

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU DOCTORAT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

YUEYING HE

STRATÉGIE DE COMMANDE UNIFIÉE DU TCSC ("THYRISTOR-
CONTROLLED SERIES CAPACITOR") POUR AMÉLIORER LA
STABILITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

JANVIER 2001

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU DOCTORAT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

YUEYING HE

STRATÉGIE DE COMMANDE UNIFIÉE DU TCSC ("THYRISTOR-
CONTROLLED SERIES CAPACITOR") POUR AMÉLIORER LA
STABILITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Membres du Jury :

Monsieur Ahmed Chériti, Président du Jury, Professeur, Université du Québec à Trois-Rivières

Monsieur Pierre Sicard, Directeur de recherche, Professeur, Université du Québec à Trois-Rivières

Monsieur Éloi Ngandui, Professeur, Université du Québec à Trois-Rivières

Monsieur Géza Joos, Professeur, Université Concordia

Monsieur Vijay K. Sood, Chercheur, Institut de Recherche d'Hydro-Québec

JANVIER 2001

© Yueying He, 2001, Tous droits réservés

DÉDICACE

À mes parents Qiuxian Li & Youguan He

À mon mari Baolin Ren

À ma fille He Ren

pour leur amour, encouragements et toutes ces années d'attente

REMERCIEMENTS

Le projet de recherche présenté dans la thèse a été effectué à la Chaire de Recherche Industrielle Hydro-Québec – CRSNG (CPEE) de l’Université du Québec à Trois-Rivières, sous la direction de Monsieur Pierre Sicard et de Monsieur Ziwen Yao.

D’abord, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur Monsieur Pierre Sicard et mon codirecteur Monsieur Ziwen Yao qui ont largement contribué à la réalisation de ce travail.

Mon directeur M. Pierre Sicard, Professeur et Directeur de Chaire de Recherche Hydro-Québec (CPEE) de l’Université du Québec, pour avoir bien voulu accepter de diriger cette thèse, pour ses précieux conseils scientifiques et pour son support financier afin que je puisse facilement finir mes études de doctorat.

Mon codirecteur M. Ziwen Yao, Professeur associé à la chaire (CPEE) de l’Université du Québec et le chercheur à SNC-Lavalin Energy Control Systems Inc. à Montréal, pour m’avoir accueilli au début de mon doctorat, pour avoir bien voulu prendre la responsabilité de codiriger ce travail et pour ses précieux conseils qui ont beaucoup aidé dans la réalisation de cet ouvrage.

J’aimerais particulièrement remercier le professeur Venkatachari Rajagopalan qui était mon directeur de 1995 à 1997, pour avoir bien voulu accepter de diriger ma thèse, pour ses précieux conseils à la réalisation de ce travail, et pour son aide financière.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Vijay K. Sood, Chercheur à l’IREQ, Monsieur Géza Joos, Professeur de l’Université Concordia, Monsieur Éloi Ngandui, Professeur de l’Université du Québec à Trois-Rivières et Monsieur Ahmed Chériti, Professeur de l’Université du Québec à Trois-Rivières, pour l’honneur qu’ils me font en participant au jury.

Je tiens également à remercier vivement les chercheurs de notre chaire, Monsieur Jianhong Xu pour ses suggestions scientifiques et pour ses constantes aides au long de la thèse, et Monsieur Abdellfattah Ba-Razzouk et Monsieur Victor Donescu pour leur temps passé à m’aider.

J’aimerais chaleureusement exprimer mes remerciements envers tous mes camarades :

Messieurs Gabriel Rakotonirina, Nicolas Léchevin, Putra Kesimpar et Hamid Maçbahî, pour leur sympathie et leur collaboration au long de mes études et de mon séjour à Trois-Rivières, et pour leur aide et encouragements spécialement pour l’amélioration de mon français.

J’aimerais aussi exprimer ma gratitude envers tous les organismes qui ont supporté mes études de doctorat. Au Ministère de l’Éducation du Gouvernement du Québec pour l’attribution de la

bourse d'excellence québécoise pour mes études de doctorat. Au Comité de l'Éducation National de Chine et à l'Université Technologique de Guangdong pour m'avoir fourni cette opportunité de me perfectionner à l'Université du Québec pour l'obtention du diplôme de Ph.D.

Finalement, j'aimerais exprimer toute ma reconnaissance à mes chers parents pour leur support moral, leurs encouragements et leur amour qui m'ont appuyée et fourni l'énergie nécessaire à continuer. J'aimerais remercier mon mari Baolin Ren et ma fille He Ren pour leur amour, leur compréhension et attente patiente pour la réunion familiale au cours de ces longues années d'études. Spécialement, j'aimerais remercier ma fille qui est ma plus grande source de réconfort. Son amour inconditionnel m'a permis de passer à travers ces jours où le travail semblait trop grand.

J'aimerais remercier toute personne qui de près ou de loin a aidé à la réalisation de ce travail.

RÉSUMÉ

Avec le développement constant des réseaux électriques interconnectés, le fonctionnement des réseaux électriques devient plus économique et plus sûr. Pourtant, ce type d'interconnexion apporte des complexités et des problèmes d'instabilité dans les réseaux électriques comme, par exemple, l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone. Ces nouveaux problèmes représentent un défi pour les recherches sur les réseaux électriques. Il est important d'étudier et développer des méthodes efficaces pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. Parmi les appareils de FACTS ("Flexible AC Transmission Systems"), un appareil en série — TCSC ("Thyristor-Controlled Series Capacitor") montre un grand potentiel pour sa capacité de commande rapide de l'impédance de la ligne de transmission d'énergie électrique et de commande de la puissance sur la ligne de transmission et pour ses caractéristiques pratiques et économiques. L'objectif principal de ce projet de recherche consiste à développer une méthode pour établir une stratégie de commande unifiée du TCSC avec objectif particulier d'amortir la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence des multi-modes de façon efficace et simultanée en plus d'assurer la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission électrique afin d'améliorer la stabilité des réseaux électriques.

Un modèle dynamique pratique du TCSC est développé pour l'étude de la caractéristique dynamique et un modèle simplifié pratique du réseau électrique avec TCSC est proposé pour la conception du régulateur de TCSC. Selon la méthode de modélisation proposée, une librairie spécialisée, appelée SIMUSTAB, est bâtie pour la simulation de la caractéristique dynamique des réseaux électriques avec TCSC sous MATLAB[®]/SIMULINK[™]. Ensuite, un mécanisme unifié pour la production de la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence est proposé en se basant sur l'analyse de l'interaction de l'amortissement durant la période dynamique d'échange de l'énergie entre le turboalternateur et le réseau de transmission. Une méthode pour l'évaluation de la stabilité et un indice de performance correspondant sont développés pour s'adapter à la conception du régulateur de TCSC avec pour objectif d'améliorer la stabilité. Ceci permet au régulateur conçu de commander l'échange de l'énergie durant le processus dynamique en ajustant l'angle d'amorçage du TCSC afin d'obtenir une interaction avec amortissement positif désiré entre l'alternateur et le réseau de transmission durant la période dynamique. Plusieurs exemples typiques d'analyse et de simulation sont donnés pour valider la

méthode proposée et la stratégie de commande unifiée proposée de TCSC en particulier pour le premier modèle de référence de IEEE (“IEEE First Benchmark Model”) et pour le deuxième modèle de référence de IEEE (“IEEE Second Benchmark Model”). Les résultats par l’analyse des valeurs propres et par simulation numérique montrent que le régulateur unifié proposé de TCSC peut amortir simultanément et efficacement la résonance hypo-synchrone et l’oscillation en basse fréquence de multi-modes dans une large plage de fréquences, en plus de maintenir la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission électrique.

Plusieurs contributions ont été apportées à l’amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant l’appareil de TCSC, spécialement la stabilité dynamique, notamment :

- un modèle dynamique du TCSC pour l’étude de la caractéristique dynamique du réseau électrique avec TCSC.
- un modèle simplifié du réseau électrique global avec TCSC adapté à la conception du régulateur de TCSC avec rétroaction locale.
- une boîte d’outils SIMUSTAB pour la simulation de la caractéristique dynamique des réseaux électriques avec des composants électroniques de puissance, ceci enrichira la librairie de logiciels pour les logiciels MATLAB®/SIMULINK™.
- un mécanisme unifié basé sur l’analyse de l’interaction de l’amortissement entre l’alternateur et le réseau de transmission de l’énergie électrique pour la production de l’oscillation en basse fréquence et de la résonance hypo-synchrone.
- une méthode d’évaluation de la stabilité dynamique adaptée pour élaborer la stratégie de commande de TCSC de façon plus efficace et plus pratique que les méthodes traditionnelles.
- une stratégie de commande unifiée du régulateur de TCSC avec la rétroaction des variables d’état locales pour amortir l’oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone de multi-modes des réseaux électriques efficacement et simultanément, en plus d’assurer la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission électrique.
- un régulateur unifié de TCSC avec comme objectif particulier d’améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xiv
LISTE DES SYMBOLES PRINCIPAUX	xv
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES FIGURES	xix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTUDE DE LA STABILITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	6
1.1 Introduction	6
1.2 Description générale de la stabilité des réseaux électriques	7
1.3 Problèmes de stabilité dynamique des réseaux électriques interconnectés	8
1.3.1 Oscillation en basse fréquence	9
1.3.2 Résonance hypo-synchrone	9
1.4 Évaluation et analyse de la stabilité dynamique	11
1.4.1 Linéarisation des réseaux électriques	11
1.4.2 Méthodes d'évaluation principales	11
1.5 Principaux outils de simulation pour l'étude de la stabilité	14
1.6 Technologie pour améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques	15
1.6.1 Régulation par PSS (“Power System Stabilizer”)	16
1.6.2 Régulation par FACTS	17
1.6.2.1 Introduction générale des FACTS	17
1.6.2.2 Appareils typiques de FACTS	17
1.6.2.3 Bénéfices possibles de la technologie de FACTS	22
1.7 Problèmes existants actuels dans l'étude de la stabilité	24

1.8	Recherches et développement de nouvelles approches pour améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques	25
1.8.1	Étude des applications de la technologie de FACTS	25
1.8.1.1	Appareils de FACTS en parallèle	26
1.8.1.2	Comparaison du degré de commande	27
1.8.1.3	Étude du TCSC	27
1.8.2	Autres études pour l'amélioration de la stabilité	29
1.9	Sujet et objectifs de recherche	30
1.10	Conclusions	31

CHAPITRE 2 MODÉLISATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE AVEC TCSC POUR L'ÉTUDE DE STABILITÉ

2.1	Introduction	32
2.2	Limitations de la modélisation des réseaux électriques pour l'étude de la performance dynamique	33
2.3	Modélisation des composants du réseau électrique branché avec un TCSC	35
2.3.1	Modèle fondamental de l'alternateur synchrone	35
2.3.2	Modélisation du système mécanique du turboalternateur	37
2.3.3	Modélisation du régulateur de l'excitation additionnelle du réseau électrique PSS	39
2.3.4	Modélisation de la ligne de transmission électrique branchée avec un transformateur idéal	40
2.3.5	Modèle du TCSC	41
2.4	Développement du modèle dynamique d'un TCSC pour l'étude de la stabilité dynamique	43
2.5	Modèle linéarisé du réseau électrique global branché avec un TCSC	46
2.5.1	Modèle électrique et mécanique unifié pour l'analyse des valeurs propres	46
2.5.2	Modèle simplifié du réseau électrique pour la conception du régulateur d'un TCSC	48
2.6	Boîte d'outils MATLAB [®] /SIMULINK TM /SIMUSTAB pour l'étude de la stabilité des réseaux électriques par simulation numérique	50

2.6.1	Méthode de modélisation	50
2.6.2	Modélisation des composants typiques dans la librairie SIMUTAB	51
2.6.2.1	Modélisation du turboalternateur et de son arbre sous SIMULINK™	51
2.6.2.2	Modélisation de la ligne de transmission d'énergie électrique sous SIMULINK™	53
2.6.2.3	Modélisation du TCSC sous SIMULINK™	53
2.7	Conclusions	56

CHAPITRE 3 ÉTUDE DE LA CARACTÉRISTIQUE D'AMORTISSEMENT DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES RELIÉE À LA STABILITÉ DYNAMIQUE

3.1	Introduction	58
3.2	Mécanisme unifié de production de SSR et de l'oscillation en basse fréquence	58
3.3	Analyse de la caractéristique d'amortissement des réseaux de transmission d'énergie électrique	59
3.4	Analyse de la caractéristique d'amortissement à l'aide du premier modèle de référence de IEEE	63
3.5	Conclusions	69

CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT D'UNE STRATÉGIE DE COMMANDE UNIFIÉE D'UN TCSC

4.1	Introduction	71
4.2	Principe de commande d'un TCSC pour améliorer la stabilité des réseaux électriques	72
4.3	Spécification de la stratégie de commande de TCSC	76
4.4	Indice de performance pour l'évaluation de la stabilité adapté à la conception du régulateur du TCSC	77
4.4.1	Mesure de performance	77
4.4.2	Analyse de performance	80
4.4.3	Développement de l'indice de performance	81

4.5	Méthode de conception du régulateur de TCSC	82
4.5.1	Choix de la méthode de conception	82
4.5.2	Développement de la conception de la commande optimale	83
4.6	Stratégie de commande de TCSC	84
4.6.1	Processus de conception du régulateur de TCSC	84
4.6.2	Considérations pour l'application pratique	87
	4.6.2.1 Conception du régulateur de TCSC avec la rétroaction des variables d'état locales	87
	4.6.2.2 Robustesse de la commande de TCSC	88
4.7	Implantation de la stratégie de commande unifiée de TCSC sur les réseaux électriques	89
4.7.1	Réseaux électriques étudiés	89
4.7.2	Conception du régulateur de TCSC pour le réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE	91
	4.7.2.1 Régulateur unifié du TCSC avec rétroaction des variables d'état locales	91
	4.7.2.2 Régulateurs du TCSC avec rétroaction des variables d'état complètes	92
	4.7.3 Conception du régulateur de TCSC à l'aide du deuxième modèle de référence de IEEE	94
4.8	Conclusions	96

CHAPITRE 5 ANALYSE DE L'EFFET DE LA COMMANDE UNIFIÉE DE TCSC PAR LA MÉTHODE DES VALEURS PROPRES

5.1	Introduction	97
5.2	Analyse des valeurs propres à l'aide des modèles de référence de IEEE	98
5.3	Comparaison des schémas de commande optimale	106
5.4	Comparaison entre la commande unifiée du TCSC proposée et la commande du TCSR (“Thyristor-Controlled Shunt Reactor”)	107
5.5	Influence de la matrice de pondération Q sur l'effet de la commande de TCSC	111
5.6	Vérification de la robustesse	116

5.7 Conclusions	122
CHAPITRE 6 ANALYSE DE L'EFFET DE LA COMMANDE UNIFIÉE DE TCSC PAR SIMULATION NUMÉRIQUE	124
6.1 Introduction	124
6.2 Modèles des réseaux électriques basés sur les modèles de référence de IEEE pour la simulation numérique	124
6.3 Analyse de l'effet de la commande unifiée de TCSC à l'aide du premier modèle de référence de IEEE	127
6.3.1 Commande unifiée du TCSC pour un réseau électrique avec amortissement très faible	127
6.3.2 Commande unifiée du TCSC pour un réseau électrique avec amortissement négatif	134
6.3.3 Analyse de la loi de commande de l'angle d'amorçage du TCSC	140
6.4 Analyse de l'effet de la commande unifiée de TCSC à l'aide du deuxième modèle de référence de IEEE	143
6.5 Comparaison des résultats de la simulation avec ceux de l'analyse des valeurs propres	148
6.5.1 Comparaison des résultats pour le réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE	149
6.5.2 Comparaison des résultats pour le réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE	151
6.6 Vérification de la robustesse par simulation numérique	152
6.7 Conclusions	156
CONCLUSIONS	158
BIBLIOGRAPHIE	163
ANNEXE A SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE SOUS MATLAB®/SIMULINK™ À L'AIDE DE LA BOÎTE D'OUTILS SIMUSTAB	168
A.1 Fonctionnement du TCSC	168

A.2 Fonctionnement du réseau électrique global branché avec un TCSC	170
A.3 Processus transitoire du réseau électrique avec la commande de l'excitation additionnelle (PSS—“Power System Stabilizer”)	176
ANNEXE B PARAMÈTRES DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET DES RÉGULATEURS ÉTUDIÉS	180
B.1 Réseaux basés sur le premier modèle de référence de IEEE [1, 20]	180
B.1.1 Données des réseaux	181
B.1.2 Conditions de fonctionnement	183
B.1.3 Paramètres de TCSC et conditions pour la conception du régulateur du TCSC	183
B.1.3.1 Régulateur du TCSC avec rétroaction des mesures locales	183
B.1.3.2 Régulateur du TCSC avec la rétroaction des variables d'état complètes	184
B.1.3.3 Comparaison entre la commande unifiée proposée de TCSC et la commande de TCSR [38]	184
B.1.3.4 Analyse des coefficients de pondération	185
B.1.3.5 Analyse de la robustesse	186
B.2 Réseaux basés sur le deuxième modèle de référence de IEEE [21]	187
B.2.1 Données de réseaux	188
B.2.2 Paramètres de TCSC et conditions de conception du régulateur de TCSC	190
B.3 Réseaux pour l'analyse du processus dynamique des réseaux électriques par simulation numérique	191
B.3.1 Réseau basé sur le modèle et les paramètres du premier modèle de référence de IEEE	192
B.3.1.1 Données du réseau	192
B.3.1.2 Conditions de fonctionnement	192
B.3.2 Réseau basé sur le modèle et les paramètres du deuxième modèle de référence de IEEE	193
B.3.2.1 Données du réseau	193
B.3.2.2 Conditions de fonctionnement	194

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AVR	Ang. : Automatic Voltage Regulator
CCHT	Courant continu à haute tension
	Ang. : High Voltage Direct Current
CSA	Compensation Série Améliorée
	Ang. : Advanced Series Compensation (ASC)
EMTP	Ang : Electromagnetic Transients Program
FACTS	Ang. : Flexible AC Transmission Systems
PSS	Ang. : Power System Stabilizer
SSR	Ang. : Sub-Synchronous Resonance
SSSC	Ang. : Static Synchronous Series Compensator
TCR	Réactance commandée par thyristor
	Ang. : Thyristor-Controlled Reactor
TCSC	Ang. : Thyristor-Controlled Series Capacitor
TCSR	Ang. : Thyristor-Controlled Shunt Reactor

LISTE DES SYMBOLES PRINCIPAUX

D_d	Coefficient d'amortissement désiré
$D_H, G_M, D_{Ba}, D_{Bb}, D_g, D_{EX}$	Coefficients d'amortissement inhérent correspondant respectivement à PH, PM, PB _a , PB _b , GEN et EX
EX	Section de masses-ressorts de l'exciteur
GEN	Section de masses-ressorts de l'alternateur
i	Courant de la ligne de transmission
i_d, i_q	Courant de TCSC (ou le courant de la ligne de transmission) dans le repère dq
i_D, i_Q et i_s	Courants des trois bobines d'amortissement de l'alternateur
i_{tcr}	Courant de branche de TCR
i_{tcr-d} et i_{tcr-q}	Courants de la branche de TCR dans le repère dq
$K_{HM}, K_{MBa}, K_{Bab}, K_{Bbg}, K_{gE}$	Rigidités des masses de torsion entre PH, PM, PB _a , PB _b , GEN et EX
$M_H, M_M, M_{Ba}, M_{Bb}, M_g, M_{EX}$	Inerties correspondant respectivement à PH, PM, PB _a , PB _b , GEN et EX
PB	Turbines à la pression basse
PB _a et PB _b	Turbines à la pression basse A et B
P_e	Puissance électromagnétique produite par GEN
PH	Turbine à la pression haute
$P_{Hm}, P_{Mm}, P_{Bam}, P_{Bbm}$	Puissances mécaniques transmises respectivement par PH, PM, PB _a et PB _b
P_m et T_m	Puissance mécanique générale d'entrée et couple mécanique général
PM	Turbine à la pression moyenne
T_e	Couple électromagnétique produit par GEN
T_H, T_M, T_{Ba}, T_{Bb}	Couples mécaniques transmis respectivement par PH, PM, PB _a et PB _b
v_g et V_g	Tension aux bornes de l'alternateur et son amplitude
v_R et E_{FD}	Variables d'état du régulateur de la tension d'alternateur

v_s et V_s	Tension aux bornes de la source infinie et son amplitude
v_{tcsc} et V_{tcsc}	Tension aux bornes du TCSC et son amplitude
v_{tcsc-d}, v_{tcsc-q}	Tensions de TCSC dans le repère dq
α	Angle d'amorçage des impulsions de TCSC
δ	Angle de puissance d'alternateur
$\delta_H, \delta_M, \delta_{Ba}, \delta_{Bb}, \delta_g, \delta_{EX}$	Angles des sections de rotation correspondant respectivement à PH, PM, PB _a , PB _b , GEN et EX
Δ	Quantité de déviation perturbée
ω	Pulsation de rotor d'alternateur synchrone
$\omega_H, \omega_M, \omega_{Ba}, \omega_{Bb}, \omega_g, \omega_{EX}$	Pulsations des sections de rotation correspondant respectivement à PH, PM, PB _a , PB _b , GEN et EX

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1 : Contributions de la commande des divers régulateurs de FACTS	23
Tableau 3-1 : Valeurs propres reliées aux modes mécaniques du turboalternateur	64
Tableau 5-1 : Valeurs propres du réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE	100
Tableau 5-2 : Valeurs propres du réseau basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE	104
Tableau 5-3 : Comparaison entre la commande optimale unifiée et la commande optimale générale	107
Tableau 5-4 : Comparaison des valeurs propres (sans commande)	110
Tableau 5-5 : Comparaison des valeurs propres (avec la commande)	111
Tableau 5-6 : Partie réelle des valeurs propres en fonction de q_1 lorsque $q_I = 0$ et $r = 2$	113
Tableau 5-7 : Partie réelle des valeurs propres en fonction de q_1 lorsque $q_I = 1$ et $r = 2$	113
Tableau 5-8 : Valeurs propres des modes mécaniques au point de fonctionnement initial 1	117
Tableau 5-9 : Partie réelle des modes 1 à 6 en fonction de la puissance mécanique P_m	117
Tableau 5-10: Partie réelle des valeurs propres en fonction de $k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$ (sans commande de TCSC)	119
Tableau 5-11 : Partie réelle des valeurs propres en fonction de $k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$	119
Tableau 6-1 : Modes d'oscillation mécanique du réseau électrique étudié dans le premier cas	149
Tableau 6-2 : Modes d'oscillation mécanique du réseau électrique étudié dans le deuxième cas	150
Tableau 6-3 : Modes d'oscillation mécanique du réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE	151
Tableau A-1 : Paramètres de fonctionnement du TCSC en p.u.	168
Tableau A-2 : Conditions de fonctionnement du réseau global en simulation	171
Tableau A-3 : Résultats des valeurs propres du réseau électrique	173

Tableau B-1 :	Paramètres de conception du régulateur du TCSC avec rétroaction des mesures locales (concernant le premier modèle de référence de IEEE)	183
Tableau B-2 :	Paramètres de conception du régulateur du TCSC avec rétroaction d'état complète (concernant le premier modèle de référence de IEEE)	184
Tableau B-3 :	Paramètres adoptés pour la comparaison avec la commande de TCSR (concernant le premier modèle de référence de IEEE)	185
Tableau B-4 :	Paramètres adoptés pour l'analyse des coefficients de pondération (concernant le premier modèle de référence de IEEE)	185
Tableau B-5 :	Paramètres adoptés pour l'évaluation de la robustesse : cas 1 — variation de P_m (concernant le premier modèle de référence de IEEE)	186
Tableau B-6 :	Paramètres adoptés pour l'évaluation de la robustesse : cas 2 — variation de $X_{L\Sigma}$ (concernant le premier modèle de référence de IEEE)	187
Tableau B-7 :	Paramètres de conception du régulateur du TCSC (concernant le deuxième modèle de référence de IEEE)	190

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1 : PSS typique	16
Figure 1-2 : TCSC	19
Figure 1-3 : Diagramme fonctionnel de commande avec un TCSC	19
Figure 1-4 : SSSC	20
Figure 1-5 : SVC	22
Figure 1-6 : STATCOM	22
Figure 1-7 : UPFC	22
Figure 2-1 : Sous-réseau d'intérêt	34
Figure 2-2 : Réseau électrique typique	35
Figure 2-3 : Modèle des six masses-ressorts de l'arbre d'un turboalternateur	37
Figure 2-4 : Système d'excitation d'alternateur avec AVR et PSS	40
Figure 2-5 : Circuit équivalent de type π de la ligne de transmission avec un transformateur	40
Figure 2-6 : Structure typique d'un TCSC	41
Figure 2-7 : Mode d'amorçage idéal d'impulsions	41
Figure 2-8 : Schéma du modèle du TCSC	42
Figure 2-9 : Régulateur linéaire de TCSC	43
Figure 2-10 : Schéma de la librairie de blocs de SIMUTAB	50
Figure 2-11 : Modèle de l'arbre du turboalternateur sous SIMULINK TM	52
Figure 2-12 : Modèle de la section de l'alternateur sous SIMULINK TM	52
Figure 2-13 : Modèle de la ligne de transmission avec un transformateur idéal sous SIMULINK TM	53
Figure 2-14 : Modèle du circuit de puissance de TCSC sous SIMULINK TM	54
Figure 2-15 : Modèle du générateur d'impulsions de TCSC sous SIMULINK TM	55
Figure 2-16 : Modèle du TCSC global sous SIMULINK TM	55
Figure 3-1 : Réseau électrique typique avec TCSC	60
Figure 3-2 : Réseau électrique représenté par le premier modèle de référence de IEEE	63

Figure 3-3:	Tracé de la partie réelle des valeurs propres reliées aux système de six masses-ressorts	64
Figure 3-4 :	Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 1 (298 rad/s)	65
Figure 3-5 :	Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 2 (203 rad/s)	65
Figure 3-6 :	Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 3 (160 rad/s)	65
Figure 3-7 :	Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 4 (127 rad/s)	65
Figure 3-8 :	Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 5 (99 rad/s)	66
Figure 3-9 :	Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 6 (9 rad/s)	66
Figure 4-1 :	Réseau électrique simplifié	74
Figure 4-2 :	TCSC typique	74
Figure 4-3 :	Puissance électrique active transmise en fonction de l'angle de puissance d'alternateur δ	74
Figure 4-4 :	Variation de k_c en fonction de l'angle d'amorçage de TCSC α	75
Figure 4-5 :	Réseau électrique décrit par le deuxième modèle de référence de IEEE	89
Figure 4-6 :	Réseau A pour l'étude de la stratégie de commande de TCSC	90
Figure 4-7 :	Réseau B pour l'étude de la stratégie de commande de TCSC	90
Figure 4-8 :	Modèle linéaire de six masses-ressorts du turboalternateur	90
Figure 4-9 :	Modèle linéaire de quatre masses-ressorts du turboalternateur	91
Figure 5-1 :	Réseau électrique A basé sur le premier modèle de référence de IEEE	98
Figure 5-2 :	Forme des oscillations de torsion des modes 1 et 4 (réseau A)	101
Figure 5-3 :	Forme des oscillations de torsion des modes 2, 3 et 5 (réseau A)	102
Figure 5-4 :	Réseau électrique B basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE	103
Figure 5-5 :	Forme des oscillations de torsion du réseau B	105
Figure 5-6 :	Réseau basé sur le premier modèle de référence de IEEE avec un TCSR	109
Figure 5-7 :	Partie réelle des modes propres intéressants qui varie avec q_1 lorsque $q_I=0$	114
Figure 5-8 :	Partie réelle des modes propres intéressants qui varie avec q_1 lorsque $q_I=1$	115
Figure 5-9 :	Partie réelle des valeurs propres en fonction de la puissance de l'alternateur P_m	118
Figure 5-10 :	Partie réelle des valeurs propres en fonction de $k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$	120
Figure 6-1:	Réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE pour simulation	125

Figure 6-2 :	Réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE pour simulation	126
Figure 6-3 :	Angle de la section d'alternateur d'arbre du turboalternateur	129
Figure 6-4 :	Déviation de la pulsation de la section d'alternateur d'arbre du turboalternateur	129
Figure 6-5 :	Composante de la déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression moyenne au mode hypo-synchrone 2 (203 rad/s)	131
Figure 6-6 :	Composante de la déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression basse A au mode hypo-synchrone 3 (160 rad/s)	132
Figure 6-7 :	Composante de la déviation de la pulsation de la section d'exciteur au mode hypo-synchrone 4 (127 rad/s)	132
Figure 6-8 :	Composante de la déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression basse B au mode hypo-synchrone 5 (99 rad/s)	133
Figure 6-9 :	Composante de la déviation de la pulsation de la section du rotor de l'alternateur au mode en basse fréquence 6 (9 rad/s)	133
Figure 6-10 :	Composante de la déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression haute au mode hypo-synchrone 1 (298 rad/s)	134
Figure 6-11 :	Déviation de la pulsation de la section d'alternateur	136
Figure 6-12 :	Angle δ_g de la section d'alternateur	136
Figure 6-13 :	Déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression haute au mode hypo-synchrone 1 (298 rad/s)	137
Figure 6-14 :	Déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression moyenne au mode hypo-synchrone 2 (203 rad/s)	138
Figure 6-15 :	Déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression basse A au mode hypo-synchrone 3 (160 rad/s)	138
Figure 6-16 :	Déviation de la pulsation de la section d'exciteur au mode 4 hypo-synchrone (127 rad/s)	139
Figure 6-17 :	Déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression basse B au mode 5 hypo-synchrone (99 rad/s)	139
Figure 6-18 :	Déviation de la pulsation de la section d'alternateur au mode 6 en basse fréquence (9 rad/s)	140

Figure 6-19 : Loi de commande de l'angle d'amorçage $\Delta\alpha$ du TCSC dans le premier exemple	141
Figure 6-20 : Loi de commande unifiée de la déviation $\Delta\alpha$ de l'angle d'amorçage du TCSC dans le deuxième exemple	142
Figure 6-21 : Relation entre le niveau de compensation k_c et l'angle d'amorçage du TCSC α ($^{\circ}$)	143
Figure 6-22 : Puissance active sur la ligne de transmission P_e	143
Figure 6-23 : Angle de la section de rotor d'alternateur	145
Figure 6-24 : Déviation de la pulsation de la section de rotor d'alternateur	145
Figure 6-25 : Composantes de déviation de la pulsation d'arbre de turboalternateur aux modes d'oscillation mécanique	147
Figure 6-26 : Composantes de déviation de la pulsation des section d'excitateur et de turbine à la pression basse respectivement aux modes 2 et 3	148
Figure 6-27 : Déviation de la pulsation de rotor de l'alternateur pour le cas 1	152
Figure 6-28 : Composantes de la déviation de la pulsation d'arbre de turboalternateur correspondant aux modes d'oscillation intéressants pour le cas 1	153
Figure 6-29 : Déviation de la pulsation de rotor de l'alternateur pour le cas 2	154
Figure 6-30 : Composants de la déviation de la pulsation d'arbre de turboalternateur correspondant aux modes d'oscillation mécanique intéressants pour le cas 2	154
Figure 6-31 : Puissance électromanétique P_e sur la ligne de transmission pour le cas 1	155
Figure 6-32 : Puissance électromanétique P_e sur la ligne de transmission pour le cas 2	155
Figure A-1 : Tension de TCSC v_{tcsc} (p.u.), courant de branche TCR i_{tcr} (p.u.) et impulsion I_{im} en fonction de l'angle d'amorçage α ($^{\circ}$)	169
Figure A-2 : Modèle du réseau électrique global avec un TCSC	170
Figure A-3 : Réponses du réseau de transmission d'énergie électrique	171
Figure A-4 : Déviations de la pulsation correspondant aux six sections de rotation de l'arbre (p.u.)	172
Figure A-5 : Angles correspondant aux six sections de rotation de l'arbre (radian)	173
Figure A-6 : Réponse fréquentielle de pulsation du turboalternateur	175
Figure A-7 : Réseau électrique typique pour l'analyse transitoire	176

Figure A-8 : Pulsation du rotor ω de l'alternateur avec un AVR après un incident (p.u.)	177
Figure A-9 : Puissance électromagnétique P_e de l'alternateur avec un AVR après un incident (p.u.)	178
Figure A-10 : Courant triphasé i_{abc} de l'alternateur et la tension triphasée E_{tabc} aux bornes de l'alternateur avec un AVR et un PSS avant un incident (p.u.)	178
Figure B-1 : Réseau électrique représenté par le premier modèle de référence de IEEE	180
Figure B-2 : Réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE	180
Figure B-3 : Fonction de transfert des turbines à vapeur	181
Figure B-4 : Régulateur de vitesse avec deux constantes de temps	181
Figure B-5 : Système d'excitation avec deux constantes de temps	182
Figure B-6 : Réseau électrique décrit par le deuxième modèle de référence de IEEE	187
Figure B-7 : Réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE	188
Figure B-8: Schéma de simulation du réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE	191
Figure B-9 : Schéma de simulation du réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE	191

INTRODUCTION

Le développement constant des réseaux électriques interconnectés permet, d'une part, au fonctionnement des réseaux électriques de devenir plus économique et plus sûr; mais d'autre part, il apporte des problèmes d'instabilité dans les réseaux électriques, en particulier les problèmes de stabilité dynamique. Le mot "dynamique" a un sens large. Il englobe non seulement l'analyse de la stabilité dynamique, mais aussi concerne les autres problèmes, comme par exemple, l'équivalence dynamique, la modélisation dynamique, l'oscillation de la torsion mécanique d'arbre d'alternateur, la commande de la stabilité, etc.. Parmi les problèmes de stabilité dynamique, l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone sont deux exemples des plus typiques oscillations.

L'oscillation en basse fréquence est causée par le manque d'amortissement du mode mécanique des réseaux électriques interconnectés. Cette oscillation se produit et se maintient pendant quelques minutes jusqu'à la séparation du réseau électrique interconnecté. Les fréquences typiques d'oscillation en basse fréquence sont généralement moins de 2 Hz. Le premier phénomène d'oscillations en basse fréquence a été observé pendant l'essai de l'interconnexion entre Northwest Power Pool et South-West Power Pool environ en 1965-1966 [1]. Les fréquences d'oscillation dans ces réseaux interconnectés sont environ 0.05Hz~2Hz.

La résonance hypo-synchrone se produit entre le turboalternateur et la ligne de transmission avec la compensation en série. Lorsque la compensation des condensateurs en série est à un certain niveau, une résonance entre l'alternateur, le transformateur, la ligne de transmission et les condensateurs peut être développée, généralement en fréquence hypo-synchrone [1-3]. Elle peut également se produire entre des turboalternateurs et les liaisons de transport à courant continu en haute tension. La résonance hypo-synchrone peut causer des dommages sérieux à l'arbre de turboalternateur. Les deux premiers exemples de dommages sérieux à l'arbre du turboalternateur se sont produits à la station Mohave en 1970 et en 1971 [1].

Ces problèmes nuisent au fonctionnement des réseaux électriques d'aujourd'hui. Donc, il est important d'étudier et développer des méthodes efficaces avancées pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. Heureusement, le développement rapide de la technologie en électronique de puissance permet de concevoir des appareils d'électronique de puissance de grande puissance

pour l'utilisation des réseaux de transmission d'énergie électrique. Ce type d'appareils est connu comme FACTS [4-8] ("Flexible AC Transmission Systems"). Ces systèmes flexibles montrent un grand potentiel pour améliorer la capacité de transmission et la caractéristique dynamique des réseaux électriques grâce à leur capacité de commande flexible et rapide. Un appareil en série --- TCSC ("Thyristor-Controlled Series Capacitor") est un appareil important de FACTS. Il a été introduit dans les lignes de transmission d'énergie électrique principalement pour commander la répartition de la puissance en régime permanent [4-15]. Une fonction importante du TCSC est la régulation de l'impédance des lignes qui permet à l'impédance des lignes de transmission de pouvoir être rapidement altérée. Le TCSC a donc un grand potentiel pour amortir les oscillations des réseaux d'énergie électrique pour améliorer la stabilité. L'utilisation du TCSC dans le réseau électrique peut amortir l'oscillation en basse fréquence et éviter les désavantages des compensateurs en série conventionnels qui peuvent causer des résonances hypo-synchrones [8,11-18]. Par conséquent, l'exploitation du potentiel des appareils de FACTS est actuellement un sujet attrayant dans la recherche de stabilité des réseaux électriques [4-8,15-19].

Notre intérêt de recherche vise à résoudre ces problèmes pour améliorer la stabilité des réseaux électriques en appliquant la technique de FACTS dans les réseaux électriques. L'objectif principal de recherche est de développer les méthodes nouvelles pour l'étude de la stabilité et pour l'établissement d'une stratégie de commande d'un TCSC afin d'obtenir un régulateur unifié optimal de TCSC avec objectif spécifique d'améliorer la stabilité des réseaux électriques. Nous allons principalement viser les problèmes d'oscillation en basse fréquence et de résonance hypo-synchrone. Nous choisissons de limiter l'étude au TCSC pour sa capacité de commande rapide de l'impédance et de la puissance de la ligne de transmission d'énergie électrique et pour ses caractéristiques pratiques et économiques. Pour atteindre cet objectif, plusieurs recherches sont nécessaires. L'objectif général peut se décomposer en des objectifs spécifiques suivants :

- Développer un modèle pratique des réseaux électriques avec TCSC pour la conception du régulateur de TCSC et pour l'analyse de la stabilité des réseaux électriques.
- Développer un critère pour l'évaluation de la stabilité dynamique, qui est adapté pour élaborer une stratégie de commande de TCSC, de façon plus efficace et plus simple que les méthodes traditionnelles.
- Selon le critère de stabilité souhaité, développer une stratégie de commande optimale unifiée avec signaux locaux d'entrée de la commande pour amortir la résonance hypo-synchrone et

l'oscillation en basse fréquence des réseaux électriques de multi-modes de façon simultanée et efficace.

- Développer un régulateur unifié robuste du TCSC avec objectif particulier d'améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques.

Par conséquent, les travaux de recherche incluent principalement l'étude de la méthode d'évaluation de la stabilité pour s'adapter à la conception du régulateur de TCSC de façon efficace et simple, le choix des signaux d'entrée de la commande et la conception du régulateur avec objectif particulier de prévenir la résonance hypo-synchrone et d'amortir l'oscillation en basse fréquence efficacement et simultanément. L'efficacité, l'uniformité, la localisation et la robustesse sont soulignées dans la conception du régulateur de TCSC et l'universalité de la méthode de conception est aussi considérée afin que la méthode proposée puisse aussi facilement être développée pour la conception de régulateurs pour les autres appareils FACTS. En se basant sur l'étude de la modélisation, un modèle simplifié linéarisé du réseau électrique est proposé pour la conception du régulateur de TCSC et un modèle dynamique de TCSC est développé pour l'analyse de la caractéristique de TCSC et de la stabilité du réseau électrique avec TCSC. Deux méthodes d'analyse, soit les valeurs propres et par simulation numérique, sont adoptées pour analyser la stabilité des réseaux électriques et pour valider la méthode d'évaluation de la stabilité proposée et l'effet de la commande du régulateur proposé de TCSC sur la stabilité des réseaux électriques.

À la fin de ce projet de recherche, nous allons apporter plusieurs contributions à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques en utilisant l'appareil de TCSC, spécialement la stabilité dynamique. Elles sont décrites comme suit :

- un modèle dynamique du TCSC pour l'étude de la caractéristique dynamique du réseau électrique avec TCSC.
- un modèle simplifié du réseau électrique global avec TCSC adapté à la conception du régulateur de TCSC avec rétroaction locale.
- un programme pour la conception du régulateur de TCSC et pour l'analyse de la stabilité du réseau électrique sous MATLAB®.
- une boîte d'outils SIMUSTAB pour la simulation de la caractéristique dynamique des réseaux électriques avec des composants électroniques de puissance, ceci enrichira la bibliothèque de logiciels pour les logiciels MATLAB®/SIMULINK™.

- un mécanisme unifié basé sur l'analyse de l'interaction de l'amortissement entre l'alternateur et le réseau de transmission de l'énergie électrique pour la production de l'oscillation en basse fréquence et de la résonance hypo-synchrone.
- une méthode d'évaluation de la stabilité dynamique adaptée pour élaborer la stratégie de commande de TCSC de façon plus efficace et plus pratique que les méthodes traditionnelles comme, par exemple, les méthodes basées sur l'analyse des valeurs propres.
- une stratégie de commande unifiée du régulateur de TCSC avec la rétroaction des variables d'état locales pour amortir l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone de multi-modes des réseaux électriques efficacement et simultanément en plus d'assurer la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission électrique.
- un régulateur unifié de TCSC avec comme objectif particulier d'améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques.

Cette thèse est composée de six chapitres et elle est organisée comme suit.

Au chapitre 1, une description générale des problèmes de stabilité des réseaux électriques reliés principalement à l'oscillation en basse fréquence et à la résonance hypo-synchrone est fournie et une revue de méthodes reliées à l'évaluation et à l'analyse de la stabilité dynamique et d'approches reliées à l'amélioration de la stabilité dynamique incluant PSS (“Power System Stabilizer”) et FACTS est effectuée. Également, l'étude bibliographique reliée aux problèmes actuels dans l'étude de la stabilité et à l'état de recherche actuel sur l'amélioration de la stabilité dynamique en utilisant les appareils de FACTS, en particulier les TCSC, est effectuée. Finalement, le sujet de thèse est défini en détails.

Le chapitre 2 présente principalement le développement des modèles mathématiques des composants des réseaux électriques adaptés à l'étude de la stabilité dynamique, à l'implantation de ces modèles sous MATLAB®/SIMULINK™ et à la validation des modèles par simulation numérique. Un modèle du réseau électrique simplifié pratique et un modèle dynamique pratique du TCSC sont respectivement développés pour la conception du régulateur de TCSC et l'analyse de la stabilité dynamique avec de petites perturbations. En se basant sur la méthode de modélisation proposée, une boîte d'outils de modélisation SIMUSTAB est élaborée pour enrichir la librairie SIMULINK™ afin de profiter des avantages des logiciels MATLAB®/SIMULINK™ pour analyser la stabilité dynamique des réseaux électriques par simulation numérique.

Au chapitre 3, un mécanisme uniifié de production de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence est proposé sous l'angle de l'interaction de l'amortissement entre le réseau de transmission d'énergie électrique et le turboalternateur, et la caractéristique d'amortissement des réseaux de transmission électrique est analysée.

Le chapitre 4 se concentre sur l'étude et le développement de la stratégie de commande d'un TCSC avec objectif particulier d'améliorer la stabilité des réseaux électriques sans modifier la répartition désirée de la puissance sur la ligne de transmission. L'efficacité, l'uniformité et la localisation d'entrée de commande sont soulignées dans la considération de la stratégie de commande du TCSC. Ce chapitre propose principalement un indice de performance pour l'évaluation de la stabilité qui s'adapte à la conception du régulateur de TCSC, et développe une méthode de conception de la commande de TCSC. Le processus de l'établissement de la stratégie de commande unifiée d'un TCSC et son implantation sur les réseaux électriques basés sur les modèles de référence de IEEE [20-21] sont présentés en détails.

Le chapitre 5 vise l'analyse et la validation de l'effet de la commande unifiée du TCSC sur la stabilité des réseaux électriques par la méthode d'analyse des valeurs propres à l'aide d'un modèle mathématique détaillé. Également, l'étude du coefficient de pondération de la fonction d'objectif pour la conception du régulateur de TCSC et la validation de la robustesse du régulateur unifié de TCSC proposé sont effectuées par l'analyse des valeurs propres en permettant aux paramètres du réseau électrique de varier dans une plage de fonctionnement possible.

Le chapitre 6 met l'accent sur l'analyse et la validation de l'effet unifié de la commande proposée de TCSC sur l'amortissement simultané et efficace de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence de multi-modes par simulation numérique dans l'environnement MATLAB[®]/SIMULINK[™] avec un modèle du réseau électrique non linéaire détaillé. À l'aide des deux réseaux électriques basés sur les modèles de référence de IEEE, les résultats de la simulation numérique du processus transitoire pour trois exemples typiques de fonctionnement des réseaux électriques sont présentés en état de stabilisation critique, en état instable et en état faiblement stable, pour valider davantage l'effet de la commande unifiée proposée du TCSC. Le balayage des fréquences est adopté pour l'analyse de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence de multi-modes par simulation numérique.

CHAPITRE 1

ÉTUDE DE LA STABILITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

1.1 Introduction

La stabilité est une propriété importante des réseaux électriques. Cependant, avec l'augmentation continue de la complexité et des dimensions des réseaux électriques modernes, les problèmes de stabilité deviennent de plus en plus difficiles à régler. L'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone sont deux exemples typiques d'instabilité dynamique. Ces problèmes représentent un défi pour les chercheurs de réseaux électriques. L'apparition de la technologie de FACTS (“Flexible AC Transmission Systems”) offre une possibilité d'améliorer la performance dynamique des réseaux électriques. Donc, il y a un intérêt important d'exploiter davantage le potentiel des appareils de FACTS pour améliorer la stabilité des réseaux électriques.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord fournir une description générale des problèmes de stabilité des réseaux électriques, principalement les problèmes de stabilité dynamique comme l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone, et les méthodes pour régler les problèmes. Ensuite, nous allons donner une revue de méthodes pour l'évaluation et l'analyse de la stabilité dynamique incluant principalement l'analyse des valeurs propres, la méthode directe de Lyapunov, le balayage de fréquence et l'analyse par simulation. De plus, nous allons donner une présentation brève des principaux outils de simulation pour l'étude de la stabilité. Spécialement, nous allons mettre l'accent sur la présentation des approches pour améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques, ce qui comprend principalement les PSS (“Power System Stabilizer”) et les principaux appareils de FACTS et la commande des divers appareils de FACTS pour améliorer le fonctionnement des réseaux électriques. Également, nous allons présenter une étude bibliographique reliée aux problèmes actuels dans l'étude de la stabilité et l'état de la recherche sur l'amélioration de la stabilité dynamique en utilisant les appareils de FACTS, en particulier pour un appareil pratique et économique de FACTS en série, le TCSC (“Thyristors-Controlled Series Capacitor”). Finalement, nous allons présenter le sujet et les objectifs de cette thèse.

1.2 Description générale de la stabilité des réseaux électriques

La stabilité des réseaux électriques est généralement définie comme leur propriété de maintenir un état de fonctionnement d'équilibre dans les conditions de fonctionnement normales ou de rétablir un état d'équilibre acceptable. Traditionnellement, le problème de stabilité des réseaux électriques est celui de maintenir le fonctionnement synchrone. Comme les réseaux électriques dépendent des alternateurs synchrones pour la génération d'énergie électrique, une condition nécessaire de fonctionnement est que tous les alternateurs synchrones maintiennent le synchronisme. Ce type de stabilité est influencé par la dynamique de l'angle du rotor de l'alternateur et par les relations de puissance-angle. Cependant, l'instabilité peut aussi se produire sans la perte du synchronisme. Ce type d'instabilité est typiquement représenté comme l'écroulement de la tension de charge. Ce cas concerne la stabilité de la tension et la commande de la tension. Parmi les problèmes de stabilité des réseaux électriques, le problème de stabilité des rotors des alternateurs synchrones, i.e. celui de maintenir le fonctionnement synchrone, est le plus important.

La stabilité du fonctionnement synchrone des réseaux électriques est principalement définie en trois différents types [1-2, 22] : la stabilité statique, la stabilité dynamique et la stabilité transitoire. En général, le problème de stabilité transitoire est causé par de grandes perturbations dans le réseau électrique, le problème de stabilité statique est causé par des perturbations relativement petites et lentes et le problème de stabilité dynamique est causé par des perturbations relativement petites et brutales. La stabilité statique est une condition préalable essentielle de fonctionnement des réseaux électriques. Pour l'étude des problèmes de stabilité avec une petite perturbation, on peut décrire les réseaux électriques à l'aide d'équations différentielles linéarisées, mais pour l'étude de la stabilité transitoire, on doit utiliser des équations différentielles non linéaires.

Avant l'apparition des réseaux électriques interconnectés, les réseaux électriques étaient relativement simples et leur conception n'avait besoin que d'information locale. De plus, il était considéré que les réseaux de transmission d'énergie électrique ne pourraient pas être commandés assez rapidement pour manipuler leur dynamique. Ainsi, les problèmes dynamiques des réseaux électriques ont été généralement résolus par le sur-dimensionnement, c.-à-d., les réseaux de transmission ont été conçus avec de larges marges de stabilité pour rétablir l'état de

fonctionnement stable après avoir subi des événements imprévus causés par des incidents, des interruptions de fonctionnement des lignes et des alternateurs, et des pannes d'équipements. Par conséquent, ceci entraîne la sous-utilisation des réseaux de transmission d'énergie électrique. Les demandes pour la sécurité et l'économie des réseaux électriques deviennent de plus en plus exigeantes, ce qui rend l'interconnexion des réseaux électriques très importante et nécessaire pour permettre la génération et la transmission de la puissance électrique d'une façon plus économique et plus sûre. De plus, la transfert de grandes quantités d'énergie électrique sur de grandes distances amène les équipements des lignes de transmission à fonctionner très proche de leur limite de fonctionnement sécuritaire durant les heures de pointe de charge. Ainsi, la compensation des condensateurs fixes est utilisée pour accroître la capacité des lignes de transmission électrique. Cependant, ces modes de compensation apportent d'autres problèmes d'instabilité dans les réseaux électriques interconnectés comme, par exemple, l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone [1-3, 22]. À cause des problèmes de stabilité, le potentiel de transmission d'interconnexion des réseaux électriques ne peut pas être exploité, donc la capacité de transmission de la puissance sur les lignes de transmission électrique est encore limitée. Par conséquent, il importe d'étudier et de développer davantage des approches nouvelles pour améliorer la stabilité des réseaux électriques.

1.3 Problèmes de stabilité dynamique des réseaux électriques interconnectés

Parmi les problèmes de stabilité dynamique, les deux problèmes les plus exigeants dans les réseaux électriques interconnectés sont l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone. Ils se produisent généralement dans les réseaux électriques avec la transmission de puissance relativement élevée par les lignes de transmission sur une grande distance ou par les lignes de transmission compensées par condensateur en série. Ils se présentent généralement avec des oscillations de multi-modes [1-4, 23]. L'instabilité dynamique nuit au fonctionnement des réseaux électriques et à la transmission de la puissance désirée.

1.3.1 Oscillation en basse fréquence

L'oscillation en basse fréquence est causée par la dynamique de transmission de puissance entre les alternateurs et les réseaux de transmission d'énergie électrique et par le manque d'amortissement du mode mécanique de réseaux électriques interconnectés. Cette oscillation se produit quand la puissance transférée est relativement élevée par rapport à la capacité de transmission des lignes électriques et se maintient pendant quelques minutes jusqu'à la séparation du réseau électrique interconnecté [1-2, 22]. Elle peut être classée en deux types de problèmes : les problèmes locaux et les problèmes globaux [2].

Les problèmes locaux sont reliés à une petite partie du réseau électrique comme, par exemple, les oscillations entre le mono-alternateur et la source infinie, et entre les alternateurs mutuellement proches. Ils s'appellent les oscillations du mode local. Les problèmes globaux sont reliés aux oscillations entre un groupe d'alternateurs dans une région et un autre groupe d'alternateurs dans une autre région. Ils s'appellent les oscillations du mode d'inter-région. Dans le premier cas, les fréquences d'oscillation se trouvent généralement dans une plage de fréquences de 0.7 Hz à 2.0 Hz. Dans le deuxième cas, les fréquences d'oscillation sont plus basses que celles du premier cas et les fréquences d'oscillation sont dans une plage de fréquences de 0.1 Hz à 0.7 Hz. Les fréquences typiques d'oscillation en basse fréquence sont généralement de moins de 2 Hz [2]. Généralement, toutes les oscillations à des fréquences inférieures à 10 Hz ressortent de l'oscillation en basse fréquence.

1.3.2 Résonance hypo-synchrone (SSR : “Sub-Synchronous Resonance”)

Le condensateur en série peut bien compenser la réactance de la ligne de transmission afin d'améliorer sa capacité de transmission de la puissance. Pourtant, ceci apporte un autre problème typique de stabilité dynamique qui s'appelle la résonance hypo-synchrone (SSR : “Sub-Synchronous Resonance”). La résonance hypo-synchrone est généralement définie [3] comme suit : une condition où le réseau électrique échange l'énergie avec un turboalternateur à une ou plusieurs fréquences naturelles du réseau électrique à des fréquences inférieures à la fréquence synchrone du réseau électrique [1-3]. Généralement, lorsque le niveau de compensation des condensateurs en série est augmenté, une résonance entre l'alternateur, le transformateur, la ligne

de transmission et les condensateurs peut être développée, généralement en fréquence hypo-synchrone. Elle peut également se produire entre le turboalternateur et les liaisons de transport à courant continu en haute tension, ce qui peut causer des dommages sérieux à l'arbre des turboalternateurs.

Généralement, la résonance hypo-synchrone est classée en trois types [3]:

- Effet de l'alternateur d'induction

Il est causé par une auto-excitation du réseau électrique. Une résistance négative se présente dans le réseau électrique global aux fréquences naturelles du réseau, donc le courant hypo-synchrone se produit dans la bobine du rotor de l'alternateur. Il est considéré comme un problème causé par une petite perturbation, donc le modèle linéarisé peut être utilisé pour l'analyse de ce type de problème.

- Effet de l'interaction du couple

Quand le couple hypo-synchrone induit dans l'alternateur est proche d'un des modes naturels du couple, l'interaction du couple se produit. Si ce couple est égal à ou est plus grand que le couple d'amortissement inhérent mécanique, le réseau deviendra auto-excité. Il est aussi considéré comme un problème causé par une petite perturbation, donc le modèle linéarisé peut être utilisé pour l'analyse de ce type de problème.

- Couple transitoire

Il est causé par une grande perturbation. Durant le processus transitoire, les composants hypo-synchrones de courant sur une ligne de transmission d'énergie électrique peuvent avoir une grande amplitude. Ceci peut aussi résulter de la résonance hypo-synchrone entre le turboalternateur et le réseau électrique de transmission électrique. Pour l'analyse du couple transitoire, les équations différentielles non linéaires des réseaux électriques doivent être considérées, ce qui ne fait pas partie de notre étude.

La référence [24] présente en détail la définition des oscillations de torsion d'un turboalternateur reliées à la résonance hypo-synchrone.

1.4 Évaluation et analyse de la stabilité dynamique

1.4.1 Linéarisation des réseaux électriques

La méthode de linéarisation du réseau électrique est adaptée pour analyser les problèmes de stabilité avec une petite perturbation. Considérons un réseau électrique formulé comme $\dot{X} = f(X, U)$ avec le vecteur de variables d'état initial $X_0 \in \mathbb{R}^n$ correspondant à un point d'équilibre et le vecteur d'entrées correspondantes $U_0 \in \mathbb{R}^r$. Supposant avoir une petite perturbation et que $f(X, U)$ est continue, dérivable et avec dérivées continues en X et en U , l'équation de petite perturbation du réseau électrique s'écrit comme suit :

$$\dot{X}_0 + \Delta \dot{X} = f(X_0 + \Delta X, U_0 + \Delta U) \quad (1-1)$$

Par la linéarisation de l'équation, on peut obtenir la forme linéarisée :

$$\dot{\Delta X}_i = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \right|_{(X_0, U_0)} \Delta x_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right|_{(X_0, U_0)} \Delta x_n + \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \right|_{(X_0, U_0)} \Delta u_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \right|_{(X_0, U_0)} \Delta u_r \quad (1-2)$$

où ΔX et ΔU représentent respectivement le vecteur de variation des variables d'état et le vecteur de variation des entrées, et Δx_i , Δu_i et f_i représentent respectivement la $i^{\text{ème}}$ valeur de variation des variables d'état, le $i^{\text{ème}}$ valeur de variation des entrées et la $i^{\text{ème}}$ fonction non linéaire du réseau électrique.

Donc, l'équation d'état linéarisée du réseau électrique peut être obtenue comme suit :

$$\dot{\Delta X} = A \Delta X + B \Delta U \quad (1-3)$$

$$\text{où } A = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{(X_0, U_0)} \text{ et } B = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{(X_0, U_0)}$$

1.4.2 Méthodes d'évaluation principales

Il y a plusieurs méthodes pour l'analyse et l'évaluation de la stabilité dynamique. Les méthodes les plus générales sont brièvement décrites ci-dessous.

■ Analyse des valeurs propres [2]

Traditionnellement, pour évaluer et analyser la stabilité cette méthode comprend deux types [2] :

- calculer directement les valeurs propres des équations du système qui représentent le réseau électrique.

C'est une méthode directe d'analyse des valeurs propres.

- déterminer la plage des paramètres du réseau électrique en s'assurant que la partie réelle des valeurs propres est négative. Ceci comprend le critère de stabilité de Routh-Hurwitz et le critère de stabilité de Nyquist.

En fait, c'est une méthode indirecte d'analyse des valeurs propres.

Par identification de la caractéristique des valeurs propres, la stabilité des réseaux électriques peut être évaluée.

Pour le premier type, l'analyse de la stabilité est effectuée avec le réseau électrique et les alternateur modélisés en un réseau linéaire d'équations différentielles. Les résultats du calcul pour les valeurs propres donnent les fréquences d'oscillation, l'amortissement à chaque fréquence, les valeurs propres correspondantes et le vecteur propre correspondant à chaque valeur propre.

Supposons qu'un réseau peut être décrit par des équations d'état sous la forme suivante:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U} \quad (1-4)$$

où \mathbf{X} est le vecteur de variables d'état et \mathbf{U} est le vecteur de variables de commande. On peut obtenir les valeurs propres λ du réseau par l'équation $|\mathbf{A}-\lambda\mathbf{I}| = 0$ où \mathbf{I} représente une matrice identité. La condition de stabilité du système est que la partie réelle de toutes les valeurs propres doit être négative.

Pour le deuxième type, il n'est pas demandé de résoudre les valeurs propres, mais il faut aussi donner les équations différentielles linéaires du réseau électrique. Généralement, ce type de méthode est utilisé comme le critère de stabilité. Selon le critère de stabilité, la stabilité des réseaux électriques peut être identifiée.

La méthode d'analyse des valeurs propres est attrayante parce qu'elle donne les fréquences et l'amortissement de chaque fréquence pour le réseau entier, et le vecteur caractéristique à chaque valeur propre par un calcul simple. Cependant, cette méthode est seulement utile pour le problème linéaire. De plus, à cause de nombreux calculs complexes concernés pour l'analyse des

valeurs propres, ce type d'analyse est limité aux réseaux relativement petits. Des travaux récents ont été faits pour un grand réseau électrique.

■ Méthode directe de Lyapunov [25]

La méthode directe de Lyapunov est décrite comme suit:

Supposons l'équation d'état de système est $\dot{x} = f(x)$ où $f(x(0))=0$.

Si une fonction scalaire positive $v(x)$, dont les dérivées partielles continues existent, satisfait les conditions suivantes :

- $v(0) = 0$
- $v(x)$ est positive;
- $\dot{v}(x)$ est négative;
- $g(\|x\|) \leq v(x)$;
- lorsque $\|x\| \rightarrow \infty$, $v(x, t) \rightarrow \infty$,

où $\|x\|$ représente la norme de x et g représente une fonction positive monotone, l'origine de ce système est un état d'équilibre globalement stable. La fonction $v(x)$ s'appelle la fonction de Lyapunov.

La méthode directe de Lyapunov peut être utilisée pour l'étude des problèmes de la stabilité des réseaux électriques non linéaires, comme par exemple, la stabilité transitoire quand le réseau électrique subit une perturbation relativement grande. Dans ce cas, le réseau électrique ne peut pas être décrit par des équations différentielles linéaires.

La méthode directe indique que pour le système étudié, si la fonction de Lyapunov peut être trouvée, le système est stable. Cependant, pour un réseau électrique grand et complexe, il peut être une tâche très difficile de trouver une fonction de Lyapunov.

■ Balayage de fréquence

La méthode de balayage de fréquence a été principalement utilisée pour l'étude du problème de la résonance hypo-synchrone [2-3, 26]. Elle est très efficace dans l'étude de l'effet de l'alternateur d'induction. Cette méthode se base sur le calcul de fonctions fréquentielles de la résistance et de l'inductance équivalentes vues du point derrière la bobine de stator pour un alternateur particulier dans le réseau. Si l'inductance est zéro et la résistance est négative à une certaine

fréquence, l'oscillation à cette fréquence peut être prédictée à cause de l'effet de l'alternateur d'induction. La méthode est simple et facile d'utilisation.

Cependant, cette méthode est limitée à l'impédance vue à un point particulier aux bornes d'un alternateur particulier dans le réseau, tel que pour des conditions différentes du réseau, le processus doit être répété.

■ Analyse par simulation

C'est une méthode d'analyse dans le domaine de temps. Les oscillations dans le réseau électrique peuvent être directement observées, ce qui fournit de l'information plus exacte sur l'amplitude des oscillations et leur amortissement que les autres méthodes. Par exemple, le logiciel EMTP ("ElectroMagnetic Transients Program") est généralement utilisé pour l'intégration des équations différentielles des réseaux électriques afin d'en analyser la stabilité par simulation. Avec EMTP, les réseaux électriques complexes peuvent être précisément modélisés. De plus, le programme EMTP permet la modélisation non linéaire pour les composants des réseaux électriques complexes. Cependant, cette méthode demande un grand nombre de travaux de modélisation, de l'information et des données du réseau électrique étudié. En outre, à cause des problèmes numériques, elle n'est pas très efficace pour la résolution des problèmes de stabilité avec une petite perturbation.

1.5 Principaux outils de simulation pour l'étude de la stabilité

L'analyse de la stabilité des réseaux électriques dépend presque complètement des simulations de leur caractéristique dynamique. Pour l'analyse des problèmes de stabilité des réseaux électriques, plusieurs logiciels ont été développés, comme par exemple, les logiciels EMTP ("Electromagnetic Transients Program"), EMTDC ("Electromagnetic Transients Simulation Program"), EUROSTAG, etc.. Parmi ces logiciels, EMTP et EMTDC sont les plus utilisés spécialement pour l'étude de la caractéristique dynamique des réseaux électriques. Le logiciel EMTP [27] est actuellement considéré comme un standard pour la simulation du processus transitoire des réseaux électriques. En plus des avantages de son économie et de l'espace de mémoire, le logiciel EMTP permet d'utiliser des modèles complexes et précis pour les composants des réseaux électriques. Avec les développements de la technologie en électronique

de puissance, les équipements électroniques de puissance, comme par exemple le système de transmission CCHT, le compensateur de var statique et les appareils de FACTS, exigent la simulation de la caractéristique dynamique avec les compensateurs en fonction dans le réseau électrique. Cependant, pour cet objectif, le logiciel EMTP peut avoir des problèmes de calcul numérique dans les simulations de ces composants électroniques de puissance.

Le logiciel EMTDC [28], commercialisé après EMTP, permet aussi le calcul du processus transitoire des réseaux électriques. Il peut considérer la simulation des composants élémentaires d'électronique de puissance et il a une meilleure interface usager que le logiciel EMTP.

MATLAB[®] est un autre programme qui vise à effectuer des calculs numériques en science et en ingénierie. SIMULINKTM [29] est un produit connexe à MATLAB adapté à l'entrée graphique et la simulation des systèmes dynamiques non linéaires. MATLAB, SIMULINK et leurs boîtes d'outils, forment un environnement complet pour la conception, la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques. Depuis quelques années, la simulation du processus dynamique des réseaux électriques dans l'environnement de MATLAB[®]/SIMULINKTM a été un sujet de plusieurs études pour tirer avantage des facilités des logiciels MATLAB[®]/SIMULINKTM. POWER SYSTEM BLOCKSET [30] est leurs boîtes d'outils pratique élaborée dans l'environnement de MATLAB[®]/SIMULINKTM pour la simulation des réseaux électriques, mais elle ne peut pas être directement utilisée pour la simulation et l'étude des problèmes de stabilité dynamique comme le problème de la résonance hypo-synchrone. SIMUPELS [31], un outil antérieur à POWER SYSTEM BLOCKSET comprend une librairie d'interrupteurs et convertisseurs de puissance et de composants comme des moteurs, éléments passifs et filtres. Il ne possède cependant pas les modules nécessaires à la simulation des réseaux électriques.

1.6 Technologie pour améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques

Pour la régulation de l'excitation additionnelle du réseau électrique, la régulation par PSS (“Power System Stabilizer”) et la régulation par FACTS (“Flexible AC Transmission Systems”) sont reconnues comme les deux méthodes les plus importantes étudiées pour améliorer la stabilité des réseaux électriques grâce à leurs bons effets en commande [1-2, 4, 8, 22, 32-33].

1.6.1 Régulation par PSS (“Power System Stabilizer”)

La régulation par le stabilisateur de réseau électrique (PSS : “Power System Stabilizer”) a été beaucoup adoptée pour amortir l’oscillation des réseaux électriques en basse fréquence [1-2, 22, 34]. L’idée de la régulation par PSS est d’introduire un amortissement additionnel à l’oscillation du rotor de l’alternateur en commandant le système d’excitation afin d’améliorer la caractéristique d’amortissement des réseaux électriques et d’amortir l’oscillation en basse fréquence. Donc, pour fournir l’amortissement additionnel, le PSS doit produire un composant de couple électromagnétique en phase avec la déviation de la vitesse de rotor de l’alternateur. L’idée théorique pour un PSS peut être montrée à l’aide du schéma fonctionnel de la figure 1-1.

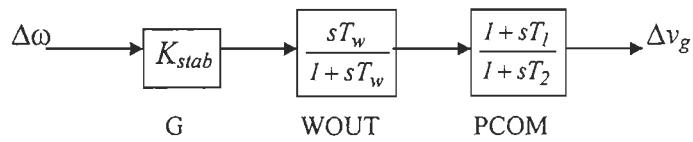


Figure 1-1 : PSS typique

Le bloc “G” représente la quantité d’amortissement introduit par le PSS et est déterminé par la constante K_{stab} . Le bloc “WOUT” représente un filtre passe-haut qui permet aux signaux reliés aux oscillations du réseau électrique de passer facilement. Le bloc “PCOM” représente une compensation d’avance de phase pour le retard de la phase entre l’entrée de l’exciteur et le couple électromagnétique de l’alternateur. Idéalement, la quantité d’amortissement de l’alternateur K_{stab} doit être mise à une valeur correspondant à l’amortissement désiré maximal. Pourtant, elle est souvent limitée par d’autres considérations. Par conséquent, la commande de l’excitation additionnelle peut être limitée aux conditions de fonctionnement de l’alternateur.

1.6.2 Régulation par FACTS

1.6.2.1 Introduction générale des FACTS

Le développement rapide de la technologie en électronique de puissance permet de concevoir des appareils d'électronique de puissance de grande puissance pour l'utilisation des réseaux de transmission d'énergie électrique à grande distance. Ce type d'appareils est connu comme FACTS ("Flexible AC Transmission Systems") [4-8]. La régulation par FACTS est une idée relativement nouvelle. Les paramètres du réseau électrique comme, par exemple, la tension, le courant, les impédances et la puissance, peuvent être ajustés en commandant l'angle d'amorçage des commutateurs dans les appareils de FACTS. La méthode par régulation des FACTS représente une combinaison efficace des connaissances de la commande automatique, de l'électronique et des réseaux électriques, donc elle est actuellement reconnue pour avoir une très grande perspective pour améliorer le fonctionnement et la stabilité des réseaux électriques.

Pour la transmission de l'énergie électrique, un des effets les plus intéressants de la technologie de FACTS est d'ouvrir une opportunité nouvelle pour commander la puissance et pour accroître la capacité de transmission de la puissance sur les lignes existantes de transmission électrique. Grâce à la capacité des régulateurs de FACTS sur la commande des paramètres d'interrelation qui gouvernent le fonctionnement des réseaux de transmission électrique incluant l'impédance en série, l'impédance en parallèle, le courant, la tension, le déphasage et l'amortissement de l'oscillation aux fréquences diverses sous la fréquence synchrone, les régulateurs de FACTS permettent à la ligne de transmettre une puissance qui s'approche de sa limite thermique et permettent aux commutateurs mécaniques dans le réseau électrique de pouvoir être suppléés par électronique de puissance avec réponse rapide, en ajoutant ainsi de la flexibilité dans le réseau électrique.

1.6.2.2 Appareils typiques de FACTS

En général, les appareils de FACTS peuvent être classés en quatre types: parallèle, série, pour régulation du déphasage et pour régulation de CCHT (Courant continu à haute tension) [4]. Les appareils de FACTS en parallèle comprennent typiquement les SVC ("Static Var Compensator")

et les STATCOM (“STATic COMpensator”). Les appareils de FACTS en série comprennent typiquement les TCSC et les UPFC (“Unified Power Flow Controller”). Les appareils de FACTS de type de régulation du déphasage comprennent typiquement les déphasateurs et les amortisseurs de résonance. Les appareils de FACTS de type de régulation de CCHT comprennent typiquement les convertisseurs à thyristors et les convertisseurs à commutation forcée. La définition des régulateurs de FACTS et la description des divers régulateurs de FACTS sont données dans les références [4-8]. Dans cette section, nous allons présenter brièvement quatre appareils typiques de FACTS.

■ Appareils de FACTS en série

La compensation série des lignes de transmission est un élément fondamental de la technologie de FACTS. Elle peut être appliquée pour obtenir l'utilisation complète des ressources de transmission en commandant les écoulements de puissance sur les lignes. En outre, avec la commande rapide, elle peut minimiser l'effet de perturbations des réseaux et améliorer la stabilité des réseaux électriques. Les compensateurs de type d'impédance variable en série sont composés de thyristor-commuté/condensateur-commandé ou réacteur commandé par thyristors avec condensateurs fixes comme, par exemple, GCSC (“GTO Thyristor-Controlled Series Capacitor”), TSSC (“Thyristor-Switched Series Capacitor”) et TCSC (“Thyristor-Controlled Series Capacitors”). Un SSSC (“Static Synchronous Series Compensator”) est un appareil typique de compensation de type de source de tension . Nous allons faire une présentation brève pour un appareil typique de type d'impédance variable qui a été beaucoup utilisé – TCSC et pour un appareil avancé de type de source de tension – SSSC.

▲ TCSC (“Thyristor-Controlled Series Capacitors”)

Un TCSC peut être composé d'un condensateur fixe avec une branche de réactance commandée par thyristor (TCR : “Thyristor-Controlled Reactance”) en parallèle ou il peut être aussi composé de plusieurs modules connectés en série [4-8]. La figure 1-2 montre un modèle du circuit monophasé de TCSC où i_{tcsc} et P_e représentent respectivement le courant et la puissance d'entrée de TCSC, i_{lcr} représente le courant de branche de TCR et V_{tcsc} représente la tension aux bornes de la branche de réactance commandée par thyristor. Le diagramme fonctionnel d'un système commandé avec TCSC est représenté sur la Figure 1-3 où α représente l'angle

d'amorçage du TCSC, y représente une variable de commande, Δ désigne une quantité perturbée et l'indice 0 désigne une quantité de référence.

Les avantages des TCSC sont les suivants [4-5, 8]:

- capable de réguler les puissances de façon flexible;
- capable d'équilibrer les puissances triphasées ;
- capable d'altérer rapidement les impédances des lignes de transmission ;
- capable de réduire les courants de court-circuit en régulant rapidement les impédances des lignes de transmission.

L'appareil TCSC a été introduit dans les lignes de transmission d'énergie électrique pour optimiser la répartition de la puissance en régime permanent. La régulation ou variation de l'impédance des lignes fournie par le TCSC est la caractéristique principale qui lui donne un grand potentiel pour amortir les oscillations des réseaux d'énergie électrique et la résonance hypo-synchrone causées par la compensation du condensateur en série sur la ligne de transmission d'énergie électrique.

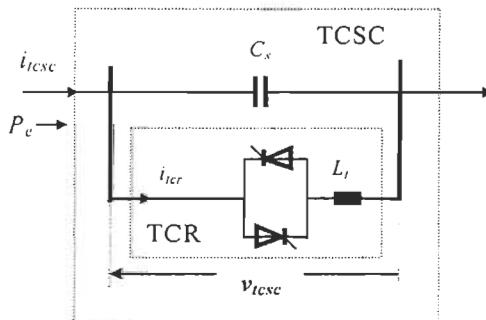


Figure 1-2 : TCSC

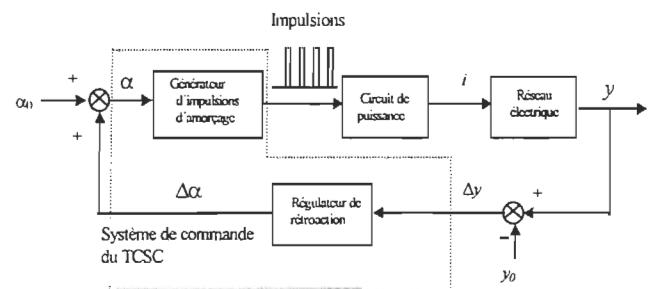


Figure 1-3 : Diagramme fonctionnel de commande avec un TCSC

▲ SSSC (“Static Synchronous Series Compensator”)

En fait, un SSSC est une source de tension basée sur convertisseur, qui a été proposé par Gyugyi en 1989 [8] avec l'idée d'utilisation unifiée de technologies basées sur convertisseur pour les compensations en série et en parallèle, et pour la commande de l'angle de transmission. La figure 1-4 montre un SSSC. Les GTO sont compris dans l'appareil de SSSC. Dans l'application

pratique, il peut être combiné effectivement avec un condensateur fixe. En ajustant la sortie de la source de tension, l'angle et l'amplitude de tension de compensation V_{com} peuvent être variés afin de commander la répartition de la puissance de transmission et la stabilité du réseau de transmission électrique.

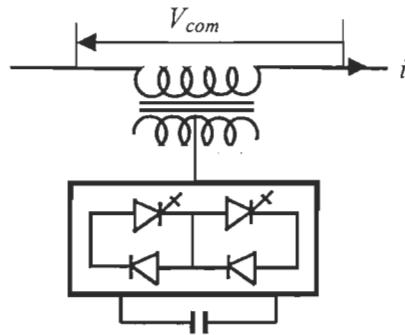


Figure 1-4 : SSSC

Les avantages des SSSC sont brièvement résumés comme suit [8] :

- capables de générer une tension de compensation contrôlable dans une plage identique capacitive et inductive, indépendamment de l'amplitude du courant de la ligne;
- capables de fournir la compensation pour la résistance R de la ligne en injectant une puissance active et pour la réactance X de la ligne en injectant une puissance réactive afin de maintenir la valeur effective X/R au niveau élevé, indépendamment du niveau de compensation de la ligne en série;
- avec le stockage d'énergie, capables d'améliorer effectivement la caractéristique d'amortissement en ajustant la compensation réactive de la ligne et en injectant simultanément une impédance réelle alternativement positive et négative afin d'absorber et de fournir la puissance active de la ligne.

■ SVC (“Static Var Compensator”)

La Figure 1-5 montre un SVC général. C'est un appareil qui a été utilisé depuis presque vingt ans avec les objectifs suivants [4-5, 8]:

- support de la tension;
- amélioration de la stabilité transitoire;

- amortissement des oscillations des réseaux électriques.

Avec la coordination appropriée entre les condensateurs actionnés par les interrupteurs mécaniques et les réactances commandées par les thyristors, la sortie de la puissance réactive du SVC peut varier continuellement et rapidement entre les valeurs de puissances capacitives et inductives. Il maintient la tension stable à un jeu de barres et il a une certaine capacité de commander la stabilité, mais il ne peut pas commander la puissance active.

■ STATCOM (“STATic COMpensator”)

La figure 1-6 montre un STATCOM [4-5, 8]. Ici un convertisseur en commutation forcée de quatre quadrants avec un condensateur CC (Courant Continu) est utilisé et des interrupteurs performants sont utilisés dans le convertisseur, typiquement des GTO.

La puissance réactive peut être commandée rapidement et facilement en régulant les amplitudes des tensions CA (Courant Alternatif). Le déphasage de tension CA est généralement réglé pour maintenir une tension CC constante aux bornes du condensateur. Le STATCOM ne consomme pas de puissance active. L’énergie dans l’appareil est stockée dans le condensateur CC.

Un avantage du STATCOM comparé avec le condensateur synchrone est que la tension de phase du STATCOM peut être individuellement régulée, donc il peut être utilisé pour la compensation des charges asymétriques [5]. Un autre avantage comparé avec les autres systèmes de SVC à thyristors est que le fonctionnement d’un STATCOM est presque indépendant de la tension de ligne. Pourtant, son désavantage principal est le coût d’application.

■ Appareil UPFC (“Unified Power Flow Controller”)

Un appareil de FACTS idéal doit être capable d’influencer la répartition de puissance de façon directe et flexible. Ceci dit, il doit être capable de superposer une tension à un angle désiré correspondant au courant de ligne de transmission. Le UPFC est un appareil proposé avec cette caractéristique [4-5, 8]. La figure 1-7 montre un UPFC.

La tension superposée par le transformateur en série avec la ligne de transmission est produite par le convertisseur 2 et elle peut avoir le déphasage désiré car de la puissance active peut être fournie par le convertisseur 1. En outre, le convertisseur 1 peut être utilisé pour commander indépendamment la puissance réactive. Un UPFC peut commander la tension, l’impédance et le déphasage de ligne de transmission. Donc s’il est commandé de façon appropriée, le UPFC peut

être un appareil performant. Pourtant, la complexité de UPFC et les coûts d'application contraignent ses applications pratiques.

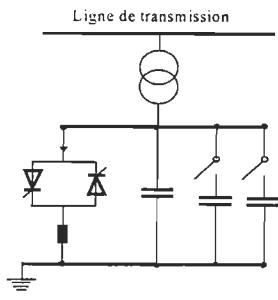


Figure 1-5 : SVC

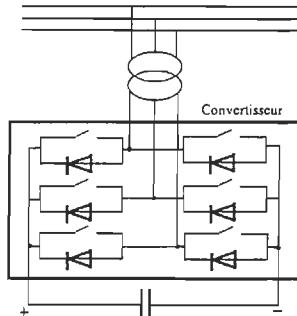


Figure 1-6 : STATCOM

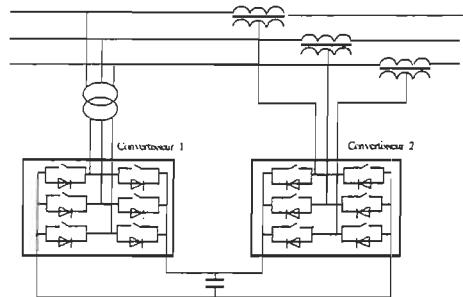


Figure 1-7 : UPFC

1.6.2.3 Bénéfices possibles de la technologie de FACTS

Les bénéfices possibles de la technologie de FACTS sont les suivants [4-5, 8] :

- Commander l'énergie électrique, ce qui permet de satisfaire le besoin d'assurer la répartition de la puissance optimale en mode d'opération normal ou en cas de faute.
- Accroître la capacité de transmission des lignes près de leur capacité thermique.
- Accroître la sécurité des réseaux électriques en accroissant la limite de la stabilité transitoire, restreindre les courants de circuit-court et les surcharges et amortissant les oscillations électromécaniques des réseaux électriques et des alternateurs.
- Fournir les connexions sûres aux équipements voisins et aux régions voisines, ce qui réduit les demandes pour la réserve de génération aux deux côtés.
- Fournir une grande flexibilité sur l'établissement de nouvelles unités de génération.
- Élever les lignes de transmission à un grade supérieur.
- Réduire la puissance réactive sur les lignes de transmission, ce qui permet aux lignes de transmettre plus de la puissance active.
- Réduire les courants de boucle.
- Dans certains cas, accroître l'utilisation de génération au coût le plus bas.

Tableau 1-1 : Contributions de la commande des divers régulateurs de FACTS

Régulateurs de FACTS	Contributions de la commande
Compensateur synchrone statique (" Static Synchronous Compensator ") STATCOM sans stockage	Commande de la tension, compensation de la puissance réactive, amortissement de l'oscillation, stabilité de la tension
Compensateur synchrone statique ("Static Synchronous Compensator") STATCOM avec stockage, BESS, SMES, condensateur de courant continu de grande valeur	Commande de la tension, compensation de la puissance réactive, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension
Compensateur statique VAR (" Static VAR Compensator ") SVC, TCR, TCS, TRS	Commande de la tension, compensation, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension
Résistance freinante commandée par thyristors (" Thyristor-Controlled Braking Resistor") TCBR	Amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique
Compensateur synchrone statique en série (" Static Synchronous Series Compensator ") SSSR sans stockage	Commande du courant, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident
Compensateur synchrone statique en série (" Static Synchronous Series Compensator ") SSSR avec stockage	Commande du courant, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension
Condensateur commandé par thyristors en série (" Thyristor-Controlled Series Capacitor") TCSC, TSSC	Commande du courant, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident
Réacteur commandé par thyristors en série (" Thyristor-Controlled Series Reactor") TCSR, TSSR	Commande du courant, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident
Transformateur de déphasage angulaire commandé par thyristors (" Thyristor-Controlled Phase-Shifting Transformer") TCPST ou TCPR	Commande de la puissance active, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension
Régulateur unifié d'écoulement de puissance ("Unified Power Flow Controller") UPFC	Commande de la puissance active et de la puissance réactive, commande de la tension, compensation de la puissance réactive, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension, restriction du courant d'incident
Limiteur de tension commandé par thyristors (" Thyristor-Controlled Voltage Limiter") TCVL	Restriction de la tension transitoire et dynamique
Régulateur de tension commandé par thyristors (" Thyristor-Controlled Voltage Regulator") TCVR	Commande de la puissance réactive, commande de la tension, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension
Régulateur de puissance d'inter-ligne (" Interline Power Flow Controller") IPFC	Commande de la puissance réactive, commande de la tension, amortissement de l'oscillation, stabilité transitoire et dynamique, stabilité de tension

La tableau 1-1 donne les contributions de la commande des divers régulateurs de FACTS pour aider à les choisir pour des applications particulières. On peut remarquer que comme la tension, le courant, l'impédance, la puissance réactive et la puissance active sont réciprocement en relation, chaque régulateur de FACTS a des contributions multiples en commandant la tension, le

courant, la puissance etc.. Cependant, le degré de contrôlabilité, particulièrement, la commande de la stabilité et de la puissance, varie d'un régulateur de FACTS à l'autre. En fait, on peut choisir le régulateur de FACTS selon l'objectif particulier de commande et selon les facteurs économiques.

1.7 Problèmes existants actuels dans l'étude de la stabilité

Actuellement, la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence sont encore deux problèmes exigeants et attirants dans l'étude de la stabilité des réseaux électriques. Les études reliées à la solution des problèmes de stabilité dynamique incluent principalement :

- amélioration de la modélisation des réseaux électriques complexes avec les régulateurs et les composants électroniques de puissance;
- amélioration des méthodes pour l'évaluation et l'analyse de la stabilité;
- équivalence dynamique des grands réseaux électriques;
- amélioration de la conception des régulateurs optimaux;
- amélioration du régulateur de la vitesse de l'alternateur et de sa régulation additionnelle;
- coordination de la régulation d'excitation additionnelle et ajustement automatique des paramètres d'excitation additionnelle pour le réseau électrique multi-alternateurs.
- recherche et développement de la technologie de FACTS comprenant principalement les problèmes suivants [4-5, 8] :
 - ✓ développement des outils d'étude pour FACTS;
 - ✓ développement des modèles des appareils de FACTS conformes à l'objectif distinctif de recherche;
 - ✓ effet des interactions entre les appareils de FACTS;
 - ✓ méthode d'étude pour identifier les meilleurs lieux où les appareils de FACTS devront être installés;
 - ✓ développement de la stratégie de commande des appareils de FACTS, ce qui est représenté comme suit:
 - ❖ détermination des composants appropriés des appareils de FACTS et du lieu d'installation des appareils de FACTS;
 - ❖ conception des régulateurs des FACTS;

- ❖ détermination du critère de commande approprié pour l'objectif de commande;
- ❖ choix des variables de mesures locales appropriées comme l'entrée de la commande.

L'intérêt de notre étude visera à régler simultanément et efficacement les problèmes d'oscillations en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone des réseaux électriques par l'effet de la commande d'un régulateur de FACTS particulier.

1.8 Recherches et développement de nouvelles approches pour améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques

L'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone constituent deux principaux problèmes de stabilité dynamique qui nuisent au fonctionnement des réseaux électriques d'aujourd'hui. Une influence typique sur le fonctionnement des réseaux électriques est la contrainte sur la capacité de transmission d'énergie électrique sur de grandes distances dans les réseaux électriques interconnectés à cause des problèmes de stabilité. Donc un sujet des plus intéressants et des plus exigeants est de développer une technologie nouvelle et un nouveau moyen pour améliorer la stabilité des réseaux électriques afin d'accroître la capacité de transmission d'énergie électrique dans les réseaux électriques interconnectés. Beaucoup de recherches ont été développées pour tenter de résoudre les deux problèmes de stabilité dynamique.

1.8.1 Étude des applications de la technologie de FACTS

Pour résoudre ces problèmes, la recherche pour obtenir une flexibilité relativement grande dans la transmission de la puissance s'est développée, ce qui a mené à l'apparition des appareils de FACTS de grande puissance et de vitesse rapide avec le développement de la technologie d'électronique de puissance. La méthode de régulation par FACTS montre un très grand potentiel pour améliorer la performance de fonctionnement et la stabilité des réseaux électriques en fortifiant la contrôlabilité des réseaux électriques et la capacité de transmission de puissance sur les lignes de transmission d'énergie électrique. Ceci permet aux éléments du réseau électrique de devenir des éléments actifs qui joueront un rôle actif dans l'amélioration de la flexibilité de transmission de puissance et de la stabilité des réseaux électriques. Par conséquent, au cours des

dernières années, beaucoup d'attention a été portée sur l'exploitation des fonctions potentielles de FACTS pour améliorer la stabilité des réseaux électriques et pour accroître la capacité de transmission des puissances de lignes.

1.8.1.1 Appareils de FACTS en parallèle

Dans [35], le SVC a été utilisé au point milieu d'une ligne de transmission avec un schéma de combinaison des compensations en série et en parallèle pour amortir l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone et pour améliorer la capacité de transmission de la ligne, mais il est seulement efficace sous la condition de petite perturbation. La référence [36] présente une modification pour [35]. Le fonctionnement unifié de SVC et PSS a été effectué au point milieu de la ligne de transmission pour diminuer la résonance hypo-synchrone, mais l'amortissement de multi-modes ne peut pas être atteint. La référence [34] présente une conception du régulateur d'amortissement pour un PSS avec les signaux globaux pour amortir les oscillations de la puissance sur la ligne de transmission électrique. Elle est aussi adaptée à la conception du régulateur d'un SVC pour le même objectif de commande. Cependant, les signaux d'entrée du régulateur ont besoin d'être obtenus de dispositifs de communication additionnels loin du régulateur, donc ceci apporte la difficulté dans la transmission des signaux et augmente le coût d'utilisation. De plus, il ne souligne pas l'effet sur la diminution de la résonance hypo-synchrone.

Dans [36] et [34], pour atteindre le but d'amortir l'oscillation, le SVC et le PSS doivent entrer en service en même temps, ce qui cause la complexité de fonctionnement du réseau électrique et augmente le coût de fonctionnement.

Des résultats pour le STATCOM ont été présentées dans [37] pour amortir la résonance hypo-synchrone. La tension aux bornes du STATCOM et les déviations de la vitesse de l'alternateur sont utilisées comme signaux auxiliaires, mais le schéma de commande ne souligne pas la commande de la répartition de puissance active sur les lignes de transmission.

Dans [38], un réacteur SIMO (“Single-Input Multiple-Output”) en parallèle commandé par thyristors a été utilisé pour amortir les modes d'oscillation de torsion de l'alternateur dans le réseau électrique compensé par un condensateur fixe, mais il ne peut pas commander la répartition de puissance active sur la ligne de transmission.

Dans tous les régulateurs mentionnés ci-dessus, la méthode classique basée sur l'assignation de la structure des valeurs et vecteurs propres dans le domaine fréquentiel est utilisée pour la conception des régulateurs, ce qui amène des difficultés pour l'amortissement de l'oscillation de multi-modes.

1.8.1.2 Comparaison du degré de commande

Les références [8,39] analysent en détail l'amortissement des appareils typiques de FACTS en série et en parallèle, comme SVC, TCSC et PS (“Phase Shifter”), et indique leur effet sur l'amortissement des oscillations des réseaux de transmission d'énergie électrique en développant un modèle unifié pour l'analyse des appareils de FACTS dans l'amortissement des oscillations des réseaux de transmission d'énergie électrique. La référence [40] donne une conclusion utile, i.e., les appareils de FACTS en série sont plus efficaces que ceux en parallèle dans l'amortissement des oscillations de la puissance sur les lignes de transmission d'énergie électrique en faisant une comparaison entre les appareils de FACTS en série et ceux en parallèle. Parmi les appareils de FACTS en série comme UPFC et TCSC, en considérant les facteurs économiques et pratiques, le condensateur en série commandé par thyristor (TCSC) est considéré comme un des appareils de FACTS les plus pratiques et les plus efficaces pour son utilisation dans les réseaux électriques.

1.8.1.3 Étude du TCSC

La caractéristique la plus attrayante d'un TCSC est sa capacité de commande rapide d'impédance de la ligne de transmission d'énergie électrique. Cela montre la fonction potentielle d'amortissement des oscillations en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone sur les lignes de transmission d'énergie électrique, donc un domaine de recherche intéressant est d'exploiter efficacement la fonction potentielle du TCSC dans l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques.

Beaucoup d'activités connexes ont été effectuées pour l'étude du TCSC pour l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques. Ces recherches visent principalement trois parties : l'analyse de la caractéristique d'amortissement, le modèle de TCSC et la stratégie de commande de TCSC

qui comprend principalement la conception du régulateur et le choix des signaux d'entrée. Les références [41-44] présentent plusieurs modèles du TCSC pour l'étude des oscillations en basse fréquence et de la résonance hypo-synchrone. Dans les références [32, 45-46], l'étude de la caractéristique d'amortissement du TCSC est effectuée pour vérifier en théorie l'effet du TCSC sur l'amortissement des oscillations des réseaux de transmission d'énergie électrique. La référence [23] présente des idées et considérations générales sur la conception de commande des FACTS pour amortir les oscillations de la puissance de ligne de transmission, et elle souligne les problèmes d'amortissement des oscillations des multi-modes et de mesure locale des signaux d'entrée du régulateur dans la conception de la commande des FACTS. Ces idées s'adaptent aussi à la conception de la commande d'un TCSC. Les références [23, 45-49] présentent la conception de régulateurs de TCSC basée sur l'analyse de la réponse fréquentielle avec un mode propre dominant. La référence [12] rapporte la première installation du TCSC dans le monde, le test, la conception du régulateur et les considérations pour l'application à une station de 345 kV à Kanawha Rivers, E-U. L'objectif principal du TCSC est d'optimiser la répartition de puissance du réseau électrique et de diminuer l'oscillation de puissance de ligne de transmission dans une certaine mesure. Les références [11, 13, 47, 50] rapportent une autre installation du TCSC à 500 kV Power Administration Substation, Bonneville, E-U. C'est aussi une des installations les plus anciennes de TCSC dans le monde. Le TCSC conçu a pour principal objectif d'optimiser la répartition de puissance du réseau électrique, et de plus il a pour fonction de diminuer les oscillations en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone dans une certaine mesure. Cependant, il a besoin d'au moins deux régulateurs pour réaliser respectivement ces fonctions, et avant la mise en fonction de la commande du TCSC, il a besoin d'identifier d'abord l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone afin de déterminer le régulateur qui est mis en service, ce qui signifie que la commande conçue du TCSC n'a pas une fonction unifiée pour amortir les oscillations en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone. De plus, pour obtenir l'effet de diminuer la résonance hypo-synchrone, le point de fonctionnement du TCSC devra être modifié. Les références [51-52] présentent un projet de commande et d'installation d'un Compensateur Série Améliorée (ASC : "Advanced Series Compensation") de 330 Mvar à 230 kV dans le Nord-est de l'Arizona (E.-U.), au poste Kayenta sur la ligne de transport Glen Canyon-Shiprock. Le ASC a aussi pour principal objectif d'optimiser la répartition de puissance du réseau électrique, et de plus il a pour fonction de diminuer les oscillations de la puissance en

basse fréquence et la résonance hypo-synchrone dans une certaine mesure. La commande “bang-bang” a été adoptée pour l’objectif d’amortir les oscillations de la puissance. Pour diminuer la résonance hypo-synchrone, le régulateur de ASC doit fonctionner dans la plage d’impédance inductive, ce qui signifie que le point de fonctionnement du ASC devra être modifié et la commande conçue n’a pas aussi une fonction unifiée pour amortir les oscillations en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone. En outre, dans la conception du régulateur de ASC, une simulation détaillée de EMTP est requise pour trouver la fonction de transfert nécessaire [10]. La commande du TCSC dans le domaine du temps comme, par exemple, la commande d’interrupteur et de “bang-bang”, est proposée dans les références [53-54] pour améliorer la stabilité transitoire reliée à une grande perturbation. Cependant, on remarque que les recherches présentes de TCSC visent principalement l’objectif d’amélioration de l’oscillation en basse fréquence des réseaux électriques.

Actuellement, trois principaux problèmes sont reliés à l’étude des TCSC:

- L’amortissement des oscillations de multi-modes;
- L’uniformité d’effet de commande pour l’oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchron;
- L’uniformité de commande de la stabilité et de la répartition de la puissance sur la ligne de transmission.

1.8.2 Autres études pour l’amélioration de la stabilité

Elles visent principalement les deux parties suivantes :

■ Compensation du condensateur en série

La méthode par la compensation de condensateur en série est utilisée pour compenser les lignes de transmission d’énergie électrique [1-2, 12, 55]. Un objectif important est d’accroître la capacité et l’efficacité de transmission d’énergie électrique sur de longues distances afin d’améliorer la stabilité des réseaux électriques reliés à l’oscillation en basse fréquence sur la ligne de transmission. Toutefois, cela apporte un autre problème typique de stabilité dynamique qui s’appelle la résonance hypo-synchrone qui se produit entre le turboalternateur et la ligne de transmission avec la compensation en série.

■ Étude du PSS

La méthode par la régulation de l'excitation additionnelle a d'abord été développée et a été utilisée pour améliorer l'amortissement des réseaux électriques en ajoutant un PSS dans le système d'excitation de l'alternateur pour amortir l'oscillation en basse fréquence [1-2]. La référence [56] indique que le PSS est efficace pour amortir les oscillations du mode local, mais le PSS a une certaine difficulté à amortir les oscillations du mode d'inter-région qui ne peuvent pas être bien commandées et bien observées à cause du signal d'entrée local adopté dans le PSS. De plus, il n'est pas efficace pour l'amortissement des oscillations du mode relié au système d'excitation.

1.9 Sujet et objectifs de recherche

Selon le développement actuel des réseaux électriques, les problèmes existants dans les réseaux électriques et l'état actuel de recherche, d'abord, nous choisissons de limiter l'étude à un appareil de FACTS en série, le TCSC ("Thyristor-Controlled Series Capacitor") pour sa capacité de commande rapide de l'impédance de la ligne de transmission d'énergie électrique, de commande de la puissance sur la ligne de transmission et pour ses caractéristiques pratiques et économiques. Notre sujet de recherche vise à développer des méthodes pour établir la stratégie de commande unifiée d'un TCSC avec pour objectif particulier d'améliorer la stabilité des réseaux électriques en plus d'assurer la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission. Nous allons viser principalement les problèmes de stabilité dynamique des réseaux électriques que sont l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone.

Cet objectif général peut se décomposer en des objectifs spécifiques suivants :

- Développer un critère pour l'évaluation de la stabilité dynamique, qui est adapté pour élaborer une stratégie de commande unifiée de l'angle de TCSC afin d'améliorer l'interaction de l'amortissement durant le processus dynamique de façon plus efficace et plus simple que les méthodes traditionnelles.
- Selon le critère de stabilité souhaité, développer une stratégie de commande optimale unifiée avec signaux locaux d'entrée de la commande pour amortir la résonance hypo-synchrone et les oscillations en basse fréquence des réseaux électriques de multi-modes, ce qui implique
 - ✓ la conception du régulateur.
 - ✓ le choix des entrées de la commande du TCSC.

- ✓ la considération de la robustesse.
- Développer un régulateur unifié optimal du TCSC selon la stratégie souhaitée avec objectif particulier d'amortir simultanément et efficacement la résonance hypo-synchrone et les oscillations en basse fréquence afin d'améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques.

Aussi, les travaux concernent principalement l'étude de la méthode de l'évaluation de la stabilité adaptée pour concevoir un régulateur de TCSC de façon efficace et simple, le développement de la modélisation du réseau électrique avec TCSC, le développement de la méthode de conception du régulateur de TCSC et des considérations concernant l'amortissement des oscillations des multi-modes, les signaux locaux d'entrée et la robustesse du régulateur. L'étude inclut le choix des signaux d'entrée de la commande et la conception du régulateur avec pour objectif particulier de prévenir la résonance hypo-synchrone et d'amortir les oscillations en basse fréquence efficacement et simultanément. L'efficacité, l'uniformité et la localisation sont soulignées dans la conception du régulateur de TCSC et l'universalité de la méthode de conception est aussi considérée afin que la méthode souhaitée puisse s'adapter à la conception du régulateur d'autres appareils de FACTS. De plus, une boîte d'outils pour la simulation et l'analyse de la caractéristique dynamique des réseaux électriques sous MATLAB[®]/SIMULINKTM sera élaborée, ce qui enrichira la librairie SIMUPEL/SIMULINKTM [31].

1.10 Conclusions

Les principaux problèmes de stabilité dynamique des réseaux électriques interconnectés sont associés à l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone. La régulation par PSS et la régulation par FACTS sont actuellement les deux moyens les plus efficaces pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. De plus, la technologie des FACTS est celle qui a le plus de potentiel pour améliorer la caractéristique de fonctionnement des réseaux électriques. Par rapport aux appareils de FACTS en parallèle, les appareils de FACTS en série, comme le TCSC, ont plus d'avantages particuliers sur la commande simultanée de la stabilité dynamique et de la puissance sur les lignes de transmission.

L'objectif principal de ce travail est de développer une méthode d'analyse et une stratégie unifiée de commande de TCSC pour améliorer la stabilité des réseaux électriques afin d'assurer la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission pour satisfaire les demandes de fonctionnement des réseaux électriques.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE AVEC TCSC POUR L'ÉTUDE DE STABILITÉ

2.1 Introduction

Pour évaluer la stabilité des réseaux électriques par l'analyse des valeurs propres ou par simulation numérique, la première tâche importante est d'établir le modèle des composants du réseau électrique. Également, l'outil de simulation numérique des réseaux électriques est indispensable pour l'analyse de la caractéristique dynamique des réseaux électriques dans l'étude de la stabilité. Plusieurs logiciels de simulation ont été développés pour l'étude des réseaux électriques comme, par exemple, EMTP, EMTDC, EUROSTAG, MATLAB[®]/SIMULINKTM/PSB (“Power System Blockset”). Pourtant, ces logiciels ne comprennent pas les modèles des composants particuliers pour l'étude de la stabilité comme, par exemple, l'arbre de turboalternateur décrit par un système de multi-masses-ressorts et les appareils de FACTS (“Flexible AC Transmission Systems”), ce qui peut apporter des difficultés pour l'étude de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence avec l'effet de la commande de FACTS. Par conséquent, nous avons choisi le logiciel MATLAB[®]/SIMULINKTM comme outil d'étude pour ses avantages dans la simulation.

Ce chapitre présente nos travaux sur la modélisation du réseau électrique avec TCSC pour l'étude de la stabilité des réseaux électriques. Ces travaux incluent principalement le développement des modèles mathématiques des composants des réseaux électriques adaptés à l'étude de la stabilité dynamique, l'implantation de ces modèles sous MATLAB[®]/SIMULINKTM et la validation des modèles par la simulation numérique. D'abord, un modèle électrique et mécanique unifié précis est présenté pour la validation de la stabilité du réseau électrique par l'analyse des valeurs propres et un modèle du réseau électrique simplifié pratique est proposé pour la conception du régulateur de TCSC. Ensuite, un modèle dynamique pratique de TCSC est développé pour l'analyse de la stabilité dynamique avec de petites perturbations. De plus, en se basant sur la méthode de modélisation proposée, une boîte d'outils de modélisation SIMUSTAB est élaborée pour enrichir

la librairie SIMULINK™ afin de profiter de ses avantages pour analyser la stabilité dynamique des réseaux électriques par simulation numérique. Finalement, trois exemples de simulation des réseaux électriques pour des cas de fonctionnement différents sont exécutés pour valider la méthode de modélisation proposée et les modèles des composants typiques de réseaux électriques ajoutés dans la librairie SIMUSTAB.

2.2 Limitations de la modélisation des réseaux électriques pour l'étude de la performance dynamique

Notre étude vise les problèmes de stabilité dynamique causés par de petites perturbations comme, par exemple, les oscillations en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone, donc nous nous intéressons à la modélisation des réseaux électriques pour l'étude de la performance dynamique. Ceci signifie que les réseaux électriques sont décrits par une série d'équations différentielles. Pour la simplification et la clarification de l'analyse, nous nous intéressons seulement aux équipements actifs pour déterminer la performance des réseaux électriques. Pour l'analyse de la résonance hypo-synchrone, notre intérêt se porte sur la turbine à vapeur, l'alternateur, le régulateur de la vitesse, le régulateur de l'excitation et le compensateur en série et l'appareil TCSC. Le réseau de transmission d'énergie électrique est aussi important et est représenté en détail en utilisant seulement des équations algébriques et des équations différentielles ordinaires avec paramètres localisés au lieu d'équations différentielles avec paramètres distribués. Cette hypothèse est justifiée parce que notre intérêt est à la performance en relativement basse fréquence inférieure à la fréquence synchrone de réseau. Les charges sont représentées comme des impédances constantes. Nous ne nous intéressons pas aux sources d'énergie comme, par exemple, les chaudières et le centre de commande du réseau électrique qui concernent le phénomène des basses fréquences inférieures à celle de notre étude. Donc les hypothèses suivantes seront adoptées dans notre étude :

- les lignes de transmission et les équipements sont représentés avec paramètres localisés;
- les charges sont représentées comme des impédances constantes;
- le phénomène relié aux basses fréquences inférieures à la fréquence synchrone de réseau est considéré.

Pour l'étude de la résonance hypo-synchrone, l'objectif d'analyse est d'étudier la performance dynamique des interactions entre le turboalternateur et le réseau de transmission d'énergie électrique dans la plage des fréquences hypo-synchrones, donc les équipements définis pour la modélisation sont :

- lignes de transmission du réseau électrique, les condensateurs en série et les TCSC;
- éléments statiques du réseau, comme par exemple, les résistances, les inductances et les condensateurs;
- alternateur synchrone;
- arbres du turboalternateur avec les masses-ressorts localisées et avec l'amortissement propre et mutuel;
- turbine constituée de divers cylindres de turbine.

Si les modèles du régulateur de vitesse, du régulateur de l'excitation et de PSS sont ajoutés, les études de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence peuvent être effectuées en même temps. La Figure 2-1 montre un sous-réseau d'intérêt pour l'étude.

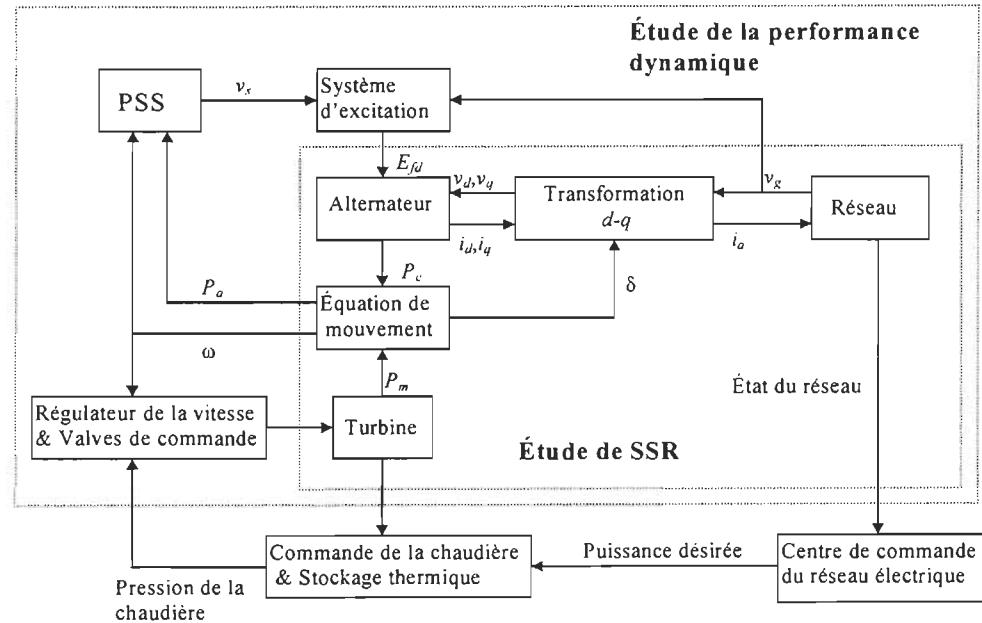


Figure 2-1 : Sous-réseau d'intérêt

2.3 Modélisation des composants du réseau électrique branché avec un TCSC (“Thyristor-Controlled Series Capacitor”)

Le réseau électrique typique dans la figure 2-2 est présenté comme un exemple pour l'étude de modélisation. Ce réseau comprend un alternateur synchrone (incluant le modèle du régulateur d'excitation, du PSS (“Power System Stabilizer”), du régulateur de vitesse et de l'arbre mécanique du turboalternateur), un appareil de FACTS en série - TCSC (“Thyristor-Controlled Series Capacitor”), une ligne de transmission électrique et une source de tension infinie.

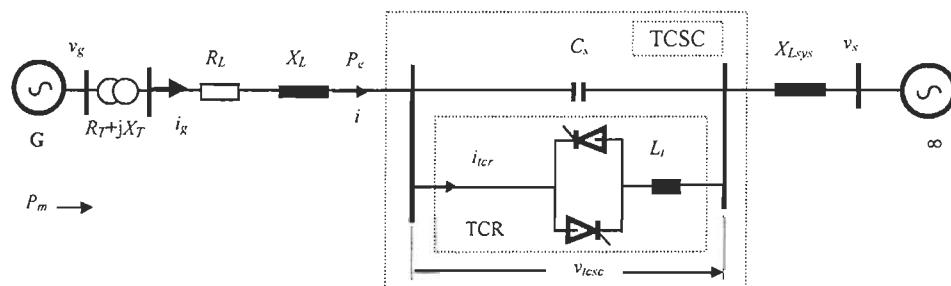


Figure 2-2 : Réseau électrique typique

2.3.1 Modèle fondamental de l'alternateur synchrone

D'abord, la caractéristique électromagnétique de l'alternateur synchrone peut être décrite par une série d'équations différentielles en p.u. comme suit [1, 57] :

$$\begin{aligned}
 v_d &= r_a(-i_d) + \dot{\psi}_d / \omega_b - \omega\psi_q \\
 v_q &= r_a(-i_q) + \dot{\psi}_q / \omega_b + \omega\psi_d \\
 v_F &= r_F i_F + \dot{\psi}_F / \omega_b \\
 0 &= r_D i_D + \dot{\psi}_D / \omega_b \\
 0 &= r_Q i_Q + \dot{\psi}_Q / \omega_b
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

Dans les équations (2-1), v , i , r , ψ et ω dénotent respectivement la tension, le courant, la résistance, le flux magnétique et la pulsation de rotor de l'alternateur, et les indices inférieurs d ,

q , F et D signalent respectivement les bobines d'axes d et q , d'excitation et d'amortissement de l'alternateur.

Les flux magnétiques peuvent être représentés en p.u. dans les équations (2-2) et (2-3) [1] où les réactances totales des bobines sont dénotées par x_d , x_F , x_D , x_q et x_Q , et les réactances mutuelles des axes d et q sont dénotées par x_{md} et x_{mq} .

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_F \\ \Psi_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & x_{md} & x_{md} \\ x_{md} & x_F & x_{md} \\ x_{md} & x_{md} & x_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_F \\ i_D \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q & x_{mq} \\ x_{mq} & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Donc, les équations de l'alternateur (2-1), (2-2) et (2-3) peuvent être combinées sous la forme compacte suivante :

$$\dot{\mathbf{X}}_g = \mathbf{f}(\mathbf{X}_g, \omega, \mathbf{U}) \quad (2-4)$$

où $\mathbf{X}_g = [i_d \ i_q \ i_F \ i_D \ i_Q]^T$, un vecteur de variables des courants des bobines de l'alternateur;
 $\mathbf{U} = [v_d \ v_q \ v_F]^T$, un vecteur de variables d'entrée, soit la tension aux bornes de l'alternateur sous forme des axes d et q et la tension d'excitation;
et \mathbf{f} est un vecteur de fonctions non linéaires.

Comme les problèmes étudiés, par exemple, la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence, ressortent de la stabilité dynamique en régime permanent suite à une petite perturbation, l'équation (2-4) doit être linéarisée pour étudier les problèmes par l'analyse des valeurs propres. Pour l'analyse par simulation numérique, nous devons seulement simuler la dynamique perturbée faiblement en régime permanent.

2.3.2 Modélisation du système mécanique du turboalternateur

L'arbre d'un turboalternateur est un système mécanique complexe. Comme les problèmes que nous étudions sont principalement reliés aux bandes des fréquences hypo-synchrones ou inférieures, un modèle simple avec paramètres localisés peut être employé pour représenter l'arbre du turboalternateur.

La figure 2-3 représente une structure typique de l'arbre d'un turboalternateur décrit par un système de six masses-ressorts avec paramètres localisés. Les six sections de masse de torsion désignées par les notations PH, PM, PB_a, PB_b, GEN et EX, représentent respectivement la turbine à pression haute, la turbine à pression moyenne et deux turbines à pression basse A et B, l'alternateur et l'excitateur; T_H , T_M , T_{Ba} , T_{Bb} désignent les couples mécaniques produits respectivement par PH, PM, PB_a et PB_b; T_e et T_{EX} désignent les couples électromagnétiques d'alternateur et d'excitateur respectivement; et K_{HM} , K_{MBA} , K_{Bab} , K_{Bbg} et K_{gE} désignent les rigidités des masses de torsion correspondant au système de six masses-ressorts de l'arbre du turboalternateur.

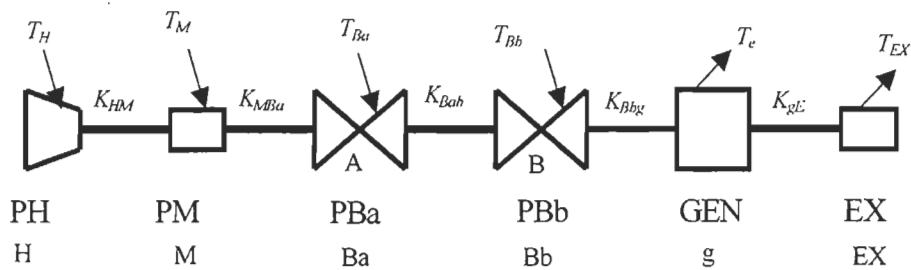


Figure 2-3 : Modèle des six masses-ressorts de l'arbre d'un turboalternateur

Nous pouvons modéliser le système de six masses-ressorts de l'arbre comme une série d'équations différentielles linéaires dans l'équation (2-5), où les notations M_H , M_M , M_{Ba} , M_{Bb} , M_g et M_{EX} représentent respectivement l'inertie de chaque section de torsion de six masses-ressorts de l'arbre du turboalternateur; D_H , D_M , D_{Ba} , D_{Bb} , D_g , et D_{EX} représentent les coefficients d'amortissement inhérent de chaque section de six masses-ressorts; ω_H , ω_M , ω_{Ba} , ω_{Bb} , ω_g et ω_{EX} représentent respectivement la pulsation de section de rotation de turbine à la pression haute, de turbine à la pression moyenne, de turbine à la pression basse A, de turbine à la pression basse B, de la section de

l'alternateur et de la section de l'excitateur, et δ_H , δ_M , δ_{Ba} , δ_{Bb} , δ_g et δ_{EX} représentent respectivement l'angle de la section de turbine à la pression haute, de la section de turbine à la pression moyenne, de la section de la turbine à la pression basse A, de la section de turbine à la pression basse B, de la section de l'alternateur et de la section de l'excitateur; Δ identifie les variables perturbées :

$\Delta\omega_H = \omega_H - \omega_{H0}$, cette dernière représentant ω_H au point de fonctionnement; et $\omega_b = 377$ rad/s.

$$\begin{aligned}
 \Delta\dot{\omega}_H &= \frac{1}{M_H} [\Delta T_H - D_H \Delta\omega_H - K_{HM} (\Delta\delta_H - \Delta\delta_M)] \\
 \Delta\dot{\delta}_H &= \omega_b \Delta\omega_H \\
 \Delta\dot{\omega}_M &= \frac{1}{M_M} [\Delta T_M - D_M \Delta\omega_M + K_{HM} (\Delta\delta_H - \Delta\delta_M) - K_{MBa} (\Delta\delta_M - \Delta\delta_{Ba})] \\
 \Delta\dot{\delta}_M &= \omega_b \Delta\omega_M \\
 \Delta\dot{\omega}_{Ba} &= \frac{1}{M_{Ba}} [\Delta T_{Ba} - D_{Ba} \Delta\omega_{Ba} + K_{MBa} (\Delta\delta_M - \Delta\delta_{Ba}) - K_{Bab} (\Delta\delta_{Ba} - \Delta\delta_{Bb})] \\
 \Delta\dot{\delta}_{Ba} &= \omega_b \Delta\omega_{Ba} \\
 \Delta\dot{\omega}_{Bb} &= \frac{1}{M_{Bb}} [\Delta T_{Bb} - D_{Bb} \Delta\omega_{Bb} + K_{Bab} (\Delta\delta_{Ba} - \Delta\delta_{Bb}) - K_{Bbg} (\Delta\delta_{Bb} - \Delta\delta_g)] \\
 \Delta\dot{\delta}_{Bb} &= \omega_b \Delta\omega_{Bb} \\
 \Delta\dot{\omega}_g &= \frac{1}{M_g} [-\Delta T_e - D_g \Delta\omega_g + K_{Bbg} (\Delta\delta_{Bb} - \Delta\delta_g) - K_{gE} (\Delta\delta_g - \Delta\delta_{EX})] \\
 \Delta\dot{\delta}_g &= \omega_b \Delta\omega_g \\
 \Delta\dot{\omega}_{EX} &= \frac{1}{M_{EX}} [-\Delta T_{EX} - D_{EX} \Delta\omega_{EX} + K_{gE} (\Delta\delta_g - \Delta\delta_{EX})] \\
 \Delta\dot{\delta}_{EX} &= \omega_b \Delta\omega_{EX}
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

On peut remarquer que douze équations différentielles linéaires de premier ordre sont utilisées pour décrire l'arbre, chaque section de rotation correspondant à deux équations différentielles [1]. Durant le processus transitoire, la variation du couple électromagnétique de l'alternateur est principalement déterminée par la dynamique de l'alternateur et du réseau de transmission d'énergie électrique connecté à l'alternateur, et la variation des couples mécaniques T_H , T_M , T_{Ba} et T_{Bb} produits par les turbines à vapeur dépend de la dynamique des turbines et de son système de régulation de la vitesse.

Pour décrire le système mécanique total, on a encore besoin d'ajouter les équations différentielles pour décrire les couples de turbine à vapeur et celles pour décrire le régulateur de la vitesse, donc l'équation d'état linéarisée de système mécanique total peut être écrite sous la forme compacte suivante :

$$\Delta \dot{X}_m = A_m \Delta X_m + B_m \Delta U_m \quad (2-6)$$

où ΔX_m désigne le vecteur de variables d'état du système mécanique, soit les déviations de l'angle et de la pulsation de chaque section de rotation de masses-ressorts de l'arbre du turboalternateur et les couples mécaniques correspondant aux turbines à vapeur; ΔU_m désigne un vecteur des variables d'entrée composé des variables de commande auxiliaire du régulateur de la vitesse et de la déviation du couple électromagnétique de l'alternateur qui représente le seul lien entre le système mécanique de l'alternateur et le système électrique du réseau électrique; et A_m et B_m désignent respectivement la matrice d'état et la matrice d'entrée de système mécanique [1-2].

2.3.3 Modélisation du régulateur de l'excitation additionnelle du réseau électrique — PSS (“Power System Stabilizer”)

Comme l'oscillation en basse fréquence dans un grand réseau électrique se produit à cause du manque d'amortissement du mode mécanique du réseau électrique, il est nécessaire d'introduire un amortissement additionnel dans le réseau électrique. L'idée de régulation de l'excitation additionnelle du réseau électrique est d'appliquer un signal par le système d'excitation afin d'obtenir un couple d'amortissement additionnel $D_E \Delta \omega$ où D_E s'appelle le coefficient d'amortissement et $\Delta \omega$ est la déviation de pulsation de l'alternateur. La figure 2-4 montre un diagramme de fonction de transfert du système d'excitation avec AVR (“Automatic Voltage Regulator”) et PSS [2].

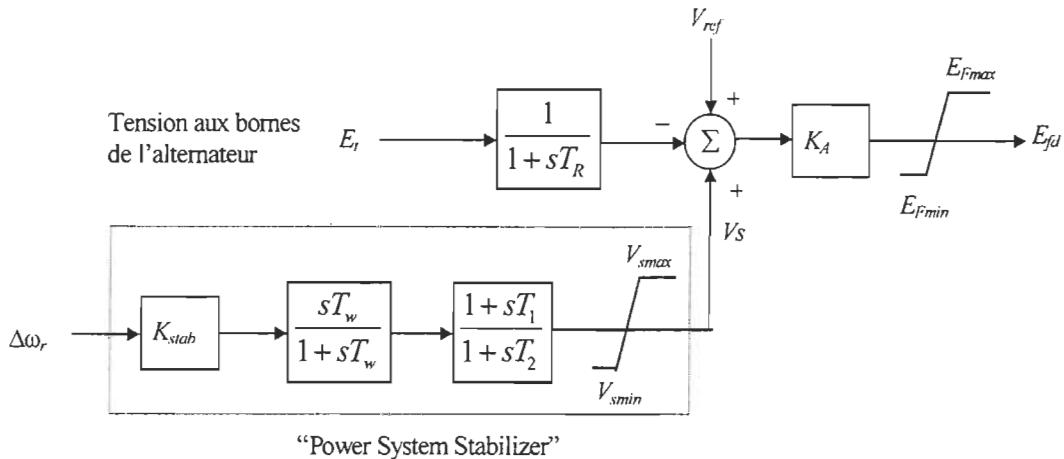
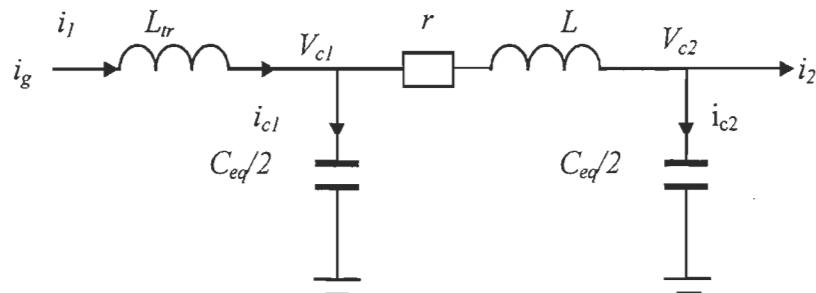


Figure 2-4 : Système d'excitation d'alternateur avec AVR et PSS

2.3.4 Modélisation de la ligne de transmission électrique branchée avec un transformateur idéal

Comme notre intérêt de recherche est relié aux fréquences plus basses que la fréquence synchrone, nous pouvons utiliser, dans un premier temps, un circuit équivalent de type π avec paramètres localisés pour décrire la ligne de transmission branchée avec un transformateur. En outre, nous modélisons le transformateur réel par un transformateur idéal branché avec une réactance en série. La figure 2-5 montre le modèle général.

Figure 2-5 : Circuit équivalent de type π de la ligne de transmission avec un transformateur

2.3.5 Modèle du TCSC

Le TCSC est un condensateur fixe branché avec une réactance commandée par thyristors (TCR — “Thyristor-Controlled Reactance”) en parallèle (figure 2-2 et figure 2-6). Le circuit de TCSC est composé de trois parties : le circuit de puissance, le circuit d'amorçage d'impulsions et le régulateur de rétroaction. La figure 2-7 montre le mode d'amorçage idéal d'un TCSC.

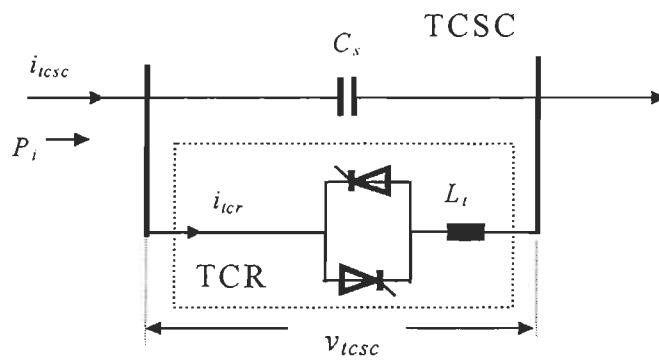


Figure 2-6 : Structure typique d'un TCSC

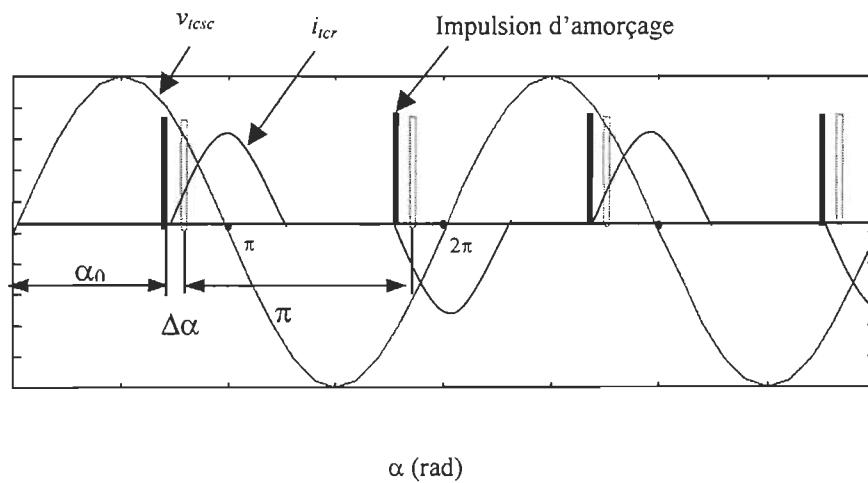


Figure 2-7 : Mode d'amorçage idéal d'impulsions

Selon [51,58-59], si on néglige l'influence des harmoniques d'ordres supérieurs, la branche TCR peut être décrite par une inductance équivalente variable L_{tcr} en fonction de l'angle d'amorçage α [55,58] :

$$L_{tcr} = \pi L_t / (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \quad (\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi) \quad (2-7)$$

où α représente l'angle d'amorçage des thyristors dans le TCSC et L_t représente l'inductance fixe de branche TCR. Ce modèle comprend un effet équivalent des circuits de puissance et d'amorçage d'impulsions de la branche TCR.

Donc, le modèle mathématique général du TCSC peut être représenté par une série d'équations différentielles non linéaires comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{dv_{tcsc}}{dt} &= \frac{i_{tcsc} - i_{tcr}}{C_s} \\ \frac{di_{tcr}}{dt} &= \frac{v_{tcsc}}{L_{tcr}(\alpha)} \end{aligned} \quad (2-8)$$

La figure 2-8 donne le schéma du modèle du TCSC, où $1/s$ représente un intégrateur.

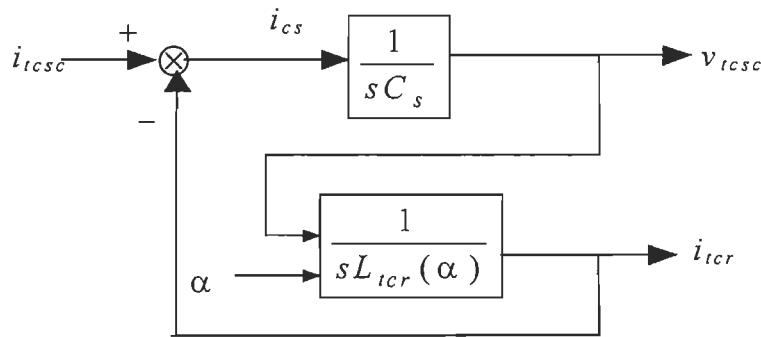


Figure 2-8 : Schéma du modèle du TCSC

Dans notre étude, la méthode de commande optimale linéaire est utilisée pour la conception du régulateur de TCSC. Donc en ce cas, la sortie du régulateur de TCSC, i.e., la déviation de l'angle d'amorçage $\Delta\alpha$, peut être représentée comme une combinaison linéaire des déviations des variables d'état d'entrée du régulateur. Ceci est montré sur la figure 2-9 où ΔX_{De} et $\Delta\alpha$ représentent respectivement le vecteur de signaux d'entrée du régulateur et la sortie du régulateur,

et K représente une matrice de rétroaction dont les éléments k_1, k_2, k_3, \dots dépendent de l'état initial de fonctionnement en régime permanent et de la méthode adoptée pour la conception du régulateur de TCSC.

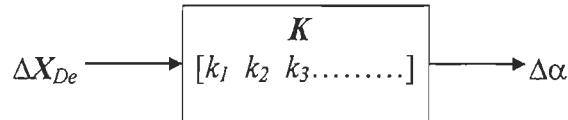


Figure 2-9 : Régulateur linéaire de TCSC

2.4 Développement du modèle dynamique d'un TCSC pour l'étude de la stabilité dynamique

Un modèle générique de TCSC a été présenté à la section 2.3.5. En négligeant l'influence des harmoniques d'ordres supérieurs, nous développons un modèle dynamique approximatif de TCSC pour l'analyse de la stabilité dynamique de façon pratique et efficace.

D'abord, l'équation différentielle de TCSC (2-8) peut être écrite sous forme des quantités triphasées comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{dV_{tcsc-abc}}{dt} &= \frac{I_{tcsc-abc} - I_{tcr-abc}}{C_s} \\ \frac{dI_{tcr-abc}}{dt} &= \frac{V_{tcsc-abc}}{L_{tcr}} \end{aligned} \quad (2-9)$$

où L_{tcr} est l'inductance équivalente variable représentée dans l'équation (2-7) et l'indice inférieur abc représente un vecteur composé des variables triphasées dans le repère abc .

Définissons les quantités dans le repère $dq0$ par $X_{dq0} = TX_{abc}$ et supposons la matrice de transformation [1-2]

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 1 & \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) \\ 1 & \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

et $T^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}$ (2-11)

où

$T T^{-1} = [I]$ qui représente une matrice identité.

L'équation (2-9) peut être arrangée et formulée comme suit :

$$\begin{aligned} T^{-1} \frac{dTV_{tcs-dq0}}{dt} &= T^{-1} \frac{TI_{tcs-dq0} - TI_{tcr-dq0}}{C_s} \\ T^{-1} \frac{dTI_{tcr-dq0}}{dt} &= T^{-1} \frac{TV_{tcs-dq0}}{L_{tcr}} \end{aligned} \quad (2-12)$$

avec

$$T^{-1} \frac{dTV_{tcs-dq0}}{dt} = T^{-1} \left(\frac{dT}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} V_{tcs-dq0} + T \frac{dV_{tcs-dq0}}{dt} \right)$$

et

$$T^{-1} \frac{dTI_{tcr-dq0}}{dt} = T^{-1} \left(\frac{dT}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} I_{tcr-dq0} + T \frac{dI_{tcr-dq0}}{dt} \right)$$

Considérant que $T T^{-1} = [I]$, $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ et $T^{-1} \frac{dT}{d\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ et réarrangeant l'équation (2-12) en

négligeant les composants homopolaires, le modèle dynamique suivant pour le TCSC dans le repère dq est obtenu :

$$\begin{aligned} \frac{dV_{tcs-dq}}{dt} &= \frac{I_{tcs-dq} - I_{tcr-dq}}{C_s} - \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \omega V_{tcs-dq} \\ \frac{dI_{tcr-dq}}{dt} &= \frac{V_{tcs-dq}}{L_{tcr}} - \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \omega I_{tcr-dq} \end{aligned} \quad (2-13)$$

$$\text{où } \mathbf{V}_{t_{csc-dq}} = \begin{bmatrix} v_{t_{csc-d}} \\ v_{t_{csc-q}} \end{bmatrix}, \mathbf{I}_{t_{csc-dq}} = \begin{bmatrix} i_{t_{csc-d}} \\ i_{t_{csc-q}} \end{bmatrix}, \text{ et } \mathbf{I}_{t_{csc-dq}} = \begin{bmatrix} i_{t_{csc-d}} \\ i_{t_{csc-q}} \end{bmatrix}.$$

L'équation (2-13) peut être réécrite :

$$\begin{aligned} \frac{dv_{t_{csc-d}}}{dt} &= \frac{i_{t_{csc-d}} - i_{t_{cr-d}}}{C_s} + v_{t_{csc-q}}\omega \\ \frac{dv_{t_{csc-q}}}{dt} &= \frac{i_{t_{csc-q}} - i_{t_{cr-q}}}{C_s} - v_{t_{csc-d}}\omega \\ \frac{di_{t_{cr-d}}}{dt} &= \frac{v_{t_{csc-d}}}{L_{tcr}} + i_{t_{cr-q}}\omega \\ \frac{di_{t_{cr-q}}}{dt} &= \frac{v_{t_{csc-q}}}{L_{tcr}} - i_{t_{cr-d}}\omega \end{aligned} \quad (2-14)$$

Toutes les quantités dans l'équation (2-14) sont en p.u.. Le modèle dynamique a une forme d'équations différentielles non linéaires relatif à l'angle d'amorçage α du TCSC.

En linéarisant l'équation (14) au point de fonctionnement à l'équilibre, le modèle dynamique du TCSC avec une petite perturbation peut être développé :

$$\dot{\Delta X}_{t_{csc}} = A_t \Delta X_{t_{csc}} + B_t \Delta U = A_t \Delta X_{t_{csc}} + B_{t\omega} \Delta \omega + B_{te} \Delta X_{ne} + B_\alpha \Delta \alpha \quad (2-15)$$

où $\Delta X_{t_{csc}} = [\Delta v_{t_{csc-d}}, \Delta v_{t_{csc-q}}, \Delta i_{t_{cr-d}}, \Delta i_{t_{cr-q}}]^T$, un vecteur des variables d'état internes de TCSC comprenant les déviations de la tension de TCSC dans le repère dq et les déviations du courant de la branche TCR dans le repère dq ;

$\Delta U = [\Delta \omega, \Delta i_{t_{csc-d}}, \Delta i_{t_{csc-q}}, \Delta \alpha]^T$, un vecteur des variables d'entrée externe de TCSC comprenant les courants d'entrée du TCSC dans le repère dq , la déviation de la pulsation de rotor d'alternateur et la déviation de l'angle d'amorçage du TCSC ;

$\Delta X_{ne} = [\Delta i_{t_{csc-d}}, \Delta i_{t_{csc-q}}]^T$, les courants d'entrée du TCSC ;

$$A_t = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & -\frac{1}{C_s} & 0 \\ -\omega_0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_s} \\ d_1 & 0 & 0 & \omega_0 \\ 0 & d_1 & -\omega_0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_t = \begin{bmatrix} v_{t_{csc-q}0} & \frac{1}{C_s} & 0 & 0 \\ -v_{t_{csc-d}0} & 0 & \frac{1}{C_s} & 0 \\ i_{t_{cr-q}0} & 0 & 0 & d_2 \cdot v_{t_{csc-d}0} \\ -i_{t_{cr-d}0} & 0 & 0 & d_2 \cdot v_{t_{csc-q}0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{t\omega} = \begin{bmatrix} v_{tcsc-q0} \\ -v_{tcsc-d0} \\ i_{tcr-q0} \\ -i_{tcr-d0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_\alpha = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_2 \cdot v_{tcsc-d0} \\ d_2 \cdot v_{tcsc-q0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{te} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{avec } \omega_0 = 1, \quad d_1 = \left. \frac{1}{L_{tcr}} \right|_{\alpha_0} \quad \text{et} \quad d_2 = \left. -\frac{1}{L_{tcr}^2} \frac{dL_{tcr}}{d\alpha} \right|_{\alpha_0}.$$

Par rapport aux références [58-59], le modèle dynamique proposé peut mieux tenir compte de la dynamique de la branche du TCR et d'une petite déviation de ω , donc il est plus précis et plus pratique, et il peut s'adapter à l'analyse de la stabilité dynamique par la méthode d'analyse des valeurs propres.

Une présentation détaillée pour le modèle dynamique de TCSC peut être trouvée dans [60].

2.5 Modèle linéarisé du réseau électrique global branché avec un TCSC

2.5.1 Modèle électrique et mécanique unifié pour l'analyse des valeurs propres

Puisque la résonance hypo-synchrone constitue la résonance électrique, l'oscillation de torsion et l'interaction entre elles, on espère avoir un modèle unique, unifié et complet des systèmes électriques et mécaniques pour l'étude de la résonance hypo-synchrone. Ce modèle doit comprendre les turbines à vapeur, le système de masses-ressorts de l'arbre, de l'alternateur et de l'excitateur, les couples des turbines, le régulateur de vitesse, la ligne de transmission compensée par condensateurs, un TCSC, l'alternateur synchrone et son système d'excitation [1-3]. Donc, la performance dynamique des réseaux électriques globaux peut être décrite par une série d'équations non linéaires de premier ordre sous forme directe des quantités triphasées (a, b, c and n (neutre)) :

$$\dot{\mathbf{X}}_{abc} = f(\mathbf{X}_{abc}, \alpha) \quad (2-16)$$

où \mathbf{X}_{abc} est un vecteur de variables d'état triphasées, α est l'angle d'amorçage du TCSC i.e., l'entrée de la commande, et $f(\bullet, \bullet)$ est un vecteur de fonctions non linéaires reliées à α . L'équation (2-16) comprend les parties électriques et mécaniques du réseau électrique.

Par la transformation du repère abc au repère $dq0$, nous avons la relation (2-17) :

$$\dot{\mathbf{X}}_{dq0} = f_{dq0}(\mathbf{X}_{dq0}, \alpha) \quad (2-17)$$

Par la linéarisation au point de fonctionnement à l'équilibre pour l'équation (2-17), la forme des équations d'état avec une petite perturbation peut être obtenue en négligeant les composantes homopolaires :

$$\Delta \dot{\mathbf{X}}_{dq} = \mathbf{A}_{full} \Delta \mathbf{X}_{dq} + \mathbf{B}_{full} \Delta \alpha \quad (2-18)$$

où “ Δ ” désigne une quantité perturbée, $\Delta \mathbf{X}_{dq}$ représente un vecteur de déviation des variables d'état dans le repère dq et \mathbf{A}_{full} et \mathbf{B}_{full} représentent respectivement les matrices d'état et d'entrée.

L'équation (2-18) peut être écrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{X}}_m \\ \Delta \dot{\mathbf{X}}_e \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{full} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_m \\ \Delta \mathbf{X}_e \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{full} \Delta \alpha \quad (2-19)$$

ou

$$\Delta \dot{\mathbf{X}}_{full} = \mathbf{A}_{full} \Delta \mathbf{X}_{full} + \mathbf{B}_{full} \Delta \alpha \quad (2-20)$$

où $\Delta \mathbf{X}_{full} = [\Delta \mathbf{X}_m^T, \Delta \mathbf{X}_e^T]^T$

Pour le réseau électrique typique montré sur la figure 2-1, en considérant l'arbre de turboalternateur décrit par un système de six masses-ressorts (figure 2-3), l'alternateur, le régulateur de la tension, le régulateur de vitesse et trois bobines d'amortissement désignées par D , Q et S dans l'équation (2-19),

$\Delta \mathbf{X}_m = [\Delta \omega_H, \Delta \omega_M, \Delta \omega_{Ba}, \Delta \omega_{Bb}, \Delta \omega_g, \Delta \omega_{EX}, \Delta \delta_H, \Delta \delta_M, \Delta \delta_{Ba}, \Delta \delta_{Bb}, \Delta \delta_g, \Delta \delta_{EX}, \Delta T_H, \Delta T_M, \Delta T_B, a, g]^T$, le vecteur des variables d'état de la partie mécanique où a et g correspondent aux variables du régulateur de vitesse de turboalternateur [1] ;

$$\Delta \mathbf{X}_e = [\Delta i_{tcsc-d}, \Delta i_{tcsc-q}, \Delta i_f, \Delta i_D, \Delta i_Q, \Delta i_s, \Delta v_R, \Delta E_{FD}, \Delta v_{tcsc-d}, \Delta v_{tcsc-q}, \Delta i_{lcr-d}, \Delta i_{lcr-q}]^T,$$

le vecteur des variables d'état de la partie électrique où i_{tcsc-d} et i_{tcsc-q} représentent le courant de TCSC dans le repère dq (dans l'exemple, le courant de TCSC est le même que celui de la ligne de transmission); v_{tcsc-d} , v_{tcsc-q} , i_{lcr-d} et i_{lcr-q} représentent respectivement la tension du TCSC et le courant de la branche de TCR (figure 2-6) dans le repère dq ; i_D , i_Q et i_s correspondent respectivement aux courants des trois bobines d'amortissement de l'alternateur; et v_R et E_{FD} correspondent aux variables d'état du régulateur de l'excitation de l'alternateur [1].

Toutes les quantités sont représentées en p.u. sauf α en radian. Par conséquent, l'équation (2-20) donne un modèle mathématique uniifié précis des réseaux électriques proposé pour l'analyse de la stabilité des réseaux électriques par la méthode des valeurs propres.

2.5.2 Modèle simplifié du réseau électrique pour la conception du régulateur du TCSC

Pour faciliter la conception du régulateur du TCSC, un modèle simplifié pratique du réseau électrique est proposé avec les hypothèses habituelles suivantes [2]:

- la puissance mécanique de l'alternateur est supposée constante;
- la force électromotrice transitoire est supposée constante, donc l'équation du régulateur de tension est ignorée;
- les bobines d'amortissement de l'alternateur sont ignorées.

La première hypothèse est justifiée car la dynamique du régulateur de vitesse est lente. La deuxième hypothèse est généralement utilisée dans l'étude de stabilité et suppose que le régulateur d'excitation peut maintenir un flux constant dans le rotor de la génératrice, ce qui se justifie par la rapidité du régulateur de tension. Par la troisième hypothèse, nous ignorons l'amortissement inhérent de l'alternateur, ce qui permettra de mettre en évidence les problèmes d'oscillation et l'effet de l'amortissement obtenu par la commande du TCSC.

D'abord, d'après l'équation d'état linéarisée du réseau électrique global (2-20), un modèle simplifié du réseau électrique est proposé pour s'adapter à la conception du régulateur du TCSC avec pour objectif d'améliorer la stabilité du réseau électrique.

Supposant que le modèle dynamique du TCSC a une forme générale comme l'équation (2-15),

$$\Delta \dot{X}_{tcsc} = A_t \Delta X_{tcsc} + B_t \Delta U = A_t \Delta X_{tcsc} + B_{t\omega} \Delta \omega + B_{te} \Delta X_{ne} + B_\alpha \Delta \alpha \quad (2-21)$$

Donc le modèle général simplifié du réseau électrique peut être représenté par l'équation (2-22) :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{Dm} \\ \Delta \dot{X}_{ne} \\ \Delta \dot{X}_{tcsc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{mm} & A_{me} & 0 \\ A_{em} & A_{ee} & A_{et} \\ A_{tm} & A_{te} & A_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{Dm} \\ \Delta X_{ne} \\ \Delta X_{tcsc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_\alpha \end{bmatrix} \Delta \alpha \quad (2-22)$$

Si l'arbre d'alternateur est décrit par un système de six masses-ressorts, dans l'équation (2-22), $\Delta X_{Dm} = [\Delta \omega_H, \Delta \omega_M, \Delta \omega_{Ba}, \Delta \omega_{Bb}, \Delta \omega_g, \Delta \omega_{EX}, \Delta \delta_H, \Delta \delta_M, \Delta \delta_{Ba}, \Delta \delta_{Bb}, \Delta \delta_g, \Delta \delta_{EX}]^T$, le vecteur des variables d'état correspondant aux déviations de la pulsation et aux angles du système de six masses-ressorts de l'arbre du turboalternateur, $A_{tm} = [0_{r \times 4}, B_{t\omega}, 0_{r \times 7}]$ où "r" désigne le nombre de variables d'état ΔX_{tcsc} dans le modèle dynamique du TCSC, et $A_{te} = B_{te}$.

La forme compacte de l'équation (2-22) peut être écrite comme:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{Dm} \\ \Delta \dot{X}_{De} \end{bmatrix} = A_D \begin{bmatrix} \Delta X_{Dm} \\ \Delta X_{De} \end{bmatrix} + B_D \Delta \alpha \quad (2-23)$$

ou

$$\Delta \dot{X}_D = A_D \Delta X_D + B_D \Delta \alpha \quad (2-24)$$

où $\Delta X_{De} = [\Delta X_{ne}^T \ \Delta X_{tcsc}^T]^T$ et $\Delta X_D = [\Delta X_{Dm}^T \ \Delta X_{De}^T]^T$, et A_D et B_D représentent respectivement la matrice d'état et la matrice d'entrée,

$$\Delta X_{ne} = [\Delta i_{tcsc-d} \ \Delta i_{tcsc-q}]^T,$$

$$\Delta X_{tcsc} = [\Delta v_{tcsc-d}, \Delta v_{tcsc-q}, \Delta i_{tcrc-d}, \Delta i_{tcrc-q}]^T,$$

et

$$\Delta X_{De} = [\Delta i_{tcsc-d}, \Delta i_{tcsc-q}, \Delta v_{tcsc-d}, \Delta v_{tcsc-q}, \Delta i_{tcrc-d}, \Delta i_{tcrc-q}]^T.$$

Donc, un modèle mathématique simplifié linéarisé général des réseaux électriques avec un appareil de TCSC est obtenu pour la conception du régulateur de TCSC.

2.6 Boîte d'outils MATLAB®/SIMULINK™ /SIMUSTAB pour l'étude de la stabilité des réseaux électriques par simulation numérique

2.6.1 Méthode de modélisation

À l'aide de SIMUPELS [31], une boîte d'outils de modélisation appelée SIMUSTAB est développée dans l'environnement de MATLAB®/SIMULINK™ pour la simulation de la caractéristique dynamique des réseaux électriques avec TCSC (“Thyristor-Controlled Series Capacitor”) afin d'étudier facilement les problèmes de stabilité des réseaux électriques, spécialement, la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence. Plusieurs blocs des modèles des composants du réseau électrique sont compris dans la boîte d'outils SIMUSTAB. Les principaux blocs incluent :

- Turboalternateur synchrone incluant l'alternateur, l'arbre mécanique du turboalternateur décrit par un système de multi-masses-ressorts, AVR (“Automatic Voltage Regulator”), PSS (“Power System Stabilizer”) et le régulateur de vitesse ;
- Ligne de transmission d'énergie électrique ;
- TCSC.

Le schéma de la librairie de blocs de SIMUSTAB développée par l'auteur⁹ est montrée sur la figure 2-10.

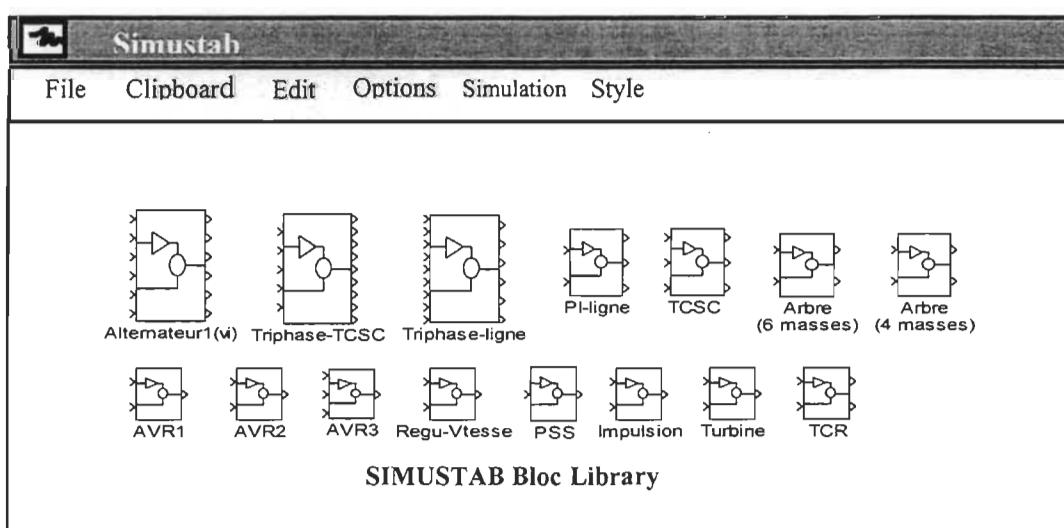


Figure 2-10 : Schéma de la librairie de blocs de SIMUSTAB

Une méthode de modélisation définie par des règles particulières est proposée pour bâtir les modèles dans la boîte d'outils SIMUSTAB et pour améliorer la simulation des réseaux électriques afin de permettre au logiciel MATLAB®/SIMULINK™ de simuler efficacement des réseaux électriques sans problèmes numériques. Les règles sont principalement décrites comme suit :

1. Il faut éviter d'utiliser le modèle (IU) pour les inductances et le modèle (UI) pour les condensateurs, où “IU” signifie que le courant “I” est choisi comme l’entrée du modèle et la tension “U” comme la sortie du modèle et “UI” signifie que la tension “U” est choisie comme l’entrée du modèle et le courant “I” comme la sortie du modèle;
2. L’alternateur synchrone doit directement démarrer à son point de fonctionnement à l’équilibre sous MATLAB®/SIMULINK™ afin d’améliorer la stabilité numérique et de réduire le temps de simulation pour l’étude de la stabilité dynamique;
3. Le commutateur idéal est adopté pour les composants commandés d’électronique de puissance.

Les modèles de la librairie SIMUSTAB permettent d’analyser les problèmes d’oscillation en basse fréquence et de la résonance hypo-synchrone simultanément et efficacement par simulation numérique sous MATLAB®/SIMULINK™. En outre, ces modèles permettent de donner les valeurs initiales dans le modèle de l’alternateur afin que l’alternateur puisse directement arriver au régime permanent pour étudier la stabilité dynamique sans problèmes numériques.

La modélisation du réseau électrique sous MATLAB®/SIMULINK™ est aussi présentées dans [61].

2.6.2 Modélisation des composants typiques dans la librairie SIMUSTAB

2.6.2.1 Modélisation du turboalternateur et de son arbre sous SIMULINK™

Le modèle est constitué par le modèle de l’alternateur synchrone et de l’arbre flexible du turboalternateur de multi-masses-ressorts ainsi que du régulateur de l’excitation, du régulateur de vitesse et du régulateur de l’excitation additionnelle du réseau électrique (PSS).

La figure 2-11 montre le modèle proposé de l'arbre du turboalternateur correspondant à l'équation (2-5) dans la boîte d'outils SIMUSTAB sous MATLAB®/SIMULINK™ et la figure 2-12 montre le modèle de la section de rotation de l'alternateur comprise dans le modèle de l'arbre.

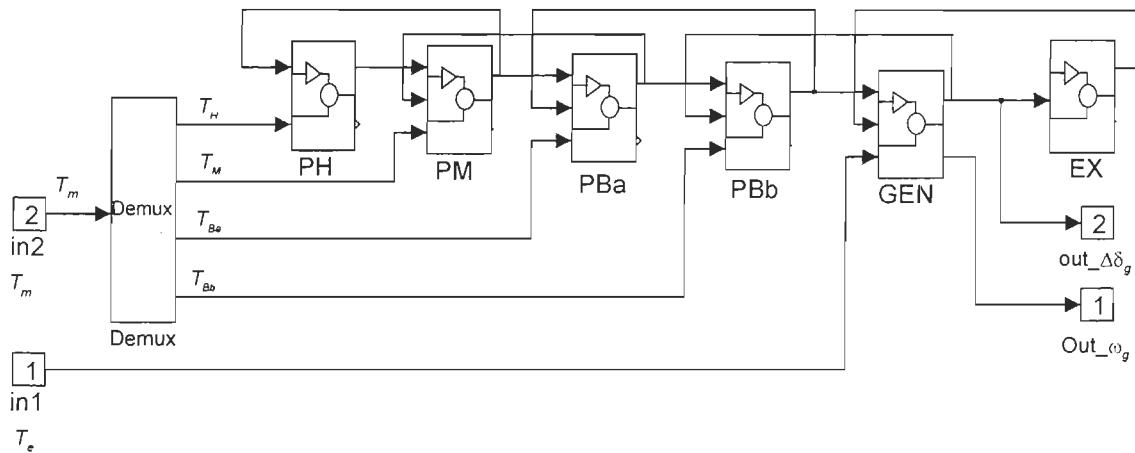


Figure 2-11: Modèle de l'arbre du turboalternateur sous SIMULINK™

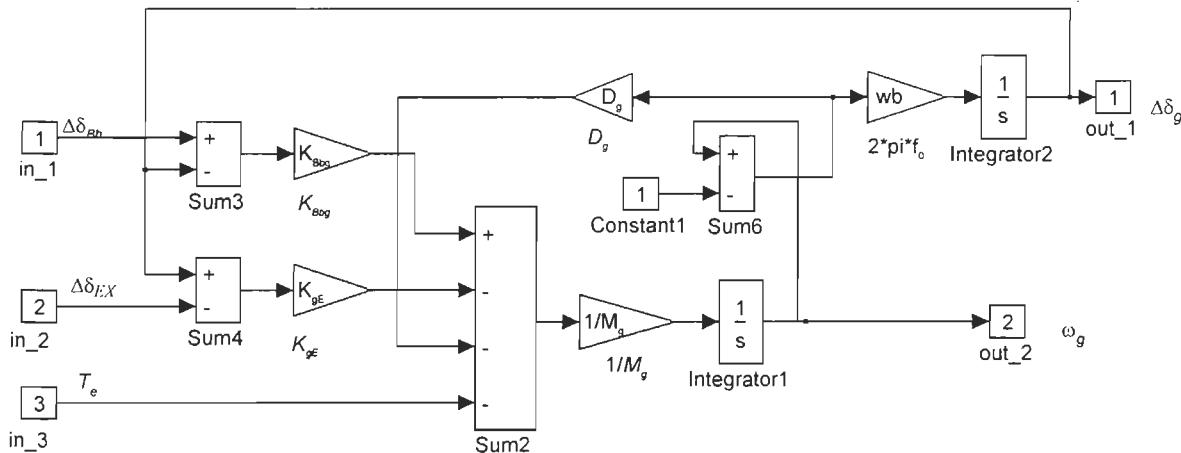


Figure 2-12: Modèle de la section de l'alternateur sous SIMULINK™

Sur la figure 2-11, les blocs PH et PM correspondent respectivement aux équations différentielles reliées à la turbine à la pression haute et à la turbine à la pression moyenne, PB_a et PB_b correspondent respectivement aux équations différentielles reliées aux turbines à la pression

basse A et à la pression basse B. Les blocs GEN et EX correspondent aux équations différentielles de rotor de l'alternateur et de l'excitateur.

2.6.2.2 Modélisation de la ligne de transmission d'énergie électrique sous SIMULINK™

Une ligne de transmission d'énergie électrique correspondant à la figure 2-5 est modélisée comme un circuit équivalent de type π . Ceci permet de représenter l'équation du réseau de transmission de façon plus simple et d'améliorer la convergence numérique. La figure 2-13 montre le modèle correspondant dans la librairie SIMUSTAB proposée sous SIMULINK™.

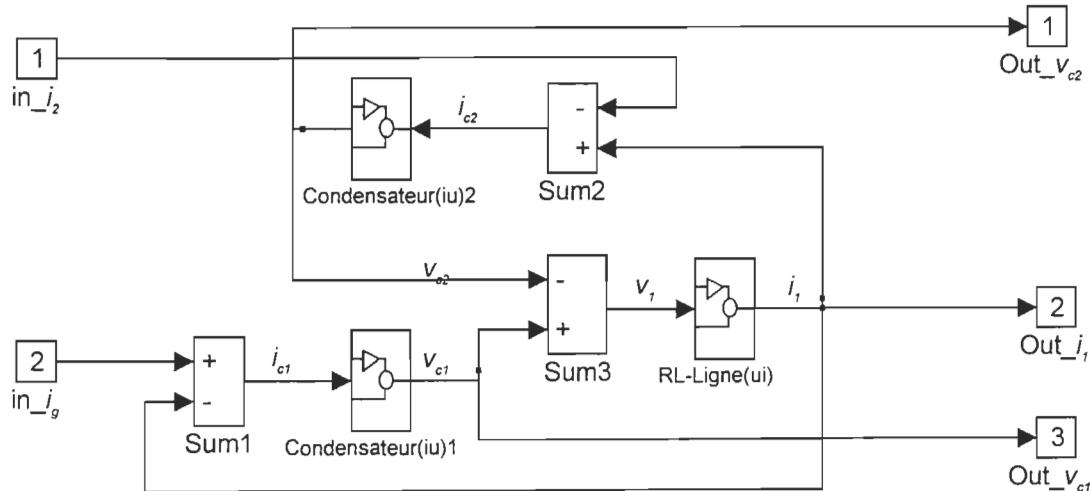


Figure 2-13 : Modèle de la ligne de transmission avec un transformateur sous SIMULINK™

2.6.2.3 Modélisation du TCSC sous SIMULINK™

Le modèle du TCSC (figure 2-6) dans la librairie SIMUSTAB comprend trois parties:

- Circuit de puissance;
- Générateur d'impulsions;
- Régulateur de rétroaction.

Le modèle du circuit de puissance est montré sur la figure 2-14.

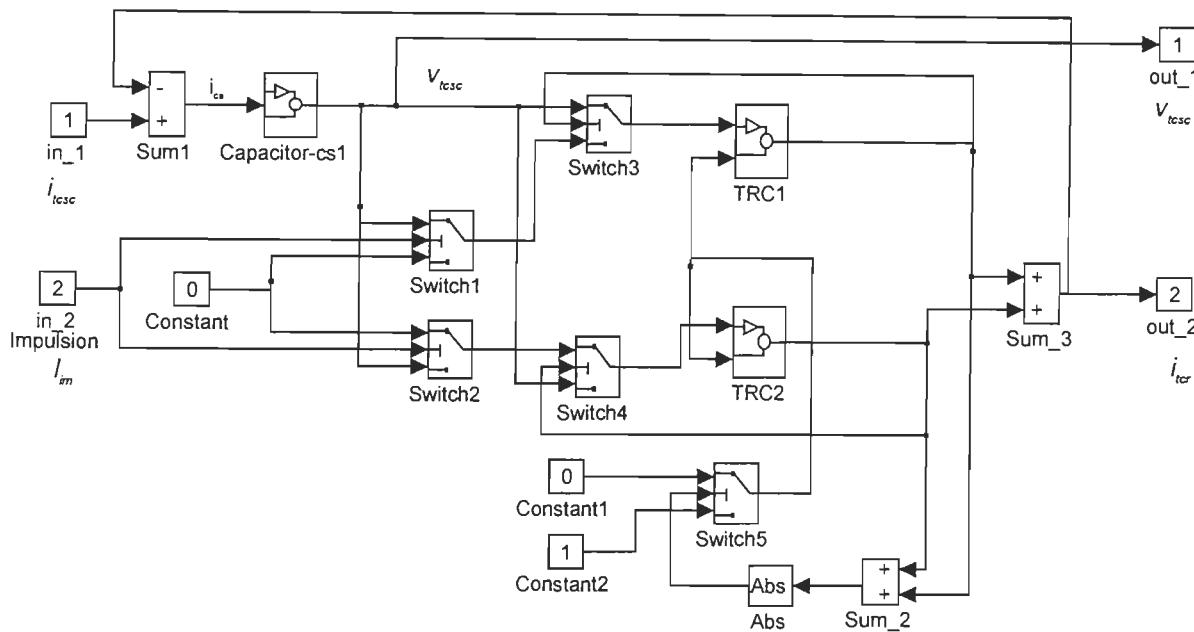


Figure 2-14 : Modèle du circuit de puissance de TCSC sous SIMULINK™

Les caractéristiques du modèle du circuit de puissance du TCSC peuvent être décrites comme suit :

- modéliser les thyristors par la méthode d'interrupteur idéal dans le modèle du circuit de puissance pour améliorer la convergence numérique et pour réduire le temps de calcul;
- permettre d'éviter le problème de calcul causé par deux constantes de temps très différentes dans deux états: état de conduction et blocage des thyristors;
- permettre à l'angle d'amorçage des thyristors d'être commandé par l'amorçage des impulsions mais permet au fonctionnement des thyristors de ne pas être influencé par la largeur d'impulsions;
- quand le signal du générateur d'impulsions arrive, un des thyristors commence à conduire et il maintient l'état de conduction si $|I_t| = I_h$ (courant de maintien des thyristors), mais les thyristors ne sont bloqués que lorsque $|I_t| < I_h$.

Le modèle du générateur d'impulsions correspondant au mode idéal d'amorçage d'impulsions montré sur la figure 2-6 est conçu sous SIMULINK™ pour les avantages de pouvoir produire exactement une série de signaux d'impulsions à tout instant désiré et d'assurer la synchronisation entre la tension v_{tcsc} de TCSC et les signaux d'impulsions. Comme les problèmes étudiés sont

ceux causés par une petite perturbation en régime permanent, la variation de la tension v_{tcsc} de TCSC est lente, ce qui permet l'utilisation du bloc $\frac{du}{dt}$ dans le modèle sans difficulté. De plus, l'angle d'amorçage peut être ajusté par le temps retardé. La figure 15 montre le modèle du générateur d'impulsions de TCSC sous SIMULINK™.

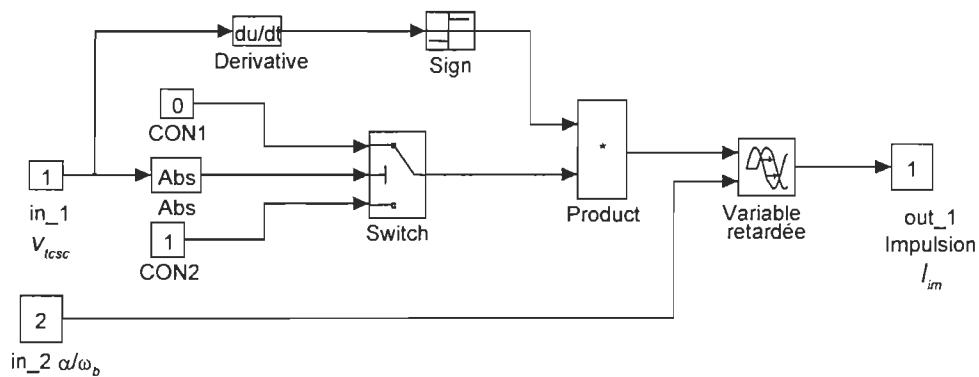


Figure 2-15 : Modèle du générateur d'impulsions de TCSC sous SIMULINK™

Le modèle global du TCSC correspondant à la figure 2-6 est montré sur la figure 2-16.

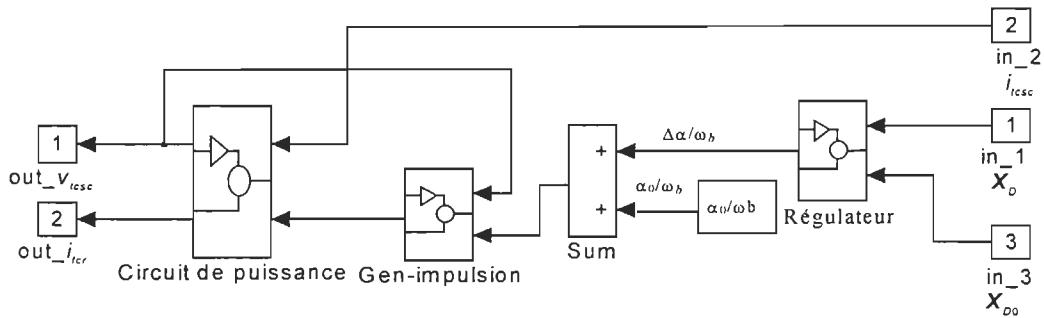


Figure 2-16 : Modèle du TCSC global sous SIMULINK™

À l'aide de la boîte d'outils SIMUSTAB, trois exemples typiques de simulation numérique des réseaux électriques dans l'environnement MATLAB[®]/SIMULINKTM sont donnés pour vérifier les modèles des principaux composants proposés dans la librairie SIMUSTAB afin de les utiliser pour étudier la stabilité des réseaux électriques. On peut trouver les résultats de la simulation à l'annexe A.

2.7 Conclusions

En se basant sur la modélisation des composants du réseau électrique, nous avons d'abord présenté un modèle électrique et mécanique unifié précis pour l'analyse des valeurs propres comme un principal moyen de validation. Ensuite, nous avons développé un modèle simplifié du réseau électrique pour la conception du régulateur d'un TCSC. De plus, nous avons proposé un modèle dynamique de TCSC qui s'adapte à l'étude de la stabilité dynamique. Ce modèle peut non seulement précisément refléter la caractéristique dynamique du TCSC, mais aussi permettre une modélisation du TCSC relativement pratique et facile pour l'étude de la stabilité dynamique des réseaux électriques avec TCSC. En se basant sur l'étude de la modélisation, nous avons établi une boîte d'outils de modélisation des réseaux électriques SIMUSTAB pour l'analyse de la stabilité des réseaux électriques par simulation numérique dans l'environnement MATLAB[®]/SIMULINKTM. Finalement, nous avons simulé trois cas typiques de fonctionnement des réseaux électriques pour valider la méthode de modélisation proposée et les modèles des composants obtenus par la méthode proposée. Par la simulations numérique, on peut remarquer :

- La méthode de modélisation des réseaux électriques proposée permet d'améliorer la convergence numérique en simulation, ce qui assure la faisabilité de simuler efficacement le fonctionnement des réseaux électriques sous MATLAB[®]/SIMULINKTM et ce qui permet d'offrir un résolution possible pour le problème relié à la modélisation et à la simulation des réseaux électriques avec les composants d'électronique de puissance sous MATLAB[®]/SIMULINKTM;
- Le modèle du TCSC établi par la méthode d'interrupteur idéal permet d'éviter le problème de calcul causé par deux constantes de temps très différentes dans deux états: conduction et

blocage des thyristors, donc la convergence numérique peut être beaucoup améliorée et le temps de calcul peut être réduit en simulation;

- Les résultats de la simulation coïncident bien au cas réel de fonctionnement du réseau électrique, ce qui montre que la méthode de modélisation proposée et les modèles des composants des réseaux électriques proposés sont fiables et efficaces pour l'étude de la stabilité du réseau électrique avec TCSC.

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE LA CARACTÉRISTIQUE D'AMORTISSEMENT DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES RELIÉE À LA STABILITÉ DYNAMIQUE

3.1 Introduction

Une tâche importante d'étude de la stabilité des réseaux électriques est de trouver le mécanisme de production des problèmes de stabilité afin de rechercher des moyens efficaces pour améliorer la stabilité. Les problèmes de résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence ont été beaucoup étudiés et les causes principales qui provoquent les deux phénomènes ont été trouvées [1-3] (chapitre 1). Ce chapitre est consacré à l'étude du mécanisme unifié de production de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence, et à l'étude de la caractéristique d'amortissement des réseaux électriques afin de trouver une approche unifiée efficace pour diminuer simultanément la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence. D'abord, nous proposons un mécanisme unifié de production de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence de l'angle d'interaction de l'amortissement entre le réseau de transmission d'énergie électrique et le turboalternateur à cause de l'échange de l'énergie électrique entre eux. De plus, nous analysons la caractéristique d'amortissement du réseau de transmission d'énergie électrique et l'influence de la commande sur la caractéristique d'amortissement du réseau électrique. Finalement, à l'aide du premier modèle de référence de IEEE, nous étudions l'amortissement du réseau électrique en fonction du niveau de compensation du condensateur en série afin de donner une explication claire de l'influence de la compensation du condensateur en série sur la caractéristique d'amortissement pour l'étude de la stabilité des réseaux électriques.

3.2 Mécanisme unifié de production de SSR et de l'oscillation en basse fréquence

L'échange de l'énergie entre un turboalternateur et le réseau de transmission d'énergie électrique durant la dynamique peut résulter du lien et d'une interaction entre eux. À cause de l'interaction, l'effet de l'amortissement faible ou même négatif du réseau électrique perturbé peut affecter

directement le turboalternateur. Si l'interaction entre l'arbre de turbo-alternateur et la ligne de transmission compensée en série par un condensateur se présente avec un amortissement faible ou même négatif pour les modes d'oscillation de torsion hypo-synchrone, les modes d'oscillation hypo-synchrone du réseau de transmission, qui ne sont pas bien amortis, seront superposés sur le système de masses-ressorts de l'arbre du turboalternateur par l'interaction, ce qui conduira à une résonance hypo-synchrone dans le réseau électrique. Pour l'oscillation en basse fréquence, si l'interaction se présente, avec l'effet de l'amortissement faible ou négatif pour les modes d'oscillation en basse fréquence, le phénomène d'oscillation en basse fréquence se produira dans le réseau de transmission à cause du manque d'amortissement mécanique. Donc l'interaction de l'amortissement entre le turboalternateur et le réseau de transmission d'énergie électrique à cause d'échange de l'énergie électrique entre eux peut déterminer la stabilité dynamique des réseaux électriques.

3.3 Analyse de la caractéristique d'amortissement des réseaux de transmission d'énergie électrique

Une signification importante du mécanisme unifié proposé dans la section 3.1 consiste à indiquer la possibilité d'éliminer simultanément et efficacement l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone. Pour atteindre ce but, une mesure cruciale est d'accroître la capacité d'amortissement des réseaux électriques pour les modes d'oscillation en basse fréquence et d'oscillation hypo-synchrone dans le réseau de transmission d'énergie électrique avec la compensation du condensateur en série afin d'améliorer l'interaction de l'amortissement entre l'alternateur et le réseau de transmission durant la dynamique. Un TCSC peut être considéré pour une telle commande.

Pour introduire une idée pour l'établissement de la stratégie de commande du TCSC, une analyse théorique de la caractéristique d'amortissement est effectuée ci-dessous.

Comme nous nous intéressons seulement aux modes d'oscillations hypo-synchrone et en basse fréquence sur le réseau de transmission d'énergie électrique, nous adoptons les hypothèses suivantes pour l'analyse :

- ignorer le système de masses-ressorts d'arbre d'alternateur;
- ignorer la résistance R_T du réseau électrique;

- ignorer les bobines d'amortissement de l'alternateur.

Le réseau électrique montré sur la figure 2-2 est employé pour l'analyse et il est représenté à nouveau à la figure 3-1.

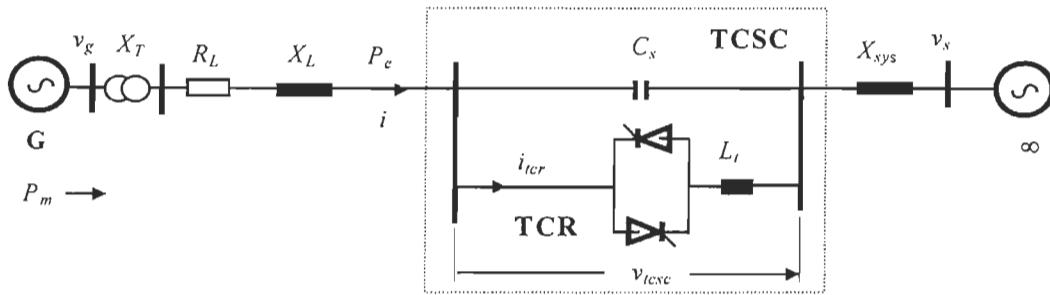


Figure 3-1 Réseau électrique typique avec TCSC

Les équations différentielles linéarisées pour le réseau électrique avec un TCSC peuvent être simplement déduites comme suit :

$$\begin{aligned}
 \dot{\Delta\delta} &= \Delta\omega \\
 \dot{\Delta\omega} &= -\frac{\omega_0}{T_j} (P_e + D_0\Delta\omega) \\
 \dot{\Delta E'_q} &= \frac{S_{Eq}}{T'_{d0}R_{Eq}} \Delta\delta + \frac{1}{T'_{d0}} \Delta E_{qe} - \frac{1}{T'_{d0}R_{Eq}} \Delta P_e \\
 \dot{\Delta E_{qe}} &= -\frac{1}{T_e} \Delta E_{qe} - \frac{K_v}{T_e} \Delta v_{gq}
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

où $D_0\Delta\omega$ désigne la puissance d'amortissement inhérent positif causée par les facteurs mécaniques comme la résistance du vent et le frottement du rotor de l'alternateur; $\Delta E'_q$ représente la déviation de la force électromotrice transitoire de l'alternateur; ΔE_{qe} représente la variable de régulation reliée au régulateur de tension de l'alternateur; Δv_{gq} désigne le signal d'entrée du régulateur de tension qui est approximativement considéré comme la déviation de la tension aux bornes de l'alternateur; K_v désigne le gain du régulateur de tension et ΔP_e représente la déviation de la puissance électromagnétique; T_j désigne l'inertie de l'alternateur; T'_{d0} désigne la constante de temps transitoire d'axe d d'alternateur et T_e désigne la constante de temps d'exciteur. Nous définissons aussi :

$$x_d \Sigma = x_d + x_L + x_{sys} + x_T + x_{tcsc}$$

$$x_q \Sigma = x_q + x_L + x_{sys} + x_T + x_{tcsc}$$

$$x'_d \Sigma = x'_d + x_L + x_{sys} + x_T + x_{tcsc}$$

$$S_{Eq} = \left. \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \right|_0 \text{ et } R_{Eq} = \left. \frac{\partial P_e}{\partial E_q} \right|_0$$

où ΔP_e est représentée comme une fonction variant avec E_q et δ ,
et

$$\Delta P_e = K_\delta \Delta \delta + K_e \Delta E'_q + K_\alpha \Delta \alpha \quad (3-2)$$

qui vient de :

$$P_e = \frac{E'_q V_s}{x_d \Sigma} \sin \delta + \frac{V_s^2}{2} \frac{x'_d \Sigma - x_q \Sigma}{x'_d \Sigma x_q \Sigma} \sin 2\delta \quad (3-3)$$

représentée comme une fonction variant avec E'_q et δ ,

$$K_\delta = \left. \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \right|_0, K_e = \left. \frac{\partial P_e}{\partial E'_q} \right|_0 \text{ et } K_\alpha = \left. \frac{\partial P_e}{\partial x_{tcsc}} \frac{\partial x_{tcsc}}{\partial \alpha} \right|_0.$$

L'équation (3-2) représente une interaction électrique reliée à l'échange de l'énergie entre l'alternateur et le réseau de transmission durant la dynamique causée par une petite perturbation. Pour la simplification de l'analyse, en ignorant le PSS, nous analysons la caractéristique d'amortissement pour les trois cas suivants :

1. le TCSC est ignoré;
2. le régulateur de l'excitation de l'alternateur et le TCSC sont ignorés;
3. le régulateur de l'excitation de l'alternateur et le TCSC sont considérés.

Dans le premier cas, $\Delta P_e = K_\delta \Delta \delta + K_e \Delta E'_q$. $K_\delta \Delta \delta$ représente une puissance synchrone qui n'affecte pas les oscillations sur le réseau. $\Delta E'_q$ peut être affecté par la régulation de l'excitation de l'alternateur et le processus transitoire de la bobine d'excitation. Ceci peut être remarqué par l'équation (3-1). Des recherches ont montré que la régulation de l'excitation de l'alternateur peut apporter de l'amortissement négatif sur le réseau électrique [2], ce qui signifie que $K_e \Delta E'_q$ inclut

une puissance d'amortissement négatif représentée par $-D_e\Delta\omega$ ($D_e>0$). La puissance d'amortissement totale ΔP_d est égale à $(D_0-D_e)\Delta\omega$. Dans ce cas, le problème d'oscillation en basse fréquence se produira à cause de l'amortissement faible (quand $D_0-D_e \geq 0$, sans suffire à amortir les modes d'oscillation en basse fréquence) ou même à cause de l'amortissement négatif (quand $D_0-D_e<0$). Avec la compensation du condensateur en série, le problème de résonance hypo-synchrone se produit si l'amortissement total est négatif ou s'il ne suffit pas pour amortir les modes d'oscillation hypo-synchrone sur le réseau de transmission d'énergie électrique (quand $D_0- D_e\geq 0$).

Dans le deuxième cas, $\Delta P_e = K_\delta\Delta\delta + K_e\Delta E'_q$. $\Delta E'_q$ dépend seulement du processus transitoire de la bobine d'excitation et l'interaction électrique entre l'alternateur et le réseau, ce qui peut être aussi trouvé de l'équation (3-1). Généralement, dans ce cas, il y a rarement de problèmes d'oscillation en basse fréquence car l'amortissement inhérent positif joue un rôle dominant dans le réseau. Pourtant, pour le réseau avec la compensation du condensateur en série, le problème de résonance hypo-synchrone se produit encore si l'amortissement inhérent ne suffit pas pour amortir les modes d'oscillation hypo-synchrone sur le réseau de transmission d'énergie électrique.

Dans le troisième cas, $\Delta P_e = K_\delta\Delta\delta + K_e\Delta E'_q + K_\alpha\Delta\alpha$. Le TCSC est branché avec le réseau de transmission et contribue une puissance électromagnétique contrôlable $K_\alpha\Delta\alpha$. Ceci fournit la possibilité que la puissance électromagnétique $K_\alpha\Delta\alpha$ contribuée par le TCSC puisse compenser l'effet de la puissance d'amortissement négatif causé par la régulation de l'excitation et même permettre à la variation de la puissance électromagnétique ΔP_e durant la dynamique de devenir une puissance désirée d'amortissement positif $D_d\Delta\omega$ qui suffit pour amortir simultanément les oscillations en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone durant le processus dynamique en commandant l'angle d'amorçage des thyristors par une stratégie de commande du TCSC appropriée. Par conséquent, selon l'analyse de l'amortissement ci-dessus, une idée reliée à l'établissement de la stratégie de commande du TCSC est développée, i.e. obtenir une interaction avec l'amortissement désiré positif entre l'alternateur et le réseau de transmission par la commande du TCSC afin d'atteindre un effet unifié pour améliorer la stabilité dynamique.

3.4 Analyse de la caractéristique d'amortissement à l'aide du premier modèle de référence de IEEE

Le premier modèle de référence de IEEE (“IEEE First Benchmark Model”) a été recommandé par IEEE [20] pour étudier le problème de résonance hypo-synchrone. Ce réseau est principalement composé d'un turboalternateur, un transformateur, une impédance de la ligne de transmission, un condensateur en série et une source infinie. La figure 3-2 montre le réseau électrique représenté par le premier modèle de référence de IEEE où l'arbre du turboalternateur est modélisé par un système de six masses-ressorts.

L'analyse des valeurs propres est employée pour trouver l'effet de la compensation du condensateur sur la résonance hypo-synchrone afin d'analyser la caractéristique d'amortissement pour le réseau électrique. Le tableau 3-1 donne les résultats du calcul des valeurs propres du réseau correspondant aux modes mécaniques de six masses-ressorts de l'arbre du turboalternateur avec les niveaux de compensation de $k_c=0.05$ à 0.7 où $k_c= X_c/X_L$ qui désigne le niveau de compensation du condensateur en série. La partie réelle des valeurs propres correspondant aux modes mécaniques est tracée de $k_c=0.05$ à 0.7 au pas principal 0.1 sur les figures 3-3, 3-4, 3-5, 3-6, 3-7, 3-8 et 3-9. À l'aide de la technique d'identification des valeurs propres, les modes mécaniques correspondant à chaque section du système de six masses-ressorts de l'arbre du turboalternateur peuvent être identifiés [1]. Dans le tableau 3-1, les modes mécaniques sont représentés comme le mode 1, le mode 2, le mode 3, le mode 4, le mode 5 et le mode 6 qui correspondent respectivement à la section de turbine à la pression haute PH, à la section de turbine à la pression moyenne PM, à la section de turbine à la pression basse PB_a, à la section d'excitateur EX et à la section de turbine à la pression basse PB_b et à la section d'alternateur GEN de l'arbre du turboalternateur. Le mode 1 correspond à l'oscillation hypo-synchrone à la fréquence la plus haute et le mode 6 correspond à l'oscillation électromécanique en basse fréquence. Le modèle de l'arbre du turboalternateur a été montré sur la figure 2-3.

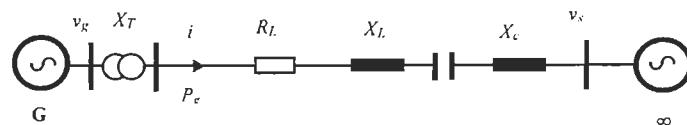


Figure 3-2 : Réseau électrique représenté par le premier modèle de référence de IEEE

Partie réelle

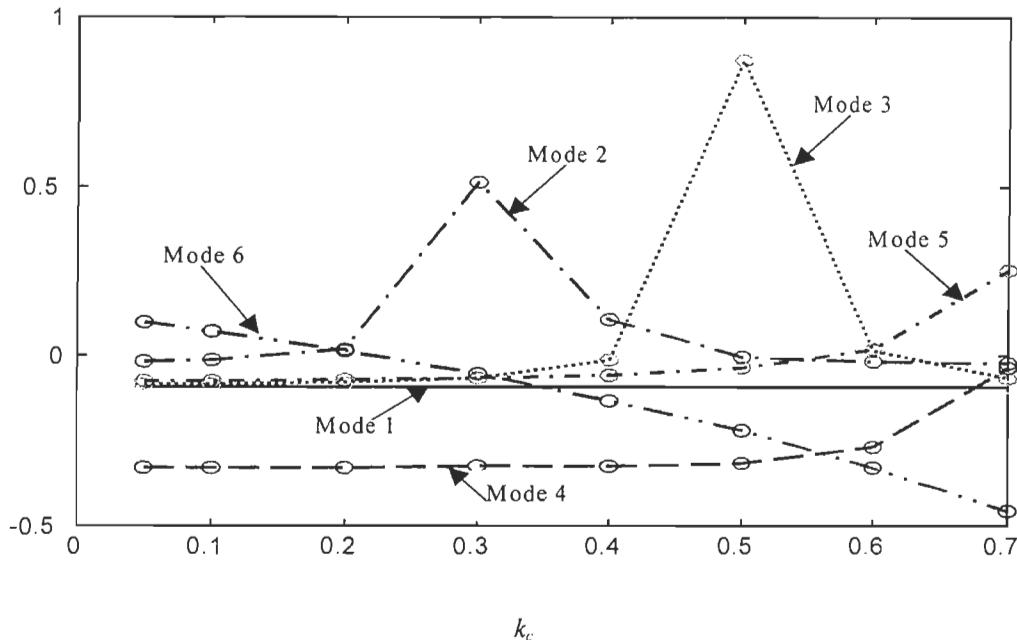


Figure 3-3: Tracé de la partie réelle des valeurs propres reliées au système de six masses-ressorts

Tableau 3-1 : Valeurs propres reliées aux modes mécaniques du turboalternateur

Mode	$k_c=0.05$	$k_c=0.1$	$k_c=0.2$	$k_c=0.3$
1	-0.09 + 298.18i	-0.09 + 298.18i	-0.09 + 298.18i	-0.09 + 298.18i
2	-0.01 + 202.98i	-0.01 + 203.00i	0.02 + 203.10i	0.51 + 203.46i
3	-0.08 + 160.61i	-0.08 + 160.62i	-0.08 + 160.64i	-0.07 + 160.69i
4	-0.33 + 127.02i	-0.33 + 127.02i	-0.33 + 127.03i	-0.33 + 127.04i
5	-0.08 + 99.07i	-0.07 + 99.09i	-0.07 + 99.15i	-0.07 + 99.23i
6	0.10 + 7.87i	0.07 + 8.07i	0.01 + 8.50i	-0.05 + 8.96
Mode	$k_c=0.4$	$k_c=0.5$	$k_c=0.6$	$k_c=0.7$
1	-0.09 + 298.18i	-0.09 + 298.18i	-0.09 + 298.18i	-0.09 + 298.18i
2	0.11 + 202.50i	0.00 + 202.72i	-0.02 + 202.78i	-0.02 + 202.82i
3	-0.01 + 160.82i	0.87 + 160.81i	0.02 + 160.21i	-0.06 + 160.38i
4	-0.32 + 127.05i	-0.31 + 127.08i	-0.27 + 127.16i	-0.03 + 126.77i
5	-0.06 + 99.33i	-0.03 + 99.50i	0.02 + 99.78i	0.25 + 100.43i
6	-0.13 + 9.47i	-0.22 + 10.04i	-0.33 + 10.69i	-0.46 + 11.42i

Partie réelle

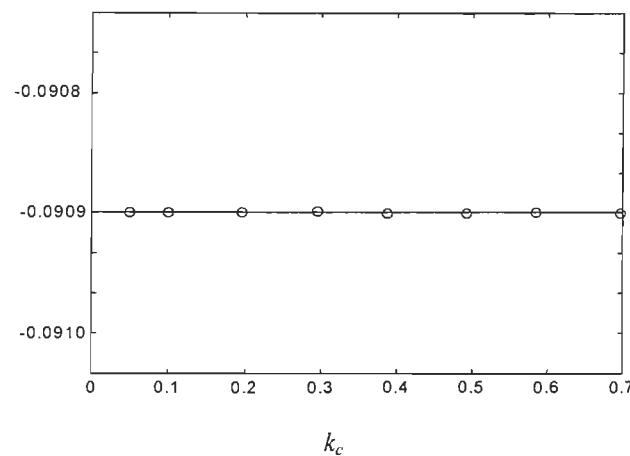


Figure 3-4 : Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 1(298 rad/s)

Partie réelle

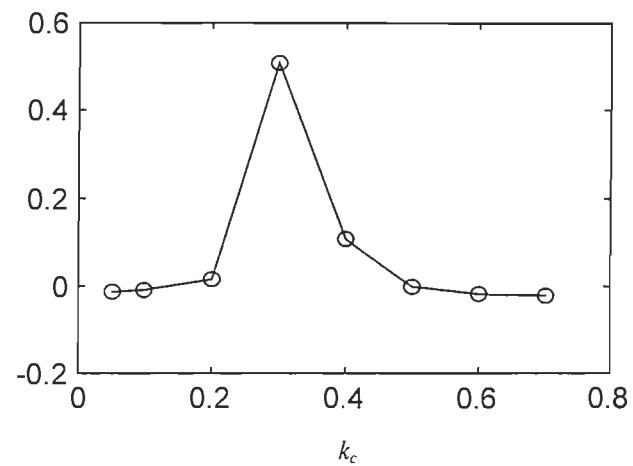


Figure 3-5 : Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 2 (203 rad/s)

Partie réelle

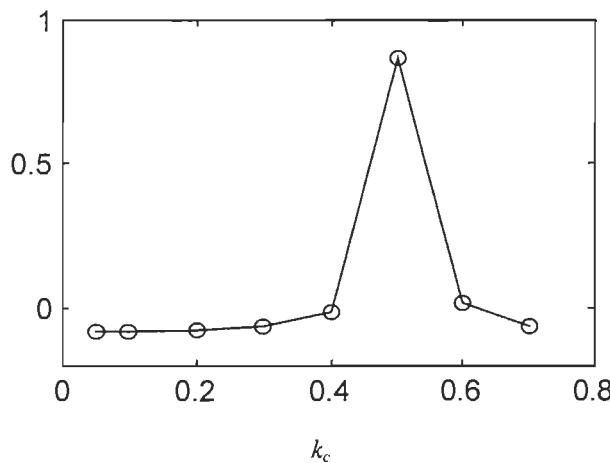


Figure 3-6 : Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 3 (160 rad/s)

Partie réelle

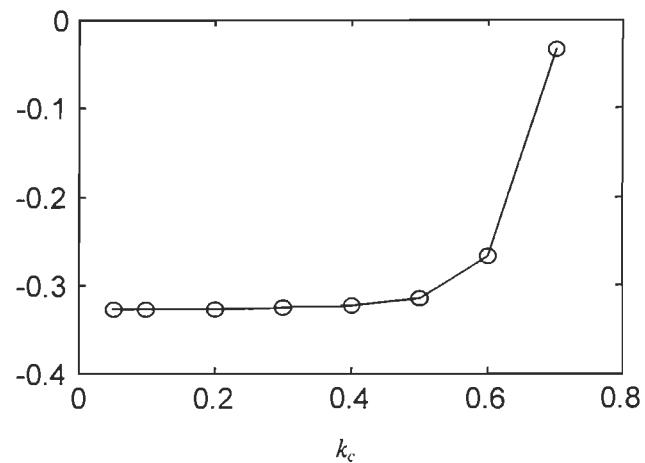


Figure 3-7 : Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 4 (127 rad/s)

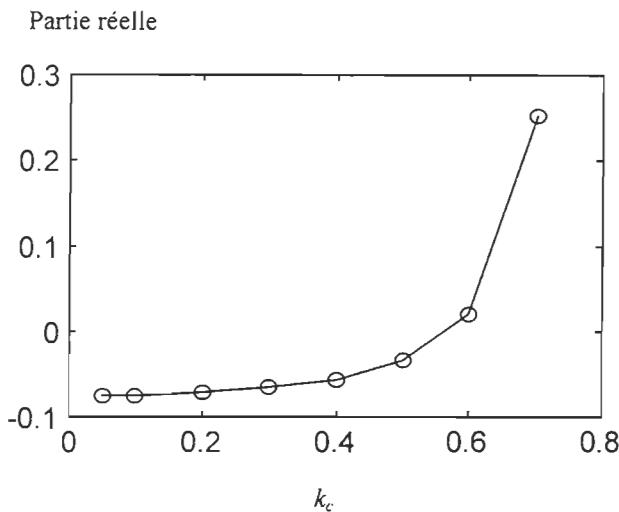


Figure 3-8 : Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 5 (99 rad/s)

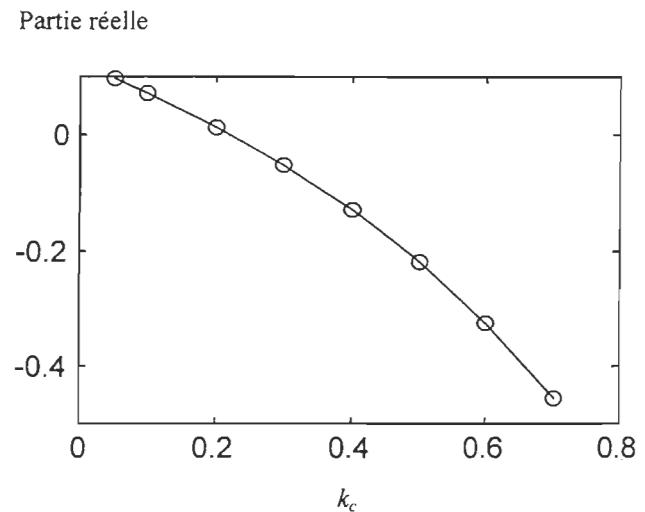


Figure 3-9 : Tracé de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 6 (9 rad/s)

Par l'analyse et l'observation des résultats montrés dans le tableau 3-1 et sur les figures 3-3 à 3-9, on peut remarquer les phénomènes significatifs suivants :

- La partie réelle du mode 1 (298 rad/s) correspondant à la turbine à la pression haute PH ne varie presque pas avec le niveau de compensation du condensateur. Lorsque le niveau de compensation du réseau k_c varie de 0.05 à 0.7, elle a toujours une partie réelle négative. La compensation du condensateur en série n'influence donc presque pas l'amortissement au mode d'oscillation hypo-synchrone à la fréquence supérieure, ce qui peut être observé au tableau 3-1 et aux figures 3-3 et 3-4;
- La résonance hypo-synchrone reliée au mode 4 (127 rad/s) correspondant à la section d'exciteur EX ne se produit pas dans le réseau lorsque le niveau de compensation du réseau k_c varie de 0.05 à 0.7, mais la partie réelle du mode s'accroît avec l'accroissement du niveau de compensation du réseau k_c , ce qui signifie que l'amortissement du mode 127 rad/s s'affaiblit avec l'accroissement du niveau de compensation k_c du réseau. Spécialement, lorsque le niveau de compensation du réseau $k_c \geq 0.4$, la diminution de l'amortissement devient plus évidente. Ce phénomène peut être observé au tableau 3-1 et aux figures 3-3 et 3-7;

- Les trois modes d'oscillation hypo-synchrone instable comme le mode 2 (203 rad/s), le mode 3 (160 rad/s) et le mode 5 (99 rad/s) existent dans le réseau électrique lorsque le niveau de compensation s'accroît, ce qui peut être trouvé du tableau 3-1 et des figures 3-3, 3-5, 3-6 et 3-8. Ils correspondent respectivement à la section de turbine à la pression moyenne PM, à la section de turbines à la pression basse PB_a et à la section de turbines à la pression basse PB_b;
- L'oscillation hypo-synchrone instable au mode 2 (203 rad/s) se produit dans la région approximative $0.12 < k_c < 0.5$ où la partie réelle du mode est positive, donc l'amortissement du mode est négatif. L'amortissement le pire se produit vers $k_c = 0.3$, ce qui peut être observé du tableau 3-1 et aux figures 3-3 et 3-5;
- Le mode 3 (160 rad/s) d'oscillation hypo-synchrone instable se produit dans l'intervalle approximatif $0.4 < k_c < 0.62$ où l'amortissement du mode est négatif. L'amortissement le pire se produit vers $k_c = 0.5$, ce qui peut être observé du tableau 3-1 et aux figures 3-3 et 3-6;
- Le mode 5 (99 rad/s) d'oscillation hypo-synchrone instable se produit lorsque k_c excède environ 0.55. Il y a une diminution de l'amortissement plus évidente lorsque $0.5 < k_c < 0.7$. Avec l'accroissement du niveau de compensation k_c , l'amortissement du mode se détériore, ce qui peut être observé du tableau 3-1 et aux figures 3-3 et 3-8;
- Le mode 6 (9 rad/s) d'oscillation en basse fréquence instable relié à la section de l'alternateur se produit lorsque le niveau de compensation k_c est très petit, soit dans l'intervalle approximatif $k_c < 0.22$. Avec l'accroissement du niveau de compensation k_c , l'amortissement de ce mode d'oscillation en basse fréquence devient de plus en plus fort et le phénomène d'oscillation en basse fréquence disparaît dans le réseau, ce qui peut être observé du tableau 3-1 et aux figures 3-3 et 3-9.

En outre, d'après la figure 3-3, on peut conclure une tendance générale reliée au phénomène d'oscillation des modes mécaniques. Ceci est décrit comme suit :

- Lorsque le niveau de compensation est très faible (ex. $k_c < 0.22$), le réseau électrique se présente principalement avec l'oscillation en basse fréquence à la fréquence 8 rad/s. Dans ce cas, le problème de stabilité du réseau est principalement relié à l'oscillation en basse fréquence à cause du manque d'amortissement mécanique;
- Lorsque le niveau de compensation est faible ($0.15 < k_c < 0.2$), l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone existent faiblement simultanément dans le réseau électrique qui présente un amortissement relativement faible;

- Lorsque le niveau de compensation est de l'ordre de $0.2 \leq k_c \leq 0.4$, l'oscillation en basse fréquence disparaît et la résonance hypo-synchrone du mode 203 rad/s se produit dans le réseau. D'abord, elle s'accroît graduellement avec k_c jusqu'à arriver à une valeur de k_c où l'amortissement au mode 203 rad/s devient le pire. Ensuite, l'oscillation de torsion hypo-synchrone du mode 203 rad/s commence à s'atténuer graduellement avec l'accroissement de k_c ;
- Lorsque le niveau de compensation est plus fort ($0.4 < k_c < 0.55$), la résonance hypo-synchrone des deux modes mécaniques 203 rad/s et 160 rad/s existe simultanément dans le réseau. Dans cet intervalle, l'oscillation du mode 203 rad/s continue à s'atténuer graduellement jusqu'à sa disparition et le mode 160 rad/s joue un rôle dominant et il devient le plus fort à une valeur de k_c d'environ 0.5;
- Lorsque le niveau de compensation est fort ($0.55 < k_c < 0.6$), l'oscillation de torsion hypo-synchrones aux modes 160 rad/s et 99 rad/s existent simultanément. Le mode 160 rad/s joue un rôle dominant encore, mais l'oscillation de torsion hypo-synchrone au mode 99 rad/s s'accroît graduellement avec l'accroissement de k_c ;
- Lorsque le niveau de compensation est très fort ($0.6 < k_c < 0.7$), le mode 99 rad/s devient le mode dominant et seulement une oscillation très faible du mode 160 rad/s existe simultanément. Elle diminue graduellement avec l'accroissement de k_c jusqu'à disparaître lorsque $k_c > 0.62$.

Donc, en se basant sur cette analyse de l'interaction de l'amortissement, nous pouvons caractériser l'influence de la compensation du réseau en série sur l'oscillation d'arbre du turboalternateur :

- La compensation du réseau de transmission en série peut affaiblir l'amortissement exercé sur les modes d'oscillation hypo-synchrone du turboalternateur par l'interaction entre le turboalternateur et le réseau de transmission dans le processus d'échange d'énergie électrique, mais elle peut accroître l'amortissement pour les modes d'oscillation en basse fréquence;
- La compensation du réseau de transmission n'a pas d'influence essentielle sur l'amortissement exercé sur les modes d'oscillation à la fréquence supérieure hypo-synchrone par l'interaction dans le processus dynamique. Par conséquent, généralement, la commande du réseau de transmission n'a pas de grande signification pour améliorer l'oscillation hypo-synchrone aux modes à la fréquence supérieure hypo-synchrone comme, par exemple, le

mode 1 (298 rad/s) montré dans le tableau 3-1. D'autres résultats peuvent également supporter le point de vue proposé [1, 37-38]. Donc, nous pouvons supposer que l'amortissement inhérent de turboalternateur a un effet dominant sur la diminution de l'oscillation de ces modes;

- Dans le réseau électrique avec la compensation générale (ex. $0.3 \leq k_c \leq 0.6$) du condensateur en série, les modes d'oscillation hypo-synchrone les plus dangereux sont ceux à la fréquence moyenne pour lesquels la résonance hypo-synchrone se produit facilement comme, par exemple, le mode 2 (203 rad/s) et le mode 3 (160 rad/s) donnés dans le tableau 3-1;
- Pour les modes d'oscillation hypo-synchrone en plus basse fréquence comme par exemple, le mode 4 (127 rad/s) et le mode 5 (99 rad/s), la résonance hypo-synchrone se produit généralement à ces modes dans le cas où le niveau de compensation du réseau de transmission est relativement fort;
- L'amortissement aux modes d'oscillation reliés au système de masses-ressorts du turboalternateur est une fonction non monotone et non linéaire du niveau de compensation du réseau de transmission. Donc, il faut choisir convenablement le niveau de compensation afin de réduire la possibilité de production de la résonance hypo-synchrone.

Si on considère l'influence de l'amortissement inhérent du turboalternateur, les idées proposées seront peu modifiées.

3.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons étudié la caractéristique d'amortissement des réseaux électriques et établi un mécanisme unifié de production de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence. Le mécanisme unifié peut être brièvement résumé comme suit :

l'interaction de l'amortissement faible ou même négatif entre le turboalternateur et le réseau de transmission d'énergie à cause de l'échange de l'énergie électrique durant la dynamique est une cause directe de la résonance hypo-synchrone d'arbre du turboalternateur et de l'oscillation en basse fréquence du réseau électrique. Ainsi l'amélioration de l'interaction de l'amortissement entre le turboalternateur et le réseau de transmission d'énergie pourra directement contribuer à diminuer simultanément la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence.

Par l'analyse de l'amortissement du réseau, nous avons vérifié la possibilité que la commande unifiée de TCSC pour le réseau de transmission peut contribuer à l'amélioration de l'interaction de l'amortissement entre le turboalternateur et le réseau de transmission électrique afin d'améliorer la stabilité des réseaux électriques.

Finalement, à l'aide du réseau électrique représenté par le premier modèle de référence de IEEE, nous avons étudié en détail la relation de l'amortissement entre l'oscillation de l'arbre du turboalternateur et la compensation du réseau de transmission, ce qui peut aider à analyser l'interaction de l'amortissement durant la dynamique. En se basant sur l'étude, nous avons tiré des conclusions utiles résumées comme suit :

- La compensation du réseau de transmission en série peut provoquer la résonance hypo-synchrone de l'arbre du turboalternateur dans le réseau électrique en affaiblissant l'amortissement des modes d'oscillation hypo-synchrone, mais elle peut améliorer ou même éliminer l'oscillation en basse fréquence dans le réseau électrique en accroissant l'amortissement pour les modes d'oscillation en basse fréquence;
- Les modes d'oscillation hypo-synchrone d'arbre du turboalternateur à la fréquence supérieure ne sont presque pas influencés par la compensation du réseau de transmission;
- Dans le réseau électrique avec la compensation générale du condensateur en série, la résonance hypo-synchrone se produit facilement aux modes d'oscillation à la fréquence moyenne hypo-synchrone;
- La résonance hypo-synchrone se produit généralement aux modes d'oscillation en plus basse fréquence hypo-synchrone dans le cas où le niveau de compensation du réseau de transmission est relativement fort.

CHAPITRE 4

DÉVELOPPEMENT D'UNE STRATÉGIE DE COMMANDE UNIFIÉE DU TCSC

4.1 Introduction

La transmission de puissance sur les lignes longues est limitée principalement par la réactance inductive en série des lignes de transmission, donc la compensation par condensateur en série a été introduite il y a presque vingt ans pour accroître la capacité de transmission de puissance. La compensation par condensateur commandé en série est une application de la technologie des FACTS. Le TCSC (“Thyristor-Controlled Series Capacitor”) est un compensateur typique commandé en série dans les appareils de FACTS et il permet de commander la répartition de la puissance sur les lignes de transmission en régime permanent suivant le trajet désiré. De plus, il permet d’améliorer l’oscillation de la puissance sur les lignes de transmission et de diminuer la résonance hypo-synchrone. La répartition raisonnable de l’énergie électrique et la stabilité des réseaux électriques sont deux points cruciaux de fonctionnement des réseaux électriques.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l’étude et le développement d’une stratégie de commande d’un TCSC avec pour objectif principal d’améliorer la stabilité des réseaux électriques sans modifier la répartition désirée de la puissance de la ligne de transmission. Notre étude vise particulièrement les problèmes d’oscillation en basse fréquence et de résonance hypo-synchrone. L’efficacité, l’uniformité et la localisation d’entrée de commande sont soulignées dans la spécification de la stratégie de commande du TCSC. Ceci signifie principalement que sous un même schéma de commande de TCSC avec rétroaction des variables d’état locales, l’oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone peuvent être amorties efficacement et simultanément, et en même temps le plan de répartition de la puissance des lignes de transmission désiré n’est pas affecté, ce qui constitue un apport original de notre étude.

Nous analysons d’abord le principe de commande d’un TCSC et définissons les caractéristiques souhaitées de la stratégie de commande du TCSC pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. De plus, un indice de performance pour l’évaluation de la stabilité est développé pour

s'adapter à la conception du régulateur de TCSC et une méthode de conception de la commande du TCSC est proposée. Finalement, le processus d'établissement de la stratégie de commande unifiée du TCSC et son implantation sur des réseaux électriques basés sur les modèles de référence de IEEE [20-21] sont présentés en détail.

4.2 Principe de commande d'un TCSC pour améliorer la stabilité des réseaux électriques

Lorsque le réseau électrique n'est pas assez amorti, une perturbation minime peut causer l'oscillation de l'angle de l'alternateur autour des valeurs de fonctionnement initiales. L'oscillation de l'angle de l'alternateur peut provoquer une oscillation de la puissance sur les lignes de transmission autour de la puissance initiale transmise. Généralement, l'oscillation est en basse fréquence. Le manque d'amortissement suffisant est un facteur de restriction pour la puissance transmise sur les lignes de transmission. Un TCSC peut être appliqué pour amortir efficacement l'oscillation de la puissance.

Pour amortir l'oscillation de la puissance, il est nécessaire de varier la compensation appliquée afin d'assister au secouement du rotor d'alternateur dans les processus d'accélération et de décélération. En effet, lorsque le rotor d'alternateur accélère, i.e., l'angle δ s'accroît ($\frac{d\delta}{dt} > 0$), la puissance électrique transmise doit être accrue pour compenser la puissance mécanique d'entrée excessive. Similairement, lorsque le rotor d'alternateur décèle, i.e., l'angle δ décroît ($\frac{d\delta}{dt} < 0$),

la puissance électrique transmise doit être réduite pour balancer la puissance mécanique d'entrée insuffisante.

Pour la démonstration, nous considérons un modèle simple de deux alternateurs avec la compensation du condensateur contrôlable montré sur la figure 4-1. La réactance de transmission effective X_{eff} avec la compensation du condensateur en série est donnée par

$$X_{eff} = X_L - X_c$$

ou

$$X_{eff} = (1-k_c)X_L$$

où k_c est le niveau de compensation en série, c'est à dire,

$$k_c = X_c/X_L$$

Supposant $V_g = V_s = V$, la puissance électrique active peut être déduite :

$$P_s = \frac{V^2}{X_L(1 - k_c)} \sin \delta \quad (4-1)$$

En linéarisant l'équation (4-1) autour des valeurs initiales de fonctionnement, on peut obtenir l'équation de la déviation de P_s en fonction de la déviation de l'angle d'alternateur δ et de la déviation du niveau de compensation k_c sous une petite perturbation :

$$\Delta P_s = \frac{V^2}{X_L(1 - k_c)} \Big|_0 \cos \delta_0 \Delta \delta + \frac{V^2}{X_L(1 - k_c)^2} \sin \delta \Big|_0 \Delta k_c \quad (4-2)$$

Pour comprendre facilement l'influence du compensateur commandé en série sur la réactance de la ligne de transmission, nous représentons son modèle à la figure 4-2. D'après l'équation (2-7) présentée dans la section 2-3, on peut écrire l'équation de la réactance de branche TCR dans un TCSC, en ne considérant que l'onde fondamentale, en fonction de l'angle d'amorçage α du TCSC :

$$X_{tcr}(\alpha) = \frac{\pi X_t}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad \left(\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi \right) \quad (4-3)$$

La réactance équivalente de TCSC est représentée par :

$$X_{tcs}(\alpha) = \frac{X_{cs} X_{tcr}}{X_{tcr} - X_{cs}} \quad (4-4)$$

Ainsi, le niveau de compensation équivalente k_c du réseau électrique avec un TCSC peut être déduit comme :

$$k_c(\alpha) = \frac{X_{tcs}(\alpha)}{X_L} \quad (4-5)$$

où X_L désigne la réactance totale de la ligne de transmission branchée avec un TCSC.

On remarque que lorsque la commande du régulateur de TCSC fonctionne, k_c de réseau de transmission est en fonction de l'angle d'amorçage α des thyristors de TCSC et la relation $k_c(\alpha)$ dépend des paramètres X_L et X_t .

De plus, des équations (4-4) et (4-5), on remarque que $X_{tcsc} > 0$ signifie $k_c > 0$, i.e., la compensation capacitive et que $X_{tcsc} < 0$ signifie $k_c < 0$, i.e., la compensation inductive.

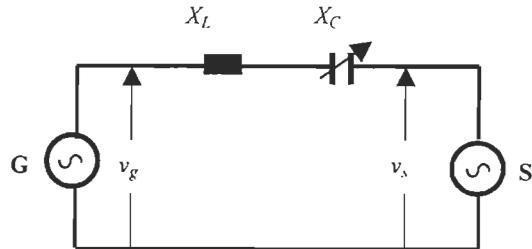


Figure 4-1 : Réseau électrique simplifié

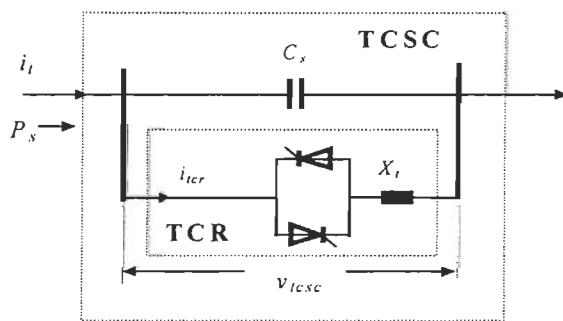


Figure 4-2 : TCSC typique

La relation de la puissance électrique active transmise correspondant à l'équation (4-1) avec l'angle d'alternateur δ est donnée à la figure 4-3 et la variation de k_c en fonction de l'angle d'alternateur δ correspondant à l'équation 4-5 est montrée sur la figure 4-4.

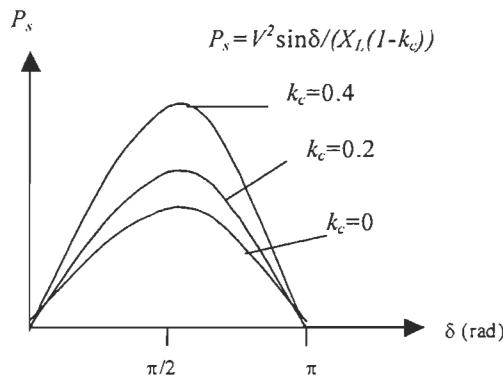


Figure 4-3 : Puissance électrique active transmise en fonction de l'angle d'alternateur δ

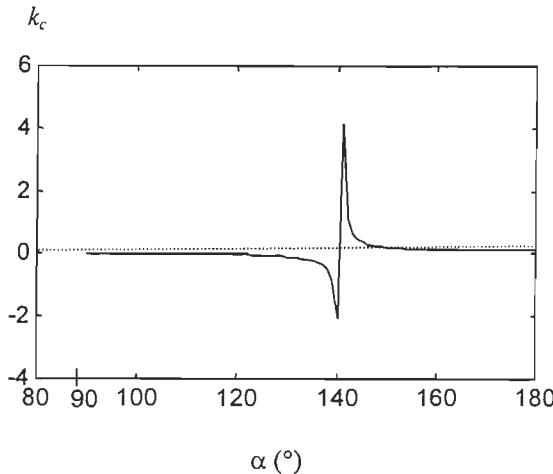


Figure 4-4 : Variation de k_c en fonction de l'angle d'amorçage de TCSC α

Cette figure démontre que la compensation de la ligne de transmission peut varier dans une large plage de l'état de fonctionnement inductif à l'état de fonctionnement capacif à l'aide de la commande de l'angle d'amorçage α des thyristors du TCSC. Des équations (4-1) à (4-4) et des figures 4-3 et 4-4, on peut remarquer que P_s varie avec k_c et avec δ , et en même temps k_c varie avec l'angle d'amorçage α du régulateur de TCSC. Par conséquent, on peut commander la déviation de la puissance électrique en commandant l'angle d'amorçage des thyristors du TCSC et arriver au but d'amortir l'oscillation de puissance du réseau électrique, i.e., la caractéristique de commande du TCSC pour la réactance permet, dans le processus d'accélération du rotor de l'alternateur, d'accroître P_s pour compenser la puissance mécanique d'entrée excessive et dans le processus de décélération du rotor de l'alternateur, de réduire P_s pour équilibrer la puissance mécanique d'entrée insuffisante pour obtenir un effet d'amortissement suffisant afin d'amortir l'oscillation de la puissance sur la ligne de transmission.

En général, pour un réseau électrique compensé par un condensateur en série comme, par exemple le réseau montré sur la figure 2-2, lorsque le niveau de compensation du réseau en série est relativement élevé, les oscillations de la torsion avec multi-modes se produisent, et lorsque le niveau de compensation du réseau est relativement faible, les oscillations en basse fréquence peuvent se produire et il est aussi possible que les oscillations en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone puissent exister simultanément dans le réseau électrique. Cependant, ce cas

simultané dépend encore d'autres facteurs comme, par exemple, la commande de l'excitation de l'alternateur et d'autres commandes des lignes de transmission.

Pour la résonance hypo-synchrone, en commandant adéquatement le niveau de compensation équivalent en série k_c ou en ajustant sa caractéristique de réactance du fonctionnement inductif au fonctionnement capacitif, un TCSC permet d'accroître l'effet de l'amortissement des modes d'oscillation hypo-synchrone, et de varier les fréquences d'oscillation hypo-synchrone sur la ligne de transmission afin de réduire la possibilité de production de la résonance hypo-synchrone du réseau électrique.

Par conséquent, on peut utiliser la caractéristique du TCSC pour la commande de réactance pour améliorer la stabilité du réseau électrique.

4.3 Spécification de la stratégie de commande de TCSC

La spécification de la stratégie de commande concernent principalement deux aspects: la conception du régulateur du TCSC pour améliorer la stabilité du réseau électrique et le choix des signaux de commande du régulateur du TCSC.

Pour satisfaire les exigences pratiques de fonctionnement des réseaux électriques et en même temps pour améliorer efficacement leur stabilité, d'abord, trois principes sont suivis afin d'obtenir une loi de commande de l'angle d'amorçage appropriée pour améliorer efficacement la stabilité dynamique. Ils sont décrits comme suit :

- Uniformité

Avec le plan de répartition désirée de la puissance des lignes de transmission, sous un même schéma de commande, l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone doivent être simultanément diminuées en régulant l'angle d'amorçage du TCSC, ce qui signifie que la commande du régulateur du TCSC doit couvrir une large plage de fréquences afin d'amortir efficacement les oscillations des multi-modes du réseau électrique sans changer le plan de répartition de la puissance des lignes de transmission.

- Efficacité

Par la commande pour l'indice de performance, l'interaction à cause de l'échange d'énergie électrique dans le régime dynamique entre le réseau de transmission et le turboalternateur doit

tendre à un effet d'amortissement désiré positif dans une large plage de fréquences. L'amortissement des réseaux électriques globaux peut être obtenu en optimisant la caractéristique d'amortissement de l'extérieur des réseaux de transmission d'énergie électrique, celle-ci permet d'améliorer l'interaction entre le turboalternateur et le réseau de transmission d'énergie électrique afin d'améliorer efficacement la stabilité des réseaux électriques.

- Systématisation

La méthode de conception du régulateur du TCSC doit être systématique, ce qui permet à la méthode de conception d'être facilement développée pour la conception du régulateur des autres appareils de FACTS avec objectif similaire.

- Localisation

Autant que possible, la conception du régulateur de TCSC doit se baser sur des informations et des données locales du réseau de transmission d'énergie électrique et les signaux du régulateur doivent dépendre seulement des variables d'état locales du réseau. En effet, le TCSC étant installé sur la ligne de transmission, il n'est pas facile, ni pratique, d'obtenir des signaux de mesure lointains, par exemple, signaux de commande des autres régulateurs. Ainsi, nous choisissons les variables locales reliées au réseau de transmission d'énergie électrique étudié comme, par exemple, la tension, le courant et la puissance dans le réseau de transmission ou leurs combinaisons comme les entrées du régulateur. La localisation des variables d'entrée de la commande et de la conception du régulateur du TCSC fournit la possibilité de diminuer les interactions entre les appareils de FACTS eux-mêmes et permet d'élaborer les stratégies de commande plus pratiques.

4.4 Indice de performance pour l'évaluation de la stabilité adapté à la conception du régulateur du TCSC

4.4.1 Mesure de performance

D'après l'étude de l'amortissement au chapitre 3, pour un réseau électrique qui manque d'amortissement, une interaction dynamique existe entre le turboalternateur et le réseau de transmission à cause de l'échange de l'énergie électrique entre eux. Ainsi, notre objectif pour la

conception du régulateur de TCSC est de commander l'interaction de l'amortissement à cause de l'échange de l'énergie durant la période dynamique en ajustant l'angle d'amorçage du TCSC afin d'obtenir une interaction avec l'amortissement désiré positif entre l'alternateur et le réseau de transmission pour améliorer la stabilité dynamique.

Supposons que l'équation d'état du réseau électrique étudié est

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{B} \Delta \alpha$$

Par conséquent, une quantité reliée à l'interaction à cause de l'échange de l'énergie électrique peut être donnée par

$$\Delta y_T = \Delta T_e - D_d \Delta \omega = C_T \Delta \mathbf{X} + D_T \Delta \alpha \quad (4-6)$$

où ΔT_e représente la déviation du couple électromagnétique de l'alternateur durant la période dynamique, qui représente un lien de l'énergie électrique entre le système mécanique de l'alternateur et le système électrique du réseau électrique, et qui reflète la caractéristique extérieure; $D_d \Delta \omega$ représente un couple d'amortissement avec un coefficient d'amortissement désiré positif D_d fourni par un TCSC durant la période dynamique; $\Delta \mathbf{X} = (\Delta x_1 \ \Delta x_2 \dots \ \Delta x_n)^T$, c'est à dire, un vecteur de déviation des variables d'état du réseau électrique; et $\mathbf{C}_T = [c_{t1} \ c_{t2} \ \dots \ c_{tn}]$, une matrice de coefficients. Ainsi, Δy_T reflète une interaction entre l'alternateur et le réseau de transmission électrique branché avec un TCSC.

En outre, une autre quantité est définie comme une quantité auxiliaire pour améliorer la qualité de commande. Elle est représentée par :

$$\Delta \mathbf{Y}_I = \Delta \mathbf{I} = \mathbf{C}_I \Delta \mathbf{X} + \mathbf{D}_I \Delta \alpha \quad (4-7)$$

$$\text{où } \Delta \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \Delta I_g \\ \Delta I_t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_I = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{Ig} \\ \mathbf{C}_{It} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_I = \begin{bmatrix} D_{Ig} \\ D_{It} \end{bmatrix}$$

$\Delta \mathbf{I}$ représente un vecteur de déviation de l'amplitude du courant qui comprend la déviation du courant ΔI_g de la ligne de transmission branchée avec l'alternateur et la déviation du courant ΔI_t de la ligne branchée avec le condensateur de compensation en série où un TCSC est inséré, et \mathbf{C}_I représente une matrice de coefficients correspondante. Selon la connaissance de l'analyse transitoire des réseaux électriques, on peut remarquer que $\Delta \mathbf{Y}_I$ comprend l'information des

composantes en haute fréquence sur les lignes de transmission électrique durant le processus dynamique.

Les équations (4-6) et (4-7) peuvent être combinées sous forme de la matrice unifiée :

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta T_e - D_d \Delta \omega \\ \Delta I_g \\ \Delta I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_T \\ \mathbf{C}_{Ig} \\ \mathbf{C}_{It} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{X} + \begin{bmatrix} D_T \\ D_{Ig} \\ D_{It} \end{bmatrix} \Delta \alpha \quad (4-8)$$

La définition générale est donnée, i.e.,

$$\Delta \mathbf{Y} = \mathbf{C}_D \Delta \mathbf{X} + \mathbf{D}_D \Delta \alpha \quad (4-9)$$

Dans les équations (4-7) et (4-8), $\Delta y_1 = \Delta y_T$, $\Delta y_2 = \Delta I_g$, $\Delta y_3 = \Delta I_t$, $\Delta \mathbf{Y} = [\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3]^T$,

et

$$\mathbf{C}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_T \\ \mathbf{C}_{Ig} \\ \mathbf{C}_{It} \end{bmatrix} \text{ et } \mathbf{D}_D = \begin{bmatrix} D_T \\ D_{Ig} \\ D_{It} \end{bmatrix}.$$

Une caractéristique de mesure de performance J_y peut être définie en fonction de Δy_1 , Δy_2 et Δy_3 :

$$J_y = \Delta \mathbf{Y}^T \Delta \mathbf{Y} = \Delta y_1^2 + \Delta y_2^2 + \Delta y_3^2 = (\Delta T_e - \Delta T_d)^2 + \Delta I_g^2 + \Delta I_t^2 \quad (4-10)$$

où $\Delta T_d = D_d \Delta \omega$.

J_y comprend toutes les informations des composantes sur une bande de fréquence concernée.

Lorsque $i_g = i_t$, i.e., la branche de l'alternateur est directement connectée avec la branche de TCSC comme, par exemple, dans le réseau montré sur la figure 2-2, l'équation (4-8) est simplifiée sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta T_e - D_d \Delta \omega \\ \Delta I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_T \\ \mathbf{C}_{Ig} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{X} + \begin{bmatrix} D_T \\ D_{Ig} \end{bmatrix} \Delta \alpha \quad (4-11)$$

et la caractéristique de mesure de performance s'écrit comme suit :

$$J_y = \Delta \mathbf{Y}^T \Delta \mathbf{Y} = \Delta y_1^2 + \Delta y_2^2 = (\Delta T_e - \Delta T_d)^2 + \Delta I_g^2 \quad (4-12)$$

4.4.2 Analyse de performance

On peut analyser la signification de la caractéristique de mesure de performance J_y dans l'équation (4-10).

Les particularités de J_y sont décrites en détail ci-dessous :

- Le plus faible est J_y , le plus proche est ΔT_e du couple d'amortissement positif ΔT_d , donc le plus l'effet de l'amortissement est près de l'effet désiré;
- Lorsque J_y tend vers zéro, ΔT_e tend vers ΔT_d , cela signifie que le couple électromagnétique transmis à un réseau de transmission par l'alternateur durant la période dynamique est simplement un couple d'amortissement désiré positif, donc une interaction de l'amortissement positif entre le turboalternateur et le réseau de transmission peut être acquise durant la période dynamique.
- Le plus faible est J_y , la plus petite est la déviation de l'amplitude des courants sur la branche du stator de l'alternateur et sur la branche de compensation du condensateur en série. Cela signifie que plus faibles sont les oscillations en haute fréquence comprises dans les courants de stator de l'alternateur et de la ligne de transmission avec le condensateur de compensation en série.
- Lorsque J_y tend vers zéro, ΔI tend vers zéro, ce qui signifie que les composantes en haute fréquence comprises dans le courant de stator de l'alternateur et de la ligne de transmission peuvent aussi être éliminées.
- Lorsque J_y tend vers zéro, ΔT_e tend vers ΔT_d et en même temps ΔI tend vers zéro. Ceci signifie que l'interaction de l'amortissement entre le turboalternateur et le réseau de transmission tend à l'interaction de l'amortissement positif désiré, ce qui peut amortir la résonance hypo-synchrone, l'oscillation en basse fréquence et en même temps éviter la production des oscillations en haute fréquence afin d'assurer la qualité de commande du régulateur de TCSC.

4.4.3 Développement de l'indice de performance

Considérant les caractéristiques de J_y et l'influence de la commande sur la stabilité dans le processus dynamique entier provoqué par une petite perturbation, un indice de performance J_{ev} pour l'évaluation de la stabilité dans la conception du régulateur du TCSC est développé :

$$J_{ev} = \int_0^\infty (\Delta Y^T \Delta Y) dt = \int_0^\infty ((\Delta T_e - \Delta T_d)^2 + \Delta I_g^2 + \Delta I_i^2) dt \quad (4-13)$$

Pour améliorer l'efficience de la commande, une quantité $\Delta U^T \Delta U$ reliée à l'énergie d'entrée de la commande, est introduite dans l'équation (4-13), donc J_{ev} dans l'équation est modifié comme :

$$J_{ev} = \int_0^\infty (\Delta Y^T \Delta Y + \Delta U^T \Delta U) dt = \int_0^\infty (\Delta y_1^2 + \Delta y_2^2 + \Delta y_3^2 + \Delta U^T \Delta U) dt \quad (4-14)$$

ce qui peut être écrit de façon générale :

$$J_{ev} = \int_0^\infty (\Delta Y^T Q \Delta Y + \Delta U^T R \Delta U) dt$$

où $Q \geq 0$ et $R > 0$ sont respectivement la matrice de coefficients de pondération de ΔY et la matrice de coefficients de pondération de ΔU . Dans la conception du régulateur de TCSC, $\Delta \alpha$ est considéré comme la variable d'entrée de commande. Donc J_{ev} est défini avec les variations des sorties et du signal de commande qui sont pénalisées sous la forme suivante :

$$J_{ev} = \int_0^\infty (q_1 \Delta y_1^2 + q_2 \Delta y_2^2 + q_3 \Delta y_3^2 + r \Delta \alpha^2) dt = \int_0^\infty (\Delta Y^T Q \Delta Y + r \Delta \alpha^2) dt \quad (4-15)$$

où r est le coefficient de pondération de $\Delta \alpha$ avec $r > 0$, $Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix}$ et $\Delta Y = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix}$.

Lorsque $\Delta y_2 = \Delta y_3$, i.e., la branche de l'alternateur est directement connectée à la branche où la compensation de condensateur en série est insérée, l'équation (4-15) est simplifiée comme :

$$J_{ev} = \int_0^\infty (q_1 \Delta y_1^2 + q_2 \Delta y_2^2 + r \Delta \alpha^2) dt \quad (4-16)$$

La minimisation de l'indice de caractéristique J_{ev} permet la minimisation respective simultanée de Δy_1 , Δy_2 , Δy_3 et $\Delta \alpha$, ce qui signifie que sous l'effet de la commande du TCSC avec l'entrée minimale d'énergie, l'interaction de l'amortissement désiré positif entre le turboalternateur et le réseau de transmission peut être acquise. Ceci permet à la résonance hypo-synchrone et à l'oscillation en basse fréquence d'être efficacement amorties et en même temps, les composantes en haute fréquence durant le processus dynamique peuvent être aussi éliminées, ce qui signifie l'amélioration de la performance du régulateur. L'indice de performance proposé peut être adapté pour la conception d'autres appareils de FACTS avec pour objectif d'améliorer la stabilité du réseau électrique.

4.5 Méthode de conception du régulateur de TCSC

Le développement de la méthode de conception du régulateur de TCSC est une partie importante de la stratégie de la commande. Nous utilisons J_{ev} proposé comme la fonction objectif pour la conception du régulateur du TCSC.

4.5.1 Choix de la méthode de conception

Les méthodes adoptées pour la conception des régulateurs des réseaux électriques sont généralement classées en deux catégories : les méthodes basées sur l'analyse dans le domaine fréquentiel et les méthodes basées sur l'analyse dans le domaine du temps. En utilisant la méthode de commande classique, la conception est exécutée selon le mode propre dominant et la méthode d'évaluation adoptée de la stabilité est basée sur l'analyse des valeurs propres. Donc, il n'est pas facile d'obtenir une large plage de fréquences afin d'amortir les oscillations des multi-modes, et l'évaluation de la stabilité des réseaux électriques est aussi relativement complexe dans la conception. Une méthode moderne, la commande H_∞ , a une robustesse attrayante et peut permettre d'obtenir une performance de commande optimale, mais elle est encore basée sur la conception du mode dominant du réseau électrique.

Donc nous avons choisi la méthode de commande linéaire optimale (“Linear Quadratic Regulator”) [62] pour la conception du régulateur de TCSC parce qu'elle ne se limite pas au

mode propre dominant pour la conception du régulateur, et elle permet d'utiliser un indice de performance relié à la forme de l'énergie du réseau électrique. Ceci fournit la possibilité d'amortir la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence de multi-modes avec une même loi de commande dans une large plage de fréquences. Cependant, pour l'utilisation pratique, la robustesse du régulateur devrait être améliorée dans la conception et les signaux d'entrée du régulateur devrait être choisis selon le cas réel.

4.5.2 Développement de la conception de la commande optimale

Du point de vue présenté dans le chapitre 3, notre objectif de conception de la commande du TCSC est d'améliorer l'interaction entre le turboalternateur et le réseau de transmission électrique en commandant l'échange de l'énergie durant la période dynamique pour obtenir un effet d'amortissement fort dans le régime dynamique provoqué par une petite perturbation, afin d'amortir simultanément et efficacement la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence, et à la fois d'assurer le plan de répartition désirée de la puissance de la ligne de transmission.

Pour l'objectif d'améliorer la stabilité des réseaux électriques de façon plus facile que les méthodes traditionnelles, nous avons développé un critère particulier de performance basé sur l'analyse de l'interaction causée par l'énergie électrique échangée entre l'alternateur et le réseau électrique dans le régime dynamique. La conception de la commande linéaire optimale exige d'abord de déterminer la caractéristique de mesure de performance J_y (équation (4-10)) correspondant à l'énergie électrique échangée dans le régime dynamique et ensuite de déterminer l'indice de performance (équation (4-14)) comme la fonction objectif, qui satisfait l'efficacité et l'uniformité pour l'évaluation de la stabilité du réseau électrique dans la conception du régulateur du TCSC. La minimisation de l'indice de performance permet d'assurer l'interaction avec amortissement positif désiré entre le turboalternateur et le réseau de transmission durant la période dynamique parce que lorsque J_{ev} tend vers un minimum, Δy_1 , Δy_2 et Δy_3 tendent aussi vers un minimum, ce qui permet à la variation du couple électromagnétique ΔTe de fournir un couple d'amortissement positif qui s'approche de la valeur désirée afin d'améliorer l'interaction.

Finalement, une loi optimale unifiée de commande du régulateur de TCSC peut être développée avec la rétroaction des variables d'état locales.

$$\Delta\alpha = -K_{Dn}\Delta X_{Dn}$$

où X_{Dn} est un vecteur de variables d'état concernant les mesures locales et K_{Dn} est un vecteur de coefficients de rétroaction.

Le régulateur de TCSC peut être utilisé pour amortir simultanément la résonance hypo-synchrone et les oscillations en basse fréquence. De plus, le problème de performance du régulateur de TCSC est aussi considéré comme, par exemple, l'élimination des harmoniques en plus haute fréquence.

4.6 Stratégie de commande de TCSC

4.6.1 Processus de conception du régulateur de TCSC

Pour concevoir le régulateur du TCSC avec rétroaction locale, les hypothèses suivantes sont posées :

- négliger l'influence des harmoniques qui circulent localement, générées par le TCSC;
- négliger la variation du couple mécanique de turbine ΔT_m ;
- considérer les forces électromotrices subtransitoires E_d'' et E_q'' constantes.

Le modèle simplifié du réseau électrique proposé dans la section 2.4.2 est utilisé pour la conception du régulateur de TCSC avec rétroaction des variables d'état locales et l'équation d'état pour le réseau électrique étudié a été écrite dans l'équation (2-25). Elle est réécrite ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{Dm} \\ \Delta \dot{X}_{De} \end{bmatrix} = A_D \begin{bmatrix} \Delta X_{Dm} \\ \Delta X_{De} \end{bmatrix} + B_D \Delta \alpha \quad (4-17)$$

Sa forme compacte est

$$\Delta \dot{X}_D = A_D \Delta X_D + B_D \Delta \alpha$$

Nous définissons l'équation des sorties du réseau électrique selon les signaux utilisés dans l'indice de performance :

$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= \Delta T_e - D_d \Delta \omega = \mathbf{C}_T \Delta X_D + D_T \Delta \alpha \\ \Delta Y_I &= \Delta I = \mathbf{C}_I \Delta X_D + \mathbf{D}_I \Delta \alpha\end{aligned}\quad (4-18)$$

où $\Delta X_D = [\Delta X_{Dm}^T \ \Delta X_{De}^T]^T$, $\Delta Y_I = \begin{bmatrix} \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix}$ et $\Delta I = \begin{bmatrix} \Delta I_g \\ \Delta I_t \end{bmatrix}$

L'équation (4-18) est arrangée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta Y_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{Tm} & \mathbf{C}_{Te} \\ \mathbf{C}_{Im} & \mathbf{C}_{Ie} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{Dm} \\ \Delta X_{De} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_T \\ \mathbf{D}_I \end{bmatrix} \Delta \alpha \quad (4-19)$$

Ou encore,

$$\Delta Y = \mathbf{C}_D \Delta X_D + \mathbf{D}_D \Delta \alpha \quad (4-20)$$

où $\Delta Y = [\Delta y_1 \ \Delta Y_I^T]^T$, $\Delta X_D = [\Delta X_{Dm}^T \ \Delta X_{De}^T]^T$,

$$\mathbf{C}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{Tm} & \mathbf{C}_{Te} \\ \mathbf{C}_{Im} & \mathbf{C}_{Ie} \end{bmatrix} \text{ et } \mathbf{D}_D = \begin{bmatrix} D_T \\ \mathbf{D}_I \end{bmatrix}.$$

Lorsque $i_g = i_t$, i.e., la branche de l'alternateur est directement connectée à la branche avec la compensation de condensateur en série, les matrices de coefficients peuvent être déduites comme suit :

$$\mathbf{C}_{Tm} = [\mathbf{0}_{1 \times 4}, -D_d, \mathbf{0}_{1 \times 7}], \mathbf{C}_{Te} = [V_{g-d0}'' x_d'' i_{q0}, V_{g-q0}'' x_q'' i_{d0}, 0, 0, 0, 0, 0],$$

$$\mathbf{C}_{Im} = [\mathbf{0}]_{1 \times 12}, \mathbf{C}_{Ie} = [i_{d0}/I_0, i_{q0}/I_0, 0, 0, 0, 0], D_T = 0 \text{ et } \mathbf{D}_I = [\mathbf{0}],$$

où V_{g-d0} , V_{g-q0} , i_{d0} et i_{q0} représentent respectivement la tension de l'alternateur dans le repère dq et le courant de la ligne de transmission (ou le courant de TCSC) dans le repère dq ; x_d'' et x_q'' représentent les réactances subtransitoires de l'alternateur dans le repère dq ; et I_0 représente l'amplitude du courant de la ligne de transmission au point de fonctionnement à l'équilibre.

La fonction objectif J_{ev} peut être facilement définie selon l'indice proposé dans l'équation (4-15) ou l'équation (4-16) pour l'évaluation de la stabilité. En considérant les matrices de pondération Q et r dans J_{ev} pour améliorer l'effet de la commande, nous obtenons l'indice de performance :

$$J = \int_0^\infty (\Delta Y^T Q \Delta Y + r \Delta \alpha^2) dt \quad (4-21)$$

En minimisant J, une loi de commande optimale pour la déviation de l'angle d'amorçage $\Delta\alpha$ de TCSC avec rétroaction des variables d'état complètes peut être d'abord obtenue :

$$\Delta\alpha = -K_D \Delta X_D \quad (4-22)$$

où K_D représente la matrice de coefficients de rétroaction avec les variables d'état complètes.

Pour un turboalternateur décrit par un système de six masses-ressorts, lorsque $i_g = i_t$, K_D peut être déterminée comme suit :

$K_D = [K_{m\omega} \ K_{m\delta} \ K_e]$, un vecteur de coefficients de rétroaction des variables d'entrée où

$K_{m\omega} = [k_{\omega H} \ k_{\omega M} \ k_{\omega Ba} \ k_{\omega Bb} \ k_{\omega g} \ k_{\omega EX}]$, un vecteur de coefficients correspondant à la pulsation de chaque section de système de masses-ressorts du turboalternateur,

$K_{m\delta} = [k_{\delta H} \ k_{\delta M} \ k_{\delta Ba} \ k_{\delta Bb} \ k_{\delta g} \ k_{\delta EX}]$, un vecteur de coefficients correspondant à l'angle de chaque section de système de masses-ressorts du turboalternateur,

et $K_e = [k_{id} \ k_{iq} \ k_{cd} \ k_{cq} \ k_{ld} \ k_{lg}]$, un vecteur de coefficients correspondant aux quantités électriques de la ligne de transmission Δi_d , Δi_q , Δv_{tcsc-d} , Δv_{tcsc-q} , Δi_{lcr-d} et Δi_{lcr-q} .

La minimisation de la fonction d'objectif J signifie que, d'une part, la commande optimale pour l'angle d'amorçage du TCSC permet à l'interaction avec l'amortissement désiré positif entre l'alternateur et le réseau de transmission d'apparaître dans le régime dynamique de l'échange de l'énergie du réseau électrique afin d'obtenir l'effet d'amortir simultanément la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence. D'autre part, elle permet d'éliminer les oscillations en plus haute fréquence comprises dans les courants du stator d'alternateur ou de la ligne de transmission électrique, ce qui peut améliorer la performance de la commande du régulateur de TCSC.

En outre, comme la commande du régulateur de TCSC proposée est effectuée autour du point de fonctionnement initial, le niveau de compensation équivalente k_c varie seulement autour du niveau de compensation initial k_{c0} commandé par le TCSC pour une répartition raisonnable de la puissance sur les lignes de transmission. Ainsi le schéma de commande proposé avec objectif particulier d'améliorer la stabilité du réseau électrique n'affecte pas le plan de répartition de la puissance sur les lignes de transmission.

4.6.2 Considérations pour l'application pratique

La mesure locale des signaux de rétroaction de la commande du TCSC et la robustesse du régulateur sont deux facteurs à considérer. Par quelques modifications de la méthode présentée dans la section 4.6.1, nous proposons une conception robuste du régulateur avec rétroaction des variables d'état locales.

4.6.2.1 Conception du régulateur de TCSC avec la rétroaction des variables d'état locales

Pour le TCSC installé sur une ligne de transmission, il est difficile de mesurer certains signaux lointains d'entrée de la commande du TCSC comme, par exemple, l'angle et la pulsation de chaque section d'arbre du turboalternateur, donc les variables d'entrée du régulateur et les coefficients de rétroaction correspondants donnés dans l'équation (4-22) doivent être modifiés d'après le principe de mesure locale des signaux d'entrée du régulateur afin de s'adapter pour l'utilisation pratique.

Pour obtenir les variables d'entrée de la commande d'un TCSC reliées aux mesures locales, une hypothèse cruciale est adoptée dans la conception du régulateur de TCSC avec la rétroaction des variables d'état locales, soit que les sections d'arbre du turboalternateur possèdent une rigidité élevée. En d'autres termes, nous considérons que quantitativement, la déviation de la pulsation et de l'angle de chaque section d'arbre du turboalternateur étudié sont égaux.

Pour un alternateur avec six masses-ressorts PH, PM, PB_a, PB_b, GEN et EX (chapitre 2), nous posons donc :

$$\Delta\omega \approx \Delta\omega_H \approx \Delta\omega_M \approx \Delta\omega_{Ba} \approx \Delta\omega_{Bb} \approx \Delta\omega_{EX} \approx \Delta\omega_g$$

et

$$\Delta\delta \approx \Delta\delta_H \approx \Delta\delta_M \approx \Delta\delta_{Ba} \approx \Delta\delta_{Bb} \approx \Delta\delta_{EX} \approx \Delta\delta_g$$

où δ et ω représentent les déviations de l'angle et la pulsation de l'arbre de l'alternateur.

Par conséquent, selon l'hypothèse, nous ne considérons plus $\Delta\omega_H$, $\Delta\omega_M$, $\Delta\omega_{Ba}$, $\Delta\omega_{Bb}$, $\Delta\omega_{EX}$, $\Delta\delta_H$, $\Delta\delta_M$, $\Delta\delta_{Ba}$, $\Delta\delta_{Bb}$, $\Delta\delta_{EX}$ comme variables d'entrée du régulateur. Ces quantités avec $\Delta\omega_g$ et $\Delta\delta_g$ ensemble peuvent être remplacées par les déviations de δ et ω synthétisées des mesures locales

comme, par exemple, la tension, le courant et puissance des lignes de transmission avec le TCSC installé [5, 39-40].

Les coefficients équivalents de rétroaction $k_{\omega\Sigma}$ et $k_{\delta\Sigma}$ correspondant à $\Delta\omega$ et $\Delta\delta$ sont obtenus ci-dessous :

$$k_{\omega\Sigma} = k_{\omega H} + k_{\omega I} + k_{\omega La} + k_{\omega Lb} + k_{\omega g} + k_{\omega EX} \quad (4-23)$$

et

$$k_{\delta\Sigma} = k_{\delta H} + k_{\delta I} + k_{\delta La} + k_{\delta Lb} + k_{\delta g} + k_{\delta EX} \quad (4-24)$$

Ainsi, une loi de commande quasi-optimale pour la déviation $\Delta\alpha$ de l'angle d'amorçage de TCSC avec rétroaction des variables d'état locales est obtenue :

$$\Delta\alpha = -K_{Dn}\Delta X_{Dn} \quad (4-25)$$

Pour le réseau électrique montré sur la figure 2-2 dont l'arbre du turboalternateur est décrit par un système de six masses-ressorts,

$$K_{Dn} = [k_{\omega\Sigma} \ k_{\delta\Sigma} \ k_{id} \ k_{iq} \ k_{cd} \ k_{cq} \ k_{ld} \ k_{lq}] \text{ et}$$

$$\Delta X_{Dn} = [\Delta\omega \ \Delta\delta \ \Delta i_d \ \Delta i_q \ \Delta v_{tcsc-d} \ \Delta v_{tcsc-q} \ \Delta i_{tcr-d} \ \Delta i_{tcr-q}]^T.$$

Également, les autres variables d'état i_d , i_q , v_{tcsc-d} , v_{tcsc-q} , i_{tcr-d} et i_{tcr-q} peuvent être obtenues par les mesures locales en utilisant une relation algébrique pour les quantités triphasées locales comme, par exemple, la tension, le courant, la puissance active et la puissance réactive [1], donc leur déviation peut être obtenue de façon similaire.

4.6.2.2 Robustesse de la commande de TCSC

Deux moyens sont adoptés dans la conception de régulateur de TCSC pour améliorer sa robustesse. D'une part, comme les paramètres normalisés en p.u. sont utilisés dans la conception, ils ne varient pas autour des valeurs initiales de fonctionnement du réseau électrique, ce qui permet à la performance de commande du régulateur de ne pas être beaucoup affectée à cause de la variation des paramètres du réseau électrique. D'autre part, en choisissant adéquatement le coefficient d'amortissement désiré D_d et en considérant une certaine marge de sécurité pour D_d , la robustesse du régulateur peut être améliorée, ce qui sera vérifié au chapitre 5.

4.7 Implantation de la stratégie de commande unifiée de TCSC sur les réseaux électriques

4.7.1 Réseaux électriques étudiés

Les réseaux électriques basés sur le premier modèle de référence de IEEE (“IEEE First Benchmark Model”) [20] et sur le deuxième modèle de référence de IEEE (“IEEE Second Benchmark Model”) de IEEE [21] sont employés comme modèles fondamentaux pour l'étude de la stabilité des réseaux électriques.

Le premier modèle de référence de IEEE a été présenté à la section 3.4 et est montré sur la figure 3-1. Il est principalement composé d'un turboalternateur, un transformateur, une impédance de ligne de transmission, un condensateur en série et une source infinie. Le deuxième modèle de référence de IEEE est montré sur la figure 4-5 et il est principalement composé d'un turboalternateur, un transformateur, deux lignes de transmission en parallèle dont une est compensée par un condensateur fixe en série, une ligne de transmission et une source infinie.

Nous utilisons le réseau électrique A montré sur la figure 4-6 et le réseau électrique B montré sur la figure 4-7 pour la conception et l'implantation du régulateur de TCSC et pour l'analyse et la validation de la stratégie de commande proposée. Le réseau électrique A est basé sur le premier modèle de référence de IEEE en ajoutant le modèle d'un TCSC à la place du condensateur fixe, et le réseau électrique B est basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE en ajoutant le modèle d'un TCSC à la place du condensateur fixe.

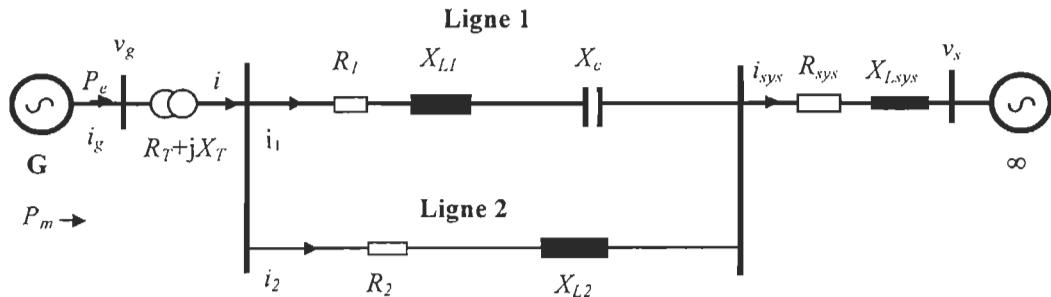


Figure 4-5 : Réseau électrique décrit par le deuxième modèle de référence de IEEE

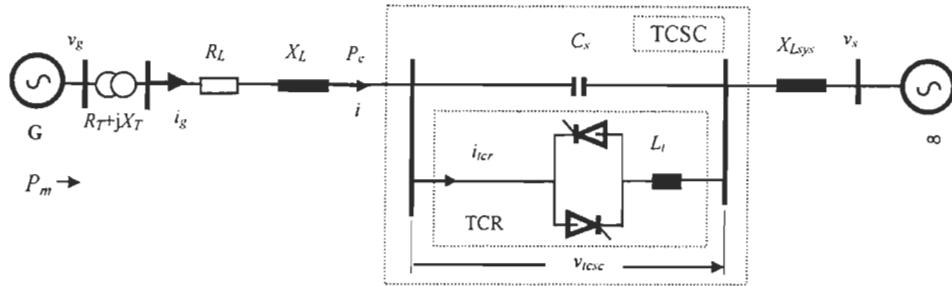


Figure 4-6 : Réseau A pour l'étude de la stratégie de commande de TCSC

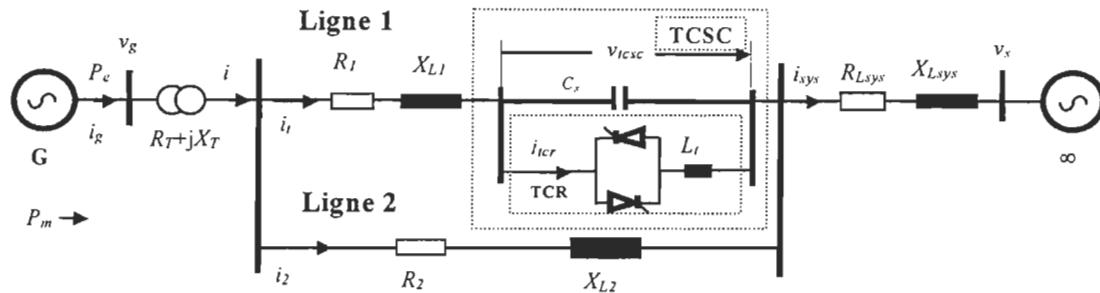


Figure 4-7 : Réseau B pour l'étude de la stratégie de commande de TCSC

Dans le réseau A, un système de six masses-ressorts est considéré comme modèle de l'arbre du turboalternateur et il est présenté de nouveau à la figure 4-8. Dans le réseau B, un système de quatre masses-ressorts est considéré comme le modèle de l'arbre du turboalternateur et il est montré sur la figure 4-9. Les paramètres de ces réseaux et des arbres de turboalternateur peuvent être trouvés à l'annexe B.

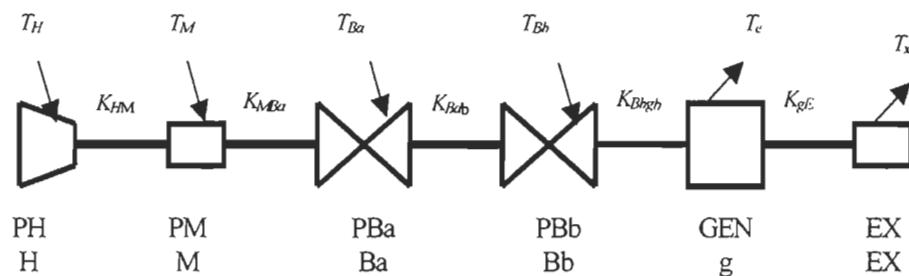


Figure 4-8 : Modèle linéaire de six masses-ressorts du turboalternateur

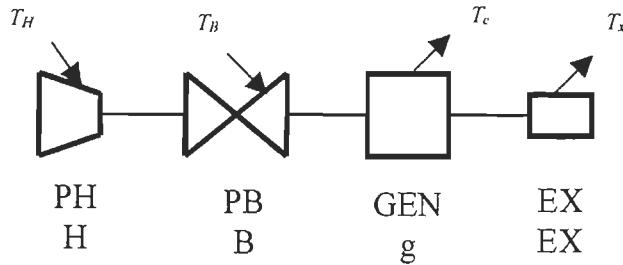


Figure 4-9 : Modèle linéaire de quatre masses-ressorts du turboalternateur

4.7.2 Conception du régulateur de TCSC pour le réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE

Le modèle détaillé du réseau électrique qui a été présenté dans la section 2.4.1 est utilisé pour la conception du régulateur de TCSC avec rétroaction des variables d'état complètes (voir l'équation (4-22)) et pour l'analyse des valeurs propres afin de valider l'effet de la commande du TCSC proposée sur l'amélioration de la stabilité du réseau électrique. Le modèle simplifié qui a été présenté dans la section 2.4.2 est utilisé pour la conception du régulateur de TCSC avec la rétroaction des variables d'état locales (voir l'équation (4-25)).

4.7.2.1 Régulateur unifié du TCSC avec rétroaction des variables d'état locales

Selon la méthode proposée à la section 4.6.2.1, pour le réseau électrique A montré sur la figure 4-6, nous avons d'abord conçu un régulateur unifié pratique de TCSC avec une loi de commande optimale de la rétroaction des variables d'état locales à l'aide du modèle mathématique simplifié. Pour le réseau A, l'équation d'état avec une petite perturbation est réécrite sous la forme de (4-26) qui vient de l'équation (2-25) :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X}_{Dm} \\ \Delta \dot{X}_{De} \end{bmatrix} = A_D \begin{bmatrix} \Delta X_{Dm} \\ \Delta X_{De} \end{bmatrix} + B_D \Delta \alpha \quad (4-26)$$

Comme le courant i_g de branche de l'alternateur est égal au courant i_t de la branche où le TCSC est installé dans le réseau A, l'équation de la sortie du réseau est

$$\Delta Y = C_D \Delta X_D + D_D \Delta \alpha \quad (4-27)$$

où $\Delta Y = [\Delta y_1 \ \Delta y_2]^T$ où $\Delta y_1 = \Delta T_e - D_d \Delta \omega$ et $\Delta y_2 = \Delta I_g$, $\Delta X_D = [\Delta X_{Dm}, \ \Delta X_{De}]^T$ et $D_d = 60$.

L'indice de performance est donné par

$$J = \int_0^\infty (\Delta Y^T Q \Delta Y + r \Delta \alpha^2) dt$$

où $Q = \begin{bmatrix} 60 & 0 \\ 0 & 60 \end{bmatrix}$ et $r = 2$. Les autres paramètres et les conditions pour la conception du régulateur de TCSC avec la rétroaction des variables d'état locales peuvent être trouvés à la section B.1.3.1 de l'annexe B.

En minimisant J , la loi de commande optimale de $\Delta \alpha$ avec la rétroaction locale est obtenue comme l'équation (4-25), c'est à dire,

$$\Delta \alpha = -K_{Dn} \Delta X_{Dn}$$

où $K_{Dn} = [416.0388 \ 0.511 \ 0.2399 \ -0.5183 \ -3.5724 \ -1.6694 \ -0.3387 \ 0.7438]$,

et $\Delta X_{Dn} = [\Delta \omega, \Delta \delta, \Delta i_d, \Delta i_q, \Delta v_{tcsc-d}, \Delta v_{tcsc-q}, \Delta i_{tcr-d}, \Delta i_{tcr-q}]^T$.

Finalement, un régulateur unifié de TCSC avec des mesures locales comme signaux d'entrée est élaboré et il est implanté sur le réseau A basé sur le premier modèle de référence de IEEE. Les quantités d'entrée locales du régulateur du TCSC comprennent la tension du TCSC, le courant de la branche de l'alternateur, la pulsation $\Delta \omega$ et l'angle $\Delta \delta$ synthétisés par les mesures locales [23, 59, 63]. L'effet de commande du régulateur du TCSC sur la stabilité du réseau électrique sera démontré au chapitre 5.

4.7.2.2 Régulateurs du TCSC avec rétroaction des variables d'état complètes

Pour vérifier la méthode proposée pour l'évaluation de la stabilité dans la conception du régulateur de TCSC, à l'aide du modèle détaillé unifié électrique et mécanique déduit dans la

section 2.4.1, nous avons encore conçu deux régulateurs du TCSC avec la rétroaction des variables d'état complètes en adoptant respectivement la méthode proposée basée sur l'interaction de l'amortissement et la méthode générale linéaire optimale pour une comparaison de l'effet de la commande.

L'équation d'état complète linéarisée autour du point de fonctionnement initial sous une petite perturbation a été déduite dans la section 2.4.1 avec forme suivante :

$$\Delta \dot{X}_{full} = A_{full} \Delta X_{full} + B_{full} \Delta \alpha \quad (\text{équation (2-20)})$$

L'équation de la sortie correspondante est représentée comme :

$$\Delta Y = C_{full} \Delta X_{full} + D_{full} \Delta \alpha \quad (4-28)$$

Les lois de commande sont respectivement représentées par l'équation (4-29) et l'équation (4-30) comme suit :

$$\Delta \alpha = -K_{fy} \Delta X_{full} \quad (\text{commande 1 avec méthode proposée}) \quad (4-29)$$

qui est obtenue en minimisant la fonction objectif $J_y = \int_0^{\infty} (\Delta Y^T Q_y \Delta Y + r_{fy} \Delta \alpha^2) dt$

et

$$\Delta \alpha = -K_{fx} \Delta X_{full} \quad (\text{commande 2 avec méthode générale}) \quad (4-30)$$

qui est obtenue en minimisant la fonction objectif $J_x = \int_0^{\infty} (\Delta X_{full}^T Q_x \Delta X_{full} + r_{fx} \Delta \alpha^2) dt$.

Pour le réseau électrique A montré sur la figure 4-6 avec l'arbre de turboalternateur représenté par un système de six masses-ressorts, nous choisissons

$$Q_y = \begin{bmatrix} 60 & 0 \\ 0 & 60 \end{bmatrix} \text{ et } r_{fy} = 20 \text{ pour la commande 1, et pour la commande 2, } Q_x = 60 \bullet I_{29 \times 29} \text{ et } r_{fx} = 1.$$

Les coefficients dans les matrices de pondération sont déterminés en permettant à la valeur absolue maximale de signal de commande 2 d'être presque identique à celle de la commande 1. Dans la conception, le coefficient d'amortissement désiré $D_d = 60$. Les autres paramètres et conditions pour la conception des régulateurs optimaux du TCSC avec rétroaction des variables d'état complètes peuvent être trouvés dans la section B.1.3.2 de l'annexe B.

Les deux matrices de coefficients de rétroaction correspondant aux deux schémas de commande sont calculées :

Pour la commande optimale linéaire unifiée proposée,

$$K_{fy} =$$

$$\begin{bmatrix} 1.2016 & 2.5878 & 22.1540 & 70.0623 & 34.8717 & 3.2049 & 0.1137 & 0.4959 & 6.8416 & 15.1940 \\ -27.7137 & 0.8300 & 1.3529 & 2.8960 & 2.4610 & 0.0277 & 0.1294 & 8.9735 & 3.8817 & -8.5807 \\ -8.5395 & -2.4566 & -2.4678 & -0.0012 & -0.0006 & -2.1175 & -2.6440 & 0.3631 & 0.8829 \end{bmatrix}$$

et pour la commande optimale linéaire générale,

$$K_{fx} =$$

$$\begin{bmatrix} 38.0480 & 79.3030 & 421.8257 & 588.4182 & 651.3409 & 12.1489 & -1.3337 & 9.1996 & 19.6382 & 30.2867 \\ -87.6018 & 4.3043 & 17.0723 & -2.4080 & 37.7617 & -0.7324 & -1.0119 & -64.1121 & 85.2312 & 68.8543 \\ 68.3179 & -89.2315 & -89.3718 & 2.0686 & 0.1856 & -22.7733 & -18.6722 & 7.4859 & 12.3300 \end{bmatrix}$$

Les résultats de la comparaison pour les deux méthodes seront présentés au chapitre 5.

4.7.3 Conception du régulateur de TCSC à l'aide du deuxième modèle de référence de IEEE

Pour le réseau B basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE montré sur la figure 4-7, l'équation d'état simplifiée avec une petite perturbation peut être écrite avec la forme compacte comme l'équation (4-25)

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{X}}_{Dm} \\ \Delta \dot{\mathbf{X}}_{De} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_D \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{Dm} \\ \Delta \mathbf{X}_{De} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_D \Delta \alpha$$

L'indice de performance utilisé est

$$J = \int_0^\infty (\Delta \mathbf{Y}^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{Y} + r \Delta \alpha^2) dt$$

et l'équation de la sortie $\Delta \mathbf{Y} = \mathbf{C}_D \Delta \mathbf{X}_D + \mathbf{D}_D \Delta \alpha$

qui vient de l'équation (4-8) de la section 4.4.1

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta T_e - D_d \Delta \omega \\ \Delta I_g \\ \Delta I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T \\ C_{Ig} \\ C_{It} \end{bmatrix} \Delta X_D + \begin{bmatrix} D_T \\ D_{Ig} \\ D_{It} \end{bmatrix} \Delta \alpha$$

où $\Delta X_D = [\Delta X_{Dm}^T \ \Delta X_{De}^T]^T$.

Dans ce cas, nous choisissons $Q = \begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 \\ 0 & 60 & 0 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix}$ et $r = 5$, et $D_d = 100$. Les autres paramètres et

les conditions pour la conception du régulateur de TCSC avec la rétroaction des variables d'état locales peuvent être trouvés aux sections B.2.1 et B.2.2 de l'annexe B.

En minimisant J , la loi de commande optimale de $\Delta \alpha$ avec la rétroaction locale est obtenue comme l'équation (4-25) :

$$\Delta \alpha = -K_{Dn} \Delta X_{Dn}$$

où

$$K_{Dn} =$$

$$[720.5401 \ -0.0915 \ -0.1574 \ 0.5549 \ 0.6649 \ -1.5017 \ -2.2214 \ 0.7658 \ 1.6184 \ 1.6184]$$

$$\text{et } \Delta X_{Dn} = [\Delta \omega \ \Delta \delta \ \Delta i_d \ \Delta i_q \ \Delta i_{ld} \ \Delta i_{lq} \ \Delta v_{tcsc-d} \ \Delta v_{tcsc-q} \ \Delta i_{tcr-d} \ \Delta i_{tcr-q}]^T.$$

Enfin, un régulateur unifié de TCSC avec des mesures locales comme signaux d'entrée est obtenu et il est implanté sur le réseau B basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE. Les quantités d'entrée locales du régulateur de TCSC comprennent la tension du TCSC, le courant de la branche de TCR du TCSC, le courant de la branche de l'alternateur, la pulsation $\Delta \omega$ et l'angle $\Delta \delta$ synthétisés par les mesures locales. L'effet de la commande du régulateur de TCSC sur la stabilité du réseau électrique sera vérifié au chapitre 5.

4.8 Conclusions

Ce chapitre a présenté une contribution à l'étude et au développement d'une stratégie de commande unifiée d'un TCSC :

- Le principe de commande d'un TCSC pour améliorer la stabilité des réseaux électriques est analysé en détail. Nous soulignons particulièrement la faisabilité et l'efficacité d'utilisation de la commande d'un TCSC pour accroître la caractéristique d'amortissement des réseaux électriques;
- Un indice de mesure de performance, relié à l'interaction de l'amortissement à cause de l'échange d'énergie durant le processus dynamique, est défini pour l'évaluation de la stabilité des réseaux électriques et pour s'adapter à la conception du régulateur de TCSC. La proposition de l'indice de performance fournit la possibilité de remplacer les méthodes traditionnelles basées sur les valeurs propres dominantes pour l'évaluation de la stabilité dans la conception du régulateur avec objectif d'améliorer la stabilité du réseau électrique, ce qui permet de mettre en lumière l'amortissement des oscillations de multi-modes des réseaux électriques de façon unifiée et efficace;
- Basée sur l'indice de performance proposé, une méthode de conception optimale unifiée du régulateur de TCSC est développée selon l'idée d'améliorer l'interaction de l'amortissement en obtenant une interaction de l'amortissement positif désiré dans le processus dynamique à l'aide de la commande linéaire optimale. La localisation, l'uniformité, l'efficacité et la robustesse sont soulignées dans la conception du régulateur de TCSC. Celle-ci permet d'élaborer une stratégie de commande unifiée de TCSC avec rétroaction des variables d'état locales pour amortir simultanément et efficacement la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence des réseaux électriques en maintenant la répartition désirée de la puissance des lignes de transmission;
- Le processus de conception du régulateur unifié optimal d'un TCSC est formulé. L'implantation de la stratégie de commande proposée sur deux réseaux électriques basés sur les modèles de référence de IEEE est réalisée et le processus est présenté en détail.

Par conséquent, nous avons abouti à l'objectif particulier d'établir une stratégie de commande unifiée et efficace de TCSC pour améliorer la stabilité des réseaux électriques.

CHAPITRE 5

ANALYSE DE L'EFFET DE LA COMMANDE UNIFIÉE DE TCSC PAR LA MÉTHODE DES VALEURS PROPRES

5.1 Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons indiqué que les problèmes de stabilité dynamique du réseau électrique, comme la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence, se manifestent suite à de petites perturbations dans le réseau électrique, donc le modèle du réseau électrique pour l'étude des problèmes de stabilité dynamique peut être linéarisé autour du point de fonctionnement initial. La méthode d'analyse des valeurs propres basée sur le modèle mathématique linéarisé du réseau électrique est bien adaptée à l'étude de la stabilité dynamique. Par conséquent, dans notre étude, la méthode des valeurs propres est utilisée comme premier outil d'analyse pour valider l'effet de la commande du régulateur de TCSC sur l'amélioration de la stabilité du réseau électrique.

Au chapitre 4, à l'aide d'un modèle linéarisé simplifié du réseau électrique proposé dans la section 2.5.2, nous avons conçu un régulateur unifié d'un TCSC afin d'établir la stratégie de commande. Dans ce chapitre, notre étude vise l'analyse et la validation de l'effet de la commande unifiée de TCSC par la méthode des valeurs propres à l'aide du modèle mathématique détaillé qui a été présenté dans la section 2.5.1. Nous allons non seulement vérifier la faisabilité du modèle simplifié du réseau électrique pour la conception du régulateur de TCSC, mais aussi l'efficacité et la supériorité de l'effet de la commande unifiée de TCSC proposée sur l'amortissement simultané de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence de multi-modes du réseau électrique.

D'abord, l'efficacité de la commande unifiée de TCSC proposée est validée par l'analyse des valeurs propres pour deux réseaux électriques typiques basés respectivement sur le premier modèle de référence de IEEE et sur le deuxième modèle de référence de IEEE [20-21] à l'aide du modèle mathématique linéarisé détaillé du réseau électrique. Ensuite, plusieurs comparaisons de l'effet de la commande entre le régulateur unifié de TCSC proposé, le régulateur optimal général

de TCSC et le régulateur de TCSR (“Thyristor-Controlled Shunt Reactor”) conçu par la méthode traditionnelle basée sur l’assignation des valeurs propres sont effectuées pour vérifier la supériorité du schéma de commande unifiée de TCSC proposé. De plus, l’étude du coefficient de pondération de la fonction objectif pour la conception du régulateur de TCSC est réalisée afin d’améliorer l’effet de la commande unifiée de TCSC. Finalement, la validation de la robustesse du régulateur unifié de TCSC proposé est effectuée par l’analyse des valeurs propres en permettant aux paramètres du réseau électrique, comme la puissance électromagnétique P_m et la réactance de ligne de transmission $X_{L\Sigma}$, de varier dans une plage de fonctionnement possible.

5.2 Analyse des valeurs propres à l'aide des modèles de référence de IEEE

D’abord, une comparaison entre le réseau avec et sans la commande de TCSC avec la rétroaction des variables d’état locales est effectuée pour le réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE montré sur la figure 4-6. Le réseau étudié est représenté de nouveau à la figure 5-1. L’arbre du turboalternateur est décrit par un système de six masses-ressorts montré sur la figure 4-8. La conception du régulateur du TCSC a été effectuée à la section 4.7.2.1. Le tableau 5-1 donne les résultats du calcul des valeurs propres dans les deux cas : avec la commande du TCSC proposée et sans commande de TCSC. Les conditions d’opération sont définies à l’annexe B : sections B.1.1, B.1.2 et B.1.3.1. Dans ce tableau, les modes 1 à 6 correspondent au système de six masses-ressorts d’arbre du turboalternateur (voir l’annexe A : section A.2). Ils correspondent respectivement aux fréquences d’oscillation naturelles 47.4 Hz (298 rad/s), 32.28 Hz (203 rad/s), 25.55 Hz (160 rad/s), 20.21 Hz (127 rad/s), 15.71 Hz (99 rad/s) et 1.433 Hz (9 rad/s).

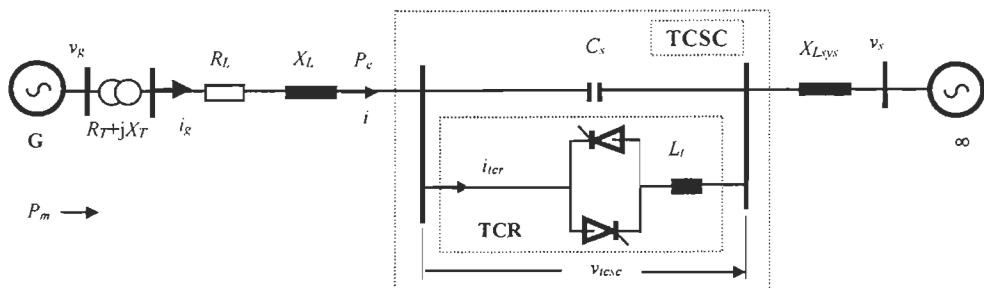


Figure 5-1 : Réseau électrique A basé sur le première modèle de référence de IEEE

Du tableau 5-1, on remarque d'abord que lorsque il n'y a pas de commande de TCSC, une résonance hypo-synchrone à la fréquence 98 rad/s et une oscillation croissant lentement à la fréquence hypo-synchrone supérieure 298 rad/s se produisent simultanément dans le réseau électrique, ce qui cause sa déstabilisation. On remarque encore que sous la commande unifiée du TCSC proposée, l'amortissement du réseau électrique est beaucoup accru, la résonance hypo-synchrone et l'oscillation hypo-synchrone sont efficacement corrigées et le réseau électrique est stable. Nous tirons ces conclusions de l'observation de la partie réelle des valeurs propres comme, par exemple, le mode 1 (298 rad/s) et le mode 5 (99 rad/s) qui, instables sans commande, sont des modes stables avec commande : la partie réelle du mode 5 (99 rad/s) d'oscillation hypo-synchrone est largement déplacée de 0.1821 dans le demi-plan droit à -3.7966 dans le demi-plan gauche du plan complexe et la partie réelle du mode 1 (298 rad/s) est aussi déplacée d'une valeur faible dans le demi-plan droit à -0.009 dans le demi-plan gauche du plan complexe. La caractéristique d'amortissement des autres modes est aussi significativement améliorée comme, par exemple, la partie réelle des modes d'oscillation hypo-synchrone 2 (204 rad/s), 3 (160 rad/s) et 4 (127 rad/s) qui sont respectivement déplacées de -0.0004 à -6.7195, de -0.0019 à -1.9069 et de -0.001 à -0.5884. L'amélioration de l'amortissement pour le mode 6 (9 rad/s) d'oscillation en basse fréquence est aussi très évidente. Le taux de décroissance de ce mode est augmenté et sa partie réelle est déplacée de -0.0657 à -5.9467.

Pour observer et analyser davantage l'effet du régulateur unifié proposé avec rétroaction des variables d'état locales sur l'amélioration de la résonance hypo-synchrone, le vecteur propre correspondant à la valeur propre de chaque mode d'oscillation hypo-synchrone est calculé. La forme de l'oscillation de la torsion des modes peut être obtenue par les vecteurs propres. Les figures 5-2 et 5-3 montrent la forme de l'oscillation de la torsion des modes correspondant aux modes d'oscillation de la torsion avec les vecteurs propres correspondants normalisés par rapport à l'élément le plus grand dans deux cas : avec la commande proposée du TCSC avec rétroaction des mesures locales et sans commande de TCSC. D'abord, la figure 5-2 montre la forme de l'oscillation de la torsion des modes hypo-synchrones 1 (298 rad/s) et 4 (127 rad/s) qui représente la forme de torsion relative faible, et la figure 5-3 donne la forme de l'oscillation de la torsion de trois modes hypo-synchrones 2, 3 et 5. En comparant les figures 5-2 et 5-3, on observe que le mode 1 et le mode 4 ont un effet localisé et exhibent une oscillation de torsion relativement faible par rapport aux autres modes d'oscillation hypo-synchrone (modes 2, 3 et 5). Donc le mode 5 (99

rad/s) avec partie réelle positive est le mode d'oscillation de torsion hypo-synchrone le plus dangereux auquel la résonance hypo-synchrone pourra se produire dans le réseau électrique.

Tableau 5-1 : Valeurs propres du réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE

Mode	Sans commande	Avec la commande proposée (Rétroaction d'état locale)
1	0.0000014 ± 298.1803i	-0.0090 ± 298.2148i
2	-0.0004 ± 202.9364i	-6.7195 ± 213.9005i
3	-0.0019 ± 160.5694i	-1.9069 ± 164.1864i
4	-0.0010 ± 127.0003i	-0.5884 ± 127.8336i
5	0.1821± 97.6732i	-3.7966 ± 106.0508i
6	-0.0657 ± 9.2615i	-5.9467 ± 25.9270i
	-1.6076 ± 662.2679i	-1199.5168
	-499.9833	-15.8677 ± 652.7937i
	-10.6105 ± 376.9692i	-499.9880
	-101.8011	-3.1805 ± 313.6466i
	-1.1866 ± 93.1311i	-102.1426
	-31.5200	-27.6548
	-24.7896	-24.8595
	-8.4196	-9.4766
	-0.1439	-0.9362
	-5.4445	-2.8376
	-4.8228	-3.7214
	-2.2633	-2.0411
	-3.0130 ± 0.3526i	-5.1267
		-4.9251
		-0.1434

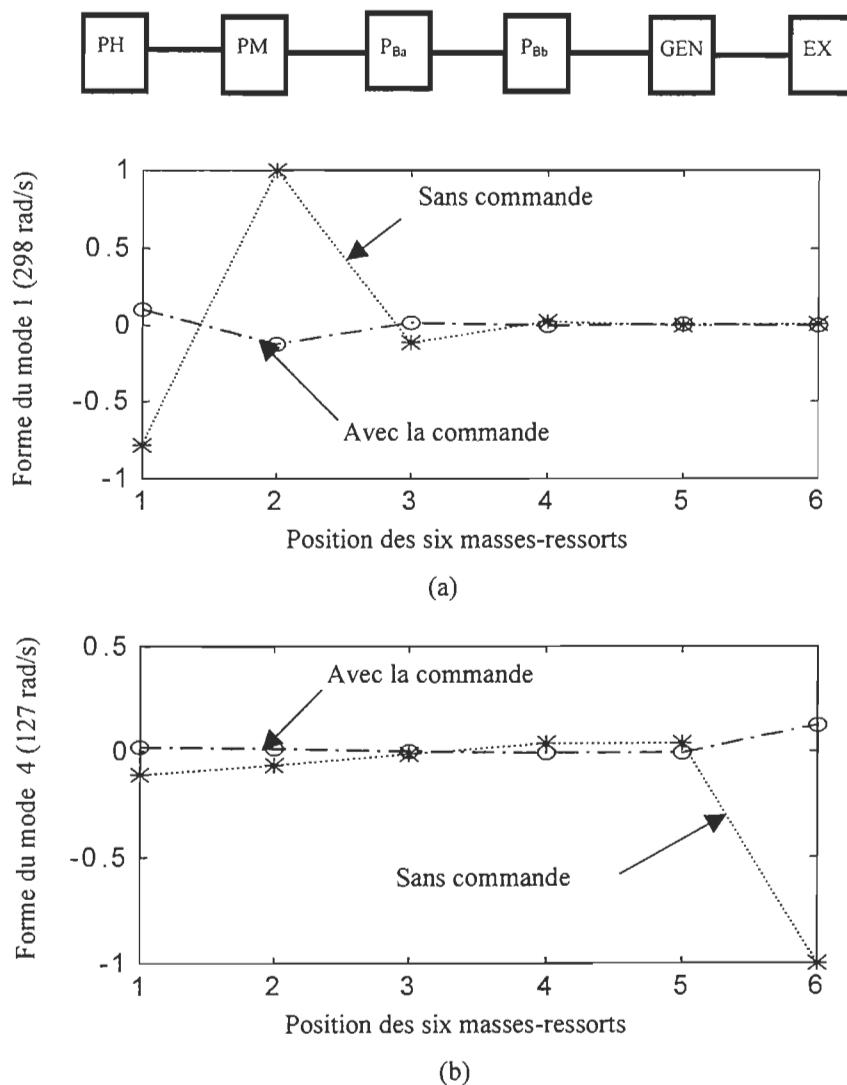


Figure 5-2 : Forme des oscillations de torsion des modes 1 et 4 (réseau A)

o : avec la commande du TCSC proposé * : sans commande de TCSC

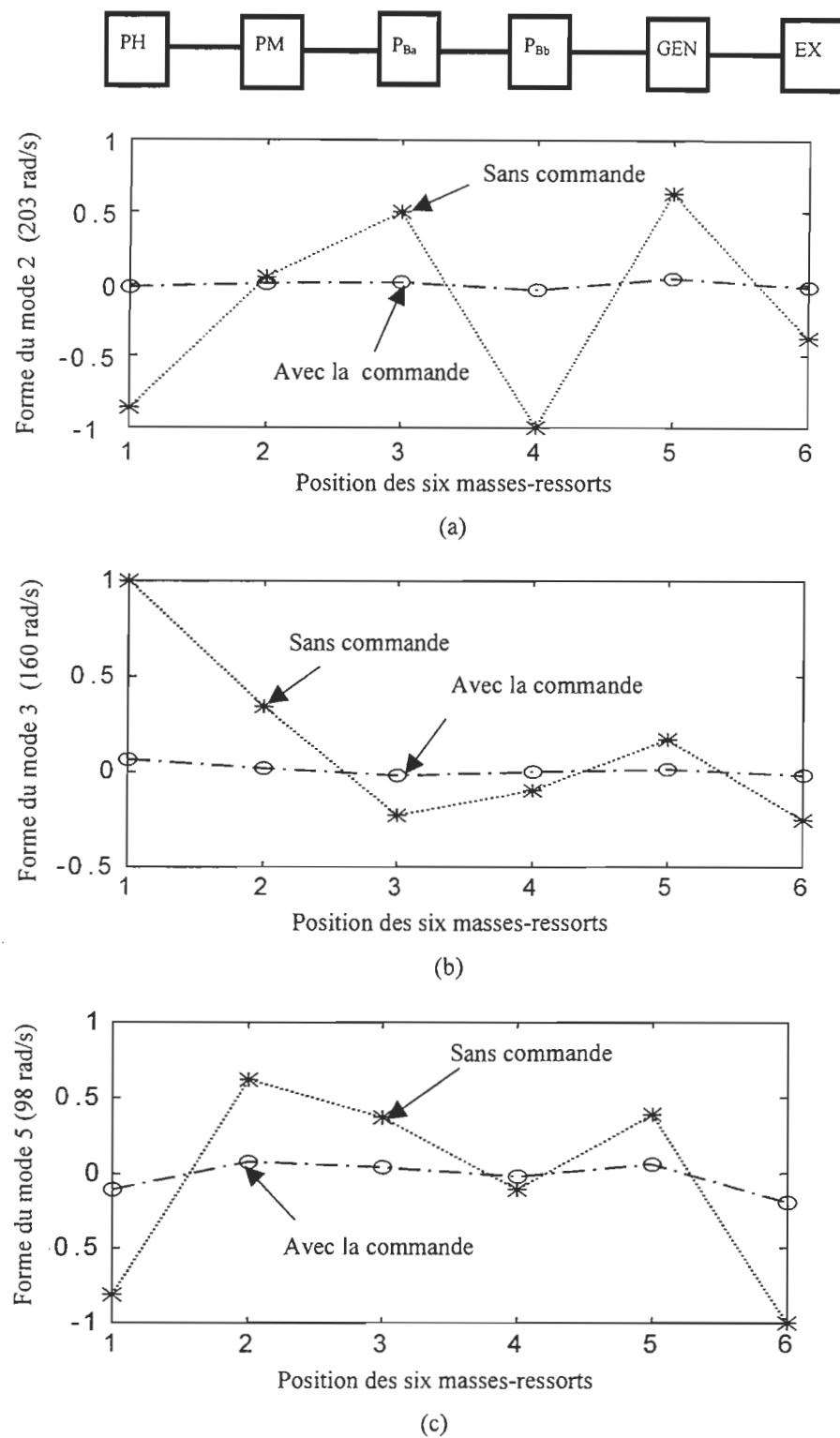


Figure 5-3 : Forme des oscillations de torsion des modes 2, 3 et 5 (réseau A)

o : avec la commande du TCSC proposé * : sans commande de TCSC

Une autre comparaison reliée au réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE montré sur la figure 4-7 est aussi effectuée. Le réseau étudié est représenté de nouveau à la figure 5-4. L'arbre du turboalternateur est décrit par un système de quatre masses-ressorts montré sur la figure 4-9. Le régulateur de TCSC conçu a été présenté à la section 4.7.3.

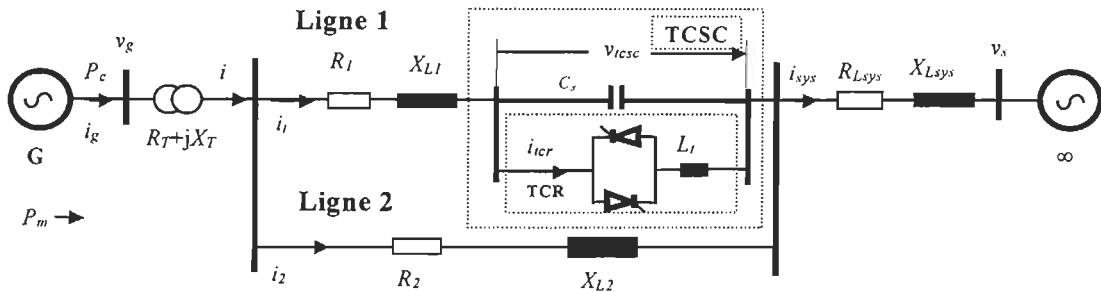


Figure 5-4 : Réseau électrique B basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE

Les résultats de la comparaison des valeurs propres entre le réseau sans et avec la commande du TCSC proposée avec rétroaction des variables d'état locales sont montrés dans le tableau 5-2. Les modes 1 à 4 correspondent au système de quatre masses-ressorts d'arbre du turboalternateur, respectivement aux fréquences naturelles 51.1 Hz (321 rad/s), 32.39 (203 rad/s), 24.65 Hz (155 rad/s) et 1.43 Hz (9 rad/s). Les modes 1 à 3 correspondent aux modes d'oscillation de la torsion hypo-synchrone et le mode 4 correspond au mode d'oscillation électromécanique en basse fréquence. Les conditions d'opération sont définies à l'annexe B (B.2). Du tableau 5-2, on remarque que lorsque le réseau n'a pas de commande de TCSC, les résonances hypo-synchrones de multi-modes aux fréquences 321 rad/s, 204 rad/s et 155 rad/s se produisent simultanément dans le réseau électrique et le réseau se présente dans un état de déstabilisation grave. On trouve que sous la commande unifiée du TCSC proposée, les résonances hypo-synchrones de multi-modes du réseau électrique sont complètement amorties et la stabilité du réseau électrique est beaucoup améliorée. En effet, avec la commande unifiée du TCSC, les modes instables 1 à 3 deviennent stables : leur partie réelle est déplacée respectivement de 0.0009 à -0.0449, de 0.002 de la région droite à -0.4877 et de 0.0047 à -2.0317 de la région gauche dans le plan complexe. L'amortissement du mode en basse fréquence est aussi beaucoup amélioré et ce mode décroît plus rapidement, la partie réelle du mode 4 (9 rad/s) étant déplacée de -0.2585 à -2.2347.

Tableau 5-2 : Valeurs propres du réseau basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE

Mode	Sans commande	Avec la commande proposée (Rétroaction des variables locales)
1	$0.0009 \pm 322.5573i$	$-0.0449 \pm 323.2716i$
2	$0.0020 \pm 204.3703i$	$-0.4877 \pm 205.1166i$
3	$0.0047 \pm 155.9392i$	$-2.0317 \pm 158.7213i$
4	$-0.2585 \pm 9.3900i$	$-2.2347 \pm 12.0273i$
	$-1.2989 \pm 714.7066i$	$-29.1963 \pm 537.2485i$
	$-17.6946 \pm 376.8390i$	$-33.1302 \pm 376.8461i$
	$-32.3480 \pm 376.9987i$	$-13.2375 \pm 353.2046i$
	$-1.0171 \pm 39.2881i$	$-4.7956 \pm 1.3561i$
	$-5.3759 \pm 1.5141i$	$-2.1368 \pm 1.0788i$
	$-2.4068 \pm 1.2495i$	$-5.4846 \pm 0.277i$
	-499.9585	-499.9618
	-97.4068	-97.3023
	-22.7196	-20.8862
	-11.2360	-13.1265
	-6.1211	-4548.0767

La forme d'oscillation de la torsion des modes est également obtenue des vecteurs propres. La figure 5-5 montre la forme de l'oscillation de la torsion correspondant aux modes mécaniques d'oscillation 1 à 3 avec les vecteurs propres correspondant normalisés par rapport à l'élément le plus grand pour deux cas : avec la commande proposée du TCSC utilisant la rétroaction des mesures locales et sans commande de TCSC.

De la figure 5-5, on observe qu'une torsion forte se présente au mode 2 (203 rad/s) (voir 5-5 (b)) et au mode 3 (155 rad/s) (voir 5-5 (c)) auxquels la résonance hypo-synchrone peut se produire, mais la torsion au mode 1 (321 rad/s) correspondant à la fréquence hypo-synchrone supérieure est faible (voir 5-5 (a)) malgré la résonance hypo-synchrone au mode qui peut se produire également. Par l'analyse des deux réseaux électriques typiques, on peut non seulement vérifier l'efficacité de la commande unifiée de TCSC proposée, mais aussi on peut montrer la faisabilité de la méthode proposée pour la conception du régulateur d'un TCSC à l'aide d'un modèle simplifié du réseau électrique.

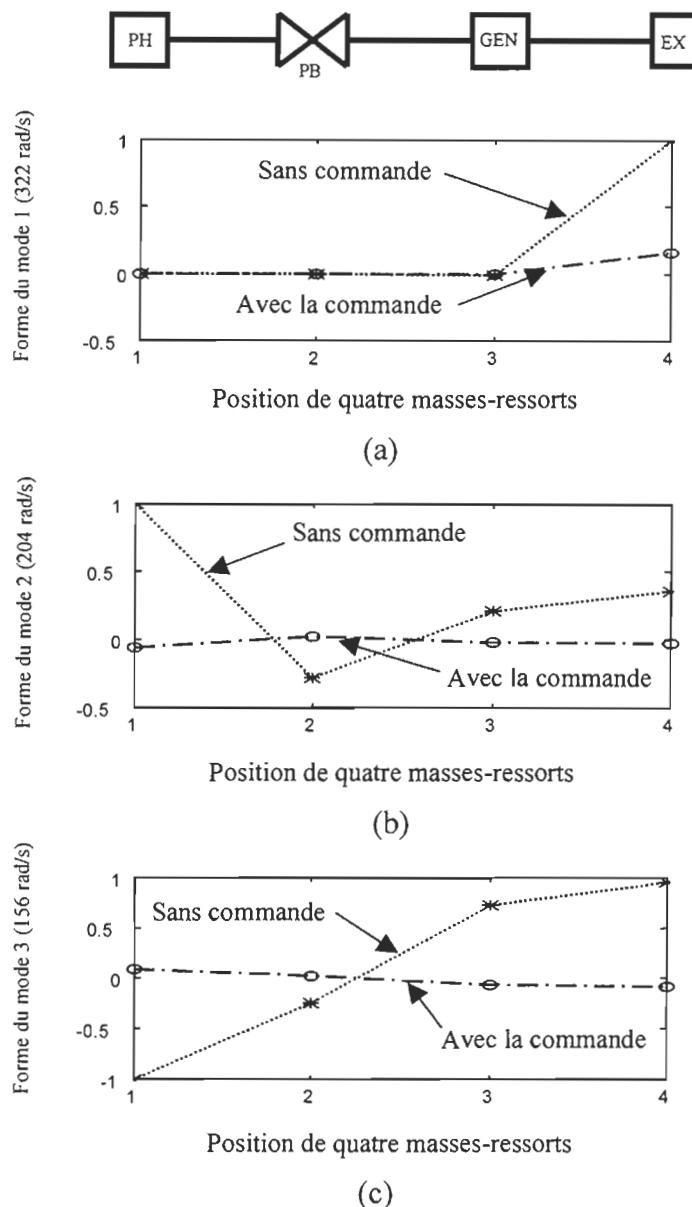


Figure 5-5 : Forme des oscillations de torsion du réseau B
o : avec la commande unifiée du TCSC * : sans commande de TCSC

Une analyse similaire de l'effet de la commande unifiée proposée de TCSC sur la stabilité des réseaux électriques est présentée dans [64-65].

5.3 Comparaison des schémas de commande optimale

Pour davantage démontrer les avantages de l'approche de commande proposée, nous avons conçu deux régulateurs de TCSC avec rétroaction des variables d'état complètes à la section 4.7.2 pour le réseau électrique montré sur la figure 5-1 en adoptant respectivement la méthode de conception du régulateur proposée et la commande optimale linéaire générale. Les résultats de la comparaison des valeurs propres entre le réseau avec la commande optimale unifiée proposée et avec la commande optimale linéaire générale sont donnés dans le tableau 5-3. Les conditions d'opération sont définies à l'annexe B (B.1.3.2).

Les modes 1 à 5 représentent les modes d'oscillation de torsion hypo-synchrone et le mode 6 correspond au mode d'oscillation électromécanique en basse fréquence. En observant la variation de la partie réelle des valeurs propres, on remarque que les deux schémas de commande optimale de TCSC améliorent la stabilité du réseau électrique en accroissant l'amortissement du réseau électrique, mais le schéma de commande optimale unifiée de TCSC proposé est beaucoup plus efficace que la loi de commande optimale générale : la partie réelle du mode 2 est seulement déplacée de -0.0213 à -0.4418 sous la commande optimale générale, mais sous la commande optimale unifiée proposée, la partie réelle du mode 2 est déplacée de -0.0213 à -2.7716 dans le plan complexe; la partie réelle du mode 3 est seulement déplacée de -0.0851 à -0.2176 sous la commande optimale générale, mais sous la commande optimale unifiée proposée, elle peut être déplacée de -0.0851 à -1.6640; la partie réelle du mode 5 est seulement déplacée de 0.0913 à -0.5136 sous la commande optimale générale, mais sous la commande optimale unifiée proposée, elle est largement déplacée de 0.0913 à -4.2437. De plus, la partie réelle du mode 6 d'oscillation en basse fréquence est déplacée de -0.0912 à seulement -2.1741 sous la commande optimale générale et à -4.7726 sous la commande optimale proposée.

Par conséquent, on peut obtenir la conclusion que le schéma de commande optimale unifiée de TCSC proposé est supérieur au schéma général de TCSC pour amortir la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence du réseau électrique. Ceci est dû à l'avantage que confère l'utilisation d'un indice de performance dédié au problème spécifique de stabilité avec la méthode de conception du régulateur optimal unifié.

La référence [66] donne un autre exemple de commande optimale pour un TCSC.

Tableau 5-3 : Comparaison entre la commande optimale unifiée et la commande optimale générale

Mode	Sans commande	Avec la commande optimale unifiée proposée	Avec la commande optimale linéaire générale
1	$-0.0909 \pm 298.1802i$	$-0.0916 \pm 298.1801i$	$-0.0909 \pm 298.1802i$
2	$-0.0213 \pm 202.9364i$	$-2.7716 \pm 202.4532i$	$-0.4418 \pm 202.7211i$
3	$-0.0851 \pm 160.5693i$	$-1.6640 \pm 160.3768i$	$-0.2176 \pm 160.4682i$
4	$-0.3296 \pm 126.9996i$	$-0.6759 \pm 126.9376i$	$-0.3218 \pm 126.9854i$
5	$0.0913 \pm 97.6654i$	$-4.2437 \pm 98.4950i$	$-0.5136 \pm 98.7400i$
6	$-0.0912 \pm 9.2622i$	$-4.7726 \pm 3.3624i$	$-2.1741 \pm 8.0127i$
	$-1.6076 \pm 662.2680i$	-499.9806	-11800.6583
	-499.9833	$-262.2047 \pm 373.2375i$	-494.5433
	$-10.6105 \pm 376.9692i$	$-125.6794 \pm 738.4158i$	-264.3598
	-101.8011	$-112.1055 \pm 45.7295i$	$-117.56933 \pm 269.7144i$
	$-1.1693 \pm 93.1391i$	-103.1958	$-101.6535 \pm 540.3375i$
	-31.5195	-27.9009	-56.6995
	-24.7896	-24.8241	-27.6594
	-8.4227	-8.41296	-24.8231
	-0.1439	-7.24949	-8.3651
	-5.4448	-4.77040	-5.5059
	-4.8228	$-2.33003 \pm 0.9559i$	-4.8138
	-2.2622	-2.1873	$-3.0131 \pm 0.5237i$
	$-3.0129 \pm 0.3525i$	-0.1439	-2.1954
			-0.1440

5.4 Comparaison entre la commande unifiée du TCSC proposée et la commande du TCSR (“Thyristor-Controlled Shunt Reactor”)

La référence [38] propose un schéma de commande d'une réactance parallèle commandée par thyristors (“Thyristor-Controlled Shunt Reactor”-- “TCSR”) à l'aide d'un contrôleur SIMO (“Single-Input Multiple-Output”) constitué de plusieurs régulateurs PI, avec pour objectif d'amortir la résonance hypo-synchrone des réseaux électriques. Dans la référence, à l'aide d'un réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE, un exemple d'amortissement de la résonance hypo-synchrone est présenté pour vérifier l'effet de commande du régulateur de TCSR sur la stabilité du réseau électrique. La figure 5-6 montre le réseau électrique étudié avec

un régulateur de TCSR basé sur le premier modèle de référence de IEEE. Une réactance en parallèle commandée par thyristors est incorporée dans le premier modèle de référence de IEEE représenté à la figure 3-1 pour ajuster les puissances réactives afin d'amortir la résonance hypo-synchrone en commandant l'angle d'amorçage des thyristors de TCSR. La méthode traditionnelle d'assignation des valeurs propres est utilisée pour la conception du régulateur de TCSR. Pour obtenir l'effet de la commande de TCSR, la vitesse de turbine à la pression moyenne, la vitesse des deux turbines à la pression basse et la vitesse de rotor d'alternateur sont exigées comme signaux de rétroaction du régulateur de TCSR. En outre, pour obtenir une bonne capacité de transmission de puissance active sur la ligne de transmission électrique, le schéma de commande de TCSR requiert l'utilisation d'un condensateur fixe en série.

On peut d'abord remarquer la différence de fonction entre le schéma de commande unifiée de TCSC proposée et le schéma de commande de TCSR. L'effet de la commande unifiée de TCSC proposée peut non seulement amortir la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence, mais aussi en même temps peut assurer la répartition désirée de la puissance active sur la ligne de transmission électrique. De plus, le régulateur unifié de TCSC proposé n'a besoin que des variables d'état locales comme signaux de rétroaction du régulateur unifié de TCSC, donc la vitesse de turbine à la pression moyenne, des turbines à la pression basse et du rotor d'alternateur ne sont pas demandées.

Nous avons conçu un régulateur unifié de TCSC sous la même condition de fonctionnement que le régulateur du TCSR. Le réseau étudié pour le régulateur unifié du TCSC est montré à la figure 5-1. D'abord, pour le cas sans commande, nous avons comparé les résultats du calcul des valeurs propres pour le premier modèle de référence de IEEE montré sur la figure 3-1 avec niveau de compensation $k_c = 0.5$. Un des résultats présentés dans le tableau 5-4 vient de l'exemple de la référence [38] et l'autre est calculé par notre programme. Ensuite, une autre comparaison entre l'effet de commande du régulateur du TCSR et l'effet de la commande unifiée du TCSC avec rétroaction des variables d'état locales sur l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques est effectuée. Le calcul des valeurs propres correspondant aux deux schémas de commande, soit avec la commande unifiée du TCSC proposée (voir la figure 5-1) et avec la commande du TCSR présentée dans la référence [38] (figure 5-6) est exécuté pour les mêmes conditions de fonctionnement pour comparer l'effet des deux schémas de commande sur l'amortissement de la résonance hypo-synchrone, ce qui est représenté dans le tableau 5-5.

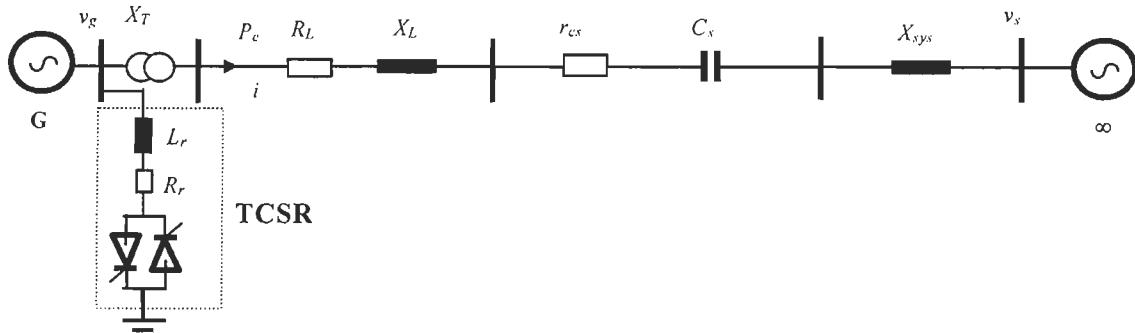


Figure 5-6 : Réseau basé sur le premier modèle de référence de IEEE avec un TCSR

Le tableau 5-4 montre que les valeurs propres obtenues par les deux voies différentes de calcul sont presque pareilles, ce qui valide notre modèle et le programme de calcul des valeurs propres. Le tableau 5-5 donne les résultats de l'analyse des valeurs propres avec les deux schémas de commande. Les conditions de fonctionnement et les paramètres pour la conception du régulateur de TCSC sont définis à la section B.1.3.3 de l'annexe B. Nous mettons l'accent sur l'analyse des modes d'oscillation de torsion hypo-synchrone 1 à 5 et le mode 6 d'oscillation électromécanique en basse fréquence. Comme les autres modes sont reliés aux composants et paramètres du réseau de transmission électrique et concernent le processus électromagnétique du réseau de transmission électrique, ils n'ont presque pas d'influence sur l'oscillation mécanique d'arbre de rotor du turboalternateur. On remarque que le nombre total des valeurs propres avec l'effet du TCSR est plus élevé de un par rapport à celui avec l'effet du TCSC à cause du régulateur PI adopté dans le schémas de commande du TCSR. Les résultats indiquent que les deux schémas de commande améliorent la stabilité du réseau électrique : toutes les valeurs propres correspondant aux modes propres mécaniques 1 à 5 et au mode électromagnétique 6 d'arbre du turboalternateur sont réduites et sont déplacées dans le demi-plan gauche du plan complexe, ce qui signifie l'amélioration de caractéristique d'amortissement du réseau électrique. On remarque davantage que, en dépit de la partie réelle (-2.0622) du mode 3 qui est un peu plus grande sous la commande unifiée du TCSC que celle (-2.81) sous la commande du TCSR, dans l'ensemble, le schéma de commande unifiée du TCSC proposée est plus efficace que le schéma de commande du TCSR.

pour l'amélioration de l'amortissement et de la stabilité du réseau électrique : la partie réelle du mode 2 est seulement déplacée de la valeur initiale à -1.90 de la région gauche sous la commande du TCSR, mais sous la commande unifiée du TCSC proposée, la partie réelle du mode 2 est largement déplacée à -6.7673 de la région gauche dans le plan complexe; la partie réelle du mode 4 est seulement déplacée à -0.7474 sous la commande du TCSR, mais sous la commande unifiée du TCSC proposée, elle est déplacée à -1.126 de la région gauche dans le plan complexe; et la partie réelle du mode 5 est seulement déplacée à -1.51 sous la commande du TCSR, mais sous la commande unifiée du TCSC proposée, elle est déplacée de la valeur initiale à -3.7997. En outre, la partie réelle du mode 1 est déplacée de la valeur initiale à -0.1814 sous la commande du TCSR, mais sous la commande unifiée du TCSC proposée, elle est déplacée à -0.198.

Tableau 5-4 : Comparaison des valeurs propres (sans commande)

Mode	Résultats proposés	Résultats donnés par l'exemple [38]
1	-0.1818 ± 298.1801i	-0.1818 ± 298.18i
2	-0.0229 ± 202.7164i	-0.0231 ± 202.72i
3	0.7977 ± 160.8109i	0.7983 ± 160.81i
4	-0.6415 ± 127.0739i	-0.6415 ± 127.07i
5	-0.1104 ± 99.4967i	-0.1101 ± 99.50i
6	-0.2446 ± 10.0436i	-0.1961 ± 10.02i
	-3.3004	-3.3039
	-2.7722	-3.9308
	-0.1439	-0.1418
	-4.8375	-4.8391 ± 0.2884i
	-5.3604	
	-7.0996 ± 590.9925i	-7.0995 ± 590.99i
	-6.9303 ± 162.4904i	-6.9314 ± 162.49i
	-2.2442	-1.8035
	-24.8055	-24.8055
	-32.1243	-32.1181
	-8.1856	-8.0871
	-499.9776	-499.9778
	-101.6723	-101.6738

Tableau 5-5 : Comparaison des valeurs propres (avec la commande)

Mode	Avec la commande unifiée du TCSC	Avec la commande du TCSR [38]
1	-0.1980 ± 298.2108i	-0.1814 ± 298.21i
2	-6.7673 ± 211.9028i	-1.90 ± 206.50i
3	-2.0622 ± 163.4435i	-2.81 ± 157.00i
4	-1.1260 ± 127.5955i	-0.7474 ± 127.07i
5	-3.7997 ± 103.6423i	-1.51 ± 100.35i
6	-2.0702 ± 17.4515i -2193.3085 -499.9876 -102.1070 -28.6611 -24.7508 -9.2892 -5.3902 -4.8349 -2.2057 -0.2538 -0.1323 -29.3953 ± 662.0571i -0.5941 ± 313.8041i -3.0751 ± 0.1810	-2.07 ± 10.10i -298.32 ± 367.42i -499.9769 -102.0421 -39.9615 ± 5.4794i -25.0397 -6.2267 -1.6181 -0.1411 -6.3512 ± 592.90i -3.4473 ± 167.24i -5.0900 ± 0.0815i -3.4208 ± 1.2537i

Donc, pour les deux objectifs d'améliorer la stabilité du réseau électrique et d'assurer la répartition optimale désirée de la puissance sur les lignes transmission du réseau électrique, le schéma de commande unifiée de TCSC proposé est plus efficace et plus pratique que le schéma de commande de TCSR proposée dans la référence [38].

5.5 Influence de la matrice de pondération Q sur l'effet de la commande de TCSC

Pour la conception du régulateur de TCSC, le réseau électrique étudié peut être décrit par un modèle linéarisé simplifié (voir la section 2.4.2). Son équation d'état est donnée dans l'équation (2-26) qui est donnée à nouveau :

$$\Delta \dot{X}_D = \mathbf{A}_D \Delta X_D + \mathbf{B}_D \Delta \alpha$$

L'équation des sorties du réseau électrique est définie (voir la section 4.6.1) par :

$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= \Delta T_e - D_d \Delta \omega = \mathbf{C}_T \Delta X_D + D_T \Delta \alpha \\ \Delta Y_I &= \Delta I = \mathbf{C}_I \Delta X_D + \mathbf{D}_I \Delta \alpha\end{aligned}\quad (5-1)$$

ou elle est écrite sous forme compacte :

$$\Delta \mathbf{Y} = \mathbf{C}_D \Delta X_D + \mathbf{D}_D \Delta \alpha$$

La fonction objectif est définie par

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta \mathbf{Y}^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{Y} + r \Delta \alpha^2) dt$$

La figure 5-1 montre le réseau étudié avec le régulateur unifié de TCSC basé sur le premier modèle de référence de IEEE. Dans la conception du régulateur de TCSC, on suppose la matrice

de pondération $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_I \end{bmatrix}$ où q_1 désigne le coefficient de pondération pour Δy_1 et q_I désigne

le coefficient de pondération pour ΔY_I . Notre intérêt vise l'étude du coefficient de pondération q_I .

Pour analyser l'influence du coefficient de pondération q_I sur l'effet de la commande unifiée de TCSC, on suppose que q_I varie et nous évaluons les gains correspondants de la loi de commande du TCSC, ainsi que les valeurs propres obtenues pour le réseau électrique. Les tableaux 5-6 et 5-7 montrent la partie réelle des valeurs propres correspondant aux six modes propres d'oscillation mécanique d'arbre du turboalternateur, le mode 1 (298 rad/s), le mode 2 (203 rad/s), le mode 3 (160 rad/s), le mode 4 (127 rad/s), le mode 5 (99 rad/s) et le mode 6 (9 rad/s), et à un mode d'oscillation électrique relié au courant de la ligne de transmission à 663 rad/s en fonction du coefficient de pondération q_I pour deux cas : lorsque $q_I = 0$ et lorsque $q_I = 1$. Les figures 5-7 et 5-8 donnent la tendance de la variation de la partie réelle des valeurs propres aux fréquences intéressantes. Les conditions d'opération sont définies à l'annexe B.1.3.4.

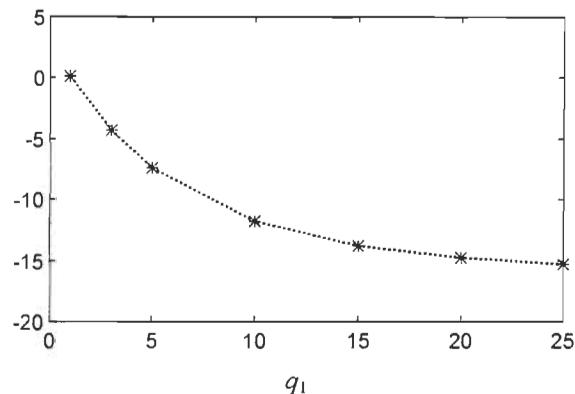
Tableau 5-6 : Partie réelle des valeurs propres en fonction de q_I lorsque $q_I = 0$ et $r = 2$

q_I	Partie réelle des valeurs propres relié aux fréquences intéressantes (rad/s)						
	Mode 0 (663 rad/s)	Mode 1 (298 rad/s)	Mode 2 (203 rad/s)	Mode 3 (160 rad/s)	Mode 4 (127 rad/s)	Mode 5 (99 rad/s)	Mode 6 (9 rad/s)
1	0.1100	-0.08592	-0.6654	-0.9610	-0.7148	-3.3034	-13.7482
3	-4.2783	-0.0876	-2.2200	-1.2021	-0.7148	-3.3034	-9.9744
5	-7.3779	-0.0891	-2.8293	-1.2844	-0.7067	-3.0978	-8.4830
10	-11.7689	-0.0913	-3.3845	-1.3505	-0.6928	-2.9651	-6.8280
15	-13.7895	-0.0926	-3.5710	-1.3679	-0.6833	-2.8846	-6.0628
20	-14.7896	-0.0933	-3.6581	-1.3731	-0.6765	-2.8299	-5.6078
25	-15.3012	-0.0939	-3.7082	-1.3748	-0.6715	-2.7903	-5.3027

Tableau 5-7 : Partie réelle des valeurs propres en fonction de q_I lorsque $q_I = 1$ et $r = 2$

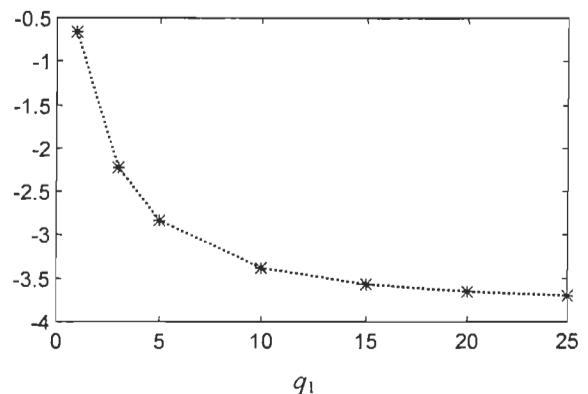
q_I	Partie réelle des valeurs propres relié aux fréquences intéressantes (rad/s)						
	Mode 0 (663 rad/s)	Mode 1 (298 rad/s)	Mode 2 (203 rad/s)	Mode 3 (160 rad/s)	Mode 4 (127 rad/s)	Mode 5 (99 rad/s)	Mode 6 (9 rad/s)
1	-2.2187	-0.0852	-0.8544	-1.0347	-0.7413	-3.4114	-13.0850
5	-8.7909	-0.0889	-2.9475	-1.3117	-0.7146	-3.1346	-8.3523
10	-12.5814	-0.0913	-3.4511	-1.3648	-0.6967	-2.9836	-6.7688
15	-14.3026	-0.0926	-3.6160	-1.3771	-0.6857	-2.8966	-6.0265
20	-15.1384	-0.0934	-3.6919	-1.3800	-0.6783	-2.8386	-5.5823
25	-15.5516	-0.0939	-3.7353	-1.3803	-0.6729	-2.7972	-5.2835
35	-15.8196	-0.0947	-3.7873	-1.3795	-0.6658	-2.7422	-4.9046
45	-15.7885	-0.0953	-3.8242	-1.3794	-0.6615	-2.7085	-4.6744
55	-15.6553	-0.0958	-3.8570	-1.3804	-0.6588	-2.6868	-4.5207

Partie réelle



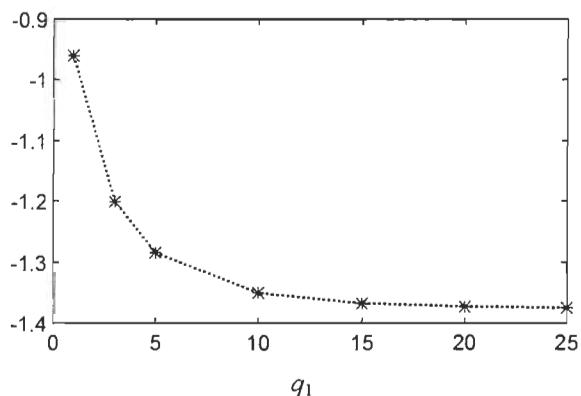
(a) : Mode 0 (663 rad/s)

Partie réelle



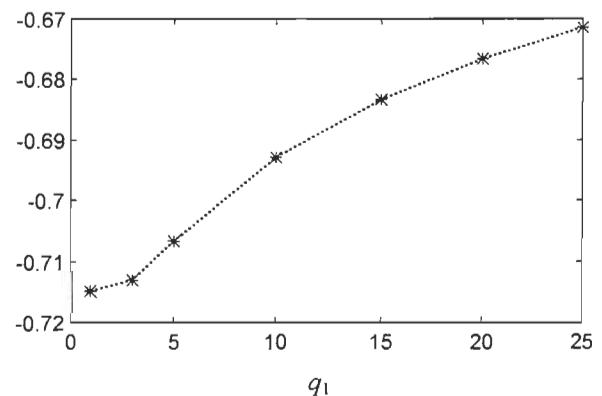
(b) : Mode 2 (203 rad/s)

Partie réelle



(c) : Mode 3 (160 rad/s)

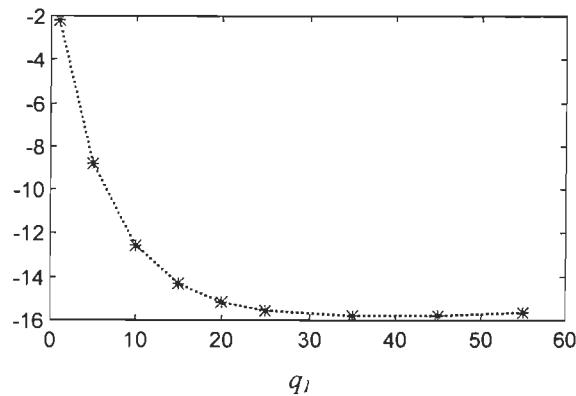
Partie réelle



(d) : Mode 4 (127 rad/s)

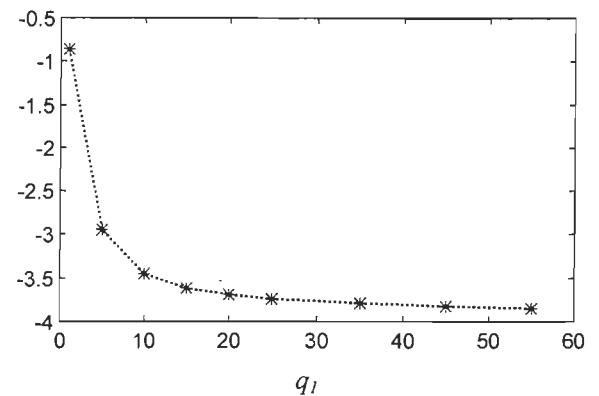
 Figure 5-7 : Partie réelle des modes propres intéressants qui varie avec q_1 lorsque $q_I = 0$

Partie réelle



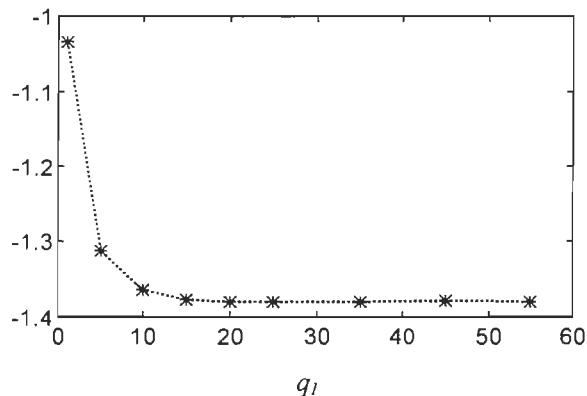
(a) : Mode 0 (663 rad/s)

Partie réelle



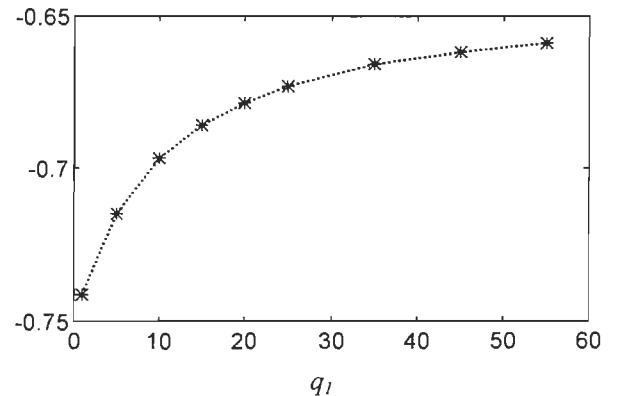
(b) : Mode 2 (203 rad/s)

Partie réelle



(c) : Mode 3 (160 rad/s)

Partie réelle



(d) : Mode 4 (127 rad/s)

Figure 5-8 : Partie réelle des modes propres intéressants qui varie avec q_I lorsque $q_I = 1$

Des tableaux 5-6 et 5-7 et des figures 5-7 et 5-8, on remarque qu'avec l'accroissement de q_I , d'abord, la partie réelle des valeurs propres correspondant aux modes d'oscillation mécanique hypo-synchrone 1 (298 rad/s), 2 (203 rad/s) et 3 (160 rad/s), et au mode d'oscillation électrique 0 (663 rad/s) décroît, ensuite leur diminution ralentit et finalement les parties réelles tendent vers des constantes. Cependant, avec l'accroissement de q_I , pour les modes d'oscillation hypo-synchrone 4 (127 rad/s) et 5 (99z rad/s) et le mode d'oscillation en basse fréquence 6 (9 rad/s), leur partie réelle s'accroît pour tendre respectivement à une constante. Ceci signifie qu'avec

l'accroissement de q_I , l'amortissement d'oscillation pour les modes mécaniques aux fréquences relativement élevées s'accroît, mais l'amortissement pour les modes d'oscillation mécanique aux fréquences relativement basses décroît. Notons que dans l'exemple, lorsque q_I est très faible et que $q_I = 0$, le mode électrique 0 (663 rad/s) du réseau électrique devient instable.

Toutes les analyses indiquent qu'on doit choisir q_I d'après l'exigence pratique pour la stabilité du réseau électrique afin obtenir l'effet désiré de la commande de TCSC sur l'amortissement des modes d'oscillation instable du réseau électrique.

5.6 Vérification de la robustesse

Le réseau électrique montré sur la figure 5-1 est encore utilisé pour l'étude de la robustesse. Pour valider la robustesse du régulateur unifié de TCSC proposé, la comparaison des valeurs propres du réseau est effectuée lorsque les paramètres du réseau électrique varient dans une plage de fonctionnement possible. Notre intérêt vise encore les modes d'oscillation mécanique reliés au système de six masses-ressorts d'arbre du turboalternateur.

D'abord, l'influence de la variation de la puissance électromagnétique P_m sur l'effet de la commande du régulateur unifié de TCSC proposé est étudiée. Le tableau 5-8 montre les résultats du calcul des valeurs propres correspondant aux modes d'oscillation mécanique d'arbre du turboalternateur du réseau pour la condition de fonctionnement initiale 1 ($P_{m0} = 0.8$ (p.u.) et $X_{L\Sigma} = 0.56$ (p.u.)) pour deux cas : avec la commande unifiée de TCSC proposée avec la rétroaction des signaux des mesures locales et sans commande de TCSC. Les modes 1 à 6 correspondent respectivement aux modes d'oscillation de torsion hypo-synchrones aux fréquences naturelles 298 rad/s, 203 rad/s, 160 rad/s, 127 rad/s et 99 rad/s et au mode d'oscillation en basse fréquence à la fréquence naturelle 9 rad/s. Le régulateur unifié du TCSC est conçu à l'état de fonctionnement initial 1. Le tableau 5-9 donne la partie réelle des valeurs propres correspondant aux modes mécaniques qui varient avec la puissance électromagnétique P_m d'alternateur autour du point de fonctionnement initial 1 pour deux cas : avec la commande unifiée du TCSC proposée et sans commande de TCSC. La figure 5-9 montre les courbes de variation de la partie réelle des valeurs propres.

Tableau 5-8 : Valeurs propres des modes mécaniques au point de fonctionnement initial 1

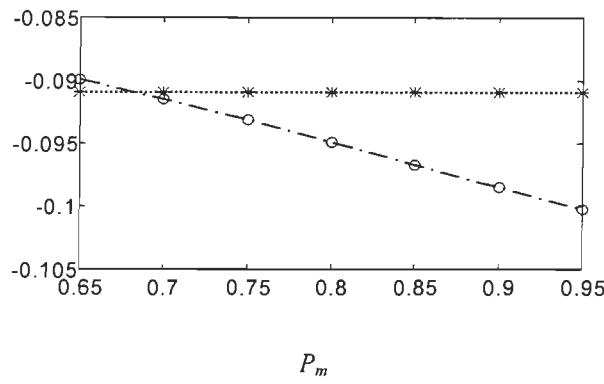
 $(P_{m0} = 0.8 \text{ (p.u.) et } X_{L\Sigma 0} = 0.56 \text{ (p.u.)})$

Mode	Sans Commande	Avec commande locale
1	$-0.0909 \pm 2.98.1802i$	$-0.0949 \pm 298.2000i$
2	$-0.0213 \pm 202.9430i$	$-4.1295 \pm 209.8705i$
3	$-0.0851 \pm 160.5743i$	$-1.4248 \pm 163.0355i$
4	$-0.3295 \pm 127.0014i$	$-0.6785 \pm 127.5739i$
5	$0.0835 \pm 97.7326i$	$-2.7839 \pm 103.9023i$
6	$-0.2021 \pm 9.3919i$	$-4.7130 \pm 22.2461i$

Tableau 5-9 : Partie réelle des modes 1 à 6 en fonction de la puissance mécanique P_m

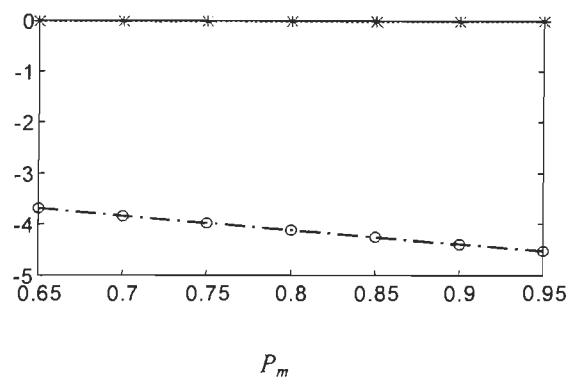
	Mode	$P_m = 0.65$	$P_m = 0.7$	$P_m = 0.75$	$P_{m0} = 0.8$	$P_m = 0.85$	$P_m = 0.9$	$P_m = 0.95$
Sans commande	1	-0.0909	-0.0909	-0.0909	-0.0909	-0.0909	-0.0909	-0.0909
	2	-0.0213	-0.0213	-0.0213	-0.0213	-0.0213	-0.0213	-0.0214
	3	-0.0850	-0.0850	-0.0850	-0.0851	-0.0851	-0.0851	-0.0852
	4	-0.3294	-0.3294	-0.3295	-0.3295	-0.3296	-0.3296	-0.3297
	5	0.0728	0.0763	0.0798	0.0835	0.0874	0.0913	0.0955
	6	-0.3706	-0.3141	-0.2579	-0.2021	-0.1465	-0.0912	-0.0359
Avec la commande	1	-0.0899	-0.0915	-0.0931	-0.0949	-0.0967	0.0985	-0.1002
	2	-3.6965	-3.8456	-3.9894	-4.1295	-4.2671	-4.4028	-4.5373
	3	-1.3702	-1.3876	-1.4058	-1.4248	-1.4446	-1.4652	-1.4865
	4	-0.6768	-0.6769	-0.6774	-0.6785	-0.6801	-0.6821	-0.6844
	5	-2.8896	-2.8480	-2.8130	-2.7839	-2.7601	-2.7410	-2.7263
	6	-8.0447	-6.8137	-5.7109	-4.7130	-0.3803	-2.9677	-2.1966

Partie réelle



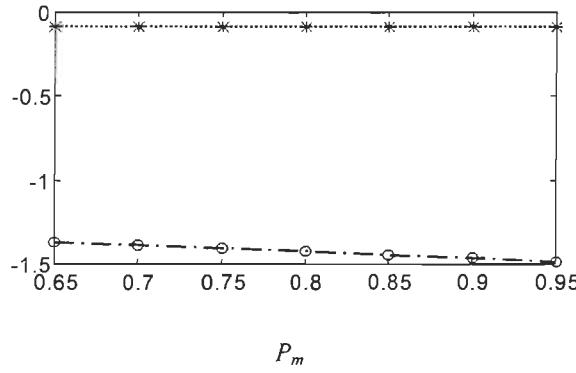
(a) : Mode hypo-synchrone 1 (298 rad/s)

Partie réelle



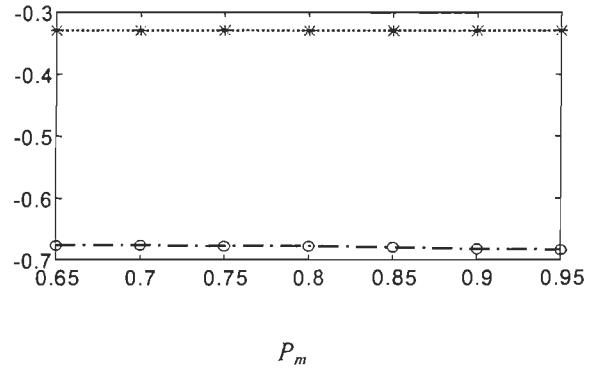
(b) : Mode hypo-synchrone 2 (203 rad/s)

Partie réelle



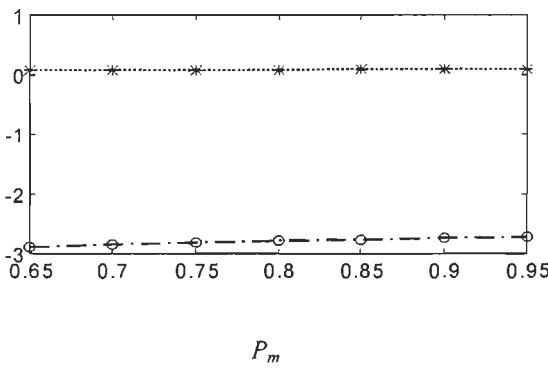
(c) : Mode hypo-synchrone 3 (160 rad/s)

Partie réelle



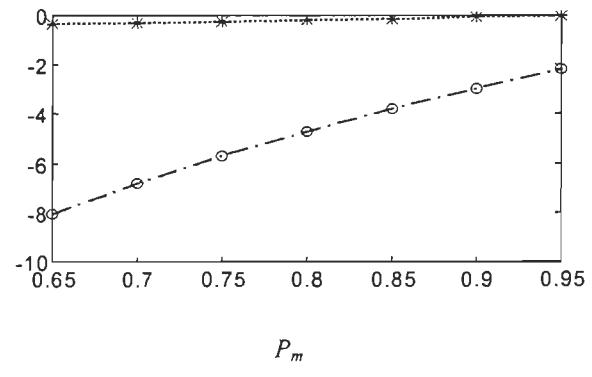
(d) : Mode hypo-synchrone 4 (127 rad/s)

Partie réelle



(e) : Mode hypo-synchrone 5 (99 rad/s)

Partie réelle



(f) : Mode en basse fréquence 6 (9 rad/s)

 Figure 5-9 : Partie réelle des valeurs propres en fonction de la puissance de l'alternateur P_m

* : sans commande de TCSC o : avec la commande de TCSC proposé

L'influence de la variation de la réactance générale $X_{L\Sigma}$ de la ligne de transmission sur l'effet de la commande du régulateur unifié de TCSC proposé est également étudiée. Les tableaux 5-10 et 5-11 montrent la partie réelle des valeurs propres correspondant aux modes mécaniques en fonction de K_L où $k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$ qui varie dans une plage de 0.925 à 1.075, donc $X_{L\Sigma}$ varie dans une plage de 0.518 à 0.602, pour deux cas : sans commande de TCSC et avec la commande unifiée du TCSC. Le régulateur unifié du TCSC est conçu à l'état de fonctionnement initial 2 : $P_m = 0.9$ (p.u.) et $X_{L\Sigma 0} = 0.56$ (p.u.). La figure 5-10 montre la courbe de variation de la partie réelle des valeurs propres.

Tableau 5-10: Partie réelle des valeurs propres en fonction de $k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$
(sans commande de TCSC)

k_L ($k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$)	Mode 1 (298 rad/s)	Mode 2 (203 rad/s)	Mode 3 (160 rad/s)	Mode 4 (127 rad/s)	Mode 5 (99 rad/s)	Mode 6 (9 rad/s)
0.925	-0.0909	-0.0209	-0.0849	-0.3294	-0.0879	-0.1538
0.95	-0.0909	-0.0211	-0.0850	-0.3294	-0.0787	-0.1320
0.975	-0.0909	-0.0212	-0.0851	-0.3295	-0.0514	-0.1112
1.0	-0.0909	-0.0213	-0.0851	-0.2963	0.0913	-0.0912
1.025	-0.0909	-0.0215	-0.0852	-0.3297	1.5978	-0.0719
1.05	-0.0909	-0.0216	-0.0853	-0.3298	2.3598	-0.0535
1.075	-0.0909	-0.0217	-0.0854	-0.3299	2.1315	-0.0357

Tableau 5-11 : Partie réelle des valeurs propres en fonction de $k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$
(avec la commande unifiée de TCSC conçu à l'état de fonctionnement initial 2)

k_L ($k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$)	Mode 1 (298 rad/s)	Mode 2 (203 rad/s)	Mode 3 (160 rad/s)	Mode 4 (127 rad/s)	Mode 5 (99 rad/s)	Mode 6 (9 rad/s)
0.925	-0.0968	-4.0946	-1.4091	-0.6620	-2.6826	-3.8261
0.95	-0.0970	-4.1911	-1.4332	-0.6702	-2.7338	-4.0114
0.975	-0.0972	-4.2870	-1.4573	-0.6786	-2.7861	-4.2179
1.0	-0.0975	-4.3820	-1.4813	-0.6871	-2.8400	-4.4475
1.025	-0.0976	-4.4765	-1.5053	-0.6959	-2.8958	-4.7030
1.05	-0.0978	-4.5704	-1.5294	-0.7050	-2.9538	-4.9870
1.075	-0.0979	-4.6637	-1.5538	-0.7143	-3.0144	-5.3030

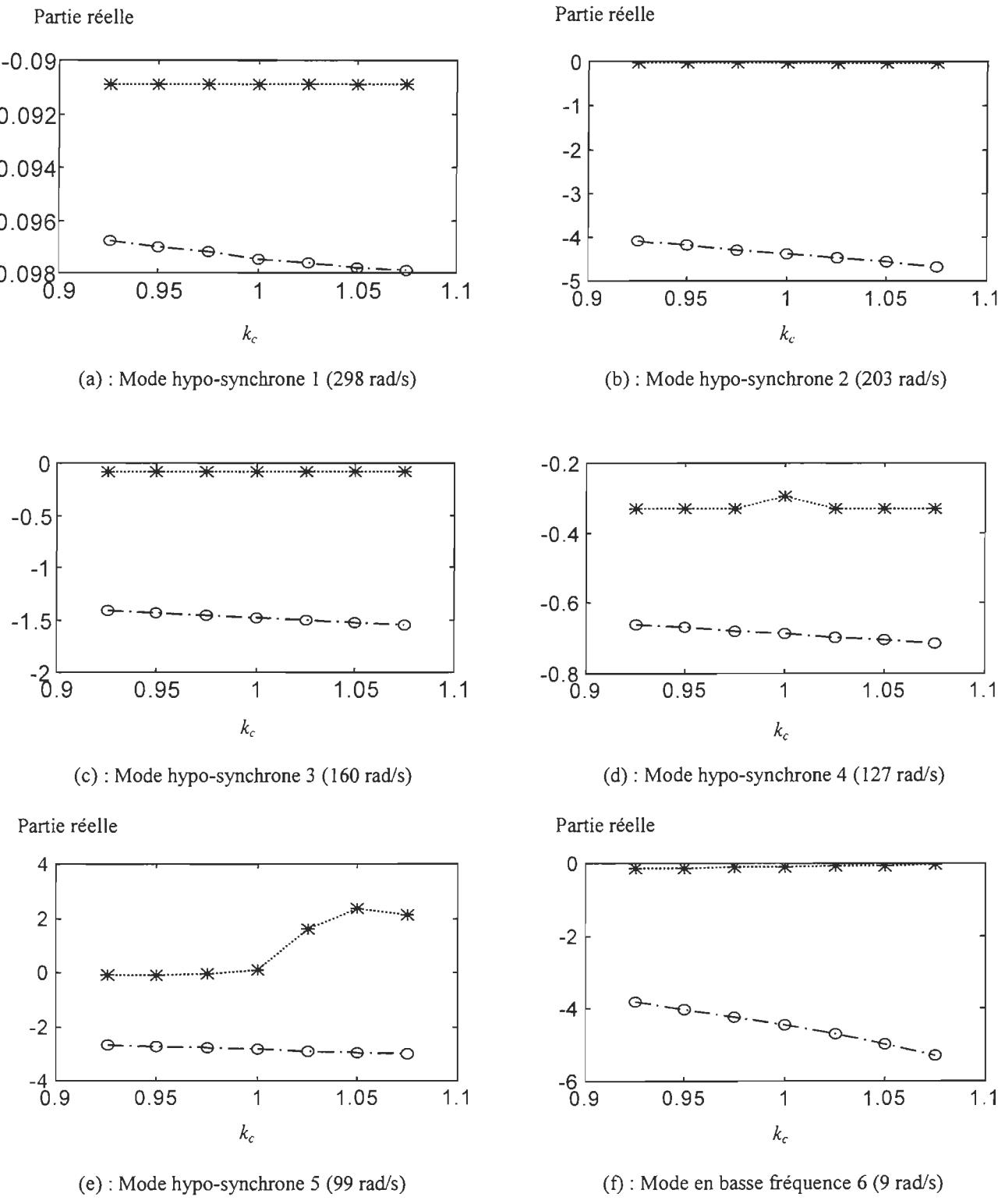


Figure 5-10 : Partie réelle des valeurs propres en fonction de $k_L = X_{L\Sigma} / X_{L\Sigma 0}$ où $X_{L\Sigma 0} = 0.56$ (p.u.)

* : sans commande de TCSC o : avec la commande du TCSC proposée

Des tableaux 5-8,5-9,5-10 et 5-11 et des figures 5-9 et 5-10, on peut remarquer que sous l'effet du régulateur unifié du TCSC proposé conçu à l'état de fonctionnement initial correspondant, lorsque les paramètres du réseau électrique P_m et $X_{L\Sigma}$ varient dans les plages spécifiées, la partie réelle des valeurs propres reliées aux modes d'oscillation hypo-synchrone et d'oscillation en basse fréquence d'arbre du turboalternateur demeurent dans le demi-plan gauche du plan complexe et offrent une bonne marge de stabilité. Les figure 5-9 et 5-10 montrent davantage que sous l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée, lorsque les paramètres du réseau électrique P_m et $X_{L\Sigma}$ varient dans leur plage spécifiée correspondante, pour les modes d'oscillation hypo-synchrone, c'est-à-dire le mode 1 (298 rad/s), le mode 2 (203 rad/s), le mode 3 (160 rad/s), le mode 4 (127 rad/s) et le mode 5 (99 rad/s), la partie réelle des valeurs propres varie peu par rapport à leur état de fonctionnement initial. La déviation relative de la partie réelle de la valeur propre reliée au mode 6 (9 rad/s) d'oscillation en basse fréquence est un peu plus grande, mais on remarque des figures 5-9 (f) et 5-10 (f) que lorsque les paramètres du réseau électrique P_m et $X_{L\Sigma}$ varient dans leur plage de fonctionnement spécifiée, sous l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée, la partie réelle maximale des valeurs propres correspondant au mode 6 (9 rad/s) est encore suffisamment négative pour maintenir un bon amortissement pour le mode 6 d'oscillation en basse fréquence : lorsque P_m s'accroît de l'état de fonctionnement initial $P_{m0} = 0.8$ à $P_m = 0.95$, la partie réelle de cette valeur propre est de -2.1966 (aussi voir le tableau 5-9), et lorsque $X_{L\Sigma}$ décroît de l'état de fonctionnement initial $X_{L\Sigma0} = 0.56$ à $X_{L\Sigma0} = 0.518$ ($k_L = 0.925$), la partie réelle de cette valeur propre est de -3.8261 (aussi voir le tableau 5-11). Les plages de variation typique de P_m et de $X_{L\Sigma}$ sont plus petites que celles que nous avons spécifiées. Par conséquent, ces résultats montrent que malgré les variations pratiques des paramètres de réseau électrique, le régulateur unifié de TCSC conçu à l'état de fonctionnement initial permet encore de maintenir un bon effet de la commande sur l'amortissement de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence du réseau électrique, ce qui indique que le régulateur unifié de TCSC proposé avec la rétroaction de variables d'état locales a une robustesse satisfaisante pour améliorer la stabilité du réseau électrique.

Les paramètres du réseau étudié et les conditions pour la conception des régulateurs du TCSC peuvent être trouvés à la section B.1.3.5 de l'annexe B.

5.7 Conclusions

Bien que la conception du régulateur de TCSC proposé ait été complétée à l'aide d'un modèle mathématique simplifié du réseau électrique proposé dans la section 2.4.2, la validation pour l'effet de la commande unifiée de TCSC proposée sur l'amortissement de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence a été effectuée par la méthode d'analyse des valeurs propres à l'aide d'un modèle mathématique complet. À partir de l'analyse et des comparaisons des valeurs propres, on peut tirer les principales conclusions suivantes :

- la méthode de conception du régulateur de TCSC basée sur la méthode proposée pour l'évaluation de la stabilité du réseau électrique est efficace et pratique;
- le modèle simplifié du réseau proposé pour la conception du régulateur unifié de TCSC est faisable et pratique;
- le schéma de commande unifiée de TCSC proposé avec la rétroaction de mesures locales a un effet important sur l'amélioration de la caractéristique d'amortissement du réseau électrique;
- la commande de TCSC proposée peut efficacement et simultanément amortir la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence du réseau électrique, donc elle possède un effet de la commande unifiée sur l'amortissement de l'oscillation de multi-modes;
- le régulateur unifié de TCSC proposé est supérieur aux autres régulateurs pour amortir simultanément et efficacement la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence de multi-modes dans le réseau électrique;
- comme la loi de commande du régulateur proposé est élaborée autour du point de fonctionnement initial, la commande unifiée de TCSC proposée peut assurer la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission sans changer l'état de fonctionnement en plus d'amortir efficacement la résonance hypo-synchrone;
- le régulateur unifié de TCSC proposé possède une caractéristique de robustesse satisfaisante grâce à l'introduction du coefficient d'amortissement désiré D_d qui peut être ajusté d'après la demande pour la robustesse, donc le régulateur proposé est évidemment différent du régulateur optimal général basé sur la méthode de LQR sans robustesse. Lorsque les paramètres du réseau étudié varient dans une plage de fonctionnement possible, le régulateur unifié de TCSC proposé peut également efficacement amortir la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence de multi-modes;

- la commande unifiée de TCSC n'a pas d'influence évidente sur les modes d'oscillation hypo-synchrone à la fréquence supérieure, soit le mode 1 (298 rad/s) pour le réseau basé sur le premier modèle de référence de IEEE et le mode 1 (321 rad/s) pour le réseau basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE, qui dépendent principalement de l'effet de l'amortissement inhérent de l'alternateur comme, par exemple, celui produit par la résistance du vent et par le frottement dans l'alternateur. Cette conclusion est conforme au cas pratique.

CHAPITRE 6

ANALYSE DE L'EFFET DE LA COMMANDE UNIFIÉE DE TCSC PAR SIMULATION NUMÉRIQUE

6.1 Introduction

La méthode par simulation numérique est utilisée pour valider davantage la stratégie de commande unifiée de TCSC proposée. Le simulation numérique du réseau électrique permet d'observer intuitivement l'effet de la commande unifiée du régulateur de TCSC sur l'amortissement des modes de résonance hypo-synchrone et d'oscillation en basse fréquence. La simulation est effectuée dans l'environnement MATLAB®/SIMULINK™ avec un modèle du réseau électrique non linéaire détaillé en utilisant des blocs de SIMUSTAB. Une perturbation relativement faible est considérée dans la simulation afin d'analyser les problèmes de stabilité dynamique des réseaux électriques.

Deux réseaux électriques basés sur les modèles de référence de IEEE sont présentés pour la simulation du processus transitoire. À l'aide du modèle mathématique linéarisé simplifié de chacun des réseaux, un régulateur optimal unifié de TCSC avec rétroaction des variables d'état locales est conçu et est implanté dans le simulateur. Ensuite, la simulation numérique du processus transitoire est effectuée pour trois exemples typiques de fonctionnement des réseaux électriques en états de stabilité différents, l'état stable proche, l'état instable et l'état faiblement stable, pour l'analyse de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence de multi-modes. Finalement, plusieurs comparaisons sont faites entre les résultats de l'analyse par la simulation numérique et ceux par l'analyse des valeurs propres.

6.2 Modèles des réseaux électriques basés sur les modèles de référence de IEEE pour la simulation numérique

Nous avons constitué deux modèles respectivement reliés au réseau basé sur le premier modèle de référence de IEEE montré sur la figure 5-1 et au réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE montré sur la figure 5-4 pour s'adapter à la simulation numérique

sous MATLAB®/SIMULINK™. Conformément au cas réel et pour éviter les problèmes numériques qui se produisent dans la simulation, nous avons ajouté de petites résistances respectivement dans la branche TCR de TCSC et dans la branche de condensateur de compensation fixe de TCSC. Ceci permet d'accélérer la décroissance des composantes pour accélérer la diminution des composantes électriques d'harmoniques d'ordre supérieur dans le réseau électrique et de réduire la déviation du fonctionnement du réseau électrique afin de permettre au processus transitoire de s'approcher autant que possible du processus dynamique du réseau électrique avec une petite perturbation. Nous pourrons aussi mettre l'accent sur l'étude des problèmes d'oscillation des modes mécaniques reliés à l'arbre de turboalternateur comme, par exemple, la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence. Les deux modèles sont montrés sur la figure 6-1 et sur la figure 6-2 qui correspondent respectivement au modèle montré sur la figure 5-1 et au modèle montré sur la figure 5-4. Dans ces modèles, la ligne de transmission électrique est modélisée par un circuit équivalent de type π où une branche constituée d'un petit condensateur en parallèle avec une résistance élevée est ajoutée aux bornes de la ligne de transmission. De plus, le modèle du transformateur est constitué d'une branche d'inductance équivalente en parallèle avec une résistance élevée.

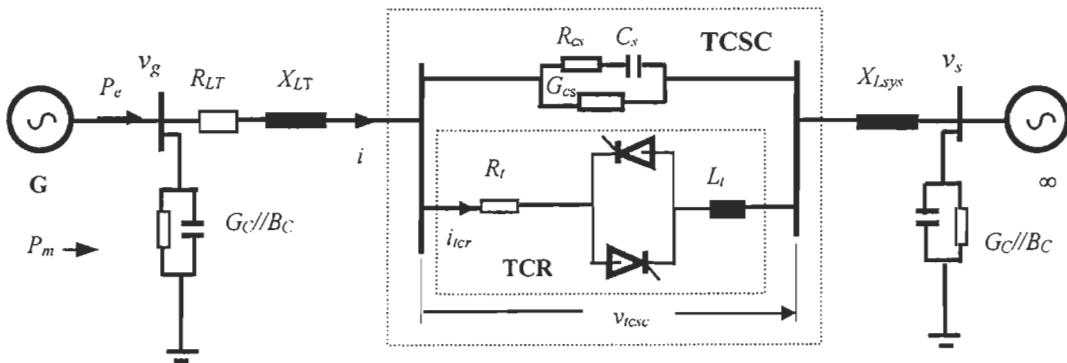


Figure 6-1: Réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE pour simulation

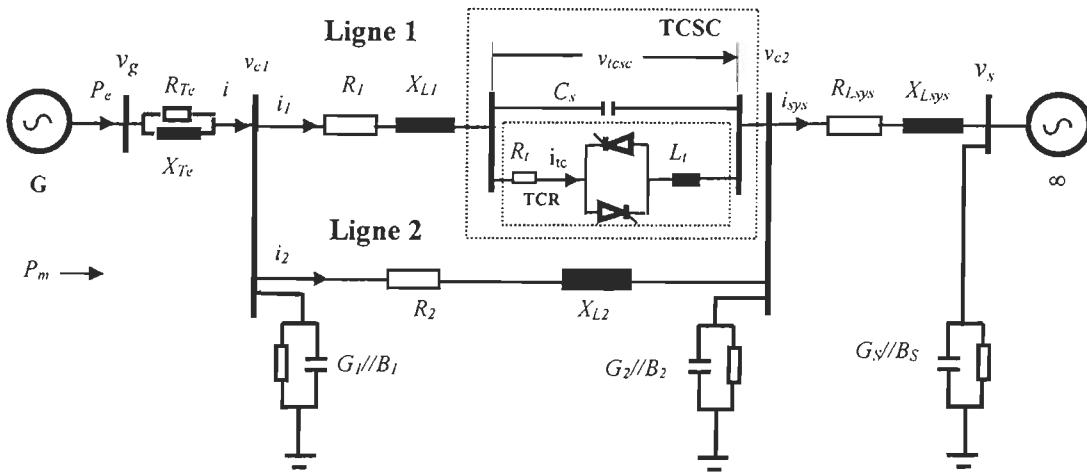


Figure 6-2 : Réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE pour simulation

Dans les deux modèles pour simulation numérique, l'alternateur synchrone peut être décrit par un modèle du système électrique basé sur une série d'équations différentielles non linéaires et par un modèle du système mécanique correspondant au système de multi-masses-ressorts d'arbre de turboalternateur avec paramètres localisés. Pour le modèle basé sur le premier modèle de référence de IEEE, l'arbre de turboalternateur est représenté par un système de six masses-ressorts , et pour le modèle basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE, l'arbre est représenté par un système de quatre masses-ressorts. Ils sont montrés sur les figures 4-8 et 4-9. Le TCSC est considéré comme un condensateur fixe branché en parallèle avec une réactance commandée par les thyristors (TCR -- “Thyristor-Controlled Reactance”). En négligeant l'influence des harmoniques d'ordre supérieur, la branche TCR de TCSC est décrite par une inductance équivalente variable L_{tc} en fonction de l'angle d'amorçage α comme le montre l'équation 2-8), donc le modèle mathématique général du TCSC est représenté par une série d'équations différentielles non linéaires comme le montre l'équation (2-9). Par conséquent, pour refléter le processus dynamique pratique autant que possible par simulation, le réseau électrique est décrit par un modèle non linéaire.

On remarque que par rapport aux modèles du réseau électrique montrés sur la figure 5-1 et sur la figure 5-4 donnés pour la conception du régulateur de TCSC et pour l'analyse des valeurs propres, les deux modèles du réseau électrique pour simulation numérique ont une petite

différence de structure en plus d'une différence dans la description mathématique du réseau électrique : modèle linéarisé pour la conception du régulateur de TCSC et pour l'analyse des valeurs propres et le modèle non linéaire pour simulation numérique avec effets parasites supplémentaires. La validation de l'effet de la commande unifiée de TCSC sur l'amortissement de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence sera effectuée par simulation à l'aide des modèles montrés sur les figures 6-1 et 6-2. Les paramètres des deux réseaux et les conditions de fonctionnement peuvent être trouvés à la section B.3 de l'annexe B.

6.3 Analyse de l'effet de la commande unifiée de TCSC à l'aide du premier modèle de référence de IEEE

D'abord, deux exemples de simulation numérique sous MATLAB[®]/SIMULINKTM pour le processus transitoire du réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE montré sur la figure 6-1 sont présentés pour la validation de l'effet de la commande de TCSC proposée. Pour permettre au processus transitoire dans la simulation de s'approcher du processus dynamique causé par une petite perturbation, celui-ci est provoqué par un faible déséquilibre de l'énergie électrique en état de démarrage initial.

6.3.1 Commande unifiée du TCSC pour un réseau électrique avec amortissement très faible

Le premier exemple de simulation concerne un réseau en état de fonctionnement critiquement stable (avec un amortissement très faible) durant le processus transitoire lorsqu'il n'y a pas l'effet de commande de TCSC. La simulation du processus transitoire est effectuée sous les conditions de fonctionnement suivantes :

- conditions de fonctionnement
 - $V_g = 1.05$, $V_s = 0.913$, $P_m = 0.9$ en p.u.;
 - angle d'amorçage du TCSC $\alpha_0 = 144^\circ$ et niveau de compensation de la ligne de transmission $k_{c0} = 0.3134$ pour lesquels la répartition désirée de la puissance sur la ligne de transmission est obtenue;

- coefficients d'amortissement inhérent du turboalternateur correspondant au système de six masses-ressorts : $D_H = 0.05$, $D_M = D_{Ba} = D_{Bb} = D_g = D_{EX} = 0$;
- état de fonctionnement initial des six sections du turboalternateur : $\delta_H = 1.23$, $\delta_M = 1.215$, $\delta_{Ba} = 1.201$, $\delta_{Bb} = 1.188$, $\delta_g = 1.175$ et $\delta_{EX} = 1.175$ en radian, et $\omega_H = \omega_M = \omega_{Ba} = \omega_{Bb} = \omega_g = \omega_{EX} = 1$ p.u.;
- état de fonctionnement désiré du turboalternateur sous la commande du TCSC proposée : $\delta_H = 1.23$, $\delta_M = 1.215$, $\delta_{Ba} = 1.201$, $\delta_{Bb} = 1.188$, et $\delta_g = \delta_{EX} = 1.17314$ en radian, et $\omega_H = \omega_M = \omega_{Ba} = \omega_{Bb} = \omega_g = \omega_{EX} = 1$ p.u.;
- état de fonctionnement désiré du réseau de transmission électrique sous la commande unifiée du TCSC proposée : $i_d = 0.8595$, $i_q = 0.3868$, $v_{tcsc-d} = 0.0728$, $v_{tcsc-q} = -0.1484$, $i_{tcr-d} = -1.8034$ et $i_{tcr-q} = -0.88725$ p.u.;
- temps où le régulateur de TCSC proposé est mis en service : $t_{tcsc} = 10$ s.

■ régulateur du TCSC

- loi de commande optimale unifiée de l'angle d'amorçage α du TCSC :

$$\Delta\alpha = -K_{Dn}\Delta X_{Dn}$$

avec le vecteur de coefficients de rétroaction des variables d'état locales :

$$K_{Dn} = [583.4447 \quad 0.3410 \quad -0.0504 \quad 0.3110 \quad -1.6699 \quad -1.0759 \quad -0.2867 \quad 0.6068]$$

et le vecteur d'entrée du régulateur correspondant aux variables d'état locales de la ligne de transmission :

$$\Delta X_{Dn} = [\Delta\omega_g \quad \Delta\delta_g \quad \Delta i_d \quad \Delta i_q \quad \Delta v_{tcsc-d} \quad \Delta v_{tcsc-q} \quad \Delta i_{tcr-d} \quad \Delta i_{tcr-q}]^T.$$

Le vecteur de gains du régulateur a été obtenu avec les matrices de coefficients de pondération

$$Q = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 70 \end{bmatrix} \text{ et } r = 2 \text{ et pour un coefficient d'amortissement désiré } D_d = 60.$$

Les autres paramètres peuvent être trouvés à la section B.3.1 de l'annexe B.

Les figures 6-3, 6-4, 6-5, 6-6, 6-7, 6-8, 6-9 et 6-10 montrent les résultats de la simulation sans commande de TCSC et avec la commande unifiée de TCSC proposée correspondant au premier

exemple. Dans ces figures, l'axe des abscisses désigne le temps en seconde et l'axe des ordonnées désigne l'angle δ d'arbre du turboalternateur en radian ou la pulsation ω d'arbre du turboalternateur en p.u..

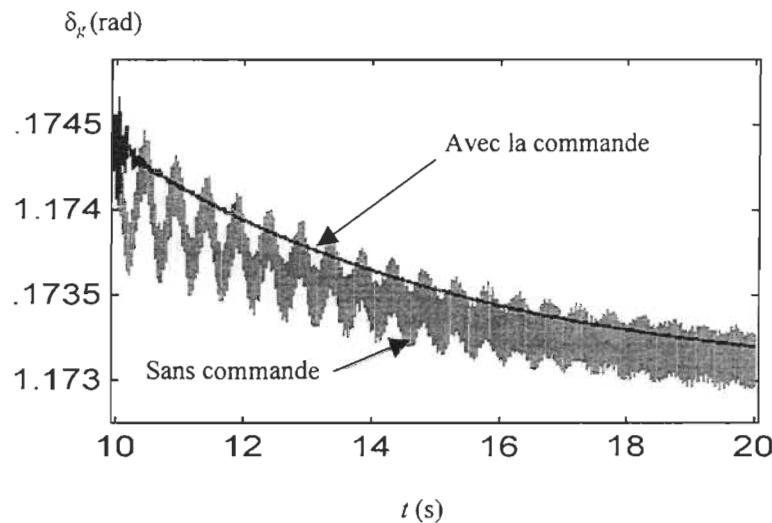


Figure 6-3 : Angle de la section d'alternateur d'arbre du turboalternateur

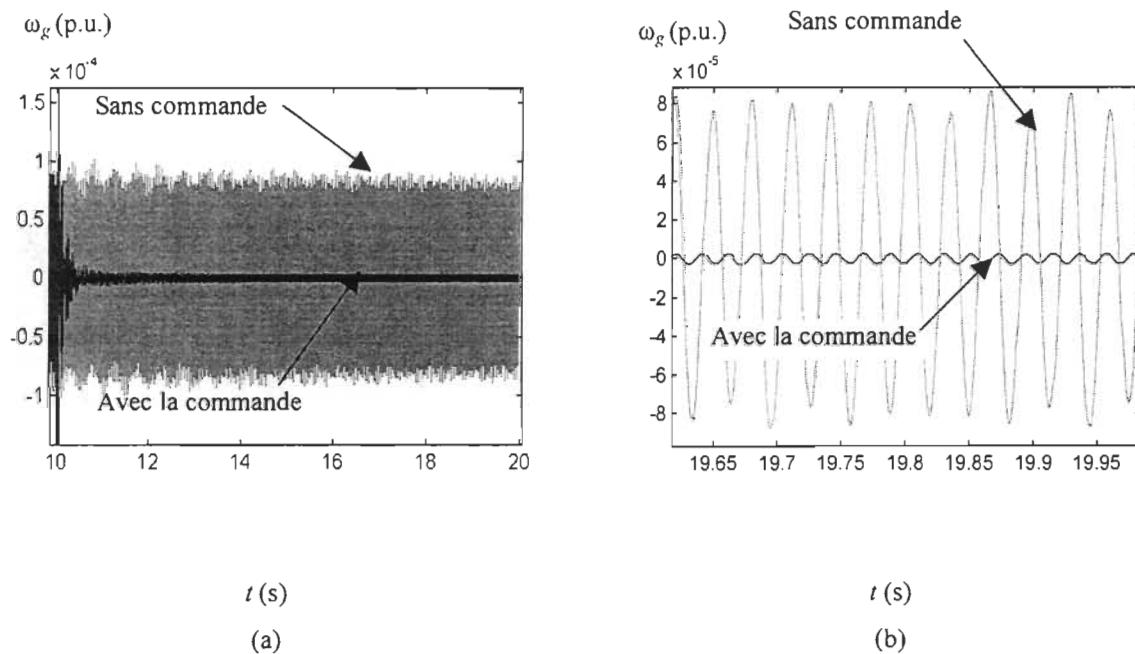


Figure 6-4 : Déviation de la pulsation de la section d'alternateur d'arbre du turboalternateur

Des figures 6-3 et 6-4, on remarque que lorsque il n'y a pas de commande de TCSC, le réseau électrique a une oscillation de l'angle et de la pulsation de rotor de l'alternateur avec amplitude presque constante, ce qui représente un amortissement très faible. Sous l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée, l'amortissement du réseau est beaucoup amélioré et les oscillations de l'angle et de la vitesse de rotor de l'alternateur sont fortement diminuées.

Par l'analyse des valeurs propres au chapitre 5 pour le réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE montré à la figure 5-1, on a remarqué que six modes d'oscillation mécanique sont compris dans l'oscillation mécanique d'arbre du turboalternateur. Ils sont représentés par les modes 1 à 6, correspondant respectivement aux fréquences naturelles d'oscillation de la torsion hypo-synchrone 298 rad/s, 203 rad/s, 160 rad/s, 127 rad/s et 99 rad/s, et à la basse fréquence 9 rad/s.

Pour analyser l'oscillation de chaque mode mécanique, d'abord, une technique d'identification des valeurs propres [1] basée sur l'analyse des vecteurs propres est utilisée pour identifier ces six modes. Pour observer et analyser clairement le processus de l'oscillation mécanique pour ces six modes dans le processus transitoire du réseau électrique, le balayage des fréquences pour la pulsation de chaque section d'arbre du turboalternateur est effectué par simulation numérique afin de sélectionner les composantes de fréquence intéressantes reliées à l'oscillation de l'arbre du turboalternateur. À l'aide du balayage de fréquence, les six composantes de fréquence de déviation de pulsation $\Delta\omega_{H298}$ (à 298 rad/s), $\Delta\omega_{M203}$ (à 203 rad/s), $\Delta\omega_{Bal61}$ (à 160 rad/s), $\Delta\omega_{Bb99}$ (à 99 rad/s), $\Delta\omega_{g9}$ (à 9 rad/s) et $\Delta\omega_{EX127}$ (à 127 rad/s) sont tirées, qui sont respectivement comprises dans les pulsations de la section de turbine à la pression haute, dans la pulsation de la section de turbine à la pression moyenne, dans la pulsation des sections des deux turbines à la pression basse A et B, dans la pulsation de la section de rotor d'alternateur et dans la pulsation de la section d'excitateur du turboalternateur. Le processus de l'oscillation des six composantes de pulsation est montré sur les figures 6-5 à 6-10. D'après l'identification des valeurs propres mentionnée au-dessus, on remarque que les six composantes de fréquence sélectionnées peuvent typiquement refléter l'oscillation des six modes propres correspondant au système de six masses-ressorts d'arbre du turboalternateur.

Des figures, on peut remarquer que dans l'ensemble, la caractéristique d'amortissement du réseau électrique obtient une grande amélioration sous l'effet de la commande unifiée du TCSC. D'abord, les figures 6-5 et 6-7 montrent que lorsque il n'y a pas de commande de TCSC, les

oscillations des modes mécaniques avec amplitude presque constante se produisent respectivement aux fréquences hypo-synchrones 203 rad/s et 127 rad/s qui présentent un amortissement faible, mais sous l'effet de la commande unifiée du TCSC, les oscillations sont diminuées. Des figures 6-6 et 6-8, on peut remarquer que sous l'effet de la commande unifiée du TCSC, l'amortissement pour les oscillations hypo-synchrones respectivement aux fréquences 161 rad/s et 99 rad/s est également beaucoup amélioré. Ceux-ci indiquent que l'effet de la commande unifiée du TCSC permet à l'oscillation hypo-synchrone aux fréquences 203 rad/s, 161 rad/s, 127 rad/s et 99 rad/s d'être évidemment amortis. Également, de la figure 6-9, on remarque que le mode d'oscillation en basse fréquence (9 rad/s) est efficacement et simultanément amorti avec la commande unifiée de TCSC. La figure 6-10 montre que pour le mode d'oscillation à la fréquence hypo-synchrone supérieure 298 rad/s, l'effet de la commande n'est pas aussi marqué car ce mode dépend principalement de l'effet de l'amortissement inhérent du turboalternateur, donc le phénomène observé de la figure 6-10 est conforme au résultat du chapitre 5 par l'analyse des valeurs propres pour le réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE.

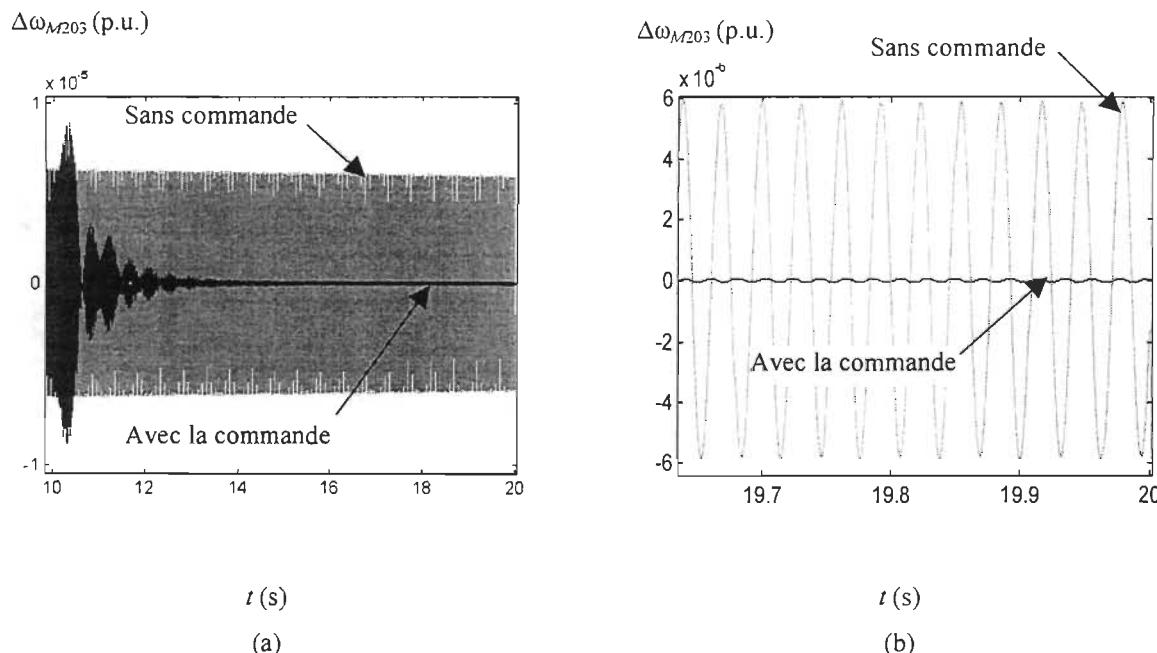


Figure 6-5 Composante de la déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression moyenne au mode hypo-synchrone 2 (203 rad/s)

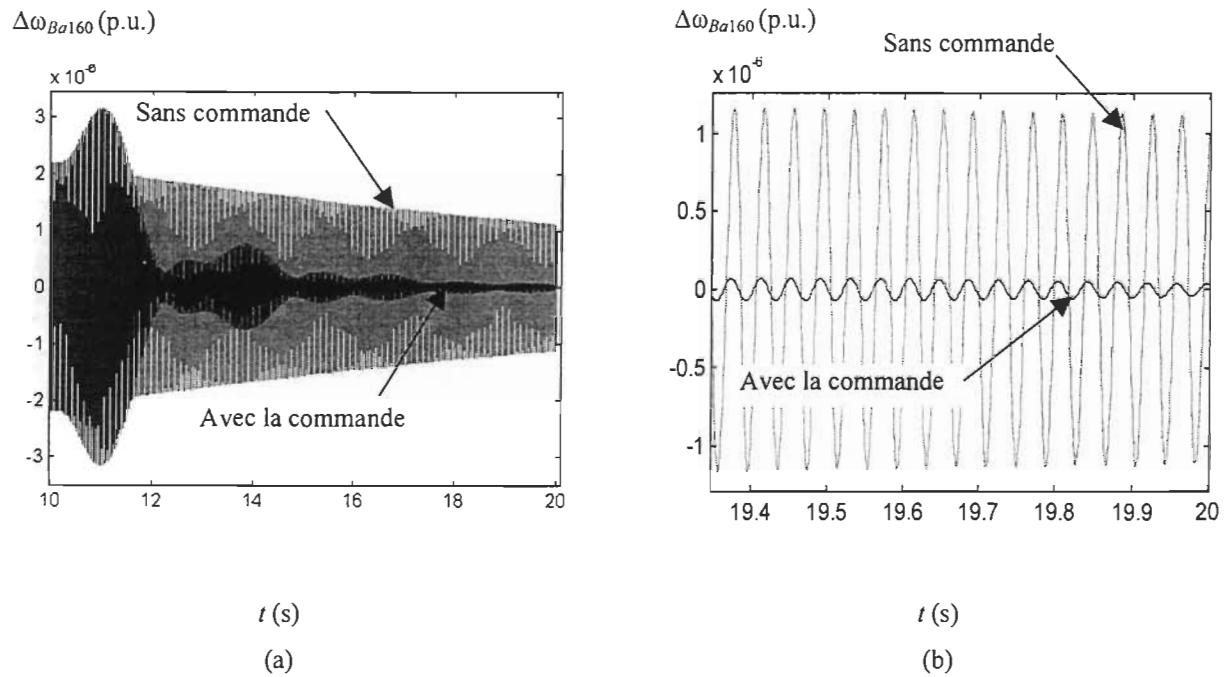


Figure 6-6 : Composante de la déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression basse A au mode hypo-synchrone 3 (160 rad/s)

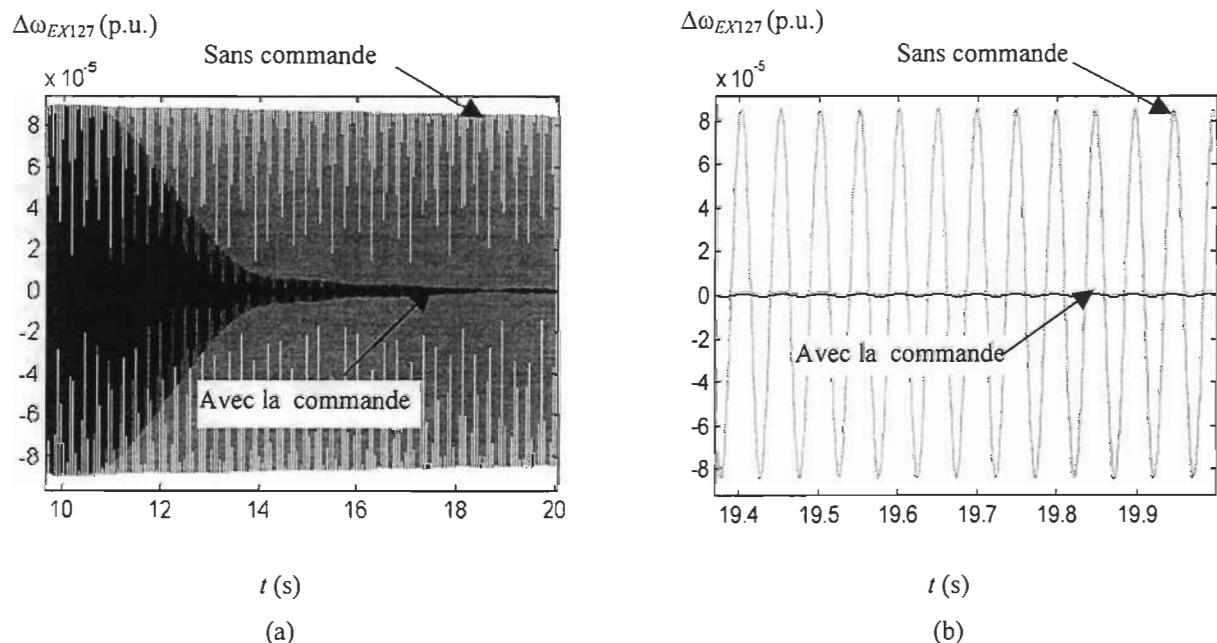


Figure 6-7 : Composante de la déviation de la pulsation de la section d'excitateur au mode hypo-synchrone 4 (127 rad/s)

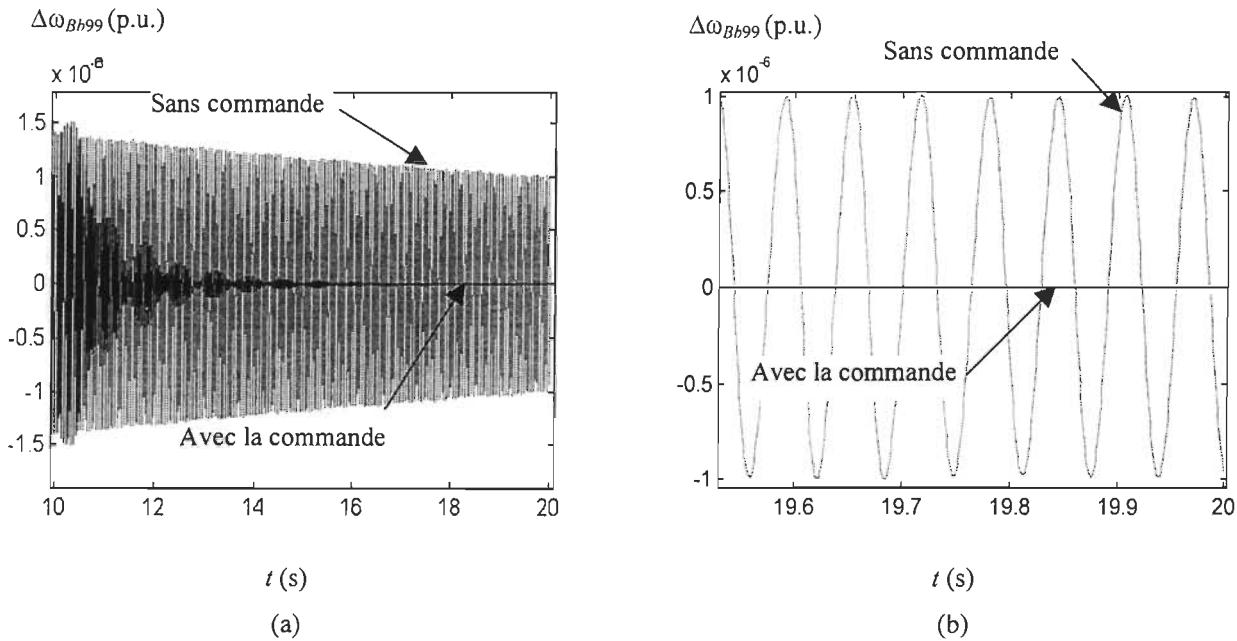


Figure 6-8 : Composante de la déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression basse B au mode hypo-synchrone 5 (99 rad/s)

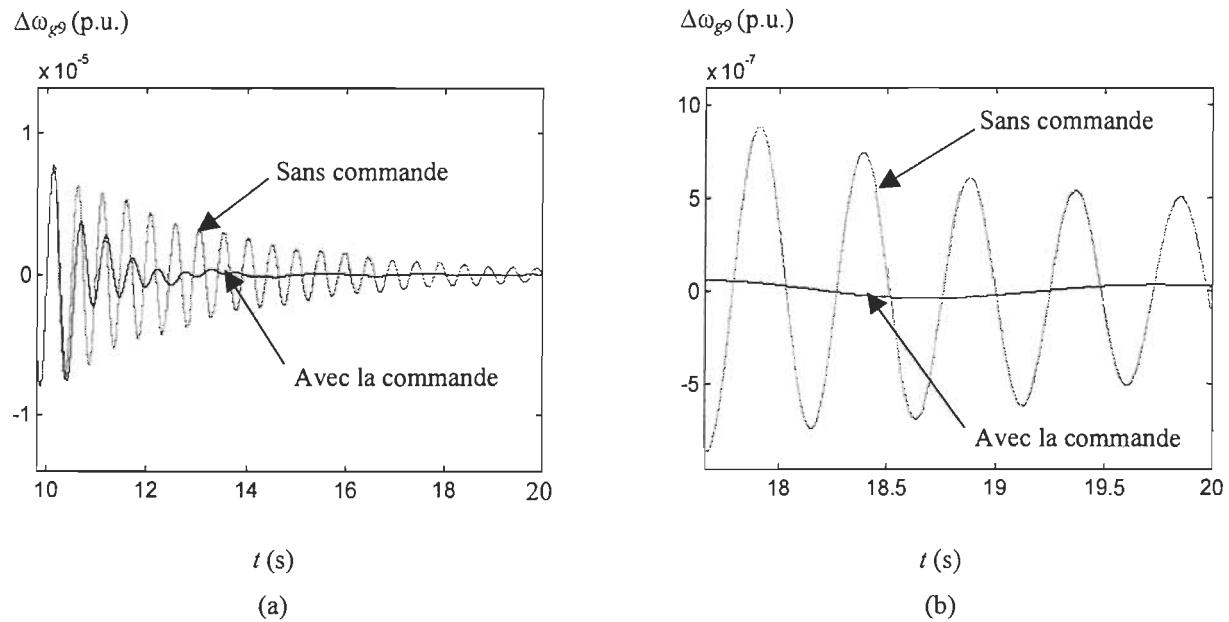


Figure 6-9: Composante de la déviation de la pulsation de la section du rotor de l'alternateur au mode en basse fréquence 6 (9 rad/s)

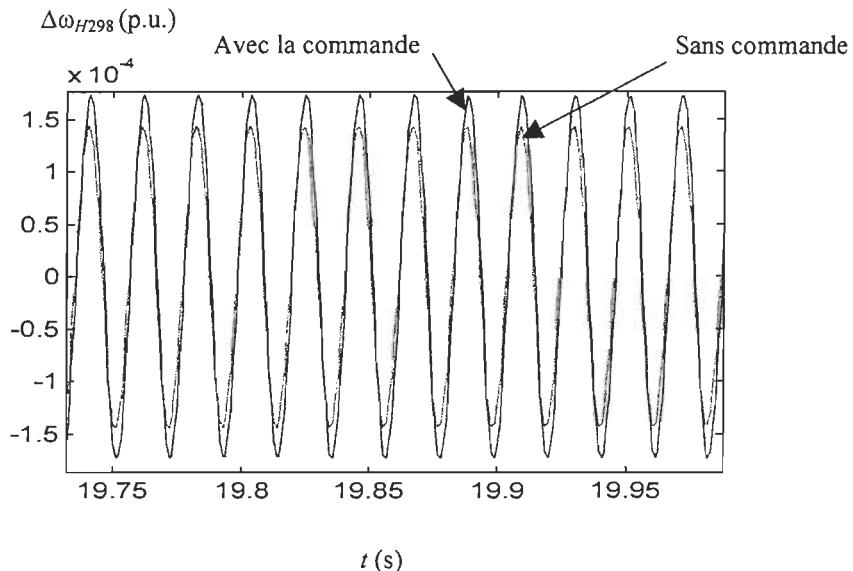


Figure 6-10: Composante de la déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression haute au mode hypo-synchrone 1 (298 rad/s)

6.3.2 Commande unifiée du TCSC pour un réseau électrique avec amortissement négatif

Le deuxième exemple de simulation correspond à un réseau avec amortissement négatif et donc en état de fonctionnement instable dans le processus transitoire lorsque il n'y a pas de commande de TCSC. La simulation du processus transitoire est effectuée sous les conditions suivantes :

■ conditions de fonctionnement du réseau

- $V_g = 1.05$, $V_s = 0.913$, $P_m = 0.9$ en p.u.;
- $\alpha_0 = 149^\circ$ et niveau de compensation $k_{c0} = 0.3596$ pour lesquels la répartition désirée de la puissance sur la ligne de transmission est obtenue;
- coefficients d'amortissement inhérent du turboalternateur correspondant au système de six masses-ressorts : $D_H = 0.05$, $D_M = D_{Ba} = D_{Bb} = D_g = D_{Ex} = 0$;
- état de fonctionnement initial du turboalternateur : $\delta_H = 1.23$, $\delta_M = 1.215$, $\delta_{Ba} = 1.201$, $\delta_{Bb} = 1.188$, $\delta_g = 1.175$ et $\delta_{Ex} = 1.175$ en radian,
et $\omega_H = \omega_M = \omega_{Ba} = \omega_{Bb} = \omega_g = \omega_{Ex} = 1$ p.u.;
- état de fonctionnement désiré du turboalternateur sous la commande proposée:

$\delta_H = 1.23$, $\delta_M = 1.215$, $\delta_{Ba} = 1.201$, $\delta_{Bb} = 1.188$, et $\delta_g = 1.1642$ en radian,
et $\omega_H = \omega_M = \omega_{Ba} = \omega_{Bb} = \omega_g = \omega_{EX} = 1$ p.u. ;

- état de fonctionnement désiré du réseau de transmission électrique :
 $i_d = 0.8675$, $i_q = 0.3930$, $v_{lcsc-d} = 0.0791$, $v_{lcsc-q} = -0.1747$, $i_{lcr-d} = -0.6923$ et $i_{lcr-q} = -0.3136$ en p.u. ;
- temps où le régulateur de TCSC proposé est mis en service :
 $t_{lcsc} = 2$ s.
- régulateur du TCSC
- loi de commande optimale unifiée de l'angle d'amorçage du TCSC :

$$\Delta\alpha = -K_{Dn}\Delta X_{Dn}$$

avec la matrice de coefficients de rétroaction :

$$K_{Dn} = [601.6840 \quad -0.2264 \quad 0.3365 \quad -0.7359 \quad -5.7172 \quad -2.5866 \quad -0.7110 \quad 1.6107],$$

et le vecteur des variables d'état locales d'entrée du régulateur :

$$\Delta X_{Dn} = [\Delta\omega_g \quad \Delta\delta_g \quad \Delta i_d \quad \Delta i_q \quad \Delta v_{lcsc-d} \quad \Delta v_{lcsc-q} \quad \Delta i_{lcr-d} \quad \Delta i_{lcr-q}]^T.$$

Le vecteur de gains du régulateur a été obtenu avec les matrices de coefficients de pondération

$$Q = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 40 \end{bmatrix} \text{ et } r = 2 \text{ et pour un coefficient d'amortissement positif désiré } D_d = 60.$$

Les autres paramètres peuvent être trouvés à la section B.3.1 de l'annexe B.

Les figures 6-11 et 6-12 montrent respectivement les comparaisons de la déviation de la pulsation et de l'angle de la section d'alternateur d'arbre du turboalternateur avec et sans commande de TCSC. Il est remarqué des figures que lorsque il n'y a pas de commande de TCSC, le réseau électrique étudié est un réseau instable avec une oscillation de la vitesse et de l'angle d'alternateur dont l'amplitude s'accroît constamment. Cependant, sous l'effet de la commande unifiée de TCSC proposée, l'amortissement du réseau électrique est beaucoup amélioré et le réseau électrique est efficacement stabilisé.

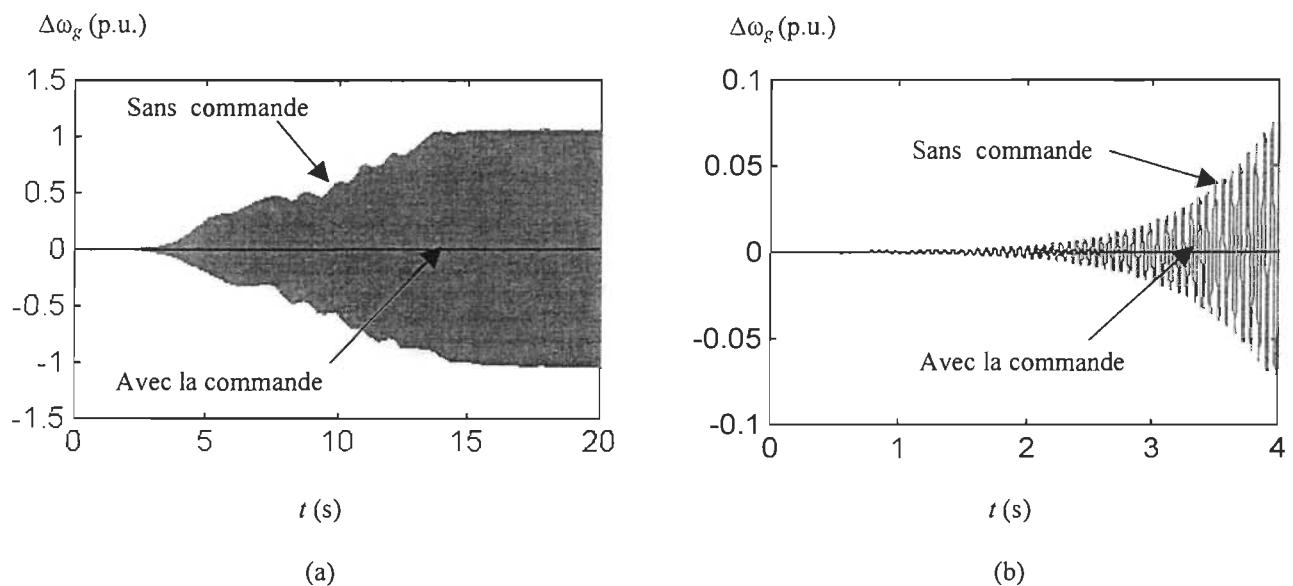
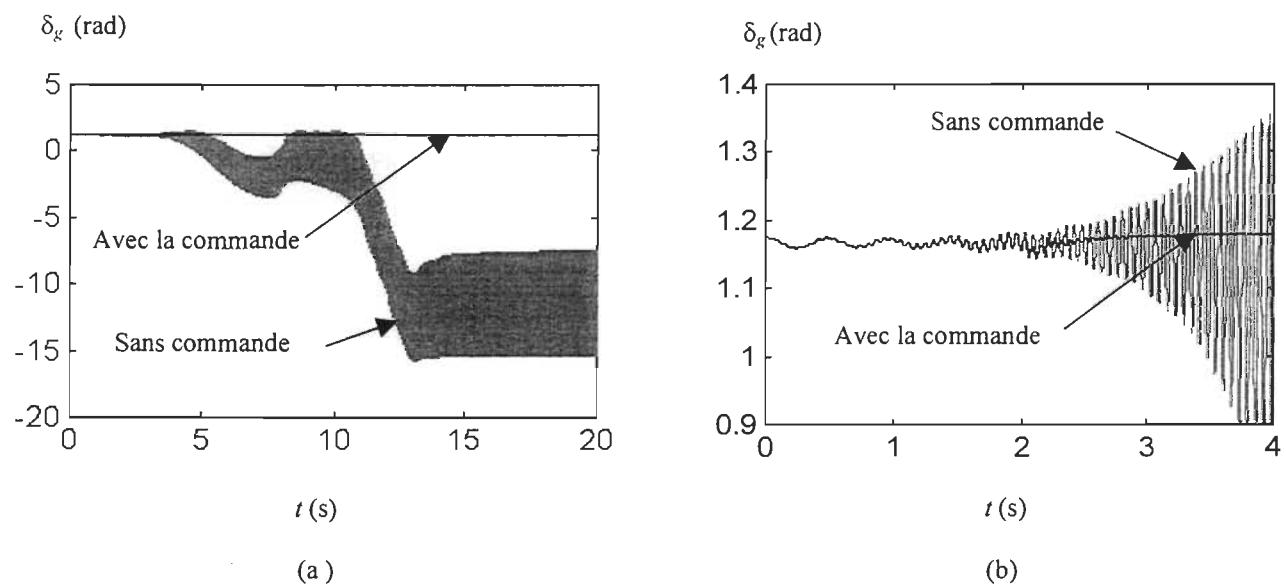


Figure 6-11 : Déviation de la pulsation de la section d'alternateur

Figure 6-12 : Angle δ_g de la section d'alternateur

Le balayage des fréquences est également effectué pour la pulsation de chaque section d'arbre du turboalternateur par simulation numérique pour sélectionner les composantes de fréquence intéressantes reliées à l'oscillation de l'arbre de turboalternateur (voir 6.3.2). Les figures 6-13 à 6-18 montrent les composantes à ces fréquences.

D'abord, de la figure 6-17, on remarque que lorsque il n'y a pas de commande de TCSC, une résonance hypo-synchrone se produit à la fréquence 99 rad/s, mais sous l'effet de la commande unifiée du TCSC, la résonance hypo-synchrone est efficacement éliminée. Des figures, on peut remarquer qu'avec l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée, tous les modes d'oscillation de la torsion hypo-synchrone, spécialement les modes respectivement à 203 rad/s, à 161 rad/s, à 127 rad/s et à 99 rad/s peuvent être beaucoup amortis et le mode d'oscillation en basse fréquence 9 rad/s est également bien amorti. Dans l'exemple, l'amortissement pour le mode d'oscillation hypo-synchrone supérieure à 298 rad/s est aussi évident.

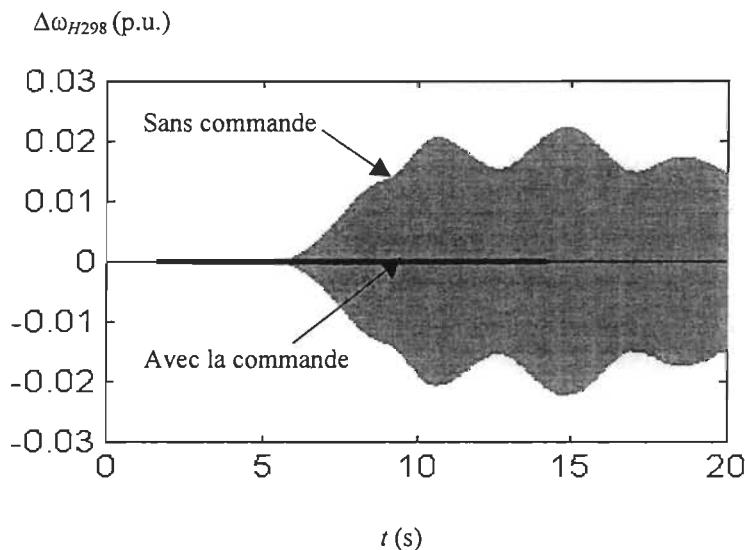


Figure 6-13 : Déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression haute au mode hypo-synchrone 1 (298 rad/s)

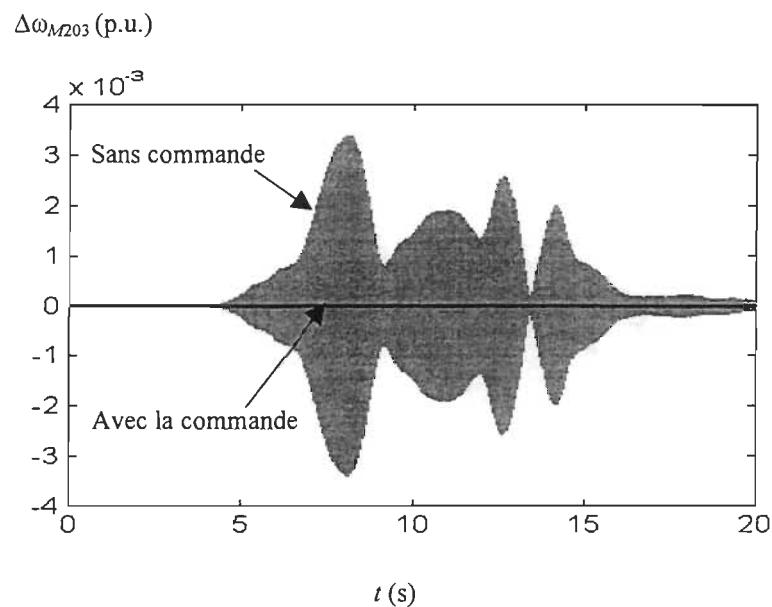


Figure 6-14 : Déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression moyenne au mode hypo-synchrone 2 (203 rad/s)

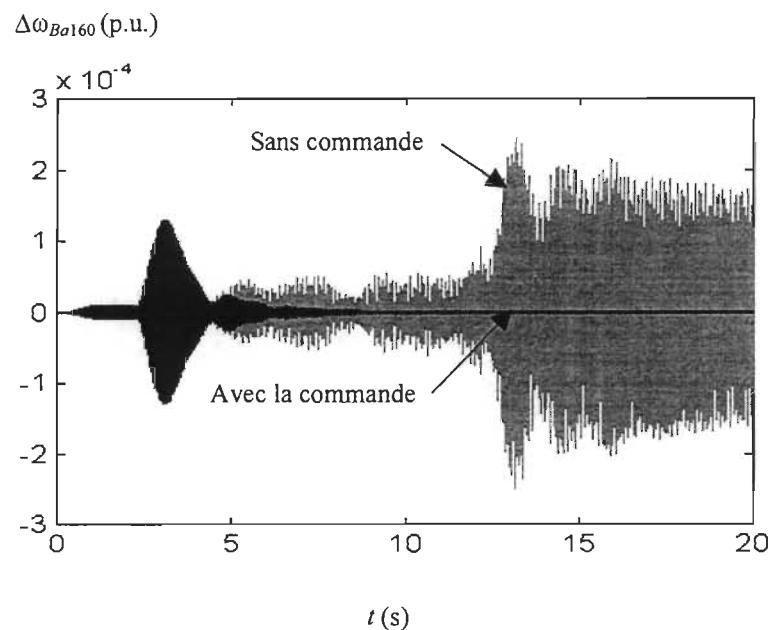


Figure 6-15 : Déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression basse A au mode 3 hypo-synchrone (160 rad/s)

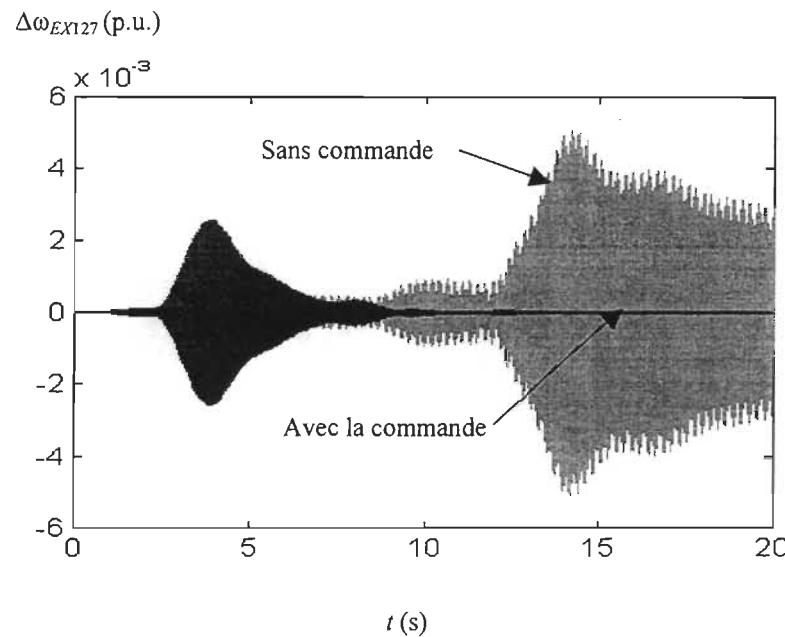


Figure 6-16 : Déviation de la pulsation de la section d'exciteur
au mode 4 hypo-synchrone (127 rad/s)

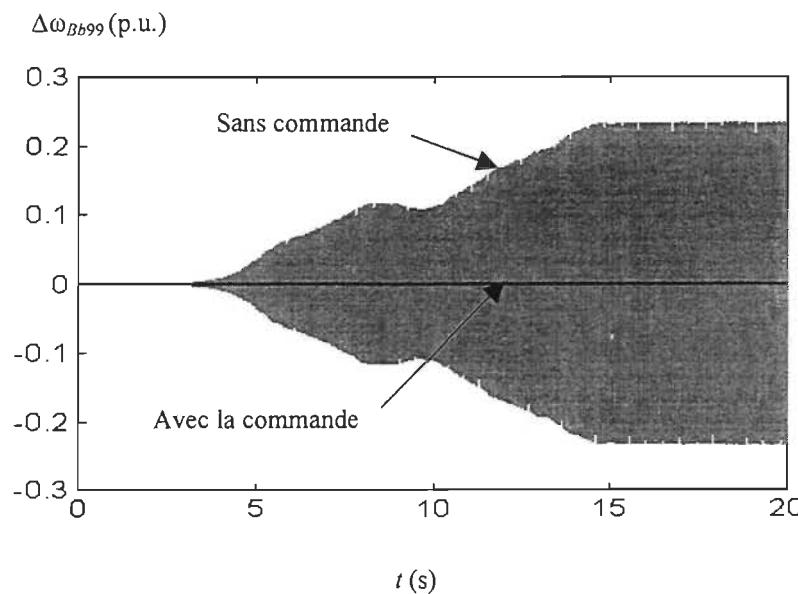


Figure 6-17 : Déviation de la pulsation de la section de turbine à la pression basse B
au mode 5 hypo-synchrone (99 rad/s)

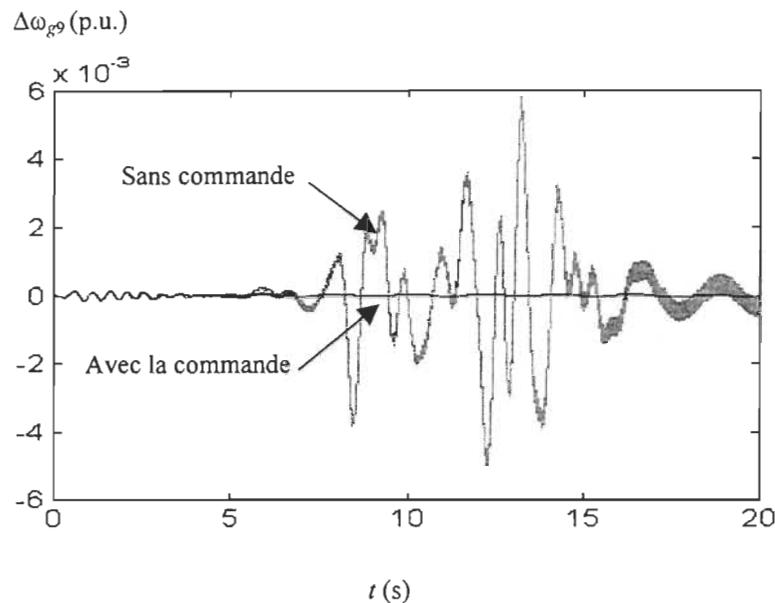


Figure 6-18 : Déviation de la pulsation de la section d’alternateur au mode 6 en basse fréquence (9 rad/s)

6.3.3 Analyse de la loi de commande de l’angle d’amorçage du TCSC

L’analyse du signal de commande permet de vérifier deux points : le signal de commande est-il excessif, ce qui compromettrait le potentiel d’application et l’hypothèse implicite que le signal de commande n’entre pas en saturation pour la conception de la loi de commande; quelle est la caractéristique du TCSC pendant le régime dynamique.

Correspondant au premier exemple de simulation, la figure 6-19 donne la courbe de la loi de commande de la déviation de l’angle d’amorçage $\Delta\alpha$ du TCSC durant le processus transitoire pour le réseau électrique avec amortissement très faible. On observe que pour accroître l’amortissement sous la condition de fonctionnement donnée, $\Delta\alpha$ varie en régime permanent dans l’intervalle de presque -0.0005 radian à $+0.0005$ radian (c’est-à-dire de -0.0286° à $+0.0286^\circ$) autour de zéro, donc le niveau de compensation équivalent k_c de la ligne de transmission en fonction de l’angle d’amorçage α du TCSC est maintenu presque à la valeur initiale k_{c0} . Ceci signifie que sous la commande unifiée proposée du TCSC avec objectif

particulier d'amortir simultanément et efficacement la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence, la répartition de la puissance sur la ligne de transmission déterminée par le niveau de compensation et par d'autres paramètres de la ligne de transmission est encore maintenue à la valeur désirée.

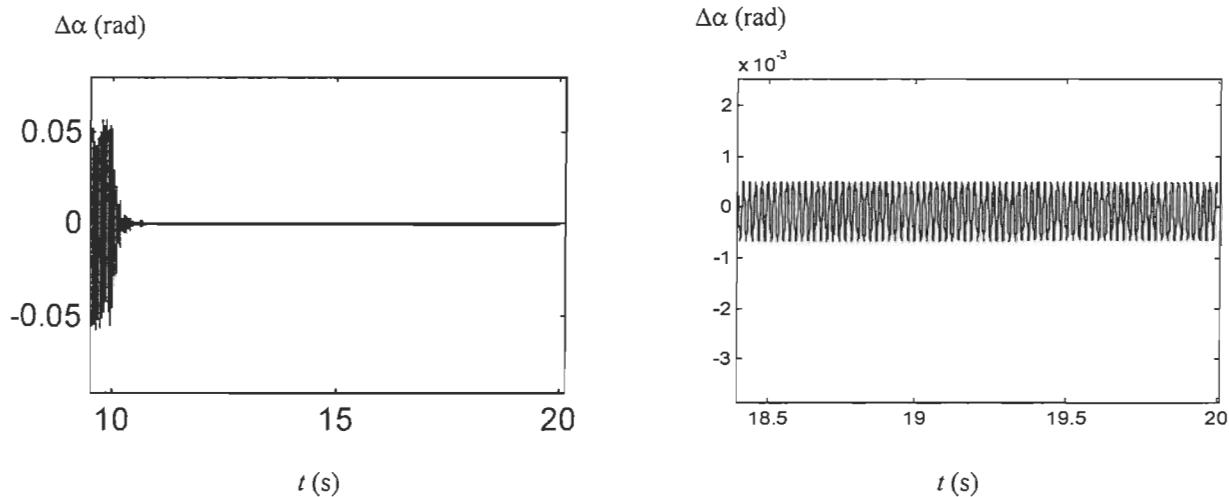


Figure 6-19: Loi de commande de l'angle d'amorçage $\Delta\alpha$ du TCSC dans le premier exemple

$$(t_{tcsc} = 10 \text{ s})$$

La figure 6-20 montre la loi de commande unifiée de la déviation de l'angle d'amorçage $\Delta\alpha$ du TCSC correspondant au deuxième exemple de simulation pour le réseau électrique instable avec une résonance hypo-synchrone durant le processus transitoire. On remarque que pour amortir la résonance hypo-synchrone dans le réseau électrique et permettre au réseau électrique d'arriver à un état de fonctionnement stable d'un état de fonctionnement instable durant le processus transitoire, $\Delta\alpha$ varie après 20 s dans un intervalle de presque -0.0362 radian à -0.0345 radian (c'est à dire, de -2.074° à -1.977°) avec une valeur centrale minime d'environ -0.0353 radian (-2.02°), donc l'angle d'amorçage α de TCSC doit varier dans l'intervalle de 147.023° à 146.926° avec une valeur centrale presque 147° , ce qui représente un petit écart relativement à l'angle d'amorçage initial α_0 (149°).

Pour expliquer l'influence de l'angle d'amorçage de TCSC α sur la caractéristique de compensation, la figure 6-21 montre la relation entre l'angle d'amorçage de TCSC α et le niveau

de compensation k_c . De la figure, on remarque qu'en théorie, la compensation capacitive de la ligne de transmission du réseau se produit pour $\alpha > 138.26^\circ$ correspondant à $k_c > 0$. Pour le cas étudié, l'angle d'amorçage α de TCSC varie seulement dans l'intervalle de 147.023° à 146.926° , donc la ligne de transmission du réseau a encore une bonne compensation capacitive et le niveau de compensation a seulement un écart minime relatif à la valeur initiale k_{c0} . Ceci signifie qu'en plus de pouvoir corriger efficacement la résonance hypo-synchrone du réseau électrique et d'améliorer la caractéristique d'amortissement du réseau électrique, l'effet de la commande unifiée du TCSC permet encore d'obtenir une bonne compensation capacitive de la ligne de transmission afin de maintenir la répartition désirée de la puissance, ce qui peut être davantage vérifié de la figure 6-22. La figure 6-22 montre le processus transitoire de puissance active P_e sur la ligne de transmission du réseau électrique correspondant au deuxième exemple de simulation. On peut remarquer de la figure 6-22 que sous l'effet de la commande unifiée du TCSC, après le régime transitoire, P_e varie tout près de la valeur de puissance active désirée au point équilibre 0.9 p.u..

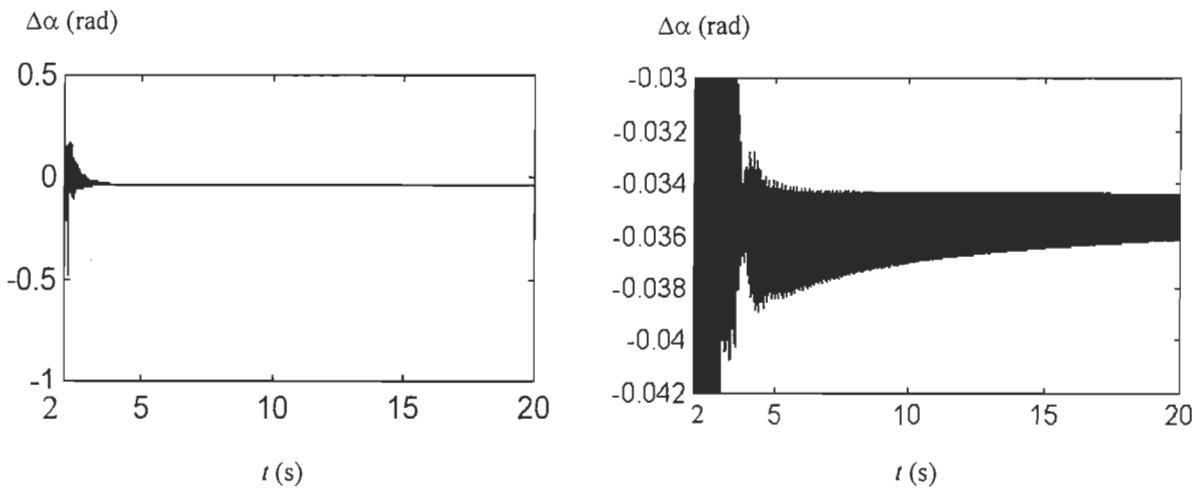


Figure 6-20 : Loi de commande unifiée de la déviation $\Delta\alpha$ de l'angle d'amorçage du TCSC
dans le deuxième exemple ($t_{tcsc} = 2$ s)

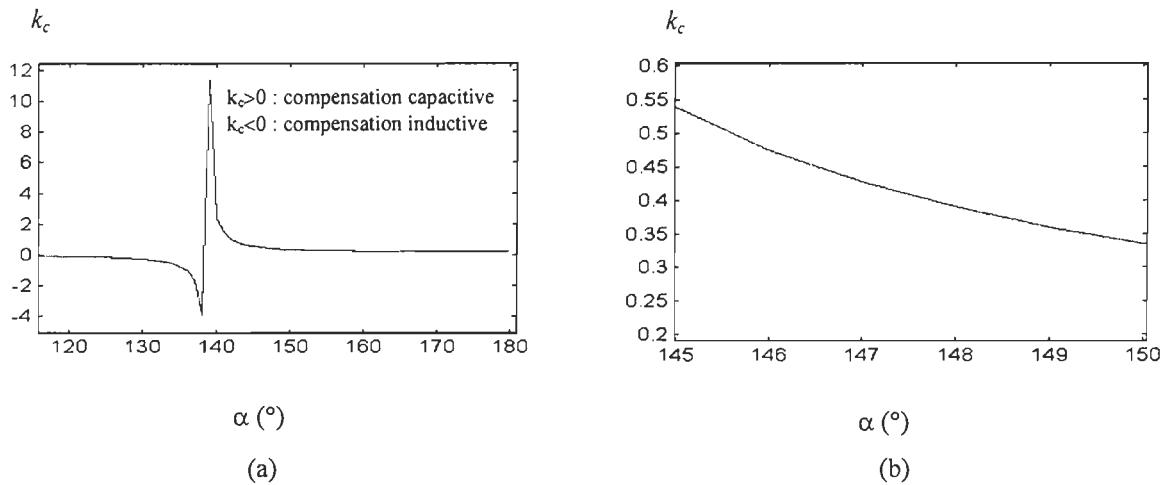


Figure 6-21 : Relation entre le niveau de compensation k_c et l'angle d'amorçage du TCSC α (°)

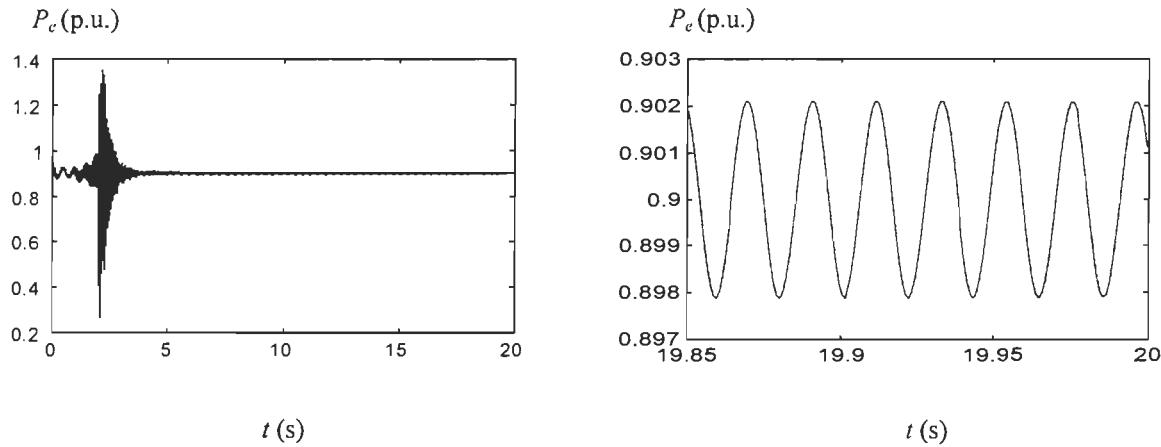


Figure 6-22 : Puissance active sur la ligne de transmission P_e

L'analyse similaire pour la commande de TCSC proposée sur la stabilité des réseaux électriques peut être aussi trouvée de [64-65].

6.4 Analyse de l'effet de la commande unifiée de TCSC à l'aide du deuxième modèle de référence de IEEE

Nous présentons la validation pour le schéma de commande de TCSC proposée par simulation pour le réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE et montré sur la figure 6-2. Dans le réseau étudié, l'arbre du turboalternateur est représenté par un système de

quatre masses-ressorts montré sur la figure 4-9 qui correspond aux quatre sections : la turbine à la pression haute, la turbine à la pression basse, l'alternateur et l'excitateur. L'exemple présente la validation de l'effet de la commande unifiée de TCSC sur la perfection de la caractéristique d'amortissement d'un réseau électrique avec amortissement faiblement positif.

Comme à la section 6.3, pour permettre au processus transitoire dans la simulation de s'approcher du processus dynamique causé par une petite perturbation, le déséquilibre de l'énergie électrique en état de fonctionnement initial est utilisé comme petite source de perturbation pour l'analyse de la stabilité du réseau électrique.

La simulation du processus transitoire est obtenue pour les conditions suivantes :

■ conditions de fonctionnement du réseau

- $V_g = 1.05$, $V_s = 0.9146$, $P_m = 0.9$ en p.u.;
 - $\alpha_0 = 143^\circ$, niveau de compensation initial $k_{c0} = 0.3787$ où la répartition désirée de la puissance sur la ligne de transmission est obtenue;
 - coefficients d'amortissement inhérent du turboalternateur de quatre masses-ressorts : $D_H = 0.1$, $D_B = 0.1$, $D_g = 0.1$ et $D_{EX} = 0.1$;
 - état de fonctionnement initial du turboalternateur : $\delta_H = 1.1366$, $\delta_B = 1.124$, $\delta_g = 1.1132$ et $\delta_{EX} = 1.1132$ en radian, et $\omega_H = \omega_B = \omega_g = \omega_{Ex} = 1$ p.u.;
 - état de fonctionnement désiré du turboalternateur sous la commande proposée:
 $\delta_H = 1.1363$, $\delta_B = 1.1237$, $\delta_g = 1.1129$ et $\delta_{EX} = 1.1129$ en radian,
et $\omega_H = \omega_B = \omega_g = \omega_{Ex} = 1$ p.u.;
 - état de fonctionnement désiré du réseau de transmission électrique sous la commande proposée : $i_d = 0.8545$, $i_q = 0.4112$, $i_{Id} = 0.5088$, $i_{Iq} = 0.25265$, $v_{tcsc-d} = 0.04666$, $v_{tcsc-q} = -0.0921$,
 $i_{tcr-d} = -1.412$ et $i_{tcr-q} = -0.716$ en p.u.;
 - temps où le régulateur de TCSC proposé est mis en service :
 $t_{tcsc} = 2$ s.
- régulateur du TCSC
- loi de commande optimale unifiée de l'angle d'amorçage du TCSC :

$$\Delta\alpha = -K_{Dn}\Delta X_{Dn}$$

avec la matrice de coefficients de rétroaction des variables d'état locales

$$\mathbf{K}_{Dn} = [537.6067 \ 0.3523 \ 0.1057 \ 0.0034 \ 0.7749 \ -1.7498 \ -1.7427 \ 1.5827 \ 1.8713 \ 1.8713]$$

correspondant au vecteur d'entrée du régulateur correspondant aux variables d'état locales

$$\Delta \mathbf{X}_{Dn} = [\Delta \omega_g \ \Delta \delta g \ \Delta i_d \ \Delta i_q \ \Delta i_{l-d} \ \Delta i_{l-q} \ \Delta v_{tcsc-d} \ \Delta v_{tcsc-q} \ \Delta i_{tcr-d} \ \Delta i_{tcr-q}]^T.$$

Le vecteur de gains du régulateur a été obtenu avec les matrices de coefficients de pondération

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 40 \end{bmatrix} \text{ et } r = 5, \text{ et pour un coefficient d'amortissement désiré } D_d = 80.$$

Les autres paramètres peuvent être trouvés de la section B.3.2 dans l'annexe B.

Les figures 6-23 et 6-24 montrent respectivement l'angle et la pulsation de section d'alternateur d'arbre du turboalternateur sans commande de TCSC et avec la commande de TCSC proposée pour valider l'effet général de la commande du TCSC sur l'amortissement de l'oscillation du réseau électrique. On peut observer des deux figures qu'avec l'effet de la commande unifiée du TCSC, la caractéristique d'amortissement du réseau électrique est beaucoup améliorée dans le processus transitoire, ce qui peut efficacement accélérer la diminution des modes d'oscillation mécanique et aussi améliorer la stabilité du réseau électrique.

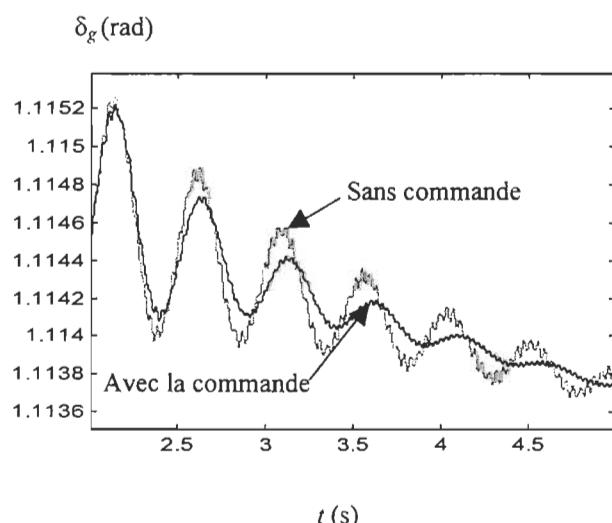


Figure 6-23 : Angle de la section de rotor d'alternateur

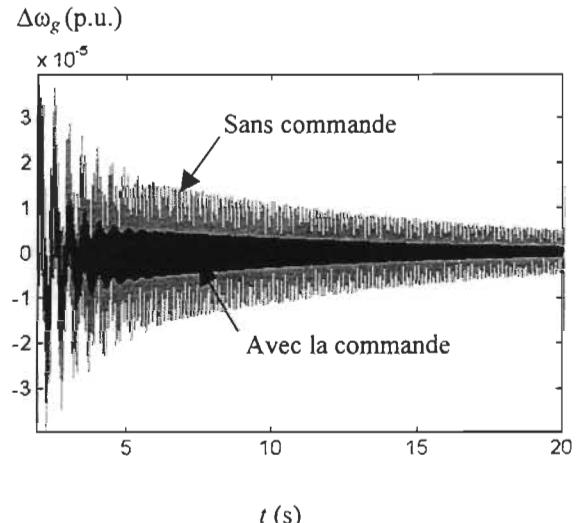
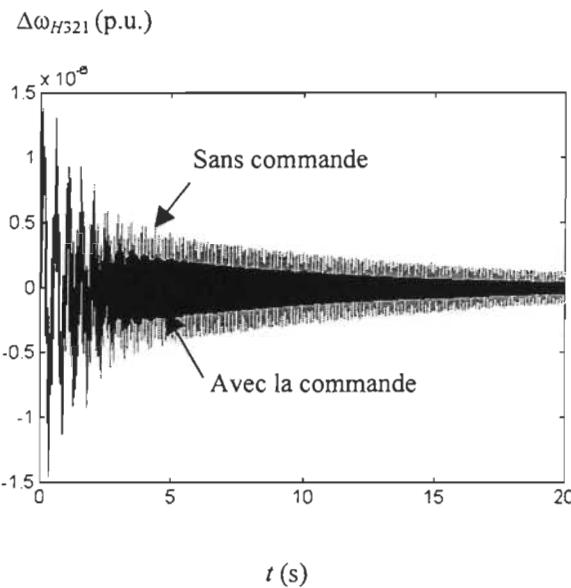
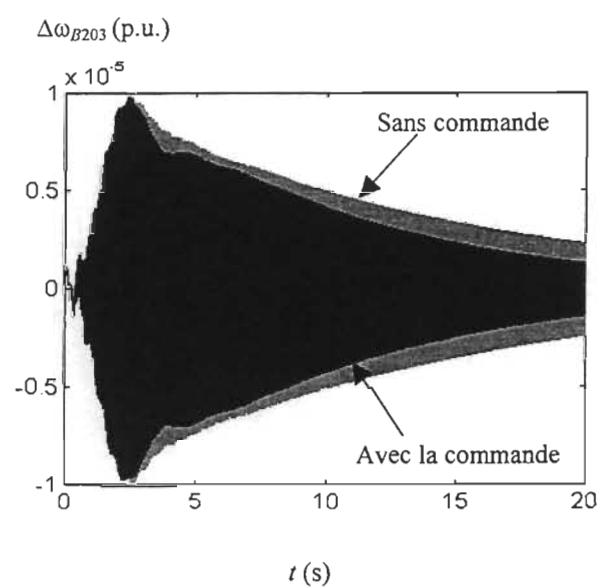


Figure 6-24 : Déviation de la pulsation de la section de rotor d'alternateur

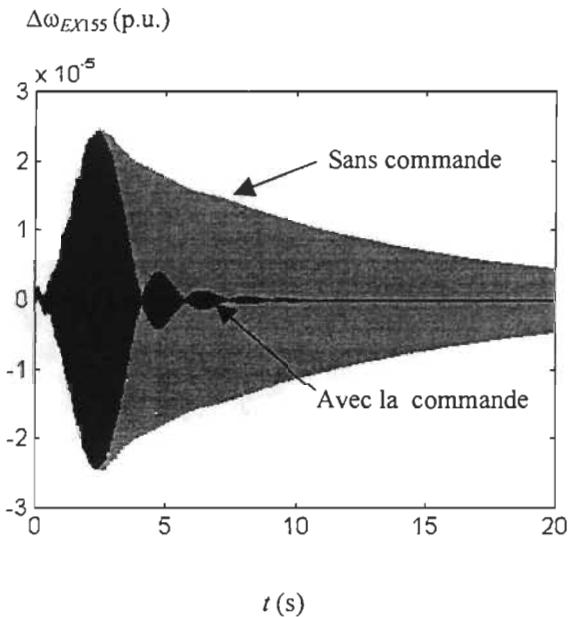
D'après l'analyse des valeurs propres au chapitre 5, les modes mécaniques d'arbre du turboalternateur correspondant au réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE comprennent trois modes d'oscillation de la torsion hypo-synchrone et un mode d'oscillation électromécanique en basse fréquence. Ils correspondent aux fréquences naturelles 321 rad/s, 203 rad/s, 155 rad/s et 9 rad/s. Similairement à la section 6.3, le balayage des fréquences pour la pulsation de chaque section d'arbre du turboalternateur est effectué par simulation numérique pour sélectionner les quatre composantes de fréquence intéressantes reliées à l'oscillation de la vitesse d'arbre du turboalternateur. Donc nous choisissons d'abord les quatre composantes de fréquence $\Delta\omega_{H322}$, $\Delta\omega_{B204}$, $\Delta\omega_{EX156}$, $\Delta\omega_g9$ tirées respectivement de la pulsation des sections de turbine à la pression haute PH, de la turbine à la pression basse PB, d'exciteur et d'alternateur d'arbre du turboalternateur. Les résultats sont montrés sur la figure 6-25. En outre, la figure 6-26 montre le processus transitoire de deux composantes typiques aux fréquences naturelles hypo-synchrones 203 rad/s et 155 rad/s comprises respectivement dans la pulsation de la section d'exciteur et de la section de turbine à la pression basse d'arbre du turboalternateur. Selon la méthode d'identification des valeurs propres, le mode 1 à la fréquence hypo-synchrone supérieure (321 rad/s) est fortement relié à la section de turbine à la pression haute et le mode 4 électromécanique en basse fréquence (9 rad/s) est fortement relié à la section d'alternateur d'arbre de turboalternateur, donc la figure 6-25 et la figure 6-26 reflètent bien le processus dynamique des quatre modes. Des figures 6-25 et 6-26, on peut d'abord remarquer que sous l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée, l'amortissement du réseau électrique est beaucoup accru, donc la stabilité du réseau électrique peut être beaucoup améliorée. Spécialement, le mode 3 à la fréquence d'oscillation de la torsion hypo-synchrone 155 rad/s est évidemment amorti. On peut encore remarquer que l'amortissement pour le mode 1, le mode 2 et le mode 4 est aussi amélioré sous l'effet de la commande unifiée proposée du TCSC.



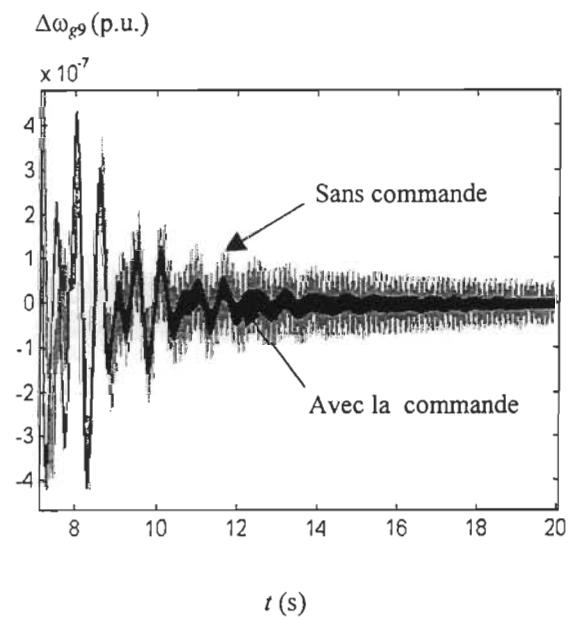
(a) À la fréquence naturelle hypo-synchrone 321 rad/s



(b) À la fréquence hypo-synchrone 203 rad/s



(c) À la fréquence hypo-synchrone 155 rad/s



(d) À la basse fréquence 9 rad/s

Figure 6-25 : Composantes de déviation de la pulsation d'arbre de turboalternateur aux modes d'oscillation mécanique

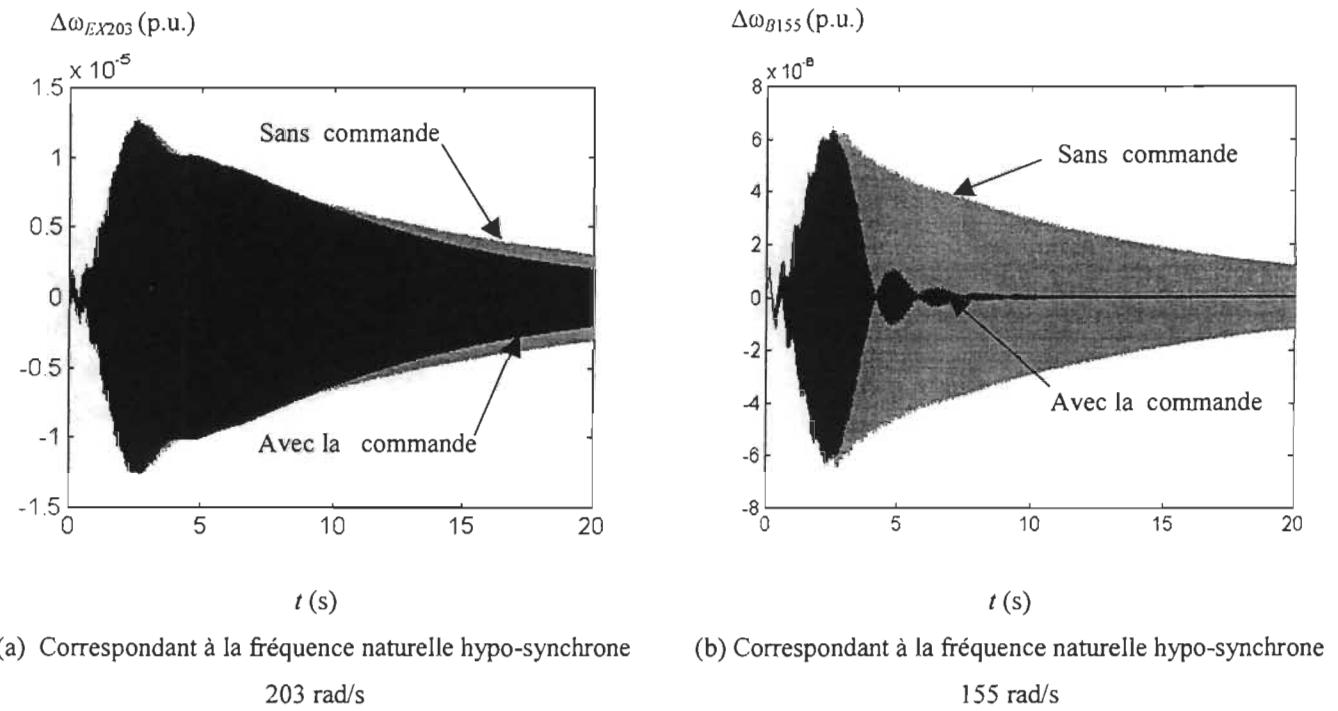


Figure 6-26 : Composantes de déviation de la pulsation des sections d'excitateur et de turbine à la pression basse respectivement aux modes 2 (203 rad/s) et 3 (155 rad/s)

6.5 Comparaison des résultats de la simulation avec ceux de l'analyse des valeurs propres

À l'aide du modèle mathématique détaillé linéarisé, l'analyse des valeurs propres est d'abord exécutée pour le réseau électrique basé sur le première modèle de référence de IEEE montré sur la figure 5-1 et pour le réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE montré sur la figure 5-4. Ensuite, plusieurs comparaisons entre les résultats de la simulation et ceux de l'analyse des valeurs propres sont effectuées. Les résultats des comparaisons peuvent être utilisés pour valider davantage les méthodes d'analyse et de modélisation adoptées dans notre étude de la stabilité et la robustesse de régulateur unifié du TCSC proposé.

6.5.1 Comparaison des résultats pour le réseau électrique basé sur le première modèle de référence de IEEE

L'analyse des valeurs propres est d'abord exécutée pour le réseau électrique montré sur la figure 5-1 pour les deux états de fonctionnement mentionnés dans les sections 6.3.1 et 6.3.2, amortissement très faible et amortissement négatif, pour une comparaison entre les résultats de la simulation avec le modèle non linéaire et ceux de l'analyse des valeurs propres avec le modèle linéarisé du réseau électrique.

Les modes propres mécaniques correspondant à l'arbre du turboalternateur dans le premier cas sont donnés dans le tableau 6-1 où mode 1 à 6 correspondent aux modes d'oscillation respectivement aux fréquences naturelles hypo-synchrones 298 rad/s, 203 rad/s, 160 rad/s, 127 rad/s et 99 rad/s, et au mode d'oscillation à la basse fréquence naturelle 9 rad/s.

Tableau 6-1 : Modes d'oscillation mécanique du réseau électrique dans le premier cas

Mode	sans commande	avec la commande du TCSC
1	$-0.0345 \pm 298.1802i$	$-0.0148 \pm 298.1535i$
2	$-0.0040 \pm 202.9546i$	$-10.1752 \pm 216.8365i$
3	$-0.0654 \pm 160.5908i$	$-2.2046 \pm 164.3790i$
4	$-0.0043 \pm 127.0147i$	$-0.6153 \pm 127.7867i$
5	$-0.0291 \pm 98.9827i$	$-3.9418 \pm 105.4364i$
6	$-0.0310 \pm 9.0432i$	$-2.8426 \pm 22.6823i$

Par l'observation de la partie réelle des modes propres mécaniques donnés dans le tableau 6-1 correspondant au premier cas, on peut d'abord remarquer que lorsque il n'y a pas de commande de TCSC, le réseau électrique est presque à la limite de la stabilité à cause des valeurs propres avec partie réelle très faiblement négative, et que les plus faibles amortissements se produisent aux modes 2 (203 rad/s) et 4 (127 rad/s). Cependant, sous l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée, la stabilité du réseau électrique est grandement améliorée dans l'ensemble. Bien que la partie réelle de mode 1 (298 rad/s) d'oscillation hypo-synchrone supérieure s'accroît un peu pour un taux de décroissance plus lent en maintenant un mode d'oscillation stable,

l'amortissement pour les autres modes d'oscillation s'accroît beaucoup (taux de décroissance plus rapide). De plus, l'amortissement du mode 6 (9 rad/s) d'oscillation en basse fréquence connaît une grande amélioration sous la commande unifiée du TCSC. On remarque que l'accroissement de l'amortissement du mode 2 (203 rad/s) est le plus fort.

En comparant les résultats de l'analyse des valeurs propres du réseau dans le premier cas dans le tableau 6-1 avec ceux de la simulation montrés sur les figures 6-5 à 6-10, on trouve que les conclusions reliées à la stabilité du réseau électrique obtenues par la simulation numérique coïncident bien avec celles obtenues par l'analyse des valeurs propres.

Le tableau 6-2 donne les comparaisons des modes propres mécaniques correspondant à l'arbre du turboalternateur sans et avec la commande unifiée du TCSC dans le deuxième cas. Du tableau 6-2, on remarque que le mode 5 (99 rad/s) est instable lorsque il n'y a pas de commande de TCSC. Grâce à l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée, la résonance hypo-synchrone du réseau électrique est efficacement corrigée et l'amortissement du réseau électrique est beaucoup amélioré, le réseau électrique étant maintenant stable.

Tableau 6-2 : Modes d'oscillation mécanique du réseau électrique étudié dans le deuxième cas

Mode	sans commande	avec la commande du TCSC
1	-0.03±298.18i	-0.05 ± 298.2i
2	-0.01 ± 202.94i	-5.4 ± 210.7i
3	-0.07 ± 160.57i	-1.7±163.3i
4	-0.005 ±127.00i	-0.4±127.6i
5	0.16± 97.67i	-3.1±104.4i
6	-0.07 ±9.26i	-4.4 ± 23.3i

En comparant les résultats de l'analyse des valeurs propres donnés dans le tableau 6-2 avec ceux de la simulation montrés sur les figures 6-13 à 6-18, on trouve que les conclusions reliées à la stabilité du réseau électrique observées par la simulation numérique sont également conformes à celles obtenues par l'analyse des valeurs propres.

6.5.2 Comparaison des résultats pour le réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE

La troisième comparaison est effectuée entre les résultats de la simulation avec le modèle non linéaire du réseau électrique montré sur la figure 6-2 et ceux de l'analyse des valeurs propres avec le modèle linéarisé du réseau électrique montré sur la figure 5-4 en se basant sur le deuxième modèle de référence de IEEE. Le tableau 6-3 donne les valeurs propres du réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE sous les conditions de fonctionnement décrites à la section 6.4. D'abord, par la comparaison de la partie réelle des valeurs propres sans et avec la commande unifiée du TCSC dans le tableau 6-3, on trouve que sous l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée, la caractéristique d'amortissement du réseau électrique est beaucoup améliorée. Cependant, l'amélioration de l'amortissement est faible pour le mode d'oscillation à la fréquence hypo-synchrone supérieure (mode 1, 321 rad/s), mais ce mode possède naturellement un taux de convergence et un amortissement élevés.

Tableau 6-3 : Modes d'oscillation mécanique du réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE

Mode	sans commande	avec la commande du TCSC
1	$-3.6079 \pm 322.5358i$	$-3.6806 \pm 322.9124i$
2	$-0.0745 \pm 204.3704i$	$-0.3718 \pm 204.8406i$
3	$-0.0722 \pm 155.9396i$	$-1.3884 \pm 157.7395i$
4	$-0.29610 \pm 9.3917i$	$-1.5966 \pm 10.9465i$

Par la comparaison des résultats des valeurs propres avec ceux obtenus par simulation (voir les figure 6-25 et 6-26) dans la section 6.4, on trouve que les conclusions obtenues par l'analyse des valeurs propres avec un modèle linéarisé et détaillé coïncident bien avec celles obtenues par la simulation numérique avec un modèle non linéaire pour le réseau basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE.

6.6 Vérification de la robustesse par simulation

Le réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE montré sur la figure 6-1 est encore utilisé pour l'étude de la robustesse par simulation. Pour valider davantage la robustesse du régulateur unifié de TCSC proposé, l'exemple de section 6.3.1 (un réseau électrique avec amortissement très faible) est utilisé pour faire les comparaisons dans deux cas différents de fonctionnement :

cas 1 : l'angle d'amorçage des thyristors est augmenté 1°;

cas 2 : le déphasage entre l'alternateur G et la source infinie ∞ est augmenté 1.05°.

Les paramètres et les conditions adoptés pour la conception du régulateur du TCSC ne changent pas et ils sont les mêmes que ceux donnés dans l'exemple de la section 6.3.1. Notre intérêt vise encore les modes d'oscillation mécanique reliés au système de six masses-ressorts d'arbre du turboalternateur.

Les figures 6-27 à 6-30 montrent les résultats par simulation numérique pour les pulsations des sections d'arbre du turboalternateur aux modes intéressants pour les deux cas de fonctionnement. Les figures 6-31 et 6-32 montrent le processus transitoire de puissance électromagnétique sur la ligne de transmission dans les deux cas de fonctionnement.

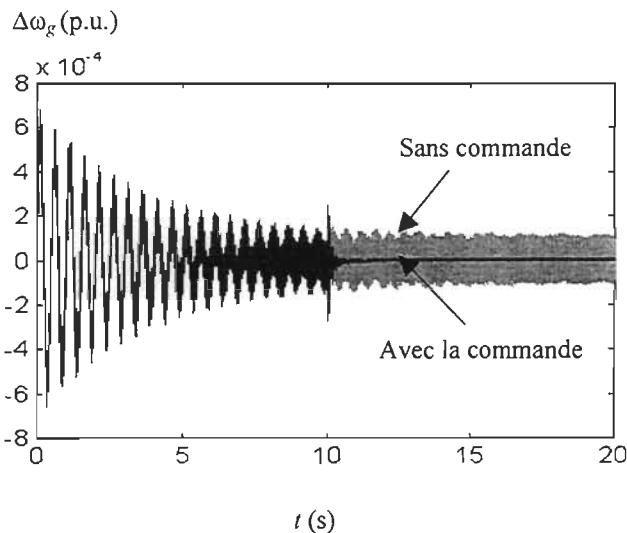


Figure 6-27 : Déviation de la pulsation de rotor de l'alternateur pour le cas 1

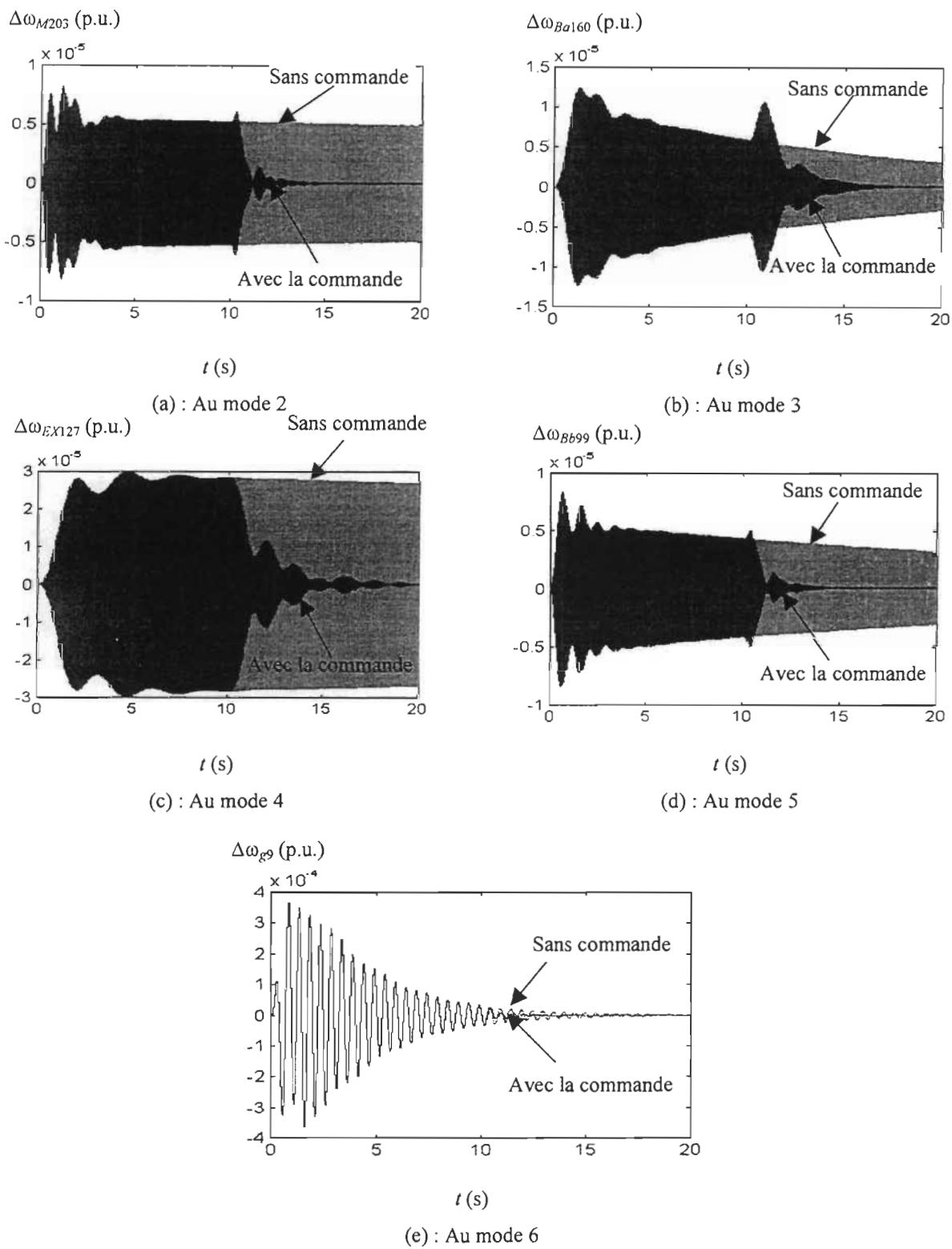


Figure 6-28 : Composantes de la déviation de la pulsation d'arbre de turboalternateur correspondant aux modes d'oscillation intéressants pour le cas 1

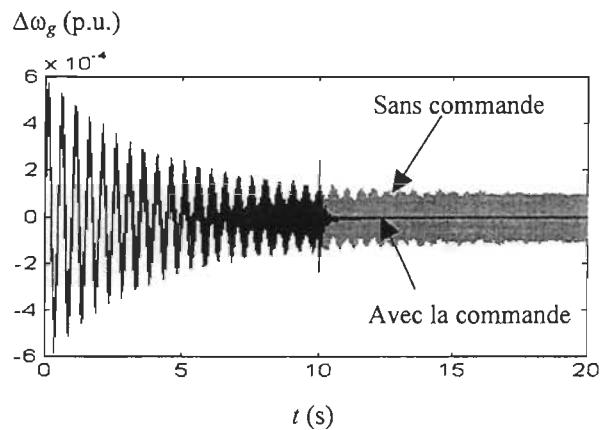


Figure 6-29 : Déviation de la pulsation de rotor de l'alternateur pour le cas 2

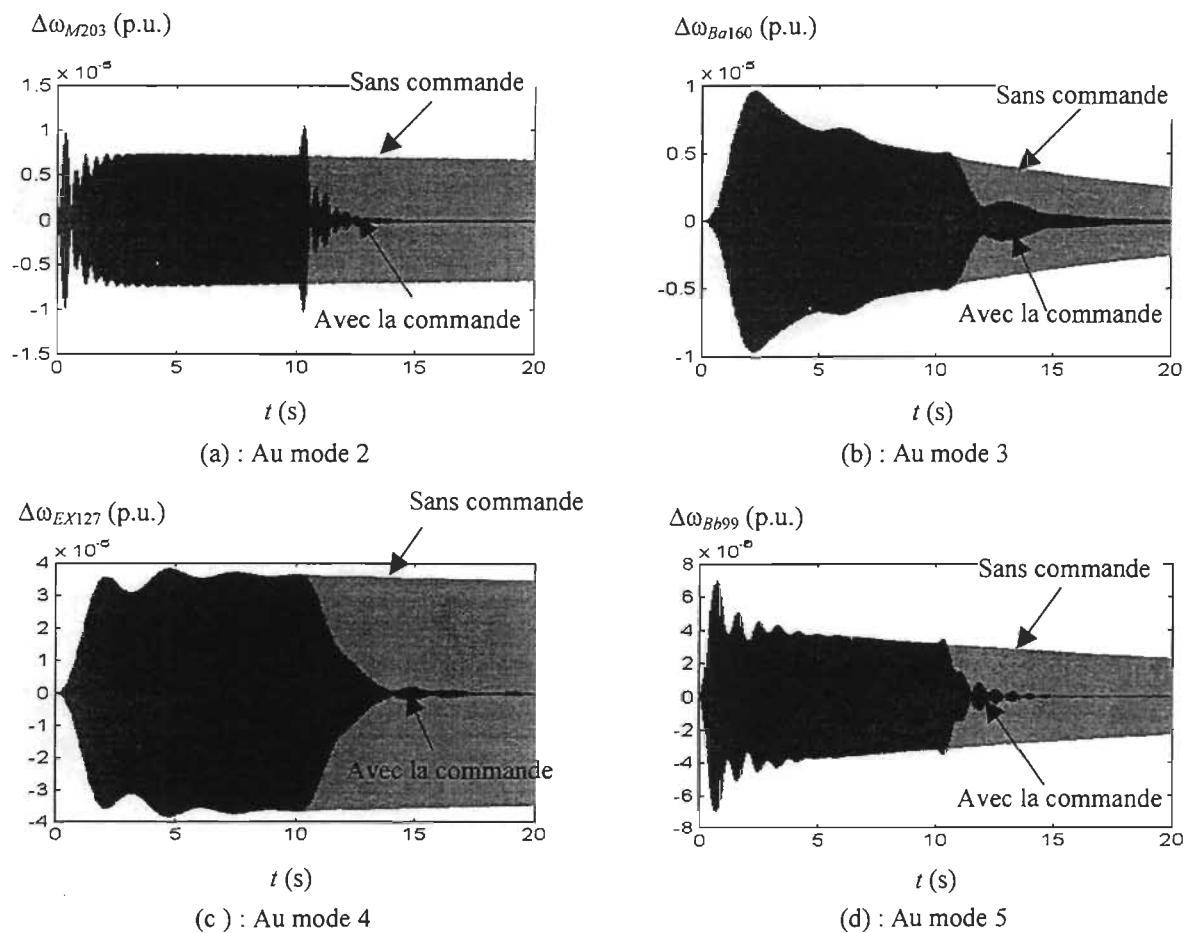
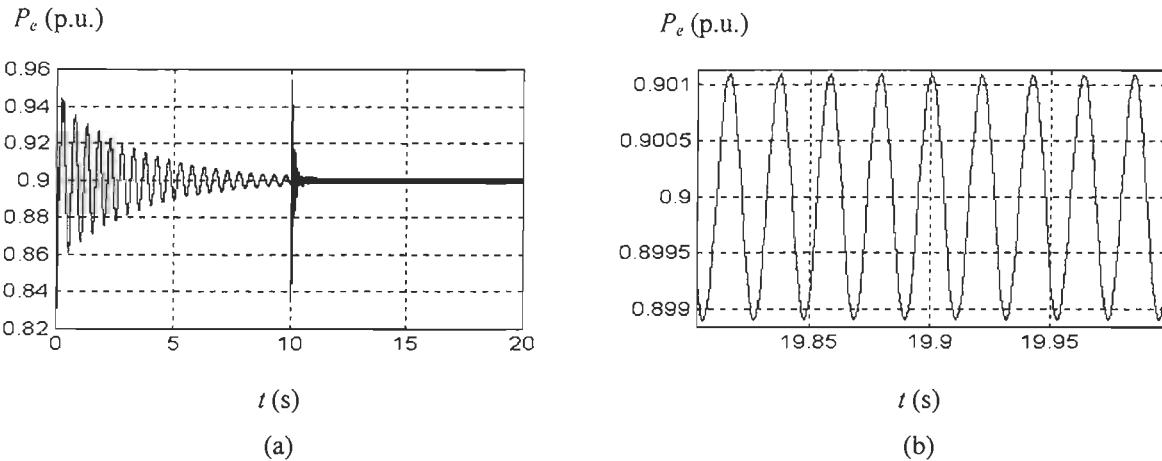
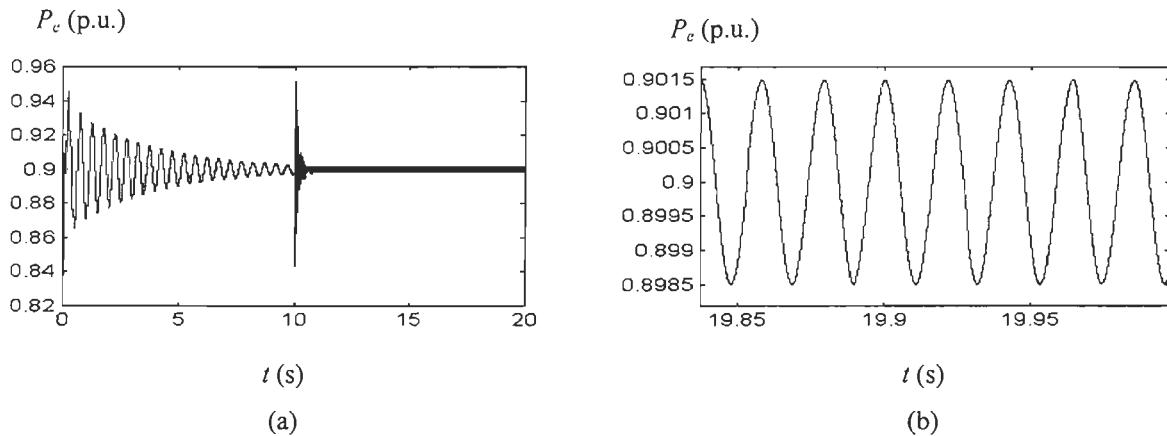


Figure 6-30 : Composants de la déviation de la pulsation d'arbre de turboalternateur correspondant aux modes d'oscillation intéressants pour le cas 2

Figure 6-31 : Puissance électromanétique P_e sur la ligne de transmission pour le cas 1Figure 6-32 : Puissance électromanétique P_e sur la ligne de transmission pour le cas 2

Des figures 6-27 à 6-30, on remarque que malgré la variation de l'angle d'amorçage et de l'angle de puissance autour du point de fonctionnement désiré, l'effet du régulateur unifié de TCSC proposé sur la commande de la stabilité est presque pareil par rapport au cas au point de fonctionnement originel. Ceci démontre que la variation légère des paramètres de fonctionnement du réseau électrique n'influence pas l'effet du régulateur proposé du TCSC conçu au point originel de fonctionnement désiré pour l'amélioration de la stabilité du réseau électrique. C'est-à-dire que le régulateur proposé démontre une bonne robustesse pour la commande de la stabilité lorsque les paramètres de fonctionnement des réseaux électriques varient légèrement (par exemple, lorsque l'amorçage des thyristors ou le modèle du TCSC pour la conception du

régulateur de TCSC ne sont pas exacts). En effet, pour l'étude du processus dynamique avec une petite perturbation, il est considéré que les paramètres et les conditions de fonctionnement des réseaux électriques varient légèrement.

Les figures 6-31 et 6-32 montrent que la puissance électromagnétique se maintient autour de la valeur théorique 0.9 (p.u.). Seulement, une composante faible d'onde harmonique (avec amplitude d'environ 0.001) est comprise dans la puissance électromagnétique à une fréquence relativement haute de presque 300 rad/s par rapport à notre intérêt de recherche. En effet, pour améliorer la qualité de fonctionnement du régulateur de TCSC, généralement, des filtres ont besoin d'être installé dans le réseau. Par conséquent, l'influence d'ondes harmoniques avec relativement haute fréquence peut donc être enlevée par les filtres désirés. À l'aide de la simulation numérique, nous avons vérifié davantage la robustesse du régulateur unifié de TCSC proposé pour l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques en plus d'assurer la répartition désirée de la puissance sur la ligne de transmission. En outre, ceci explique pourquoi le modèle idéal du commutateur des thyristors peut être encore considéré pour la conception du régulateur de TCSC dans la phase de recherche actuelle.

6.7 Conclusions

À l'aide de deux modèles non linéaires des réseaux électriques basés sur les modèles de référence de IEEE, en appliquant trois exemples typiques de fonctionnement des réseaux électriques en états de stabilité différents (stabilité presque marginale, instable et faiblement stable), nous avons analysé les problèmes de stabilité des réseaux électriques dans le processus transitoire par la simulation numérique sous MATLAB®/SIMULINK™. Les résultats de la simulation valident davantage les avantages de la commande unifiée de TCSC proposée pour l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques. Bien que certaines différences existent entre le modèle du réseau pour la simulation numérique et celui pour l'analyse des valeurs propres et bien que la petite perturbation que les réseaux subissent est relativement grande pour la simulation numérique du processus transitoire, les résultats de recherche indiquent que les conclusions obtenues par la simulation numérique coïncident avec celles par l'analyse des valeurs propres pour la stabilité des réseaux électriques. Ceci permet de confirmer davantage les méthodes de modélisation et d'analyse adoptées dans notre étude et de vérifier davantage la robustesse de régulateur unifié de TCSC proposé pour la commande de la stabilité des réseaux électriques.

Les conclusions principales apportées par la simulation numérique sont précisées comme suit :

- l'effet de la commande unifiée du TCSC proposée permet de beaucoup améliorer la caractéristique d'amortissement des réseaux électriques et permet à l'oscillation hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence de multi-mode des réseaux électriques d'être simultanément efficacement amorties; donc le régulateur de TCSC proposé a un effet unifié efficace sur l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques;
- la stratégie de commande unifiée du TCSC proposée permet d'assurer la répartition désirée de la puissance sur la ligne de transmission afin d'améliorer le fonctionnement des réseaux électriques en régime permanent en maintenant la compensation capacitive sur les lignes de transmission ;
- les comparaisons des résultats de la simulation avec ceux des valeurs propres indiquent que :
 - ✓ le régulateur unifié de TCSC conçu par la méthode de linéarisation peut également bien s'adapter à la commande de la stabilité du processus transitoire du réseau électrique dans une certaine mesure;
 - ✓ le régulateur unifié de TCSC conçu possède une bonne robustesse pour la commande de la stabilité malgré la variation des paramètres de réseau électrique dans une certaine mesure;
 - ✓ les méthodes d'analyse et de modélisation adoptées pour l'étude de la stabilité et pour la conception du régulateur du TCSC sont efficaces et faisables.
- Quant aux modes d'oscillation hypo-synchrone aux fréquences supérieures, en général, ils ne sont pas affectés significativement par la commande du TCSC, ce qui est conforme aux résultats de l'analyse des valeurs propres avec un modèle linéarisé précis des réseaux électriques;
- La robustesse de régulateur unifié de TCSC proposé est vérifiée davantage par simulation numérique.

En somme, les résultats de simulation numérique pour les réseaux électriques avec les modèles non linéaires basés respectivement sur le premier modèle de référence de IEEE et sur le deuxième modèle de référence de IEEE sont satisfaisants, ce qui justifie davantage la méthode de conception du TCSC proposée et la commande unifiée de TCSC proposée pour l'amortissement des oscillations hypo-synchrones et des oscillations en basse fréquence des multi-modes du réseau électrique.

CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette thèse consiste à apporter une contribution à l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux électriques, en particulier à l'amortissement de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence des multi-modes de façon efficace et simultanée, en plus d'assurer la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission électrique. Cette contribution a été apportée par le développement d'une stratégie de commande optimale unifiée de TCSC avec une fonction objectif définie spécifiquement pour améliorer la stabilité des réseaux électriques et en utilisant la rétroaction des variables d'état locales. La stratégie de commande unifiée de TCSC a été obtenue en réalisant les travaux suivants :

- Modélisation des réseaux électriques branchés avec TCSC pour l'étude de la stabilité. Nous avons réalisé le développement des modèles mathématiques des composants des réseaux électriques pour s'adapter à l'étude de la stabilité dynamique et nous avons effectué leur implantation sous MATLAB®/SIMULINK™. Un modèle électrique et mécanique unifié précis a été présenté pour la validation de la stabilité du réseau électrique par l'analyse des valeurs propres et un modèle simplifié pratique du réseau électrique a été proposé pour la conception du régulateur de TCSC. Spécialement, un modèle dynamique pratique de TCSC a été défini pour l'analyse de la stabilité dynamique avec de petites perturbations. Une boîte d'outils SIMUSTAB a été élaborée pour la simulation de la caractéristique dynamique des réseaux électriques avec des composants électroniques de puissance dans l'environnement MATLAB®/SIMULINK™.
- Étude de la caractéristique d'amortissement des réseaux électriques et description du mécanisme unifié de production de la résonance hypo-synchrone et de l'oscillation en basse fréquence. De l'angle d'interaction de l'amortissement entre le turboalternateur et le réseau de transmission durant le processus dynamique d'échange de l'énergie électrique, nous avons décrit un mécanisme unifié de production des deux problèmes dynamiques, ce qui met en lumière le moyen d'amortir la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence de façon simultanée et efficace en adoptant la commande appropriée pour le réseau de transmission d'énergie électrique. Nous avons vérifié que la commande efficace du TCSC pour le réseau de transmission peut contribuer à l'amélioration de l'interaction de

l'amortissement afin de diminuer simultanément la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence de multi-modes.

- Développement d'un indice de performance de la stabilité des réseaux électriques relié au mécanisme unifié proposé. L'indice de performance fournit la possibilité de remplacer l'utilisation des méthodes traditionnelles basées sur les valeurs propres dominantes de façon efficace et pratique dans la conception du régulateur avec pour objectif d'améliorer la stabilité du réseau électrique.
- Développement d'une loi de commande basée sur une méthode de conception optimale unifiée du régulateur de TCSC. Selon l'idée d'améliorer l'interaction de l'amortissement en obtenant une interaction de l'amortissement positif désiré dans le processus dynamique à l'aide de la commande linéaire optimale, une méthode de conception optimale unifiée du régulateur de TCSC a été proposée. La localisation, l'uniformité, l'efficacité et la robustesse sont soulignées dans la conception du régulateur du TCSC. Ceci permet d'élaborer une stratégie de commande unifiée robuste du TCSC avec rétroaction de variables d'état locales pour amortir simultanément et efficacement la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence des réseaux électriques, avec une répartition désirée de la puissance des lignes de transmission.

À l'aide de modèles typiques de réseaux électriques basés sur le premier modèle de référence de IEEE et sur le deuxième modèle de référence de IEEE, nous avons effectué l'analyse et la validation de l'effet de la commande unifiée proposée de TCSC sur l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques, respectivement par la méthode des valeurs propres et par simulation numérique à l'aide d'un modèle non linéaire dans l'environnement MATLAB®/SIMULINK™. Les conclusions obtenues par simulation numérique coïncident avec celles de l'analyse des valeurs propres :

- La commande unifiée du TCSC proposée permet de beaucoup améliorer la caractéristique d'amortissement des réseaux électriques, et permet à l'oscillation hypo-synchrone et à l'oscillation en basse fréquence de multi-modes des réseaux électriques d'être amorties de façon simultanée et efficace, donc le régulateur de TCSC proposé a un effet unifié et efficace sur l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques;

- La stratégie de commande unifiée du TCSC proposée permet d'assurer la répartition désirée de la puissance et de maintenir la compensation capacitive sur la ligne de transmission afin d'améliorer le fonctionnement des réseaux électriques en régime permanent;
- La méthode de conception du régulateur du TCSC basée sur l'évaluation proposée de la stabilité du réseau électrique est efficace et pratique;
- Le modèle simplifié du réseau proposé pour la conception du régulateur unifié de TCSC est faisable et pratique;
- Le régulateur unifié du TCSC proposé est supérieur aux autres régulateurs pour amortir simultanément et efficacement la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence de multi-modes dans le réseau électrique;
- Le régulateur unifié du TCSC proposé possède une caractéristique de robustesse satisfaisante grâce à l'introduction du coefficient d'amortissement désiré D_d qui peut être ajusté d'après la demande pour la robustesse, donc le régulateur proposé est évidemment différent du régulateur optimal général basé sur la méthode de LQR sans robustesse. Lorsque les paramètres du réseau étudié varient dans une plage de fonctionnement possible, le régulateur unifié de TCSC proposé peut également efficacement amortir la résonance hypo-synchrone et l'oscillation en basse fréquence de multi-modes;
- La commande unifiée du TCSC n'a pas d'influence évidente sur les modes d'oscillation hypo-synchrone à la fréquence supérieure comme, par exemple, le mode 298 rad/s pour le réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE et le mode 322 rad/s pour le réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE parce que ces modes dépendent principalement de l'effet de l'amortissement inhérent de l'alternateur dû, entre autres, à la résistance du vent et au frottement dans l'alternateur. La conclusion de l'analyse est conforme au cas pratique.

À la fin de ce projet de recherche, nous avons apporté plusieurs contributions à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques, spécialement la stabilité dynamique en utilisant l'appareil de TCSC. Ces contributions sont les suivantes :

- Un modèle dynamique du TCSC pour l'étude de la caractéristique dynamique du réseau électrique avec TCSC;
- Un modèle simplifié du réseau électrique global avec TCSC adapté à la conception du régulateur de TCSC avec rétroaction locale;

- Une boîte d'outils SIMUSTAB pour la simulation de la caractéristique dynamique des réseaux électriques avec des composants électroniques de puissance : ceci enrichira la librairie d'outils pour les logiciels MATLAB[®]/SIMULINKTM;
- Un mécanisme unifié pour la production de l'oscillation en basse fréquence et de la résonance hypo-synchrone basé sur l'analyse de l'interaction de l'amortissement entre l'alternateur et le réseau de transmission d'énergie électrique;
- Une méthode d'évaluation de la stabilité dynamique adaptée pour élaborer une stratégie de commande de TCSC de façon plus efficace et plus pratique que les méthodes traditionnelles comme, par exemple, les méthodes basées sur l'analyse des valeurs propres;
- Une stratégie de commande unifiée du régulateur de TCSC avec rétroaction des variables d'état locales pour amortir l'oscillation en basse fréquence et la résonance hypo-synchrone de multi-modes des réseaux électriques efficacement et simultanément, en plus d'assurer la répartition désirée de la puissance sur les lignes de transmission électrique;
- Un régulateur unifié robuste de TCSC avec pour objectif particulier d'améliorer la stabilité dynamique des réseaux électriques.

En résumé, les contributions originales de ce travail résident dans la proposition d'un mécanisme unifié de production de la résonance hyposynchrone et de l'oscillation en basse fréquence, le développement d'un indice de performance pour l'évaluation de la stabilité des réseaux électriques de l'angle pour améliorer l'interaction de l'amortissement entre le turboalternateur et le réseau de transmission d'énergie électrique, et selon l'indice de performance, l'établissement d'une stratégie de commande unifiée et efficace du TCSC avec rétroaction des signaux de mesures locales avec pour objectif d'amortir simultanément et efficacement la résonance hyposynchrone et l'oscillation en basse fréquence sur la ligne de transmission sans modification de la puissance active sur les lignes de transmission. Ce travail n'a considéré qu'un réseau électrique de mono-alternateur avec un TCSC et l'indice de performance, bien qu'il rencontre les objectifs fixés, ne permet pas d'amortir significativement certains modes. En outre, le modèle idéal du TCSC a été adopté pour la conception du régulateur de TCSC, ce qui affecte l'effet réel de commande du TCSC à un certain degré dans l'application pratique, bien que la robustesse du régulateur de TCSC proposé permet d'obtenir encore un bon effet de commande pour l'amélioration de la stabilité. Par conséquent, pour faire suite au présent travail de recherche,

nous proposons les perspectives de travaux futurs suivants pour poursuivre le développement de lois de commande pour la stabilisation des réseaux électriques :

- Amélioration du modèle de TCSC pour l'application pratique;
- Amélioration de l'indice de performance

La recherche dans ce sens pourrait être effectuée en améliorant l'indice de performance pour augmenter la sensibilité à certains modes. Ainsi, l'amortissement de ces modes pourrait être amélioré, en particulier si ceux-ci étaient initialement peu observables à partir des signaux de mesure bruts. Pour ce, les signaux de mesure locale pourraient être filtrés (filtres passe bande par exemple) et l'indice de performance pourrait être défini en fonction des signaux filtrés. Ceci demande d'ajouter le modèle du filtre au modèle du réseau.

- Adaptation de la méthode pour l'application à d'autres appareils de FACTS avec pour même objectif d'améliorer la stabilité du réseau électrique

L'indice de performance proposé pour l'évaluation de la stabilité est déduit par la méthode de conception systématique, ce qui permet à la méthode de conception d'être facilement développée pour la conception du régulateur d'autres appareils de FACTS avec objectif similaire. Nous croyons que l'indice de performance proposé peut être adapté à la conception du régulateur d'autres appareils de FACTS comme STATCOM, SVC, UPFC etc.. Le modèle des appareils de FACTS pourrait remplacer le modèle du TCSC et être combiné dans le modèle global du réseau électrique étudié.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y. Yu, *Electric Power System Dynamics*, New York : ACADEMIC Press, 1983.
- [2] P. Kundur, *Power System Control and Stability*, New York : McGraw-HILL, Inc., 1993.
- [3] P.M. Anderson, B.L. Agrawal et J.E. Van Ness, *Subsynchronous Resonance in Power Systems*, New York : IEEE Press, 1989.
- [4] V.K. Sood, "Position Paper on FACTS Technology, Project ST-460," Technologie et IREQ, Mars 1995.
- [5] EFI SINTEF GROUP, "HVDC and Power Electronic Components (FACTS)-Technical Status, Network Analyses and Possible Utilization in the Norwegian Main Grid," Décembre 1995.
- [6] N.G. Hingorani, "FACTS-Flexible AC Transmission System," Proceedings of IEE Fifth International Conference on AC and DC Power Transmission, Septembre 1991, London, UK.
- [7] E. Larsen et F. Sener, "Current Activity in Flexible AC Transmission System (FACTS)," *FACTS*, TH 0465-5 PER , Avril, 1992.
- [8] N.G. Hingorani et L. Gyugyi, *Understanding FACTS*, New York : IEEE Press., 1999.
- [9] M. Noroozian et G. Andersson, "Power Flow Control by Use of Controllable Series Components," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, Juillet 1993.
- [10] S.G. Jalali et al., "Dynamic Response of a Thyristor Controlled Switched Capacitor," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, pp. 1609-1615, Juillet 1994.
- [11] J. Urbanek et al., "Thyristor Controlled Series Compensation Prototype Installation at the Slatt 500 kV Substation," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp.1460-1469, Juillet 1993.
- [12] A.J.F. Keri, B.J.Ware et al. "Improving Transmission System Performance Using Controlled Series Capacitor," *CIGRE*, 14/37/38-07, Session 1992.
- [13] R.J. Piwko et al., "Subsynchronous Resonance Performance Tests of the Slatt Thyristor-Controlled Series Capacitor," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, pp.1112-1119, Avril 1996.
- [14] T. Luor et al., "Application of Thyristor-Controlled Series Compensators to Enhance Oscillatory Stability and Transmission Capability of a Longitudinal Power System," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 14, No. 1, pp.179-185, Février 1999.
- [15] M.Noroozian et al., "Improving Power System Dynamics by Series-connected FACTS Devices," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 12, No. 4 , pp. 1635-1641, Octobre 1997.

- [16] L.A.S. Pilotto et al., "Determination of Needed FACTS Controllers that Increase Asset Utilization of Power Systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, pp. 364-371, Janvier 1997.
- [17] H.F. Wang et al., "A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillations Part II: Multi-machine Power Systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 13, No. 4 , pp. 1355-1362, Octobre 1998.
- [18] D.J. Gotham et G.T. Heydt, "Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems with FACTS Devices," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 13, No. 1, pp. 60-65, Février 1998.
- [19] N. Li et al., "FACTS-Based Power Flow Control in Interconnected Power System ,," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 15, No. 1, pp. 257-262, Février 2000.
- [20] IEEE Committee Report, "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance," *IEEE Trans. Power Apparatus and System*, Vol. PAS-96, No.5, pp. 1565-1570, Sept/Oct 1977.
- [21] IEEE Committee Report, "Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance," *IEEE Trans. Power Apparatus and System*, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1057-1065, Mai 1985.
- [22] R. T. Byerly et E. W. Kimbark, *Stability of Large Electric Power System*, New York : IEEE Press, 1974.
- [23] E.V. Larsen et al., "Concept for Design of FACTS Controllers to Damp Power Swings," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 10, No. 2, pp. 948-956, Mai 1995.
- [24] IEEE Working Group., " Modelling and Analysis Guidelines for Slow Transients: Part I Torsional Oscillations; Transient Torques; Turbine Blade Vibrations; Fast Bus Transfer," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 10, No. 4 , pp. 1950-1955, Octobre 1995.
- [25] M.A. Pai, *Power System Stability*, New York : North-Holland Publishing Company, 1981.
- [26] B.L. Agrawal et al., "Use of Frequency Scanning Techniques for Subsynchronous Resonance Analysis," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 2, pp. 341-349, Mars/Avril 1979.
- [27] Bonneville Power Administration, *EMTP Rule Book*, Oregon, USA, Avril 1982.
- [28] Manitoba HVDC Research Centre, *EMTDC User's Manual*, Manitoba, Canada, 1988.
- [29] Simulink User's, *A Program for Simulation Dynamic Systems* , SIMULINK Guide for MS-WINDOWS, Mathworks Ins., South Natick, M.A., 1992.
- [30] The Math Works Inc, *Power System Blockset User's Guide*, Natick, USA, 1998.

- [31] A. Ba-razzouk, K. Debebe, D.O. Neacsu, M. Gheorghe, A. Pittet, Z. Yao et V. Rajagopalan, "SIMUPELS : SIMULATION of Power Electronic Systems in SIMULINK Environment," CPEE, Université du Québec à Trois-Rivières, Avril 1996.
- [32] P. Pourbeik et M.J. Gibbard, "Simultaneous Coordination of Power System Stabilizers and FACTS Device Stabilizers in a Multimachine Power System for Enhancing Dynamic Performance," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 13, No. 2, pp.473-479, Mai 1998.
- [33] W.S. Levine, *The Control Handbook*, New York : CRC Press, 1996.
- [34] H. Quinot et al., "Robust Coordinated AVR+PSS for Damping Large Scale Power System," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 14, No. 4, pp.1446-1451, November 1999.
- [35] K.R. Padhy et R.K. Varma, "Static VAR System Auxiliary Controllers for Damping Torsional Oscillations," *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 271-286, Octobre 1990.
- [36] S.A. Khaparde et V. Krishna, "Simulation of Unified Static VAR Compensator and Power System Stabilizer for arresting Subsynchronous Resonance," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 1055-1069, Août 1999.
- [37] K.V. Patil et al., "Application of STATCOM for Damping Torsional Oscillations in Series Compensated AC Systems," PE-568-EC-0-01-1997, pp. 1-6, 1997.
- [38] S. Lee et C. Liu, "Damping Subsynchronous Resonance Using a SIMO Shunt Reactor Controller," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 1253-1262, Août 1994.
- [39] H.F. Wang, F.J. Swift, "A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillation Part I: Single-machine Infinite-bus Power Systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 12, No. 2 , pp. 941-946, Avril 1997.
- [40] M. Noroozian et G. Andersson, "Damping of Power System Oscillations by Use of Controllable Components," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, pp. 2046-2054, Octobre 1994.
- [41] B.K. Perkins et M.R. Iravani, "Dynamic Modeling of a TCSC with Application to SSR Analysis," PE-477-PWRS-0-01-1997, 1997.
- [42] S.G. Jalali et al., "A Stability Model for the Advanced Series Compensator (ASC)," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, pp. 1128-1137, Avril 1996.
- [43] J.J. Paserba et al., "A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 10, No. 3, pp. 1471-1478, Juillet 1995.
- [44] H.A. Othman et al., "Analytical Modeling of Thyristor-Controlled Series Capacitors for SSR Studies," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 119-127, Février 1996.

- [45] G. N. Taranto et J. H. Chow, "A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 10, No. 3, pp. 1219-1225, Août 1995.
- [46] L. Rouco et F.L. Pagola, "An Eigenvalue Sensitivity Approach to Location and Controller Design of Controllable Series Capacitors for Damping Power System Oscillations," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 12, No. 4, pp. 1660-1666, Novembre 1997.
- [47] P.S. Dolan et al., "A Study of TCSC Optimal Damping Control Parameters for Different Operating Conditions," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 10, No. 4, pp. 1972-1977, Novembre 1995.
- [48] M. Klein et al., " H_∞ Damping Controller Design in Large Power Systems," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 10, No. 1, pp. 158-164, Février 1994.
- [49] N. Yang et al., "TCSC Controller Design for Interarea Oscillations," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 13, No. 4, pp. 1304-1310, Novembre 1998.
- [50] D.J. Trudnowski et al., "Estimating Damping Effectiveness of BPA's Thyristor Controlled Series Capacitor by Applying Time and Frequency Domain Method to Measured Response," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 11, No. 2, pp. 761-766, Mai 1996.
- [51] N. Christl et al., "Advanced Series Compensation (ASC) with Thyristor Controlled Impedance," *CIGRÉ 14/37/38-05*, Août 1992.
- [52] P. E. Krause et al. "Power System Studies and Modelling for the Kayenta 230 kv Substation Advanced Series Compensation," Proceedings of IEE Fifth International Conference on AC and DC Power Transmission, pp. 33-37, 1991.
- [53] D.N. Kosterev et W.J. Kolodziej, "Bang-Bang Series Capacitor Transient Stability Control," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 10, No. 2, pp. 915-923, Mai 1995.
- [54] J. Chang et J.H. Chow, "Time-Optimal Series Capacitor Control for Damping Interarea Modes in Interconnected Power System," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 12, No. 1, pp. 215-221, Février 1997.
- [55] Canadian Electrical Association, *Static Compensator for Reactive Power Control*, Winnipeg : Canteht Publication, 1986.
- [56] M.E. Aboul-Ela et al., "Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 767-773, Mai 1996.

- [57] P.M. Anderson et A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, New York : IEEE Press, 1994.
- [58] S. Helbing et G. Karady, "Investigations of an Advanced form of Series Compensation," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 9, pp. 939-947, Avril 1994.
- [59] G. N. Taranto et al. "Robust decentralized Control design for Damping Power System Oscillation," Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Lake Buena Vista, FL, pp. 4080-4085, 1994.
- [60] Y. He, P. Sicard et Z. Yao, "A unified dynamic model of TCSC to study small-signal stability of power systems," Rapport de recherche (soumis pour publication dans IEEE Transactions on Power Systems, IEEE Power Engineering Society), Chaire de Recherche Hydro-Québec (CPEE), Université du Québec à Trois-Rivières, Québec, Canada, 2000.
- [61] Y. He, Z. Yao et V. Rajagopalan, "Simulation of Power System Dynamics in the Environment MATLAB/SIMULINK," IEEE/CAS, SCS97 (International Symposium on Signals Circuits and Systems), Lasi, Romania, Octobre 1997.
- [62] F.L. Lewis et V.L. Syrmos, *Optimal Control*, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [63] J. Chang, "Dynamic State Estimation Using a Nonlinear Observer for Optimal Series-Capacitor Switching Control," *Electrical Power & Energy System*, Vol. 19, No. 7, pp. 441-447, 1997.
- [64] Y. He, P. Sicard, J. Xu, Z. Yao et V. Rajagopalan, "A Unified Optimal Controller Design of TCSC to Improve the Power System Dynamic Stability," IEEE/PES Winter Meeting 1999, New York, USA, Janvier 1999.
- [65] Y. He, P. Sicard, J. Xu, Z. Yao et V. Rajagopalan, "Unified Control of Subsynchronous Resonance and Low Frequency Oscillations by means of TCSC," Rapport de recherche (soumis pour publication dans IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE Power Engineering Society), Chaire de Recherche Hydro-Québec (CPEE), Université du Québec à Trois-Rivières, Québec, Canada, 2000.
- [66] Y. He, "Modelling and Optimal Control Design for Thyristor-Controlled Series Capacitors," IEEE/PES, PICA97 (Conference on Power Industry Computer Applications), Columbus, Ohio, USA, Mai 1997.

ANNEXE A

SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE SOUS MATLAB®/SIMULINK™ À L'AIDE DE LA BOÎTE D'OUTILS SIMUSTAB

A.1 Fonctionnement du TCSC

À l'aide de la boîte d'outils SIMUSTAB, le fonctionnement d'un TCSC (figure 2-6) sous MATLAB®/SIMULINK™ est simulé. Le TCSC est modélisé selon le mode idéal d'amorçage en utilisant le modèle complet montré sur la figure 2-14 et sur la figure 2-15. De petite résistances sont ajoutées dans le circuit pour aider la diminution des harmoniques d'ordre supérieur. Les paramètres de fonctionnement sont définis dans le Tableau A-1. La figure A-1 montre les réponses de la tension v_{tcsc} , du courant i_{lcr} de branche TCR et des impulsions d'amorçage I_{im} du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage α du TCSC.

Tableau A-1 : Paramètres de fonctionnement du TCSC en p.u.

I_{tcsc}	x_{cs}	x_t
0.95	0.112	$x_{cs}/3$

Les résultats par simulation montrés sur la figure A-1 montrent :

- l'angle d'amorçage des thyristors peut correspondre exactement à l'amorçage d'impulsions I_{im} , mais le fonctionnement des thyristors n'est pas influencé par le largeur d'impulsions ;
- le courant de branche TCR i_{lcr} peut être exactement commandé par l'amorçage des impulsions I_{im} et il varie avec l'angle d'amorçage des thyristors α comme, par exemple, lorsque $\alpha = 90^\circ$, la branche TCR est constamment en conduction et le courant i_{lcr} arrive au maximum, et lorsque $\alpha = 180^\circ$, la branche TCR est complètement bloquée et i_{lcr} devient nul;
- la tension v_{tcsc} de TCSC est bien synchronisée avec les signaux d'impulsions I_{im} ;

- la tension de TCSC v_{tcsc} est non sinusoïdale à cause du courant de branche TCR qui comprend les composants d'harmoniques d'ordre supérieur sauf pour les deux cas : $\alpha = 90^\circ$ et $\alpha = 180^\circ$.

On peut remarquer que qualitativement, les résultats obtenus par simulation numérique correspondent bien au cas pratique, ce qui peut vérifier la méthode de modélisation de TCSC proposée et le modèle du TCSC sous SIMULINK™.

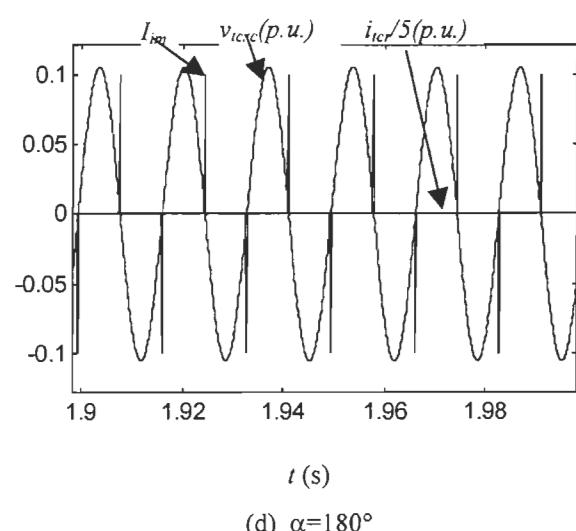
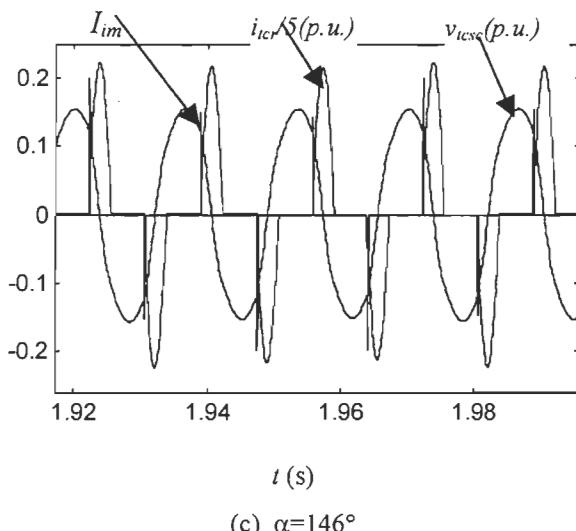
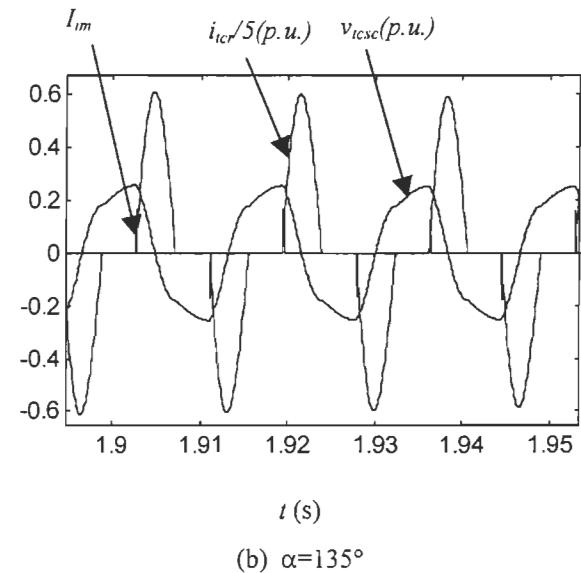
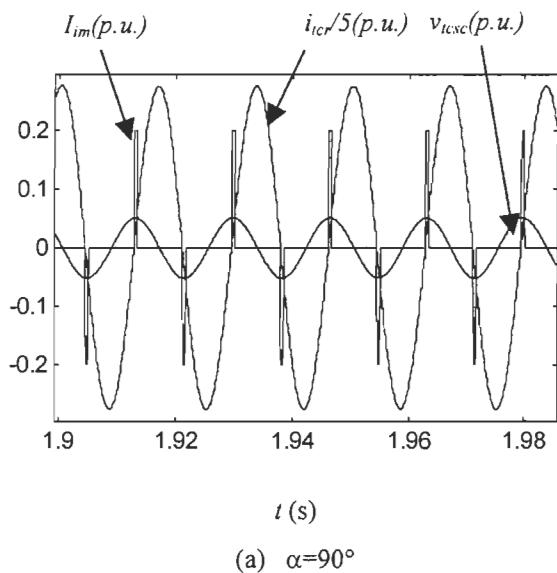


Figure A-1 : Tension de TCSC v_{tcsc} (p.u.), courant de branche TCR i_{tc} (p.u.) et impulsion I_{im} en fonction de l'angle d'amorçage α ($^\circ$)

A.2 Fonctionnement du réseau électrique global branché avec un TCSC

Le réseau électrique montré sur la figure 2-2 est utilisé pour la simulation sous MATLAB®/SIMULINK™. Le réseau comprend un turboalternateur dont l'arbre est décrit par un système de six masses-ressorts, un transformateur, un TCSC, une ligne de transmission électrique et une source de puissance infinie. À l'aide de la librairie SIMUSTAB et d'après les règles de modélisation, le modèle du réseau électrique global sous SIMULINK™ est obtenu et il est représenté à la figure A-2, le modèle de l'arbre du turboalternateur étant représenté à la figure 2-11. Le processus transitoire du réseau électrique est provoqué par une perturbation relativement faible à cause du déséquilibre de l'énergie électrique à l'état initial, c'est-à-dire $P_{e0} \neq P_m$. Dans l'exemple, nous mettons l'accent sur l'analyse et l'étude du fonctionnement de l'arbre de turboalternateur avec un système de six masses-ressorts pour vérifier le modèle de l'arbre de turboalternateur proposé.

Le tableau A-2 donne les conditions de fonctionnement en simulation où T_H , T_M , T_{Ba} et T_{Bb} représentent respectivement le couple mécanique de la turbine à la pression haute, de la turbine à la pression moyenne, des deux turbines à la pression basse A et B, et $T_{m\Sigma}$ représente le couple mécanique global de l'arbre de turboalternateur. Tous les paramètres sont en p.u.. Les autres paramètres peuvent être trouvés à la section B.1 dans l'annexe B.

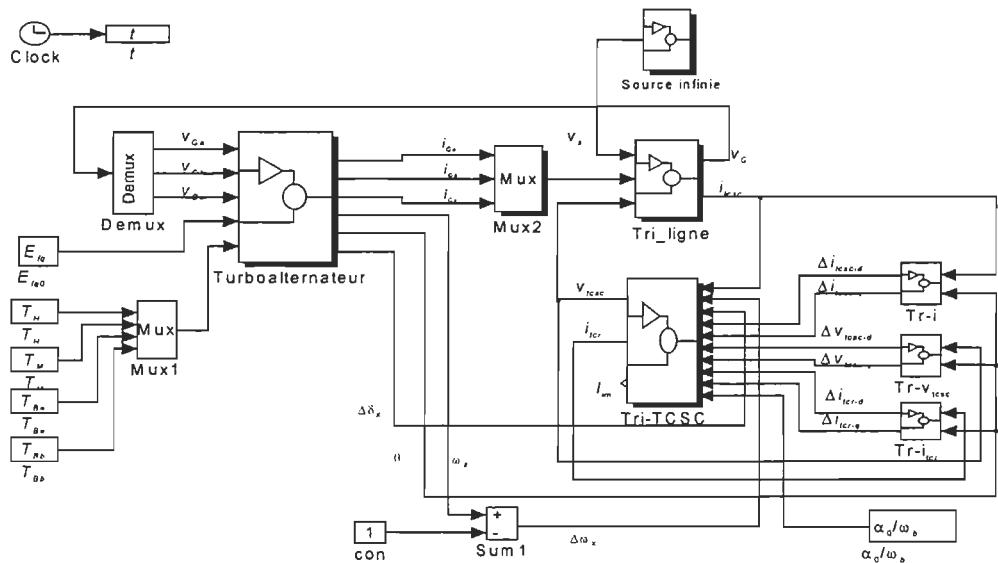
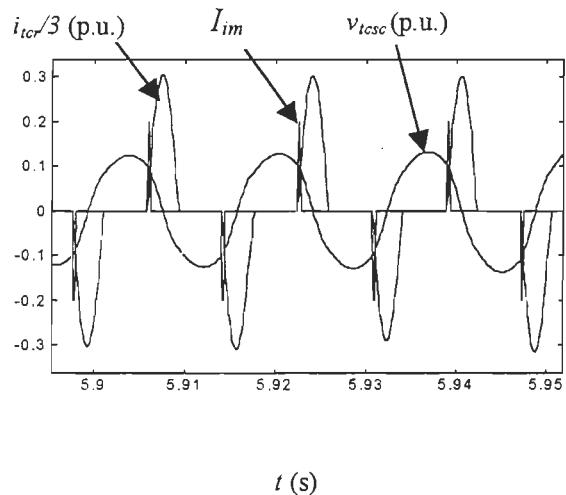


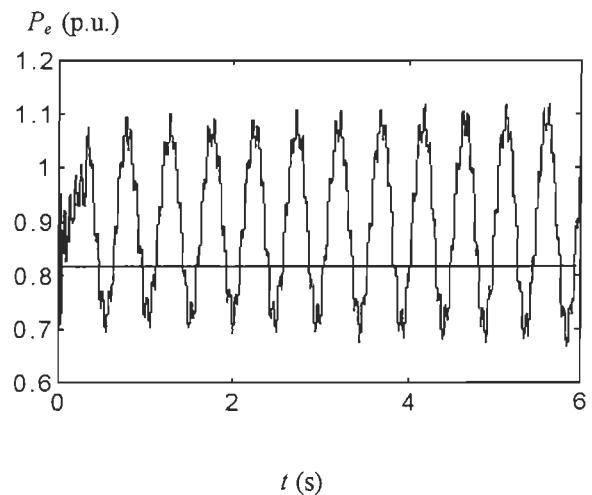
Figure A-2 : Modèle du réseau électrique global avec un TCSC

Tableau A-2 : Conditions de fonctionnement du réseau global en simulation

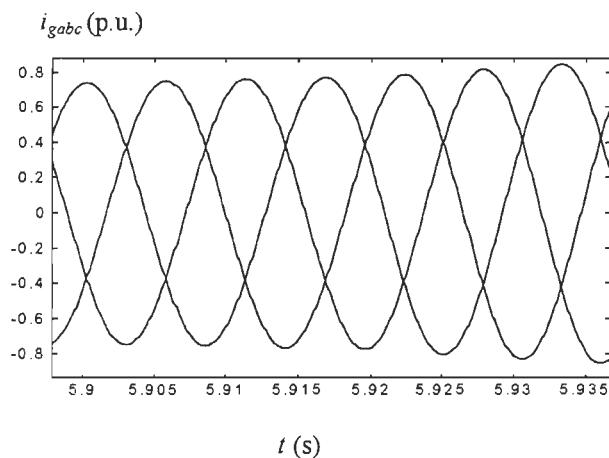
Couple mécanique de système de six masses-ressorts d'alternateur (p.u.)					Tension aux bornes de l'alternateur (p.u.)	Angle d'amorçage $\alpha(^{\circ})$	Niveau de compensation k_{c0}	x_{cs}	x_t
T_m	T_H	T_M	T_{Ba}	T_{Bb}					
0.9	0.27	0.234	0.198	0.198	1.05	146	0.266	0.112	0.0373



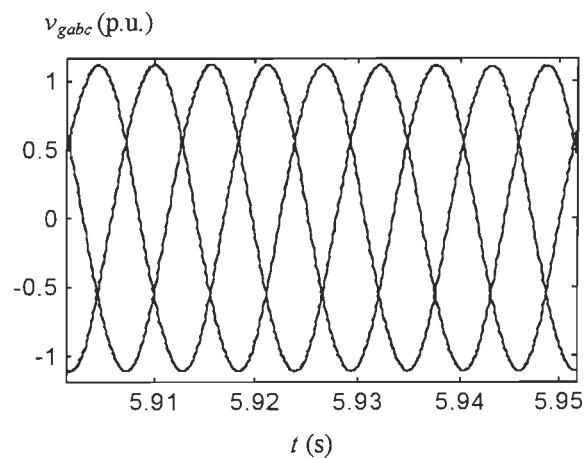
(a) Réponses de la tension et du courant du TCSC (p.u.)



(b) Puissance électromagnétique de l'alternateur (p.u.)



(c) Courant triphasé du stator de l'alternateur (p.u.)



(d) Tension aux bornes de l'alternateur (p.u.)

Figure A-3 : Réponses du réseau de transmission d'énergie électrique

La figure A-3 montre les résultats de la simulation où P_e désigne la puissance électromagnétique de l'alternateur, i_{gabc} désigne le courant triphasé du stator de l'alternateur et v_{gabc} désigne la tension triphasée aux bornes de l'alternateur.

Les figures A-4 et A-5 montrent respectivement les déviations de la pulsation et l'angle de chaque section de rotation du système de six masses-ressorts de l'arbre du turboalternateur.

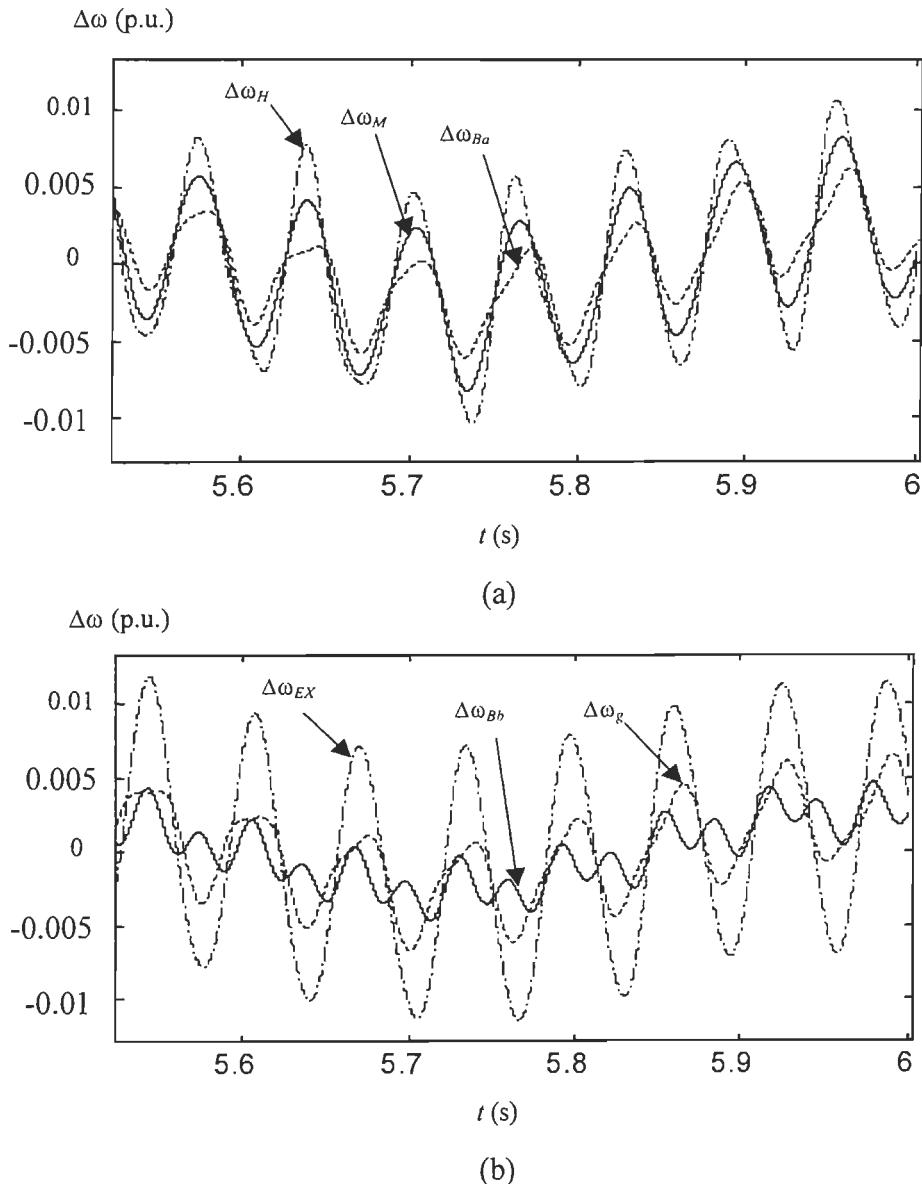
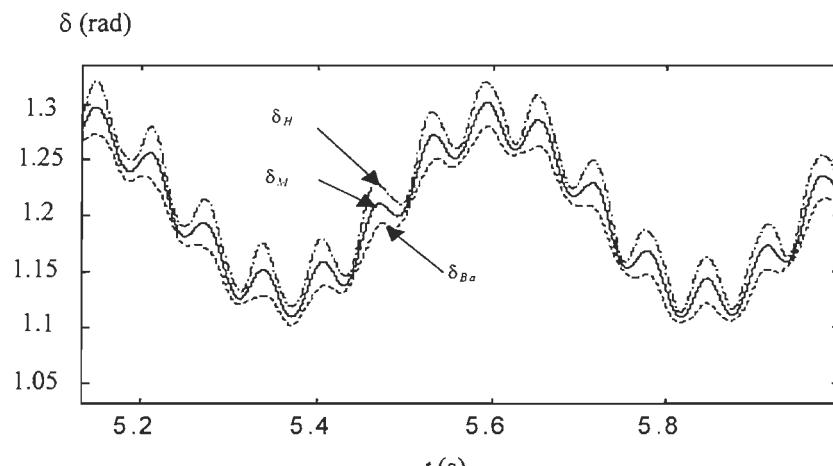


Figure A-4 : Déviations de la pulsation correspondant aux six sections de rotation de l'arbre (p.u.)

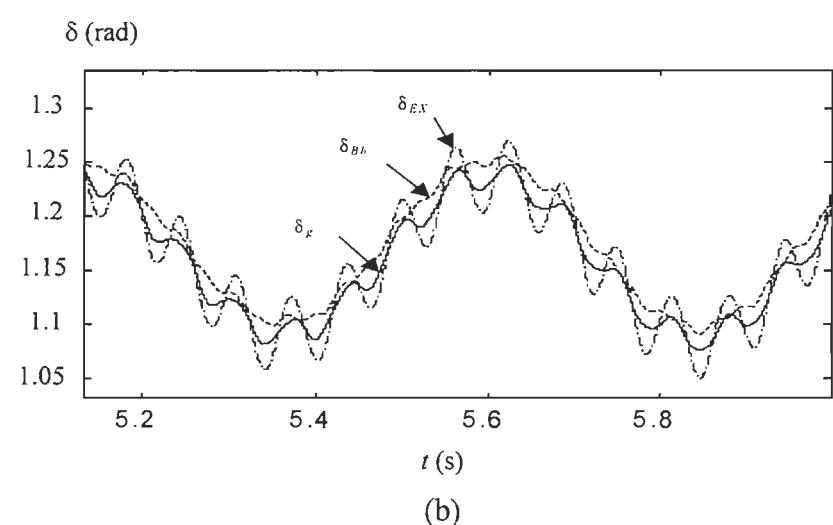
Pour vérifier les résultats de la simulation numérique, l'analyse des valeurs propres pour le réseau électrique est aussi effectuée et les résultats sont donnés dans le tableau A-3.

Tableau A-3 : Résultats des valeurs propres du réseau électrique

Mode	Partie réelle	Fréquence (rad/s)
1	-0.18	298.18i
2	-0.04	202.90i
3	-0.16	160.43i
4	-0.65	127.06i
5	-0.13	99.28i
6	-0.05	8.80i



(a)



(b)

Figure A-5 : Angles correspondant aux six sections de rotation de l'arbre (radian)

Une technique pour identifier les valeurs propres a été présentée dans les références [1-2], ce qui permet de trouver le degré de liaison entre chaque mode propre et chaque section de rotation de six masses-ressorts d'arbre du turboalternateur, ce qui est décrit comme suit [1] :

- le mode 1 correspond plus fortement à la section de turbine à la pression haute;
- le mode 2 correspond plus fortement à la section de turbine à la pression moyenne;
- le mode 3 correspond plus fortement à la section de turbine à la pression basse A;
- le mode 4 correspond plus fortement à la section de l'exciteur;
- le mode 5 correspond fortement à la section de turbine à la pression basse B;
- le mode 6 correspond plus fortement à la section de l'alternateur.

Supposons donc que ω_{H298} , ω_{M203} , ω_{Ba160} , ω_{Bb99} , ω_g et ω_{EX127} représentent les composantes fréquentielles de pulsation correspondant respectivement à la turbine à la pression haute à la fréquence naturelle 47.45 Hz (mode 1 : 298 rad/s), à la turbine à la pression moyenne à la fréquence naturelle 32.28 Hz (mode 2 : 203 rad/s), à la turbine à la pression basse A à la fréquence naturelle 25.55 Hz (mode 3 : 160 rad/s), à la turbine à la pression basse B à la fréquence naturelle 15.71 Hz (mode 5 : 99 rad/s), à l'alternateur à la fréquence naturelle 1.43 Hz (mode 6 : 9 rad/s) et à l'exciteur à la fréquence naturelle 20.21 Hz (mode 4 : 127 rad/s). Par conséquent, l'analyse fréquentielle pour la pulsation de chaque section de rotation de six masses-ressorts du turboalternateur est effectuée pour obtenir le processus dynamique de ω_{H298} , ω_{M203} , ω_{Ba160} , ω_{Bb99} , ω_g et ω_{EX127} . Les résultats sont montrés sur la figure A-6.

D'abord, des résultats des valeurs propres donnés dans le tableau A-3, on peut remarquer :

- les modes d'oscillation mécanique du réseau étudié comprennent cinq modes d'oscillation hypo-synchrone et un mode d'oscillation en basse fréquence. Les cinq modes hyposynchrones correspondant respectivement aux fréquences naturelles 298 rad/s, 203 rad/s, 160 rad/s, 127 rad/s et 99 rad/s, et le mode d'oscillation en basse fréquence correspond à la fréquence naturelle 9 rad/s ;
- le mode à la fréquence 127 rad/s (mode 4) diminue le plus rapidement dans le processus dynamique;
- le mode à la fréquence 298 rad/s (mode 1) et le mode à la fréquence 160 rad/s (mode 3) ont une diminution plus lente dans le processus dynamique;
- le mode à la fréquence 99 rad/s (mode 5) a une diminution légèrement plus lente;

- le mode à la fréquence 9 rad/s (mode 6) et le mode à la fréquence 203 rad/s (mode 2) diminuent le plus lentement dans le processus dynamique.

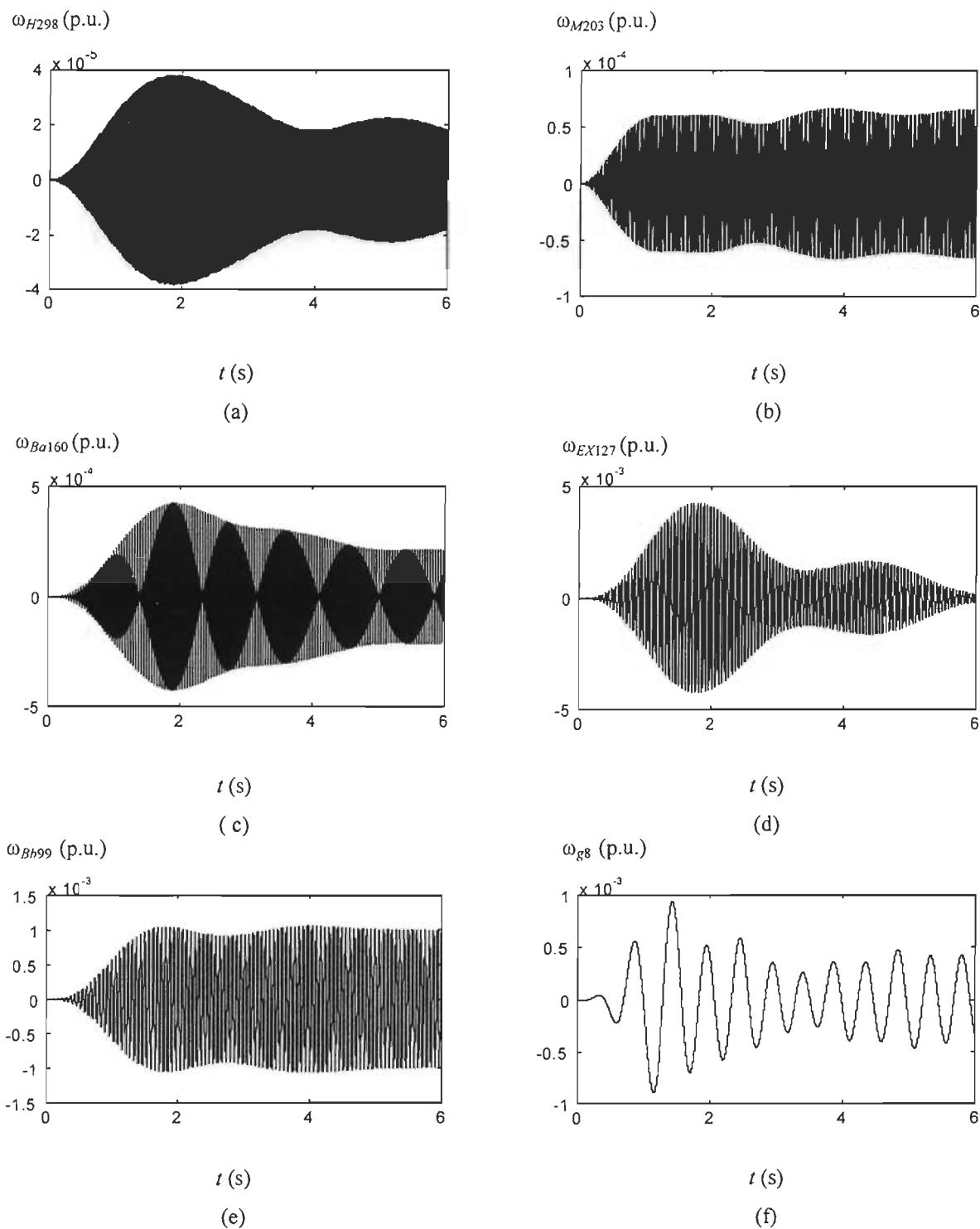


Figure A-6 : Réponse fréquentielle de pulsation du turboalternateur

En comparant les résultats obtenus par la simulation numérique pour les pulsations ω_{H298} , ω_{M203} , ω_{Ba160} , ω_{Bb99} , ω_{g8} et ω_{EX127} avec ceux obtenus par l'analyse des valeurs propres donnés dans le tableau A-3, on trouve que les conclusions obtenues par la simulation numérique du réseau électrique global dans le processus dynamique coïncident exactement à ceux obtenus par l'analyse des valeurs propres, donc on peut vérifier la modélisation du réseau électrique global proposée et le modèle proposé de l'arbre de turboalternateur décrit par un système de six masses-ressorts sous SIMULINK™.

A.3 Processus transitoire du réseau électrique avec la commande de l'excitation additionnelle (PSS—“Power System Stabilizer”)

Un réseau électrique typique est proposé dans la référence [2] pour l'analyse du processus transitoire du réseau électrique avec la commande de l'excitation (voir la figure A-7). Le modèle du réseau électrique global a une configuration similaire à la figure 2-2. Une simulation numérique pour le réseau électrique est exécutée sous MATLAB®/SIMULINK™ pour faire une comparaison avec les résultats dans l'exemple donné par la référence [2]. Notre intérêt vise l'analyse de l'effet des commandes du PSS et du AVR (“Automatic Voltage Regulator”) dans le processus transitoire du réseau électrique et de l'état de fonctionnement en régime permanent. Dans ce cas, le système de masses-ressorts de l'alternateur n'est pas considéré, donc l'arbre d'alternateur est représenté par le modèle général.

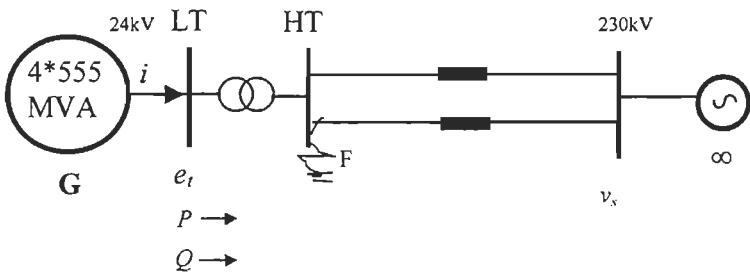


Figure A-7 : Réseau électrique typique pour l'analyse transitoire

Dans l'exemple, les quatre alternateurs sont représentés par un alternateur équivalent dont les paramètres sont en p.u avec la base 2220 MVA. La condition de fonctionnement du pré-défaut du réseau en p.u. ayant comme base 2220MVA et 24kV est :

$$V_s = 0.9, E_t = 1.0, P = 0.9, Q = 0.436 \text{ où } P = P_m.$$

Un défaut de court-circuit triphasé se produit au point F à la 5^{ème} seconde et il est enlevé après 0.07 s en isolant simultanément le circuit de défaut aux deux bouts.

Nous vérifions la stabilité du réseau dans les cas suivants de commande de l'excitation :

- AVR (“Automatic Voltage Regulator”) sans PSS
- AVR (“Automatic Voltage Regulator”) avec PSS

Les résultats de la comparaison dans les deux cas de fonctionnement obtenus par simulation numérique pour le réseau électrique dans le processus transitoire sont montrés sur les figures A-8 et A-9. La figure A-10 donne les réponses sans incident en régime permanent du courant triphasé i_{abc} de l'alternateur et la tension triphasée e_{labc} aux bornes de l'alternateur en p.u. avec un AVR et un PSS.

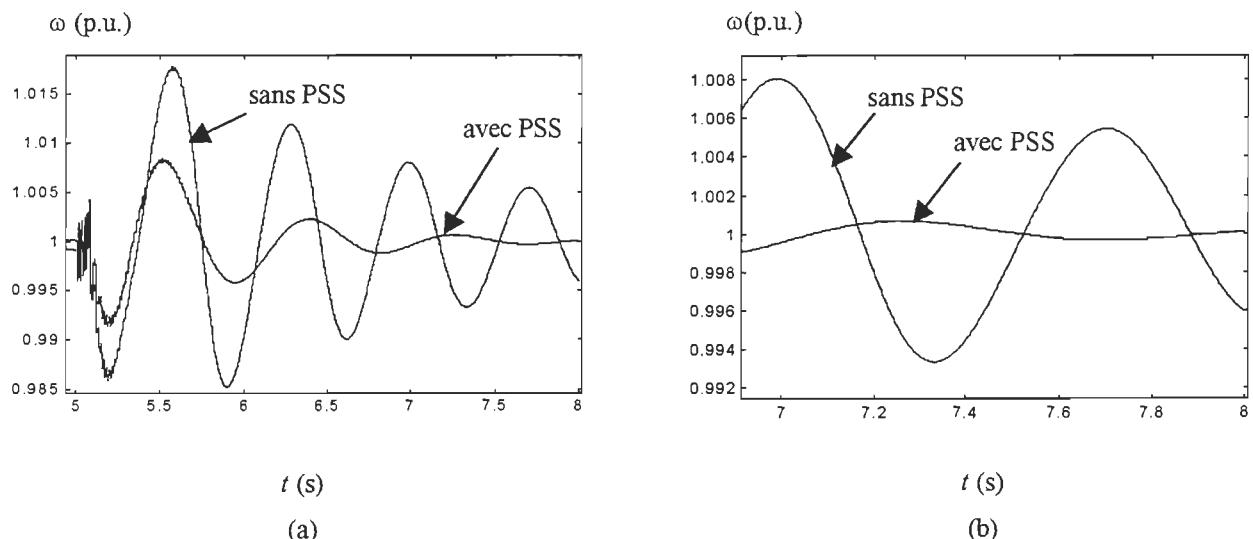


Figure A-8 : Pulsation du rotor ω de l'alternateur avec un AVR après un incident

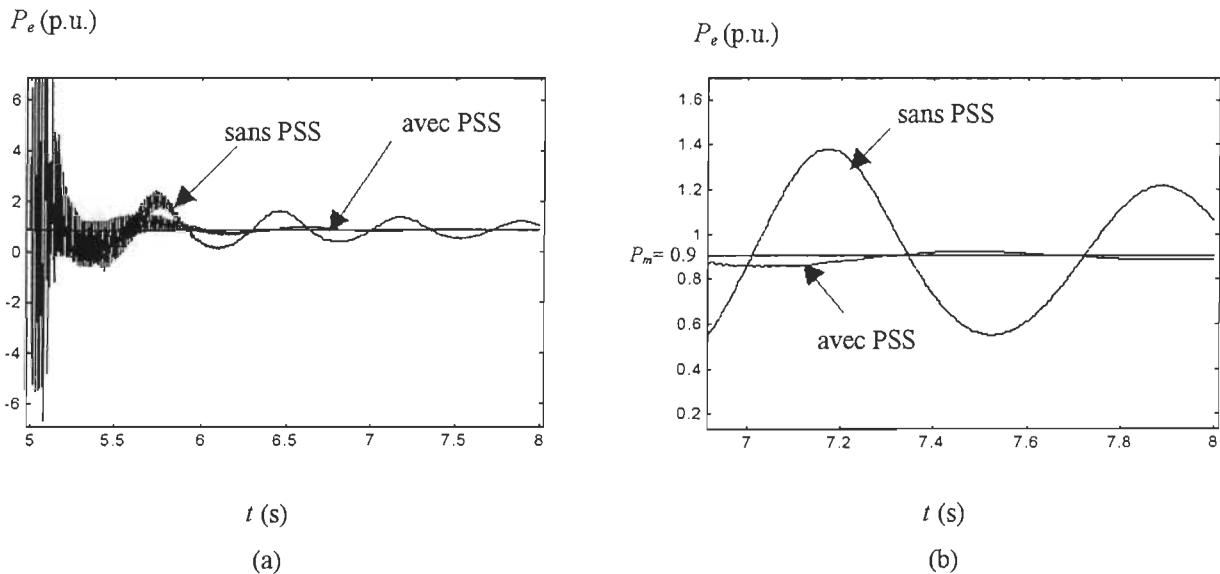


Figure A-9 : Puissance électromagnétique P_e de l'alternateur avec un AVR après un incident

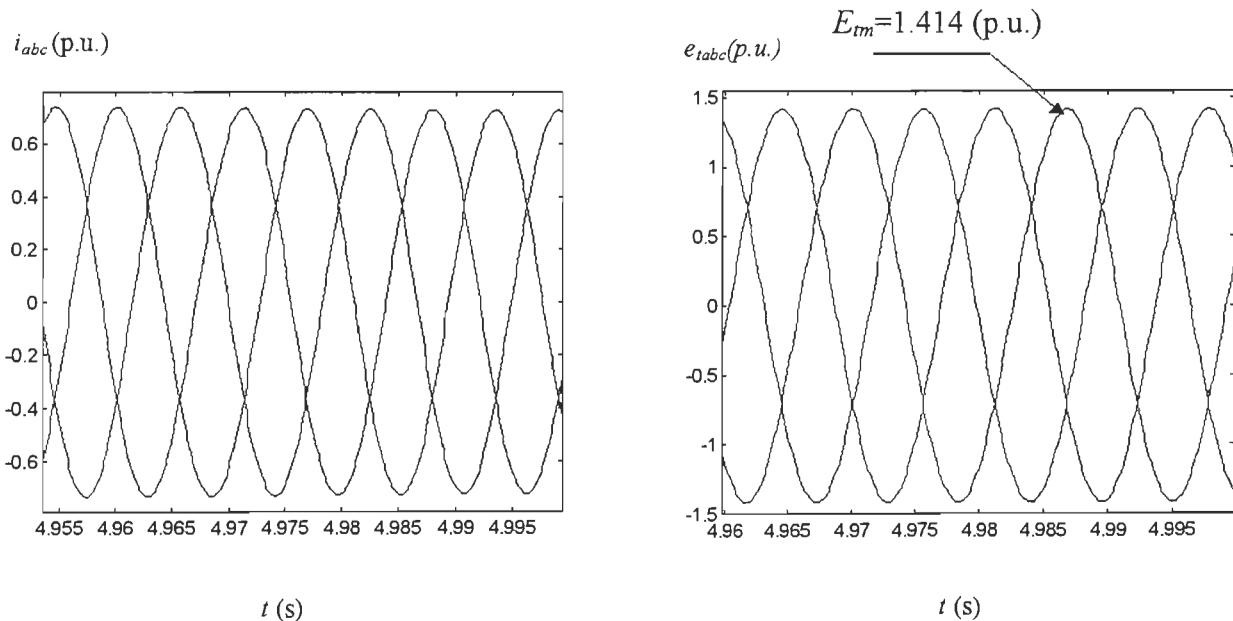


Figure A-10 : Courant triphasé i_{abc} de l'alternateur et la tension triphasée e_{tabc} aux bornes de l'alternateur avec un AVR et un PSS avant un incident

Les figures A-8 et A-9 montrent les effets de la commande de l'excitation sur la vitesse de rotor de l'alternateur et sur la puissance électromagnétique après un incident et la figure A-10 montrent que les résultats de la simulation sans incident pour le réseau sont exactement égaux aux valeurs initiales de fonctionnement en régime permanent données dans le tableau A-3, i.e., $V_s = 0.9$, $E_t = 1$ et $P_e = 0.9$ en p.u.. On peut remarquer que les conclusions obtenues par la simulation numérique avec un incident et sans incident coïncident bien à ceux donnés dans l'exemple, ce qui valide davantage la méthode de modélisation des réseaux électriques proposée et les modèles proposés.

ANNEXE B

PARAMÈTRES DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ÉTUDIÉS

B.1 Réseaux basés sur le premier modèle de référence de IEEE [1, 20]

La figure B-1 donne le premier modèle de référence de IEEE et la figure B-2 montre le réseau électrique basé sur le modèle et les paramètres du premier modèle de référence de IEEE avec un TCSC connecté à la ligne de transmission en série.

Dans les deux réseaux, la plupart des données sont prises des références [1] et [20]. Tous les paramètres sont en p.u. avec une base unique excepté l'angle d'amorçage de TCSC α dont les unités sont spécifiées.

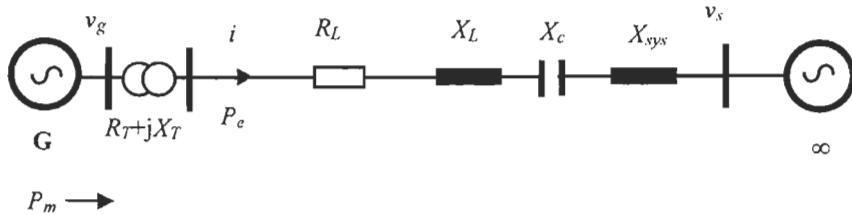


Figure B-1 : Réseau électrique représenté par le premier modèle de référence de IEEE

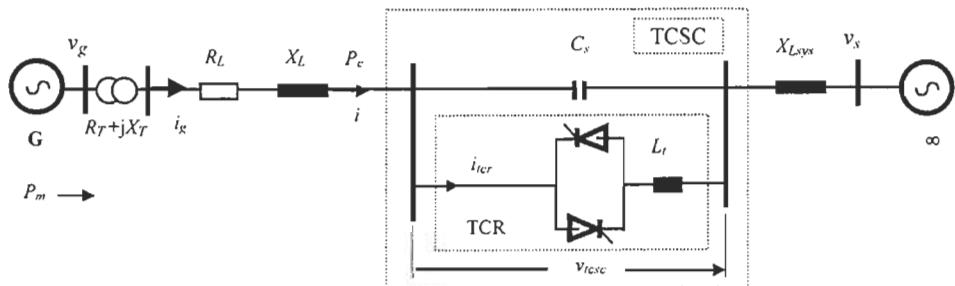


Figure B-2 : Réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE

B.1.1 Données des réseaux

■ Inertie et rigidité des masses de torsion [20]

$$M_H = 0.185794$$

$$K_{HM} = 19.303$$

$$M_M = 0.311178$$

$$K_{MBa} = 34.929$$

$$M_{Ba} = 1.717340$$

$$K_{Bab} = 52.038$$

$$M_{Bb} = 1.768430$$

$$K_{Bbg} = 70.858$$

$$M_g = 1.736990$$

$$K_{gE} = 2.822$$

$$M_{EX} = 0.068433$$

■ Turbines à vapeur et régulateur de vitesse [1]

Les figures B-3 et B-4 donnent la fonction de transfert des turbines à vapeur et du régulateur de la vitesse de l'alternateur.

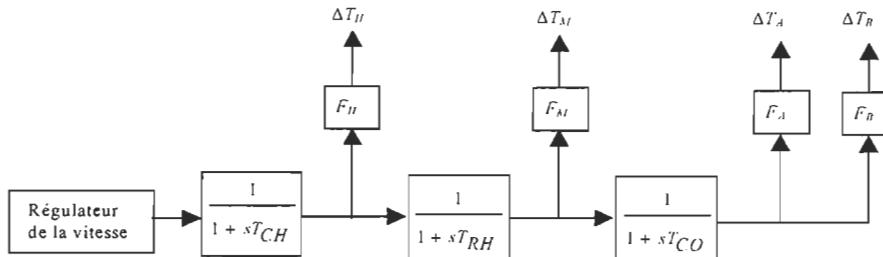


Figure B-3 : Fonction de transfert des turbines à vapeur

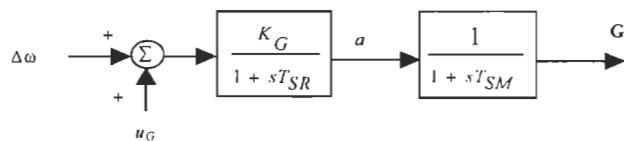


Figure B-4 : Régulateur de vitesse avec deux constantes de temps

Les paramètres sont donnés comme suit :

$$F_H = 0.3 \quad F_M = 0.26 \quad F_A = 0.22 \quad F_B = 0.22$$

$$T_{CH} = 0.3 \quad T_{RH} = 7 \quad T_{CO} = 0.2$$

$$K_G = 25 \quad T_{SR} = 0.2 \quad T_{SM} = 0.3$$

■ Transformateur et ligne de transmission [20]

$$R_T = 0.01, \quad X_T = 0.14, \quad R_L = 0.02, \quad X_L = 0.5, \quad X_{Lsys} = 0.06, \quad X_{L\Sigma} = X_L + X_{Lsys} = 0.56$$

La capacité de compensation est choisie d'après le niveau de compensation k_c . Pour l'étude de la résonance hypo-synchrone, k_c peut être généralement choisi dans la plage : $0.0 < k_c < 0.8$.

■ Alternateur synchrone [1,20]

$$x_{md} = 1.660 \quad x_d = 1.790 \quad x_F = 1.7 \quad x_D = 1.666$$

$$x_{mq} = 1.580 \quad x_q = 1.710 \quad x_Q = 1.695 \quad x_S = 1.825$$

$$r_F = 0.001 \quad r_D = 0.0037 \quad r_Q = 0.0053 \quad r_S = 0.0182 \quad r_a = 0.0015$$

■ Système d'excitation

La figure B-5 montre un système d'excitation avec deux constantes de temps et avec réponse rapide. Les données sont choisies de [1].

$$K_A = 50, \quad T_E = 0.002, \quad T_A = 0.01$$

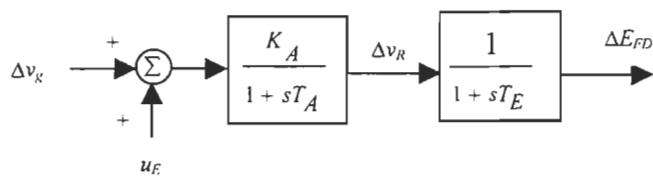


Figure B-5 : Système d'excitation avec deux constantes de temps

B.1.2 Conditions de fonctionnement

La puissance mécanique générale $P_m = 0.9$ qui est répartie parmi les sections de turbine à vapeur PH, PM, PB_a et PB_b respectivement comme suit :

$$P_{Hm} = 0.3 \bullet P_m, \quad P_{Mm} = 0.26 \bullet P_m, \quad P_{Bam} = 0.22 \bullet P_m, \quad P_{Bbm} = 0.22 \bullet P_m.$$

La puissance d'excitateur est supposée d'être zéro.

La tension aux bornes de l'alternateur $V_g = 1.05$.

Le facteur de puissance $PF = 0.9$ (Retard).

B.1.3 Paramètres de TCSC et conditions pour la conception du régulateur du TCSC

B.1.3.1 Régulateur du TCSC avec rétroaction des mesures locales

Les paramètres montrés dans le tableau B-1 sont utilisés pour la conception du régulateur du TCSC avec rétroaction des mesures locales et pour l'analyse des valeurs propres dans la section 4.7.2.1 et dans la section 5.2.

Tableau B-1 : Paramètres de conception du régulateur du TCSC avec rétroaction des mesures locales (concernant le premier modèle de référence de IEEE)

Paramètres de TCSC	Angle d'amorçage initial α_0 (°)		Niveau de compensation initial k_{c0}	Capacitance fixe X_{cs} (p.u.)	Réactance de la branche de TCR X_t (p.u.)
	149	0.3596			
Coefficients d'amortissement	D_H	D_M	D_{Ba}	D_{Bh}	D_g
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Matrices de pondération	r			Q	
	2			$\begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$	
Coefficient d'amortissement désiré D_d	60				

B.1.3.2 Régulateur du TCSC avec la rétroaction des variables d'état complètes

Les paramètres montrés dans le tableau B-2 sont utilisés pour la conception du régulateur du TCSC avec la rétroaction des variables d'état complètes et pour la comparaison de l'effet de la commande entre les schémas de commande unifiée proposée et de commande optimale générale dans la section 4.7.2.2 et dans la section 5.3.

Tableau B-2 : Paramètres de conception du régulateur du TCSC avec rétroaction d'état complète (concernant le premier modèle de référence de IEEE)

Paramètres de TCSC	Angle d'amorçage initial α_0 (°)		Niveau de compensation initial k_{c0}	Capacitance fixe X_{cs} (p.u.)		Réactance de la branche de TCR X_t (p.u.)
	149		0.3596	0.112		0.016
Coefficients d'amortissement	D_H	D_M	D_{Ba}	D_{Bh}	D_g	D_{EX}
	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Matrices de pondération	r_{fy}		Q_{fy}	r_{fx}		Q_{fx}
	20		$\begin{bmatrix} 60 & 0 \\ 0 & 60 \end{bmatrix}$	1		$60 \bullet \mathbf{I}_{29 \times 29}$
Coefficient d'amortissement désiré D_d	60					

B.1.3.3 Comparaison entre la commande unifiée proposée de TCSC et la commande de TCSR [38]

Les paramètres montrés dans le tableau B-3 sont adoptés dans la section 5.4 pour la comparaison entre la commande unifiée proposée de TCSC et la commande de TCSR [38].

Tableau B-3 : Paramètres adoptés pour la comparaison avec la commande de TCSR
 (concernant le premier modèle de référence de IEEE)

Paramètres de TCSC	Angle d'amorçage initial α_0 (°)		Niveau de compensation initial k_{c0}	Capacitance fixe X_{cx} (p.u.)		Réactance de la branche de TCR X_t (p.u.)
	141.922		0.5	0.056		0.008
Coefficients d'amortissement	D_H	D_M	D_{Ba}	D_{Bb}	D_g	D_{EX}
	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Matrices de pondération	r			Q		
	2			$\begin{bmatrix} 14 & 0 \\ 0 & 11 \end{bmatrix}$		
Coefficient d'amortissement désiré D_d	95					

B.1.3.4 Analyse des coefficients de pondération

Les paramètres montrés dans le tableau B-4 sont adoptés dans la section 5.5 pour l'analyse des coefficients de pondération.

Tableau B-4 : Paramètres adoptés pour l'analyse des coefficients de pondération
 (concernant le premier modèle de référence de IEEE)

Paramètres de TCSC	Angle d'amorçage initial α_0 (°)		Niveau de compensation initial k_{c0}	Capacitance fixe X_{cs} (p.u.)		Réactance de la branche de TCR X_t (p.u.)
	149		0.3596	0.112		0.016
Coefficients d'amortissement	D_H	D_M	D_{Ba}	D_{Bb}	D_g	D_{EX}
	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Matrices de pondération	r			Q		
	2			$\begin{bmatrix} Q_t & 0 \\ 0 & Q_i \end{bmatrix}$		
Coefficient d'amortissement désiré D_d	60					

B.1.3.5 Analyse de la robustesse

Les paramètres montrés dans le tableau B-5 et dans le tableau B-6 sont adoptés dans la section 5.6 pour l'analyse de la robustesse.

Dans les tableaux B-5 et B-6, cas 1 correspond à la variation de la puissance mécanique P_m de 0.65 à 0.95 autour du point de conception $P_{m0} = 0.8$ (p.u.) et cas 2 correspond à la variation de la réactance générale de ligne de transmission $X_{L\Sigma}$ de 0.532 à 0.588 autour du point de conception $X_{L\Sigma0} = 0.56$.

Tableau B-5 : Paramètres adoptés pour l'évaluation de la robustesse : cas 1 — variation de P_m
 (concernant le premier modèle de référence de IEEE)

Cas 1 : Puissance mécanique au point de conception $P_{m0} = 0.8$ (p.u.) Avec variation de P_m de 0.65 à 0.95	Paramètres de TCSC	Angle d'amorçage initial	Niveau de compensation initial	Capacitance fixe	Réactance de la branche de TCR	
		α_0 (°)	k_{c0}	X_{cx} (p.u.)	X_t (p.u.)	
		149	0.3596	0.112	0.016	
Coefficients d'amortissement	D_H	D_M	D_{Ba}	D_{Bh}	D_g	
	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
Matrices de pondération	r			Q		
	2			$\begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 40 \end{bmatrix}$		
Coefficient d'amortissement désiré D_d	60					

Tableau B-6 : Paramètres adoptés pour l'évaluation de la robustesse : cas 2 — variation de $X_{L\Sigma}$
 (concernant le premier modèle de référence de IEEE)

Cas 2 : Puissance mécanique au point de conception $X_{L\Sigma 0} = 0.56$ (p.u.) Avec variation de $X_{L\Sigma}$ de 0.532 à 0.588	Paramètres de TCSC	Angle d'amorçage initial α_0 (°)	Niveau de compensation initial k_{c0}	Capacitance fixe	Réactance de la branche de TCR
		149	0.3596	X_{cx} (p.u.)	X_t (p.u.)
	Coefficients d'amortissement	D_H	D_M	D_{Ba}	D_{Bb}
		0.05	0.05	0.05	0.05
	Matrices de pondération	r			Q
		2			$\begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 40 \end{bmatrix}$
	Coefficient d'amortissement désiré D_d	60			

B.2 Réseaux basés sur le deuxième modèle de référence de IEEE [21]

Les figures B-6 et B-7 montrent respectivement le modèle décrit par le deuxième modèle de référence de IEEE et le réseau électrique basé sur le modèle et les paramètres du deuxième modèle de référence de IEEE avec un TCSC connecté à ligne 1. La plupart des paramètres des réseaux viennent de [21]. Sauf pour l'unité d'angle d'amorçage α qui est spécifiée, tous les autres paramètres sont donnés en p.u. et ils sont calculés sous une base unique.

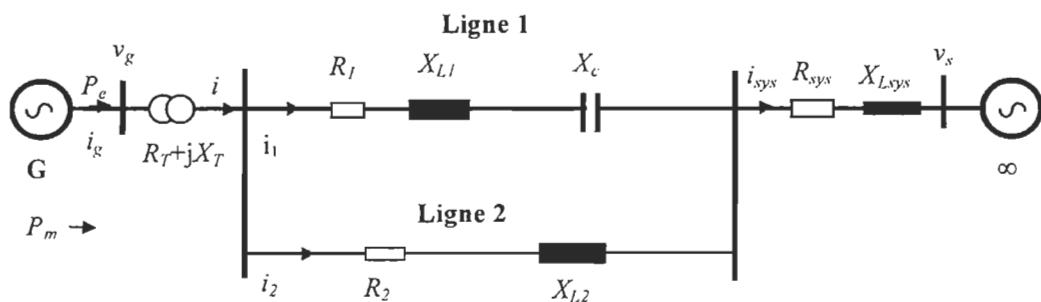


Figure B-6 : Réseau électrique décrit par le deuxième modèle de référence de IEEE

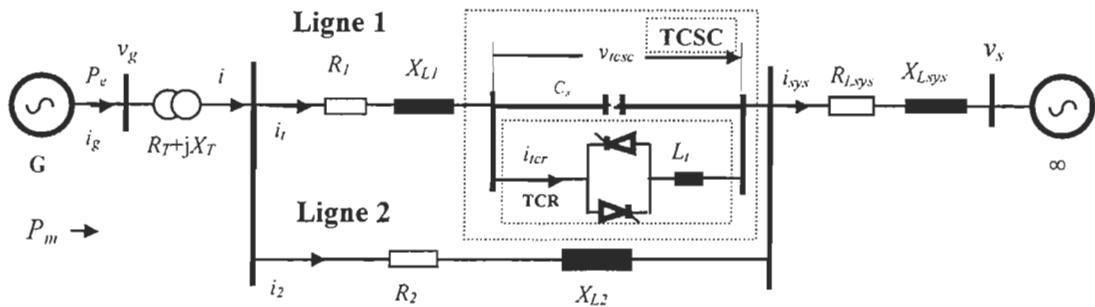


Figure B-7 : Réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE

B.2.1 Données de réseaux

Les paramètres suivants sont donnés en p.u. sous la base de l'alternateur $S_{GB} = 600 \text{ MVA}$ et $V_{GB} = 22 \text{ kV}$:

■ Inertie et rigidité des masses de torsion [21]

$$M_H = 0.4939$$

$$K_{HB} = 42.7032$$

$$M_B = 3.0748$$

$$K_{Bg} = 83.4724$$

$$M_g = 1.7436$$

$$K_{gE} = 3.7404$$

$$M_{EX} = 0.0137$$

■ Alternateur synchrone [21]

$$x_{ad} = 0.14 \quad x_d = 0.25 \quad x_d = 0.2 \quad x_q = 0.46 \quad x_q = 0.2$$

$$T_d = 4.5 \quad T_d = 0.04 \quad T_q = 0.55 \quad T_q = 0.09$$

$$x_{md} = 1.51 \quad x_d = 1.65 \quad x_F = 1.6296 \quad x_D = 1.642$$

$$x_{mq} = 1.45 \quad x_q = 1.59 \quad x_Q = 1.5238$$

$$r_F = 0.00096 \quad r_D = 0.016 \quad r_Q = 0.0116 \quad r_a = 0.0045$$

■ Système d'excitation, système des turbines à vapeur et de régulation de vitesse

Les mêmes modèles et les mêmes paramètres que ceux présentés dans la section B.1 sont adoptés pour l'analyse de la stabilité du réseau montré sur la figures B-7.

■ Transformateur et ligne de transmission [21]

Avec la base des lignes de transmission : $S_{LB} = 100$ MVA et $V_{LB} = 500$ kV , les paramètres du transformateur et des lignes de transmission sont représentés en p.u. comme :

$$R_T = 0.0002, \quad X_T = 0.02, \quad R_I = 0.0067, \quad X_{LI} = 0.0793, \quad R_2 = 0.0074, \quad X_{L2} = 0.08, \\ R_{sys} = 0.0014, \quad X_{Lsys} = 0.03$$

Pour obtenir les paramètres en p.u. sous une base unique, les données ci-dessus doivent être transférées sous la base unique. On suppose la base de l'alternateur choisie comme la base unique, i.e., $S_B = S_{GB} = 600$ MVA. Donc les paramètres de transformateur et de ligne de transmission en p.u. sont modifiés comme :

$$R_T = 0.0012, \quad X_T = 0.12, \quad R_I = 0.0402, \quad X_{LI} = 0.4434, \quad R_2 = 0.0444, \quad X_{L2} = 0.48, \\ R_{sys} = 0.0084, \quad X_{Lsys} = 0.18$$

Également, la capacité de compensation est choisie d'après le niveau de compensation k_c . Pour l'étude de la résonance hypo-synchrone, k_c peut être généralement choisi dans la plage : $0.0 < k_c < 0.8$.

■ Conditions de fonctionnement initiales

Avec la base unique, la puissance mécanique générale $P_m = 0.9$ est répartie parmi les sections de turbine à la pression haute PH et de turbine à la pression PB respectivement comme suit :

$$P_{Hm} = 0.6 \bullet P_m; \quad P_{Bm} = 0.4 \bullet P_m.$$

La puissance d'exciteur est supposée d'être zéro.

La tension aux bornes de l'alternateur $V_g = 1.05$ et le facteur de puissance $PF = 0.9$ (Retard).

B.2.2 Paramètres de TCSC et conditions de conception du régulateur de TCSC

Le tableau B-7 donne les paramètres en p.u. avec la base unique et les conditions adoptées dans la section 4.7.3 pour la conception du régulateur de TCSC et dans la section 5.2 pour l'analyse des valeurs propres pour le réseau montré sur la figure B-7.

Tableau B-7 : Paramètres de conception du régulateur du TCSC
(concernant le deuxième modèle de référence de IEEE)

Paramètres de TCSC	Angle d'amorçage initial α_0 (°)	Niveau de compensation initial k_{c0}	Capacitance fixe X_{cs} (p.u.)	Réactance de la branche de TCR X_t (p.u.)
	143	0.3787	0.048	0.006857
Coefficients d'amortissement	D_H	D_B	D_g	D_{EX}
	0.0	0.0	0.0	0.0
Matrices de pondération	r		Q	
	5		$\begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 \\ 0 & 60 & 0 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix}$	
Coefficient d'amortissement désiré D_d	100			

■ Conception du régulateur de TCSC

- la loi de commande optimale unifiée de l'angle d'amorçage du TCSC :

$$\Delta\alpha = -K_{Dn}\Delta X_{Dn}$$

avec le vecteur de coefficients de rétroaction des variables d'état locales

$$K_{Dn} = [537.6067 \ 0.3523 \ 0.1057 \ 0.0034 \ 0.7749 \ -1.7498 \ -1.7427 \ 1.5827 \ 1.8713 \ 1.8713]$$

correspondant au vecteur d'entrée du régulateur relié aux variables d'état locales

$$\Delta X_{Dn} = [\Delta\omega_g \ \Delta\delta_g \ \Delta i_d \ \Delta i_q \ \Delta i_{l-d} \ \Delta i_{l-q} \ \Delta v_{tcsc-d} \ \Delta v_{tcsc-q} \ \Delta i_{tcr-d} \ \Delta i_{tcr-q}]^T;$$

- les matrices de coefficients de pondération $Q = \begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 40 \end{bmatrix}$ et $r = 5$;

- le coefficient d'amortissement désiré $D_d = 80$.

B.3 Réseaux pour l'analyse du processus dynamique des réseaux électriques par simulation numérique

Pour permettre la simulation du processus dynamique des réseaux, deux modèles sont élaborés pour l'analyse des réseaux électriques en ajoutant quelques petites résistances dans les réseaux montrés sur la figure B-2 et sur la figure B-7. Ils sont respectivement montrés sur la figure B-8 et sur la figure B-9.

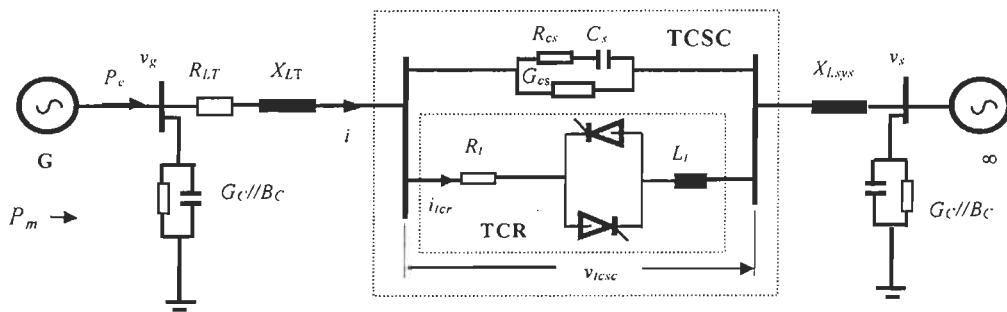


Figure B-8: Schéma de simulation du réseau électrique basé sur le premier modèle de référence de IEEE

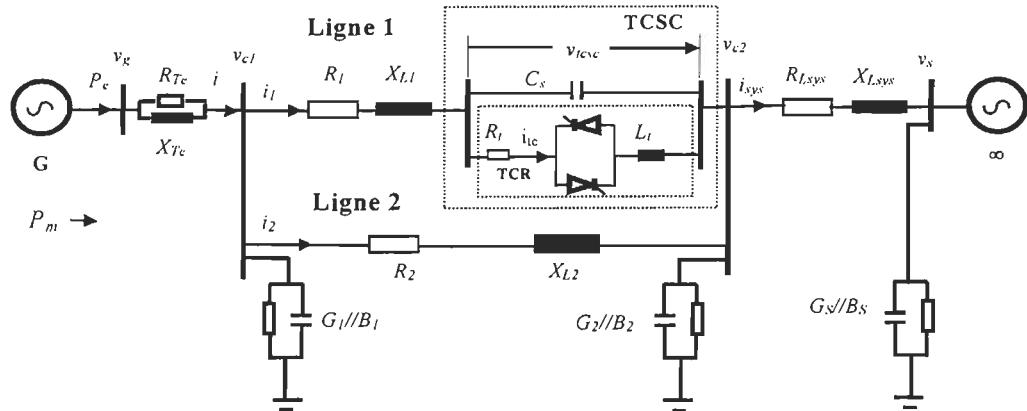


Figure B-9 : Schéma de simulation du réseau électrique basé sur le deuxième modèle de référence de IEEE

B.3.1 Réseau basé sur le modèle et les paramètres du premier modèle de référence de IEEE

Pour le modèle montré sur la figure B-8, les paramètres principaux viennent de [1] et [20]. Tous les paramètres suivants sont donnés en p.u. avec une base unique excepté l'angle d'amorçage α de TCSC dont l'unité est spécifiée. Ces paramètres sont adoptés dans la section 6.3.1 et dans la section 6.3.2 pour l'analyse par simulation numérique.

B.3.1.1 Données du réseau

$$R_T = 0.01, X_T = 0.14, R_L = 0.02, X_L = 0.5, X_{L_{sys}} = 0.06$$

$$R_{LT} = R_T + R_L = 0.03, X_{LT} = X_T + X_L = 0.64$$

$$G_C = 0.0045, B_C = 0.0035$$

Les paramètres de TCSC sont :

- pour l'exemple dans la section 6.3.1 :

$$X_{cs} = 0.056, R_{cs} = 0.00056, G_{cs} = 0.178, X_t = 0.008, R_t = 0.00008;$$

- pour l'exemple dans la section 6.3.2 :

$$X_{cs} = 0.112, R_{cs} = 0.0011, G_{cs} = 0.0893, X_t = 0.016, R_t = 1.6000e-004.$$

B.3.1.2 Conditions de fonctionnement

La puissance mécanique générale $P_m = 0.9$.

La puissance mécanique est répartie parmi les sections de turbine à vapeur PH, PM, PB_a et PB_b respectivement comme suit :

$$P_{Hm} = 0.3 \bullet P_m, P_{Mm} = 0.26 \bullet P_m, P_{Bam} = 0.22 \bullet P_m, P_{Bbm} = 0.22 \bullet P_m.$$

La puissance d'exciteur est supposée d'être zéro.

La tension aux bornes de l'alternateur $V_g = 1.05$ et le facteur de puissance $PF = 0.9$ (Retard).

Les coefficients d'amortissement inhérent de chaque section d'arbre du turboalternateur sont supposés comme suit :

$$D_H = 0.05, D_M = 0.0, D_{Ba} = 0.0, D_{Bb} = 0.0, D_g = 0.0, D_{EX} = 0.0.$$

Les autres paramètres sont :

- pour l'exemple dans la section 6.3.1 :

l'angle d'amorçage initial du TCSC $\alpha_0 = 144^\circ$ et le niveau de compensation désirée $k_{c0} = 0.3134$.

Les matrices de pondération pour la conception du régulateur du TCSC

$$r=2, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 70 \end{bmatrix}.$$

- pour l'exemple dans la section 6.3.2 :

$\alpha_0 = 149^\circ, k_{c0} = 0.3596$

$$r=2, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 40 \end{bmatrix}.$$

B.3.2 Réseau basé sur le modèle et les paramètres du deuxième modèle de référence de IEEE

Pour le modèle montré sur la figure B-9, les paramètres principaux viennent de [21]. Tous les paramètres en p.u. sont calculés sous une base unique. Les paramètres suivants sont adoptés dans la section 6.4 pour l'analyse par simulation numérique.

B.3.2.1 Données du réseau

On choisit la base de l'alternateur comme la base unique, i.e., $S_B = S_{GB} = 600 \text{ MVA}$ et $V_B = V_{GB} = 22 \text{ kV}$, donc tous les paramètres en p.u. sont calculés sous la base de l'alternateur.

$$R_I = 0.0402, X_{LI} = 0.4434, R_2 = 0.0444, X_{L2} = 0.48, R_{Lsys} = 0.0084, X_{Lsys} = 0.18$$

$$G_I = 1.2825\text{e-}004, B_I = 0.0128, G_2 = 3.5650\text{e-}004, B_2 = 0.0356,$$

$$R_t = 1.3714\text{e-}005, X_t = 0.0069, X_{cs} = 0.048$$

$R_{Te} = 12.0012$ et $X_{Te} = 0.1200$ qui sont obtenus par les relations suivantes :

$$R_{Te} = (R_T^2 + X_T^2)/R_T \text{ et } X_{Te} = (R_T^2 + X_T^2)/X_T$$

où $R_T = 0.0012$ et $X_T = 0.1200$.

B.3.2.2 Conditions de fonctionnement

La puissance mécanique générale $P_m = 0.9$ est répartie parmi les sections de turbine à vapeur PH et PB respectivement comme suit :

$$P_{Hm} = 0.6 \bullet P_m; \quad P_{Bm} = 0.4 \bullet P_m.$$

La puissance d'excitateur est supposée d'être zéro.

La tension aux bornes de l'alternateur $V_g = 1.05$.

Le facteur de puissance $PF = 0.9$ (Retard).

L'angle d'amorçage initial $\alpha_0 = 143^\circ$.

Le coefficient d'amortissement désiré $D_d = 80$.

Le niveau de compensation désirée $k_{c0} = 0.3787$.

Les coefficients d'amortissement inhérent de chaque section d'arbre du turboalternateur

$$D_H = 0.1, D_B = 0.1, D_g = 0.1, D_{EX} = 0.1.$$

Les matrices de pondération adoptées pour la conception du régulateur du TCSC avec la

rétroaction des variables de mesures locales $r = 5$, $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 40 \end{bmatrix}$.