

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**CONTRIBUTION À LA RÉOLUTION DES DÉSÉQUILIBRES DE TENSION  
SUR LES RESEAUX A CABLES DE GARDE ISOLÉS PAR L'UTILISATION DES  
COMPENSATEURS STATIQUES (STATCOM)**

THÈSE PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU

DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

ALIDOU KOUTOU

JANVIER 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (Ph. D.)

**Direction de recherche :**

---

Prof. Mamadou Lamine Doumbia

UQTR, directeur de recherche

**Jury d'évaluation**

---

Prof. Alben Cardenas

UQTR, président du jury

---

Dr. Laurent Lenoir

IREQ Hydro-Québec, évaluateur externe

---

Prof. Issouf Fofana

UQAC, évaluateur externe

Thèse soutenue le 09 01 2023

## Résumé

Les progrès de l'électrification dans le monde sont très disparates. Dans les pays développés, la totalité de la population est considérée comme ayant accès à l'électricité, ce qui n'est pas le cas en Asie du Sud et en Afrique subsaharienne surtout en milieu rural. Ne pas avoir accès à l'électricité a des conséquences directes sur la qualité de vie.

Ce déficit de couverture s'explique par l'éloignement de ces populations des sources de production, des enjeux démographiques et aussi par la faiblesse des investissements publics. D'où la nécessité de trouver des solutions adaptées à ces zones.

Les techniques conventionnelles d'électrification rurale les plus répandues deviennent moins rentables pour des localités traversées par les lignes de transport électrique haute tension si ces lignes sont exploitées. D'autres techniques axées sur l'exploitation des lignes haute tension se sont imposées.

De ces techniques, le réseau à Câble de Garde Isolés (CDGI) est celle capable de répondre à la demande en puissance tant en monophasé qu'en triphasé. Mais, l'alimentation triphasée a comme principal inconvénient le déséquilibre de tension.

Des solutions basées sur l'utilisation des composants passifs ont été proposées pour l'amélioration de la qualité de tension de ces types de réseau. Cependant, ces techniques restent moins performantes pour répondre aux différentes variations de tension.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la qualité de la tension de ces types de réseaux. Des topologies axées sur l'utilisation des Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) tels que les Dynamic Voltage Restorers (DVR), les Static Synchronous

Compensator (STATCOM) et le couplage des réseaux apportent une contribution considérable à la qualité de ces réseaux CDGI.

## Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse sont les fruits d'une bonne collaboration entre les acteurs d'électrification rurale et le monde universitaire sous la Direction du Professeur DOUMBIA Mamadou Lamine de l'Université du Québec à Trois Rivières.

Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour son accueil, son plein engagement et sa grande détermination pour l'aboutissement de ces travaux.

Je remercie également les membres évaluateurs de ma thèse Professeur Alben Cardenas de UQTR, Dr. Laurent Lenoir de l'Institut de Recherche en Électricité du Québec (IREQ) Hydro-Québec et le Professeur Issouf Fofana de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC).

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les professeurs de l'UQTR du département de génie électrique et génie informatique qui m'ont accompagné durant ce parcours.

Je tiens également à remercier tous les collègues de la Société Nationale d'électricité du Burkina, qui de près ou de loin m'ont permis d'enrichir le contenu de cette thèse.

Mes remerciements vont également à l'endroit de ma famille pour leur soutien moral, ainsi que mes amis qui m'ont aidés et encouragés.

## Table des matières

1.1	Contexte.....	1
1.2	Problématique.....	3
1.3	Objectifs de la thèse.....	4
1.4	Contribution de la thèse.....	5
1.5	Publications .....	5
1.6	Infrastructure .....	6
1.7	Méthodologie de la recherche .....	6
1.8	Structure de la thèse.....	7
	Chapitre 1 - Réseaux de transport et de distribution électrique .....	9
1.1	Introduction .....	9
1.2	Réseaux de transport et de répartition .....	10
1.3	Liaisons à haute tension continue.....	11
1.4	Réseaux de distribution .....	13
1.5	Modélisation des éléments d'un réseau de transport.....	14
1.6	Réglage de la tension.....	15
1.6.1	Cas de la ligne courte.....	15
1.6.2	Cas de la ligne avec capacité.....	18
1.7	Moyens classiques de réglage de tension .....	27
1.8	Conclusion.....	28
	Chapitre 2 - Types de réseaux issus des lignes haute tension .....	30
2.1	Introduction .....	30
2.2	Réseaux à câble de garde isolé par couplage capacitif et inductif .....	30

2.3	Réseau par couplage capacitif sur les conducteurs de phase.....	31
2.4	Réseaux à câble de garde isolé par diviseur inductif.....	32
2.5	Réseaux à câble de garde isolé et techniques de réduction du déséquilibre de tension .....	33
2.5.1	Réseaux à câble de garde isolé.....	33
2.5.2	Techniques de réduction du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI.....	36
2.6	Conclusion.....	39
Chapitre 3 - Fonctionnement et configuration des FACTS .....		40
3.1	Introduction .....	40
3.2	Différents groupes de FACTS .....	40
3.3	Principes de fonctionnement des FACTS.....	41
3.3.1	Compensation shunt.....	43
3.3.2	Compensation série.....	48
3.3.3	Compensation par déphasage.....	52
3.3.4	UPFC (Unified Power Flow Controller).....	54
3.4	Conclusion.....	56
Chapitre 4 - Structures de convertisseurs dans les STATCOM.....		57
4.1	Introduction .....	57
4.2	Convertisseurs sources de tension .....	58
4.3	Convertisseurs source de courant .....	59
4.4	Comparaison des deux sources de convertisseur.....	61
4.5	Association parallèle d'onduleurs de tension.....	61
4.6	Association série d'onduleurs de tension.....	62

4.7	Onduleurs multi-niveaux .....	63
4.7.1	Convertisseur à onduleur Clampé par le Neutre (NPC).....	63
4.7.2	Convertisseur à onduleur Clampé Activement par le Neutre (ANPC) .....	66
4.7.3	Convertisseur à onduleur Multicellulaire Série (FC).....	67
4.7.4	Convertisseur à onduleur Multicellulaire Superposé (SMC).....	70
4.8	Conclusion .....	74
Chapitre 5 - Études théoriques des onduleurs multiniveaux .....		75
5.1	Introduction .....	75
5.2	Onduleurs multiniveaux à potentiels distribués NPC (Neutral Point Clamped) .....	75
5.2.1	Onduleur à trois niveaux de tensions de type NPC.....	75
5.2.2	Onduleur à cinq niveaux de type NPC.....	80
5.2.3	Généralisation de la structure NPC à N niveaux de tension .....	83
5.3	Onduleur multiniveaux cascadié en ponts "H" .....	84
5.3.1	Onduleur à trois niveaux de type Cascade en pont H .....	84
5.3.2	Onduleur à cinq niveaux de type cascade en pont H .....	89
5.3.3	Généralisation de la structure cascade en pont H à N niveaux de tension .....	94
5.3.4	Calcul du filtre passif du STATCOM.....	95
5.3.5	Analyse de l'état d'équilibre .....	97
5.3.6	Taux de distorsion.....	99
5.3.7	Technique de commande des convertisseurs multiniveaux .....	101
5.4	Conclusion .....	102

Chapitre 6 - Compensation active de type série.....	103
6.1 Introduction .....	103
6.2 Classification des compensateurs séries actifs .....	103
6.2.1 Classification basée sur le convertisseur.....	104
6.2.2 Classification basée sur la topologie.....	105
6.2.3 Classification basée sur le système d'alimentation .....	107
6.3 Principe de fonctionnement et de contrôle des compensateurs séries.....	112
6.3.1 Principe de fonctionnement des compensateurs actifs en série .....	113
6.3.2 Contrôle des compensateurs DVR.....	114
6.4 Analyse et conception des compensateurs série DVR .....	122
6.4.1 Tension nominale du VSC des DVR .....	123
6.4.2 Courant nominal du VSC du DVR .....	123
6.4.3 Transformateur d'injection du DVR.....	124
6.4.4 Tension du condensateur CC du VSC des DVR.....	124
6.4.5 Capacité du bus à courant continu du VSC .....	125
6.4.6 Inductance d'interface pour le VSC .....	125
6.4.7 Filtre d'ondulation .....	126
6.5 Conclusion.....	126
Chapitre 7 - Validation des travaux de recherche .....	127
7.1 Réduction des baisses de tension sur un réseau CDGI par couplage de deux transformateurs de distribution .....	127
7.1.1 Couplage théorique et mathématique de deux réseaux.....	127
7.1.2 Description et fonctionnement de l'analyseur de réseau Megger MPQ1000.....	132

7.1.3	Mesures expérimentales avec l'analyseur Megger MPQ1000.....	132
7.1.4	Résultats des travaux pratiques.....	133
7.1.5	Résultats des travaux de simulation.....	136
7.1.6	Conclusion partielle sur le réseau avec couplage.....	137
7.2	Réduction du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI par STATCOM.....	138
7.2.1	STATCOM NPC.....	138
7.2.2	STATCOM pont en H.....	142
7.2.3	Conclusion partielle sur le STATCOM .....	146
7.3	Réduction du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI par les DVR 146	
7.3.1	Contrôle du DVR .....	147
7.3.2	Charge linéaire .....	147
7.3.3	Charge non linéaire .....	151
7.3.4	Conclusion partielle sur le DVR.....	156
7.4	Synthèse des résultats.....	156
7.5	Conclusion.....	158
Chapitre 8 - Conclusion générale.....		159
8.1	Résumé de la recherche .....	159
8.2	Contributions scientifiques.....	161
8.3	Contribution apportée dans des articles.....	163
8.4	Travaux futurs .....	163
ANNEXE A – Caractéristiques du réseau CDGI.....		177
ANNEXE B: Analyse mathématique d'un réseau CDGI .....		178

ANNEXE C: Travaux de simulation de l'onduleur cascade en pont H et NPC .....	182
ANNEXE D: Simulation du STATCOM NPC et réseau CDGI dans Matlab .....	188
ANNEXE E: Simulation du STATCOM H Bridge et réseau CDGI dans Matlab .....	190
ANNEXE F: Simulation DVR et réseau CDGI dans Matlab .....	192
ANNEXE G : Couplage de deux réseaux CDGI .....	194
ANNEXE H : Analyseur Megger MPQ1000 installé .....	195
ANNEXE I: Caractéristiques techniques des DVR .....	196

## Liste des tableaux

Tableau 1-1 Valeurs caractéristiques de lignes et câbles[46]. .....	18
Tableau 4-1 Réalisation des différents niveaux pour l'onduleur NPC 3N.....	65
Tableau 4-2 Réalisation des différents niveaux par l'onduleur FC 3N.....	69
Tableau 4-3 Réalisation des différents niveaux pour SMC1 x2 3NG.....	72
Tableau 5-1 État de l'onduleur NPC trois niveaux .....	79
Tableau 5-2 États possibles de l'onduleur H bridge à 5 niveaux.....	82
Tableau 5-3 État de l'onduleur cascade trois niveaux .....	88
Tableau 5-4 États possibles de l'onduleur cascade à 5 niveaux.....	92
Tableau 7-1 Synthèse des résultats de compensation .....	157

## Liste des figures

Figure 1-1 Structure des réseaux électriques modernes [24] .....	10
Figure 1-2 Ligne courte (A), schéma vectoriel (B)[24] .....	15
Figure 1-3 Caractéristique VR en fonction de Q [24].....	17
Figure 1-4 Principe d'un transformateur déphaseur [49].....	22
Figure 1-5 Limite de puissance en fonction de $\phi$ [50] .....	24
Figure 1-6 Lieux de puissance (A). Lieux de puissance avec compensation série (B) [50] .....	25
Figure 1-7 Puissance $P = f(\theta)$ avec source kI (A), lieu P-Q (B) [50].....	26
Figure 1-8 Lieu $P = f(\theta)$ (fig. A), lieu P-Q (Fig b) [51]. .....	26
Figure 2-1 Réseau par couplage capacitif sur un conducteur de phase.....	32
Figure 2-2 Réseaux à câble de garde isolé par diviseur inductif.....	33
Figure 2-3 Réseau CDGI [56].....	34
Figure 2-4 Réseau à CDGI monophasé avec retour à la terre [56]. .....	35
Figure 2-5 Réseau à CDGI monophasé avec deux câbles de garde [56].. .....	35
Figure 2-6 Réseau CDGI distribution triphasée [56]. .....	36
Figure 2-7 Méthode de réduction des asymétries par insertion d'impédance dans le circuit de retour à la terre. ....	37
Figure 2-8 Méthode de réduction des asymétries par des transformateurs de compensation spéciales .....	38
Figure 2-9 Méthodes de réduction des asymétries par insertion de réactances .....	38
Figure 3-1 Ligne électrique.....	41
Figure 3-2 Ligne électrique décomposée .....	42
Figure 3-3 Courbe de puissance en fonction de l'angle de transmission [65] .....	42
Figure 3-4 Compensation shunt d'une ligne .....	43
Figure 3-5 Courbes de puissance avec et sans compensation .....	44

Figure 3-6 Schéma du SVC.....	45
Figure 3-7 Forme d'onde du courant et tension dans un RCT [68]. .....	45
Figure 3-8 Structure du STATCOM .....	46
Figure 3-9 Courant capacitif                      Figure 3-10 Courant inductif.....	47
Figure 3-11 Caractéristique statique du STATCOM .....	48
Figure 3-12 Compensation série d'une ligne .....	48
Figure 3-13 Courbes de puissance avec et sans compensation série [71].....	49
Figure 3-14 Insertion d'un TCSC sur une ligne.....	50
Figure 3-15 Impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors [72]. .....	51
Figure 3-16 Compensateur série par onduleur .....	52
Figure 3-17 Compensation par déphasage d'une ligne .....	53
Figure 3-18 Déphaseur par thyristors (représentation pour une phase) [74]: .....	54
Figure 3-19 Schéma de principe du contrôleur universel de puissance UPFC .....	55
Figure 4-1 Schéma de principe d'un STATCOM.....	57
Figure 4-2 Schéma de principe convertisseur source de tension .....	58
Figure 4-3 Schéma de principe d'un convertisseur source de courant.....	59
Figure 4-4 Convertisseur source de courant à thyristors.....	60
Figure 4-5 Convertisseur source de courant à composante contrôlables .....	60
Figure 4-6 Association d'onduleurs en parallèle .....	62
Figure 4-7 Association d'onduleurs en série.....	62
Figure 4-8 Convertisseur à onduleur NPC 3 niveaux .....	64
Figure 4-9 Onduleur ANPC 3 niveaux.....	67
Figure 4-10 Convertisseur à onduleur FC 3 niveaux .....	68
Figure 4-11 Onduleur SMC1x2 3 niveaux.....	71
Figure 5-1 Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux .....	76

Figure 5-2 Bras d'un onduleur NPC à 3 niveaux .....	77
Figure 5-3 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux .....	78
Figure 5-4 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC trois niveaux .....	79
Figure 5-5 Schéma d'un onduleur NPC à 5 niveaux .....	81
Figure 5-6 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC 5niveaux.....	83
Figure 5-7 Schéma triphasé d'un onduleur cascade en pont H à 3 niveaux .....	85
Figure 5-8 Schéma d'une cellule d'onduleur .....	86
Figure 5-9 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en H .....	87
Figure 5-10 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type H .....	88
Figure 5-11 Schéma d'un onduleur cascade en H à 5 niveaux.....	89
Figure 5-12 Pont H 5 niveaux : Principe et exemples de mécanisme de commutation a-).....	90
Figure 5-13 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type H 5niveaux.....	93
Figure 5-14 Schéma d'un onduleur cascade en pont H à N niveaux.....	94
Figure 6-1 DVR monophasé basé sur CSC [106, 107]. .....	104
Figure 6-2 DVR monophasé basé sur VSC [108]. .....	105
Figure 6-3 Topologie en demi-point du DVR monophasé basé sur VSC [109]. .....	106
Figure 6-4 Topologie en pont complet du DVR monophasé basé sur VSC [109].....	106
Figure 6-5 DVR triphasé à trois fils [109]. .....	107
Figure 6-6 Classification des configurations de DVR pour système de distribution triphasé à trois fils[110]. .....	109
Figure 6-7 Système connecté DVR pris en charge par BESS [111]. .....	110
Figure 6-8 Système connecté DVR avec condensateur [111]. .....	111

Figure 6-9 Diagramme de phase du système DVR alimenté par condensateur pour la compensation (A) chute de tension, (B) hausse de tension, et (C) déséquilibre de tension .....	112
Figure 6-10(A) Schéma unifilaire du DVR. (B) Diagramme de phase des schémas d'injection de tension DVR [114]. .....	114
Figure 6-11 Méthode basée sur la théorie du cadre de référence synchrone (SRF) pour le contrôle du DVR alimenté par BESS [121]. .....	118
Figure 6-12 Méthode basée sur la théorie du cadre de référence synchrone (SRF) pour le contrôle du DVR autonome [123]. .....	120
Figure 7-1 Analyseur Megger MPQ1000 connecté au réseau .....	133
Figure 7-2 Courbe de charge chez un consommateur .....	134
Figure 7-3 Facteur de déséquilibre en fonction de la distance .....	135
Figure 7-4 Signal sinusoïdal chez un consommateur sans couplage réseau .....	136
Figure 7-5 Signal sinusoïdal chez un consommateur avec couplage du réseau .....	136
Figure 7-6 Courbe réseau CDGI simple ( $V_{load1}$ ) et couplé ( $V_{load2}$ ) simulé dans Matlab .....	137
Figure 7-7 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ), la tension injectée par le STACOM NPC ( $V_{inj}$ ) et la tension aux bornes du convertisseur (NPC) .....	139
Figure 7-8 Taux de distorsion harmoniques du courant de la charge .....	140
Figure 7-9 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ), la tension injectée par le STACOM NPC ( $V_{inj}$ ) et la tension aux bornes du convertisseur (VNPC) .....	141
Figure 7-10 Taux de distorsion harmoniques du courant de la charge .....	142
Figure 7-11 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ), la tension injectée par le STACOM H ( $V_{inj}$ ) et la tension aux bornes du convertisseur (VH) .....	143
Figure 7-12 Taux de distorsion harmoniques du courant de la charge .....	144
Figure 7-13 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ), la tension injectée par le STATCOM H ( $V_{inj}$ ) et la tension aux bornes du convertisseur (VH) .....	145
Figure 7-14 Taux de distorsion harmoniques du courant de la charge .....	146

Figure 7-15 Algorithme de contrôle des DVR.....	147
Figure 7-16 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ) et la tension injectée par le DVR.....	148
Figure 7-17 Taux de distorsion harmonique du courant de charge.....	149
Figure 7-18 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ) et injectée par le DVR ( $V_{inject}$ ).....	150
Figure 7-19 Taux de distorsion harmonique du courant de la charge.....	151
Figure 7-20 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ) et du DVR $V_{inject}$ . ....	152
Figure 7-21 Courant du réseau $I_{abc}$ , de la charge $I_{load}$ et du DVR $I_{inject}$ .....	153
Figure 7-22 Taux de distorsion harmoniques du courant.....	153
Figure 7-23 Tension $V_{abc}$ , de la charge $V_{load}$ , du DVR $V_{inject}$ .....	154
Figure 7-24 Courant $I_{abc}$ , $I_{load}$ et $I_{inject}$ .....	155
Figure 7-25 Taux de distorsion du courant .....	155

## **Liste des symboles**

AC : Alternating Current

ANPC: Active-Neutral-Point-Clamped

ASVC: Advanced Static Var Compensator

BT: Basse Tension

C : Capacité (F)

CDGI : Réseaux à Câble de Garde Isolé

CSERA : Compensateur Statique d'Énergie Réactive de type Avancé

DSTATCOMs: Distribution Static Compensators

DVR: Dynamic Voltage Restorers

EPLL: Enhanced Phase Lock Loop

FACTS: Flexible Alternating Current Transmission System

FC: Flying Capacitor

GTO: Gate Turn-Off Thyristor

HT : Haute Tension

HTB : Haute Tension B

HVDC: High Voltage Direct Current

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

IGCT: Integrated Gate-Commutated Thyristor

**IRPT: Instantaneous Reactive Power Theory**

**ISC: Instantaneous Symmetrical Components**

**LTC: Load Tap Changer**

**MT : Moyenne Tension**

**MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions**

**PCC: Point of Common Coupling**

**PI : Correcteur Proportionnel Intégral**

**PV : Photovoltaïque**

**NPC : Clampé Par le Neutre**

**RCT : Réactances Commandées par Thyristor**

**STATCOM: Static Synchronous Compensator**

**SSSC: Static Synchronous Series Compensator**

**SMC: Stacked Multicell Converter**

**SVG: Static Var Generator**

**SVC: Static Var Compensator**

**SRF: Synchronous Reference Frame**

**THD: Total Harmonic Distortion**

**TCSC: Thyristors Controlled Series Compensator**

**UPFC: Unified Power Flow Controller**

UPC : **Unit Power Control**

UPS: **Uninterruptible Power Supply**

UPQC: **Unified Power Quality Compensator**

VSI : **Voltage Source Inverter**

VSC : **Voltage Source Converter**



## **Introduction**

### 1.1 Contexte

Les progrès de l'électrification dans le monde sont spectaculaires. Environ 15% de la population mondiale est privée d'électricité aujourd'hui, contre 25% au début des années 2000 [1]. Il reste tout de même 1.1 milliard de personnes qui n'ont pas accès à cette forme d'énergie selon les estimations de la Banque mondiale. Ne pas avoir accès à l'électricité a des conséquences directes sur les activités économiques et le mode de vie.

Dans les pays développés, la totalité de la population est considérée comme ayant accès à l'électricité. L'Asie de l'Est et du Pacifique, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord ainsi que l'Amérique Latine ont tous atteint un taux d'électrification d'environ 97% de leur population [2]. On estime à environ 108 millions le nombre de personnes privées d'électricité dans ces régions.

Les populations qui n'ont pas accès à l'électricité vivent principalement en Asie du Sud et en Afrique subsaharienne. En Asie du Sud, l'accès à l'électricité a connu un progrès remarquable. Le taux d'accès est passé de 48 % en 1993 à 80 % en 2014. 20 % de la population reste sans accès à l'électricité, soit trois cent quarante-trois millions de personnes (dont deux cent soixante-dix millions en Inde) [3]. L'Afrique subsaharienne est la région du monde la moins électrifiée même si le taux d'accès a presque doublé, passant de 21 % à 37 % sur la même période. Cette hausse n'a pas empêché le nombre total de personnes non raccordées au réseau électrique d'augmenter de cinq cent à six cent million entre 2000 et 2014. Au total, 60 % de la population mondiale non raccordée à l'électricité vit en Afrique [4].

Une partie du monde, principalement rurale, demeure à l'écart du progrès sur l'électricité. D'abord du fait de l'éloignement de ces populations des sources de production: le coût de l'électrification est beaucoup plus élevé dans les campagnes. Ensuite du fait des enjeux démographiques. La population de ces régions croît à un rythme très rapide que la production d'énergie a du mal à suivre [5]. Enfin, en raison de la faiblesse des investissements publics. Une partie des gouvernements des pays en développement sont peu soucieux d'élargir à tous l'accès à l'électricité une fois les couches aisées raccordées [3].

D'où la nécessité de trouver des solutions adaptées à chaque zone [6]. Le solaire photovoltaïque (PV), l'éolien, le micro hydroélectricité, la biomasse, la génératrice diesel, les productions hybrides sont les solutions les plus répandues [7-9].

Si cette variété de technologie permet de faire un choix technique et économique pour l'électrification de certaines localités, elles sont moins rentables pour des localités traversées par les lignes de transport électrique haute tension (HT) [10]. D'où la mise en œuvre des technologies en exploitant les lignes de transport haute tension [11, 12]. L'alimentation par couplage capacitif, l'alimentation par couplage par connexion sur un câble de garde isolé de ligne HT et les réseaux à câble de garde isolé (CDGI) sont les techniques qui regroupent cette dernière famille [13] [14].

De ces techniques, l'alimentation par câble de garde est celle qui est en mesure de fournir une puissance assez considérable en monophasé ou triphasé [15].

Mais l'alimentation triphasée a comme principal inconvénient le déséquilibre de tension lors des différentes variations liées au fonctionnement du réseau [16] [17]. Ces différents déséquilibres ont comme conséquence la destruction des appareils électriques.

## 1.2 Problématique

La démarche d'électrification des zones rurales se caractérise par un ensemble de contraintes qui se résument à la faible densité de la population, à la faible demande d'énergie et aux revenus modestes des utilisateurs [18].

Comment concilier la réalité économique avec la faiblesse des revenus de ces zones rurales et une faible densité de population [19].

L'exploitation des lignes de transport haute tension avec la technique de raccordement par câble de garde isolé en monophasé ou triphasé répond à ces contraintes.

Le réseau à câble de garde isolé (CDGI) est une technique qui consiste à isoler les câbles de garde des lignes haute tension au moyen d'isolateurs de suspension et alimenter ces câbles avec une moyenne tension (MT) de l'ordre de 20-34.5 kV depuis la station de transformation HT/MT. Ainsi, on peut alimenter plusieurs localités situées le long de la ligne HT en raccordant les transformateurs moyenne tension/basse tension (MT/BT) au point de consommation. Pour un réseau HT à un seul câble de garde, on fournira une basse tension monophasée de distribution et pour un réseau HT équipé de deux câbles de garde on obtiendra en plus de la tension monophasée une tension triphasée.

Mais l'option triphasée est source de déséquilibre d'amplitude de tension pouvant atteindre des valeurs inadmissibles pour les équipements [20]. Ces déséquilibres sont dus aux facteurs suivants :

- En régime permanent, le câble de garde est soumis à des tensions induites à partir de la ligne HT (par couplage capacitif et magnétique) qui se superposent à la chute de tension due à la circulation de la puissance dans le câble de garde ;

- Les courants de court-circuit dissymétriques de la ligne HT peuvent induire des surtensions relativement importantes dans le câble de garde. Ces courants de court-circuit doivent être maintenus dans les limites acceptables ;
- Les électrodes de mise à la terre sont souvent source d'instabilités thermiques provoquées par la température du sol, donc une variation de l'impédance de la phase reliée à l'électrode. En effet, l'une des principales difficultés que présente le retour du courant par la terre est d'empêcher la terre de se dessécher au voisinage des électrodes, car cela risque de conduire à une augmentation incontrôlée de la résistance [21].
- La consommation d'énergie réactive par les clients industriels provoque des chutes de tensions dans le réseau de transport. Aussi les réseaux eux-mêmes contribuent à une fourniture ou absorption d'énergie réactive.

La résolution de ces déséquilibres a toujours été réalisée par les composants passifs (condensateur et inductance) à commande mécanique et par des transformateurs à prises variables [20]. Bien que ces éléments résolvent les déséquilibres de tension, ils ont comme limite l'incapacité de réaliser des corrections des valeurs de tensions à l'apparition des différents phénomènes énumérés ci-dessus inhérents au fonctionnement du réseau [22].

### 1.3 Objectifs de la thèse

En se basant sur les problématiques de l'exploitation des réseaux CDGI présentées dans le paragraphe ci-dessus et afin de contribuer à l'amélioration des paramètres de ces types de réseaux, nous présentons les objectifs scientifiques visés de cette thèse. Il s'agit de la résolution des déséquilibres de tension sur les réseaux à câble de garde isolé triphasé par l'utilisation des Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) tels que les

Dynamic Voltage Restorers (DVR), les Static Synchronous Compensator (STATCOM) et par couplage des réseaux. Pour atteindre cet objectif principal, les objectifs spécifiques ci-dessous ont été proposés:

- ❖ Évaluer l'efficacité théorique et par simulation du STATCOM pont H sur la résolution du déséquilibre de tension des réseaux CDGI.
- ❖ Évaluer l'efficacité du STATCOM NPC sur la résolution du déséquilibre de tension des réseaux CDGI.
- ❖ Évaluer l'efficacité du couplage de deux réseaux de distribution basse tension sur la résolution du déséquilibre de tension des réseaux CDGI.
- ❖ Évaluer l'efficacité du DVR sur la résolution du déséquilibre de tension des réseaux CDGI.

#### 1.4 Contribution de la thèse

Nous proposons des nouvelles méthodologies de résolution du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI par :

- Couplage de deux transformateurs de distribution basse tension
- Insertion d'un STATCOM dans le réseau
- Insertion d'un restaurateur de tension dynamique (DVR).

#### 1.5 Publications

1 Alidou KOUTOU, Mamadou Lamine DOUMBIA "Investigation of Grounding Electrode Impedance Variation on the Voltage and Phase Angle of Three Phase Shield Wire" (2016 CIGRÉ Canada Conference- Paper 756).

2. A. Koutou, M.L. Doumbia Three Phase Shield Wire Schemes Unbalance and Voltage Fluctuation Reduction Using H-Bridge Cascaded Static Synchronous Compensator (STATCOM). J Electr Electron Syst 5: 187. doi:10.4172/2332-0796.1000187, 2016.

3. Alidou KOUTOU, Mamadou Lamine DOUMBIA "Mitigation of Voltage Unbalance in Three Phase Shield Wire Schemes by coupling the transformers"(CRESD 2020: International Conference on Rural Electrification for Sustainable Development-Prague, Czechia July 9 - 10, 2020)

4. Alidou KOUTOU; Mamadou Lamine DOUMBIA " Mitigation of voltage unbalance in Three Phase Shield Wire Schemes by dynamic voltage restorers" (A soumettre)

## 1.6 Infrastructure

Le laboratoire de conversion d'énergie électrique et qualité de l'onde (CEEQO) et le laboratoire de recherche en électronique de puissance (LREP) ont été les lieux pour la réalisation de ce travail.

La partie expérimentale s'est réalisée sur le réseau de distribution publique au Burkina Faso.

## 1.7 Méthodologie de la recherche

Ce rapport de thèse se compose de plusieurs parties résumées comme suit :

- ✓ L'état de l'art sur les réseaux CDGI et les différentes techniques de résolution des déséquilibres de tension.

- ✓ L'étude sur les différents types de FACTS, leur modélisation et le fonctionnement des différents onduleurs utilisés.

- ✓ Le dimensionnement, modélisation et commande classique des systèmes FACTS (STATCOM et DVR).
- ✓ La synthèse et la simulation des STATCOM et DVR.
- ✓ Le raccordement du réseau CDGI avec le STATCOM et le DVR pour assurer le maintien de la qualité de la tension.
- ✓ La réalisation expérimentale sur le réseau de distribution public CDGI.
- ✓ La rédaction d'article avec le rapport final de doctorat

### 1.8 Structure de la thèse

La thèse se divise en huit (8) chapitres. Le chapitre un (1) présente les réseaux de transport et de distribution électriques. Il constitue une introduction générale à l'exploitation des réseaux électriques, décrit succinctement la structure et les modes de réglage des réseaux électriques.

Le chapitre deux (2) fait un tour d'horizon sur les réseaux issus des lignes électriques haute tension et plus particulièrement l'état de l'art des réseaux CDGI et les différentes techniques de réduction du déséquilibre de tension.

Le chapitre trois (3) présente le fonctionnement et la configuration des FACTS.

Les chapitres quatre (4) et cinq (5) présentent les différentes sources de convertisseurs dans les STATCOM et une étude théorique des onduleurs respectivement.

Le chapitre six (6) traite de la compensation active de type série.

Le chapitre sept (7) présente les résultats obtenus en simulation avec l'utilisation du DVR, du STACOM et l'expérimentation par couplage du réseau de distribution pour la réduction du déséquilibre de tension, puis par simulation.

Enfin le chapitre huit (8) résume le travail de la thèse et présente les perspectives futures en recherche dans le domaine des réseaux CDGI.

## Chapitre 1 - Réseaux de transport et de distribution électrique

### 1.1 Introduction

En rappel, l'énergie électrique est transportée et distribuée par des lignes aériennes et des câbles souterrains ou sous-marins du point de sa production vers celui de son utilisation, constituant ce qui est appelé un réseau électrique [23]. Ces réseaux fonctionnent en courant alternatif à la fréquence de 50Hz en Europe, 60Hz aux États-Unis et en Amérique du Nord. A l'aide des transformateurs on peut ainsi choisir le niveau de tension le plus approprié techniquement et économiquement à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'énergie électrique [24]. En outre, la maîtrise des court-circuit et la coupure des courants en cas de défaut sont nettement plus aisées à réaliser en courant alternatif qu'en courant continu [25]. Les réseaux électriques modernes en courant alternatif sont organisés en deux types. D'une part, les réseaux de transport et de répartition à tensions élevées (> 30 kV et jusqu' à 380 kV en Europe) et à structure maillée. D'autre part, les réseaux de distribution à tensions typiquement inférieures à 30 kV et à structure radiale comme illustré sur la Figure 1-1

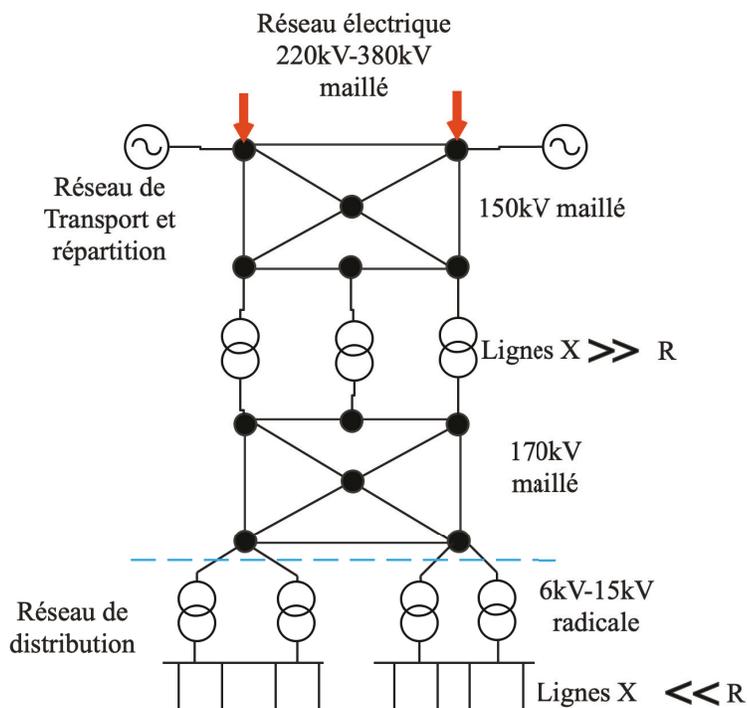


Figure 1-1 Structure des réseaux électriques modernes [24]

Cette figure reprend des valeurs typiques de tensions communément utilisées et donne les valeurs normalisées pour la définition de la haute et de la basse tension.

## 1.2 Réseaux de transport et de répartition

Les réseaux de transport et de répartition sont alimentés par des générateurs de grande puissance (ordre de grandeur 1 000 MW) dont la puissance nominale et la localisation ont fait l'objet d'une planification centralisée et dont la production est coordonnée de manière centralisée sur des zones très étendues [26]. Cette production dite centralisée participe aux contrôles de la fréquence et de la tension nécessaires pour assurer un fonctionnement stable du réseau. Ces réseaux maillés accueillent l'essentiel de la production mais un faible nombre de clients directement raccordés en haute tension. Les chutes de tension dans ces réseaux sont liées à la circulation de la puissance réactive et la philosophie adoptée est de

maintenir un niveau de tension le plus élevé possible pour limiter les pertes en lignes, tout en préservant une bonne tenue des équipements [27]. Le réglage de la tension met en œuvre des dispositifs de compensation de la puissance réactive, le plus près possible des zones où cette puissance est appelée et l'ajustement de l'amplitude de la tension par les générateurs et des transformateurs réglables [28]. Le maintien de la tension dans les réseaux de transport est lié à la puissance réactive alors que le maintien de la fréquence est un problème qui implique l'équilibre entre production et consommation sur l'ensemble du réseau interconnecté [29].

### 1.3 Liaisons à haute tension continue

Les liaisons à haute tension continue (HVDC pour high voltage direct current) mettent en œuvre des systèmes de conversion courant alternatif/courant continu à semi-conducteurs [30]. Ces liaisons sont réapparues depuis une quarantaine d'années initialement avec des convertisseurs à vapeur de mercure avant l'utilisation des semi-conducteurs sous forme de thyristors jusqu'à récemment.

Les liaisons à courant continu s'imposent économiquement par rapport aux liaisons en courant alternatif dès que la distance dépasse 800 à 1 000 km en aérien et de l'ordre de 50 km en souterrain ou sous-marin [31]. Elles s'imposent aussi techniquement pour assurer des liaisons à distance nulle (dos à dos ou back to back) entre réseaux à fréquences différentes ou à modes de réglages différents. Ces liaisons dos à dos sont aussi utilisées pour pallier l'impossibilité d'établir sur un très grand territoire un réseau synchrone à courant alternatif d'un seul tenant en séparant ce réseau en parties synchrones raccordées par de telles liaisons. C'est le cas de l'Amérique du Nord où le réseau est organisé en quatre systèmes synchrones

(Côte Ouest, Centre et Côte Est, Québec, Texas) reliés par 12 liaisons HVDC dos à dos, dont la première a été installée en 1972 pour relier le Québec au Nouveau Brunswick.

Actuellement, se développe une nouvelle génération de liaisons à haute tension continue de l'ordre de 100 kV, utilisant des convertisseurs électroniques de type source de tension (VSC pour Voltage Source Converter) à modulation de largeur d'impulsions (MLI), mettant en œuvre des composants contrôlables tant à la conduction qu'à la coupure (GTO, IGBT, IGCT). Ce nouveau type de liaison permet déjà des applications pour des puissances de plusieurs centaines de MW [32].

Ces nouveaux convertisseurs présentent de nombreux avantages par rapport aux convertisseurs traditionnels à thyristors et commutation par le réseau. Ils ne requièrent en effet pas d'installation de coûteux filtres d'harmoniques, ni de source d'énergie réactive, ni d'échange d'information entre les deux extrémités de la liaison permettant ainsi de générer des tensions à fréquence déterminée et d'amplitude et de phase réglables. Ils constituent de véritables sources statiques capables de fournir ou d'absorber tant de la puissance active que de la puissance réactive. Ces nouvelles liaisons sont particulièrement indiquées pour les applications suivantes [33]:

- Liaisons entre petites unités dispersées (éoliennes, centrales au fil de l'eau) et liaison de l'ensemble de ces unités au réseau principal;
- Alimentation d'agglomération à extension rapide;
- Alimentation d'utilisateurs éloignés du réseau principal;
- Alimentation par liaison continue de zones sans générateurs.

#### 1.4 Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution fonctionnent à des tensions inférieures à 30 kV et présentent des structures radiales alimentées par un nombre restreint de postes à partir du réseau de transport et de répartition [34]. Ils alimentent l'essentiel des consommateurs. Les chutes de tension y sont dues à la circulation de la puissance active (liaisons à  $R \gg X$ ) et la compensation de la puissance réactive est principalement réalisée au niveau des consommateurs, incités par la tarification [35].

Il existe souvent des possibilités d'alimentation alternative pour pallier les défaillances et indisponibilités d'ouvrages, notamment par un second transformateur en parallèle avec reprise au vol pour alimenter une partie du réseau de distribution par un autre poste HT [36]. Les réseaux de distribution constituent des circuits électriques unidirectionnels dans lesquels les flux de puissance active et réactive s'écoulent des hautes vers les basses tensions à partir du réseau de transport. Ces flux ainsi que les tensions sont déterminés essentiellement par les charges. Les systèmes de protection et de réglage de la tension sont basés sur le caractère unidirectionnel de l'échange d'énergie. En outre, dans ces réseaux il est impératif de maintenir la tension proche d'une valeur contractuelle qui garantit une utilisation optimale des appareils alimentés [37].

Les structures et les modes de réglage des réseaux de transport et de distribution étant donc très différents, un découplage est nécessaire entre ces réseaux pour résoudre les problèmes indépendamment [38]. Ce découplage est réalisé à l'aide de transformateurs MT/BT munis de prises réglables à vide ou en charge qui selon les besoins modifient leur rapport de transformation à moyen ou à court terme afin de ne pas transmettre des fluctuations de tension du réseau de transport vers le réseau de distribution et de maintenir le plan de

tension de ce dernier. Le réglage en charge s'effectue automatiquement avec une temporisation de l'ordre de la minute. Deux types de régulateurs sont actuellement utilisés, l'un à consigne fixe et l'autre à consigne variable du courant. Les postes sources sont en outre équipés de batteries de condensateurs pour compenser la puissance réactive consommée par les réseaux de distribution, et éviter que cette puissance soit fournie par les réseaux de transport et de répartition [39].

### 1.5 Modélisation des éléments d'un réseau de transport

En considérant un fonctionnement du réseau en régime triphasé équilibré normal, un schéma monophasé sera utilisé et sera modélisé par les éléments suivants [40]:

- Les lignes seront représentées par un schéma en pi équivalent (quadripôle) à constantes concentrées qui se réduira, lorsque les capacités seront négligées à un simple dipôle résistance-réactance (R-X) série, voire X seule ;
- Les transformateurs seront modélisés par leur seule inductance de court-circuit ;
- Les conditions aux accès (imposées par les charges et générateurs) seront représentées par des puissances actives et réactives ;
- L'utilisation de grandeurs réduites (pu) simplifiera encore le calcul.

Pour la résolution d'une telle représentation, l'ensemble des charges (y compris les pertes) doit être équilibré par l'ensemble des productions [41].

Dans le cas contraire, l'état de régime n'est pas maintenu et il y aura une variation de fréquence et/ou de tension se terminant soit par une perte de synchronisme (perte de stabilité angulaire), soit par un effondrement de tension (perte de stabilité de tension). Ce calcul

permet aussi de mettre en évidence dans un cas simple le concept de boucle de puissance [42].

### 1.6 Réglage de la tension

Le découplage des réglages P-f et Q-V permet de les étudier séparément et de traiter les problèmes spécifiques de manière relativement indépendante et de se limiter par exemple à l'étude du réglage de la tension [43].

#### 1.6.1 Cas de la ligne courte

Dans le cas de lignes de faible longueur (quelques dizaines de kilomètres), on peut raisonnablement prendre le modèle du dipôle Figure 1-2 A d'impédance  $Z = R + jX$ . En notant les tensions de phase respectivement côté charge et source,  $\underline{V}_R$  et  $\underline{V}_S$ , on arrive au diagramme vectoriel Figure 1-2 B repère avec la tension  $\underline{V}_R$  comme origine des phases pour un courant déphasé d'un angle  $\phi$ [44].

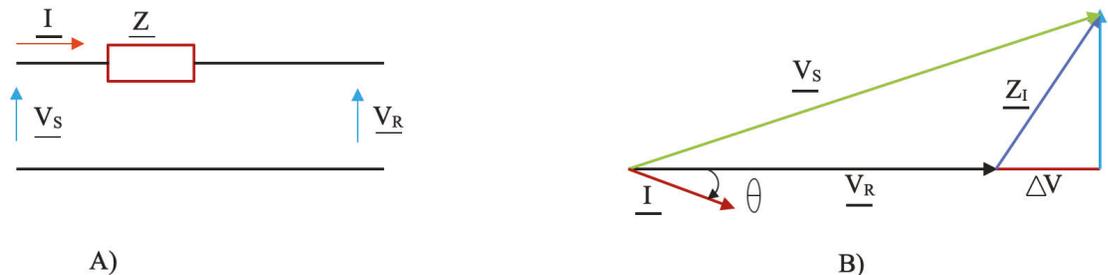


Figure 1-2 Ligne courte (A), schéma vectoriel (B)[24]

La chute de tension complexe  $\underline{\Delta V}$  se compose de deux parties : une composante longitudinale  $\underline{\Delta V}$ , projection de la chute de tension sur  $\underline{V}_R$  et assimilée à la différence des modules des tensions et une composante en quadrature  $\delta V$  assimilée au déphasage entre les deux tensions  $\underline{V}_R$  et  $\underline{V}_S$ .

La chute de tension peut donc s'écrire :

$$\Delta V = RI\cos\varphi + XI\sin\varphi \text{ et } \delta V = XI\cos\varphi - RI\sin\varphi \quad (1-1)$$

En prenant en compte les puissances active P et réactive Q (par phase) côté récepteur on a :

$$\Delta V = \frac{RP+XQ}{V_R} \quad (1-2)$$

$$\delta V = \frac{XP-RQ}{V_R} \quad (1-3)$$

où, si  $R \ll X$  cas de la ligne de transport, finalement à:

$$\Delta V \cong \frac{XQ}{V_R} \quad (1-4)$$

$$\delta V \cong \frac{XP}{V_R} \quad (1-5)$$

On voit ainsi que pour limiter les chutes de tension, il ne faut pas transporter de puissance réactive. On retrouve la formule simplifiée du déphasage montrant la liaison entre transport de puissance active et déphasage.

La minimisation du transport d'énergie réactive diminue également les pertes par effet Joule données par  $3R(P^2 + Q^2)/V_R^2$  tout transit de puissance réactive limite les possibilités de transit actif pour un même échauffement des conducteurs.

On peut appliquer le même raisonnement dans le cas d'un réseau vu d'un jeu de barre et modélisé par un équivalent de Thévenin. Dans ce cas, la réactance de Thévenin est en grandeur réduite. L'inverse de la puissance de court-circuit  $S_{cc}$  au nœud considéré et  $V_S$  est la tension à vide (de Thévenin) au nœud considéré. En situation normale, le rapport  $V_S/V_R$

est voisin de l'unité et la variation relative de la tension  $\frac{\Delta V}{V_R} \cong \frac{xQ}{V_S^2} = Q/S_{CC}$  et la caractéristique de la tension de charge est donnée en grandeur réduite par [45]:

$$V_R \cong V_S \left(1 - \frac{Q}{S_{CC}}\right) \quad (1-6)$$

La caractéristique obtenue est illustrée sur la Figure 1-3

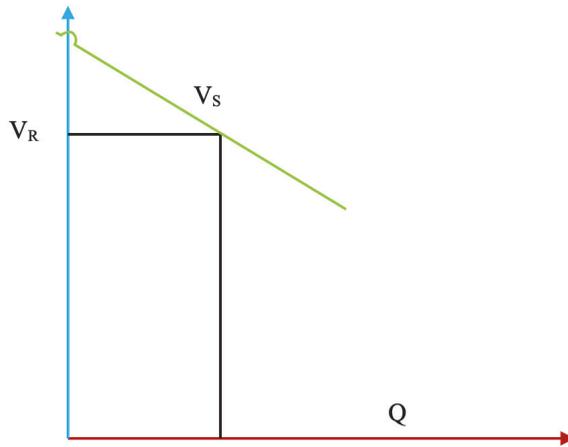


Figure 1-3 Caractéristique VR en fonction de Q [24]

On en déduit une première méthode de réglage de la tension, par injection de puissance réactive au niveau de la charge.

On voit aussi que l'existence d'une relation de la forme  $V = f(P, Q)$  implique que la variation de tension :

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP + \frac{\partial V}{\partial Q} dQ \quad (1-7)$$

est déterminée par des coefficients de sensibilité en ce point et en particulier ce sera surtout le coefficient  $\partial v/\partial Q$  qui renseignera sur l'importance de l'injection de puissance réactive à mettre en œuvre pour provoquer une variation de la tension. Ce coefficient s'exprime  $MVA_r/kV$  dimension d'un courant et la caractéristique de charge précédente

montre en effet que  $\frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{S_{cc}}{V_S} = I_{cc}$  courant de court-circuit triphasé au point considéré. Le réglage de la tension par la puissance réactive en un point présente d'autant moins d'intérêt que le courant de court-circuit y est élevé ou la puissance de court-circuit importante puisque la puissance réactive à injecter sera importante.

### 1.6.2 Cas de la ligne avec capacité

Outre les chutes de tension provoquées dans le réseau de transport par la consommation d'énergie réactive des clients industriels, les réseaux eux-mêmes contribuent à une fourniture ou absorption d'énergie réactive. Ce sera notamment le cas de lignes aériennes longues ou de câbles souterrains. Dans ces cas, on ne pourra plus négliger l'effet des capacités propres de ces liaisons [46].

A titre d'ordre de grandeur, le Tableau 1-1 donne quelques valeurs pour divers cas de ligne aérienne et de câble bien que dans le cas des câbles, les conditions de pose puissent influencer ces chiffres

Tableau 1-1 Valeurs caractéristiques de lignes et câbles[46].

	Puissance	Pertes	Capacité	Puissance réactive produite
Ligne aérienne 150kV/621mm <sup>2</sup> 1 070 A	280 MVA	222 kW/km	9 nF/km	0,063 MVar/km

Câble 150 kV 1 000 mm <sup>2</sup> 913 A	240 MVA	91 kW/km	200 nF/km	1,40 MVAr/km
Ligne aérienne : 400 kV 2*621 mm <sup>2</sup> 2 070 A	1 410 MVA	440 kW/km	10 nF/km	0,665 MVAr/km
Câble:400 kV 1 000 mm <sup>2</sup> 870 A	575 MVA	95 kW/km	200 nF/km	10 MVAr/km

On peut constater qu'il existe une longueur critique de câble pour laquelle toute la puissance transportée est en fait due à la capacité du câble : en effet  $I = \omega CV$  et pour une longueur suffisante la capacité est telle que le courant atteint la limite thermique. Cette limite est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. Réaliser des liaisons souterraines sur de grandes distances n'est donc pas physiquement possible.

Considérons le cas d'une ligne idéale à constantes réparties sans perte et de longueur  $L$  placée entre deux sources de tension  $V_S$  et  $V_R$  déphasées d'un angle  $\theta$ . En notant  $l$  l'inductance linéique et  $c$  la capacité linéique, on définit l'impédance caractéristique par  $Z_o = \sqrt{l/c}$  (ordre de grandeur : quelques centaines d'ohms en ligne aérienne, quelques dizaines en câble souterrain) et la constante de phase  $\beta = \omega \sqrt{lc}$  (ordre de grandeur :

$10^{-3}$  rad/km). Dans ces conditions, on montre que la puissance active transportée en R est donnée par [47] :

$$P = \frac{V_S V_R \sin \theta}{Z_0 \sin(\beta L)} \quad (1-8)$$

La puissance réactive en R est :

$$Q = \frac{V_R (V_S \cos \theta - V_R \cos(\beta L))}{Z_0 \sin(\beta L)} \quad (1-9)$$

Si la ligne est électriquement courte, on peut assimiler le sinus de  $\beta L$  à l'angle et il vient alors la relation bien connue :

$$P = \frac{V_S V_R \sin \theta}{X} \quad (1-10)$$

avec  $X = \omega IL$ , réactance totale de la ligne.

De même :

$$Q = \frac{V_S V_R \cos \theta - V_R^2}{X} = \frac{V_R (V_S \cos \theta - V_R)}{X} \quad (1-11)$$

Ces relations montrent que la circulation de puissance active dépend du déphasage entre les tensions à chaque extrémité de la ligne. La limite est atteinte pour un déphasage de  $90^\circ$ . Il est connu que cet angle correspond aussi à la limite de stabilité statique des alternateurs aux extrémités. On voit aussi que la puissance réactive transportée est liée à la différence des modules des tensions aux extrémités et que à tensions constantes la puissance active ne peut être contrôlée par  $\theta$  sans aussi modifier la puissance réactive aux extrémités.

Si les tensions aux extrémités de la ligne ont le même module, on obtient encore dans le cas général:

$$P = \frac{V_S^2 \sin \theta}{Z_0 \sin(\beta L)} = \frac{P_0 \sin \theta}{\sin(\beta L)} \quad (1-12)$$

en notant  $P_0 = V_S^2 / Z_0$  la puissance naturelle ou puissance caractéristique de la ligne avec  $Z_0$  impédance caractéristique. Physiquement, on peut dire que la puissance naturelle correspond à un transport de puissance active sous  $\cos \theta = 1$ . Il y a un simple déphasage entre la source et la charge.

Toute puissance transportée supérieure à cette puissance (cas de lignes aériennes sous fortes charges) correspond à une consommation de puissance réactive par la ligne. Toute puissance inférieure (cas des câbles souterrains à tout régime : la limite thermique est toujours inférieure à cette puissance naturelle) correspond à une production d'énergie réactive par la ligne [48].

On voit donc que la puissance limite sera d'autant plus élevée que la longueur électrique de la ligne sera faible. On sera encore limité dans ce cas par des considérations d'échauffement. Pour une longueur  $L$  égale à 1 500 km, on retrouve la ligne dite quart d'onde ( $\sin \beta L = 1$ ) et l'on voit que la puissance limite est alors la puissance naturelle.

Ces simples considérations montrent les éléments sur lesquels on peut agir pour ajuster la puissance active transportée en :

Augmentant la tension ;

Réduisant la longueur électrique de la ligne par diminution de l'inductance ;

-modifiant l'angle de déphasage entre les tensions aux extrémités.

La compensation de la longueur électrique par condensateurs en série a été utilisée depuis longtemps sur des longues lignes THT [49]. On appelle  $k$  degré de compensation série, le

rapport de la réactance capacitive série à la réactance de la ligne  $X_c/X$ . Il est limité en général à -40 % pour éviter des phénomènes de résonance hypo synchrone. La résonance hypo synchrone est 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.

Dans le cas de la ligne sans perte avec tensions identiques en module aux extrémités, on montre que la puissance active est donnée par :

$$P = \frac{V^2 \sin \theta}{(1-k)X} \quad (1-13)$$

et la puissance réactive fournie par le condensateur série est :

$$Q_c = \frac{2V^2 k(1-\cos \theta)}{X(1-K)^2} \quad (1-14)$$

La modification du déphasage se fait par transformateur déphaseur (avec insertion d'une tension en quadrature avec la tension locale, Figure 1-4, par un transformateur série).

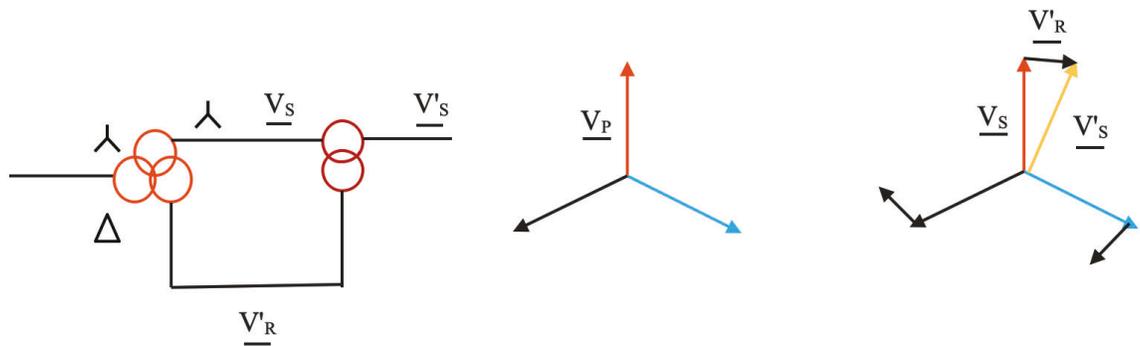


Figure 1-4 Principe d'un transformateur déphaseur [49].

Dans ce cas, si le déphasage total est réduit d'un angle  $\sigma$ , la puissance devient :

$$S = \frac{4V^2}{X \sin \frac{\theta-\delta}{2} \sin \frac{\sigma}{2}} \quad (1-15)$$

Enfin, l'introduction d'une source idéale de puissance réactive par exemple au milieu de la ligne maintient la tension au même module qu'aux extrémités. Il permet en fait de considérer deux lignes indépendantes de réactance  $X/2$  et la puissance est alors donnée par :

$$P_s = \frac{2V^2}{X \sin \frac{\theta}{2}} \quad (1-16)$$

doublant la puissance maximale transmissible. La puissance réactive fournie par cette source est donnée par :

$$Q_s = \frac{4V^2}{X(1-\cos\theta)} \quad (1-17)$$

soit 4 fois la puissance réactive aux extrémités de la ligne sans compensation.

En reprenant les équations du quadripôle équivalent de la ligne sans perte en régime sinusoïdal :

$$V_S = V_R \cos(\beta L) + jZ_0 I_R \sin(\beta L) \quad (1-18)$$

$$Z_0 I_S = jV_R \sin(\beta L) + Z_0 I_R \cos(\beta L) \quad (1-19)$$

et en normalisant par la puissance naturelle et la tension  $V_S$ , on peut arriver à la relation suivante :

$$V_R^4 \cos^2(\beta L) + V_R^2 (P_R \sin(4\beta L) \tan\varphi - 1) + \frac{\sin^2(\beta L) - P_R^2}{\cos^2(\varphi)} = 0 \quad (1-20)$$

qui permet de tracer  $V_R$  en fonction de  $P$  pour différents facteurs de puissance et pour une longueur donnée ( Figure 1-5). Outre l'existence d'une limite de puissance transmissible, on constate deux valeurs possibles de la tension pour toute puissance transitée ; seule la valeur supérieure est stable.

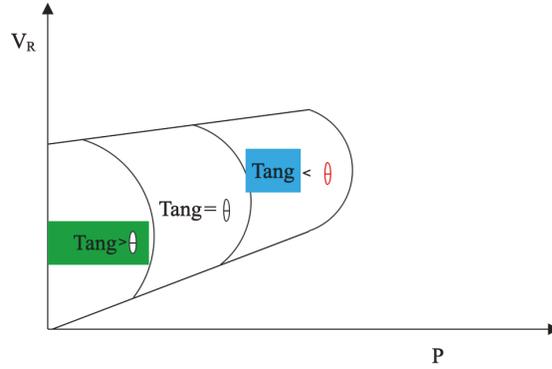


Figure 1-5 Limite de puissance en fonction de  $\phi$  [50]

Si la résistance de la ligne est considérée, cette dernière peut être modélisée par un schéma en  $\pi$  nominal. Les paramètres transversaux sont représentés par une capacité concentrée  $C$  et l'impédance longitudinale totale  $\underline{Z}=Ze^{j\psi}$  entre les deux sources déphasées de  $\theta$ . La puissance active maximale est cette fois atteinte pour un déphasage  $\theta = \psi$ , inférieur à  $90^\circ$ , selon la partie réelle des relations suivantes [50] :

$$\underline{S}_S = \frac{V_S^2}{Z} e^{j\psi} - \frac{V_S V_R}{Z} e^{j(\psi-\theta)} \quad (1-21)$$

$$\underline{S}_R = \frac{V_R V_S}{Z} e^{j(\psi+\theta)} - \frac{V_R^2}{Z} e^{j\psi} \quad (1-22)$$

Les lieux correspondent dans un plan P-Q à deux cercles centrés respectivement en  $\frac{V_S^2}{Z}$  et  $\frac{V_R^2}{Z}$  et de rayon  $V_R V_S / Z$ . La modification de l'impédance longitudinale (compensation série) revient donc à augmenter les rayons des cercles, tout autre paramètre restant constant.

Considérons une ligne d'impédance  $0,01 + j0,1$  pu entre deux sources dont l'amplitude de la tension est 1 pu, le déphasage  $\theta$  variant de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$  (Figure 1-6.A). Si l'on réduit

la réactance série à 0,06 on obtient la Figure 1-6.B montrant l'accroissement de la puissance échangée.

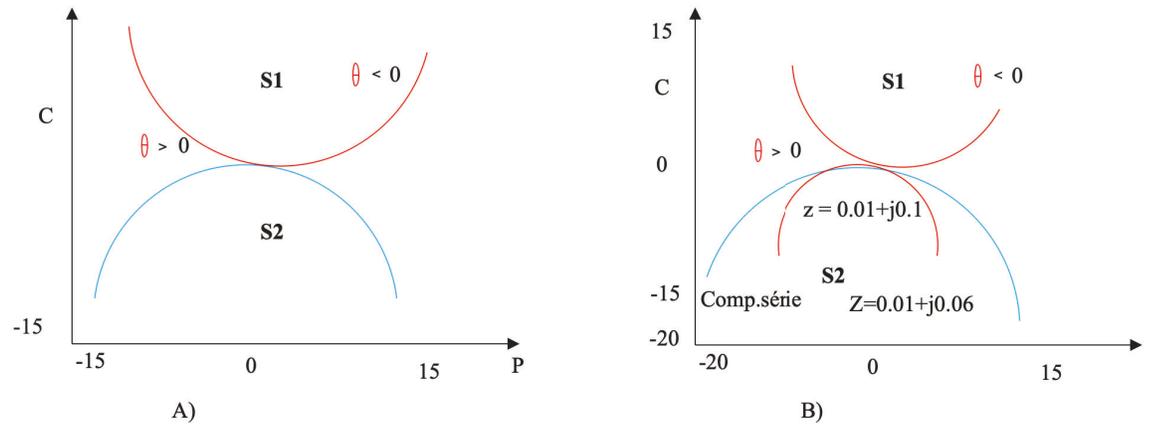


Figure 1-6 Lieux de puissance (A). Lieux de puissance avec compensation série (B) [50]

Le concept de contrôleur série introduit une source de tension en quadrature avec le courant de ligne  $\underline{V}_i = jK\underline{I}$  et modifie le lieu comme suit :

$$\underline{S}_2' = \underline{U}_2 \left( \frac{\underline{U}_1 + jK\underline{I} - \underline{U}_2}{\underline{Z}} \right) \quad (1-23)$$

$$\underline{S}_2' = \underline{S}_2 + \frac{\underline{U}_2(-jK\underline{I}^*)}{\underline{Z}^*} = \underline{S}_2 + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}^*} \left( -jK \frac{\underline{S}_2'}{\underline{U}_2} \right) = \frac{\underline{S}_2 \underline{Z}^*}{\underline{Z}^* + jK} \quad (1-24)$$

ce qui donne un cercle passant par l'origine et le point  $\underline{S}_2$ . Seule une portion de ce cercle est évidemment accessible vu les contraintes physiques imposées par les limites en courant ou tension.

La Figure 1-7 A montre partiellement ce lieu pour  $k = 0,05$  avec les mêmes conditions que précédemment. On voit qu'il y a une action plus large qu'une simple modification d'impédances : en particulier, on peut avoir un changement de signe de la puissance active Figure 1-7 B ce qui est impossible par la seule modification d'impédance.

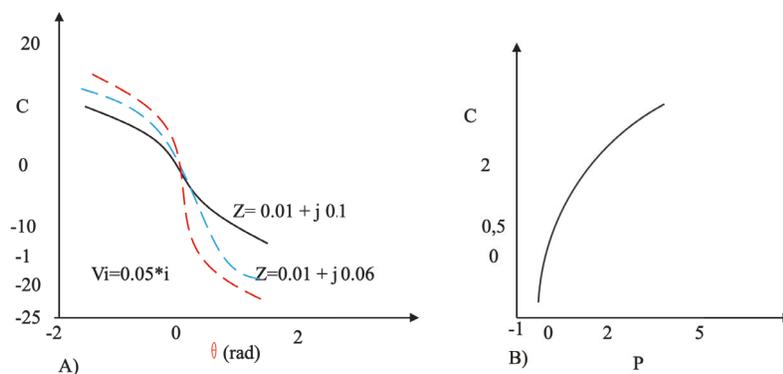


Figure 1-7 Puissance  $P = f(\theta)$  avec source  $kI$  (A), lieu P-Q (B) [50]

Enfin, le concept de contrôleur généralisé avec une source de grandeur et de phase arbitraire  $\underline{V}_i$  conduit à un domaine intérieur à un cercle centré sur  $\underline{S}_2$  :

$$\underline{S}_2' = \underline{S}_2 + \frac{U_2 V_1^*}{Z^*} \quad (1-25)$$

Les Figure 1-8A et Figure 1-8 B illustrent ce lieu respectivement pour  $V_i = 0.1e^{j60^\circ}$  dans l'exemple précédent et pour une phase variable de  $0$  à  $360^\circ$ . La présence de deux degrés de liberté augmente les possibilités d'échange puisque dans ce dernier cas tous les points intérieurs au cercle peuvent être atteints [51].

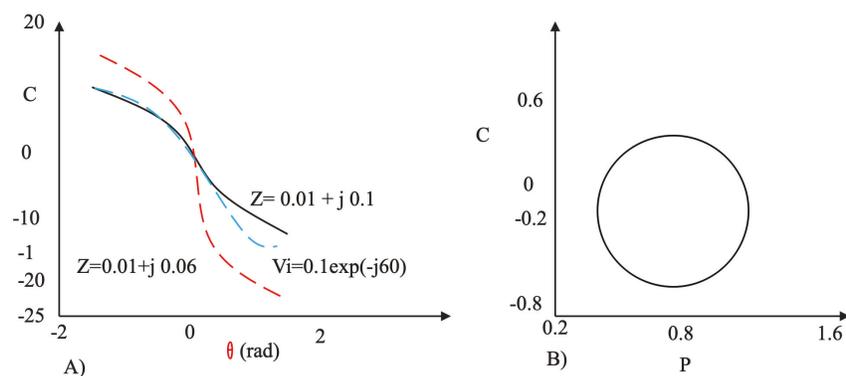


Figure 1-8 Lieu  $P = f(\theta)$  (fig. A), lieu P-Q (Fig b) [51].

### 1.7 Moyens classiques de réglage de tension

Les moyens seront différents selon le niveau auquel on agit à savoir le transport ou la distribution. En transport, le réseau comporte des groupes importants, un réseau maillé avec une résistance des conducteurs faible par rapport à la réactance et une chute de tension liée par conséquent au transport de réactif [52]. Par contre en distribution on aura souvent une structure radiale, une grande densité de consommateurs, pas ou peu de générateurs et une résistance des lignes plus grande que la réactance.

Le découplage entre les deux niveaux est assuré par des transformateurs à rapport de transformation variable, munis de prises réglables à vide (MT/BT) ou en charge (HT/MT). Ce qui évitent de transmettre les fluctuations de tension d'un réseau amont vers un réseau aval. En général, les moyens de compensation et de réglage à mettre en œuvre doivent faire face aux fluctuations périodiques liées à l'évolution journalière des transits de puissance. Ils doivent aussi éviter les variations brusques liées aux incidents sur le réseau. Les dispositifs de réglage de tension sont [53, 54]:

- Les condensateurs et inductances fixes ;

Ce type d'équipement permet d'ajuster la puissance réactive fournie aux variations de consommation, et ainsi de maintenir le  $\cos\phi$  à la valeur désirée Il s'utilise dans les cas où la puissance réactive consommée est forte vis-à-vis de la puissance du transformateur et varie dans les proportions importantes, c'est-à-dire essentiellement

- Les compensateurs synchrones ;

On appelle compensateur synchrone, un moteur synchrone qui tourne à vide et dont la seule fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur une ligne de transport

ou sur un réseau. Pour régulariser la tension d'un réseau, on doit lui fournir une puissance réactive pendant les heures de pointes. Intervenant pendant les périodes creuses, il doit absorber l'excès de la puissance réactive générée par les lignes.

Le compensateur synchrone permet de compenser ces fluctuations de puissance réactive en ajustant l'excitation selon les besoins. Le compensateur agit alors comme une énorme capacitance ou inductance variable dont la valeur est réglable en faisant varier le courant d'excitation de son rotor.

- Les compensateurs statiques ;

Les compensateurs statiques sont constitués de systèmes FACTS (flexible AC Transmission System) ; systèmes flexibles de transmission à courant alternatif qui ont pour objectifs de contrôler la tension et le transit de la puissance dans les réseaux afin d'augmenter leur capacité de charge jusqu'à leurs limites thermiques maximales.

- Les transformateurs à prises variables (en charge ou à vide) ;

- Les groupes générateurs.

## **1.8 Conclusion**

Les réseaux de transport et de répartition sont alimentés par des générateurs de grande puissance dont la puissance nominale et la localisation ont fait l'objet d'une planification centralisée et dont la production est coordonnée de manière centralisée sur des zones très étendues.

Certains réseaux utilisent les liaisons à haute tension continue pour mettre en œuvre les systèmes de conversion courant alternatif/courant continu à semi-conducteurs.

Après conversion du niveau de tension à des valeurs inférieures à 30kV, ils deviennent des réseaux de distribution et présentent des structures radiales, alimentées par un nombre restreint de postes à partir du réseau de transport et de répartition. Ils alimentent l'essentiel des consommateurs.

Le réglage de la tension peut se faire par découplage des réglages P-f et Q-V et permet de traiter les problèmes spécifiques de manière relativement indépendante.

Les réseaux haute tension sont souvent mis à profit pour créer des mini réseaux le long des lignes pour alimenter des faibles charges. Le chapitre suivant traite des différents types de mini réseau pouvant être obtenus en exploitant les lignes HT.

## Chapitre 2 - Types de réseaux issus des lignes haute tension

### 2.1 Introduction

Les différentes possibilités d'alimentation par couplage se différencient par leur mode de soutirage de l'énergie électrique à partir de la ligne à H.T. Ces techniques se résument aux couplages par capacités naturelles, par connexion sur les conducteurs de phases et par injection de tension à partir d'un poste de tension, communément appelé réseaux CDGI.

Dans ce chapitre nous présentons ces types de réseaux et les différentes techniques utilisées pour la réduction des déséquilibres de tension sur les réseaux CDGI et leur limite.

### 2.2 Réseaux à câble de garde isolé par couplage capacitif et inductif

Le fil de garde est un conducteur de faible diamètre disposé parallèlement au-dessus des lignes et servant principalement à protéger celles-ci des décharges atmosphériques. Ce fil est normalement relié à la terre et n'est pas utilisé pour le transport de l'énergie électrique. De ce fil de garde isolé, on peut extraire de l'énergie induite par les conducteurs de phase de la ligne haute tension par couplage capacitif et inductif.

Le fil de garde est isolé par des isolateurs conventionnels choisis en fonction de la tension d'opération. Sa vocation de protection demeure inchangée, offrant toujours le point d'attraction le plus propice à la foudre. Les lignes de transport électrique, lorsqu'elles sont alimentées génèrent dans leur périphérie un champ électrique alternatif proportionnel à leur niveau de tension. Le fil de garde situé dans ce champ en est influencé et lorsque celui-ci est isolé, une tension électrique y est induite. D'autres paramètres comme la géométrie des lignes, les dimensions des conducteurs et la topographie du terrain situé sous le faisceau ont aussi une influence directe sur la quantité d'énergie. Le couplage est fait par les capacités

naturelles. Les capacités naturelles intervenant, la quantité d'énergie induite dépend donc aussi de la permittivité de l'air.

Un conducteur connecté directement au câble de garde permet alors d'extraire l'énergie induite pour alimenter une charge au travers d'un transformateur et d'un dispositif de régulation de la tension. Le retour du courant se fait par la terre ou par l'autre câble de garde s'il en existe.

### 2.3 Réseau par couplage capacitif sur les conducteurs de phase

Pour ce type d'alimentation la puissance est directement soutirée d'une phase de la ligne H.T à travers les condensateurs constituant le diviseur capacitif de tension. Le retour du courant se faisant par la terre. Ainsi, le niveau de tension de transport est réduit à un niveau de distribution permettant alors l'emploi d'un transformateur de distribution MT/BT pour passer du niveau de distribution à celui de l'utilisation Figure 2-1. On y distingue 3 parties associées à trois niveaux de tension: haute, moyenne, basse :

- La haute tension est constituée par la ligne et un condensateur de couplage;
- La moyenne tension est constituée par un second condensateur, une bobine de compensation, un filtre amortisseur et le primaire du transformateur MT/BT.
- La basse tension comprend le secondaire du transformateur et la charge à alimenter.

Les éléments du diviseur peuvent être choisis de façon à obtenir une moyenne tension de valeur normalisée pour faciliter l'approvisionnement en transformateur MT/BT correspondant au réseau.

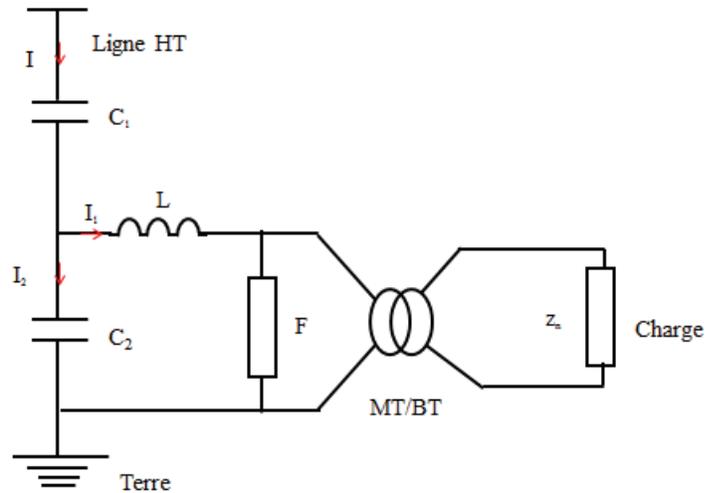


Figure 2-1 Réseau par couplage capacitif sur un conducteur de phase

#### 2.4 Réseaux à câble de garde isolé par diviseur inductif

Le principe de fonctionnement reste le même qu'un réseau par couplage capacitif. La division de la tension est réalisée par un ensemble de 2 bobines. Ce poste se branche également sur un conducteur de phase d'une ligne à HT et un transformateur MT/BT permet d'obtenir la BT Figure 2-2.

L'appareil est essentiellement composé de deux inductances en série. La tension de sortie est fonction des valeurs des inductances. Pour obtenir une régulation adéquate de tension de sortie on ajoute une capacité en série au diviseur inductif d'une valeur telle que l'impédance totale de la source soit nulle. De cette façon on annule l'impédance de source formée par les inductances

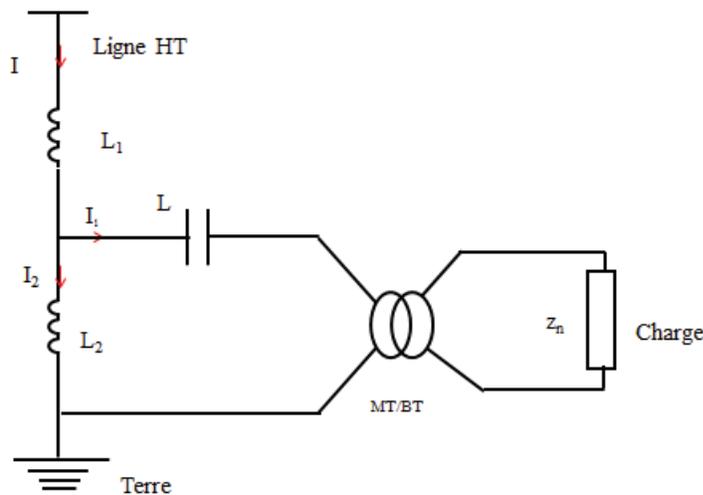


Figure 2-2 Réseaux à câble de garde isolé par diviseur inductif

## 2.5 Réseaux à câble de garde isolé et techniques de réduction du déséquilibre de tension

### 2.5.1 Réseaux à câble de garde isolé

Le câble de garde est un conducteur de faible section disposé parallèlement au-dessus des lignes HT et servant principalement à protéger celles-ci des décharges atmosphériques [55]. Ce câble de manière conventionnelle est en contact direct avec les ferrailles des pylônes des lignes HT reliés à la terre et n'est pas utilisé pour le transport de l'énergie électrique. Son isolation est réalisée par des isolateurs conventionnels choisis en fonction de la tension d'opération. Sa fonction primaire de protection demeure inchangée, offrant toujours le point d'attraction le plus propice à la foudre. Un réseau à CDGI (Figure 2-3) est obtenu en alimentant ces câbles de garde isolés par une moyenne tension (MT) à partir d'un poste source de transformation [56].

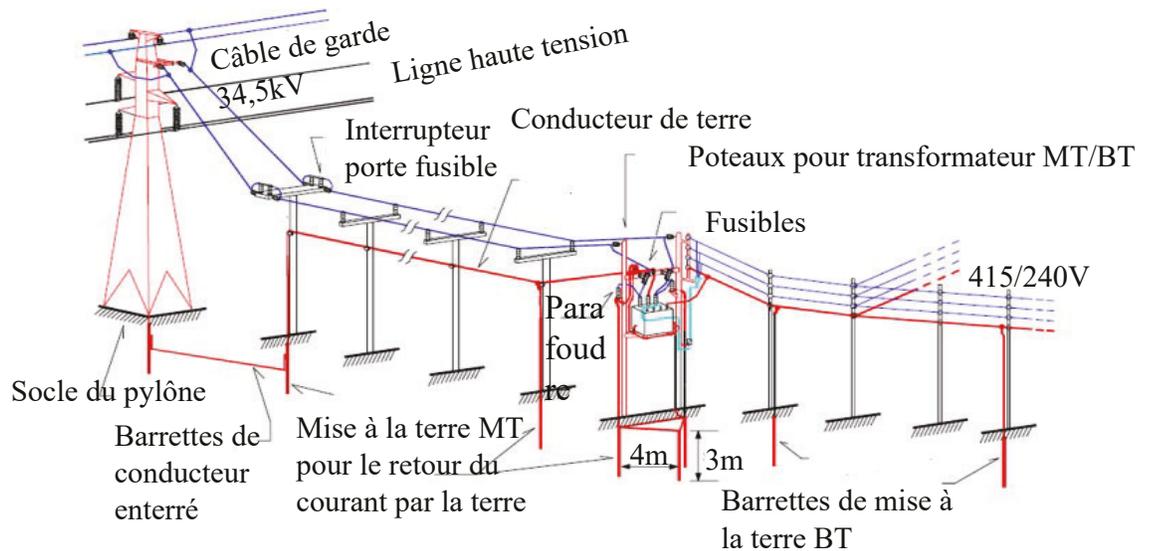


Figure 2-3 Réseau CDGI [56].

#### 2.5.1.1 Réseau à CDGI monophasé

La distribution monophasée avec retour de courant à la terre est assimilable à l'alimentation d'une seule phase des lignes de distribution MT avec retour de courant de terre qui permet d'alimenter de petites charges à distance pouvant atteindre une centaine de kilomètres du poste de transformation. Un seul câble de garde isolé est nécessaire pour sa mise en œuvre [57, 58](Figure 2-4).

L'alimentation monophasée avec retour à la terre est beaucoup utilisée par Hydro Québec au Canada, l'Australie, la Nouvelle-Zélande et la Russie pour la distribution.

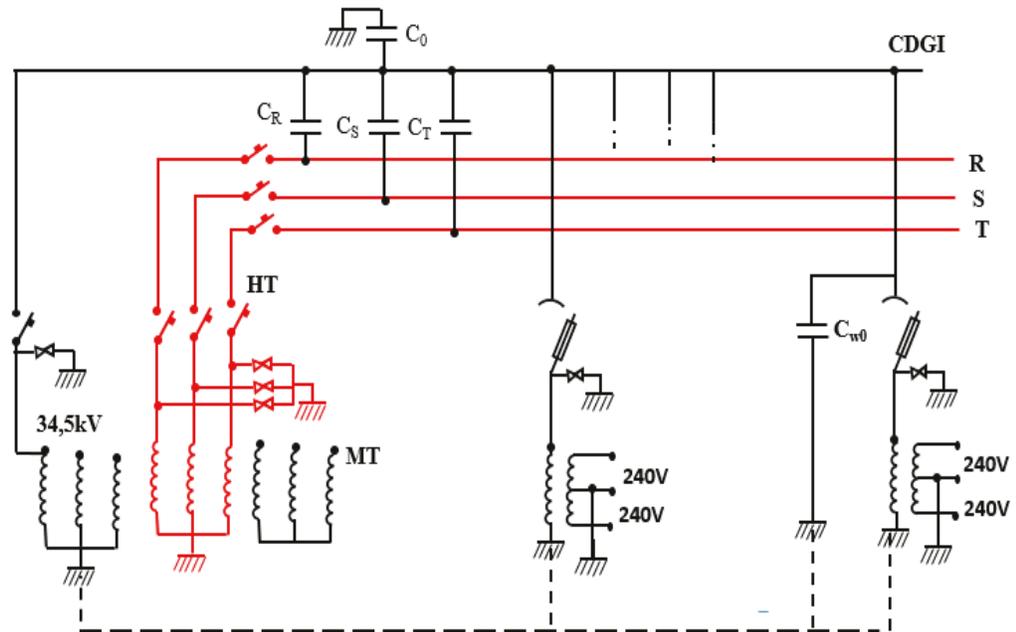


Figure 2-4 Réseau à CDGI monophasé avec retour à la terre [56].

La distribution monophasée peut être également obtenue avec deux câbles de garde isolés (Figure 2-5). Dans une telle configuration, il n'y a pas de retour à la terre.

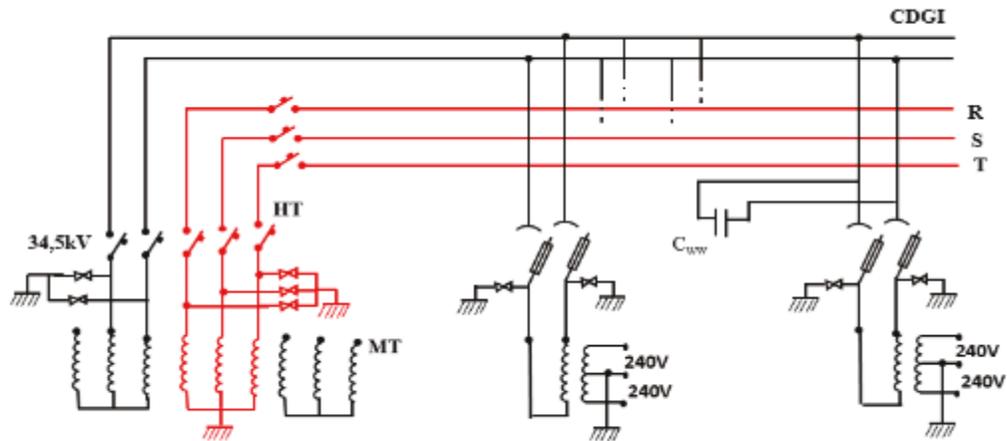


Figure 2-5 Réseau à CDGI monophasé avec deux câbles de garde [56].

### 2.5.1.2 Réseau à CDGI triphasé

La distribution triphasée exige deux câbles de garde isolés de la ligne électrique de transport. Les deux bornes moyennes tension du transformateur MT/BT sont raccordées aux deux câbles de garde, la troisième borne du transformateur est raccordée à la terre (Figure 2-6).

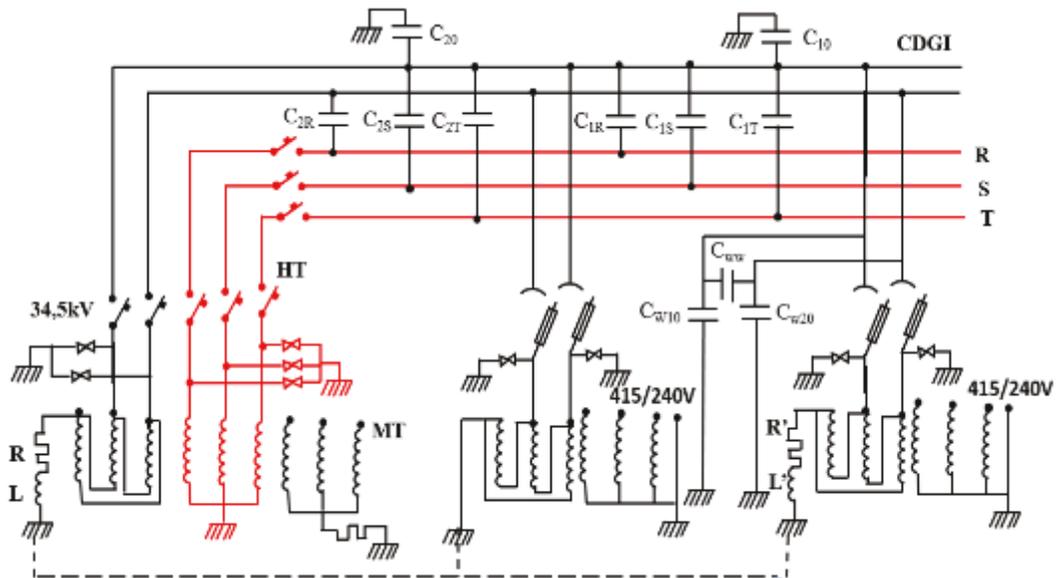


Figure 2-6 Réseau CDGI distribution triphasée [56].

### 2.5.2 Techniques de réduction du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI

La majorité des travaux réalisés et trouvés dans la littérature utilisent une topologie basée sur les composants passifs (condensateur, inductance et résistance) à commande mécanique (Figure 2-7 et Figure 2-9) et des transformateurs à prises variables (Figure 2-8) pour la réduction du déséquilibre [59].

Les condensateurs et inductances fixes ou banc de condensateurs ou d'inductance fixes ont pour inconvénient de provoquer une sous-compensation ou une surcompensation en cas

de variation de tension à des moments incontrôlables. Quant aux transformateurs à prises variables (en charge ou à vide) en plus du coût élevé de sa mise en œuvre pour les petites puissances, l'automate de réglage peut ne pas détecter les élévations de tension locales introduites par les charges et donc maintenir au niveau du poste source une tension élevée provoquant des surtensions [60].

La résolution du déséquilibre de tension passe par un fonctionnement instantané des équipements installés afin de leur permettre de mieux s'adapter aux différentes variations.

2.5.2.1 Insertion en série dans le circuit de retour à la terre d'une inductance et d'une résistance

Dans un tel équilibrage, seul un des conducteurs de ligne est pris en compte. L'effet capacitif de la ligne haute tension n'est pas pris en compte (Figure 2-7) [56].

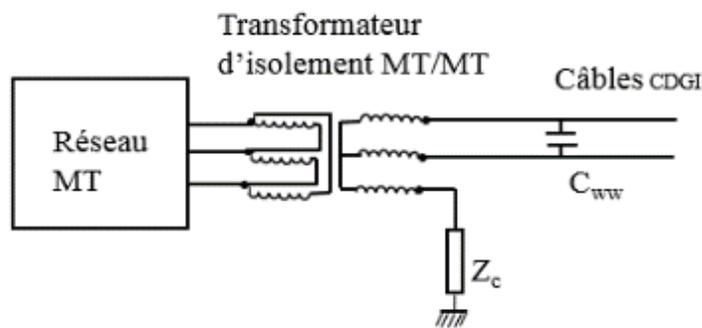


Figure 2-7 Méthode de réduction des asymétries par insertion d'impédance dans le circuit de retour à la terre.

### 2.5.2.2 Transformateur à prises variables

Comme alternative, il y a également l'équilibrage des tensions en agissant sur les trois phases basse tension du transformateur de distribution par insertion d'une force électromotrice obtenue à partir de transformateurs équipés d'un régleur en charge et un contrôle adéquat de changement de prises (Figure 2-8)

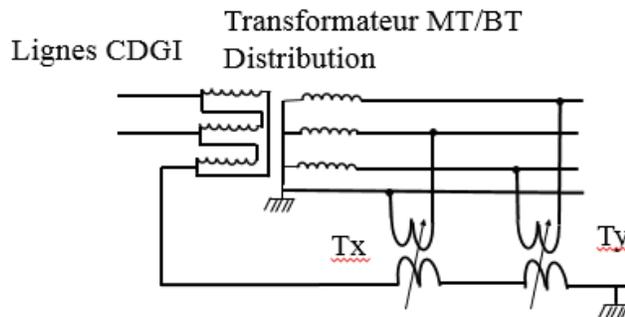


Figure 2-8 Méthode de réduction des asymétries par des transformateurs de compensation spéciales

### 2.5.2.3 Application de réactances

Enfin, une solution récente consiste à appliquer des réactances adaptées pour annuler ou réduire considérablement les asymétries inhérentes au circuit de terre (Figure 2-9) [20].

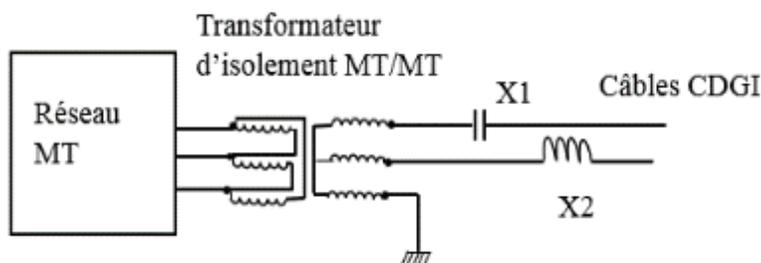


Figure 2-9 Méthodes de réduction des asymétries par insertion de réactances

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre a traité des différents types de réseaux existants pour alimenter les faibles puissances en utilisant les lignes hautes tension. Parmi ces techniques nous avons :

Le couplage par capacités naturelles qui consiste au soutirage de l'énergie à partir d'un conducteur suspendu à proximité des conducteurs de phase d'une ligne à H.T

Le couplage capacitif par connexion sur les conducteurs de phase.

Le réseau CDGI qui consiste à alimenter les câbles de garde isolés par une MT à partir d'un poste source de transformation. Les techniques de réduction des déséquilibres de tension des réseaux CDGI ont toujours été basées essentiellement sur l'utilisation des composants passifs alors que les FACTs peuvent être aussi utilisés pour améliorer le déséquilibre de tension de ces réseaux du fait de leur rapidité et leur faible maintenance. Le chapitre suivant traitera du fonctionnement et des configurations de ces FACTs dans le but de les utiliser sur les réseaux CDGI.

## Chapitre 3 - Fonctionnement et configuration des FACTS

### 3.1 Introduction

Les dispositifs électromécaniques ou purement passifs ont longtemps été utilisés dans les réseaux électriques. De nos jours ils répondent de moins en moins aux nouvelles contraintes imposées par les développements de ces réseaux et l'exigence de la qualité de fourniture [61].

Les FACTS mettent à profit les possibilités offertes par l'électronique de puissance (rapidité et faible maintenance) pour dépasser les limites des équipements électromécaniques ou passifs [62].

### 3.2 Différents groupes de FACTS

Les systèmes FACTS peuvent être [63]:

- ✓ Les compensateurs d'énergie réactive qui soutiennent la tension du réseau au point de connexion en contrôlant le flux de la puissance réactive.
- ✓ Les condensateurs séries réglables qui modifient l'impédance de la ligne et permettent alors de contrôler la puissance qui transite sur celle-ci.
- ✓ Les déphaseurs qui modifient la puissance transmise sur une ligne en changeant la phase de la tension à un nœud donné.
- ✓ Les limiteurs de courant de défaut qui insèrent des éléments résistifs en cas de court-circuit.
- ✓ Les freins dynamiques qui réduisent la perte de synchronisme des machines génératrices du réseau à la suite de divers problèmes.

✓ Les amortisseurs de résonance subsynchrone qui amortissent les oscillations de puissances dans le réseau. Ces fréquences sont très inférieures à la fréquence nominale du réseau.

Notre intérêt sera porté sur les groupes des FACTS qui permettent de contrôler le flux de la puissance réactive[64].

### 3.3 Principes de fonctionnement des FACTS

Soit une ligne à courant alternatif, sans perte et modélisée par une réactance  $X_L$  (Figure 3-1)

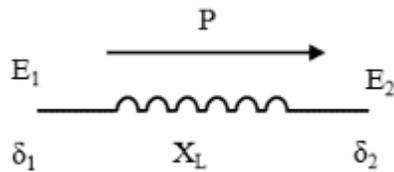


Figure 3-1 Ligne électrique

L'équation de la puissance qui transite dans cette ligne en fonction des tensions aux extrémités de la ligne  $E_1$  et  $E_2$ , du déphasage  $\delta_{12}$  entre ces tensions et de l'impédance de la ligne  $X_L$  est[65] :

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_L} \sin \delta_{12} \quad (3-1)$$

Pour régler le transit de puissance avec des paramètres de fourniture de qualité, il suffit de modifier les paramètres de tension  $E_1$  ou  $E_2$ ; de l'impédance  $X_L$  ou du déphasage  $\delta_{12}$ . L'action sur ces paramètres permet de contrôler au mieux la qualité de fourniture de l'électricité aux consommateurs.

La Figure 3-1 peut se décomposer en deux demi-lignes d'impédance  $\frac{X_L}{2}$  (Figure 3-2)

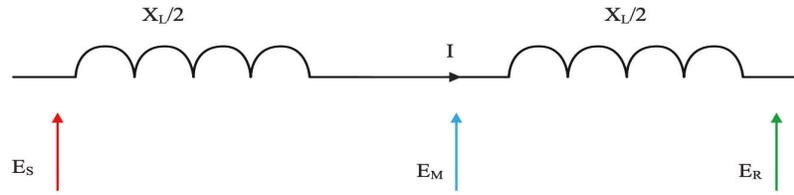


Figure 3-2 Ligne électrique décomposée

$E_S$ : Tension aux bornes de la source

$E_R$  : Tension aux bornes du récepteur

$E_M$  : Tension au milieu de la ligne

$X_L$  : Impédance (Réactance) de la ligne

$I$  : Courant de ligne

Si on considère que les tensions à chaque extrémité de la ligne sont égales à  $E$  et que le déphasage entre elle est  $\delta_{12}$ , la puissance transmise sur la ligne est alors représentée par l'équation  $P$  et la courbe de puissance en fonction de l'angle de transmission sur la Figure

3-3

$$P = \frac{E^2}{X_L} \sin \delta_{12} \quad (3-2)$$

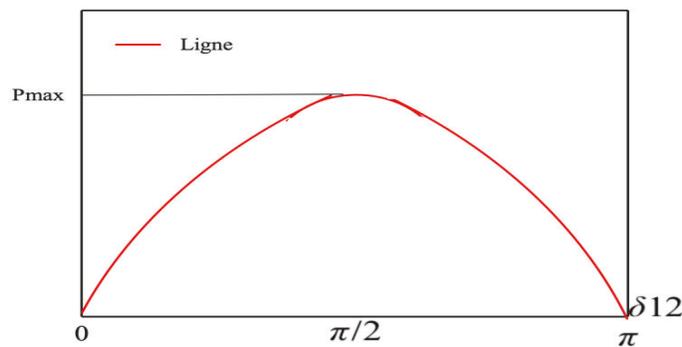


Figure 3-3 Courbe de puissance en fonction de l'angle de transmission [65]

On obtient la puissance maximale transmissible sur la ligne à  $\frac{\pi}{2}$ .

### 3.3.1 Compensation shunt

On insère maintenant au milieu de la ligne un compensateur d'énergie réactive idéal [24]. Ce dispositif permet de maintenir la tension  $E_M$  à la tension  $E$ , en contrôlant le flux de puissance réactive (Figure 3-4). En effet, la chute de tension à travers une ligne est donnée par la relation  $\Delta E$  en négligeant le terme résistif de la ligne [51].

$$\Delta E = \frac{X_L Q}{E} \quad (3-3)$$

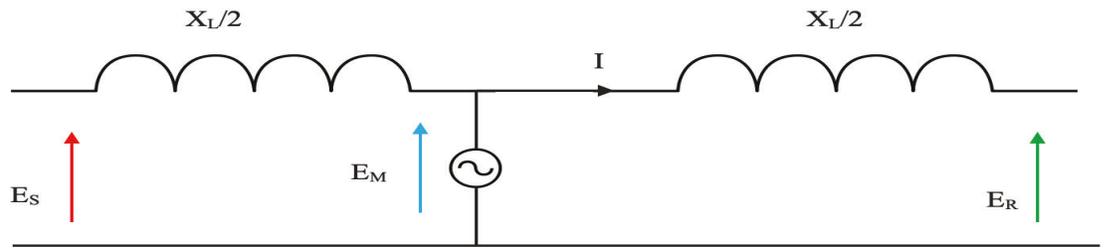


Figure 3-4 Compensation shunt d'une ligne

L'équation donne l'expression de la puissance transmise par la ligne compensée représentée par la Figure 3-5. On remarquera que la puissance maximale transmise est doublée et est obtenue pour un déphasage de  $\delta = \pi$ . Une compensation shunt permet donc de doubler le transport de puissance maximale d'une ligne[66].

$$P = \frac{2E^2}{X_L} \sin \frac{\delta_{12}}{2} \quad (3-4)$$

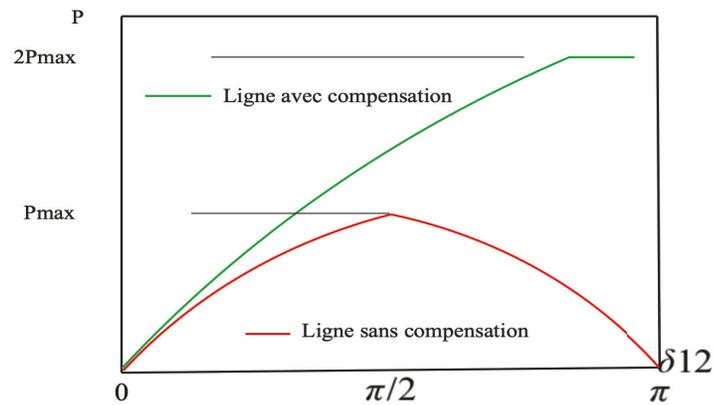


Figure 3-5 Courbes de puissance avec et sans compensation

### 3.3.1.1 Compensation par SVC (Static Var Compensator)

Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques, les RCT (Réactances Commandées par Thyristor) (Figure 3-6) ont fait leur apparition vers la fin des années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristors tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins d'une demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage  $\varphi$  permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif [67].

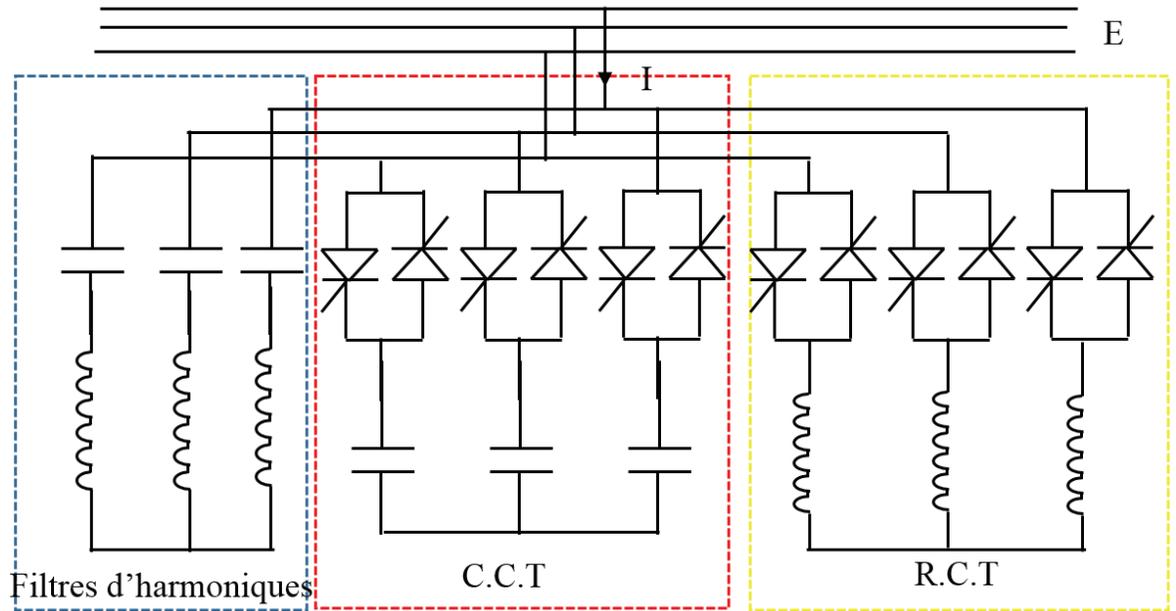


Figure 3-6 Schéma du SVC

La Figure 3-7 donne les formes d'onde du courant et de la tension. Pour éliminer les harmoniques de rang (3, 9, 15, ...) ces dispositifs sont dans la pratique connectés en triangle. Pour limiter la pollution harmonique du réseau, on peut encore éliminer les harmoniques de rang 5, 7, 17, 19 en connectant deux RCT aux bornes secondaires d'un transformateur, ceux-ci décalés de trente degrés [68].

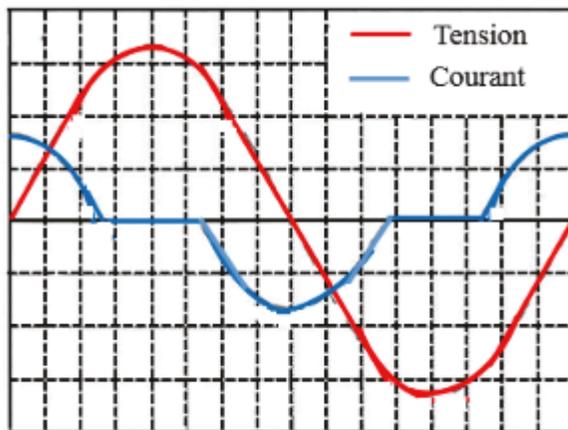


Figure 3-7 Forme d'onde du courant et tension dans un RCT [68].

### 3.3.1.2 STATCOM (Static Compensator)

Le STATCOM (Static Compensator) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur Statique d'Énergie Réactive de type Avancé), ASVC (Advanced Static Var Compensator), SVG (Static Var Generator) et STATCOM (Static Compensator) [69].

Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'être créées par un groupe tournant (Figure 3-8).

Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle [70].

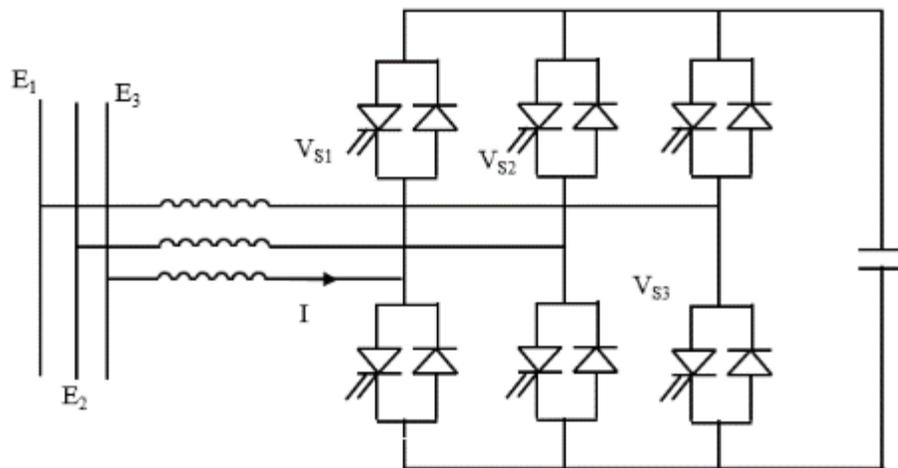


Figure 3-8 Structure du STATCOM

Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celle-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage. L'échange d'énergie réactive se

fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur  $V_s$ , laquelle est en phase avec la tension du réseau  $E$ . Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante [70]:

Si  $V_s < E$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $+\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension  $E$  et le courant est capacitif (Figure 3-9).

Si  $V_s > E$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $-\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension  $E$  et le courant est inductif (Figure 3-10)

Si  $V_s = E$ , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

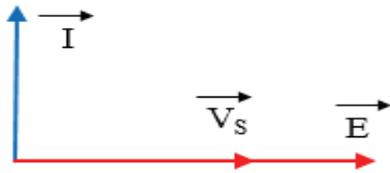


Figure 3-9 Courant capacitif

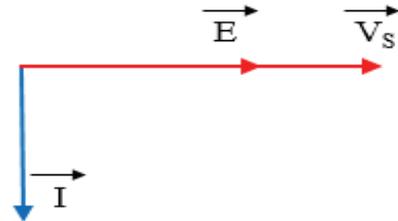


Figure 3-10 Courant inductif

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie avec un comportement inductif et capacitif uniquement à l'aide d'une inductance. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui peut entraîner des résonances avec les éléments inductifs. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la Figure 3-11. Ce dispositif a l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension  $E$  diminue, contrairement au SVC [71].

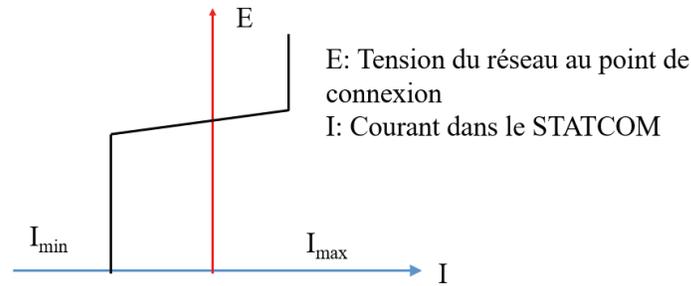


Figure 3-11 Caractéristique statique du STATCOM

### 3.3.2 Compensation série

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance sur la ligne [25] toujours dans le but d'en augmenter la puissance transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductif, en ajoutant une réactance de type capacitif (Figure 3-12) l'on diminue cette réactance.

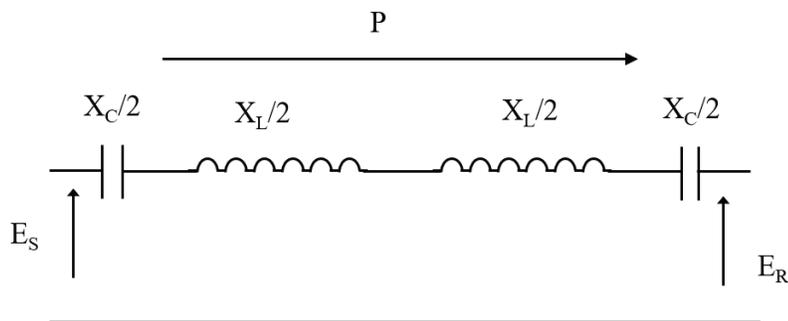


Figure 3-12 Compensation série d'une ligne

La réactance introduite aura la valeur  $X_c$ , donnée par l'équation :

$$X_c = \alpha X_L, \quad (3-5)$$

$\alpha$  est le degré de compensation  $0 \leq \alpha < 1$

L'impédance totale entre le récepteur et la source est maintenant donnée par :

$$X_{total} = X_L - X_C = X_L(1 - s) \quad (3-6)$$

La puissance transmise par la ligne en fonction du degré de compensation représentée sur la Figure 3-13 est [25] :

$$P = \frac{v^2}{X_L(1-s)} \sin\delta_{12} \quad (3-7)$$

Avec ce type de compensation, les condensateurs doivent échanger de l'énergie réactive en quantité importante. Les propriétés sont similaires à celles du compensateur d'énergie réactive.

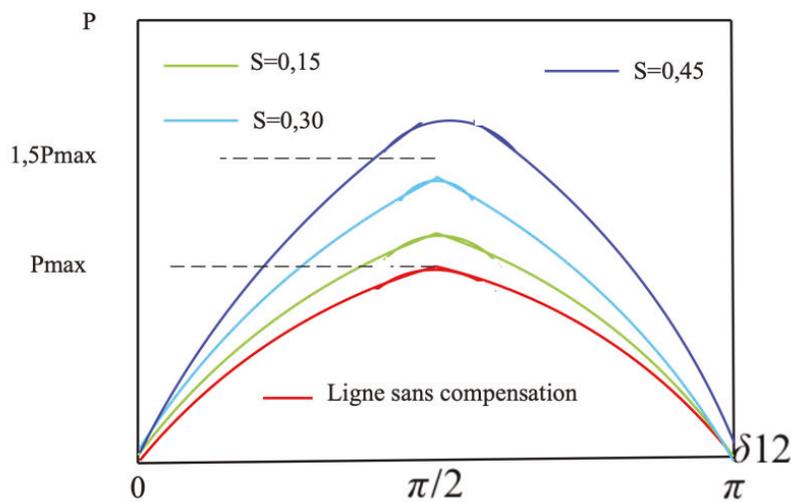


Figure 3-13 Courbes de puissance avec et sans compensation série [71].

3.3.2.1 Compensateur série commandée par thyristor (TCSC-: Thyristors Controlled Series Compensator).

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Cet ensemble est inséré sur la ligne électrique pour la compensation (Figure 3-14) [72].

Où  $X_c$  est l'impédance du condensateur du TCSC

$X_I$  est l'impédance de l'inductance du TCSC

$X_L$  est l'impédance de la ligne

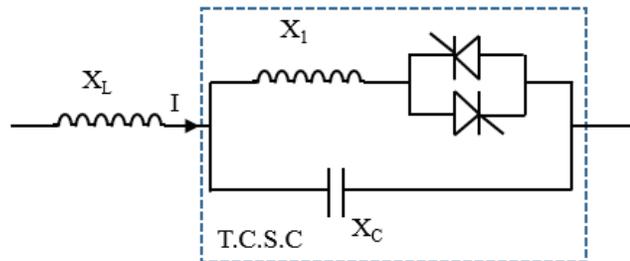


Figure 3-14 Insertion d'un TCSC sur une ligne

Ce dispositif a trois modes de conduction:

1. Si les thyristors ne sont pas commandés, l'impédance du dispositif est alors  $X_C$
2. Si les thyristors sont commandés en pleine conduction, l'impédance équivalente est égale à l'impédance du condensateur  $X_C$  en parallèle avec l'impédance de l'inductance  $X_I$ .
3. Si les thyristors sont en conduction partielle, l'impédance du dispositif est donc fonction de l'angle de retard à l'amorçage (Figure 3-15). On remarque qu'il y a une zone où l'impédance n'est pas déterminée.

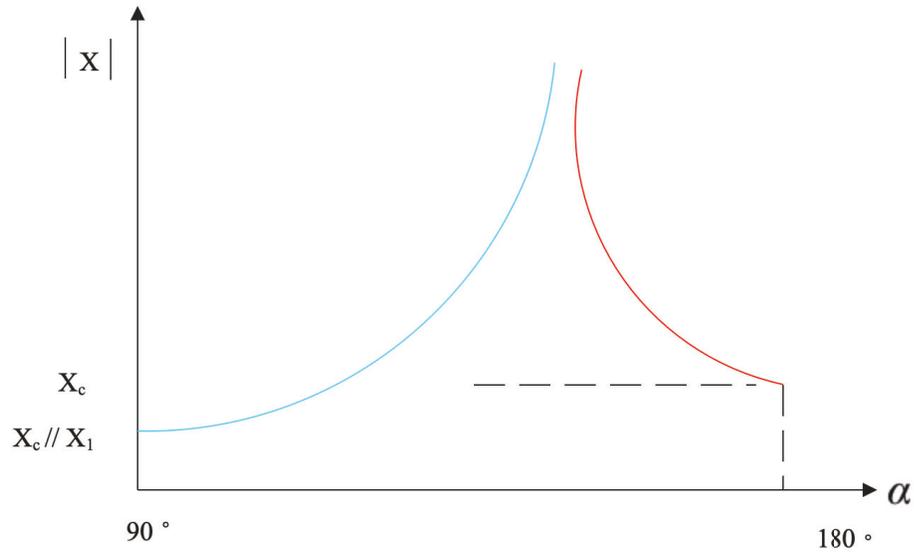


Figure 3-15 Impédance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors [72].

L'avantage du TCSC est d'obtenir une impédance de ligne variable avec un temps de réponse plus rapide. Mais il peut engendrer des instabilités s'il est commandé près de la résonance [73].

### 3.3.2.2 Compensateur série par onduleur de tension

Le principe de ce dispositif est d'introduire une tension en série sur la ligne en quadrature avec le courant, de sorte à reproduire le fonctionnement d'un condensateur (Figure 3-16). La tension insérée par l'onduleur sera à la fréquence du réseau et l'amplitude de celle-ci proportionnelle à la compensation désirée. Cette tension introduite a pour expression [74]:

$$V_c = -jkX_L I \quad (3-8)$$

Où  $I$  est le courant de ligne

$k$  est le degré de compensation

$$k = \frac{X_C}{X_L}$$

$X_L$  est l'impédance totale de la ligne

$X_C$  est l'impédance capacitive introduite sur la ligne

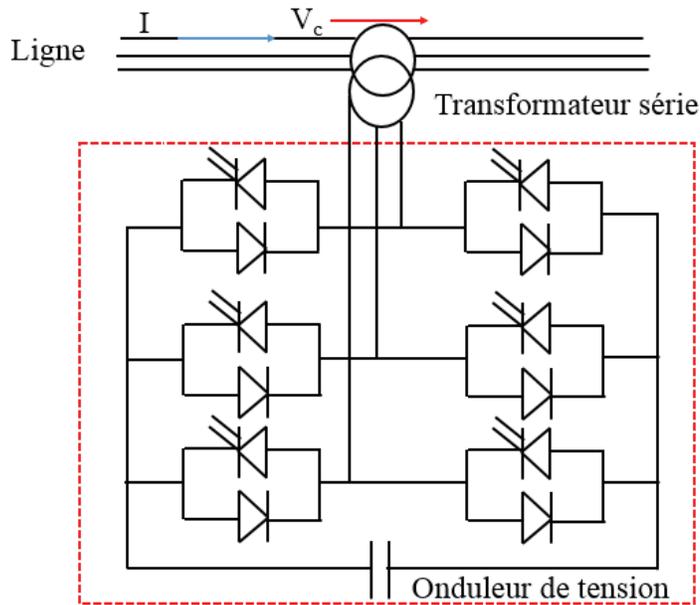


Figure 3-16 Compensateur série par onduleur

Le dispositif peut donc introduire une impédance inductive s'il est nécessaire d'augmenter l'impédance de la ligne. Pour ce faire, il faut que le terme  $k$  soit négatif.

L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement de condensateur, mais de simuler son fonctionnement. Cela évite d'avoir des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau. L'encombrement de ce compensateur est plus réduit que le TCSC, mais sa commande sera plus complexe.

### 3.3.3 Compensation par déphasage

Le principe de cette compensation est basé sur l'insertion d'un déphaseur sur la ligne (Figure 3-17). Ce dispositif est modélisé par une source de tension d'amplitude et de phase

variables. On peut alors avoir en sortie du déphaseur une tension  $V_S$  de même amplitude qu'à l'entrée ( $V_G$ ) mais déphasée.

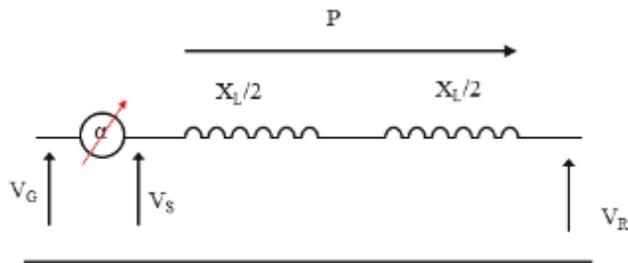


Figure 3-17 Compensation par déphasage d'une ligne

La puissance transmissible sur la ligne est alors fonction de l'angle de déphasage exprimée par :

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta + \alpha) \quad (3-9)$$

Pour ce type de compensation la puissance maximale transmissible n'est pas augmentée. Le réglage du transit de puissance se fait par le réglage de  $\alpha$ .

Ces FACTS ont été créés pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régleur en charge (LTC Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement.

Le principe de ce compensateur est d'injecter une tension en quadrature avec la tension à déphaser. Son amplitude est une combinaison des secondaires dont les rapports de transformation sont 1, 3 et 9 (Figure 3-18). L'amplitude de la tension insérée évolue en paliers. Il peut donc engendrer des échanges d'énergie active et réactive avec le réseau.

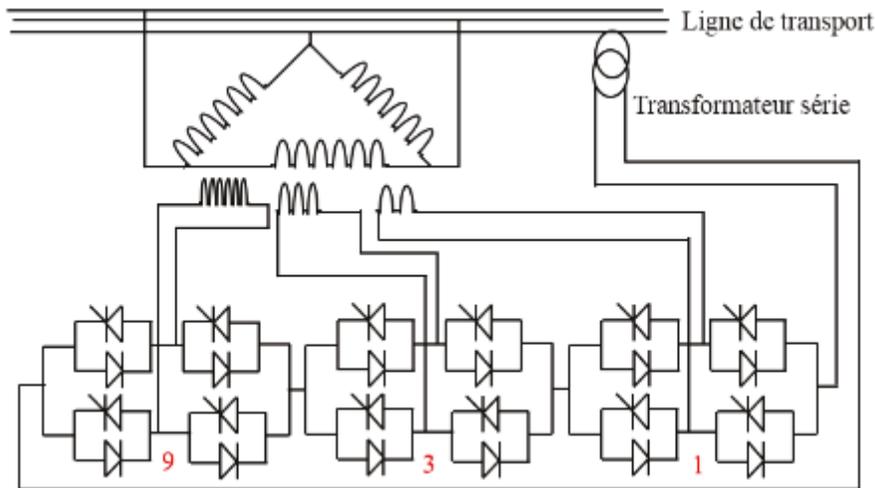


Figure 3-18 Déphaseur par thyristors (représentation pour une phase) [74]:

Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé, mais il a l'avantage de ne pas générer d'harmonique car les thyristors sont commandés en interrupteurs électroniques (pleine conduction). Par contre comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'y adjoindre un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation.

### 3.3.4 UPFC (Unified Power Flow Controller)

Il s'agit du système le plus sophistiqué de FACTS, proposé [27]. Il consiste, comme le montre la Figure 3-19 en deux sources synchrones couplées au réseau par des transformateurs, l'une placée en dérivation et l'autre en série obtenues par des onduleurs ayant en commun une capacité de stockage. La source de tension série est totalement contrôlable en amplitude et en phase. Ce convertisseur puise son énergie dans le circuit continu intermédiaire, ce dernier étant lui-même alimenté par le convertisseur shunt qui fournit la puissance active absorbée par le convertisseur et les pertes. Il peut en outre régler la puissance réactive en A [75].

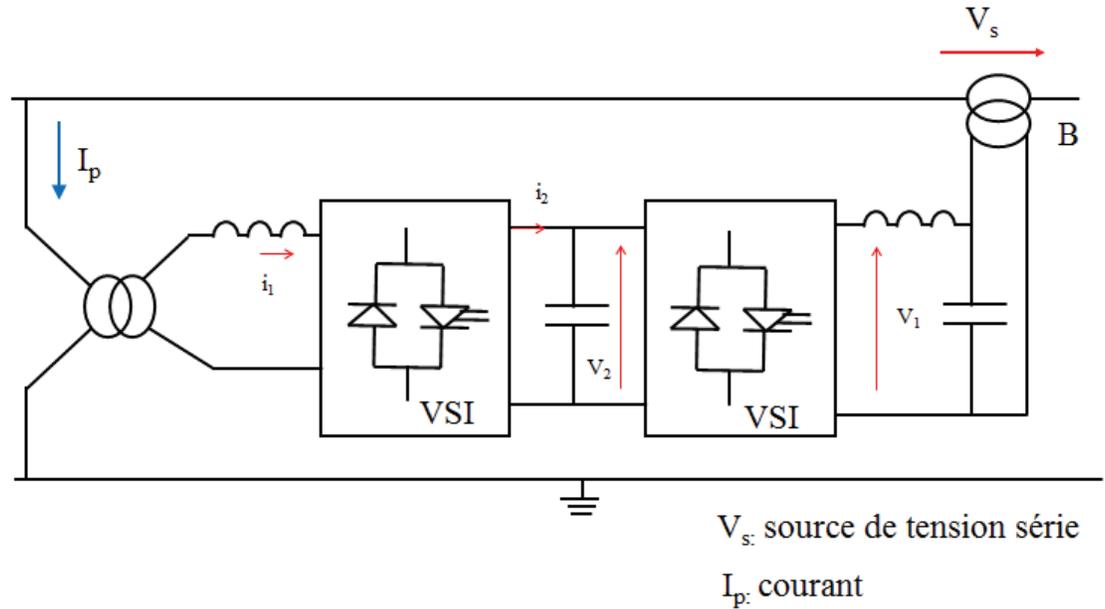


Figure 3-19 Schéma de principe du contrôleur universel de puissance UPFC

Les convertisseurs de tension triphasés permettent chacun de contrôler indépendamment deux grandeurs [74]:

- ✓ Les courants  $i_1$  et  $i_2$  pour le convertisseur 1 commandé en courant;
- ✓ Les tensions  $v_1$  et  $v_2$  pour le convertisseur 2 commandé en tension.

Chacune de ces grandeurs commandables constitue un degré de liberté qui peut être utilisé pour le contrôle du système. On peut ainsi contrôler indépendamment ou simultanément les trois paramètres de base de la transmission de puissance d'un réseau, à savoir la tension, l'impédance de la ligne et le déphasage. Le quatrième degré de liberté est asservi au maintien d'une tension constante aux bornes de la capacité, en l'absence de source continue. L'UPFC réalise fonctionnellement la combinaison d'un compensateur statique

synchrone STATCOM et d'un compensateur statique série. Selon le mode de contrôle choisi, on pourra avoir[76] :

- soit un contrôle direct de la tension par addition (ou soustraction) d'une tension en phase avec la tension du nœud shunt et donc action sur la puissance réactive principalement;
- soit un compensateur shunt, en agissant seulement sur la tension de l'onduleur shunt pour absorber ou générer de la puissance réactive au nœud shunt et y garder la tension constante;
- soit un compensateur série par adjonction d'une tension série en quadrature avec le courant de la liaison et de grandeur telle que seule la tension à l'extrémité B soit modifiée et donc principalement la puissance réactive en ce nœud;
- soit un déphaseur si la tension série est de grandeur et de phase telle qu'en gardant le même module de tension en B. Elle en réduise le déphasage par rapport au nœud A. L'action se fera alors essentiellement sur la puissance active transitée;
- soit un contrôle multifonctions permettant de gérer les puissances active et réactive dans la liaison.

### 3.4 Conclusion

Nous avons exploré la configuration des FACTS destiné à répondre aux problèmes des réseaux. Les différentes compensations permettent de donner des solutions en tenant compte des différentes contraintes, et surtout d'améliorer le contrôle du transit de puissance dans les réseaux et la qualité de fourniture d'électricité. La compensation shunt (STATCOM) et la compensation série étant notre thème central de recherche. Le chapitre suivant traitera des différents types de convertisseur et leur fonctionnement.

## Chapitre 4 - Structures de convertisseurs dans les STATCOM

### 4.1 Introduction

Le STATCOM est composé d'une source d'énergie continue ou d'un condensateur associé à un convertisseur statique à base de semi-conducteurs du type IGBT. Ce convertisseur permet de régler le niveau  $V_s$  de la tension en sortie du convertisseur et de maintenir le courant de sortie  $I_s$  en quadrature avec  $V_s$  [77].

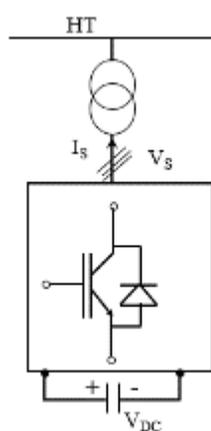


Figure 4-1 Schéma de principe d'un STATCOM

Les différentes fonctions jouées par le STATCOM sont de:

- ✓ Injecter de la puissance réactive ( $V_s < V_{HT}$ );
- ✓ Absorber de la puissance réactive ( $V_s > V_{HT}$ );
- ✓ Filtrer les harmoniques;
- ✓ Équilibrer les charges triphasées en cas de nécessité;
- ✓ Stabiliser la tension au point de raccordement;
- ✓ Atténuer les oscillations de puissances.

Il y a essentiellement deux sources d'onduleurs que peut constituer un STATCOM :

l'onduleur source de tension et l'onduleur source de courant

Le choix de la classe de l'onduleur est entre autres imposé par :

- ✓ Les niveaux de puissances mis en jeu;
- ✓ La pollution harmonique;
- ✓ Le niveau de pertes;
- ✓ Le coût du dispositif;
- ✓ La fiabilité

#### 4.2 Convertisseurs sources de tension

Dans un convertisseur source de tension, c'est la tension continue qui conserve toujours la même polarité et c'est le courant continu qui change de sens pour modifier le sens d'écoulement de l'énergie comme sur la Figure 4-2.

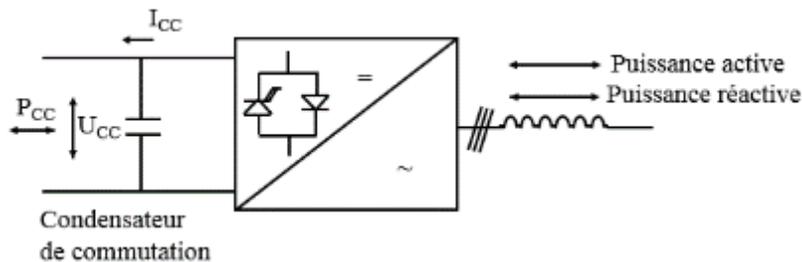


Figure 4-2 Schéma de principe convertisseur source de tension

Ces convertisseurs sont réalisés uniquement avec des composants entièrement contrôlables et des diodes de roues libres. Les diodes permettent l'inversion du sens du courant. Les commutations sont forcées en utilisant de l'énergie prélevée du côté courant continu avec l'aide de condensateurs destinés à fournir les pointes de courant nécessaires aux commutations [28].

### 4.3 Convertisseurs source de courant

Dans un convertisseur source de courant, le courant continu a toujours le même sens. La modification du sens de l'écoulement de l'énergie par le convertisseur se réalise par inversion de la polarité de la tension continue comme indiqué sur la Figure 4-3 [78].

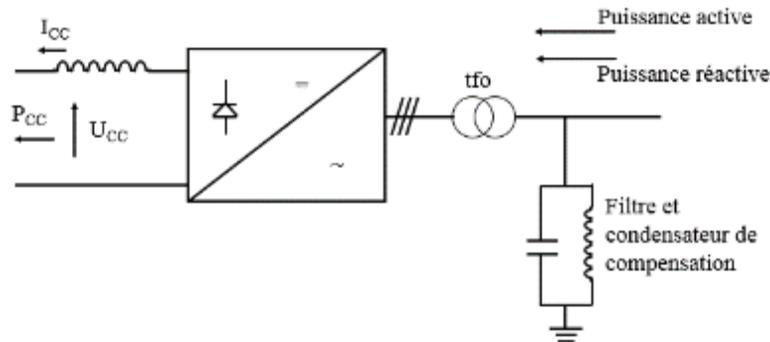


Figure 4-3 Schéma de principe d'un convertisseur source de courant

Les convertisseurs sources de courant peuvent être réalisés en utilisant soit de simples diodes ou des thyristors avec pilotage des commutations par les tensions alternatives, soit des composants entièrement contrôlables auto commutés. Les possibilités d'échange d'énergie active et réactive dépendent du type de composants utilisés [28] :

1. Les systèmes à diodes transfèrent uniquement de l'énergie active de l'alternatif vers le continu sans possibilité de réglage et consomment de l'énergie réactive;
2. Les systèmes à thyristors permettent l'échange d'énergie active dans les deux sens (alternatif vers continu et l'inverse), avec possibilité de réglage par modification de l'instant de mise en conduction des thyristors (Figure 4-4). Ces systèmes absorbent l'énergie réactive côté réseau alternatif. Ces convertisseurs sont généralement utilisés dans les stations de conversion des liaisons à haute tension continue.

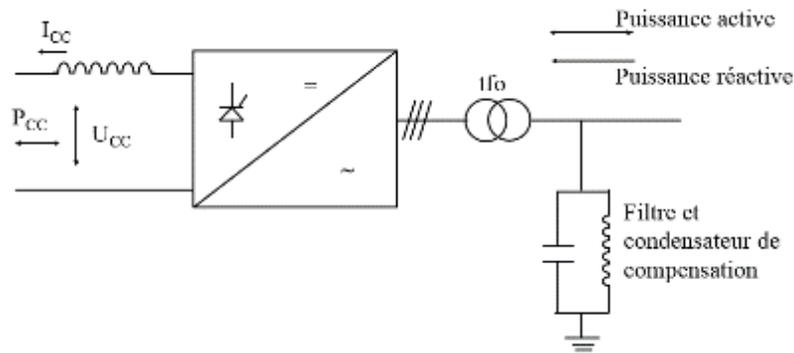


Figure 4-4 Convertisseur source de courant à thyristors

3. Les systèmes à composants entièrement contrôlables à commutation forcée à l'aide de l'énergie accumulée dans des condensateurs placés du côté alternatif autorisent les échanges réglables d'énergie active dans les deux sens ainsi que la fourniture ou l'absorption d'énergie réactive du côté réseau alternatif (Figure 4-5).

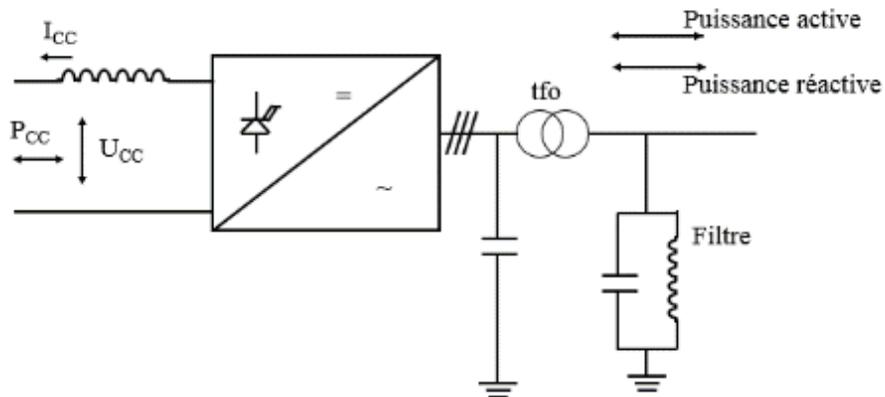


Figure 4-5 Convertisseur source de courant à composante contrôlables

Sur l'ensemble de ces systèmes, des inductances sont placées du côté continu à des fins de lissage du courant ainsi que les filtres d'harmoniques et les condensateurs de compensation de l'énergie réactive ou de commutation et enfin d'éventuels transformateurs.

#### 4.4 Comparaison des deux sources de convertisseur

La comparaison des deux structures montre que l'onduleur de courant est plus intéressant au niveau du TDH pour les faibles valeurs de courant capacitif. Ceci parce que la majorité du courant est fournie par le banc de capacité. Pour les fortes valeurs de courant (inductif ou capacitif) l'onduleur de tension est plus performant. Pour des applications de fortes puissances, avec des interrupteurs GTO les pertes par commutations sont très importantes. C'est ainsi que les STATCOM de plusieurs dizaines jusqu'à une centaine de MVAR sont réalisés en associant plusieurs structures d'onduleurs [79].

Pour la suite de nos travaux notre choix a été porté sur les convertisseurs à source de tension, au regard des fortes valeurs de courant capacitif à transiter.

Pour avoir des taux de distorsion harmoniques acceptables avec une contrainte de fonctionnement en pleine onde, il est nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle des structures. Cela permet aux formes d'onde résultantes des onduleurs du STATCOM d'être le plus proche possible de leur terme fondamental. Diverses solutions sont envisageables en couplant les onduleurs avec des transformateurs adéquats.

#### 4.5 Association parallèle d'onduleurs de tension

La mise en parallèle de deux onduleurs s'effectue par l'intermédiaire d'un transformateur à double enroulement secondaire, un en étoile et l'autre en triangle (Figure 4-6) [80].

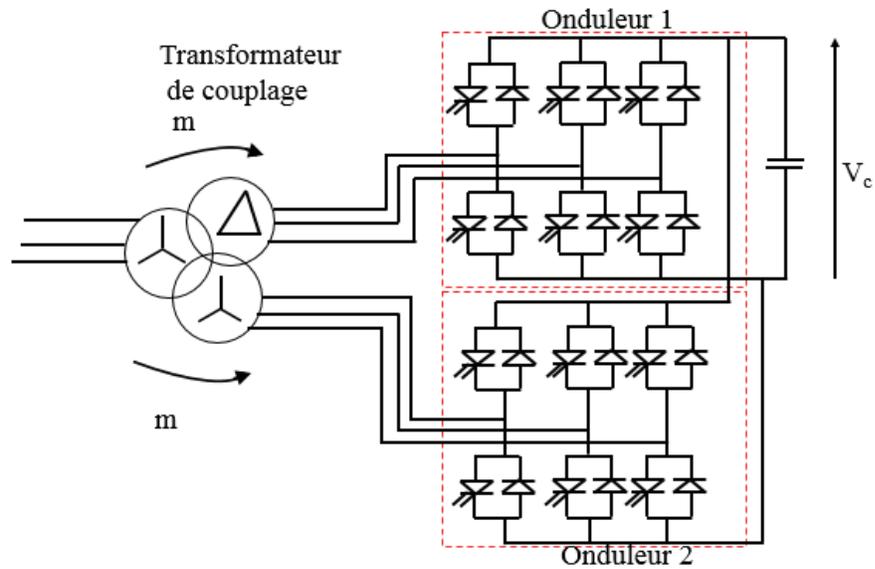


Figure 4-6 Association d'onduleurs en parallèle

#### 4.6 Association série d'onduleurs de tension

La mise en série se fait en utilisant un transformateur sommateur : un onduleur est connecté en série avec le primaire de ce transformateur, l'autre en étoile avec son secondaire. Un transformateur étoile- triangle est utilisé pour le couplage avec le réseau (Figure 4-7) [81].

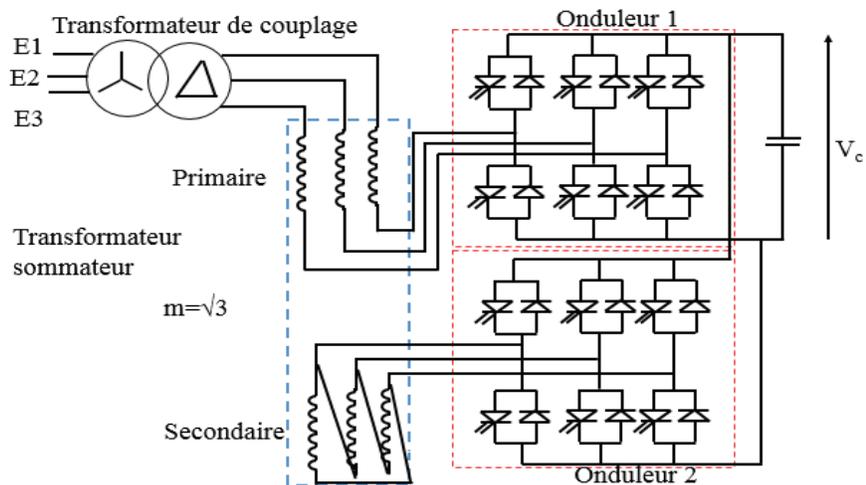


Figure 4-7 Association d'onduleurs en série

Les onduleurs sont commandés en pleine onde. La connexion série ou parallèle n'a pas d'influence sur le taux de distorsion harmonique. Il est identique dans les deux cas. Toutefois, la différence réside dans les contraintes sur les composants.

Le courant qui traverse les cellules GTO-Diode est plus important pour la structure parallèle que dans la structure série.

Pour une inductance de fuite d'un transformateur donné, la tension aux bornes du condensateur sera plus faible pour une structure série que pour une structure parallèle.

La structure série semble plus avantageuse, mais demande deux transformateurs.

#### 4.7 Onduleurs multi-niveaux

Le principe est d'insérer des capacités chargées pour reconstituer la tension de sortie de l'onduleur désirée. Ainsi donc on s'affranchit de la nécessité d'un couplage magnétique et par conséquent du transformateur. Le transformateur de couplage étant encombrant et coûteux au niveau des pertes et de son investissement.

##### 4.7.1 Convertisseur à onduleur Clampé par le Neutre (NPC)

Une des structures de référence dans la conversion multiniveaux est le convertisseur NPC 3 niveaux (Neutral Point Clamped) (Figure 4-8) [82].

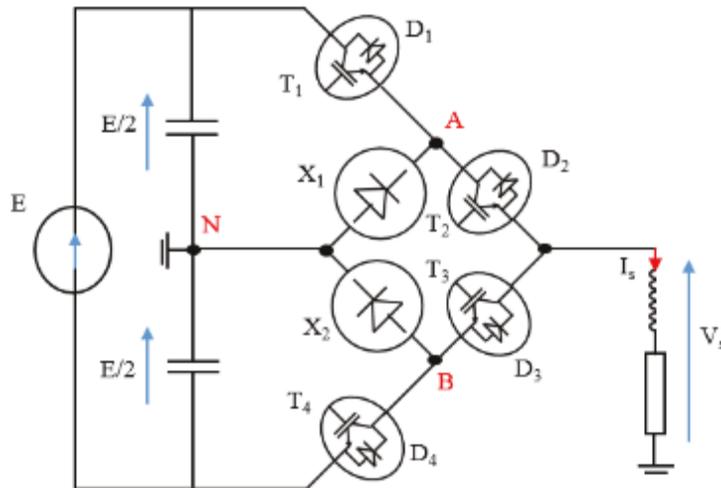


Figure 4-8 Convertisseur à onduleur NPC 3 niveaux

Ce convertisseur utilise la mise en série d'interrupteurs et la répartition de la tension aux bornes des interrupteurs. L'état bloqué est réalisé avec des diodes connectées au point milieu (N). Ces diodes de clamp permettent d'assurer une tension de blocage à  $E/2$  aux points A et B.

Les niveaux de tension en sortie réalisables sont au nombre de 3 :  $-E/2$ , 0 et  $E/2$ .

Les possibilités pour réaliser les différents niveaux sont résumées dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 Réalisation des différents niveaux pour l'onduleur NPC 3N

Tension de sortie	Interrupteur passants	Sens du courant	Le courant circule dans.....
E/2	T1 et T2	$I_s > 0$	T1 et T2
		$I_s < 0$	D1 et D2
0	T2 et T3	$I_s > 0$	X1 et T2
		$I_s < 0$	X2 et T3
-E/2	T3 et T4	$I_s > 0$	D4 et D3
		$I_s < 0$	T4 et T3

Les interrupteurs T1 et T3 (respectivement T2 et T4) sont commandés de manière complémentaire. Tous les interrupteurs ne sont pas actifs pendant la totalité de la période de modulation : Deux interrupteurs sur quatre sont dans un état bloqué :

- ✓ Si la modulante est positive, alors l'interrupteur T2 est toujours passant et T4 bloqué;
- ✓ Si T1 est amorcé alors l'interrupteur T3 doit être bloqué, la tension en sortie est alors E/2. Si T1 est à l'état OFF et T3 est ON, la tension de sortie est égale à 0V;
- ✓ De même si le signal modulant est négatif, les interrupteurs figés sont T1 à l'état bloqué et T3 à l'état passant;

✓ Si T2 est amorcé et T4 bloqué alors la tension de sortie est fixée à 0V et si T2 est à l'état OFF et T4 est ON, la tension de sortie est égale à  $-E/2$ .

Avec une structure NPC, il est possible de réduire les pertes globales dans les différents interrupteurs, mais ces pertes ne sont pas bien réparties dans les différents composants semi-conducteurs. Néanmoins, cette structure possède comme inconvénient majeur l'équilibrage du point milieu. Celui-ci est réalisé la plupart du temps par un pont diviseur capacitif. Dans le cas d'une utilisation d'un onduleur NPC 3 niveaux monophasé, le potentiel du point milieu peut avoir une grande ondulation. De plus, l'utilisation d'un NPC supérieur ou égal à 4 niveaux entraîne une divergence des tensions aux bornes des condensateurs. Pour résoudre ces problèmes, il existe plusieurs solutions telles que l'utilisation d'un contrôleur actif ou l'implantation d'une structure dédiée à l'équilibrage de ces tensions de condensateurs. Mais ces solutions deviennent de plus en plus complexes et rajoute des coûts supplémentaires au convertisseur.

#### 4.7.2 Convertisseur à onduleur Clampé Activement par le Neutre (ANPC)

Une variante de la structure NPC est le convertisseur Active-NPC (ANPC) (Figure 4-9) [83].

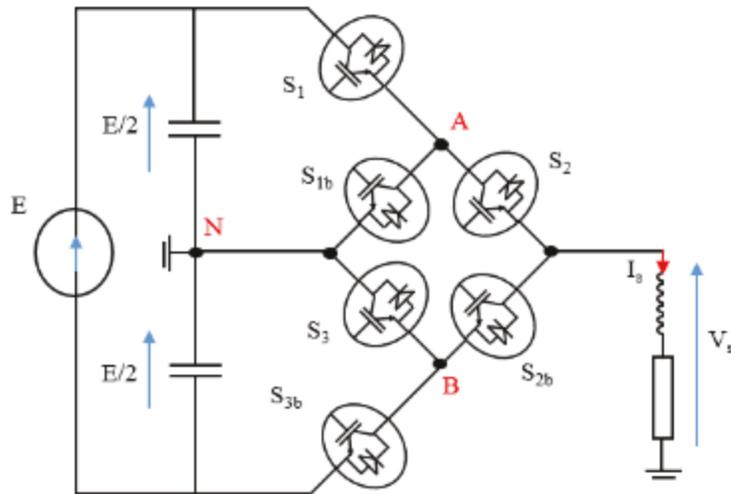


Figure 4-9 Onduleur ANPC 3 niveaux

Dans cette structure, les diodes de clamp sont remplacées par des interrupteurs trois segments (IGBT et diode en parallèle). Les pertes dans les interrupteurs pour un convertisseur NPC ne sont pas correctement réparties dans les différents composants semi-conducteurs. Dans le cas où tous les composants sont installés sur le même système de refroidissement, les températures de jonction n'ont pas les mêmes valeurs et les performances sont limitées par le composant possédant la température de jonction la plus haute. Ajouter des interrupteurs composés d'IGBT en parallèle avec une diode permet à cette structure d'avoir plusieurs modes de commande et ainsi une possibilité de choisir le type de modulation pour équilibrer ces pertes [30].

#### 4.7.3 Convertisseur à onduleur Multicellulaire Série (FC)

Le principe du convertisseur à onduleur multicellulaire série FC (Flying Capacitor) est la mise en série de cellule de commutation. Les cellules sont connectées entre elles par une source de tension. Ceci permet d'avoir une tension multiniveau ainsi que d'autres propriétés intéressantes.

#### 4.7.3.1 Convertisseur à onduleur à 2 Cellules (FC 3N)

Le convertisseur à onduleur FC à 2 cellules (Figure 4-10) est composé d'une mise en série de deux cellules de commutation par l'intermédiaire d'une source de tension. Cette source de tension est réalisée par un condensateur flottant[84].

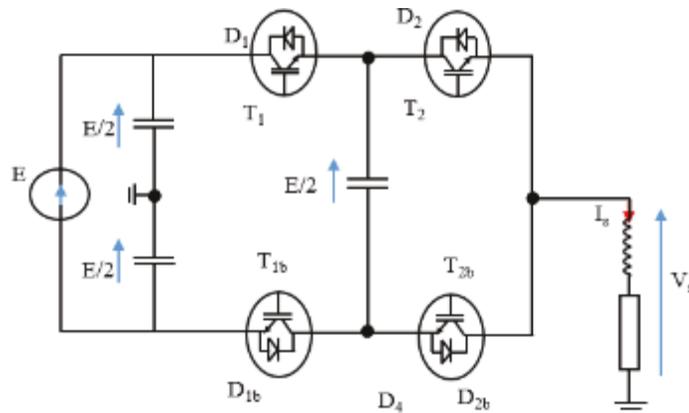


Figure 4-10 Convertisseur à onduleur FC 3 niveaux

Pour éviter de court-circuiter les sources de tension, les interrupteurs  $T_1$  et  $T_{1b}$ , ou  $T_2$  et  $T_{2b}$  doivent être commandés de manière complémentaire. Ces deux couples d'interrupteurs forment alors deux cellules de commutation.

Cette structure permet d'avoir trois niveaux de tension en sortie  $-E/2$ ,  $0$  et  $E/2$ . Les différentes possibilités sont résumées dans le Tableau 4-2

Tableau 4-2 Réalisation des différents niveaux par l'onduleur FC 3N

Tension de sortie	Interrupteurs passants	Sens du courant	Interrupteur de conduction du courant
E/2	T1 et T2	$I_s > 0$	T1 et T2
		$I_s < 0$	D1 et D2
0	T1 et T2b	$I_s > 0$	T1 et D2b
		$I_s < 0$	D1 et T2b
	T1b et T2	$I_s > 0$	D1b et T2
		$I_s < 0$	T1b et T2
-E/2	T1b et T2b	$I_s > 0$	D1b et D2b
		$I_s < 0$	T1b et T2b

Les sources de tension sont soit égales à E ou à E/2, celles-ci imposent la contrainte en tension sur les différents interrupteurs.

Comme pour la structure NPC 3 niveaux, cette structure permet d'avoir 3 niveaux de tension distincts. Mais l'avantage de cette structure est d'avoir une bonne qualité de la tension découpée en sortie ainsi qu'une ondulation de courant plus faible que pour un onduleur NPC

3 niveaux. Cette propriété est assez intéressante en termes de filtrage car elle permet d'avoir une réduction du volume des composants du filtre de sortie.

Au niveau des pertes, même si tous les interrupteurs commutent à la fréquence de découpage, elles sont équivalentes aux pertes dans l'onduleur NPC pour des formes d'ondes en sortie identiques.

#### 4.7.3.2 Convertisseur à onduleur multicellulaire série à $p$ cellules

S'il est possible de mettre en série deux cellules de commutation, il est alors possible de mettre en série  $p$  cellules de commutation. Les deux interrupteurs de la cellule de commutation ont des commandes complémentaires pour éviter les courts-circuits des sources de tension. La mise en série de  $p$  cellules de commutation impose de placer dans la structure  $(p - 1)$  condensateurs flottants[85].

L'utilisation d'une cellule de commutation permet d'avoir une variation de la tension entre deux niveaux de  $E$ . Avec la structure précédente, le FC 3 niveaux, la variation entre 2 niveaux est égale à  $E/2$ . L'extension pour une structure multicellulaire série à  $p$  cellules permet d'avoir une variation de tension de sortie entre deux niveaux de  $E/p$ . Il en est de même pour la tenue en tension des IGBT, chaque composant semi-conducteurs doit bloquer une tension égale à  $E/p$ .

Pour avoir une tension multiniveau de bonne qualité il est nécessaire que les tensions aux bornes des différentes sources flottantes soient équilibrées

#### 4.7.4 Convertisseur à onduleur Multicellulaire Superposé (SMC)

Cette structure est une évolution du convertisseur multicellulaire série [32].

#### 4.7.4.1 La Cellule 3 Niveaux (SMC1x2)

La cellule élémentaire du convertisseur multicellulaire est composée de 4 ou 6 interrupteurs (Figure 4-11).

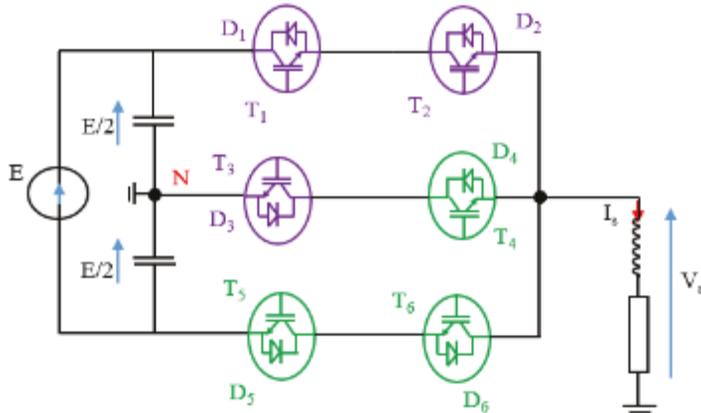


Figure 4-11 Onduleur SMC1x2 3 niveaux

Les branches extérieures sont composées de deux interrupteurs 3 segments. La mise en série d'interrupteurs est nécessaire pour la tenue en tension. La tenue en tension de l'ensemble des différents interrupteurs est  $E/2$ . Doubler les interrupteurs, n'augmente pas les pertes par commutation, car un seul des deux interrupteurs commute à la fréquence de découpage, l'autre ne commutant uniquement que deux fois par période de modulation. La branche du milieu est composée de deux interrupteurs placés en opposition. Pour ces interrupteurs la tenue en tension maximale est égale à  $E/2$ . Ils n'ont pas besoin d'être doublés.

Comme pour le NPC 3 niveaux, la commande se sépare en deux parties :

✓ Pendant l'alternance positive de la modulante, les interrupteurs T2 et T4 restent fermés alors que T5 et T6 restent en position OFF. Pour avoir la tension de sortie égale à  $E/2$ , T1 doit être en position ON alors que T3 doit être bloqué. Au contraire T3 doit être amorcé et T1 en position OFF pour avoir le niveau 0.

✓ Pendant l'alternance négative, T3 et T5 doivent être passants alors que T1 et T2 sont en position OFF. Pour avoir en sortie le niveau 0, l'interrupteur T4 doit être passant alors que T6 doit être en position OFF. Pour le niveau  $-E/2$ , l'interrupteur T5 doit être passant alors que T6 est OFF.

Il y a donc 2 couples d'interrupteurs commandés de manière complémentaire : T1 et T3, et T4 et T6. Chaque interrupteur découpe au maximum pendant une moitié de période de modulation comme pour le NPC 3 niveaux. Le passage du courant dans chaque interrupteur se fait soit par l'IGBT soit par la diode, cela dépend du signe du courant. Le .

Tableau 4-3 résume les différentes conductions des différents composants semi-conducteurs en fonction du signe du courant de sortie et du niveau désiré.

Tableau 4-3 Réalisation des différents niveaux pour SMC1 x2 3NG

Tension de sortie	Interrupteurs passants	Sens du courant	Interrupteur de conduction du courant
E/2	T1 et T2	$I_s > 0$	T1 et T2
		$I_s < 0$	D1 et D2
0	T3 et T4	$I_s > 0$	D3 et T4
		$I_s < 0$	T3 et D4
-E/2	T5 et T6	$I_s > 0$	D5 et D6
		$I_s < 0$	T5 et T6

Le comportement de cette structure est similaire au NPC 3 niveaux. En termes de pertes, les deux structures sont équivalentes. Les formes d'ondes sont également identiques. Ce principe a deux évolutions possibles. La première est une extension verticale avec la mise en série de plus de deux condensateurs pour réaliser le pont diviseur capacitif. Or, avec une extension verticale supérieure ou égale à 3 condensateurs, les tensions aux bornes de ceux-ci ne sont pas équilibrées naturellement. C'est pour ça que la revue se limite dans la littérature à deux étages. L'autre extension possible pour cette structure est d'utiliser le principe du convertisseur multicellulaire série, en mettant en série plusieurs cellules 3 niveaux en plaçant entre chacune deux condensateurs flottants.

#### 4.7.4.2 Convertisseur SMC $px2$

Le convertisseur multicellulaire superposé  $px2$  (SMC $px2$ ) est une mise en série de structures SMC $1x2$ . Comme dans le cas du FC, les cellules sont connectées entre elles par des condensateurs flottants.

Un avantage des structures multicellulaires superposées est une réduction de l'énergie stockée dans les condensateurs flottants. En effet, lorsque le nombre de cellules devient trop important pour un convertisseur FC, la tension du condensateur le plus proche du bus d'entrée tend à avoir la même tension que le bus continu. Dans le cas du SMC, chaque tension aux bornes des condensateurs est divisée par 2 par rapport au convertisseur multicellulaires série.

Ce qui permet de diminuer le volume des condensateurs car l'énergie stockée dans ceux-ci est moindre que pour un convertisseur multicellulaire série.

## 4.8 Conclusion

Les structures des onduleurs dans les convertisseurs multiniveaux se sont développées suite à la limitation des composants semi-conducteurs. Pour des applications à moyenne ou haute tension, elles restent encore une solution pour assurer la conversion tout en assurant la tenue en tension des composants.

La structure la plus commune et aussi historiquement est le NPC. Cette structure est appréciée car sa mise en œuvre est simple et possède beaucoup d'applications. Elle reste cependant contraignante quand on souhaite faire une extension pour avoir en sortie plus de niveaux de tension.

Alors que les structures comme le NPC ou l'ANPC utilisent le fractionnement de la tension du bus continu, les convertisseurs multicellulaires utilisent des sources de tension flottantes. Ces structures sont intéressantes pour leurs caractéristiques en sortie. Néanmoins l'énergie stockée dans les différents condensateurs flottants est une limitation à l'extension de cette structure vers plus de niveaux. Le principal avantage des convertisseurs multicellulaires superposés est de diminuer cette énergie stockée en superposant plusieurs FC. De plus, il permet de réduire les pertes par rapport à cette dernière structure. Par contre cette structure est gourmande en composants même si ceux-ci ne commutent pas tous à la fréquence de découpage et pendant toute la période de modulation. Afin de comprendre le fonctionnement des différents éléments constituant les convertisseurs pour une bonne utilisation sur les réseaux CGDI, une étude théorique est détaillée dans le chapitre suivant.

## Chapitre 5 - Études théoriques des onduleurs multiniveaux

### 5.1 Introduction

Les structures de conversion multiniveaux sont devenues une des solutions utilisées pour la conversion d'énergie de fortes puissances dans le milieu industriel. Il est possible de trouver ces convertisseurs dans des applications très variées. Si le domaine d'application des structures multiniveaux est très varié, les structures de conversion sont elles aussi très différentes. Ceci est dû aux différentes propriétés des structures de base de la conversion multiniveaux qui peuvent être déterminantes dans leurs choix pour une application donnée.

A partir des principes de base de la construction de structure de conversion multiniveaux, de nouvelles structures peuvent être mises en œuvre, soit en faisant évoluer celles-ci dans leur propre famille, soit en mariant deux familles. Ce qui permet d'avoir une nouvelle structure possédant des propriétés des deux familles.

Parmi les topologies d'onduleurs multiniveaux, on distingue l'onduleur multiniveaux à potentiels distribués NPC (Neutral Point Clamped), l'onduleur multiniveaux cascadié en ponts "H" et l'onduleur multiniveaux à cellules imbriquées [86].

L'onduleur NPC et l'onduleur cascadié sont les topologies les plus répandues dans les applications de STATCOM, nous nous intéresserons plus à ces deux topologies.

### 5.2 Onduleurs multiniveaux à potentiels distribués NPC (Neutral Point Clamped)

#### 5.2.1 Onduleur à trois niveaux de tensions de type NPC

##### 5.2.1.1 Structure

En général pour les convertisseurs multiniveaux le nombre de niveaux  $N$  est donné par  $N = P + 1$ , avec  $P$  le nombre de paires d'interrupteurs complémentaires par phase. Le nombre

de niveaux se calcule dans le cas d'onduleur NPC par  $N = \frac{m}{2} + 1$ , avec  $m$  le nombre d'interrupteurs par phase [87].

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur la Figure 5-1. Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série ( $C_1$  et  $C_2$ ), formant un point milieu noté (0) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu vaut  $V_{dc}$ ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $\frac{V_{dc}}{2}$  à leurs bornes.

Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés ( $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$  et  $S_{a4}$  pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'association classique d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

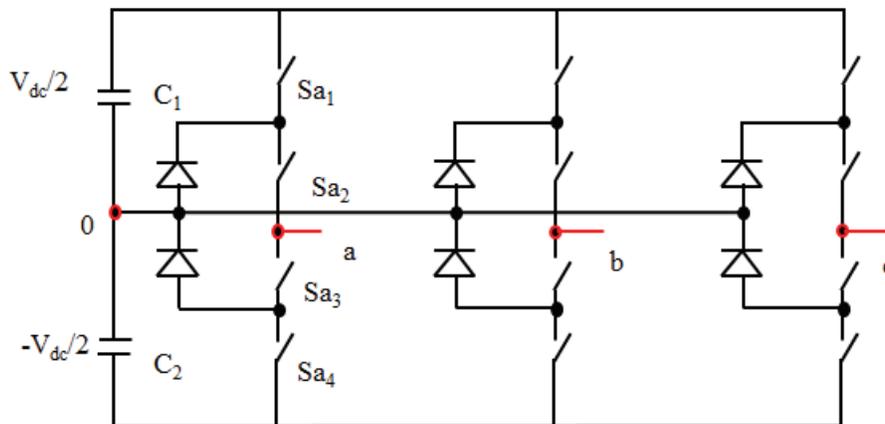


Figure 5-1 Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux

### 5.2.1.2 Principe de fonctionnement

Pour des raisons de simplicité, l'étude a été limitée à un bras d'onduleur NPC de trois niveaux, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension  $V_{ao}$  pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conceptions des interrupteurs.

Le sens positif ou négatif des courants  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  et  $I_{d0}$  fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur (Figure 5-2). Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant.

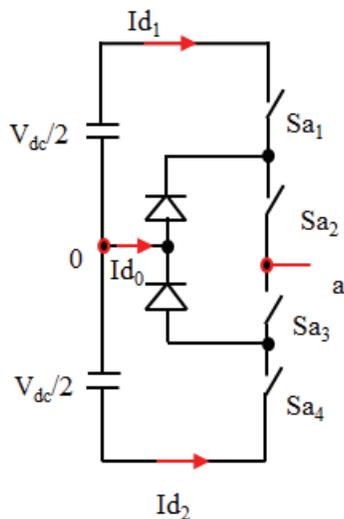


Figure 5-2 Bras d'un onduleur NPC à 3 niveaux

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possibles permettant de générer les N niveaux de tensions. Particulièrement pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement:

- Séquence 1 avec une génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a2}$  sont passants et  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$  sont bloqués comme le montre la Figure 5-3a et la tension de sortie  $V_{ao}$  est:  $V_{ao} = +\frac{V_{dc}}{2}$

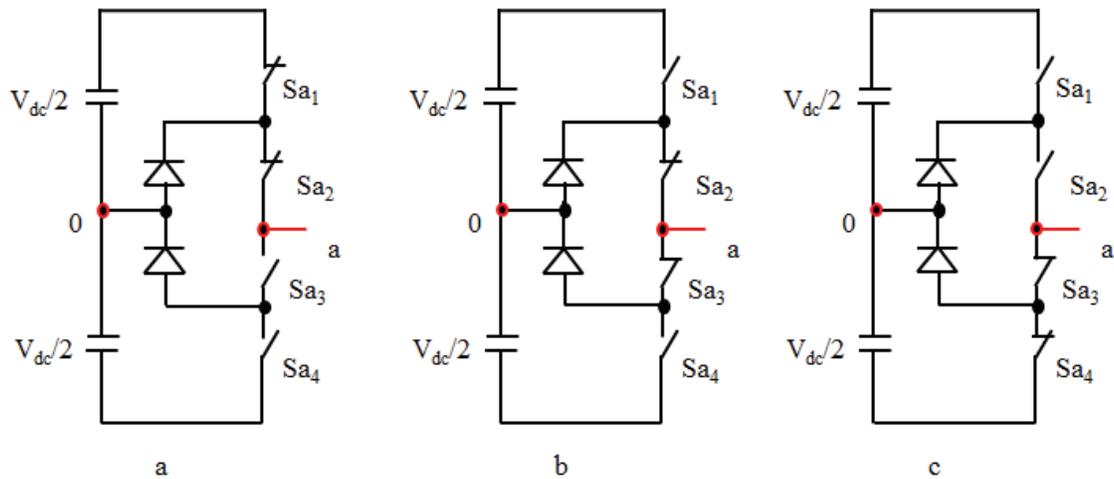


Figure 5-3 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux

- Séquence 2 avec une génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$  sont passants et  $S_{a1}$  et  $S_{a4}$  sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point 0 à travers l'une des diodes de maintien, comme l'indique la Figure 5-3b et la tension de sortie  $V_{ao}$  est donc nulle,  $V_{ao} = 0$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a4}$  vaut  $+\frac{V_{dc}}{2}$

- Séquence 3 avec une génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a2}$  sont bloqués et  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$  sont passants comme le montre la Figure 5-3 et la tension de sortie  $V_{ao}$  vaut  $-\frac{V_{dc}}{2}$

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $S_{a1}$  et  $S_{a2}$  vaut  $+\frac{V_{dc}}{2}$

Les trois séquences peuvent être résumées sur le tableau 5-1

Tableau 5-1 État de l'onduleur NPC trois niveaux

$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$	$V_{ao}$
1	1	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$
0	0	1	1	0
0	1	1	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$

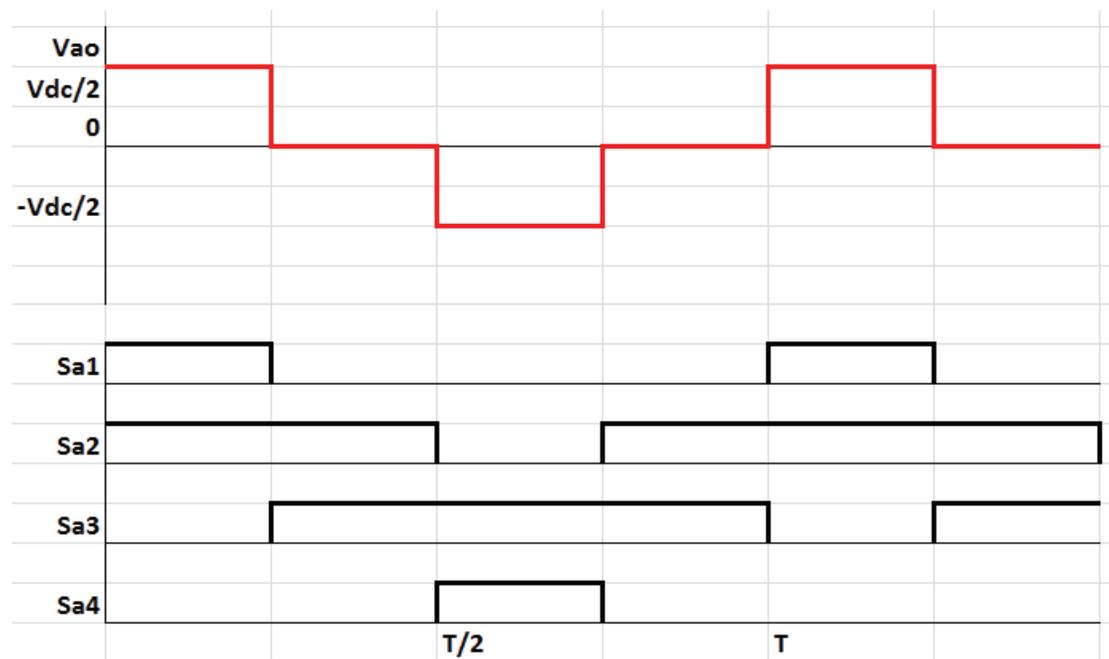


Figure 5-4 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC trois niveaux

Le temps de conduction de chaque interrupteur est réduit par rapport à celui des interrupteurs d'un convertisseur classique à deux niveaux, chaque interrupteur bloque une tension de  $\frac{V_{dc}}{2}$  dans le cas NPC à trois niveaux au lieu de  $V_{dc}$  pour l'onduleur classique deux niveaux. A chaque changement de niveau de tension, on a deux interrupteurs qui commutent.

## 5.2.2 Onduleur à cinq niveaux de type NPC

### 5.2.2.1 Structure

Chaque phase de l'onduleur triphasé NPC à cinq niveaux de tensions est composée de huit interrupteurs commandés qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant (il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle) et de six diodes de maintien connectées tout au long du bus continu.

L'onduleur est alimenté par une source continue  $E$  et quatre condensateurs de valeurs égales se partagent pour donner quatre sources distinctes de tension  $\frac{V_{dc}}{4}$ .

La structure triphasée de l'onduleur NPC à cinq niveaux de tensions est présentée sur la Figure 5-5 [88].

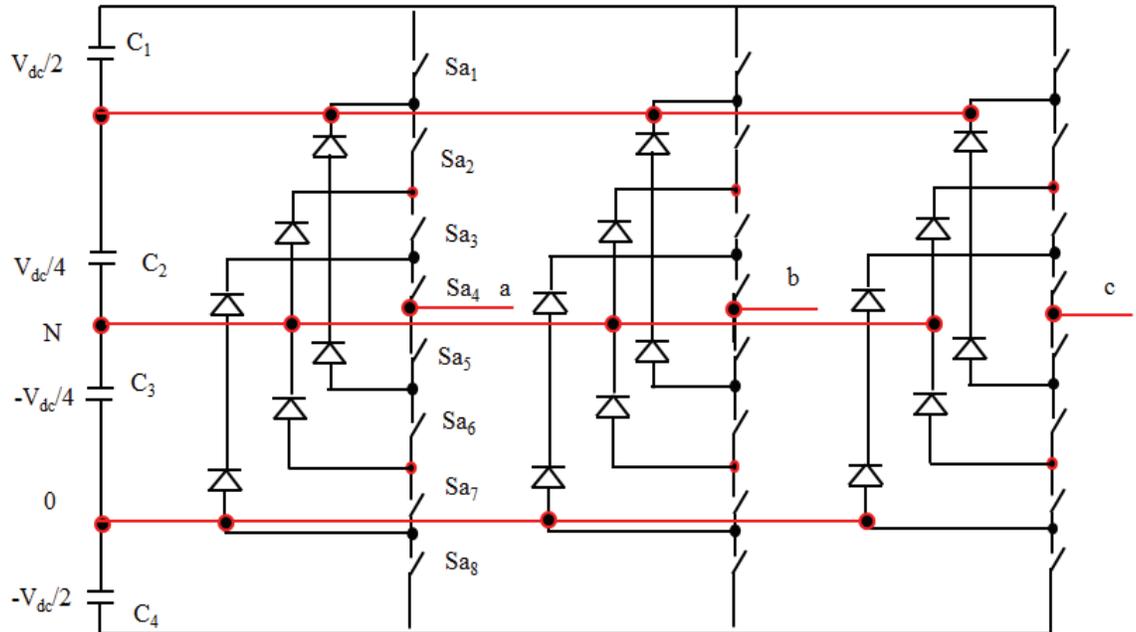


Figure 5-5 Schéma d'un onduleur NPC à 5 niveaux

#### 5.2.2.2 Principe de fonctionnement

Nous avons limité l'étude à un bras d'onduleur NPC de cinq niveaux. L'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension  $V_{ao}$  pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences d'induction des interrupteurs. Dans ce cas, nous avons cinq séquences de fonctionnement possible :

- Séquence 1:  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$  sont passants et  $S_{a5}$ ,  $S_{a6}$ ,  $S_{a7}$  et  $S_{a8}$  sont bloqués. Alors, le point a est relié directement à la borne positive du premier étage de tension.

$\frac{V_{cd}}{2}$  et le point 0 est relié à la borne négative du deuxième étage de tension ce qui implique que la tension de sortie vaut:  $V_{ao} = + \frac{V_{dc}}{2}$

- Séquence 2:  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$ ,  $S_{a5}$  sont passants et,  $S_{a6}$ ,  $S_{a7}$  et  $S_{a8}$ ,  $S_{a1}$  sont bloqués, on a: la tension de sortie  $V_{ao} = + \frac{V_{dc}}{4}$

Séquence 3:  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$ ,  $S_{a5}$  et  $S_{a6}$  sont passants et  $S_{a7}$ ,  $S_{a8}$ ,  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$  sont bloqués, on a:

la tension de sortie :  $V_{ao} = 0$

• Séquence 4:  $S_{a4}$ ,  $S_{a5}$ ,  $S_{a6}$ ,  $S_{a7}$  sont passants et  $S_{a8}$ ,  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$  sont bloqués, on a: la

tension de sortie :  $V_{ao} = -\frac{V_{dc}}{4}$

• Séquence 5:  $S_{a5}$ ,  $S_{a6}$ ,  $S_{a7}$ ,  $S_{a8}$  sont passants et  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$  sont bloqués, on a: la

tension de sortie  $V_{ao} = -\frac{V_{dc}}{2}$

Tableau 5-2 États possibles de l'onduleur H bridge à 5 niveaux

$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$	$S_{a5}$	$S_{a6}$	$S_{a7}$	$S_{a8}$	$V_{ao}$
1	1	1	1	0	0	0	0	$V_{dc}/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$V_{dc}/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	- $V_{dc}/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	- $V_{dc}/2$

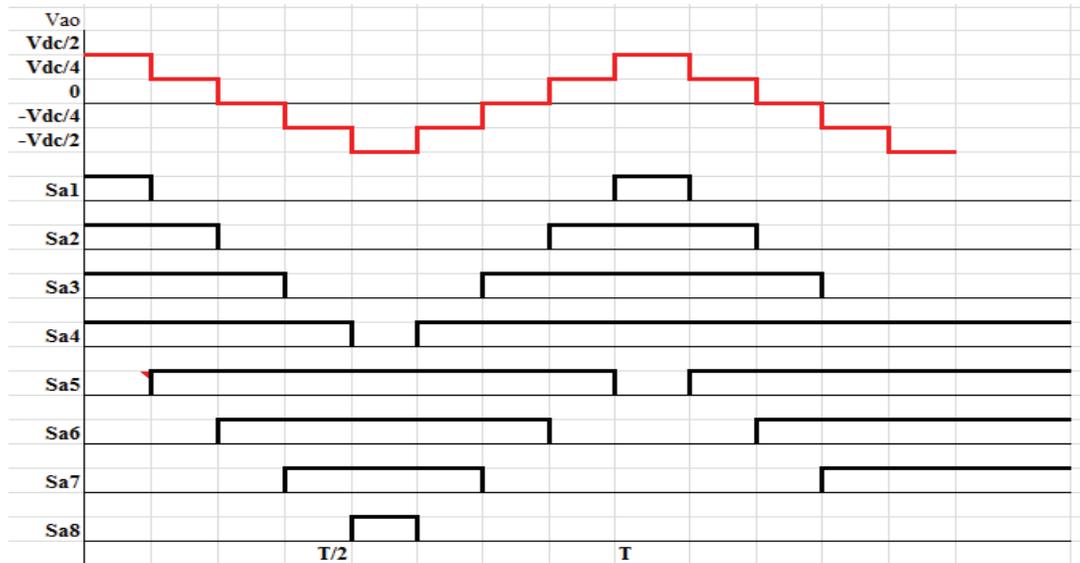


Figure 5-6 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC 5niveaux

On remarque que plus le nombre de niveaux augmente plus la tension de sortie en forme d'escalier possède de paliers. Ceci permet de mieux approcher la sinusoïde. Donc la tension de sortie du convertisseur NPC 5 niveaux est meilleure du point de vue taux de distorsion harmonique que celle d'un NPC à trois niveaux. Un autre avantage du NPC à cinq niveaux est que les interrupteurs commandés bloquent une tension  $V_k = + \frac{V_{dc}}{4}$  deux fois plus faible que celle bloquée par les interrupteurs du convertisseur à trois niveaux ( $V_k = + \frac{V_{dc}}{2}$ ). On a deux commutations à chaque changement de niveau de la tension de sortie [81].

### 5.2.3 Généralisation de la structure NPC à N niveaux de tension

#### 5.2.3.1 Structure

En se basant sur l'étude faite sur les onduleurs de tension de type NPC à trois et à cinq niveaux, on peut étendre notre étude à des convertisseurs à N niveaux de tensions de type NPC. Pour un onduleur à N niveaux, le nombre des éléments constituant sa topologie

notamment les condensateurs C, les interrupteurs K (par phases) et les diodes de bouclage ou de maintien D (par phase) sont régis par les relations [89]:

$$C=N-1; K=2(N-1); D=2(N-2)$$

Pour un convertisseur NPC à N niveaux de tension, nous avons N-1 interrupteurs commandes complémentaires par phases. En outre, nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions [90].

### 5.3 Onduleur multiniveaux cascadié en ponts "H"

Le nombre de niveaux d'onduleur à ponts en 'H' cascadié se calcule par  $N = 2N_H + 1$ , avec  $N_H$  nombre de ponts par phase [91].

#### 5.3.1 Onduleur à trois niveaux de type Cascade en pont H

##### 5.3.1.1 Structure

La structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleur monophasé (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur Figure 5-7 [92].

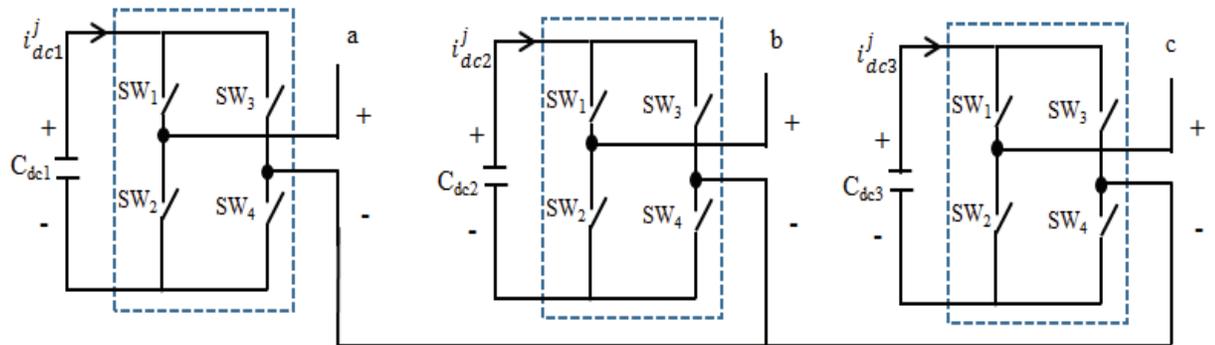


Figure 5-7 Schéma triphasé d'un onduleur cascade en pont H à 3 niveaux

Les cellules  $y$  sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle. Chaque cellule de l'onduleur est alimentée par une source continue  $C_d$  et est composée de quatre interrupteurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'association classique d'un transistor et d'une diode en antiparallèle (Figure 5-8). Les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série.

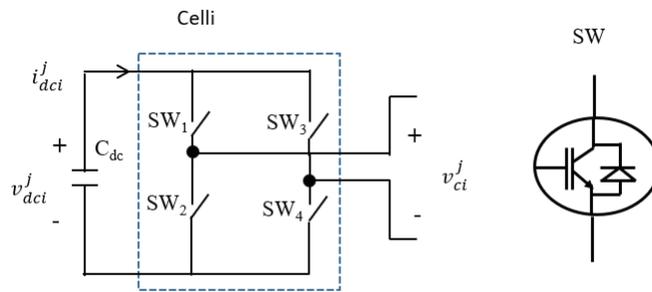


Figure 5-8 Schéma d'une cellule d'onduleur

### 5.3.1.2 Principe de fonctionnement

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure cascade en pont H à trois niveaux de tension, nous nous sommes servis de la structure monophasée (Figure 5-9). La structure d'un bras d'onduleur trois niveaux de type cascade en pont H est identique à celui d'un onduleur classique monophasé en pont complet. Cependant la technique de commande est différente. Cette différence permettra d'avoir les trois niveaux de tension[93].

L'objectif visé est donc de déterminer les valeurs que peuvent prendre la tension  $V_{ci}$  pour les différents états possibles des interrupteurs, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs. Nous avons trois séquences de fonctionnement possible:

- Séquences 1 avec une génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs  $SW_1$  et  $SW_4$ , sont passants et  $SW_2$  et  $SW_3$  sont bloqués comme le montre la Figure 5-9 a. et la tension de sortie  $V_{ci} = +V$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $SW_2$ ,  $SW_3$  vaut:  $V_{SW2} = V_{SW3} = +V$ .

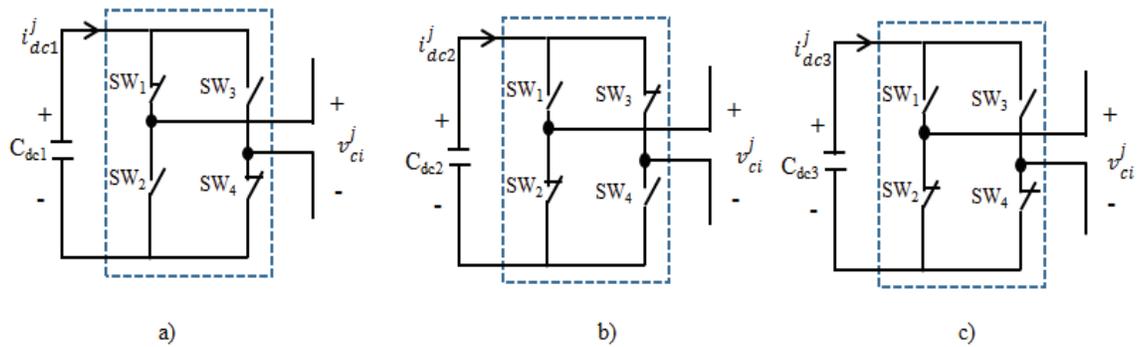


Figure 5-9 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en H

- Séquences 2 avec une génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs  $SW_2$ , et  $SW_4$  sont passants et  $SW_1$ ,  $SW_3$  sont bloqués comme le montre Figure 5-9c. Et la tension de sortie  $V_{ci} = 0$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $SW_1$ ,  $SW_3$  vaut:  $V_{sw1} = V_{sw3} = +V$ .

- Séquences 3 avec une génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs  $SW_1$  et  $SW_4$  sont bloqués et  $SW_2$ ,  $SW_3$  sont passants comme le montre la Figure 5-9 b. Et la tension de sortie  $V_{ci} = -E$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs  $SW_1$  et  $SW_4$  vaut:  $V_{sw1} = V_{sw4} = +E$ .

Les séquences de commutation sont résumées sur Tableau 5-3.

Tableau 5-3 État de l'onduleur cascade trois niveaux

SW1	SW2	SW3	SW4	V <sub>ci</sub>
1	0	0	1	+V
0	1	0	1	0
0	0	1	1	-V

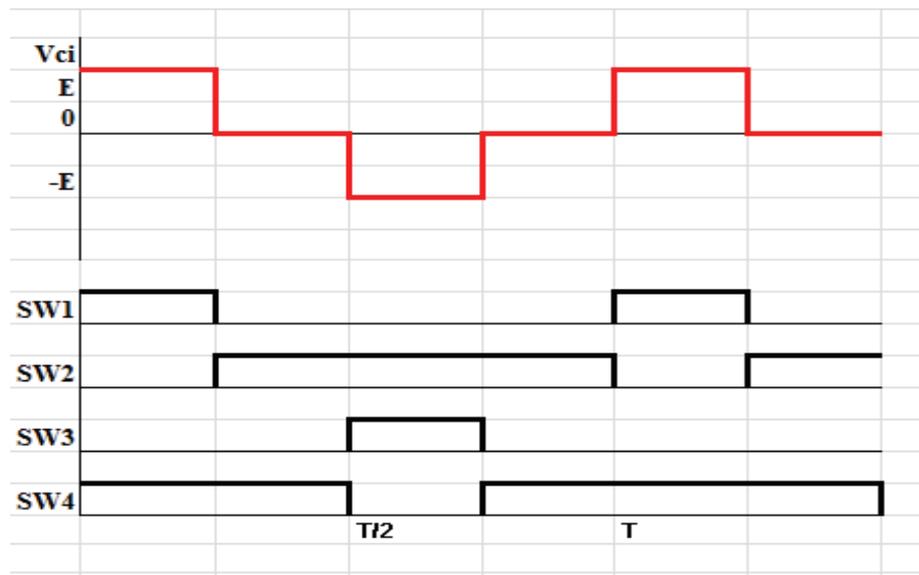


Figure 5-10 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type H

A chaque changement de niveau de tension, nous avons un seul interrupteur (IGBT) qui change d'état. Ce qui réduit considérablement les pertes par commutation.

### 5.3.2 Onduleur à cinq niveaux de type cascade en pont H

#### 5.3.2.1 Structure

La structure d'un convertisseur à cinq niveaux basés sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la Figure 5-11[94].

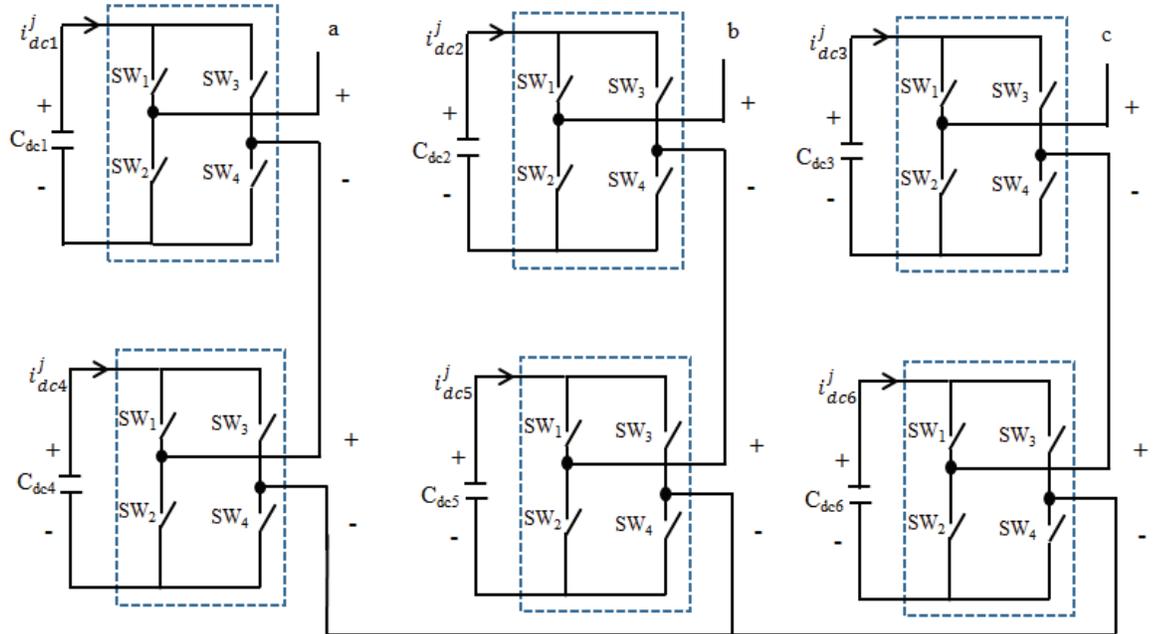


Figure 5-11 Schéma d'un onduleur cascade en H à 5 niveaux

#### 5.3.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du convertisseur cascade en pont H à cinq niveaux de tension sera illustré par la structure monophasée de la Figure 5-12[95].

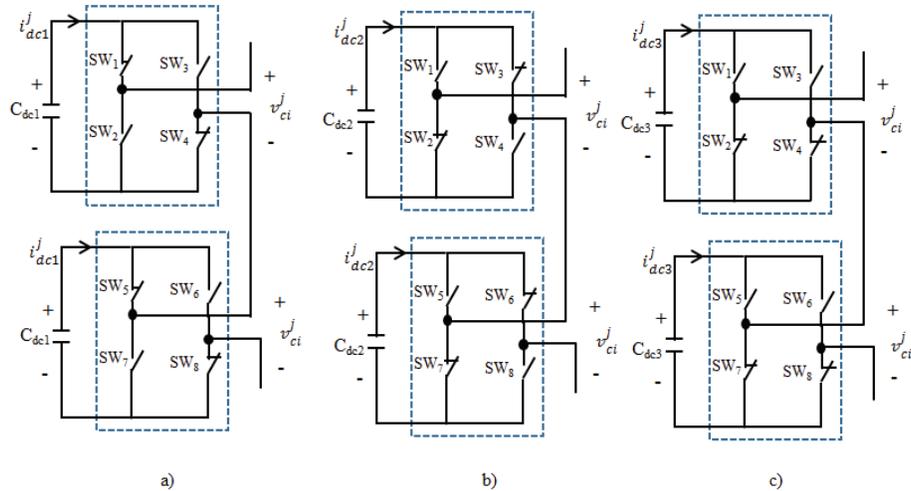


Figure 5-12 Pont H 5 niveaux : Principe et exemples de mécanisme de commutation a-)

Génération de  $V_{ci} = +2V$ , b) Génération de  $V_{ci} = -2V$ , c) Génération de  $V_{ci} = 0$

La structure d'un bras d'onduleur cinq niveaux de type cascade en pont H est l'association en cascade de deux onduleurs classiques monophasés en pont complet. De telle sorte que la tension à la sortie de l'onduleur obtenue soit la somme des tensions de sortie des deux onduleurs classiques.

Nous avons les cinq séquences de fonctionnement suivant pour le convertisseur cascade en pont H à cinq niveaux de tensions:

Séquence 1:  $SW_1$ ,  $SW_4$ ,  $SW_5$  et  $SW_8$  sont passants et  $SW_2$ ,  $SW_3$ ,  $SW_6$ , et  $SW_7$  sont bloqués. Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie  $E$  et le second pont monophasé (celui du bas) donne également  $E$  comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascadié H à cinq niveaux de tensions :  $V_{ci} = E + E = 2E$

- Séquence 2:  $SW_1$ ,  $SW_4$ ,  $SW_5$  et  $SW_6$  sont passants et  $SW_2$ ,  $SW_3$ ,  $SW_7$  et  $SW_8$  sont bloqués. On a toujours  $E$  à la sortie du premier pont, mais cette fois  $= 0$  à la sortie du second pont. D'où la tension  $V_{ci} = E$

- Séquence 3:  $SW_2$ ,  $SW_4$ ,  $SW_7$  et  $SW_8$  sont passants et  $SW_5$ ,  $SW_6$ ,  $SW_1$  et  $SW_3$  sont bloqués. On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. La tension de sortie du pont en H obtenue vaut:  $V_{ci} = 0$

- Séquence 4:  $SW_2$ ,  $SW_3$ ,  $SW_6$ , et  $SW_7$  sont passants et  $SW_1$ ,  $SW_4$ ,  $SW_5$ , et  $SW_8$  sont bloqués. Dans ce cas, la tension de sortie est :  $V_{ci} = -E$

- Séquence 5:  $SW_2$ ,  $SW_4$ ,  $SW_5$  et  $SW_6$  sont passants et  $SW_1$ ,  $SW_3$ ,  $SW_7$  et  $SW_8$ , sont bloqués. On a alors la tension de sortie  $V_{ci} = -E - E = -2E$

Les tensions bloquées par les différents interrupteurs au cours des séquences de fonctionnement valent toutes la valeur de  $E$ .

Les cinq états de commutation possibles peuvent être résumés dans le Tableau 5-4

Tableau 5-4 États possibles de l'onduleur cascade à 5 niveaux

SW 1	SW 2	SW 3	SW 4	SW 5	SW 6	SW 7	SW 8	Vc i
1	0	0	1	1	0	0	1	2E
1	0	0	1	0	1	0	1	E
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	- 2E

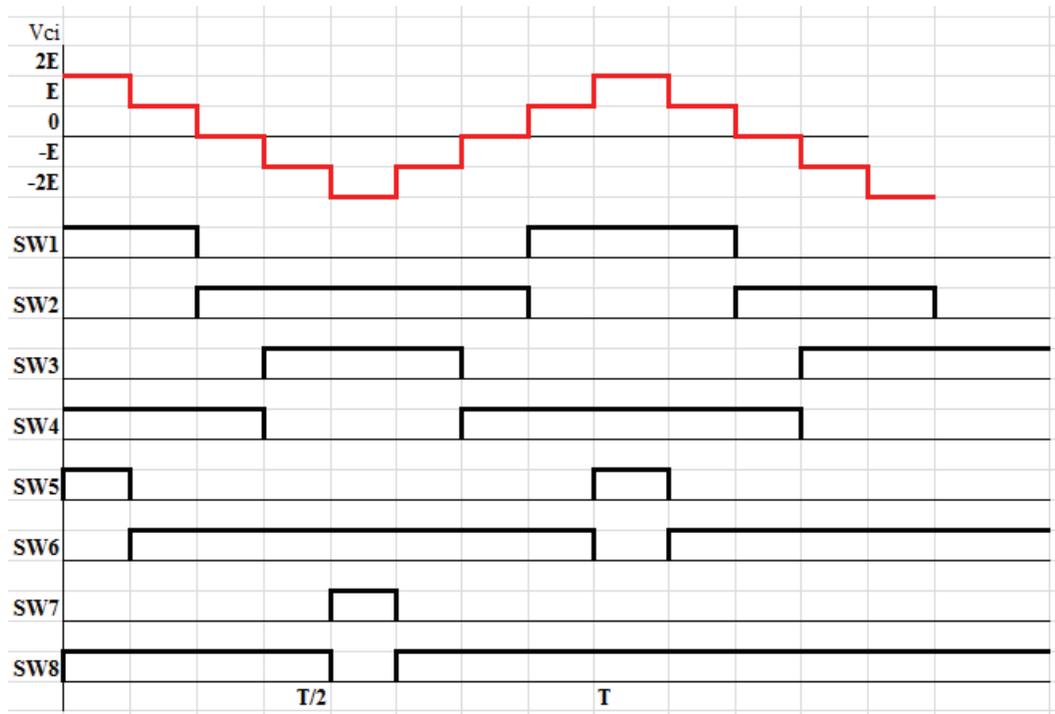


Figure 5-13 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type H 5niveaux

Le signal de la tension de sortie obtenue présente plus de paliers dans ce cas que celui à trois niveaux. Ce qui implique logiquement un signal plus proche d'une sinusoïdale, donc moins de TDH. Un autre point important est qu'à chaque changement de niveau de tension, nous avons deux interrupteurs (IGBT) qui changent d'état alors que dans le cas de l'onduleur trois niveaux on a seulement une seule commutation à chaque changement de niveau. Cependant, par période on a quatre (4) commutations dans le cas cinq niveaux et six (6) commutations dans le cas cascadié trois niveaux [96].

Les pertes par commutation dans le cas du convertisseur cascade en H sont plus réduits.

### 5.3.3 Généralisation de la structure cascade en pont H à N niveaux de tension

#### 5.3.3.1 Structure

La structure triphasée d'un convertisseur de type cascade à N niveaux de tension est présentée à la Figure 5-14. Chaque phase du convertisseur est constituée de  $(N - 1) / 2$  étages de ponts monophasés classiques, ces ponts sont montés en cascade de telle sorte que la tension de sortie de notre onduleur cascade en pont H soit la somme des tensions de sorties de chaque pont monophasé. Aussi, par phase nous avons  $2(N - 1)$  interrupteurs commandés et  $\frac{N-1}{2}$  sources continues [94].

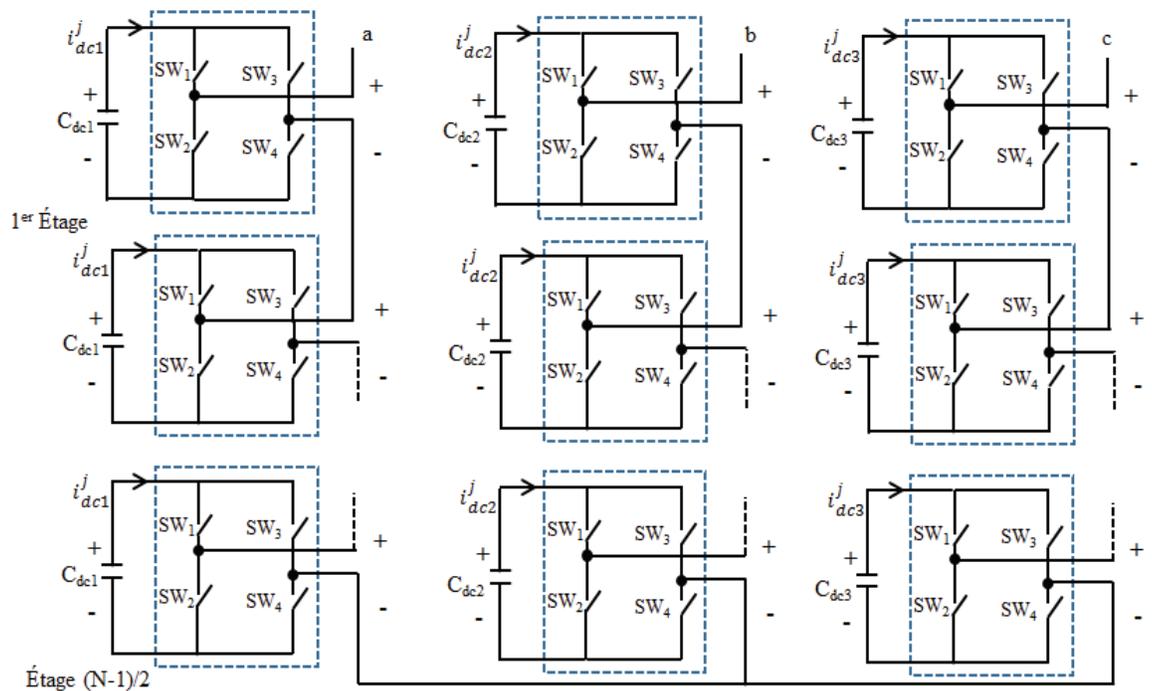


Figure 5-14 Schéma d'un onduleur cascade en pont H à N niveaux

#### 5.3.3.2 Principe de fonctionnement

Dans chaque pont monophasé classique, nous avons deux interrupteurs commandés en complémentaire. Ainsi, le choix des interrupteurs à fermer ou à ouvrir dépendra de la valeur

de la tension de sortie escomptée. Pour obtenir le niveau E de chaque étage, les interrupteurs  $SW_1$  et  $SW_4$  doivent être fermés et les interrupteurs  $SW_2$  et  $SW_4$  ouverts. Ce qui donnera à la sortie du convertisseur cascade en H une tension  $V_{ci} = \frac{N-1}{2} * E$ . Pour le niveau - E de chaque étage  $SW_1$  et  $SW_4$  sont ouverts et  $SW_2$  et  $SW_4$  fermés. Pour le niveau 0 de chaque étage, on ferme deux interrupteurs voisins de bras différents (par exemple  $SW_2$  et  $SW_4$ ) et les deux autres restent ouverts.

Pour les N niveaux de tension du convertisseur cascade en pont H, nous avons combiné différents états de la tension de sortie de chaque étage. Le premier niveau de tension correspond à  $V_{ci} = \frac{N-1}{2} * E$  et le dernier niveau sera  $V_{ci} = - \frac{N-1}{2} * E$  [97].

#### 5.3.4 Calcul du filtre passif du STATCOM

Toutes les topologies basées sur le VSC ont besoin d'un filtre  $L_c$  passif afin d'absorber la tension instantanée résultant de la différence entre le convertisseur et le réseau afin de réduire le contenu harmonique de courant alternatif injecté.

Le modèle dynamique de l'onduleur cascade en pont H peut être obtenu en utilisant la loi de Kirchhoff de circuit. Pour des fins de modélisation, nous supposons que toutes les modules ont la même capacité et que la tension en courant continu et la tension alternative est également partagée entre toutes les cellules. L'application de la loi de tension sur la partie alternative pour la phase d'un STATCOM donne l'équation suivante [98]:

$$L_c \frac{d}{dt} i_c^a + R_c i_c^a + n_c s_c^a v_{dc}^a = v_s^a \quad (5-1)$$

où,  $s_c^a$  est la fonction de commutation du module de la phase A et la résistance  $R_c$  ( série) est la résistance parasite de l' inductance  $L_c$  .

Pour la partie continue, toujours avec la loi de Kirchhoff l'équation dynamique est :

$$s_c^a i_c^a = C_{dc} \frac{d}{dt} v_{dc}^a + \frac{v_{dc}^a}{R_{dc}} \quad (5-2)$$

Où  $R_{dc}$  est une résistance connectée en parallèle au condensateur  $C_{dc}$  qui concentre les pertes globales du côté DC.

Tenant compte de (5-1) et (5-2), le modèle dynamique totale pour la phase A peut être obtenu de la manière suivante :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_c^a = -\frac{R_c}{L_c} i_c^a - \frac{n_c S_c^a v_{dc}^a}{L_c} + \frac{v_s^a}{L_c} \\ \frac{d}{dt} v_{dc}^a = \frac{s_c^a i_c^a}{C_{dc}} - \frac{v_{dc}^a}{R_{dc} C_{dc}} \end{cases} \quad (5-3)$$

Il est important de remarquer que ce modèle peut être facilement étendu aux deux autres phases grâce à la nature unique de phase du pont. Les Transitoires de la source de tension et la puissance de charge sont également inclus dans le modèle. Toutefois, afin de simplifier les analyses ils ont été considérés comme des perturbations dans la suite des travaux.

À partir de (5-3), il est possible d'obtenir le modèle fondamental du STATCOM tout en remplaçant la fonction de commutation avec son composant fondamental qui est habituellement appelé signal de modulation. Ainsi,

$$s_c^a \approx G_{ac} m_c^a = G_{ac} M_c \sin(\omega_s t + \phi_c) = G_{ac} \{m_c^d \sin(\omega_s t) + m_c^q \cos(\omega_s t)\} \quad (5-4)$$

où  $G_{ac}$  est le gain de la technique de modulation et  $m_{ac}$  est le signal de modulation qui est en état permanent sinusoïdal avec les fonctions composantes sinus et cosinus pour lesquelles les amplitudes sont définies sur les axes dq- par  $m_c^d$  et  $m_c^q$  [1].

En remplaçant (5-4) dans (5-3) et compte tenu de la nature sinusoïdale de la tension, les équations résultantes du STATCOM sont :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_c^d = -\frac{R_c}{L_c} i_c^d + \omega_s i_c^q - \frac{n_c G_{ac} m_c^d v_{dc}}{L_c} + \frac{v_s^d}{L_c} \\ \frac{d}{dt} i_c^q = -\omega_s i_c^d - \frac{R_c}{L_c} i_c^q - \frac{n_c G_{ac} m_c^q v_{dc}}{L_c} + \frac{v_s^q}{L_c} \\ \frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{G_{ac}(m_c^d i_c^d + m_c^q i_c^q)}{2C_{dc}} - \frac{v_{dc}}{R_{dc} C_{dc}} \end{cases} \quad (5-5)$$

Dans le cas d'un filtrage d'harmonique, ces sources peuvent être remplacées par des condensateurs dont il sera nécessaire d'assurer l'équilibrage.

### 5.3.5 Analyse de l'état d'équilibre

Afin d'évaluer le comportement stationnaire du STATCOM, les états des équations variables doivent être évaluées à l'état d'équilibre, à savoir les dérivés sont égales à zéro. Les équations qui en résultent doivent être résolues et les signaux de modulation sont calculés afin de parvenir à un état de fonctionnement souhaité [99].

Ainsi, les équations d'état stationnaire sont :

$$\begin{cases} 0 = -\frac{R_c}{L_c} I_c^d + \omega_s I_c^q - \frac{n_c G_{ac} M_c^d V_{dc}}{L_c} + \frac{V_s^d}{L_c} \\ 0 = -\omega_s I_c^d - \frac{R_c}{L_c} I_c^q - \frac{n_c G_{ac} M_c^q V_{dc}}{L_c} + \frac{V_s^q}{L_c} \\ 0 = \frac{G_{ac}(M_c^d I_c^d + M_c^q I_c^q)}{2C_{dc}} - \frac{V_{dc}}{R_{dc} C_{dc}} \end{cases} \quad (5-6)$$

dans laquelle les variables en lettres majuscules désignent la valeur constante de chaque variable dans un point de fonctionnement arbitraire.

Afin d'obtenir un facteur de puissance souhaité au niveau de la source, ou imposer un angle de phase  $\Phi_s$  entre le courant de source et la tension, les éléments suivants de l'équation peuvent être considérés :

$$\Phi_s = \text{atan}\left(\frac{V_s^q}{V_s^d}\right) - \text{atan}\left(\frac{I_s^q}{I_s^d}\right) = \text{atan}\left(\frac{V_s^q}{V_s^d}\right) - \text{atan}\left(\frac{I_l^q + I_c^q}{I_l^d + I_c^d}\right) \quad (5-7)$$

Cette équation précédente calcule la différence d'angle entre la tension de source et la phase du courant de source qui correspond à l'angle de phasage de la source. Il est important de remarquer que les deux composants d et q de la source de courant sont constitués de la somme des courants de compensation et de la charge.

Par soucis de simplification dans les calculs futurs, les définitions suivantes sont faites :

$$K_s = \tan(\phi_s) = \frac{I_l^q + I_c^q}{I_l^d + I_c^d} \quad (5-8)$$

$$I_c^q = K_s I_c^d + (K_s I_l^d - I_l^q) = K_s I_c^d + \lambda_s \quad (5-9)$$

Pour une charge linéaire donnée ( $I_l^d$  et  $I_l^q$ ) et un facteur de puissance de la source imposée, les valeurs de  $K_s$  et  $\lambda_s$  seront connues. Puis, (5-8) et (5-9) peuvent être résolues pour  $I_c^d$ , donnant le polynôme de second ordre suivant :

$$R_c \{1 + K_s^2\} (I_c^d)^2 + \{2R_c K_s \lambda_s - V_s^d - K_s V_s^q\} I_c^d + \left\{ \frac{2V_{dc}^2 n_c}{R_{dc}} - \lambda_s V_s^q + \lambda_s^2 R_c \right\} = 0 \quad (5-10)$$

Où la tension  $V_{dc}$  doit également être imposée afin de résoudre cette équation. Cette tension doit veiller à ce que la somme des tensions continues de toutes les cellules de puissance soit supérieure à l'amplitude de la tension de source  $|V_s|$ , à savoir

$$n_c V_{dc} > |V_s| = \sqrt{(V_s^d)^2 + (V_s^q)^2} \quad (5-11)$$

Cette contrainte augmente parce que VSC fonctionne avec une tension continue qui doit être supérieure à la valeur crête de la tension dans la partie alternative. Une valeur convenable pour  $V_{dc}$  devrait prévoir au moins une marge de sécurité de 10%[\[98\]](#). Puis (5-11) devient :

$$V_{dc} = \frac{k_{dc}}{n_c} \sqrt{(V_s^d)^2 + (V_s^q)^2} \quad (5-12)$$

où  $k_{dc} = 1,1$  afin d'assurer la marge de 10 %

Comme (5-12) est un polynôme du second degré, il a deux solutions possibles et une seule d'entre elle doit être sélectionnée. Le choix doit tenir compte de la valeur absolue la plus faible, parce que cela permet de minimiser le courant dans le compensateur et donc de réduire les pertes. Il convient de noter à partir de (5-12) que la valeur de  $I_c^d$  ne dépend ni de la valeur de l'inductance  $L_c$  ni de la capacité  $C_{dc}$ , à savoir que le courant que le compensateur injecte pour obtenir un facteur de puissance de consigne est indépendant des valeurs de ces éléments passifs.

Une fois la valeur de  $I_c^d$  est trouvé,  $I_c^q$  peut être facilement obtenu à partir de (5-12).

Ensuite, la valeur des signaux de modulation est calculée par :

$$M_c^d = \frac{V_s^d - R_c I_c^d + \omega_s L_c I_c^q}{n_c G_{ac} V_{dc}} \quad (5-13)$$

$$M_c^q = \frac{V_s^d - R_c I_c^q + \omega_s L_c I_c^d}{n_c G_{ac} V_{dc}} \quad (5-14)$$

### 5.3.6 Taux de distorsion

Encore appelé distorsion harmonique totale, il est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale [100].

Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension.

$$THD = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{F_1}$$

On va couramment jusqu'au 40<sup>ème</sup> ou 50<sup>ème</sup> rang d'harmoniques

Cette grandeur permet d'évaluer à l'aide d'un nombre unique la perturbation d'un courant ou d'une tension en un point d'un réseau, voire de comparer deux réseaux sujets à des harmoniques de rangs différents. C'est ce taux global qui est retenu par les fournisseurs d'électricité pour mesurer dans son réseau « la pollution harmonique » que provoquent les différents utilisateurs. Le THD représente sensiblement l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes et les dispositifs. La distorsion de l'onde de tension est proportionnelle à l'impédance du réseau et à l'amplitude des courants harmoniques. La précision de son calcul n'est limitée que par l'incertitude de l'impédance du réseau. Le taux de distorsion du réseau électrique est presque partout inférieur à 2% en HTB, 5% en HTA et 7% en BT. Les fournisseurs d'électricité demandent à chaque abonné industriel ou tertiaire de limiter sa contribution au THD en tension au point de couplage à 1,6% au total et à 1% pour le plus mauvais harmonique.

La distorsion de la tension pour un appareil sensible ne devrait pas dépasser 5% de distorsion totale, dont moins de 3% de  $H_3$  et de  $H_5$ . On considère que la distorsion devient excessive à partir de 8%. Dès 3% d'harmonique 5 (composante inverse), la fiabilité d'un gros moteur peut être réduite. Une distorsion de 15 % ne perturbe aucun appareil électrodomestique[98].

### 5.3.7 Technique de commande des convertisseurs multiniveaux

Il existe essentiellement deux techniques de génération des signaux PWM (pulse with modulation) les plus utilisées : la technique de modulation intersective et les techniques numériques d'espace vectoriel [101].

Le développement de la technologie numérique a vu l'apparition de la technique SVPWM (Space Vector Pulse With Modulation). Cette technique prend une place importante dans la commande des convertisseurs du fait de sa mise en œuvre relativement facile, mais aussi de la qualité des signaux obtenus notamment la faible ondulation du courant.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la complexité du contrôle de l'algorithme permettant de générer les signaux de commande lorsque les convertisseurs sont supérieurs à trois niveaux.

Pour générer les impulsions de commande MLI d'un convertisseur à N-niveaux de tensions, N-1 porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont la même fréquence  $f_c$  et la même amplitude  $A_c$ . Les porteuses peuvent être horizontalement ou verticalement décalées. Si elles sont horizontales, le déphasage entre deux signaux consécutifs est donné par la relation  $\frac{2}{N-1}$  et si elles sont décalées verticalement les signaux triangulaires peuvent être en phase ou non et occupent une bande continue avec le même décalage vertical. Ils sont d'abord comparés au signal de référence d'amplitude  $A_r$  et de fréquence  $f_r$ . Chaque comparaison donne la valeur un (1) si une porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire. A la sortie du modulateur, la somme des résultats issus des comparaisons est ensuite décodée, et donne la valeur correspondante à chaque niveau de tension [102].

## 5.4 Conclusion

La première partie de ce chapitre a traité de la structure, du fonctionnement et du dimensionnement des différents éléments des onduleurs NPC et H à N niveaux.

Le calcul du filtre passif nécessaire pour l'absorption de la tension instantanée résultant de la différence entre le convertisseur et le réseau pour réduire le contenu harmonique de courant alternatif injecté a constitué la seconde partie.

Enfin les techniques de génération des signaux PWM pour la commande des convertisseurs ont constitué la dernière partie de ce chapitre.

Bien que ces différents types de convertisseur puissent être utilisés pour la résolution du déséquilibre de tension dans les STATCOM, les compensateurs séries peuvent aussi jouer le même rôle. Le chapitre suivant traitera donc de la compensation série et son utilisation pour la résolution des déséquilibres de tension.

## Chapitre 6 - Compensation active de type série

### 6.1 Introduction

Dans les systèmes de distribution modernes il existe un certain nombre de problèmes de qualité d'alimentation liés à la tension par une pollution importante et des conditions de fonctionnement anormales. Ces problèmes sont dus à la chute de tension dans les départs et les transformateurs, divers types de perturbations, défauts, utilisation de charges des consommateurs de puissance réactive et déséquilibrées, etc.

Les compensateurs actifs de type série sont largement utilisés à la fois pour injecter la tension de grandeur et de fréquence requises, rétablir ainsi la tension entre les charges afin de protéger les charges sensibles de ces problèmes de qualité. Ces compensateurs sont connus sous le nom de compensateurs en série synchrones (SSC) et de restaurateurs de tension dynamiques (DVR) [[103](#)].

Ce chapitre traite de l'efficacité technique des compensateurs, de leur principe de fonctionnement et de leur contrôle

### 6.2 Classification des compensateurs séries actifs

Les compensateurs en série actifs peuvent être classés en fonction du type de convertisseur de puissance, de la topologie et du nombre de phases. Le type de convertisseur de puissance peut être CSC ou VSC. La topologie peut être VSC en demi-point, VSC en pont complet, etc. La troisième classification est basée sur le nombre de phases telles que les systèmes monophasés ou triphasés [[104](#)].

### 6.2.1 Classification basée sur le convertisseur

Deux types de convertisseurs de puissance sont utilisés dans le développement de compensateur série actif. La Figure 6-1 présente une CSC monophasée (DVR) basée sur un convertisseur de source de courant. Dans ce DVR, une diode est utilisée en série avec le dispositif à commutation automatique (IGBT) pour le blocage en tension inverse. Cependant, les configurations basées sur GTO n'ont pas besoin de la diode série, mais ont une fréquence de commutation limitée [105].

Bien que les CSC soient considérées comme suffisamment fiables, ils entraînent des pertes élevées et nécessitent une haute tension aux bornes du condensateur et de courant alternatifs. De plus, ils ne peuvent pas être utilisés dans les modes multiniveaux [106, 107].

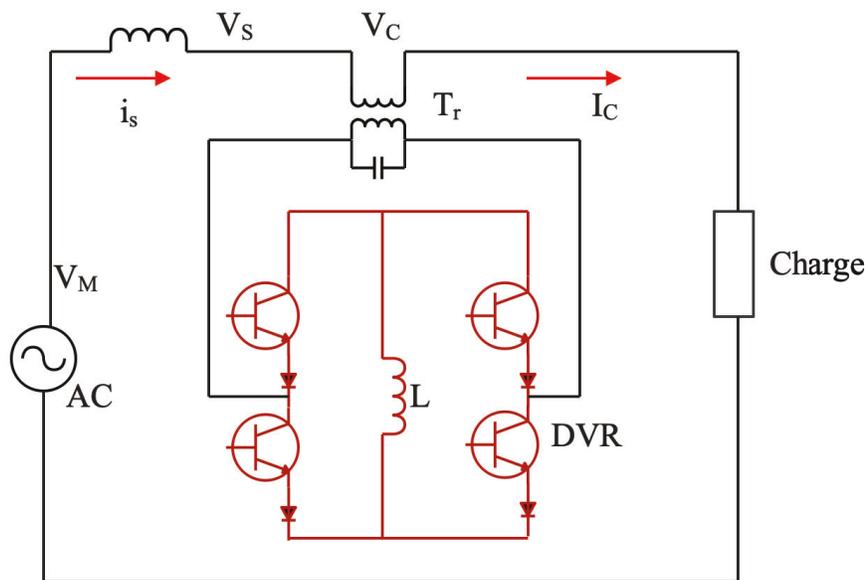


Figure 6-1 DVR monophasé basé sur CSC [106, 107].

L'autre convertisseur de puissance utilisé est le VSC, comme indiqué dans la Figure 6-2. Il a une tension continue autoportante avec un condensateur DC. Il est devenu plus dominant

puisqu'il est plus léger, moins cher et plus extensible aux versions à plusieurs niveaux et à plusieurs étapes pour améliorer les performances avec des fréquences de commutation plus basses. Il est plus populaire dans les applications à base d'onduleur car sur un réseau le même convertisseur de puissance peut être utilisé comme un compensateur de série de charges critiques et sensibles [108].

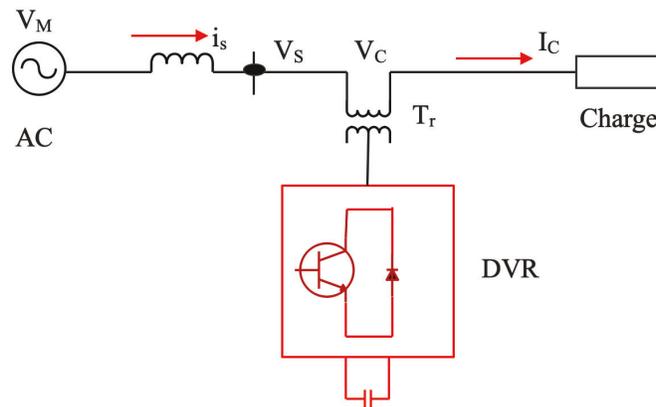


Figure 6-2 DVR monophasé basé sur VSC [108].

### 6.2.2 Classification basée sur la topologie

Les compensateurs séries actifs peuvent être classés en fonction de la topologie (demi-pont, pont complet) et la configuration sans transformateur. Les Figure 6-3 à Figure 6-5 montrent le bloc de base des compensateurs série actifs. Ils sont connectés en série avec le secteur en amont de la charge à l'aide d'un transformateur adapté pour équilibrer et réguler la tension aux bornes de la charge ou de la ligne. Ils peuvent être installés par les services

publics pour atténuer les harmoniques provoquées par la résonance avec des impédances de ligne et des compensateurs de shunt passifs [109].

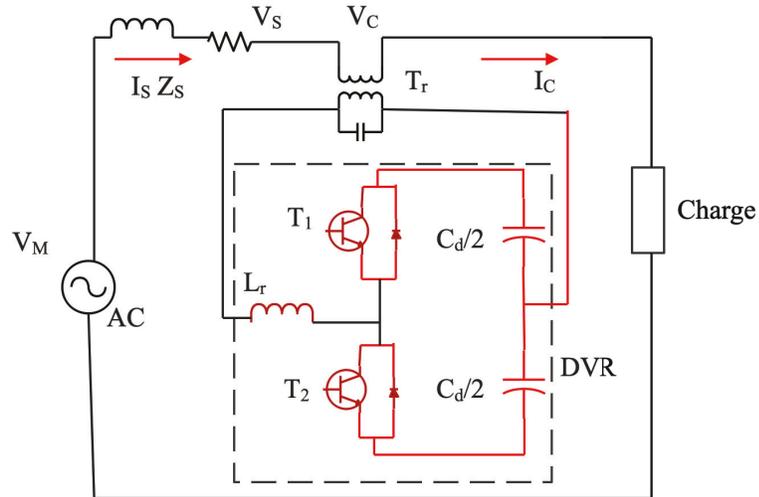


Figure 6-3 Topologie en demi-point du DVR monophasé basé sur VSC [109].

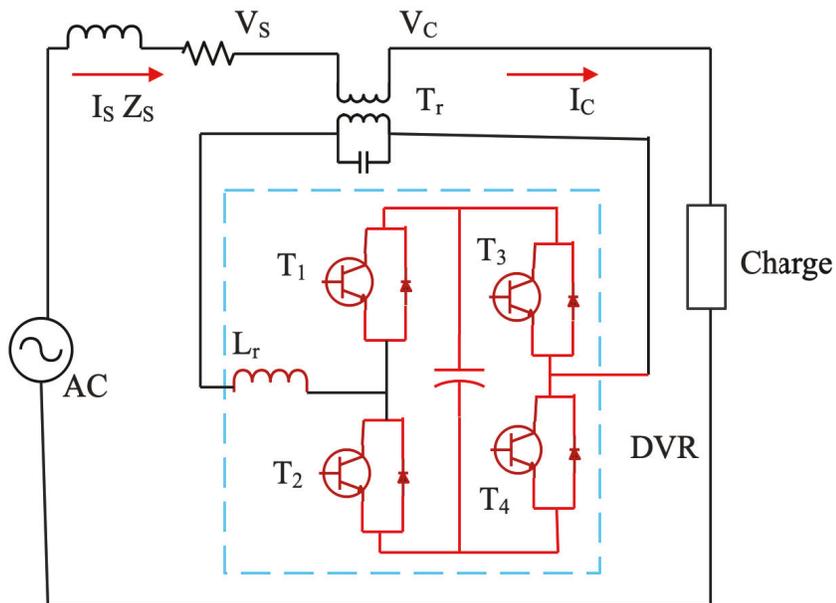


Figure 6-4 Topologie en pont complet du DVR monophasé basé sur VSC [109].



Les deux configurations de convertisseur de puissance CSC avec les éléments de stockage d'énergie inductifs et VSC avec les éléments de stockage d'énergie capacitive peuvent être utilisés pour les DVR à deux fils.

La Figure 6-1 montre un compensateur en série actif avec CSC utilisant un élément de stockage inductif. Les configurations similaires basées sur le VSC peuvent être obtenues en ne considérant que la phase et le neutre à chaque fois ( Figure 6-3,Figure 6-4).

#### 6.2.3.2 DVR à trois fils

Les configurations des DVR pour le système triphasé sont classées dans la Figure 6-6. Cette classification est basée sur la liaison CC du VSC des DVR et sur le nombre de dispositifs de commutation requis. Fondamentalement, il existe des liaisons CC supportées par le redresseur, la batterie et le condensateur pour le VSC de DVR. Le support du redresseur peut être réalisé en amont du transformateur d'injection, à savoir: côté réseau ou en aval, à savoir côté charge.

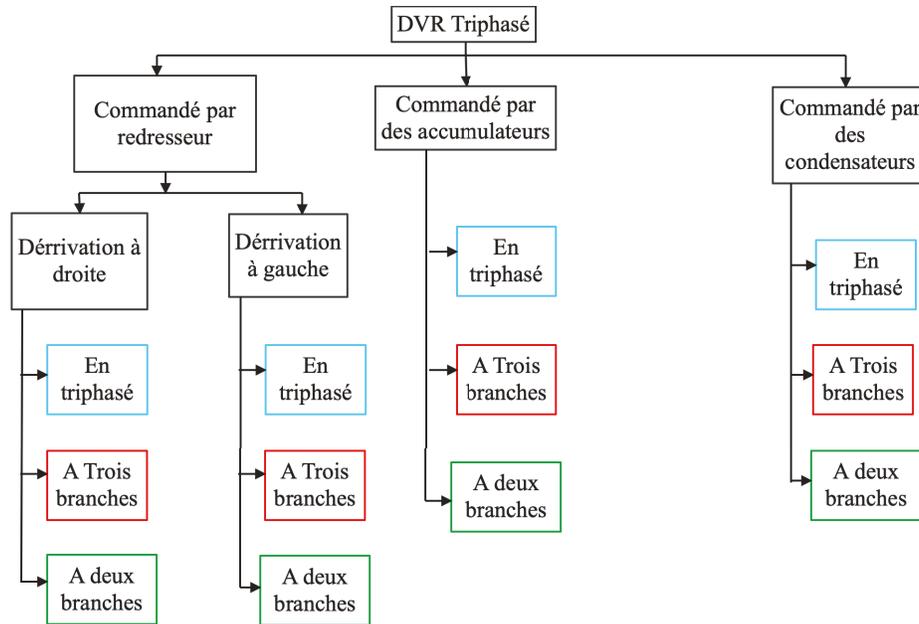


Figure 6-6 Classification des configurations de DVR pour système de distribution triphasé à trois fils[110].

La Figure 6-7 présente un schéma de principe détaillé d'un DVR triphasé avec BESS sur son côté CC et connecté à une charge critique triphasée pour améliorer la tension. L'alimentation triphasée est connectée à une charge critique et sensible via des transformateurs d'injection série triphasés. La phase est connectée au PCC via une impédance de court-circuit. La tension injectée par le DVR ( $V_{ca}$ ) est telle que la tension de charge ( $V_{la}$ ) ne soit pas déformée et est obtenue avec une amplitude nominale[111].





La Figure 6-9C montre la répartition en deux phases. Les tensions aux bornes asymétriques ( $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$ ,  $V_{sc}$ ) et l'injection des tensions dans chaque phase ( $V_{ca}$ ,  $V_{cb}$ ,  $V_{cc}$ ) sont telles que les tensions de ligne ( $V_{La-Lb}$ ,  $V_{Lb-Lc}$ ,  $V_{Lc-La}$ ) sont égales en amplitude et sont déplacés de 120 degrés[112].

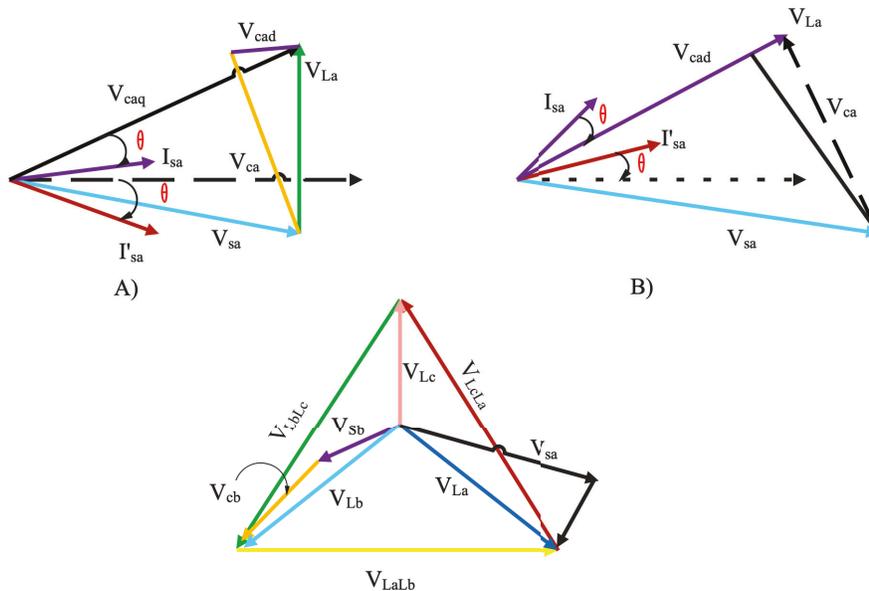


Figure 6-9 Diagramme de phase du système DVR alimenté par condensateur pour la compensation (A) chute de tension, (B) hausse de tension, et (C) déséquilibre de tension

### 6.3 Principe de fonctionnement et de contrôle des compensateurs séries

Le circuit fondamental des compensateurs en série actifs pour un système alternatif triphasé à trois fils est illustré à la Figure 6-8. Un VSC basé sur IGBT avec un condensateur de bus CC est utilisé en tant que DVR. Utilisant un algorithme de contrôle, les tensions injectées sont directement contrôlées en estimant les tensions injectées de référence.

Toutefois à la place des tensions injectées, les tensions de charge de référence peuvent être estimées pour une valeur indirecte de contrôle de la tension de son VSC. Les impulsions pour le DVR sont générées en utilisant une hystérésis sans porteuse. Le contrôle de la tension

sur les tensions de référence et de charge détectée entraîne un contrôle de tension indirecte. En utilisant le DVR avec un algorithme de contrôle approprié, les pics de tension, les surtensions, fluctuations, distorsion de la forme d'onde, déséquilibre de tension et harmoniques sont compensés. Le principe détaillé de fonctionnement et de contrôle des compensateurs séries actifs sont donnés dans les sections suivantes.

### 6.3.1 Principe de fonctionnement des compensateurs actifs en série

Les compensateurs actifs en série reposent sur le principe de l'injection d'une tension en série avec l'alimentation et cela est mis en œuvre de deux manières. Le compensateur insère une tension de forme d'onde requise de sorte qu'il puisse protéger les consommateurs sensibles des perturbations telles que les creux, les surtensions, les pics, les déséquilibres, harmoniques de la tension d'alimentation et est connu sous le nom de restaurateur de tension dynamique [113].

La Figure 6-10 A montre un schéma unifilaire du DVR pour l'amélioration de la qualité de la tension dans un système de distribution. Une tension (VC) est injectée de sorte que la tension de charge (VL) soit d'amplitude constante et non déformée, bien que la tension d'alimentation (VS) ne soit pas de grandeur constante ou puisse être déformée. La Figure 6-10 B montre le diagramme des phases des différentes tension. VL est la tension à travers la charge avant le creux de la tension. Pendant la baisse, la tension est réduite à VS avec un décalage de phase d'angle de  $\theta$ . Le DVR injecte une tension de sorte que l'amplitude de la tension de charge soit maintenue à état. Selon l'angle de phase de la tension de charge, l'injection de tension peut être réalisée de quatre façons.

VC1 représente la tension injectée en phase avec la tension d'alimentation.

Avec l'injection de VC2 l'amplitude de la tension de charge reste la même, mais elle entraîne VS sous un petit angle. Dans VC3 la tension de charge conserve la même phase que celle de la condition initiale qui peut être un angle optimal compte tenu de la source d'énergie au niveau du bus CC du VSC utilisé comme DVR. VC4 est la condition où la tension injectée est en quadrature avec le courant et ce cas est adapté pour un DVR alimenté par un condensateur. Le DVR fonctionne dans ce schéma avec un BESS, comme illustré à la Figure 6-10 [114].

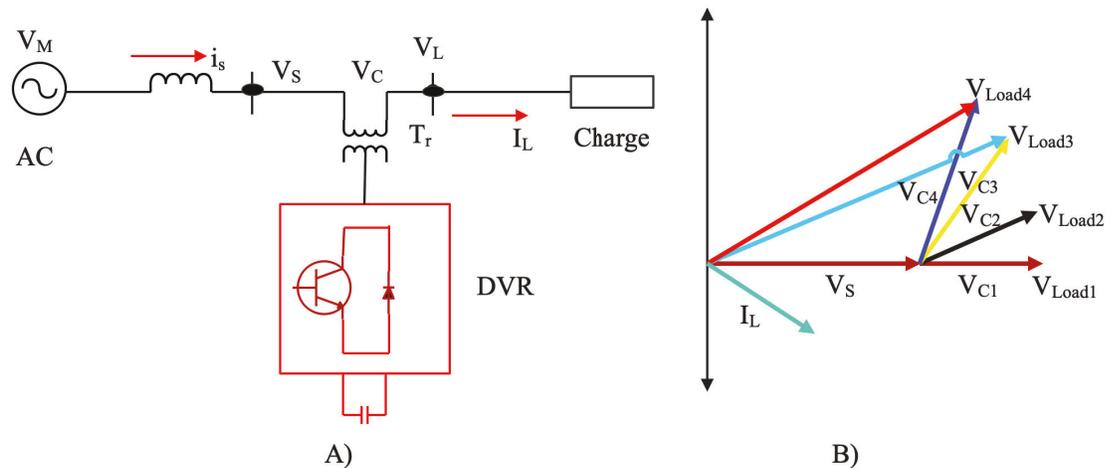


Figure 6-10(A) Schéma unifilaire du DVR. (B) Diagramme de phase des schémas d'injection de tension DVR [114].

### 6.3.2 Contrôle des compensateurs DVR

Les algorithmes de contrôle du DVR sont basés sur l'estimation soit des tensions injectées, soit de la tension de charge de référence pour l'amélioration de la qualité de l'énergie dans un système de distribution. Les tensions aux bornes, les courants de source, les

tensions de charge et la tension du bus continu sont généralement utilisés comme signaux de réaction [115].

Les tensions de charge de référence sont estimées à l'aide des algorithmes de contrôle. Il y a beaucoup d'algorithmes de contrôle rapportés dans la littérature pour le contrôle de DVR similaire à d'autres appareils d'alimentation tels que les DSTATCOMs [116].

Ceux-ci sont classés en tant qu'algorithmes de contrôle du domaine temporel et du domaine fréquentiel.

Il existe plus d'une douzaine d'algorithmes de contrôle dans le domaine temporel qui peuvent être utilisés pour contrôler le DVR. Ces algorithmes de contrôle sont les suivants:

- la théorie du cadre de référence synchrone (SRF), également appelée théorie d – q [117]
- la technique de gabarit unitaire ou théorie basée sur le contrôleur proportionnel intégral
- la théorie de la puissance réactive instantanée (IRPT), également connue sous le nom de théorie PQ ou théorie  $\alpha - \beta$
- la théorie des composants symétriques instantanés (ISC)
- la théorie du réseau neuronal (algorithme Adaline basé sur Widrow LMS)
- la théorie PQ en une phase
- la théorie DQ en une phase
- L'algorithme de contrôle amélioré basé sur la boucle à verrouillage de phase (EPLL)
- L'algorithme de détection adaptatif également connu sous le nom de théorie de l'annulation d'interférence adaptative.

La plupart de ces algorithmes de contrôle du domaine temporel ont été utilisés pour le contrôle des DVR. De même, il existe presque le même nombre d'algorithmes de contrôle du domaine fréquentiel. Certains d'entre eux sont [118]:

- La théorie des séries de Fourier
- La théorie de la transformée de Fourier discrète
- La théorie de la transformation de Fourier rapide
- La théorie de la transformée de Fourier discrète récursive
- L'algorithme de contrôle basé sur le filtre de Kalman
- La théorie de la transformation en ondelettes
- La théorie de la transformation de Stockwell (transformation S) théorie de la transformation par décomposition empirique (EMD)
- La théorie de la transformation de Hilbert – Huang

La plupart de ces algorithmes de contrôle du domaine fréquentiel sont utilisés pour le contrôle de la qualité de l'énergie, des objectifs dans les analyseurs de puissance, les instruments PQ, etc. Certains de ces algorithmes sont aussi utilisés pour le contrôle des DVR. Cependant, ces algorithmes sont lents nécessitant des calculs complexes. Par conséquent, ces méthodes de contrôle ne sont pas vraiment préférées pour le contrôle en temps réel du DVR comparé aux algorithmes de contrôle de domaine temporel [119].

Tous ces algorithmes de contrôle peuvent être utilisés dans le contrôle du DVR. Cependant pour donner une compréhension de base, seule la théorie SRF est discutée.

### 6.3.2.1 Contrôle des DVR basé sur la théorie du cadre de référence synchrone (SFR)

La compensation des baisses de tension à l'aide d'un DVR peut être réalisée en injectant/absorbant la puissance réactive ou de la puissance active, ou la combinaison des deux. Lorsque la tension injectée est en quadrature avec le courant à la fréquence fondamentale, la compensation est réalisée en injectant une puissance réactive et le DVR peut être réalisé avec le bus DC auto-supporté. Cependant, si la tension injectée est en phase avec le courant, le DVR peut nécessiter une alimentation réelle. Par conséquent une batterie ou un redresseur côté CC du VSC est nécessaire. La technique de contrôle adoptée doit prendre en compte les limitations telles que la capacité de tension d'injection (puissance nominale du convertisseur et du transformateur) et l'optimisation de la taille de l'énergie stockée [[120](#)].

### 6.3.2.2 Contrôle des DVR avec BESS

La Figure 6-11 représente l'algorithme de commande du DVR dans lequel une théorie du cadre de référence synchrone est utilisée pour l'estimation des signaux de référence [[121](#)].

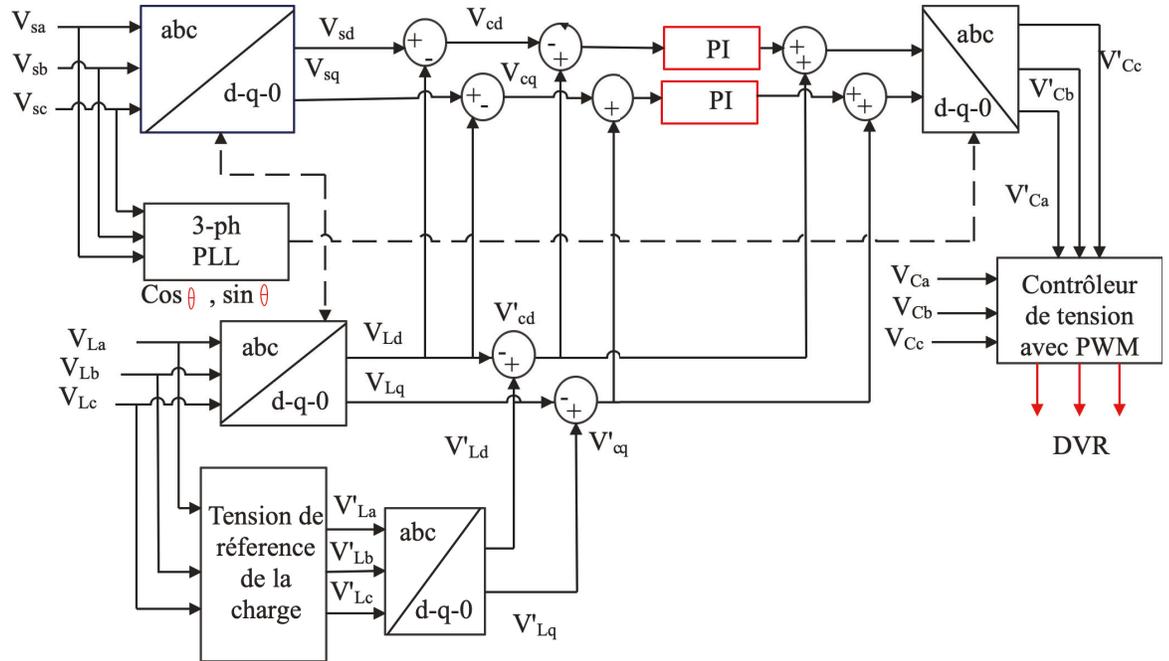


Figure 6-11 Méthode basée sur la théorie du cadre de référence synchrone (SRF) pour le contrôle du DVR alimenté par BESS [121].

Les tensions à PCC ( $V_s$ ) et les tensions aux bornes de la charge ( $V_L$ ) sont détectées pour dériver les signaux d'entrée IGBT. Les tensions de charge de référence ( $v_{La}$ ,  $v_{Lb}$ ,  $v_{Lc}$ ) sont extraites en utilisant le vecteur unitaire dérivé. L'amplitude de la tension de charge ( $V_L$ ) en PCC est calculée comme suit:

$$V_L = (2/3)^{1/2} (V_{La}^2 + V_{Lb}^2 + V_{Lc}^2)^{1/2} \quad (6-1)$$

et les vecteurs unitaires sont calculés comme :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{v_l} \begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

Par conséquent, les tensions de charge de référence sont estimées comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_{La}^* \\ v_{Lb}^* \\ v_{Lc}^* \end{bmatrix} = V_L^* \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

où  $V_L^*$  est la valeur de référence de l'amplitude de la tension aux bornes de la charge.

Les tensions de charge ( $v_{La}, v_{Lb}, v_{Lc}$ ) sont converties dans le référentiel tournant à l'aide du paramètre abc-dq0 conversion en utilisant la transformation du parc avec des vecteurs unitaires ( $\sin \theta, \cos \theta$ ) dérivés en utilisant une PLL :

$$\begin{bmatrix} v_{Ld} \\ v_{Lq} \\ v_{Lo} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

De même, les tensions de charge de référence ( $v_{La}^*, v_{Lb}^*, v_{Lc}^*$ ) et les tensions au niveau du PCC ( $V_s$ ) sont également converties en référentielles tournantes. Ensuite, les tensions du DVR sont obtenues dans le repère tournant comme :

$$V_{Cd}^* = V_{Ld}^* - V_{Ld} \quad (6-5)$$

$$V_{Cq}^* = V_{Lq}^* - V_{Lq} \quad (6-6)$$

Ces erreurs de tension entre les tensions de référence et réelle du DVR dans le référentiel tournant sont régulées à l'aide de deux contrôleurs PI [122].

La tension de référence du DVR dans la trame abc est obtenue à partir de la transformation de Park inversée en  $V_{cd}^*$  de l'équation (6-4),  $V_{cq}^*$  de l'équation (6-5) et  $v_{c0}^*$  à zéro.

$$\begin{bmatrix} v_{ca}^* \\ v_{cb}^* \\ v_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cd}^* \\ v_{cq}^* \\ v_{c0}^* \end{bmatrix} \quad (6-7)$$

Les tensions de référence du DVR ( $v_{ca}^*, v_{cb}^*, v_{cc}^*$ ) et les tensions détectées du DVR ( $v_{ca}, v_{cb}, v_{cc}$ ) sont utilisées dans un contrôleur PWM pour générer des impulsions. Le contrôleur PWM fonctionne avec une fréquence de commutation constante  $f_s$  de l'ordre de 10 kHz [123].

### 6.3.2.3 Contrôle des DVR auto-supportés

La Figure 6-12 montre l'algorithme de contrôle du DVR dans lequel la théorie SRF est utilisée pour le contrôle d'un DVR auto-supporté.

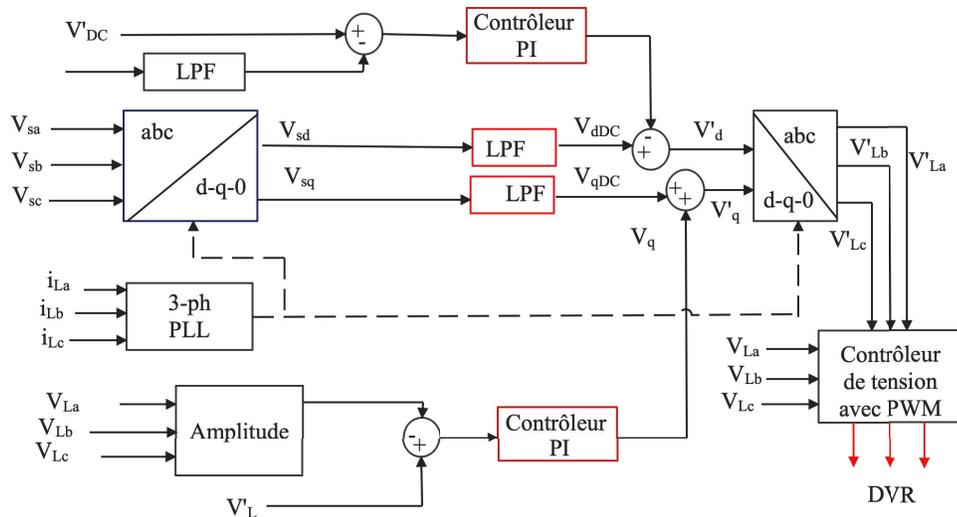


Figure 6-12 Méthode basée sur la théorie du cadre de référence synchrone (SRF) pour le contrôle du DVR autonome [123].

Les tensions au niveau du PCC ( $V_s$ ) sont converties dans le référentiel tournant à l'aide du convertisseur abc – dq0 en utilisant la transformation du parc. Les harmoniques et les composantes oscillatoires des tensions sont éliminées à l'aide de filtres passe-bas (LPF). Les composantes des tensions sur les axes d et q sont :

$$V_{sd} = V_{dDC} + V_{dAC} \quad (6-8)$$

$$V_{sq} = V_{qDC} + V_{qAC} \quad (6-9)$$

La stratégie de compensation pour la résolution des problèmes de qualité de tension considère que la tension aux bornes de la charge doit être de grandeur nominale et de nature non déformée. Afin de maintenir la tension de bus CC du condensateur auto-supporté. Un contrôleur PI est utilisé au niveau du bus DC du DVR et la sortie  $V_{loss}$  est utilisée pour faire face aux pertes [124]:

$$V_{loss(n)} = V_{loss(n-1)} + K_{p1}(V_{de(n)} - V_{de(n-1)}) + K_{il}V_{de(n)} \quad (6-10)$$

où  $V_{de(n)} = V_{DC}^* - V_{DC(n)}$  est l'erreur entre la tension continue de référence ( $v_{cc}^*$ ) et la tension CC détectée ( $V_{DC}$ ) au nième instant d'échantillonnage  $K_{p1}$  et  $K_{il}$  sont les gains proportionnels et intégraux du bus continu régulateur de tension PI.

Par conséquent, la tension de charge de référence sur l'axe d est

$$V_d^* = V_{dDC} - V_{loss} \quad (6-11)$$

L'amplitude de la tension aux bornes de la charge ( $V_L$ ) est contrôlée en fonction de sa tension de référence ( $V_L^*$ ) en utilisant un autre contrôleur PI. La sortie du contrôleur PI est considérée comme la composante réactive de la tension ( $V_{qr}$ ) pour réguler la tension aux

bornes de la charge. L'amplitude de la tension de charge ( $V_L$ ) en PCC est calculée à partir des tensions alternatives ( $V_{La}, V_{Lb}, V_{Lc}$ ).

Un contrôleur de tension PI est utilisé pour réguler ceci à une valeur de référence comme

$$V_{qr}(n) = V_{qr(n-1)} + K_{p2}(V_{te(n)} - V_{te(n-1)}) + K_{i2}v_{te(n)} \quad (6-12)$$

où  $V_{te(n)} = V_L^* - V_{L(n)}$  indique l'erreur entre la tension aux bornes de la charge de référence ( $V_L^*$ ) et l'amplitude de tension aux bornes de la charge ( $V_L \dots n$ ) au nième instant d'échantillonnage.  $K_{p2}$  et  $K_{i2}$  sont le proportionnel et le gain intégré du contrôleur PI de tension de bus CC.

La tension de l'axe en quadrature de la charge de référence est :

$$V_q^* = V_{qDC} + V_{qr} \quad (6-13)$$

#### 6.4 Analyse et conception des compensateurs série DVR

La Figure 6-8 présente un schéma de principe d'un DVR avec un condensateur afin d'améliorer la qualité d'un système de distribution. Trois tensions source ( $V_{Ma}, V_{Mb}, V_{Mc}$ ) représentent un système d'alimentation triphasé et l'impédance de la source en série est indiquée par  $Z_{Sa}, Z_{Sb}$  et  $Z_{Sc}$ . Les tensions PCC ( $V_{Sa}, V_{Sb}, V_{Sc}$ ) ont des problèmes de qualité de tension et le DVR utilise des transformateurs d'injection ( $T_r$ ) pour compenser les tensions ( $V_{Ca}, V_{Cb}, V_{Cc}$ ) afin d'obtenir des tensions de charge non déformées ( $V_{La}, V_{Lb}, V_{Lc}$ ). Un VSC avec un condensateur CC (CDC) est utilisé en tant que DVR. L'ondulation de commutation dans la tension injectée est filtrée à l'aide d'un inducteur série ( $L_r$ ) et un condensateur parallèle ( $C_r$ ).

La conception d'un DVR inclut la tension nominale du VSC, le courant nominal du VSC, le kVA du VSC, le transformateur d'injection, la tension du bus à courant continu, la capacité du bus à courant continu, l'inductance d'interface CA et le filtre d'ondulation. La conception du DVR est illustrée à travers l'exemple suivant [125].

#### 6.4.1 Tension nominale du VSC des DVR

Considérons une fluctuation de tension entre +20 et -30% et un déséquilibre de tension de 6% aux bornes d'une charge triphasée de 415 V, 20 kVA, 50 Hz. La tension nominale du VSC d'un DVR dépend de la tension maximale à injecter dans la charge. Par conséquent, l'injection de tension par phase correspond à 30% de la tension de phase dans le cas d'un DVR basé sur BESS. Cependant, dans le cas d'un DVR auto-supporté basé sur VSC, la tension injectée doit être en quadrature avec le courant de charge. Aussi la tension nominale VSC est calculée en conséquence conformément aux exigences de la charge. La chute de tension maximale de la tension aux bornes de la source est égale à  $239,6 \times 0,7 = 167,72$  V. En considérant une charge de facteur de puissance unitaire, la tension injectée ( $V_C$ ) est estimée à :

$$V_C = \sqrt{(V_S^2 - V_L^2)} = \sqrt{239,6^2 - 167,72^2} = 171,1 \text{ V.} \quad (6-14)$$

Cette tension doit être injectée en quadrature avec le courant d'alimentation dans le cas d'un système autonome basé sur VSC.

#### 6.4.2 Courant nominal du VSC du DVR

Le courant nominal du DVR dépend de la charge connectée à l'aval du DVR. Pour 20 kVA de charge, le courant est:

$$\sqrt{3}V_S I_S = 20\,000\text{VA}$$

où  $I_S$  est le courant et  $V_S$  est la tension de ligne. Par conséquent, la valeur nominale  $I_S$  du DVR = 27,82 A

Puissance du VSC des DVR (kVA) :

La puissance en kVA du VSC d'un DVR est calculée comme suit:

$$S = 3V_C I_S / 1000 = (3 \times 171.1\text{V} \times 27.82\text{A}) / 1000 = 14\text{kVA}$$

#### 6.4.3 Transformateur d'injection du DVR

Le transformateur d'injection est conçu en tenant compte du niveau de tension optimal du VSC. Pour une chute de tension du convertisseur de puissance, le transformateur est sélectionné de sorte que la tension de l'enroulement primaire (côté alimentation) soit de 171,10 V et la tension de l'enroulement secondaire (côté VSC) est de 50 V.

Le transformateur d'injection est le même que celui de VSC et est calculé comme:

$$kVA = 3V_C I_S / 1000 = 14\text{kVA} \quad (6-15)$$

#### 6.4.4 Tension du condensateur CC du VSC des DVR

La tension du condensateur CC est sélectionnée en fonction de la relation suivante[126]:

$$V_{DC} > 2\sqrt{2V_{vsc}}$$

où la tension  $V_{vsc}$  est de 50 V. La valeur de  $V_{DC}$  est de 141,4 V et une  $V_{DC}$  de 150 V est sélectionné pour un DVR

#### 6.4.5 Capacité du bus à courant continu du VSC

La capacité du bus à courant continu est sélectionnée en fonction de l'énergie transitoire requise lors du changement de charge.

Considérant que l'énergie stockée dans le condensateur du bus à courant continu permet de répondre à la demande en énergie de la charge pendant une période donnée de la fraction du cycle de puissance, la relation peut être exprimée comme[127]:

$$\left(\frac{1}{2}\right)C_d(V_{DC}^2 - V_{DC1}^2) = 3V_C I_s \Delta t. \quad (6-16)$$

où  $V_{DC}$  est la tension assignée du bus continu,  $V_{DC1}$  est la chute de tension du bus continu autorisée pendant les transitoires et  $\Delta t$  est la période pour laquelle un apport est requis.

Considérant  $\Delta t = 200 \mu s$ ,  $V_{DC} = 150V$ ,  $V_{DC1} = 150 - 5\% \text{ de } 150 = 142.5V$ , la capacité du bus à courant continu  $C_d$  est calculé comme

$$\frac{1}{2} * C_d (150^2 - 142.5^2)$$

Cela donne  $C_d = 2603,76 \mu F$ . Par conséquent, un condensateur de bus CC de 3000  $\mu F$ , 200 V est sélectionné pour le DVR.

#### 6.4.6 Inductance d'interface pour le VSC

L'inductance d'interfaçage ( $L_r$ ) est sélectionnée en fonction de l'ondulation du courant du DVR ( $\Delta I_s$ ). Considérant que le courant d'ondulation dans l'inductance est de 2%, l'indice de modulation  $m$  de 1 et le facteur de surcharge  $a = 1,2$ , l'inductance est calculée comme [128]:

$$L_r = n * \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) m V_{DC} / (6 a f_s \Delta I_s) \quad (6-17)$$

#### 6.4.7 Filtre d'ondulation

Un filtre d'ondulation est conçu pour éliminer les ondulations de fréquence de commutation de la tension injectée de SSSC. Le filtre d'ondulation est constitué d'un condensateur  $C_r$  et d'une résistance  $R_r$  branchés en série et généralement accordé à la moitié de la fréquence de découpage  $f_r$  qui est calculée comme [129, 130].

$$f_r = 1 / (2 * \pi * R_r * C_r)$$

#### 6.5 Conclusion

Les SSC actifs à semi-conducteurs sont utilisés pour compenser les problèmes de qualité de la tension des réseaux électriques, tels que les baisses, fluctuations, déséquilibre, régulation, etc. Ils protègent les charges sensibles d'interruption, qui entraînent une perte de production et le mauvais fonctionnement d'autres équipements critiques tels que les systèmes médicaux et de santé. Ces SSC sont également appelés DVR quand ils sont utilisés pour la compensation dynamique de courtes périodes. Les VSC basés en PWM sont préférés pour réaliser des DVR.

Une étude analytique de divers indices de performance des SSC pour la compensation de la tension a été faite en détails. Le DVR est considéré comme l'une des meilleures solutions pour atténuer les problèmes de qualité de la tension sur différents types de charges et protéger les charges critiques et sensibles.

Tous ces travaux de recherche sur les STATACOM et les DVR ont été utilisés pour la réduction des déséquilibres de tension sur les réseaux CDDGI dont les résultats sont présentés dans le chapitre suivant.

## Chapitre 7 - Validation des travaux de recherche

Ce chapitre présente la validation de nos travaux de recherche. Il s'agit :

- ✓ des travaux de réduction du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI par les DVR;
- ✓ des travaux de réduction du déséquilibre de tension sur un réseau CDGI avec un STATCOM H bridge et NPC;
- ✓ Nous avons eu l'occasion de réaliser des travaux pratiques sur un réseau CDGI existant dans le but de trouver une solution moins contraignante pouvant réduire le déséquilibre de tension. Cette validation expérimentale et par simulation qui consiste à coupler deux réseaux CDGI sera présentée.

### 7.1 Réduction des baisses de tension sur un réseau CDGI par couplage de deux transformateurs de distribution

Ces travaux traitent de la résolution du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI en couplant deux réseaux basse tension par simulation et en pratique.

Nous analysons la valeur de tension et le déséquilibre de tension avec l'analyseur de réseau. L'analyse a été réalisée sur deux types de réseaux, le premier réseau modélisé est avec les deux transformateurs électriquement séparés, et le deuxième réseau est constitué de deux transformateurs couplés.

#### 7.1.1 Couplage théorique et mathématique de deux réseaux

Équation entre les conducteurs.

Considérant que nous pouvons négliger les courants de déplacement, la forme suivante des équations de Maxwell peut s'écrire [131]. Voir Annexe G

$$\text{Rot} H = j$$

$$\text{Rot} E = -\partial B / \partial t$$

$$H = \nu B \tag{7-1}$$

$$j = \sigma E$$

$$\text{div} B = 0,$$

où H est l'excitation magnétique, B est l'induction magnétique, E est le champ électrique, j la densité de courant,  $\nu$  réductivité et  $\sigma$  la conductivité électrique.

En introduisant le vecteur magnétique potentiel A tel que  $B = \text{rot}(A)$ , l'équation classique du champ est obtenue:

$$\text{Rot}(\nu \text{Rot} A) = j \tag{7-2}$$

Pour les conductrices, il existe un couplage de champs électriques et magnétiques, ce qui se traduit par le développement de courants induits dans des conducteurs.

En écrivant:

$$\text{Rot}(E) = -\frac{\partial(\text{rot} A)}{\partial t} = \text{rot}\left(-\frac{\partial A}{\partial t}\right) \tag{7-3}$$

Nous montrons le potentiel scalaire électrique V tel que:

$$j = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \text{Grad} V \tag{7-4}$$

La densité de courant  $j$  est donc la somme de deux termes: un terme de courants induits fait par le vecteur de potentiel magnétique  $A$  et un terme relié au potentiel électrique scalaire  $V$ . Le potentiel électrique  $V$  est la tension appliquée aux conducteurs mais aussi à l'effet champ magnétique (couplage).

L'équation du champ magnétique en termes de potentiel vectoriel s'écrit enfin [132]:

$$R_{ot}(vR_{ot}A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma Grad V = 0 \quad (7-5)$$

$Grad V$  représente le gradient de potentiel électrique dans le conducteur et n'est pas généralement inconnu. Dans le cas cartésien bidimensionnel on peut le définir sur chaque conducteur.

Dans le cas des cartes 2D, nous supposons qu'un problème fini peut être résolu comme faisant partie d'un problème infiniment long de direction  $z$ , et tel que les courants ont une seule composante suivant  $z$ .

Par conséquent, le champ magnétique n'a que deux composantes dans le plan d'étude  $x$   $y$ .

Les conducteurs sont représentés par des surfaces orientées (pour définir la direction du circuit électrique associé) et caractérisés par une conductivité électrique ( $x$   $y$ ) qui peut dépendre de l'espace.

L'équation 7- 5 prend la forme scalaire simplifiée car  $A$ ,  $j$  et  $Grad V$  n'ont qu'une composante suivant  $z$

$$\frac{\partial \left( \frac{v \partial A}{\partial x} \right)}{\partial x} + \left( \frac{v \partial A}{\partial y} \right) \partial y - \frac{\sigma \partial A}{\partial t} - \sigma Grad V = 0 \quad (7-6)$$

Dans le cas bidimensionnel, il faut noter que Grad V est constant sur un conducteur. En effet l'équation (I) s'écrit (notant que A et j n'ont qu'une seule composante suivant z):

$$d \frac{(j - \frac{\sigma dA}{dt})}{dx} = 0 \text{ et } d \frac{(j - \frac{\sigma dA}{dt})}{dy} = 0 \quad (7-7)$$

Donc  $j - \frac{\sigma dA}{dt} = cte = -Grad V$  dans le conducteur. Si L est la longueur du domaine d'étude (suivant z) L Grad V représente la chute de tension sur le conducteur. Il y aura autant de valeurs de (Grad V) k qu'il y aura de conducteur traversant le plan.

Néanmoins si plusieurs conducteurs sont mis en parallèle, ils auront la même valeur Grad V et peuvent être considérés comme un seul conducteur.

$$j = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma Grad V \quad (7-8)$$

$$\int_{S_k} j dS_k = I_k = \int_{S_k} \frac{\sigma \partial A}{\partial t} dS_k - (Grad V)_k \int_{S_k} \sigma dS_k \quad (7-9)$$

où  $I_k$  est le courant traversant le conducteur k.

En écrivant:

$$\Delta V_k = -L Grad V_k$$

$$R_k = LI \int_{S_k} \sigma dS_k \quad (7-10)$$

$R_k$  est la résistance du pilote k dans le domaine d'étude et  $\Delta V_k$  la chute de tension aux bornes des conducteurs; la relation courant-tension peut s'écrire :

$$\Delta V_k = R_k I_k + R_k \int_{S_k} \frac{\sigma \partial A}{\partial t} dS_k \quad (7-11)$$

En se mettant dans un domaine en éléments finis, le potentiel vecteur  $A$  est approché en utilisant des fonctions de forme classiques:

$$A = \sum \beta_j A_j \quad (7-12)$$

En appliquant la méthode de Galerkin dans l'équation 7.5 avec des fonctions de projection et des fonctions de forme identique  $\beta_j$ , on obtient le système d'équations suivant

$$[S][A] + [G] \frac{d[A]}{dt} - [C][\Delta V] = 0 \quad (7-13)$$

Avec:

$\Delta V_k = L (\text{Grad } V_k)$  où  $L$  est la longueur (dans la direction perpendiculaire au plan d'étude) du domaine traité par éléments finis.[\[133\]](#).

$$S_{ij}(NXN) = \int_{sk} Lv \text{grad } \beta_i \text{ grad } \beta_j dS$$

$$G_{ik}(NXN) = \int_{sk} L\beta_i \beta_j \sigma dS_k \quad (7-14)$$

$$G_{ik}(NXM) = \int_{sk} \beta_i \sigma dS_k$$

$M$ : nombre de conducteurs.

Les relations courant-tension (7-11) des conducteurs se présentent sous la forme de :

$$[\Delta V] = [R][I] + [R][C]^T \frac{d[A]}{dt} \quad (7-15)$$

Où  $[R]$  est la matrice diagonale:

$$R_{kk}(MXM) = R_k \quad (7-16)$$

### 7.1.2 Description et fonctionnement de l'analyseur de réseau Megger MPQ1000

L'analyseur de réseau est un dispositif d'évaluation de la qualité d'un réseau électrique. Il permet d'obtenir en instantané les principales caractéristiques du réseau telles que le courant, la tension, la fréquence, les puissances active et réactive, les harmoniques. Il est également possible de réaliser le bilan énergétique complet d'une installation.

Il dispose de quatre canaux de mesure en tension et en courant. L'analyseur capture et enregistre tous les paramètres transitoires, alarmes et formes d'onde. La configuration des ratios permet d'obtenir une lecture directe des mesures. Il offre la possibilité d'accéder directement aux mesures (harmoniques, taux de déséquilibre ...). Des tensions jusqu'à 1000V peuvent être mesurées avec le Megger MPQ1000.

Les mesures sont utilisées avec le logiciel MEGGER PQ. Il permet la configuration, le traitement et l'analyse des données [16].

### 7.1.3 Mesures expérimentales avec l'analyseur Megger MPQ1000.

Nous avons installé un analyseur de réseau Megger MPQ1000 en plusieurs points du réseau SW pour étudier les paramètres en période de forte demande (Figure 7-1) [[134](#)].

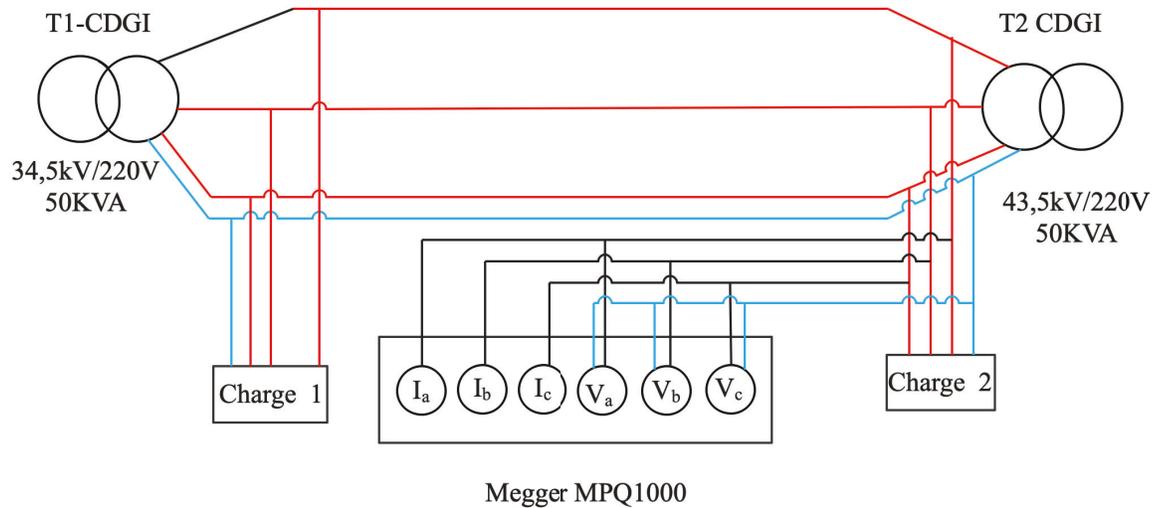


Figure 7-1 Analyseur Megger MPQ1000 connecté au réseau

#### 7.1.4 Résultats des travaux pratiques

L'expérience a été réalisée sur un réseau basse tension du Burkina Faso alimenté par un transformateur 0,4 / 15kV / 160 kVA avec un taux de charge de 70%. Le câble utilisé est de type torsadé Retylène aluminium 3x70 + 1x54,6 + 16 mm<sup>2</sup>.

Les travaux se sont déroulés en deux temps. La première étape a été de prendre les paramètres du réseau basse tension sans couplage chez les clients le long de la ligne à partir du poste du transformateur jusqu'à une distance de 1200 mètres. La deuxième étape, nous avons couplé deux réseaux basse tension alimentés chacun par un transformateur et nous avons procédé aux mêmes mesures.

La Figure 7-2 montre les courbes de charge enregistrées chez un consommateur sur cinq jours successifs. Il existe trois niveaux de demande de puissance. Un pic entre 19h-22h, une baisse de la demande entre 22h à 9h et un dernier pic à partir de 9h jusqu'à 16h. Ces différentes variations de demande de puissance peuvent avoir un impact sur le déséquilibre de tension de chaque consommateur.

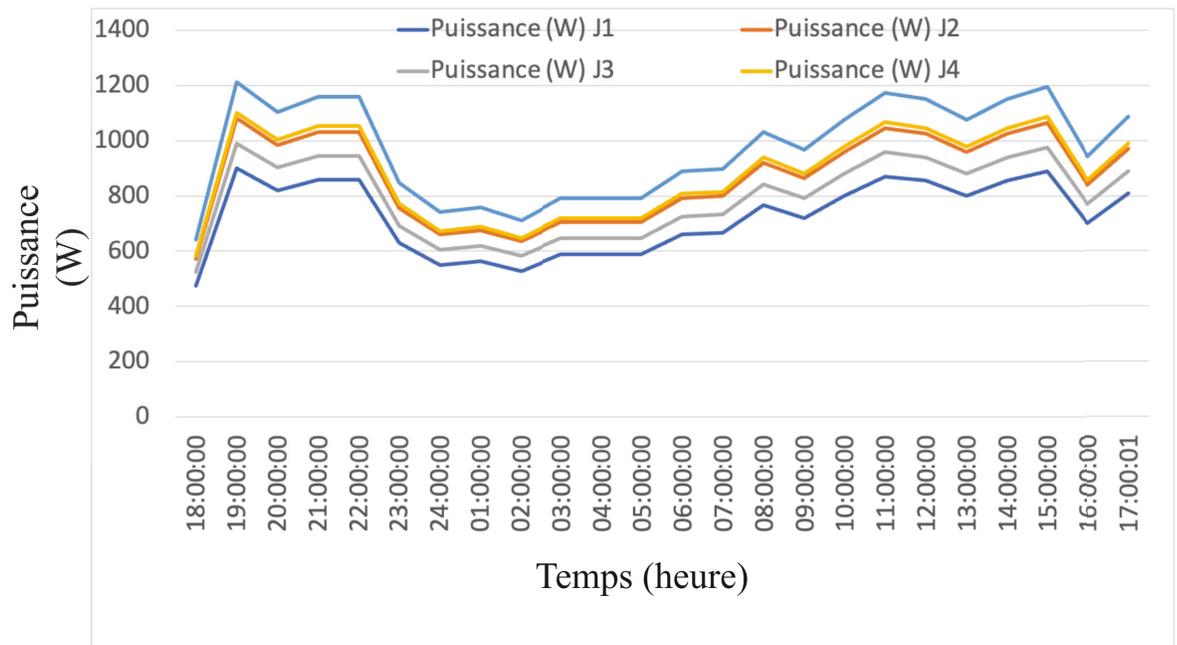


Figure 7-2 Courbe de charge chez un consommateur

La Figure 7-3 montre le facteur de déséquilibre enregistré sur la ligne en fonction de la distance par rapport au poste source pour un réseau ordinaire et un réseau couplé.

Pour un réseau ordinaire (courbe rouge), on constate qu'à partir de 460 m le facteur de déséquilibre de 2,3% commence à se dégrader et dépasse les limites acceptables en termes de distribution électrique. Sa valeur atteint 9,3% largement au-dessus des limites admissibles

Pour un réseau couplé, nous avons une amélioration du facteur de déséquilibre à travers le réseau. La courbe en bleu nous montre un bon facteur de déséquilibre jusqu'à 920 mètres. Mais le dernier client a son facteur de déséquilibre à 3,54%, ce qui est sensiblement plus élevé mais plus acceptable que les 9,3% du réseau ordinaire.

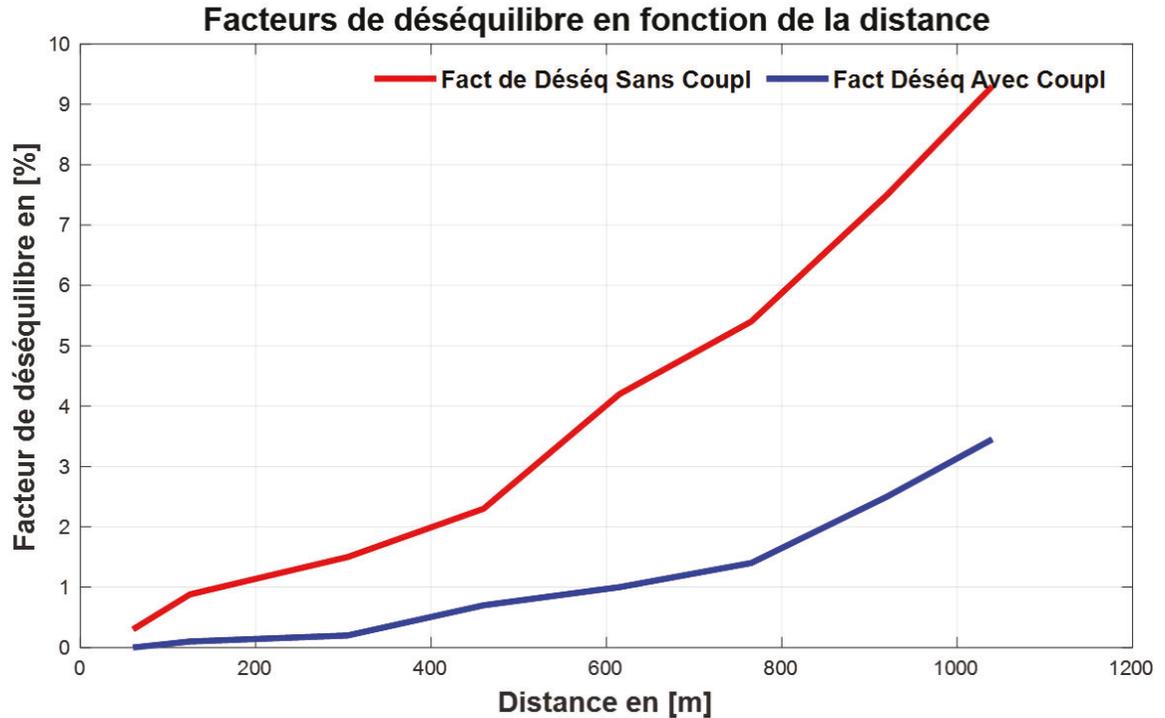


Figure 7-3 Facteur de déséquilibre en fonction de la distance

La Figure 7-4 montre les signaux de tension sinusoïdaux chez un client en bout de ligne sur un réseau sans couplage. Sur cette figure, les valeurs de tension maximales sont bien inférieures à la normale, ce qui entraînera un mauvais facteur de déséquilibre. En outre, nous avons la présence des harmoniques significative chez le consommateur.

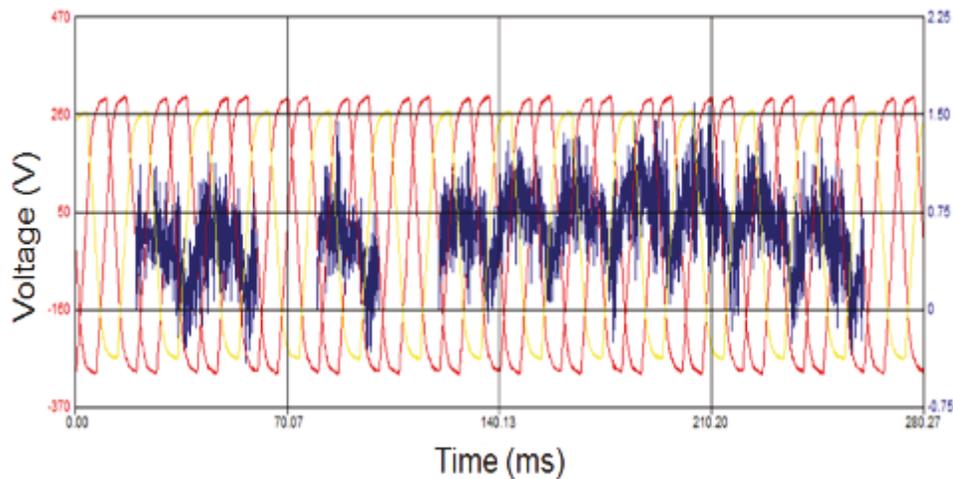


Figure 7-4 Signal sinusoïdal chez un consommateur sans couplage réseau

Contrairement à la Figure 7-4, la Figure 7-5 présente les signaux de tension sinusoïdaux chez le même consommateur, mais connecté à un réseau couplé. Dans cette configuration, les valeurs maximales des trois tensions atteignent les valeurs normales. Ce qui se traduit par une amélioration du facteur de déséquilibre. D'où l'amélioration du taux de déséquilibre.

Pour la disparition des harmoniques, cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Soit le couplage l'a dissipé ou que la charge qui portait ces harmoniques a été mise hors tension.

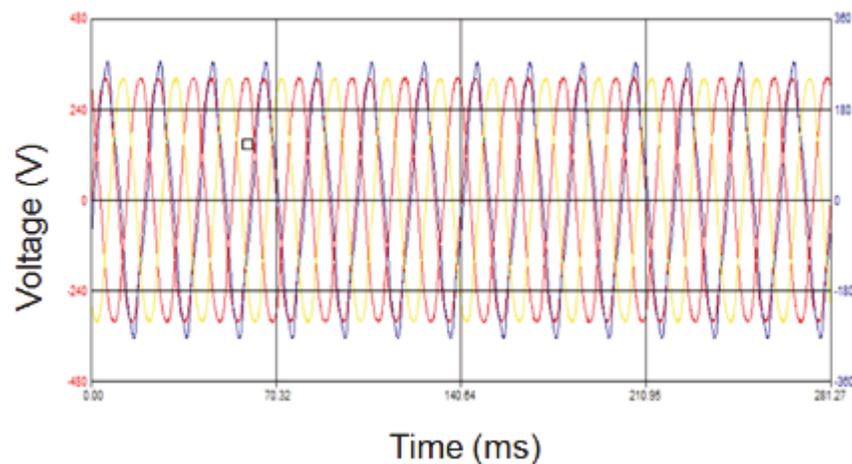


Figure 7-5 Signal sinusoïdal chez un consommateur avec couplage du réseau

### 7.1.5 Résultats des travaux de simulation

Nous avons procédé par simulation sur Matlab/Simulink/SimPowerSystems de ces deux types de réseaux (Annexe G). La Figure 7-16 représente les tensions obtenues aux bornes d'une charge avec un seul réseau CDGI et deux réseaux CDGI couplés. Nous constatons que pour un réseau CDGI simple, la baisse de tension est bien perceptible sur la troisième phase. Lorsque les deux réseaux sont couplés il y a une amélioration du niveau de tension.

Les tensions mesurées sur un réseau CDGI simple sont :  $V_{abc1} = 280V$ ,  $V_{abc2} = 340V$  et  $V_{abc3} = 400V$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 35%.

Le couplage permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{abc1} = 380V$ ,  $V_{abc2} = 400V$  et  $V_{abc3} = 390V$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 5%.

La limite de cette technique est le fait qu'il n'y a aucune possibilité d'agir sur les valeurs de tension obtenues. Le déséquilibre dépendra donc de la distance du client par rapport aux transformateurs et de la variation de la charge sur le réseau.

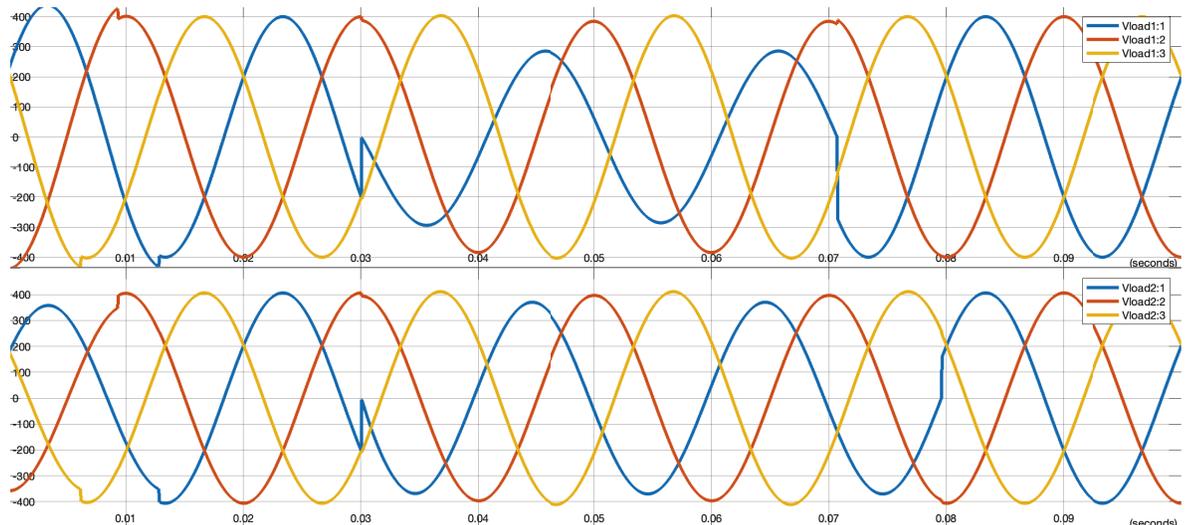


Figure 7-6 Courbe réseau CDGI simple (Vload1) et couplé (Vload2) simulé dans Matlab

### 7.1.6 Conclusion partielle sur le réseau avec couplage

Quelques jours de fonctionnement de cette expérience sur le réseau de distribution ont confirmé la viabilité de cette méthode pour réduire le déséquilibre de tension dans le réseau triphasé CDGI. Il a fourni la même qualité de service qu'un système de distribution ordinaire et aucun problème n'a été causé par le couplage de réseau.

La simulation sur Matlab a permis également de confirmer que le couplage de deux réseaux CDGI permet d'améliorer le déséquilibre de tension.

Avec ces données, nous pouvons confirmer que cette technique bien que présentant certaines limites peut aider les gestionnaires de réseaux CDGI à solutionner le problème de déséquilibre de tension.

## 7.2 Réduction du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI par STATCOM

Une seconde méthode de réduction du déséquilibre de tension consiste à l'utilisation des convertisseurs NPC et H bridge pour mesurer leur performance.

Pour chaque type de convertisseur, nous avons fait des simulations dans un premier temps pour une différence d'amplitude de tension sur une phase et dans un second temps sur deux phases.

Les simulations ont été réalisées avec les éléments de la bibliothèque de Matlab/Simulink/SimPowerSystems.

### 7.2.1 STATCOM NPC

#### 7.2.1.1 Étude sur une différence d'amplitude de tension sur une phase

La Figure 7-17 Figure 7-16 représente les tensions obtenues sur un réseau CDGI avec une différence d'amplitude de tension sur une phase. Pour  $0s < t < 0.05s$  la charge est alimentée par une tension  $V_{abc}$  sans baisse de tension, ce qui se traduit par le même signal sinusoïdal aux bornes de la charge. Le STATCOM n'injecte aucune tension. De  $0.05s < t < 0.1s$ , nous appliquons une baisse de tension sur la phase 1, le STATCOM détecte cette baisse de tension, et injecte une tension ( $V_{injecteur}$ ). Cette injection permet de corriger la baisse de tension aux bornes de la charge et nous donne une bonne tension équilibrée  $V_{load}$ . Pour  $0.1s < t < 0.15s$ ,

la baisse de tension disparaît et les tensions reviennent à la normale. Le STATCOM cesse donc l'injection. Entre  $0.15s < t < 0.2s$ , la baisse de tension apparaît de nouveau et le STATCOM procède à une nouvelle injection. Pour  $0.2s < t < 0.3s$  la baisse de tension disparaît de nouveau. Nous observons que le STATCOM cesse à nouveau d'injecter.

Les tensions mesurées à la source sont :  $V_{abc1} = 284V$ ,  $V_{abc2} = 344V$  et  $V_{abc3} = 402V$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 33%.

L'injection du STATCOM permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{abc1} = 382V$ ,  $V_{abc2} = 400V$  et  $V_{abc3} = 392V$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 4%.

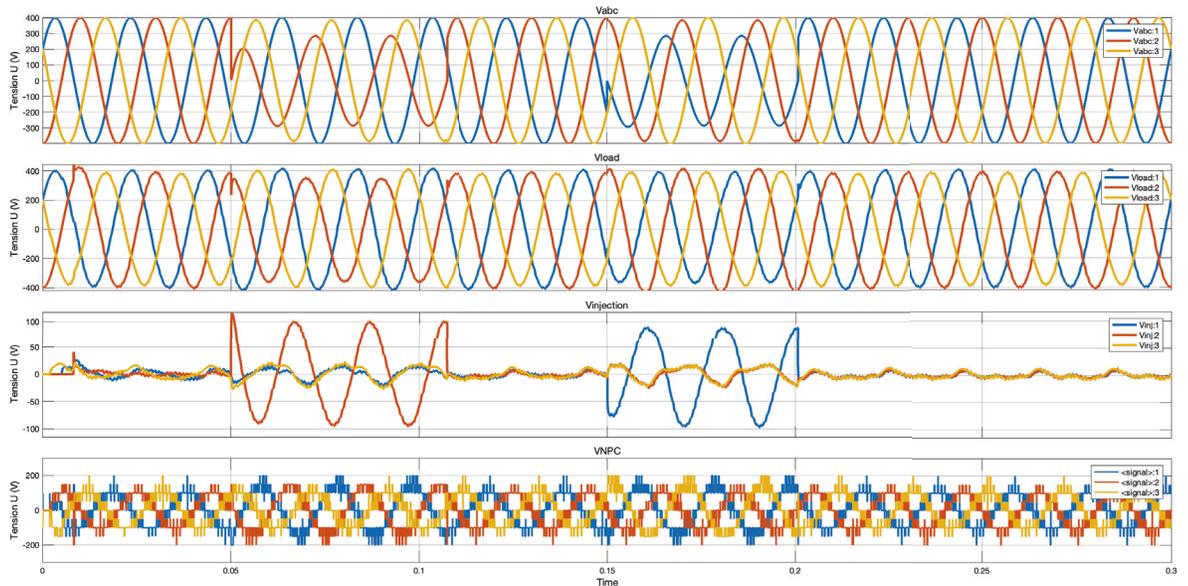


Figure 7-7 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ), la tension injectée par le STATCOM NPC ( $V_{inj}$ ) et la tension aux bornes du convertisseur (NPC)

La Figure 7-8 représente les taux de distorsion harmonique de courant de la charge

Nous avons un THD de 1,87% aux bornes de la charge. Ce taux signifie que les différents harmoniques créés par l'injection de tension ont été tous filtrés.

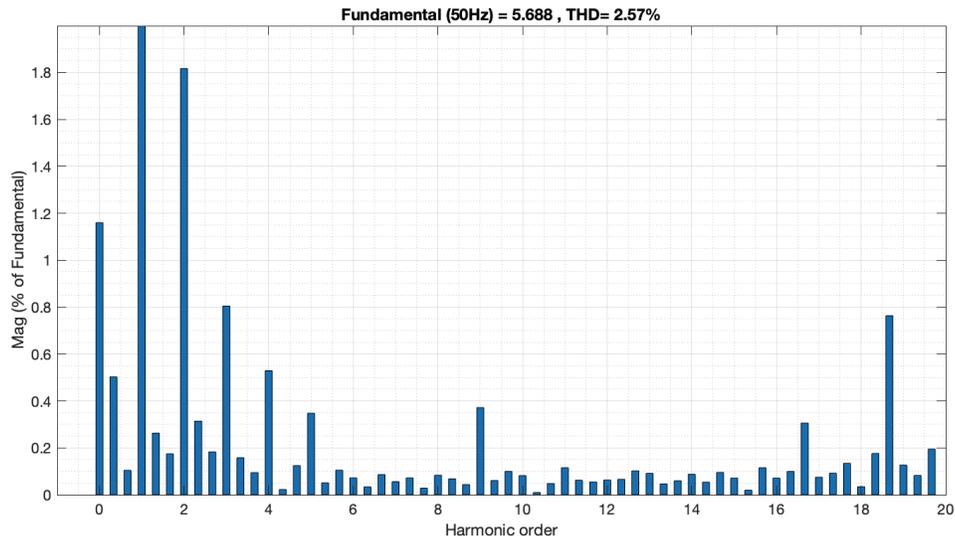


Figure 7-8 Taux de distorsion harmoniques du courant de la charge

#### 7.2.1.2 Étude d'une différence d'amplitude sur deux phases de tension.

Dans cette partie nous créons une différence d'amplitude de tension sur deux phases sur le réseau CDGI avec un STATCOM NPC. La Figure 7-9 représente les tensions obtenues à différents niveaux. Pour  $0s < t < 0.05s$  la charge est alimentée par une tension  $V_{abc}$  sans déséquilibre de tension, ce qui se traduit par le même signal sinusoïdal aux bornes de la charge. Le STATCOM n'injecte aucune tension. De  $0.05s < t < 0.1s$ , nous appliquons un déséquilibre de tension sur deux phases, le STATCOM détecte ce déséquilibre, et injecte la tension pendant cette même période ( $V_{injecteur}$ ). Cette injection permet de corriger le déséquilibre de tension aux bornes de la charge et nous donne une bonne tension équilibrée  $V_{load}$ . Pour  $0.1s < t < 0.15s$ , le déséquilibre de tension disparaît et les tensions reviennent à la normale. Le STATCOM cesse donc l'injection. Entre  $0.15s < t < 0.2s$ , le déséquilibre de tension apparaît de nouveau et le STACOM procède à une nouvelle injection. Pour  $0.2s < t$

< 0.3s le déséquilibre disparaît de nouveau. Nous observons que le STATCOM cesse à nouveau d'injecter.

Les tensions mesurées à la source sont :  $V_{abc1}= 289V$ ,  $V_{abc2}=267V$  et  $V_{abc3} = 563V$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 38%.

L'injection du STATCOM permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{abc1}= 396V$ ,  $V_{abc2}=381V$  et  $V_{abc3} = 409V$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 7%.

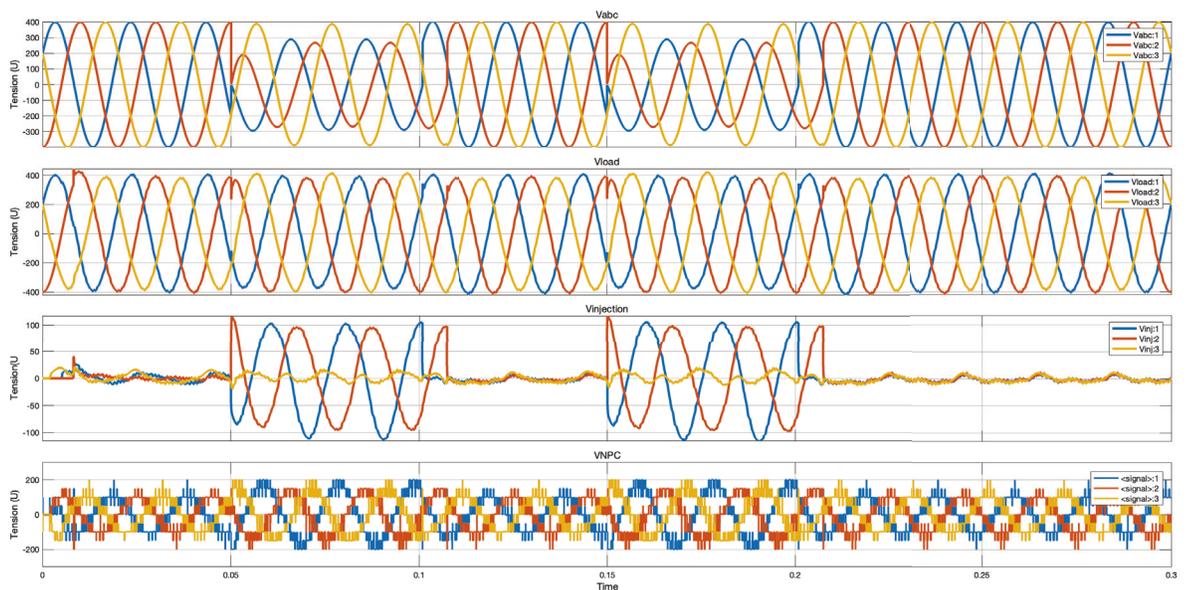


Figure 7-9 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ), la tension injectée par le STATCOM NPC ( $V_{inj}$ ) et la tension aux bornes du convertisseur (VNPC)

La Figure 7-10 représente les taux de distorsion harmonique du courant.

Nous remarquons que le THD n'a pas varié, comparé au réseau avec baisse de tension.

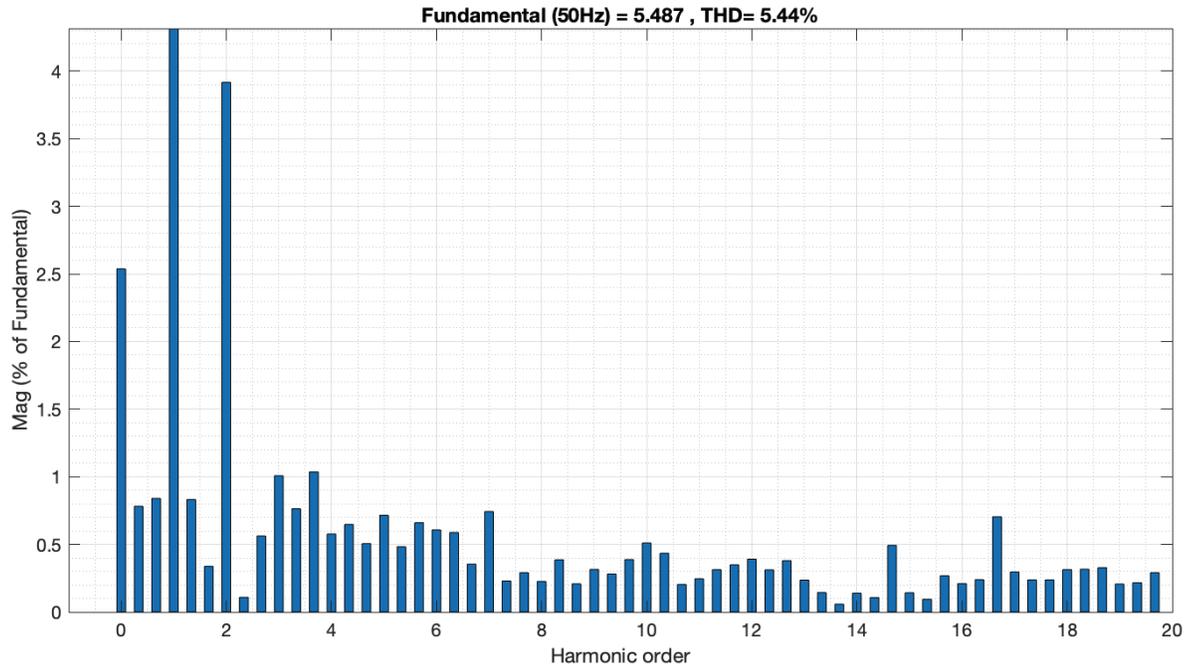


Figure 7-10 Taux de distorsion harmoniques du courant de la charge

## 7.2.2 STATCOM pont en H

### 7.2.2.1 Étude d'une baisse de tension sur une phase

La Figure 7-11 représente les tensions obtenues sur un réseau CDGI avec une baisse de tension sur une phase connecté à un STATCOM H bridge. Pour  $0s < t < 0.05s$  la charge est alimentée par une tension  $V_{abc}$  sans baisse de tension, ce qui se traduit par le même signal sinusoïdal aux bornes de la charge. Le STATCOM n'injecte aucune tension. De  $0.05s < t < 0.1s$ , nous appliquons une baisse de tension sur la phase 1, le STATCOM détecte cette baisse de tension, on a donc l'injection de tension pendant cette même période ( $V_{injecteur}$ ). Cette injection permet de corriger la baisse de tension aux bornes de la charge et nous donne une tension équilibrée  $V_{load}$ . Pour  $0.1s < t < 0.15s$ , la baisse de tension disparaît et les tensions reviennent à la normale. Le STATCOM cesse donc l'injection. Entre  $0.15s < t < 0.2s$ , la baisse de tension apparaît de nouveau et le STATCOM procède à une nouvelle injection.

Pour  $0.2s < t < 0.3s$  la baisse de tension disparaît de nouveau. Nous observons que le STATCOM cesse à nouveau d'injecter.

Les tensions mesurées à la source sont :  $V_{abc1}= 282, V$   $V_{abc2}=399V$  et  $V_{abc3} =395V$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 32%.

L'injection du STATCOM permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{abc1}= 371V$ ,  $V_{abc2}= 390V$  et  $V_{abc3} = 394V$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 5%.

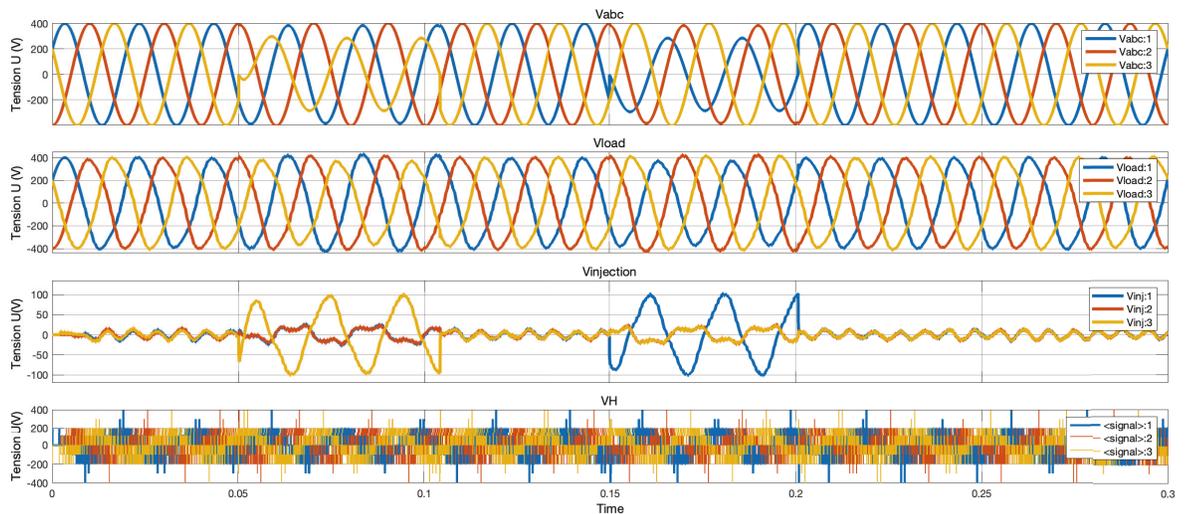


Figure 7-11 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ), la tension injectée par le STATCOM H ( $V_{inj}$ ) et la tension aux bornes du convertisseur ( $VH$ )

La Figure 7-12 représente les taux de distorsion harmonique du courant de charge

Nous remarquons que le THD n'a pas varié, comparé au réseau avec baisse de tension.

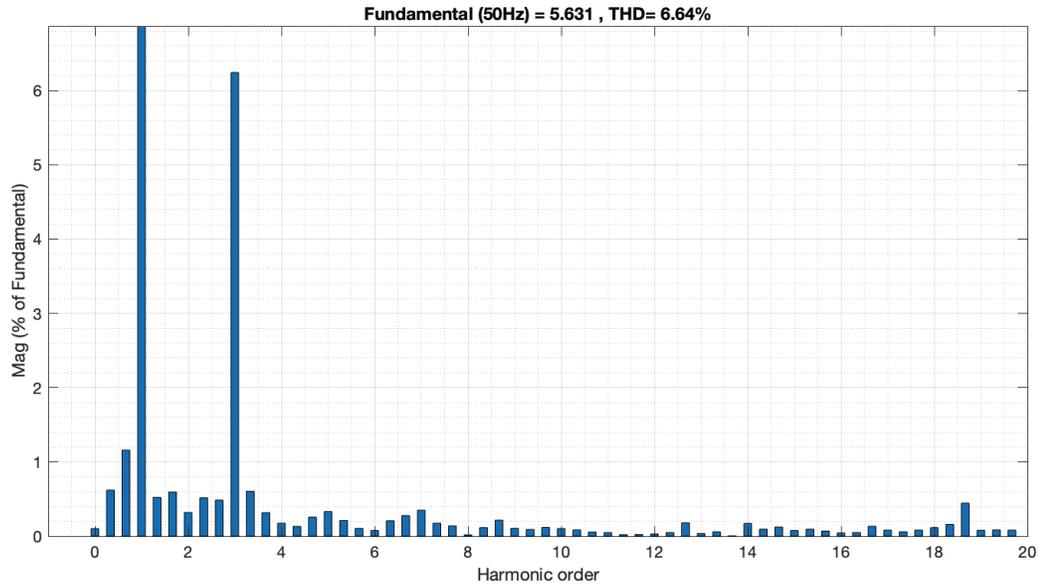


Figure 7-12 Taux de distorsion harmoniques du courant de la charge

#### 7.2.2.2 Étude de différence d'amplitude de tension sur deux phases.

Dans cette partie nous créons un déséquilibre de tension sur le réseau CDGI avec un STATCOM H Bridge. La Figure 7-13 représente les tensions obtenues à différents niveaux. Pour  $0s < t < 0.05s$  la charge est alimentée par une tension  $V_{abc}$  sans déséquilibre de tension, ce qui se traduit par le même signal sinusoïdal aux bornes de la charge. Le STATCOM n'injecte aucune tension. De  $0.05s < t < 0.1s$ , nous appliquons une baisse de tension sur deux phases, le STATCOM détecte ces nouvelles perturbations, et injecte la tension pendant cette même période ( $V_{injecteur}$ ). Cette injection permet de corriger le déséquilibre de tension aux bornes de la charge et nous donne une tension équilibrée  $V_{load}$ . Pour  $0.1s < t < 0.15s$ , le déséquilibre de tension cesse et les tensions reviennent à la normale. Le STATCOM cesse donc l'injection. Entre  $0.15s < t < 0.2s$ , le déséquilibre de tension apparaît de nouveau et le STATCOM procède à une nouvelle injection. Pour  $0.2s < t < 0.3s$  le déséquilibre disparaît de nouveau. Nous observons que le STATCOM cesse à nouveau d'injecter.

Les tensions mesurées à la source sont :  $V_{abc1} = 387V$ ,  $V_{abc2} = 290V$  et  $V_{abc3} = 268$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 38%.

L'injection du STATCOM permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{abc1} = 430V$ ,  $V_{abc2} = 388V$  et  $V_{abc3} = 400V$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 10%.

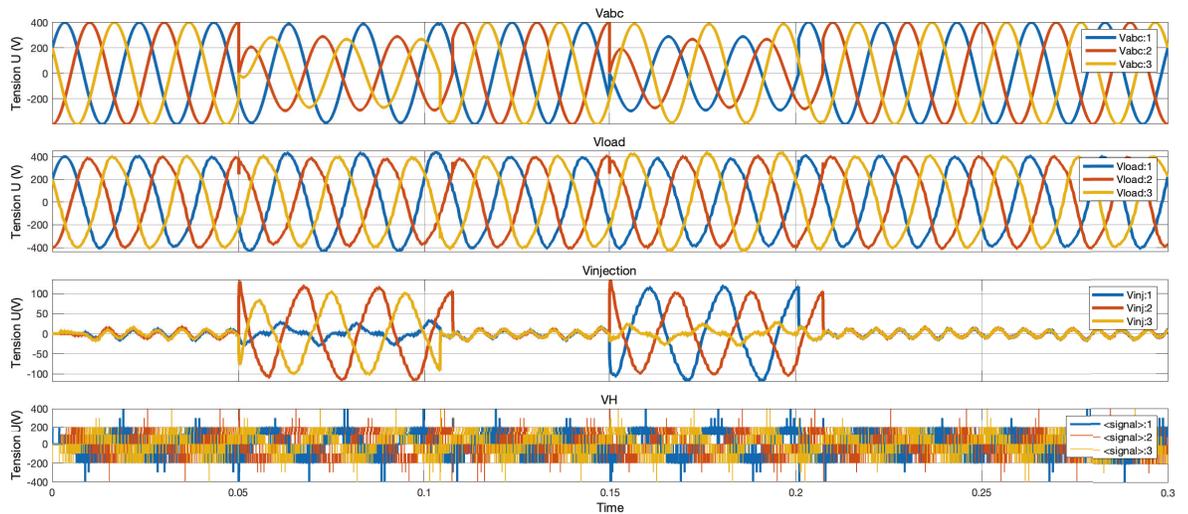


Figure 7-13 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ), la tension injectée par le STATCOM H ( $V_{inj}$ ) et la tension aux bornes du convertisseur ( $VH$ )

La Figure 7-14 représente les taux de distorsion harmonique du courant qui est de 7,27%

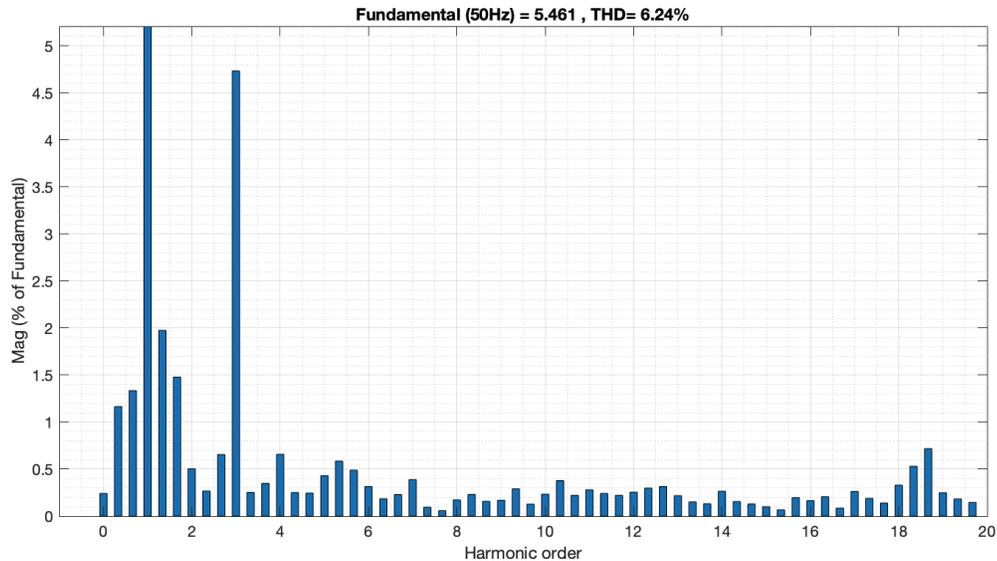


Figure 7-14 Taux de distorsion harmoniques du courant de la charge

### 7.2.3 Conclusion partielle sur le STATCOM

À travers l'étude comparative, on peut conclure que les STATCOM NPC et H bridge réduisent considérablement les variations de tension enregistrées sur les réseaux CDGI lors de l'apparition de certains phénomènes inhérents au fonctionnement du réseau. Ce qui se traduit par l'obtention d'un meilleur facteur de déséquilibre. Si les deux FACTS sont une solution pour le déséquilibre de tension, les travaux ont également prouvé que le STATCOM NPC a des meilleurs résultats. Par contre, la fermeture des STATCOM engendre des harmoniques considérables sur le réseau qui ont été résolues par l'installation des filtres.

### 7.3 Réduction du déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI par les DVR

Dans un premier temps nous avons fait la simulation avec une charge linéaire alimenté par un réseau triphasé ayant une différence d'amplitude de tension sur une et deux phases puis dans un second temps avec une charge non linéaire.

### 7.3.1 Contrôle du DVR

La Figure 7-15 représente l'algorithme de contrôle utilisé dans la simulation pour le contrôle de la tension injectée. Cet algorithme est basé sur la théorie SRF.

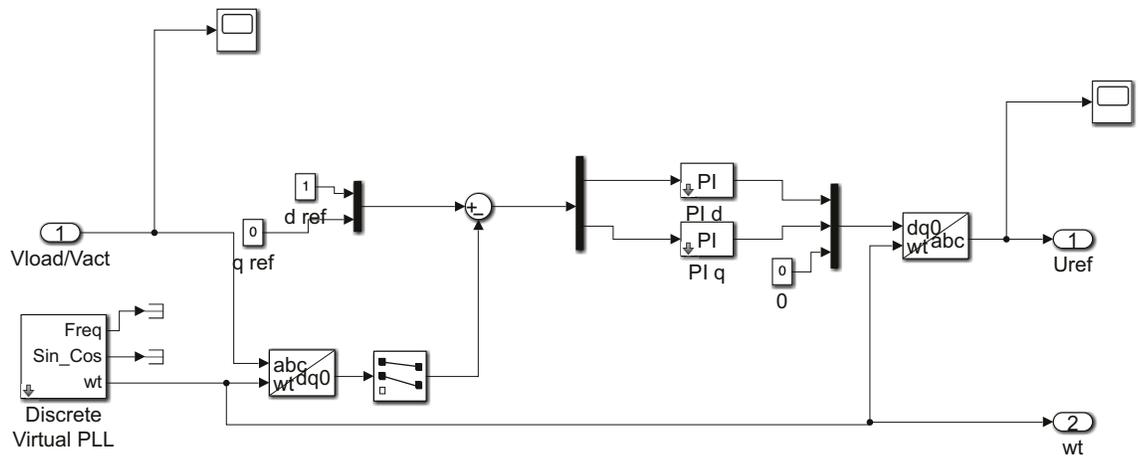


Figure 7-15 Algorithme de contrôle des DVR

### 7.3.2 Charge linéaire

#### 7.3.2.1 Étude d'une différence d'amplitude de tension sur une phase

La Figure 7-16 représente les tensions obtenues pour une charge linéaire alimentée par une baisse de tension sur une phase. Pour  $0s < t < 0.03s$  la charge est alimentée par une tension  $V_{abc}$  sans baisse de tension, ce qui se traduit par le même signal sinusoïdal aux bornes de la charge. Le DVR n'injecte aucune tension. De  $0.03s < t < 0.07s$ , nous appliquons une baisse de tension sur la phase 1, avec l'action du DVR qui a détecté cette baisse de tension, on a donc l'injection de tension pendant cette même période ( $V_{injecteur}$ ). Cette injection permet de corriger le déséquilibre de tension aux bornes de la charge et nous donne une bonne tension équilibrée  $V_{load}$  pour  $0.03s < t < 0.07s$  malgré le déséquilibre de tension

observé à l'entrée. Pour  $0.07s < t < 0.1s$  nous arrêtons la baisse de tension provoquée sur la phase 1 et la charge est maintenant alimentée par une tension équilibrée. Nous observons que le DVR cesse d'injecter la tension au même moment  $V_{injection} = 0$  pour  $0.03s < t < 0.07s$ .

Les tensions mesurées à la source sont :  $V_{abc1} = 284V$ ,  $V_{abc2} = 384V$  et  $V_{abc3} = 401V$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 32%.

L'injection du DVR permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{abc1} = 400V$ ,  $V_{abc2} = 410V$  et  $V_{abc3} = 405V$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 2,4 %.

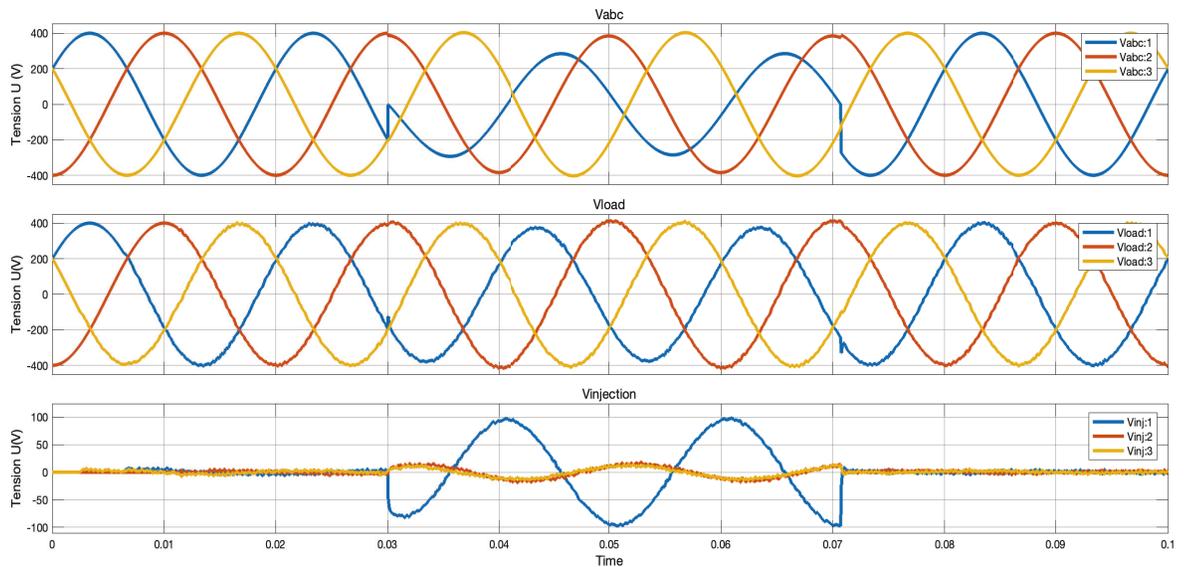


Figure 7-16 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ) et la tension injectée par le DVR

La Figure 7-17 représente les taux de distorsion harmonique du courant de charge.

Nous avons un TDH de 2.32% aux bornes de la charge. Ce qui traduit une faible présence d'harmonique malgré la compensation.

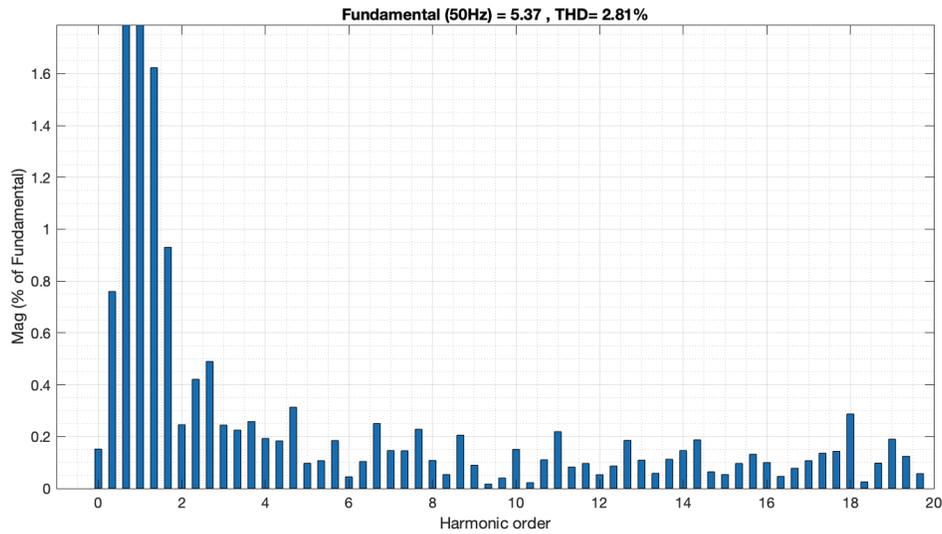


Figure 7-17 Taux de distorsion harmonique du courant de charge

### 7.3.2.2 Étude d'une différence d'amplitude de tension sur deux phases.

Dans cette partie nous alimentons toujours une charge linéaire en créant une différence d'amplitude sur deux phases. La Figure 7-18 représente les tensions obtenues pour une charge linéaire alimentée par une tension déséquilibrée. Pour  $0s < t < 0.03s$  la charge est alimentée par une tension  $V_{abc}$  sans déséquilibre de tension, ce qui se traduit par l'obtention du même signal sinusoïdal aux bornes de la charge. Le DVR n'injecte aucune tension. De  $0.03s < t < 0.07s$ , nous appliquons une tension déséquilibrée aux bornes de la charge, après comparaison des niveaux de tension, le DVR injecte une tension pendant cette même période ( $V_{injection}$ ) sur les trois phases pour corriger le déséquilibre. Pour  $0.07s < t < 0.1s$ , nous cessons de créer le déséquilibre de tension et la charge est maintenant alimentée par une tension équilibrée. Nous observons que le DVR cesse d'injecter la tension au même moment  $V_{injection} = 0$  pour  $0.03s < t < 0.07s$ .

Les tensions mesurées à la source sont :  $V_{abc1}= 275V$ ;  $V_{abc2}=274V$  et  $V_{abc3} = 386V$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 35%.

L'injection du DVR permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{abc1}= 395V$ ;  $V_{abc2}=390V$  et  $V_{abc3} = 400V$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 2,5%.

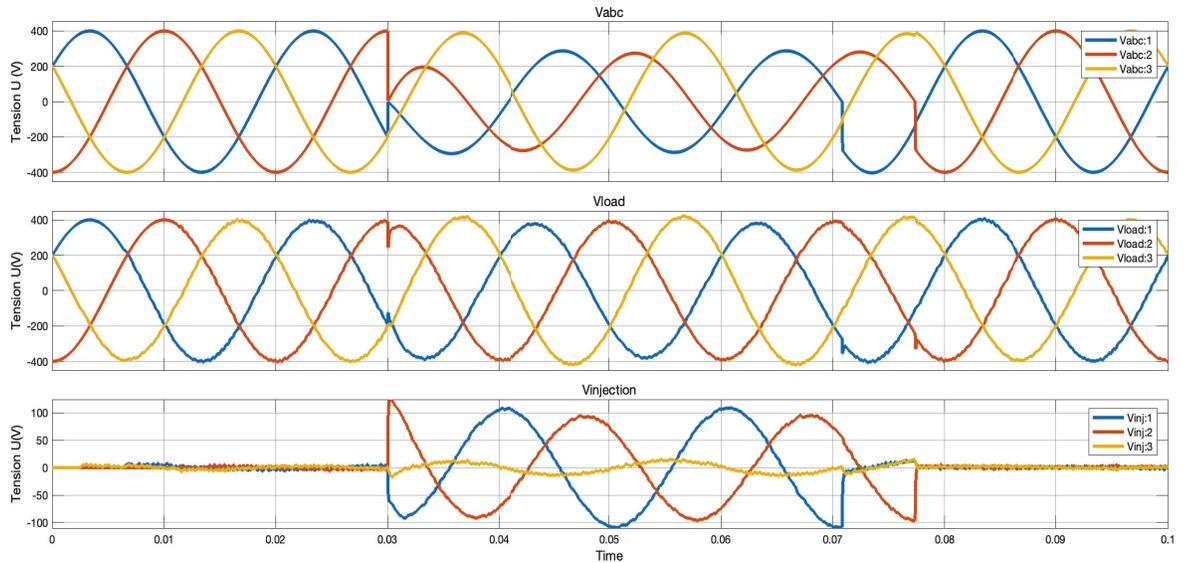


Figure 7-18 Tension du réseau ( $V_{abc}$ ), de la charge ( $V_{load}$ ) et injectée par le DVR ( $V_{inject}$ )

La Figure 7-19 représente les taux de distorsion harmonique du courant.

Comparé au réseau avec baisse de tension sur une phase, les taux de distorsion harmonique sont restés sensiblement les mêmes pour  $V_{abc}$ ,  $V_{load}$  et  $V_{inject}$ .

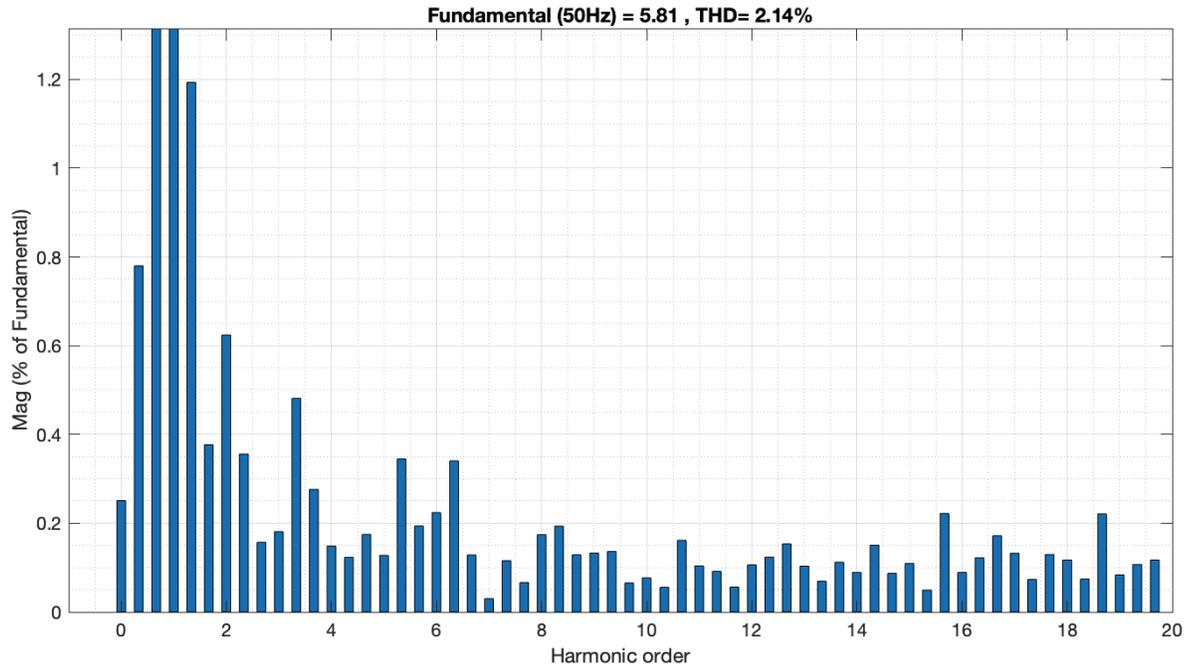


Figure 7-19 Taux de distorsion harmonique du courant de la charge

### 7.3.3 Charge non linéaire

Dans cette seconde partie nous avons fait la simulation avec une charge non linéaire alimentée par un réseau CDGI avec une différence d'amplitude sur une phase, puis sur deux phases.

#### 7.3.3.1 Différence d'amplitude sur une phase

La Figure 7-20 représente les tensions obtenues pour une charge non linéaire alimentée par une baisse de tension sur une phase. Pour  $0s < t < 0.03s$  la charge est alimentée par une tension  $V_{abc}$  sans baisse de tension, ce qui se traduit par le même signal sinusoïdal aux bornes de la charge. La charge étant non linéaire nous observons une distorsion de la tension. Le DVR n'injecte aucune tension. De  $0.03s < t < 0.07s$ , nous appliquons une baisse de tension sur la phase 1 avec la charge non linéaire. Le DVR injecte donc une tension ayant le même signal que la charge pour corriger le déséquilibre. Pour  $0.07s < t < 0.1s$ , la baisse de tension

prend fin, et la charge est maintenant alimentée par une tension équilibrée. Nous observons que le DVR cesse d'injecter la tension au même moment  $V_{\text{injection}} = 0$  pour  $0.03\text{s} < t < 0.07\text{s}$ .

Les tensions mesurées à la source sont :  $V_{\text{abc}1} = 284$ ;  $V_{\text{abc}2} = 383\text{V}$  et  $V_{\text{abc}3} = 402\text{V}$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 33%.

L'injection du DVR permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{\text{abc}1} = 394\text{V}$ ;  $V_{\text{abc}2} = 403\text{V}$  et  $V_{\text{abc}3} = 399\text{V}$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 2.2%.

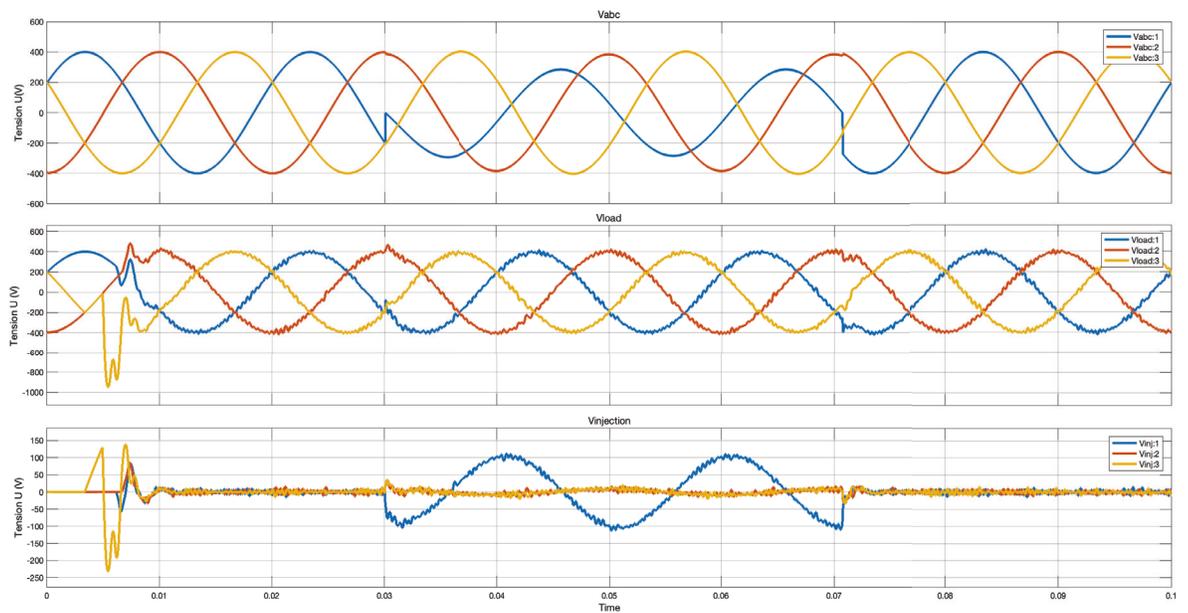


Figure 7-20 Tension du réseau ( $V_{\text{abc}}$ ), de la charge ( $V_{\text{load}}$ ) et du DVR  $V_{\text{injection}}$ .

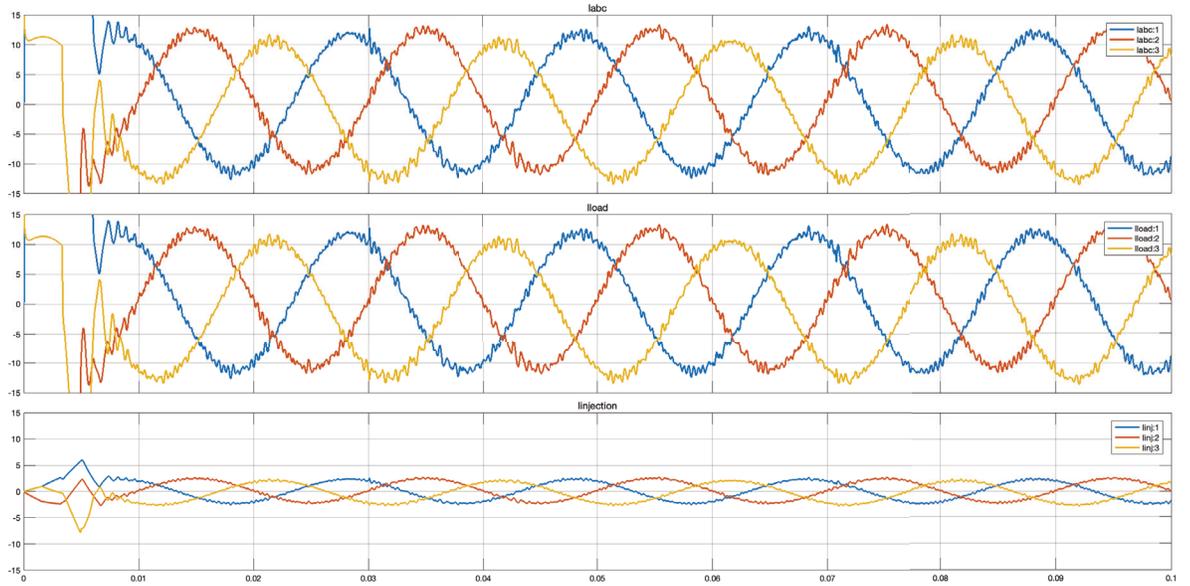


Figure 7-21 Courant du réseau  $I_{abc}$ , de la charge  $I_{load}$  et du DVR  $I_{inject}$

La Figure 7-23 représente les taux de distorsion harmonique du courant de charge. Pour la charge non linéaire le THD est de 13,39%.

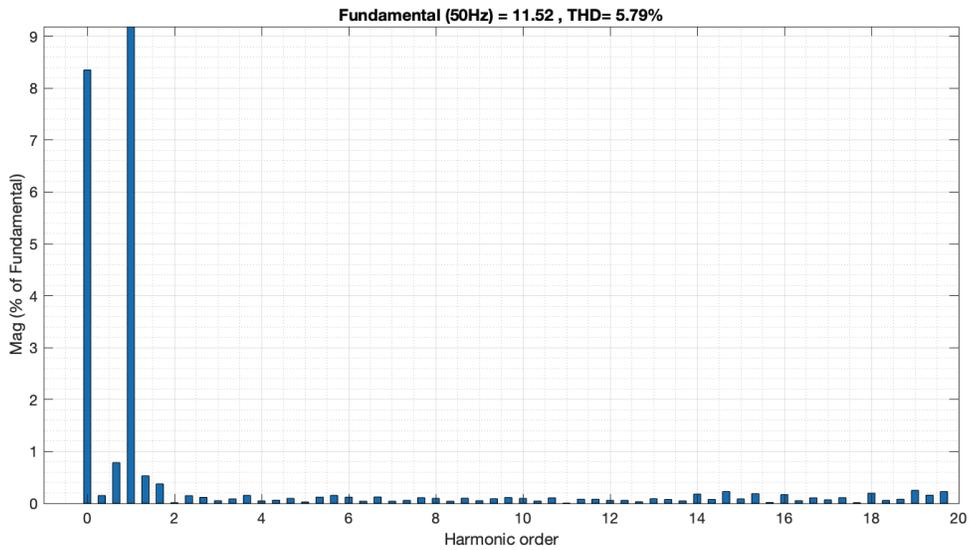


Figure 7-22 Taux de distorsion harmoniques du courant

### 7.3.3.2 Différence d'amplitude sur deux phases

La Figure 7-23 représente les tensions obtenues pour une charge non linéaire alimentée par une tension déséquilibrée. Comparées aux courbes obtenues pour la charge linéaire, nous constatons que malgré l'effet non linéaire de la charge le DVR injecte la tension au moment indiqué pour équilibrer la tension aux bornes de la charge.

Les tensions mesurées à la source sont :  $V_{abc1} = 287V$ ,  $V_{abc2} = 274V$  et  $V_{abc3} = 386V$ . Ces valeurs nous ramènent à un déséquilibre de tension de 35%.

L'injection du DVR permet d'améliorer la valeur de ces tensions à :  $V_{abc1} = 390V$ ,  $V_{abc2} = 394V$  et  $V_{abc3} = 384V$ , ce qui fait améliorer le déséquilibre à 2,5%.

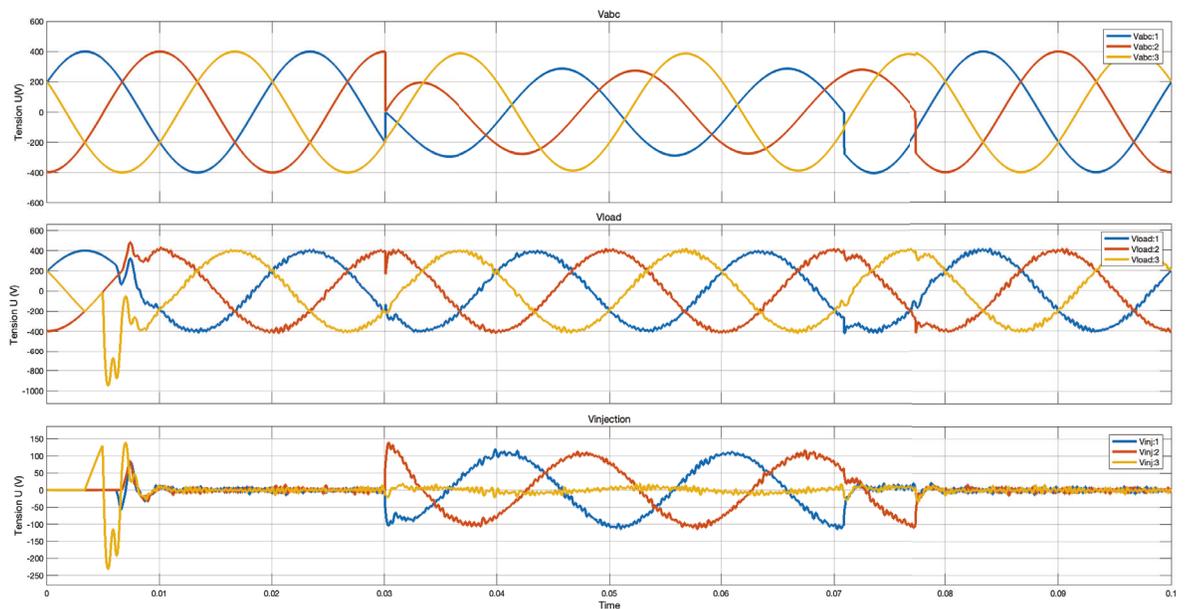


Figure 7-23 Tension  $V_{abc}$ , de la charge  $V_{load}$ , du DVR  $V_{injection}$

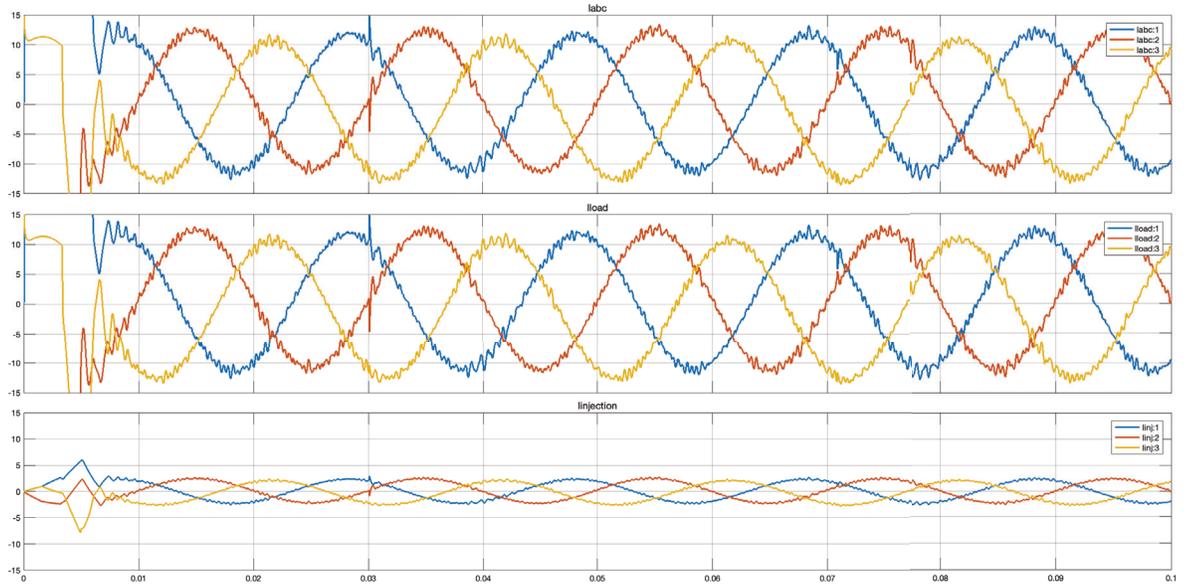


Figure 7-24 Courant Iabc, Iload et Iinject

La Figure 7-25 représente les taux de distorsion harmonique du courant de la charge non linéaire. Les THD reste sensiblement élevé comparé à la baisse de tension pour la même nature de charge, même si le réseau est déséquilibré.

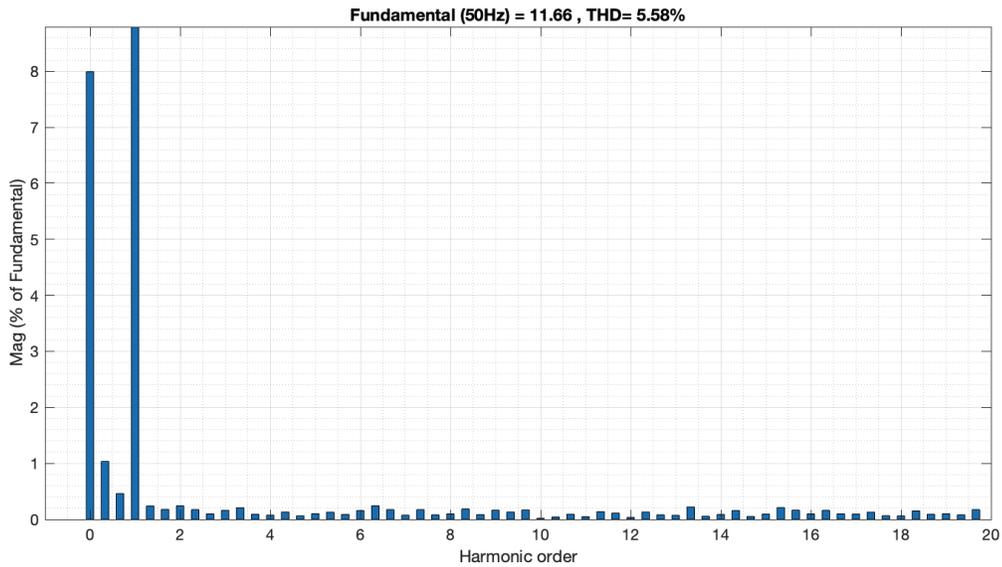


Figure 7-25 Taux de distorsion du courant

#### 7.3.4 Conclusion partielle sur le DVR

Pour une charge linéaire ou non linéaire alimentée par une différence d'amplitude de tension sur une phase ou sur deux phases nous constatons une réponse à temps du DVR qui injecte la tension nécessaire après comparaison et permet d'équilibrer la tension aux bornes de la charge.

Ce qui se traduit aux niveaux des courants par les appels de courant nécessaire au maintien de l'équilibre de tension.

Les taux de distorsion harmonique (THD) de courant de charge et de ligne sont restés dans la limite admissible (moins de 2%) pour une charge linéaire.

#### 7.4 Synthèse des résultats

Tableau 7-1 Synthèse des résultats de compensation

Technique de compensation	Valeur initiale de déséquilibre (%)	Valeur de déséquilibre après compensation (%)
Couplage de deux transformateur	9,3	3,45
Convertisseur NPC avec différence d'amplitude sur une phase	33	4
Convertisseur NPC avec différence d'amplitude sur deux phases	38	7
Convertisseur H Bridge avec différence d'amplitude sur une phase	32	5
Convertisseur H Bridge avec différence d'amplitude sur deux phases	38	10
DVR charge linéaire différence d'amplitude sur une phase	32	2,4
DVR charge linéaire différence d'amplitude sur deux phases	35	2,5
DVR charge non linéaire différence d'amplitude sur une phase	33	2,2
DVR charge linéaire différence d'amplitude sur deux phases	35	2,5

Static Var Generator (SVG):/STATCOM: 30Kvar/50Kvar/100Kvar: 2 000\$

Coût du DVR :

400V/50KVA triphasé : 15 700 \$ USD

400V/100KVA triphasé: 24 400 4USD

400V/160 KVA triphasé : 33 110 \$USD

## 7.5 Conclusion

Ce chapitre a traité de trois méthodes de réduction des déséquilibres de tension sur les réseaux CDGI.

La première a consisté à l'utilisation des DVR. Il ressort que pour une charge linéaire et non linéaire le DVR a un temps de réponse satisfaisant pour réduire les déséquilibres de tension.

La deuxième a consisté à l'insertion de STATCOM NPC et H bridge dans le réseau CDGI. Si les deux FACTS sont une solution pour le déséquilibre de tension, les travaux ont également montré que le STATCOM NPC a des résultats meilleurs.

En fin la troisième a consisté à des travaux expérimentaux sur un réseau de distribution public au Burkina Faso et de simulation de ces réseaux. Il ressort de ces travaux que la technique de couplage de deux réseaux CDGI alimentés par des transformateurs de distribution est également une solution plus simple pour réduire le déséquilibre de tension. Cette technique a des limites pour les clients situés en bout de ligne.

De ces trois techniques, le DVR reste celle qui présente les meilleurs résultats, suivi du STACOM et enfin de la méthode de couplage. En prenant en compte les coûts du matériel, le STATCOM pourrait être un compromis.

## Chapitre 8 - Conclusion générale

Dans ce chapitre, les conclusions finales de la thèse sont présentées ainsi que des contributions visant à apporter de nouvelles solutions pour améliorer la qualité de la tension sur les réseaux CDGI. Des travaux futurs qui pourraient être réalisés en utilisant les connaissances de cette étude sont aussi présentés.

### 8.1 Résumé de la recherche

L'objectif principal de cette recherche est de proposer de nouvelles techniques de réduction des déséquilibres de tension sur les réseaux CDGI pour améliorer la qualité de tension délivrée par ces types de réseaux. Pour atteindre cet objectif de recherche, plusieurs techniques sont proposées allant de l'utilisation des DVR et STATCOM à des méthodes simples telle que le couplage des réseaux.

Dans le Chapitre 1 les réseaux de transport et de distribution électriques ont été présentés.

Les réseaux de transport et de répartition sont alimentés par des générateurs de grande puissance dont la puissance nominale et la localisation ont fait l'objet d'une planification globale. La production est coordonnée orientée sur des zones très étendues.

Certains réseaux utilisent les liaisons à haute tension continue pour mettre en œuvre les systèmes de conversion courant alternatif/courant continu à semi-conducteurs.

Après conversion du niveau de tension à des valeurs inférieures à 30kV, ils deviennent des réseaux de distribution et présentent des structures radiales alimentées par un nombre restreint de postes à partir du réseau de transport et de répartition. Ils alimentent l'essentiel des consommateurs. Le réglage de la tension fournie aux consommateurs peut se faire par

découplage des réglages P-f et Q-V et permet de traiter les problèmes spécifiques de manière relativement indépendante.

Dans le Chapitre 2 les différents types de réseaux issus des lignes hautes tension ont été abordé. Les réseaux CDGI et les techniques de résolution des déséquilibres de tension ont été plus développés.

Le réseau CDGI consiste à isoler les câbles de garde d'une ligne de transport et les alimenter par une tension MT à partir d'un poste source de transformation.

Deux types de réseaux peuvent être obtenus en fonction du raccordement. Avec un seul câble de garde, on aura un réseau CDGI monophasé avec retour à la terre. Tandis qu'avec deux câbles de garde les configurations monophasées sans retour à la terre et le réseau triphasée peuvent être réalisés.

Pour les techniques de réduction des déséquilibres, elles sont basées essentiellement sur l'utilisation des composants passifs.

Le Chapitre 3 a présenté le fonctionnement et la configuration des FACTS.

Les différents FACTS destinés à répondre aux problèmes des réseaux permettent de donner des solutions en tenant compte des différentes contraintes, et surtout d'améliorer le contrôle du transit de puissance dans les réseaux et la qualité de fourniture d'électricité en temps réel.

Les Chapitres 4 et 5 ont traité essentiellement des différentes sources de convertisseurs dans les STATCOM et une étude théorique des onduleurs respectivement.

Les structures des onduleurs dans les convertisseurs multiniveaux se sont développées suite à la limitation des composants semi-conducteurs. Pour des applications à moyenne ou

haute tension, elles restent encore une solution pour assurer la conversion tout en assurant la tenue en tension des composants.

La structure la plus commune et aussi historiquement est le NPC. Cette structure est appréciée car sa mise en œuvre est simple et possède beaucoup d'applications. Elle reste cependant contraignante quand on souhaite faire une extension pour avoir en sortie plus de niveaux de tension.

Le Chapitre 6 présente les compensateurs actifs de type série qui sont largement utilisés à la fois pour injecter la tension de grandeur et de fréquence requises, rétablir ainsi la tension afin de protéger les charges sensibles de des problèmes de qualité.

Ces SSC sont également appelés DVR quand ils sont utilisés pour la compensation dynamique pour de courtes périodes.

Une étude analytique de divers indices de performance des SSC pour la compensation de la tension a été faite en détail. Le DVR est considéré comme l'une des meilleures solutions pour atténuer les problèmes de qualité de la tension sur différents types de charges et protéger les charges sensibles.

## 8.2 Contributions scientifiques

Le projet de recherche proposé dans cette thèse vise à trouver des techniques plus adaptées pour résoudre les problèmes de déséquilibre de tension sur les réseaux CDGI afin d'assurer une qualité de tension aux consommateurs de ces réseaux.

Les principales contributions de cette thèse sont exposées ci-dessous :

Des nouvelles techniques d'amélioration de la qualité de tension sur les réseaux CDGI ont été proposées pour permettre à ces types de réseaux majoritairement utilisés dans les zones rurales de fournir une tension respectant les critères de distribution électrique.

Ces propositions utilisent essentiellement trois techniques. L'insertion d'un DVR, d'un STATCOM et le couplage de deux réseaux existants.

A notre connaissance ces trois techniques n'ont pas encore été expérimentées sur les réseaux DGI.

L'insertion d'un DVR dans le réseau CDGI alimentant une charge linéaire ou non linéaire soumis à un déséquilibre de tension nous démontre l'obtention d'une tension équilibrée avec un THD acceptable aux bornes de la charge quel que soit le type de variation.

L'insertion des STATCOM NPC et H bridge réduit les variations de tension enregistrées sur les réseaux CDGI, donc un bon facteur de déséquilibre. Des deux configurations il ressort également que le NPC a de meilleures performances.

Pour la technique de couplage de deux réseaux CDGI, nous obtenons aussi une amélioration du niveau du facteur de déséquilibre. Mais cette solution présente des limites pour les longues lignes de distribution. Ainsi donc le client en bout de ligne se retrouve avec un facteur de déséquilibre au-delà de la norme.

Des trois solutions, l'insertion du DVR sur les réseaux CDGI est la meilleure en termes de performance mais les coûts sont exorbitants pour un besoin rural. On pourrait donc faire un compromis en faisant le choix des STATCOM.

### 8.3 Contribution apportée dans des articles

Le travail de cette thèse a permis la publication deux articles de conférences. L'un à CIGRÉ et l'autre à International Conference on Rural Electrification for Sustainable Development (CRESD 2020). Un article a été également publié dans le journal J Electr Electron Syst 5. En fin un article est en attente de soumission[[135](#)].

### 8.4 Travaux futurs

Pour nos travaux futurs, en tant que professionnel du domaine des réseaux électriques, nous travaillerons au développement de ces types de réseaux pour accroître la couverture électrique des pays du Sud surtout dans les zones rurales traversées par des lignes électriques haute tension.

Nous avons également quelques possibilités de recherches futures basées sur le travail présenté :

- réduction des déséquilibres de tension sur les réseaux CDGI par insertion DSTATCOMs (distribution static compensators)[[136](#)]. Quand bien même que le DSTATCOMs est essentiellement utilisé pour résoudre les déséquilibres de courant
- réduction des déséquilibres de tension sur les réseaux CDGI par insertion UPQC (unified power quality compensator). UPQC est la combinaison du DVR et du DSTATCOMs.
- Validation de ces travaux avec un logiciel de réseau électrique

## Bibliographie

- [1] doi: <https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>.
- [2] H. Patel and S. Chowdhury, "Review of technical and economic challenges for implementing rural microgrids in South Africa," in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, 2015, doi: 10.1109/PTC.2015.7232341.
- [3] T. Urmee, D. Harries, and A. Schlapfer, "Issues related to rural electrification using renewable energy in developing countries of Asia and Pacific," *Renewable Energy*, Article vol. 34, no. 2, pp. 354-357, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.05.004.
- [4] J. Liu, P. Zeng, H. Cheng, S. Zhang, J. Zhang, and X. Zhang, "Decentralized Expansion of Transmission Networks Incorporating Active Distribution Networks," in *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 1-4 Dec. 2019 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994520.
- [5] C. Bai-Xu, Z. Xiangyu, Z. Hongyi, S. Weicheng, and ZhuJie, "Research on distribution Network Planning in the context of distributed energy Resources," in *2021 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 7-9 April 2021 2021, pp. 780-783, doi: 10.1109/CICED50259.2021.9556584.
- [6] S. T. Lee, "A new vision for transmission operation and planning under an open power market," in *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003. CIGRE/PES 2003.*, 8-10 Oct. 2003 2003, pp. 127-131, doi: 10.1109/QSEPDS.2003.159808.
- [7] T. Pushparaj, C. Venkatesan, and S. Ramabalan, "Emission studies on Karanja biodiesel fuelled diesel engine with ethanol as additive," in *IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM-2012*, 2012, pp. 263-268.
- [8] A. Monteiro, E. Ribeiro, A. J. M. Cardoso, and C. Boccaletti, "Power control of a small-scale standalone wind turbine for rural and remote areas electrification," in *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2014*, 2014, pp. 889-894, doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872093.
- [9] M. S. Ferdous, K. A. Sagar, F. R. Bin Karim, and M. M. Rashed, "A case study on present scenario of biomass energy in bangladesh and its future prospect," in *2014 2nd International Conference on Green Energy and Technology, ICGET 2014*, 2014, pp. 95-98, doi: 10.1109/ICGET.2014.6966671.
- [10] F. Iliceto, F. M. Gatta, S. Lauria, M. Debebe, and M. Bussen, "Rural electrification in Ethiopia with the shield wire scheme," in *IEE Conference Publication*, 2005, vol. 5, 2005-11034 ed., pp. 233-242.
- [11] F. Iliceto, E. Cinieri, and F. Gatta, "Rural electrification of developing countries using the insulated shield wires of HV lines. New design criteria and operation experience,"

in *INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS*, 1994, vol. 2, pp. 37/38-03.

- [12] O. Alphonse, "Alimentation de faibles charges directement des lignes à haute tension," Thèse, Département d'Electricité, Electronique et Informatique, Université de Liège, 1, Décembre 2002.
- [13] G. Marchesan *et al.*, "Three-phase-two-wire rural distribution network: influence of design characteristics on voltage unbalance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1-11, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3196602.
- [14] Y. Tao, S. Wen-xia, Y. Cai-wei, and Y. Qing, "Experimental investigation on the impulse-current distribution of grounding electrodes with various structures," in *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 2008: IEEE, pp. 269-272.
- [15] F. Iliceto, F. Gatta, and G. Dokyi, "Three-phase and single-phase electrification in developing countries using the insulated shield wires of HV lines energized at MV. Operation experience in Ghana," in *IV International Conference on Power Systems Operation and Planning*, 2000.
- [16] N. Lopatkin, "On the Assessment of Three-Phase Delta Voltages' Unbalance," in *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 11-13 March 2020 2020, pp. 1-8, doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067480.
- [17] P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of voltage unbalance," *IEEE Power Engineering Review*, Article vol. 21, no. 5, pp. 50-51, 2001, doi: 10.1109/39.920965.
- [18] F. N. Lima, M. M. Santos, M. A. Benetti, T. Milke, and M. Sperandio, "Power Distribution Network Reconfiguration Considering the Transmission System Usage," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 12, pp. 2113-2121, 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9480154.
- [19] S. Kudal, S. Ankaliki, K. Sunagar, and V. Puthran, "Comparative performance analysis of power systems," in *2016 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, 9-10 Dec. 2016 2016, pp. 83-88, doi: 10.1109/ICEECCOT.2016.7955190.
- [20] F. M. Gatta, F. Iliceto, S. Lauria, and P. Masato, "Balancing methods of the "3-phase" shield wire schemes," in *2005 IEEE Russia Power Tech, PowerTech*, 2005, doi: 10.1109/PTC.2005.4524477.
- [21] B. Smohai and J. Ladanyi, "Analysis of methods to reduce the ground resistance of transmission line towers," in *IYCE 2015 - Proceedings: 2015 5th International Youth Conference on Energy*, 2015, doi: 10.1109/IYCE.2015.7180822.
- [22] K. Alidou and L. D. Mamadou, "Investigation of Grounding Electrode Impedance Variation on the Voltage and Phase Angle of Three Phase Shield Wire," presented at the CIGREE, Vancouver (Canada), 2016, 756.
- [23] "AC and DC Power Transmission (Conf. Publ. No.345)," in *International Conference on AC and DC Power Transmission*, 17-20 Sept. 1991 1991, p. 0\_1.

- [24] C. Michel, LAVOISIER, Ed. *L'exploitation des réseaux électriques avec l'électronique de puissance*, 1ère édition ed. HERMES SCIENCE PUBLICATIONS, avril 2006, p. 255 pages.
- [25] H. Huan *et al.*, "Research on Power Quality Control Method of Active Distribution Network with Microgrids," in *2018 3rd International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE)*, 29-30 Dec. 2018 2018, pp. 533-536, doi: 10.1109/ICSCSE.2018.00114.
- [26] R. L. Vasquez-Arnez, M. Masuda, J. A. Jardini, W. Kaiser, and E. J. V. Nicodem, "Tap-off power from the overhead shield wires of an HV transmission line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Article vol. 27, no. 2, pp. 986-992, 2012, Art no. 6169968, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2185253.
- [27] M. H. Albadi, A. S. A. Hinai, A. H. Al-Badi, M. S. A. Riyami, S. M. A. Hinai, and R. S. A. Abri, "Unbalance in power systems: Case study," in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 17-19 March 2015 2015, pp. 1407-1411, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125294.
- [28] Y. Lin, J. He, X. Xu, and Z. Shan, "Research on Fault Recovery Coordination Strategy of Transmission and Distribution Network Based on Multi-Source Data," in *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 17-19 Sept. 2018 2018, pp. 1086-1089, doi: 10.1109/CICED.2018.8592034.
- [29] M. A. A. Al-Ja'afreh and G. Mokryani, "Voltage Unbalance Mitigation in Low Voltage Distribution Networks using Time Series Three-Phase Optimal Power Flow," in *2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 31 Aug.-3 Sept. 2021 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548248.
- [30] "IEEE Draft Guide for Commissioning High-Voltage Direct-Current (HVDC) Converter Stations and Associated Transmission Systems," *IEEE P1378/D4, October 2021*, pp. 1-48, 2021.
- [31] G. D. Kamalapur, V. R. Sheelavant, E. Achar, C. U. Bhat, T. Nagacharana Teja, and G. Hegde, "Flexible A C transmission and study of TCSC," in *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics: Ushering in Technologies of Tomorrow, Today, ICCCI 2014*, 2014, doi: 10.1109/ICCCI.2014.6921844.
- [32] M. G. Mardika, T. A. Puri, Suwarno, M. Walch, U. Schichler, and G. Godel, "High voltage test on 245 kV post insulators with different materials," in *2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 29-30 Oct. 2015 2015, pp. 394-397, doi: 10.1109/ICITEED.2015.7408978.
- [33] Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, and O. Protsenko, "Partial Discharge as Threat to Insulation of High Voltage Direct Current Transmissions," in *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 17-19 April 2019 2019, pp. 24-27, doi: 10.1109/ESS.2019.8764201.
- [34] R. Billinton, R. Ghajar, F. Filippelli, and R. D. Bianco, "The Canadian Electrical Association approach to transmission and distribution equipment reliability

- assessment," in *Second International Conference on the Reliability of Transmission and Distribution Equipment, 1995.*, 29-31 March 1995 1995, pp. 7-12, doi: 10.1049/cp:19950210.
- [35] A. Pokryvailo, "Behavior of HV cable at short circuit: Part II," in *Proceedings of the 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, IPMHVC 2014*, 2015, pp. 249-251, doi: 10.1109/IPMHVC.2014.7287255.
- [36] V. Mariappan, M. R. Ahamed, and B. N. A. Thehli, "A comprehensive analysis and solution for sympathetic tripping in distribution network," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 10-13 June 2013, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2013.0912.
- [37] A. Savio, F. Bignucolo, and R. Caldon, "Contribution of MV static distributed generation to voltage unbalance mitigation," in *2016 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, 5-7 Oct. 2016 2016, pp. 1-6, doi: 10.23919/AEIT.2016.7892739.
- [38] O. Samuelsson, M. Hemmingsson, A. H. Nielsen, K. O. H. Pedersen, and J. Rasmussen, "Monitoring of power system events at transmission and distribution level," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 1007-1008, 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873014.
- [39] G. Ledwich and E. Palmer, "Energy function for power systems with transmission losses," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 785-790, 1997, doi: 10.1109/59.589682.
- [40] J. Yue, S. Cai, N. Xie, Z. Zhang, X. Xiang, and X. Dong, "Research on Distribution Network Topology and Energy Management Considering Energy Router Port Interconnection," in *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 30 Oct.-1 Nov. 2020 2020, pp. 3636-3640, doi: 10.1109/EI250167.2020.9346983.
- [41] S. Saukh and A. Borysenko, "Representation of Transmission and Distribution Networks in the Mathematical Model of the Electricity Market Equilibrium," in *2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 15-18 Sept. 2019 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/CPEE47179.2019.8949116.
- [42] Z. Hongshan, Z. Chao, and R. Hui, "Power transmission network vulnerable region identifying based on complex network theory," in *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 6-9 April 2008 2008, pp. 1082-1085, doi: 10.1109/DRPT.2008.4523568.
- [43] D. Zhang, Q. Qin, and B. Wang, "Research on a New Hysteresis Control Technology for Flexible High-voltage Direct Current Transmission," in *2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, 22-24 Nov. 2019 2019, pp. 568-571, doi: 10.1109/AUTEEE48671.2019.9033239.
- [44] N. Christi, R. Hedin, R. Johnson, P. Krause, and A. Montoya, "Power system studies and modelling for the Kayenta 230 kV substation advanced series compensation," in

- International Conference on AC and DC Power Transmission*, 17-20 Sept. 1991 1991, pp. 33-37.
- [45] I. E. Saad, N. H. Saad, and W. A. S. El-Khattam, "Optimal Unbalance Mitigation for Three-Phase Distribution Networks Equipped with Single-Phase PV Systems," in *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 18-20 Dec. 2018 2018, pp. 980-985, doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635120.
- [46] S. N. Duarte, B. C. d. Souza, P. M. d. Almeida, L. R. d. Araújo, and P. G. Barbosa, "A Compensation Strategy Based on Consumer's Voltage Unbalance Assessment for a Distribution Static Synchronous Compensator," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 01, pp. 156-164, 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9049473.
- [47] D. Yan, C. Jiangbo, L. Hui, Y. Jing, S. Minfeng, and G. Huihao, "Discussion on the evaluation method of current unbalance compensation effect of three-phase unbalanced load adjusting device in distribution network," in *2021 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 7-9 April 2021 2021, pp. 230-234, doi: 10.1109/CICED50259.2021.9556702.
- [48] O. P. Taiwo, R. Tiako, and I. E. Davidson, "An improvement of voltage unbalance in a low voltage 11/0.4 kV electric power distribution network under 3-phase unbalance load condition using dynamic voltage restorer," in *2017 IEEE PES PowerAfrica*, 27-30 June 2017 2017, pp. 126-131, doi: 10.1109/PowerAfrica.2017.7991211.
- [49] T. V. Raphaelalani, N. M. Ijumba, and A. A. Jimoh, "Capacitive divider system for feeding a distribution network from an EHV line," in *PowerCon 2000 - 2000 International Conference on Power System Technology, Proceedings*, 2000, vol. 1, pp. 299-304, doi: 10.1109/ICPST.2000.900073.
- [50] A. Nakadomari, R. Shigenobu, M. Sugimura, K. Takahashi, and T. Senjyu, "A Study on Voltage Unbalance Compensation and Minimizing Loss in Distribution System using SVR," in *2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 20-23 Sept. 2020 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/APPEEC48164.2020.9220390.
- [51] S. Al-Gahtani and R. M. Nelms, "A New Voltage Sensorless Control Method for a Shunt Active Power Filter for Unbalanced Conditions," in *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 11-14 June 2019 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2019.8783570.
- [52] M. Coppo, A. Raciti, R. Caldon, and R. Turri, "Exploiting inverter-interfaced DG for Voltage unbalance mitigation and ancillary services in distribution systems," in *2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, 16-18 Sept. 2015 2015, pp. 371-376, doi: 10.1109/RTSI.2015.7325126.
- [53] D. Shah and M. L. Crow, "Online Volt-Var Control for Distribution Systems with Solid-State Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Article vol. 31, no. 1, pp. 343-350, 2016, Art no. 7161383, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2457442.

- [54] L. I. J, X. Song, Y. Zhang, and F. Gao, "Operation optimization of active distribution network considering maximum consumption of distributed generation," in *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, 21-24 Oct. 2019, pp. 1053-1057, doi: 10.1109/APAP47170.2019.9224667.
- [55] J. L. Chaneliere, *Protection des lignes et des câbles de transport et de répartition*. Ed. Techniques Ingénieur, 2009.
- [56] F. Iliceto, E. Cinieri, L. Casely-Hayford, and G. Dokyi, "New concepts on MV distribution from insulated shield wires of HV lines: Operation results of an experimental system and applications in Ghana," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 4, no. 4, pp. 2130-2144, 1989.
- [57] R. G. Minullin, Y. V. Piskovatskiy, and V. A. Kasimov, "Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6–10 Kv Distribution Circuits by a Location Method," in *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 22-24 Sept. 2020, pp. 411-415, doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216267.
- [58] A. A. Krasnykh, I. L. Krivoshein, and A. L. Kozlov, "Research of single-phase faults in 6–35 KV branched overhead distribution network," in *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 16-19 May 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076252.
- [59] E. Cinieri, "A new lossless circuit balancing the MV distribution systems from insulated shield wires of HV lines," in *1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333)*, 1999, vol. 2: IEEE, pp. 722-728.
- [60] A. Koutou, "Étude des déséquilibres d'amplitude et de phase des tensions d'un réseau à câbles de garde isolés de lignes de transport d'énergie électrique," 2015.
- [61] A. H. M. Niaki and I. D. Amiri, "The impact of shunt-FACTS devices on distance relay performance," in *2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)*, 5-6 Nov. 2015, pp. 348-354, doi: 10.1109/KBEI.2015.7436070.
- [62] X. Zhou, K. Wei, Y. Ma, and Z. Gao, "A review of reactive power compensation devices," in *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2018*, 2018, pp. 2020-2024, doi: 10.1109/ICMA.2018.8484519.
- [63] H. Ren, D. Watts, Z. Mi, and J. Lu, "A review of FACTS' practical consideration and economic evaluation," in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2009, doi: 10.1109/APPEEC.2009.4918115.
- [64] R. K. Varma, W. Litzemberger, and J. Berge, "Bibliography of FACTS: 2002 - Part II IEEE Working Group Report," in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 24-28 June 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/PES.2007.386278.
- [65] Y. Sang and M. Sahraei-Ardakani, "Economic Benefit Comparison of D-FACTS and FACTS in Transmission Networks with Uncertainties," in *2018 IEEE Power &*

- Energy Society General Meeting (PESGM)*, 5-10 Aug. 2018 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2018.8585939.
- [66] E. Schaefer, M. Anwari, and M. Taufik, "Performance Analysis of Shunt Reactive Power Compensators," in *2009 Third Asia International Conference on Modelling & Simulation*, 25-29 May 2009 2009, pp. 503-507, doi: 10.1109/AMS.2009.87.
- [67] B. T. Zine-Eddine, N. Ali, M. Said, and I. Rachid, "A New Control Method of Three-Phase Self Excited Induction Generator Feeding Single-Phase Load by using Static Var Compensator," in *2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA)*, 6-7 Nov. 2018 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICWEAA.2018.8605056.
- [68] K. Ramadhan, K. Yonathan, I. M. Ardita, F. H. Jufri, and A. R. Utomo, "Voltage Stability Improvement Using Load Shedding and Static VAR Compensator (SVC): Study Case of Senayan-Sambas Power System," in *2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, 28-30 June 2019 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074752.
- [69] T. D. Kahingala, S. Perera, U. Jayatunga, and A. P. Agalgaonkar, "Network-Wide Influence of a STATCOM Configured for Voltage Unbalance Mitigation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 3, pp. 1602-1605, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2945537.
- [70] O. Martin, S. Terry, and N. Bottrell, "APPLICATION OF A DISTRIBUTION STATCOM TO MANAGE NETWORK VOLTAGES," in *The 17th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2021)*, 8 July-8 Dec. 2021 2021, vol. 2021, pp. 91-95, doi: 10.1049/icp.2021.2450.
- [71] A. M. Ining, N. A. M. Leh, S. A. Hamid, and Z. Muhammad, "A Study on Voltage Stability Improvement using STATCOM and UPFC," in *2021 IEEE 9th Conference on Systems, Process and Control (ICSPC 2021)*, 10-11 Dec. 2021 2021, pp. 34-39, doi: 10.1109/ICSPC53359.2021.9689145.
- [72] L. Kejun, Z. Jianguo, S. Haishun, and J. Xiaoling, "Physical Model Study of the Thyristor Controlled Series Compensator," in *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, 18-18 Aug. 2005 2005, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2005.1546764.
- [73] P. Preetha and A. A. Kumar, "Comparision of voltage stability using SSSC and TCSC controller," in *2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*, 26-27 Feb. 2015 2015, pp. 938-942, doi: 10.1109/ECS.2015.7125052.
- [74] V. Gyurov, M. Duganov, and N. Bezhanov, "Development of a Physical Model of a Thyristor-controlled Series Compensator for Medium Voltage Power Supply Systems," in *2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, 9-12 Sept. 2020 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/BulEF51036.2020.9326038.
- [75] S. Ahmad, F. M. Albatsh, S. Mekhilef, and H. Mokhlis, "An approach to improve active power flow capability by using dynamic unified power flow controller," in

- 2014 *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, 20-23 May 2014 2014, pp. 249-254, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873798.
- [76] Q. Arooj and U. A. Khan, "Improving the Efficiency of Transmission Line by Using 48-Pulse Smart Power Flow Controller," in *2021 16th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, 22-23 Dec. 2021 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICET54505.2021.9689899.
- [77] A. Shukla and A. Nami, "Multilevel Converter Topologies for STATCOMs," in *Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems*, F. Shahnia, S. Rajakaruna, and A. Ghosh Eds. Singapore: Springer Singapore, 2015, pp. 35-82.
- [78] H. Ghoddami and A. Yazdani, "An analysis of the three-level neutral-point clamped (NPC) inverter with two independent DC sources," in *2012 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 29 April-2 May 2012 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/CCECE.2012.6335006.
- [79] Y. Neyshabouri and M. Farhadi-Kangarlu, "Improved Low Voltage Ride Through by A STATCOM Based on Neutral Point Piloted (NPP) Multilevel Inverter," in *2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 18-20 May 2021 2021, pp. 246-251, doi: 10.1109/ICEE52715.2021.9544466.
- [80] Z. Jiang, N. Beniwal, S. Ceballos, J. Pou, H. D. Tafti, and G. G. Farivar, "Analysis of the Average Neutral-Point Current Limits of the Neutral-Point-Clamped Converter Under Three-Level Modulation," in *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 18-21 Oct. 2020 2020, pp. 4079-4084, doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255382.
- [81] K. Yoon-Hyuk, P. Byoung-Gun, K. Rae-Young, H. Dong-Seok, and J. Ha-Jin, "A simple space vector PWM scheme with neutral point balancing for three-level neutral point clamped inverter," in *2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 9-13 Oct. 2011 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/IAS.2011.6074330.
- [82] I. Lopez *et al.*, "Modulation Strategy for Multiphase Neutral-Point-Clamped Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Article vol. 31, no. 2, pp. 928-941, 2016, Art no. 7067413, doi: 10.1109/TPEL.2015.2416911.
- [83] D. Janik, T. Kosan, S. Janous, J. Sadsky, and Z. Peroutka, "The SVPWM modulation technique with active voltage balancing control for 3-level ANPC inverter," in *International Conference on Applied Electronics*, 2015, vol. 2015-October, pp. 81-84.
- [84] M. Arifujjaman, M. S. Hossain, and M. T. Iqbal, "Efficiency comparison of 2- and 3-level inverter based Power Conditioning System for grid-connected SOFC application," in *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 4-7 May 2014 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/CCECE.2014.6900918.
- [85] R. H. Wilkinson, T. A. Meynard, and H. d. T. Mouton, "Natural Balance of Multicell Converters: The Two-Cell Case," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 1649-1657, 2006, doi: 10.1109/TPEL.2006.882958.

- [86] A. Koutou and M. Doumbia, "Three Phase Shield Wire Schemes Unbalance and Voltage Fluctuation Reduction Using H-Bridge Cascaded Static Synchronous Compensator (STATCOM)," *J Electr Electron Syst*, vol. 5, no. 187, pp. 2332-0796.1000187, 2016.
- [87] S. Dargahi, E. Babaei, S. Eskandari, V. Dargahi, and M. Sabahi, "Flying-capacitor stacked multicell multilevel voltage source inverters: Analysis and modelling," *IET Power Electronics*, Article vol. 7, no. 12, pp. 2969-2987, 2014, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0902.
- [88] K. Komatsu *et al.*, "New IGBT modules for advanced neutral-point-clamped 3-level power converters," in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, 21-24 June 2010 2010, pp. 523-527, doi: 10.1109/IPEC.2010.5543275.
- [89] N. F. Mailah *et al.*, "Harmonics reduction of three phase five-level Neutral-Point-Clamped Multilevel Inverter," in *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2-5 Dec. 2012 2012, pp. 13-17, doi: 10.1109/PECon.2012.6450194.
- [90] V. Dargahi, A. K. Sadigh, and K. Corzine, "Analytical determination of conduction losses for modified flying capacitor multicell converters," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2016, vol. 2016-May, pp. 2840-2846, doi: 10.1109/APEC.2016.7468267.
- [91] Z. B. Ibrahim, M. L. Hossain, M. H. N. Talib, R. Mustafa, and N. M. N. Mahadi, "A five level cascaded H-bridge inverter based on space vector pulse width modulation technique," in *2014 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2014*, 2014, pp. 293-297, doi: 10.1109/CENCON.2014.6967518.
- [92] K. Tan, H. Wang, and C. Wang, "A Decoupling Control Method for Hybrid Cascaded H-Bridge Inverter," in *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*, 29 Nov.-2 Dec. 2020 2020, pp. 2469-2471, doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9368057.
- [93] M. Aalami, E. Babaei, and M. Sabahi, "Design of a new combined cascaded multilevel inverter based on developed H-bridge with reduced number of IGBTs and DC voltage sources," in *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*, 10-12 April 2018 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPE.2018.8372571.
- [94] S. Nagar, S. Khan, and B. Singh, "Performance of Cascaded Diode Bridge Integrated H-Bridge 13 Level Multilevel Inverter," in *2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, 26-27 Oct. 2017 2017, pp. 399-403, doi: 10.1109/RDCAPE.2017.8358304.
- [95] M. Baldé, M. L. Doumbia, A. Chériti, and C. Benachaiba, "Comparative study of NPC and Cascaded converters topologies," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, Article vol. 1, no. 9, pp. 185-190, 2011, Art no. 282, doi: 10.24084/repqj09.282.
- [96] P. Melin, J. Espinoza, J. Guzman, M. Rivera, E. Espinosa, and J. Rothen, "Analysis and design of a Cascaded H-Bridge topology based on current-source inverters," in

- IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2013, pp. 6189-6194, doi: 10.1109/IECON.2013.6700153.
- [97] H. H. Wang and A. M. Khambadkone, "Analytical power loss evaluation of 5 level H-Bridge with coupled inductor and series connected H-Bridge for PEBB applications," in *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2-5 Nov. 2009 2009, pp. 458-463, doi: 10.1109/PEDS.2009.5385922.
- [98] D. J. Meisner, B. Niemann, M. Shevchenko, E. Fombang, I. Khosravi, and H. v. Geymüller, "STATCOM with Active Filter Using STATCOM as Active Filter, Improving Power Quality and reducing Harmonics," in *2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 12-15 Oct. 2020 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/TD39804.2020.9299900.
- [99] A. Hasanzadeh, M. Parniani, and S. M. R. Sadriyeh, "A comparative study on current control methods for load balancing and power factor correction using STATCOM," in *2005 IEEE Russia Power Tech*, 27-30 June 2005 2005, pp. 1-7, doi: 10.1109/PTC.2005.4524612.
- [100] T. Tadivaka, M. Srikanth, and T. V. Muni, "THD reduction and voltage flicker mitigation in power system base on STATCOM," in *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*, 27-28 Feb. 2014 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICICES.2014.7034161.
- [101] D. G. Zrilic, "Alternative Approach to Use of Pulse Width Modulation," in *2006 World Automation Congress*, 24-26 July 2006 2006, pp. 1-5, doi: 10.1109/WAC.2006.376008.
- [102] J. J. Razon, R. Alimuin, S. Arenas, and R. Alimuin, "Design of a Low Power DC-DC Buck Converter Utilizing Pulse Width Modulation and Pulse Frequency Modulation for Cacao Pod Maturity Testing Device," in *2018 3rd Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON)*, 12-14 Dec. 2018 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/TIMES-iCON.2018.8621850.
- [103] B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, *Power quality: problems and mitigation techniques*. John Wiley & Sons, 2014.
- [104] G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, and M. Oliver, "Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbances," in *7th IEEE International Power Electronics Congress. Technical Proceedings. CIEP 2000 (Cat. No.00TH8529)*, 15-19 Oct. 2000 2000, pp. 93-98, doi: 10.1109/CIEP.2000.891397.
- [105] M. R. S, M. J, P. M, P. K, and M. V. M, "Optimal Placement and Sizing of Harmonic and Reactive Compensators in Interconnected Systems," in *2018 15th IEEE India Council International Conference (INDICON)*, 16-18 Dec. 2018 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDICON45594.2018.8987025.
- [106] S. Zhang and J. Le, "Design and Performance Analysis of a MV DVR with Double-Stage LC Filter," in *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*, 17-21 April 2017 2017, pp. 154-158, doi: 10.1109/ICEI.2017.34.

- [107] L. F. J. Meloni, Â. J. J. Rezek, and Ê. R. Ribeiro, "Small-signal modeling of a single-phase DVR for voltage sag mitigation," in *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 16-19 Oct. 2016 2016, pp. 55-59, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783449.
- [108] H. Heydari, S. M. Oladali, E. Heydari, and A. Nazarzadeh, "Smart optimal control of DVR to compensate voltage sag of the critical loads in the distribution power system," in *2014 Smart Grid Conference (SGC)*, 9-10 Dec. 2014 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/SGC.2014.7151033.
- [109] A. Nahavandi and M. Behshameh, "Investigation of Multi-functional DVR in IEEE 13-Bus Industrial Distribution System," in *2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering*, 28-30 Dec. 2009 2009, vol. 2, pp. 279-282, doi: 10.1109/ICCEE.2009.230.
- [110] A. Tashackori, S. H. Hosseini, M. Sabahi, and T. Nouri, "A three-phase four-leg DVR using three dimensional space vector modulation," in *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 14-16 May 2013 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/IranianCEE.2013.6599761.
- [111] N. P. Kumar and Y. Pal, "Performance evaluation of three-phase, three wire DVR for power quality improvement," in *2014 Students Conference on Engineering and Systems*, 28-30 May 2014 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCES.2014.6880114.
- [112] J. P. K. Chhotaray and R. N. Pradhan, "A Study of Voltage Profile Improvement Using DVR," in *2017 International Conference on Information Technology (ICIT)*, 21-23 Dec. 2017 2017, pp. 91-96, doi: 10.1109/ICIT.2017.50.
- [113] R. Sun, H. Qiu, B. Chen, X. Yuan, S. Luo, and W. Gu, "Voltage sag improvement using DVR and SVG in power systems," in *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 10-13 Aug. 2016 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/CICED.2016.7576217.
- [114] Y. Prakash and S. Sankar, "Power quality improvement using DVR in power system," in *2014 POWER AND ENERGY SYSTEMS: TOWARDS SUSTAINABLE ENERGY*, 13-15 March 2014 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/PESTSE.2014.6805250.
- [115] R. E. Nambiar, M. D, B. L, A. J. P. K, and V. Priyadarshini, "Comparative Study Between Different Controllers Of DVR For Power Quality Improvement," in *2021 International Conference on Design Innovations for 3Cs Compute Communicate Control (ICDI3C)*, 10-11 June 2021 2021, pp. 84-87, doi: 10.1109/ICDI3C53598.2021.00025.
- [116] R. Saxena and M. Kushwah, "Optimization of voltage sag/swell using dynamic voltage restorer (DVR)," in *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, 3-5 March 2016 2016, pp. 4046-4051, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755474.
- [117] J. Bangarraju, V. Rajagopal, B. Pallavi, K. Amritha, and K. S. Singh, "Unit vectors of SRF control algorithm based DVR for power quality improvement," in *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation*

- (*SmartTechCon*), 17-19 Aug. 2017 2017, pp. 1160-1165, doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358551.
- [118] J. Bangarraju, V. Rajagopal, V. Nagamalleswari, S. R. Arya, and B. Subhash, "Control of DVR using SPLN strategy in distribution system," in *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*, 25-27 Nov. 2016 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/POWERI.2016.8077453.
- [119] D. N. Katole, M. B. Daigavane, S. P. Gawande, and P. Daigavane, "Modified instantaneous p-q theory for single phase DVR for mitigation of voltage sag in case of nonlinear load," in *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, 14-16 Dec. 2016 2016, pp. 163-168, doi: 10.1109/ICEPES.2016.7915924.
- [120] K. R. N. V. Subbarao, A. V. V. Srinivas, and B. V. Krishna, "A level shifted PWM technique for controlled string source MLI," in *Proceedings of 6th IEEE Power India International Conference, PIICON 2014*, 2014, doi: 10.1109/34084POWERI.2014.7117697.
- [121] M. A. A. Yahiya and M. A. R. Uzair, "Performance analysis of DVR, DSTATCOM and UPQC For improving the power quality with various control strategies," in *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, 21-23 Jan. 2016 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/PESTSE.2016.7516483.
- [122] A. M. Eltamaly, Y. S. Mohamed, A. M. El-Sayed, and A. N. A. Elghaffar, "Enhancement of Power System Quality Using PI Control Technique with DVR for Mitigation Voltage Sag," in *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 18-20 Dec. 2018 2018, pp. 116-121, doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635221.
- [123] P. Jing, Z. X. Xin, S. Li, S. D. Yang, and G. Kuo, "Design and analysis of DVR system for strong unbalanced voltage suppression," in *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 26-28 Nov. 2017 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2017.8245359.
- [124] R. F. Muktiadji and J. O. Oladigbolu, "Design of Dynamic Voltage Restorer Utilizing Adaptive Control to Mitigate Voltage Sag," in *2021 Fourth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)*, 2-3 Oct. 2021 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICVEE54186.2021.9649714.
- [125] T. Sundar and S. Sankar, "Simulation and investigation of prototype DVR for power flow control," in *2013 International Conference on Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE)*, 5-6 Dec. 2013 2013, pp. 133-138, doi: 10.1109/ICRESE.2013.6927802.
- [126] M. I. Hossain, I. Rahaman, M. N. Rahman, M. F. Hasan, M. M. Hasan, and R. C. Sarker, "Voltage Sag Compensation in Distribution System Using Dynamic Voltage Restorer," in *2020 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technology (ICAICT)*, 28-29 Nov. 2020 2020, pp. 492-497, doi: 10.1109/ICAICT51780.2020.9333502.

- [127] Q. Guo, C. Tu, F. Jiang, R. Zhu, and J. Gao, "Improved Dual-Functional DVR With Integrated Auxiliary Capacitor for Capacity Optimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 10, pp. 9755-9766, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3028820.
- [128] S. Latif and J. S. Savier, "Natural Current Regulation in DFIG under severe Asymmetrical Fault using Virtual Impedance Enhanced Phase Shifted DVR," in *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, 2-4 Jan. 2020 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070673.
- [129] D. Szabó, R. Bodnár, M. Regul'a, and J. Altus, "Designing and modelling of a DVR in Matlab," in *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 12-14 May 2014 2014, pp. 229-233, doi: 10.1109/EPE.2014.6839464.
- [130] R. Singh and A. Singh, "Comparative Performance Analysis of Three-Phase, Three-Wire Shunt Active Power Filter and Dynamic Voltage Restorer," in *2021 IEEE Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, 24-25 Oct. 2021 2021, pp. 665-670, doi: 10.1109/MysuruCon52639.2021.9641651.
- [131] J. Kim, I. Jeong, and C. Kim, "Network Modeling of Aperture-Coupled Vertically Mounted Slotline Coupling Structure," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 10-12, 2010, doi: 10.1109/LMWC.2009.2035950.
- [132] A. Razek, "Analysis of electromagnetic systems accounting for coupled magnetic and electric circuit behaviour," in *IEE Colloquium on Coupling Electromagnetic to Other Fields*, 18-18 May 1993 1993, pp. 2/1-2/3.
- [133] R. Liu, H. Shao, Y. Wang, X. g. Qi, P. Xi, and J. k. An, "Key Line Identification of Power Network Considering Active and Reactive Power Coupling Relationship between Branches," in *2019 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*, 27-31 May 2019 2019, pp. 432-436, doi: 10.1109/ICEI.2019.00082.
- [134] B. Hwang *et al.*, "Fast power delivery network analyzer," in *2011 12th International Symposium on Quality Electronic Design*, 14-16 March 2011 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISQED.2011.5770799.
- [135] K. Alidou and D. Mamadou L, "Mitigation of Voltage Unbalance in Three Phase Shield Wire Schemes by coupling the transformers  
," presented at the CRESO: International Conference on Rural Electrification for Sustainable Development, Prague, Czechia jul 9-10, 2020 213-213.
- [136] M. Nguyen Van, K. Bach Quoc, and P. Pham Viet, "Comparative simulation results of DVR and D-STATCOM to improve voltage quality in distributed power system," in *2017 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 21-23 July 2017 2017, pp. 196-199, doi: 10.1109/ICSSE.2017.8030864.

## ANNEXE A – Caractéristiques du réseau CDGI

Le réseau choisi est celui du Burkina Faso situé en Afrique de l'Ouest. La ligne de transport haute tension, HT (rouge) alimentant le réseau à CDGI est de 225 kV - 50Hz-338 km. (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**) Cette ligne HT est équipée de conducteurs All Aluminium Alloy Conductors (AAAC) de = 31.04 mm,  $R_{20^{\circ}\text{C}} = 0.0583\Omega/\text{km}$ . L'impédance du réseau est de  $\frac{x_o}{x_d} = 3$ .

Le réseau à CDGI est construit avec des conducteurs Aluminium Conductors Steel Reinforced (ACSR) de diamètre = 10.02 mm et de résistance linéique  $R_{20^{\circ}\text{C}} = 0.58 \Omega/\text{km}$ . La tension de la ligne CDGI est de 34.5kV alimentée à partir d'un poste de transformation HT/MT délivrant une basse tension triphasée de 415/240V pour la consommation des villes le long de la ligne.

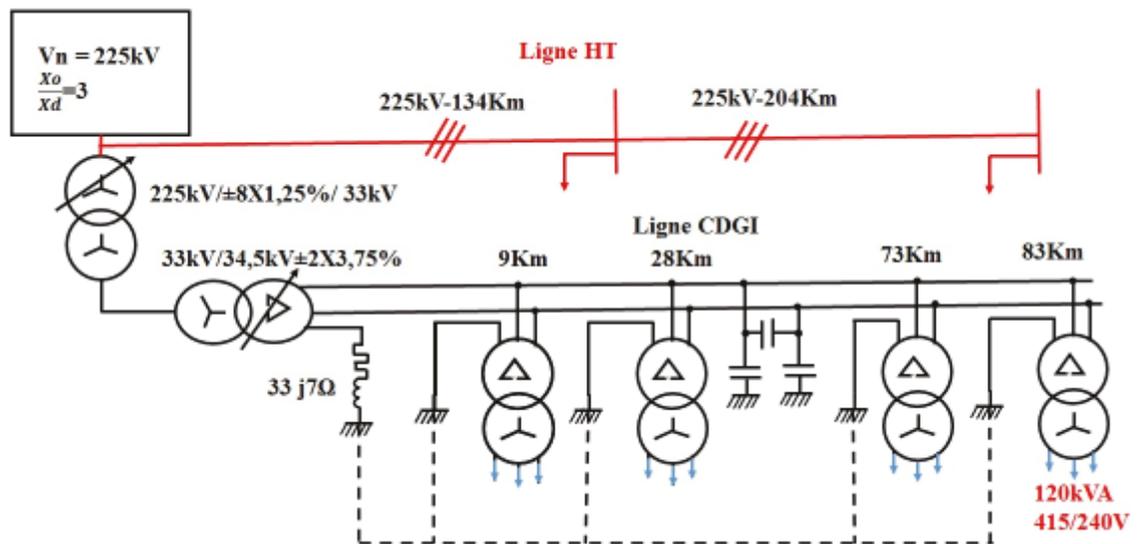


Figure Annexe 1 Réseau HT et CDG

## ANNEXE B: Analyse mathématique d'un réseau CDGI

Pour l'analyse mathématique de l'influence de la variation de l'impédance sur la tension et le phasage, nous avons schématisé un des transformateurs 34.5/0.415 kV -120 kVA du réseau de la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** qui se ramène à la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**

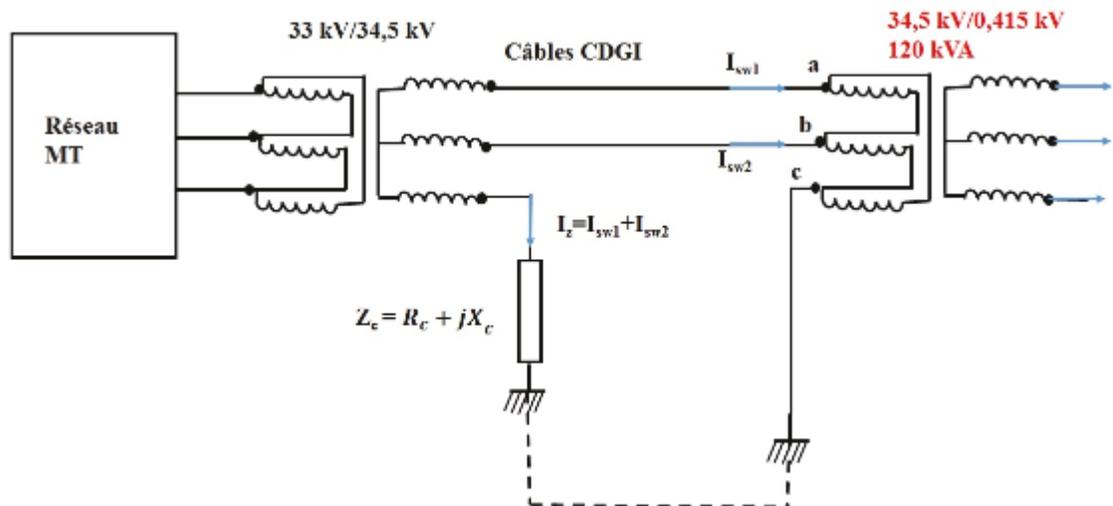


Figure Annexe 2 Circuit équivalent du transformateur à étudier raccordé sur le réseau à câble de garde isolé

En négligeant toutes les capacités et le couplage magnétique entre les câbles de garde et les conducteurs de ligne haute tension, le circuit équivalent côté moyenne tension du système se ramène à la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**

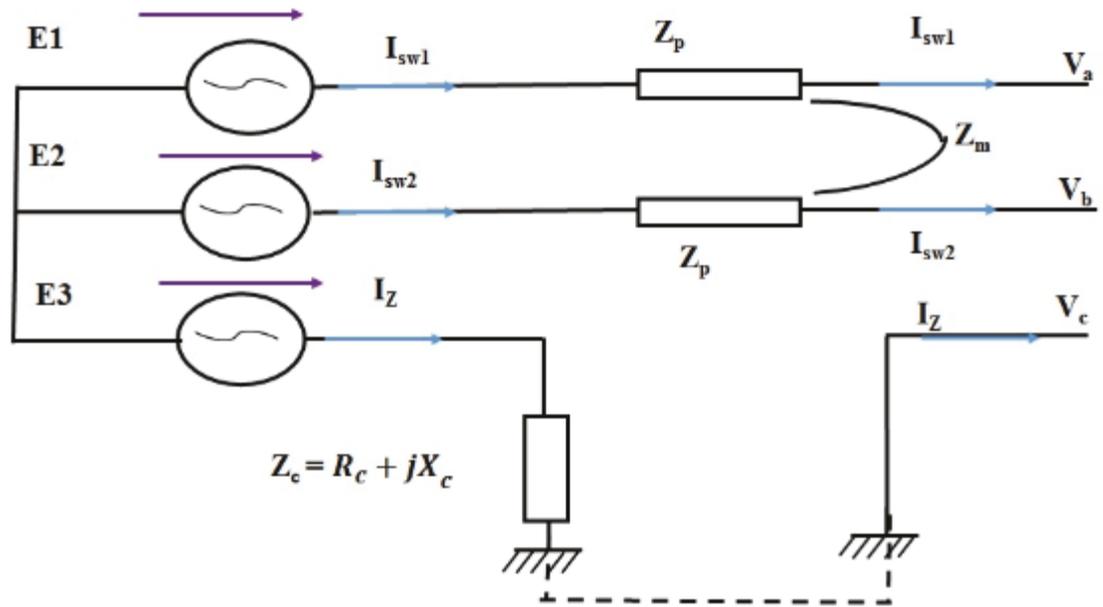


Figure Annexe 3 Circuit équivalent simplifié du réseau à topologie biphasée alimentant le transformateur triphasé à étudier côté moyenne tension

En prenant en compte les caractéristiques du réseau CDGI de la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, on peut exprimer les éléments  $Z_p$  et  $Z_m$  de la manière suivante :

$$Z_p = R_{sw} + \pi f * 10^{-4} + j * 0,1445 \log_{10} \left( \frac{D_e}{r_{gesw}} \right) \quad (1)$$

$$Z_m = \pi f * 10^{-4} + j * 0,1445 \log_{10} \left( \frac{D_e}{D_{sw}} \right) \quad (2)$$

$$D_e = 658 \sqrt{\rho_{terre} / f} \quad (1)$$

$R_{sw}$ : Résistance du conducteur du CDGI

$R_{gesw}$  : Équivalent radius du CDGI

Pour deux conducteurs :

$$R_{gesw} = \sqrt{rs} \quad (2)$$

$r$  = rayon du conducteur

$s$  = La distance d'écartement des deux conducteurs à partir des axes.

Pour notre cas :

$$s = 5\text{m}$$

$$\rho_{\text{terre}} = 250\Omega \cdot \text{m}$$

$$Z_p = 48.15 \Omega$$

$$Z_m = 0.74 \Omega$$

En appliquant la loi des mailles de tension [10] calculons  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$

$$V_{ab} = E_1 - E_2 + Z_p(I_{sw_2} - I_{sw_1}) + Z_m(I_{sw_1} - I_{sw_2}) \quad (3)$$

$$V_{bc} = E_2 - E_3 - Z_m I_{sw_1} + Z_c I_z - Z_p I_{sw_2} \quad (4)$$

$$V_{ca} = E_3 - E_2 - Z_c I_z + Z_p I_{sw_2} + Z_m I_{sw_1} \quad (5)$$

Par ailleurs on sait que :

$$I_z = (I_{sw_1} + I_{sw_2}) \quad (6)$$

D'où

$$V_{ab} = E_1 - E_2 + I_{sw_2}(2Z_p - 2Z_m) + I_z(Z_m - Z_p) \quad (7)$$

$$V_{bc} = E_2 - E_3 + Z_c I_z + I_{sw_2}(Z_m - Z_p) - Z_m I_z \quad (8)$$

$$V_{ca} = E_3 - E_2 - Z_c I_z + I_{sw_2}(Z_p - Z_m) + Z_m I_z \quad (9)$$

En remplaçant  $Z_p$  et  $Z_m$  par leur valeur on a :

$$V_{ab} = E_1 - E_2 + 95I_{sw_2} - 47I_z \quad (10)$$

$$V_{bc} = E_2 - E_3 + Z_c I_z - 0,75 I_z - 47 I_{sw_2} \quad (11)$$

$$V_{ca} = E_3 - E_2 - Z_c I_z + 0,75 I_z + 47 I_{sw_2} \quad (12)$$

Dans les expressions  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ , les tensions  $E_1, E_2, 95 I_{sw_2}, Z_c I_z$  sont constantes. Le courant dans chaque maille est égal à la somme des courants  $I_{sw_2}$  et  $I_z$ . L'augmentation de l'impédance a pour effet la réduction de la valeur du courant  $I_z$ . Par conséquent  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  et les angles  $\phi_{ab}, \phi_{bc}$  et  $\phi_{ca}$  seront aussi affectés.

## ANNEXE C: Travaux de simulation de l'onduleur cascade en pont H et NPC

Cette partie présente les simulations dans l'environnement Matlab /Simulink/ SimPowerSystems de l'étude théorique sur les onduleurs H Bridge et NPC

La méthode de commande MLI de type PS est utilisée pour la commande des interrupteurs. en boucle ouverte, pour un indice de modulation de 0.98 et 1080 Hz comme fréquence de porteuses.

Les sources continues utilisées valent 11700V conformément à la théorie de calcul de la tension de source développée. La tension nominale de notre réseau étant de 15 000V les charges utilisées sont :

Résistance  $R = 1 \Omega$

Inductance  $L = 0.75 \text{ H}$ ,

Facteur de puissance  $\cos\Phi = 0.80$ .

Les **Erreur! Source du renvoi introuvable.** à **Erreur! Source du renvoi introuvable.** présentent les signaux de la tension entre les phases a et b; le spectre harmonique; la tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ) et son spectre harmonique; les courants de ligne ( $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ ) et le spectre harmonique.

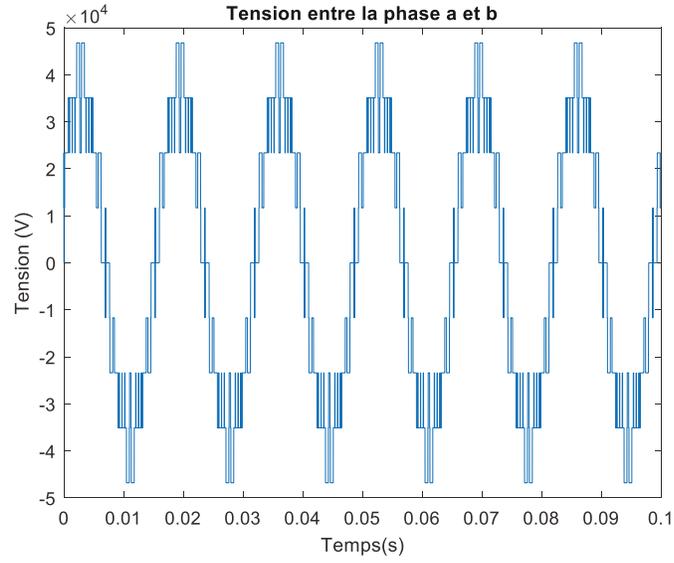


Figure Annexe 4 Tension entre les phases a et b ( $V_{ab}$ ) de l'onduleur H

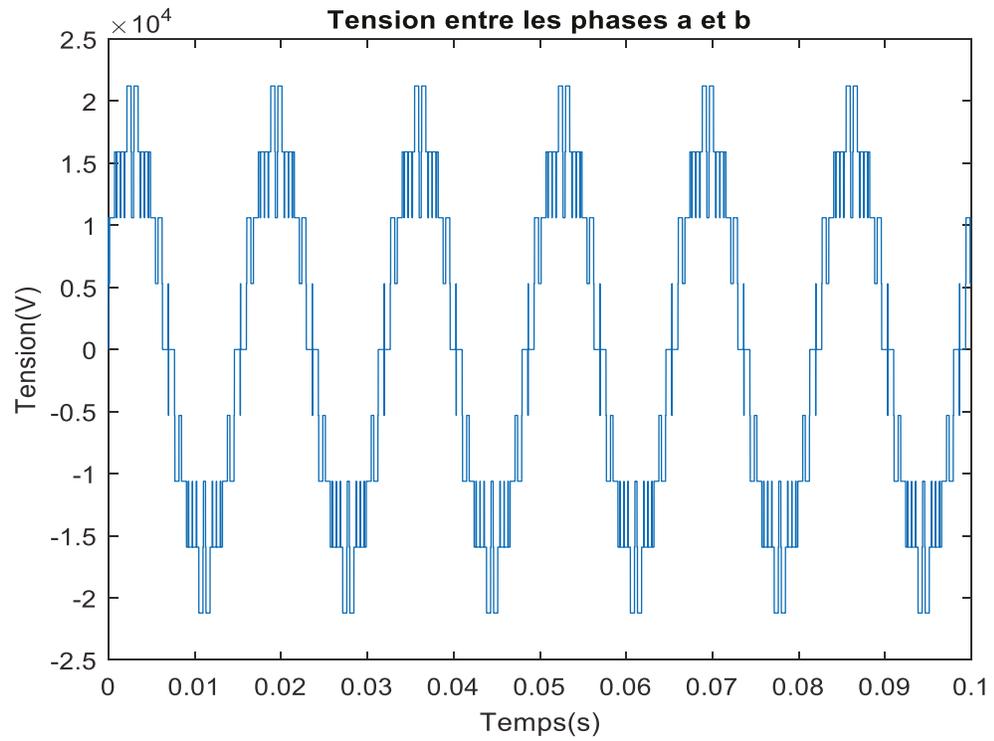


Figure Annexe 5 Tension entre les phases a et b ( $V_{ab}$ ) de l'onduleur NPC

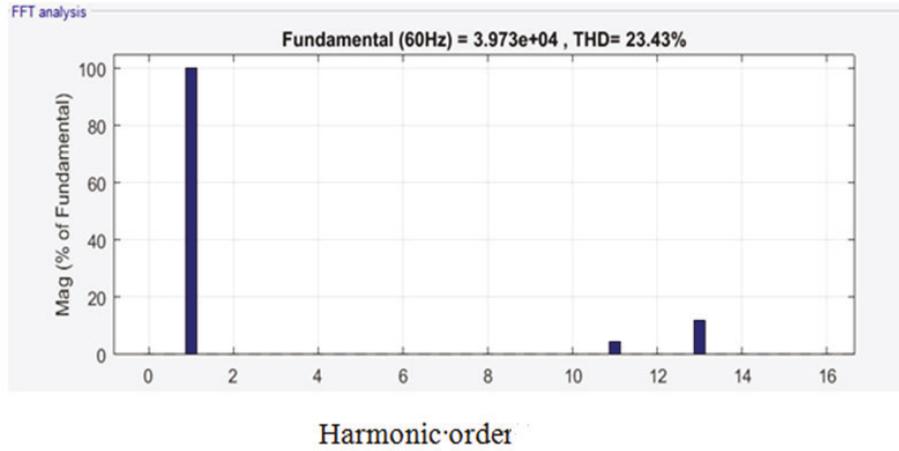


Figure Annexe 6 Spectre harmonique du la tension Vab de cascade en pont H cinq niveaux

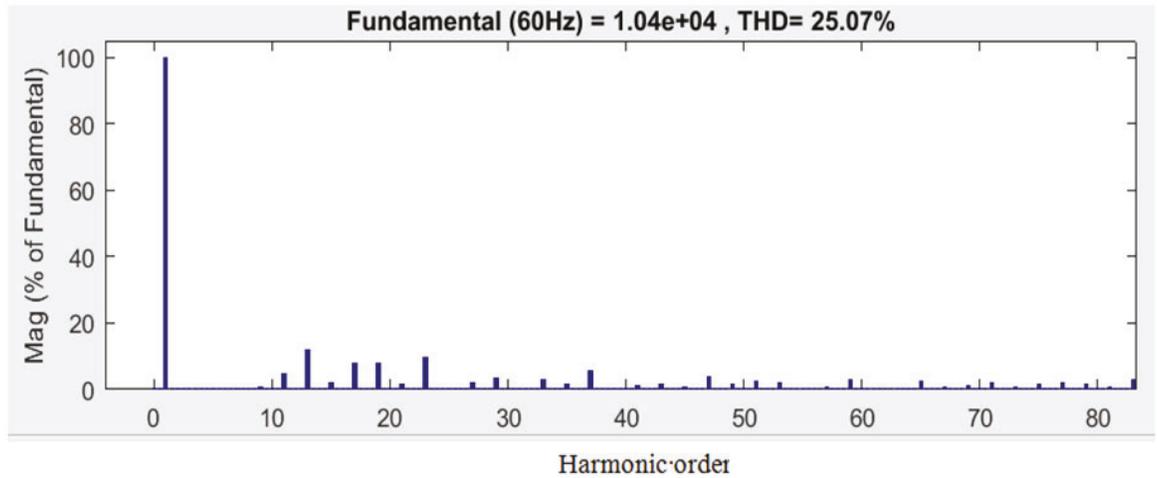


Figure Annexe 7 Spectre harmonique du la tension Vab NPC

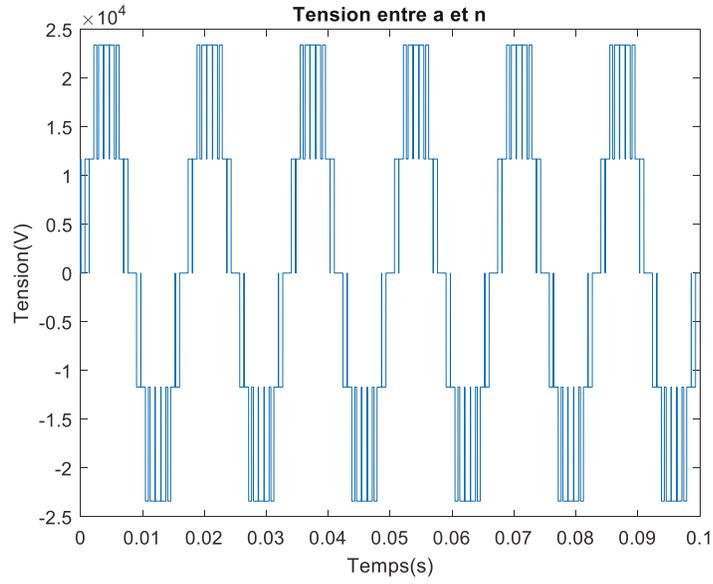


Figure Annexe 8 Tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ) H

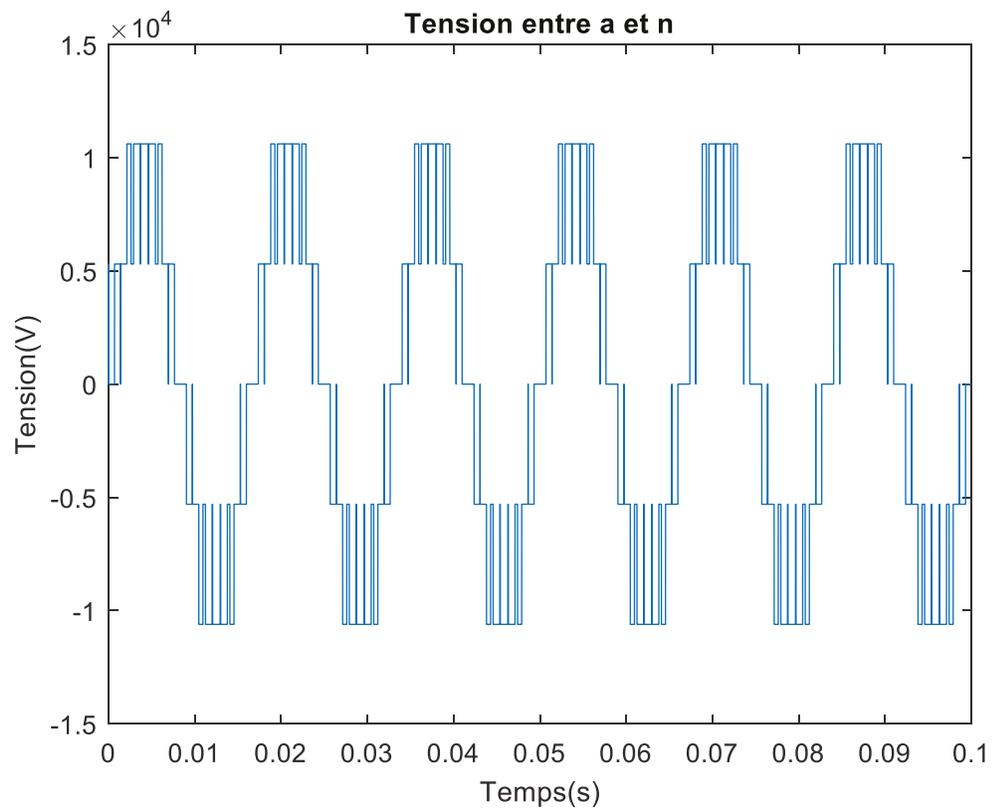


Figure Annexe 9 Tension entre la phase a et le neutre n ( $V_{an}$ ) NPN

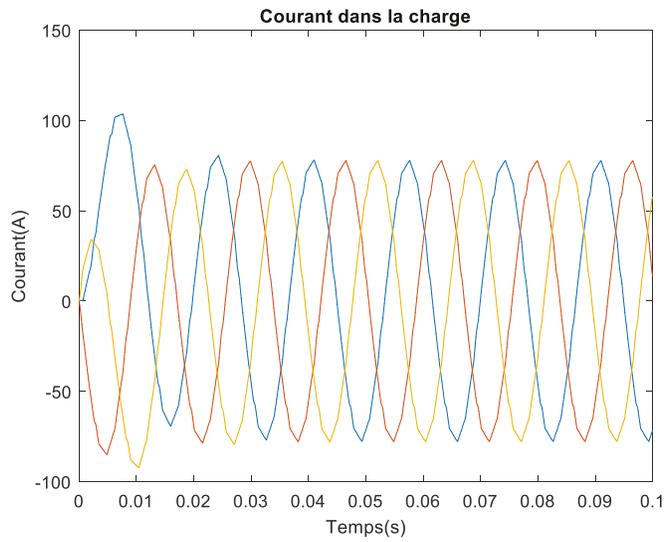


Figure Annexe 10 Courants de ligne H

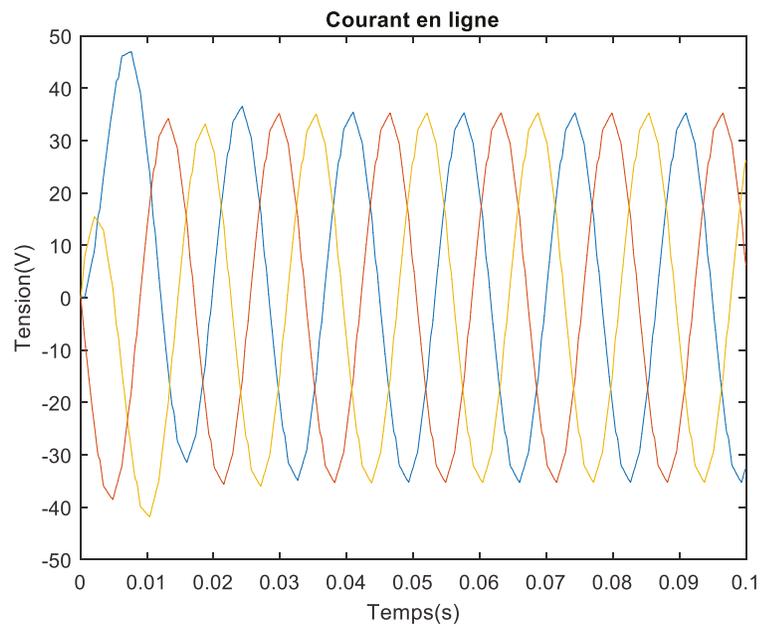


Figure Annexe 11 Courants de ligne NPC

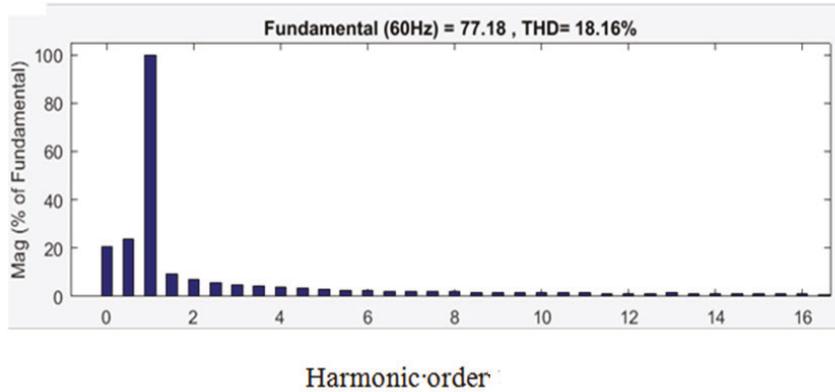


Figure Annexe 12 Spectre harmonique du courant de charge de cascade en pont H cinq niveaux

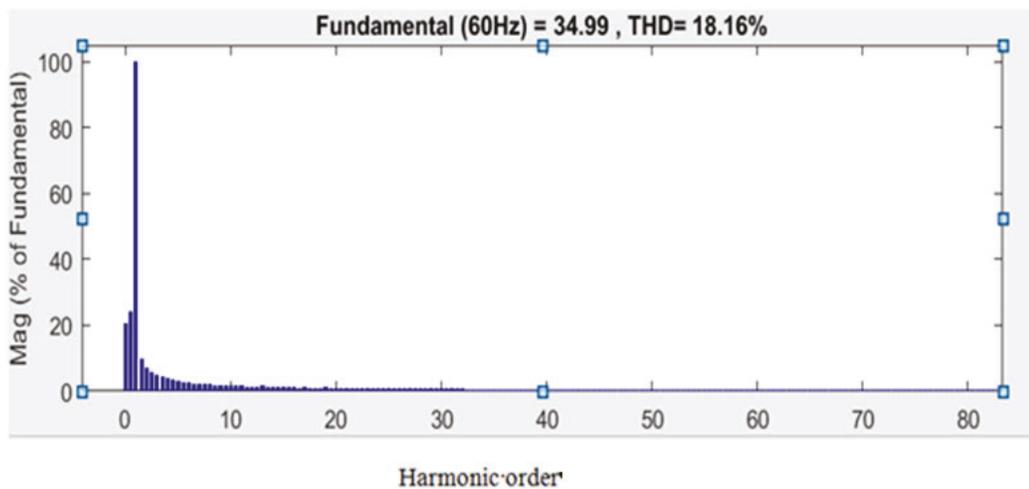


Figure Annexe 13 Spectre harmonique du courant de charge NPC

Nous remarquons que les courbes obtenues correspondent bien à celles théoriques. Pour la tension simple  $V_{an}$ , nous avons les cinq niveaux de tensions comme mentionné dans la partie théorique.

Le spectre harmonique des signaux montre que les harmoniques sont repoussées aux hautes fréquences, ce qui facilitera le filtrage au besoin.

## ANNEXE D: Simulation du STATCOM NPC et réseau CDGI dans Matlab

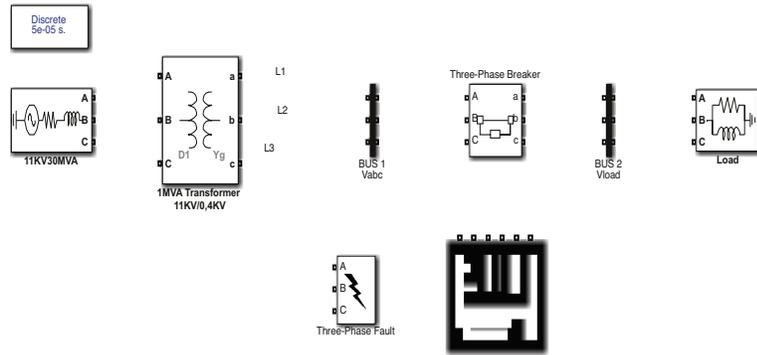


Figure Annexe 14 STACOM NPC intégré au réseau CDGI

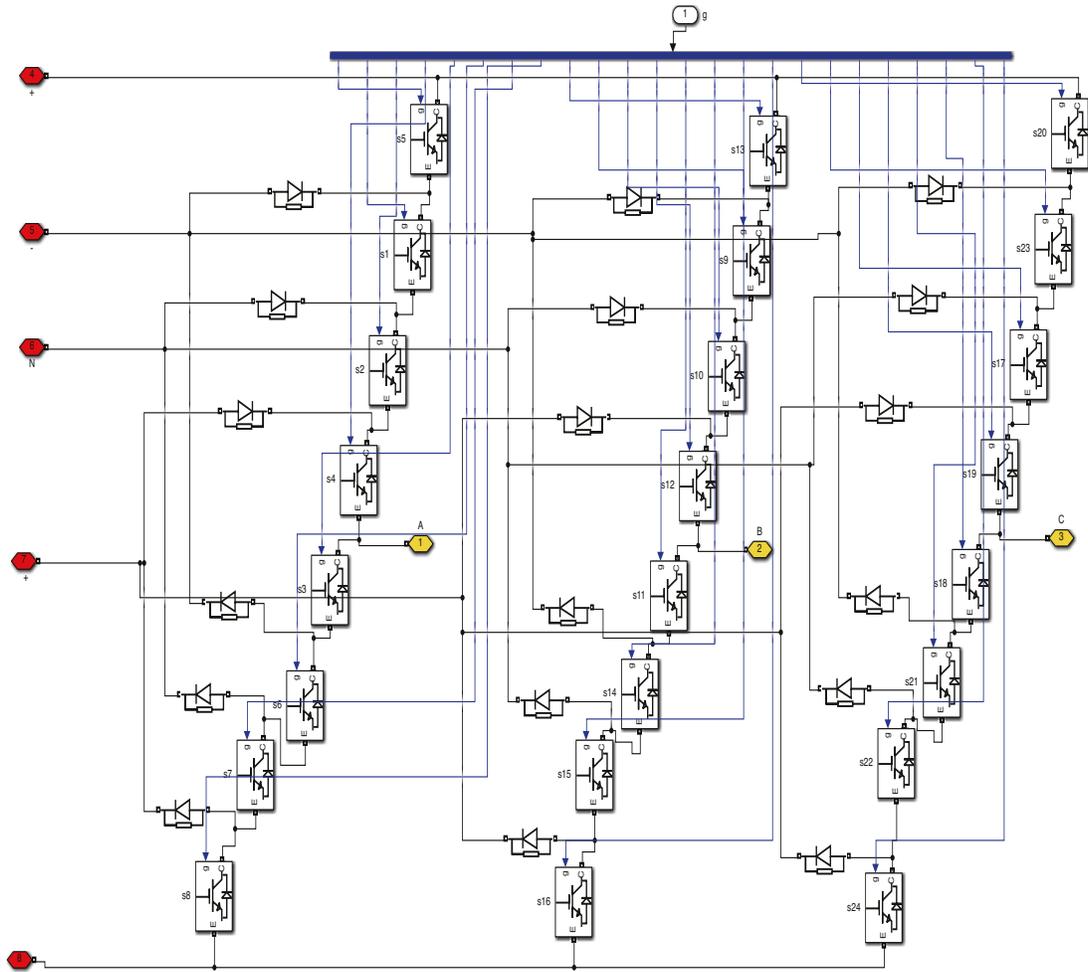


Figure Annexe 15 Pont NPC 5 niveaux

ANNEXE E: Simulation du STATCOM H Bridge et réseau CDGI dans Matlab

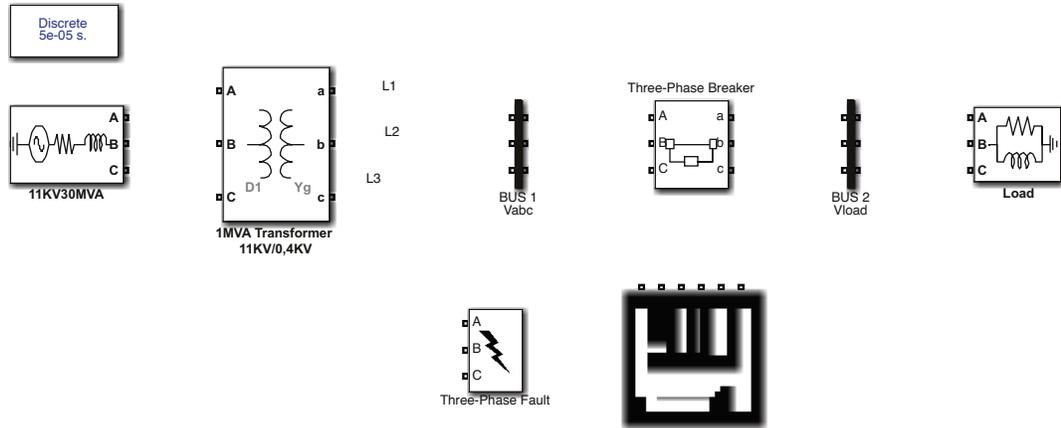


Figure Annexe 16 STACOM H Bridge intégré au réseau CDGI

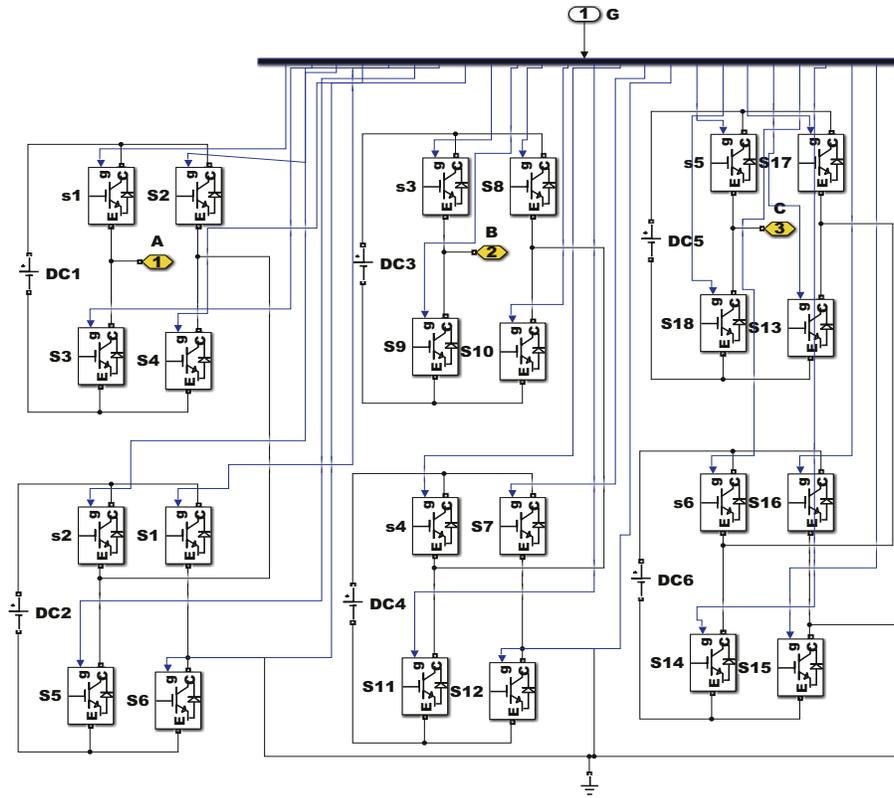


Figure Annexe 17 Pont H bridge

ANNEXE F: Simulation DVR et réseau CDGI dans Matlab

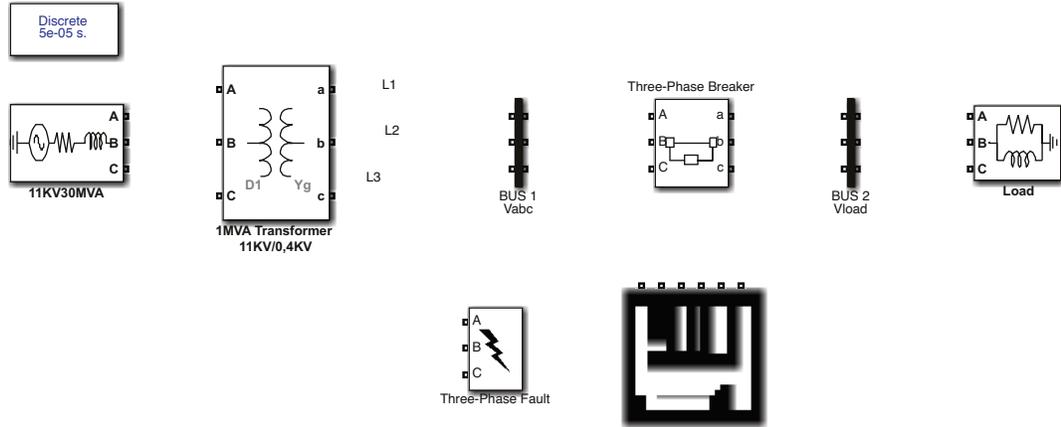


Figure Annexe 18 DVR intégré au réseau CDGI avec une charge linéaire

Figure Annexe-19 Schéma du DVR

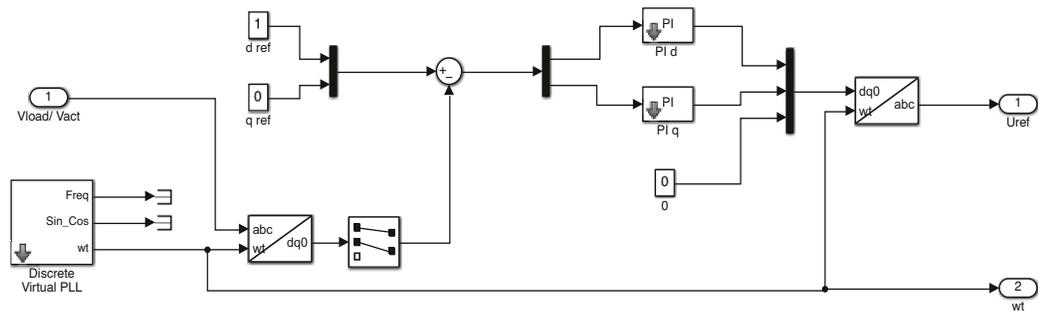


Figure Annexe 19 Contrôleur du DVR

## ANNEXE G : Couplage de deux réseaux CDGI

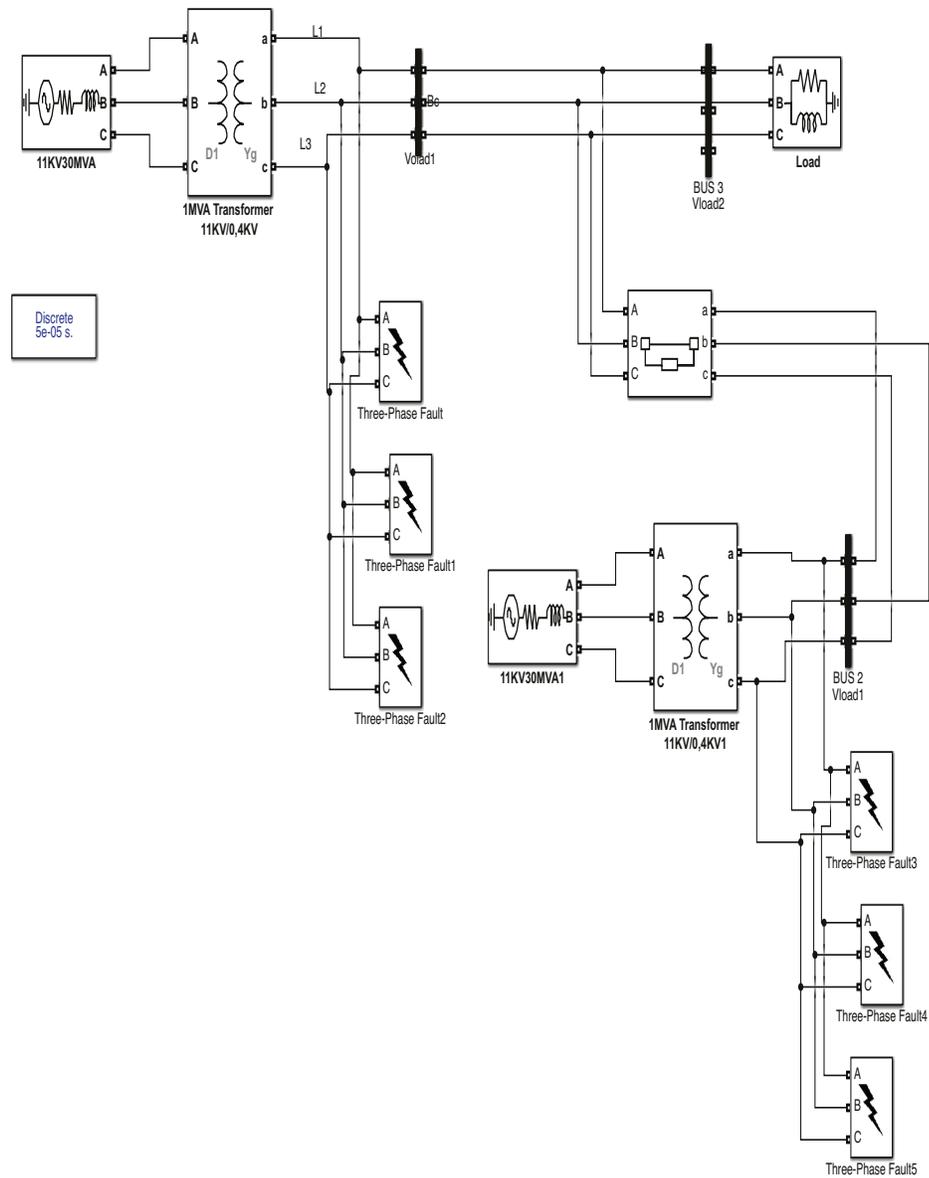


Figure Annexe 20 Schéma de couplage des deux réseaux

## ANNEXE H : Analyseur Megger MPQ1000 installé



Figure Annexe 21 Câblage de l'analyseur de réseau

## ANNEXE I: Caractéristiques techniques des DVR

Indice de techniques d'entrée	Valeurs
La capacité du système	30KVA--2400KVA
La plage de tension CA en entrée nominale	210V/400V/480V/690V
La plage de tension d'entrée	-20%--+20%
Fréquence de réseau	50/60 Hz±10%
Méthode de câblage	3 phase/phase 3 lignes/3/4 lignes
Efficacité globale	>99 %
Tension résiduelle minimum	0%
Temps de réglage de tension	1~5ms
La fréquence de sortie	50/60 Hz ± 1 %
La tension à la distorsion (THDu)	En vertu de la charge linéaire THDu Conditions : <2,5 %
Déséquilibre de tension (négatif/positif de séquence)	100 % déséquilibré, sous une charge déséquilibrée <3 %