



**UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES**

**Faculté de Génie électrique**

**Département d'Electrotechnique**

**Thèse présentée par :**

***HAMEURLAINE Abdelhadi***

Pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat en Science en Electrotechnique**

**Option : Réseaux électriques**

**Intitulé de la thèse:**

**Contribution à l'amélioration des performances dynamiques  
d'une liaison VSC-HVDC**

Présenté devant le jury composé de :

**Pr. MASSOUM Ahmed**

**Pr. SAYAH Houari**

**Pr. KHATIR Mohamed**

**Dr. FLITTI Mohamed**

**Pr. BOUKEZZI Larbi**

**Dr. CHERROUN Lakhmissi**

Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)

Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)

Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)

MCA (U.B.B Ain Temouchent)

Professeur (U.Z.A. Djelfa)

MCA (U.Z.A. Djelfa)

Président

Directeur de thèse

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Soutenue le : 12/ 03 /2020

## **Table de Matières**

## Table de Matières

<b>Liste des tableaux</b>	<b>1</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>2</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>7</b>

### Chapitre 1 : Etat de l'art sur les systèmes VSC- HVDC

<b>1.1-Introduction</b>	<b>12</b>
<b>1.2-Historique sur le développement du transport HVDC</b>	<b>13</b>
<b>1.3-Intérêts des systèmes HVDC par rapport aux systèmes alternatifs</b>	<b>16</b>
1.3.1-Raisons techniques	17
1.3.2-Raisons économiques	17
1.3.3-Enjeux environnementaux	18
<b>1.4-Configurations des systèmes HVDC</b>	<b>19</b>
<b>1.5-Technologie des systèmes HVDC</b>	<b>21</b>
1.5.1-La technologie CSC -HVDC	22
1.5.2-Présentation du thyristor	23
1.5.3-Caractéristiques et fonctionnement	23
1.5.4-Le blocage par commutation naturelle	24
<b>1.6-La présentation des systèmes de transmission VSC-HVDC</b>	<b>25</b>
<b>1.7-État de l'art de la structure IGBT</b>	<b>26</b>
1.7.1-La cellule de commutation	27
1.7.2-Caractéristiques et fonctionnement	27
<b>1.8-Avantage des systèmes VSC-HVDC</b>	<b>28</b>
<b>1.9-Les composants élémentaires des systèmes VSC-HVDC</b>	<b>30</b>
1.9.1-Les transformateurs de conversion	30
1.9.2-Les filtres alternatifs (AC)	30
1.9.3-Les convertisseurs VSC	31
1.9.4-Les condensateurs DC	31
1.9.5-Les réactances de phase	31
1.9.6-Les condensateurs DC	31
1.9.7-Les filtres DC	32
1.9.8-Les câbles DC	32
<b>1.10-Domains d'application des systèmes VSC-HVDC</b>	<b>32</b>
<b>1.11-Evolution des topologies des convertisseurs VSC</b>	<b>33</b>
1.11.1-La topologie à deux niveaux	35
1.11.2-La topologie à trois niveaux	36
1.11.3-Topologie MMC	37
<b>1.12-Conclusion</b>	<b>39</b>

## **Chapitre 2 : Fonctionnement et modélisation des systèmes VSC-HVDC.**

<b>2.1-Introduction</b>	<b>42</b>
<b>2.2-Principe de fonctionnement et configuration d'un système VSC-HVDC</b>	<b>43</b>
2.2.1-Fonctionnement de base d'un VSC	44
2.2.2-Fonctionnement en quatre quadrants	45
2.2.3-Technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI)	46
<b>2.3-Modélisation d'un système VSC-HVDC</b>	<b>48</b>
2.3.1-Modélisation d'un système VSC-HVDC à trois niveaux	48
2.3.2-La topologie et principe de fonctionnement du convertisseur	50
2.3.3-Séquences de fonctionnement du convertisseur	51
2.3.4-Modélisation du redresseur	52
2.3.5-Modélisation du circuit DC	55
2.3.6-Modélisation du filtre	55
<b>2.4-Contrôle d'un système VSC-HVDC</b>	<b>57</b>
2.4.1-Conception du régulateur de courant	59
2.4.2-Contrôle de la tension DC	61
2.4.3-Contrôle de la puissance active et réactive	63
2.4.4-La commande PLL (Phase Locked Loop)	64
2.4.5-Commande par MLI du convertisseur à trois niveaux	64
2.4.6-Structure de commande du convertisseur (redresseur)	65
2.4.7-Structure de commande du convertisseur (onduleur)	66
2.4.8-Structure de contrôle globale	67
<b>2.5-Résultats de la simulation</b>	<b>68</b>
2.5.1-Description du système étudié	69
2.5.2-Fonctionnement du système dans les conditions normales	70
2.5.3-Réponses transitoires des régulateurs	72
<b>2.6-Conclusion</b>	<b>74</b>

## **Chapitre 3 La commande à base de la logique floue**

<b>3.1-Introduction</b>	<b>77</b>
<b>3.2-La logique floue</b>	<b>80</b>
<b>3.3-Les systèmes d'inférence floue</b>	<b>80</b>
3.3.1-Les ensembles flous	81
3.3.2-Définitions	81
3.3.3-Variables linguistiques et ensembles flous	81
3.3.4-Fonctions d'appartenances	83
<b>3.4-Opérateurs de la logique floue</b>	<b>85</b>
<b>3.5-Avantages et inconvénients de réglage par logique floue</b>	<b>86</b>
<b>3.6-La commande floue</b>	<b>87</b>
<b>3.7-La structure générale d'une commande floue</b>	<b>88</b>

3.7.1-Interface de fuzzification	89
3.7.2-Base de connaissance	91
3.7.3-Moteur d'inférence floue	92
3.7.3.1-Inférence floue de Mamdani	93
3.7.3.2-Inférence floue de Sugeno	93
3.7.4-Interface de défuzzification	94
3.7.4.1-Méthode de centre de gravité	94
3.7.4.2-Méthode de centre de maximum	95
3.7.4.3-Méthode de moyenne de maximum	95
<b>3.8-Les différents types de la commande à base de la logique floue</b>	<b>95</b>
3.8.1-Le modèle flou de type Mamdani	95
3.8.2-Le modèle flou de type Takagi-Sugeno(T-S)	96
<b>3.9-La commande par logique floue du système VSC-HVDC</b>	<b>97</b>
3.9.1-Fuzzification	98
3.9.2 Règles d'inférence	100
3.9.3-Défuzzification	100
3.9.4-Schéma de commande global	100
<b>3.10-Résultats de la simulation</b>	<b>101</b>
3.10.1-Fonctionnement du système dans les conditions normales	101
3.10.2-Réponses des régulateurs	103
<b>3.11-Conclusion</b>	<b>105</b>

## Chapitre 4 Simulations et analyse des résultats

<b>4.1-Introduction</b>	<b>108</b>
<b>4.2-Description du système étudié</b>	<b>109</b>
<b>4.3-Simulations</b>	<b>110</b>
4.3.1-Variation de paramètres	110
4.3.2-Changement de charge	114
4.3.3-Défaut AC triphasé	117
4.3.4-Défaut DC	120
<b>4.4-Conclusion</b>	<b>122</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>125</b>
<b>Perspectives</b>	<b>127</b>
<b>Annexes</b>	<b>128</b>
Annexe1	129
Annexe2	134
<b>Références bibliographiques</b>	<b>137</b>

---

## Liste des abréviations

<b>AC</b>	Alternating current.
<b>CA:</b>	Courant alternatif.
<b>CAHT:</b>	Courant alternatif haute tension.
<b>CC :</b>	Courant continu.
<b>CCHT:</b>	Courant continu haute tension.
<b>CSC:</b>	Convertisseur de source de courant.
<b>DC</b>	Direct current
<b>HVAC</b>	High Voltage Alternating Current
<b>HVDC</b>	High Voltage Direct Current
<b>IGBT</b>	Insulated-Gate Bipolar Transistor
<b>LCC</b>	Line-commutated converters
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsion
<b>MMC</b>	Modular Multi-level Converter
<b>MTDC</b>	Multi-Terminal Direct Current
<b>NPC</b>	Neutral Point Clamped (Point neutre calé)
<b>PCC</b>	Point of Common Coupling
<b>PI</b>	Proportionnel-intégral (Régulateur proportionnel-intégral)
<b>PLL</b>	Phase locked loop
<b>PI:</b>	Régulateur proportionnel-intégral.
<b>PWM</b>	Pulse Width modulation
<b>PU.:</b>	Per-Unit.
<b>SCC</b>	Convertisseur Source du Courant
<b>VSC:</b>	Convertisseur de source de tension.

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1:</b> Comparaison entre HVDC classique et le système VSC-HVDC	29
<b>Tableau 2.1</b> Paramètres du système VSC-HVDC	70
<b>Tableau 3.1</b> : Exemple de variable linguistique	90
<b>Tableau 3.2:</b> Tableau des règles d'inférence	100

## Liste des figures

<b>Figure 1.1:</b> Coûts relatifs comparés d'une liaison à courant continu et d'une liaison à courant alternatif	18
<b>Figure 1.2:</b> Configurations principales d'un système HVDC	20
<b>Figure 1.3:</b> Schéma de principe d'un système de transmission HVDC conventionnel	22
<b>Figure 1.4:</b> Symbole du thyristor	23
<b>Figure 1.5:</b> Caractéristique du thyristor	24
<b>Figure 1.6:</b> Commutation naturelle	24
<b>Figure 1.7:</b> Chronogrammes illustrant d'une commutation naturelle	24
<b>Figure 1.8:</b> Schéma de principe d'un système de transmission VSC- HVDC	25
<b>Figure 1.9:</b> Gamme d'application des divers composants en fréquence et en puissance apparente	26
<b>Figure 1.10:</b> a) Schéma d'une cellule de commutation; b) Formes d'ondes schématiques de commutations (à la fermeture, puis à l'ouverture)	27
<b>Figure 1.11:</b> a) Schéma Construction de l'assemblage, b) Transistor IGBT monté antiparallèle avec une diode	28
<b>Figure 1.12:</b> Schéma des éléments d'un système VSC-HVDC	30
<b>Figure 1.13:</b> Schéma d'un câble sous-marin unipolaire d'un système VSC-HVDC	32
<b>Figure 1.14:</b> Convertisseur VSC-HVDC à deux niveaux	35
<b>Figure 1.15:</b> Forme d'onde de la tension	35
<b>Figure 1.16:</b> Convertisseur VSC-HVDC à trois niveaux	36
<b>Figure 1.17:</b> Forme d'onde de la tension	37
<b>Figure 1.18:</b> Schéma d'un sous module	38
<b>Figure 1.19:</b> Schéma d'un convertisseur MMC triphasé	39
<b>Figure 2.1:</b> Schéma d'un système VSC-HVDC	43
<b>Figure 2.2:</b> Schéma de principe d'un VSC	44
<b>Figure 2.3:</b> Mode de fonctionnement en 4 quadrants d'un VSC	46
<b>Figure 2.4:</b> Exemple technique de la Modulation de Largeur d'impulsion (MLI)	47
<b>Figure 2.5:</b> Système VSC-HVDC à trois niveaux	49
<b>Figure 2.6:</b> Redresseur triphasé trois niveaux à point neutre calé des diodes	50
<b>Figure 2.7:</b> Schéma équivalent simplifié du redresseur triphasé trois niveaux	51
<b>Figure 2.8:</b> Schéma modèle de circuit DC du VSC-HVDC	55
<b>Figure 2.9:</b> Schéma diagramme de filtre	56



<b>Figure2.10:</b> Structure de control d'un système VSC-HVDC	59
<b>Figure2.11:</b> Bloc diagramme du convertisseur	59
<b>Figure 2.12:</b> Structure de Contrôle interne d'une station VSC (Régulateur de courant suivant le plan dq0)	61
<b>Figure2.13:</b> Schéma bloc de régulateur de la tension DC	63
<b>Figure 2.14:</b> Signal de MLI à trois niveaux pour le contrôle d'un convertisseur 3-niveaux	65
<b>Figure 2.15:</b> Schéma bloc de commande du redresseur	66
<b>Figure 2.16:</b> Schéma bloc de commande de l'onduleur	67
<b>Figure2.17:</b> Schéma bloc de contrôle du convertisseur (VSC-HVDC)	68
<b>Figure 2.18:</b> Modèle d'un système de transmission VSC-HVDC	69
<b>Figure2.19:</b> Démarrage et réponse en régime normal de la liaison VSC-HVDC (station1)	71
<b>Figure2.20:</b> Démarrage et réponse en régime normal de liaison VSC-HVDC (station 2)	72
<b>Figure 2.21:</b> Réponse transitoire des régulateurs suite à un échelon	73
<b>Figure3.1:</b> Variables linguistiques	82
<b>Figure3.2:</b> Différentes formes de fonctions d'appartenance	84
<b>Figure3.3:</b> Structure de base d'un régulateur flou	88
<b>Figure3.4:</b> Univers du discours partitionné par les termes linguistique définis dans le tableau 3.1	90
<b>Figure 3.5:</b> Désignations standard et fonctions d'appartenance.(a) Désignations standard pour trois termes (b) Désignations standard pour cinq termes	91
<b>Figure 3.6:</b> Schéma du régulateur P.I. flou	97
<b>Figure 3.7:</b> Commande floue des courants du VSC-HVDC (convertisseurs: redresseur et onduleur)	98
<b>Figure 3.8:</b> Formes des fonctions d'appartenance utilisées	99
<b>Figure 3.9:</b> Commande floue du système VSC-HVDC (commande du redresseur)	100
<b>Figure 3.10:</b> Commande floue du système VSC-HVDC (commande de l'onduleur)	101
<b>Figure3.11:</b> Démarrage et réponse en régime normal de liaison VSC-HVDC (station 1)	102
<b>Figure3.12:</b> Démarrage et réponse en régime normal de liaison VSC-HVDC (station 2)	103
<b>Figure 3.13:</b> Réponse transitoire des régulateurs suite à un échelon (station 1)	104
<b>Figure 3.14:</b> Réponse <b>transitoire</b> des régulateurs suite à un échelon (station 2)	104

---

<b>Figure 4.1:</b> Modèle d'un système de transmission VSC-HVDC	109
<b>Figure 4.2:</b> Variation de la puissance active. (a) Réglage par PI analogique (b) Réglage par logique floue	111
<b>Figure 4.3:</b> Variation de la puissance réactive (a) Réglage par PI analogique (b) Réglage par logique floue	112
<b>Figure 4.4:</b> Variation de la puissance réactive(a) Réglage par PI analogique (b) Réglage par logique floue	113
<b>Figure 4.5:</b> Variation de la tension DC (a) Réglage par PI analogique (b) Réglage par logique floue	114
<b>Figure 4.6:</b> La puissance active et réactive suite à un changement de charge (Régulateur PI, flou station1).	115
<b>Figure 4.7:</b> La tension DC et la puissance réactive suite à un changement de charge (Régulateur PI, flou station2)	116
<b>Figure 4.8:</b> La puissance active et réactive suite à un défaut triphasé (Régulateur PI, flou station1)	118
<b>Figure 4.9:</b> La tension DC et la puissance réactive suite à un défaut triphasé (Régulateur PI, flou station 2)	119
<b>Figure 4.10:</b> La puissance active et réactive suite à un défaut DC (Régulateur PI, flou station1)	121
<b>Figure 4.11:</b> La tension DC et la puissance réactive suite à un défaut DC (Régulateur PI, flou station2)	122

## **Remerciements et Dédicaces**

## **DEDICACES**

*Je dédie ce mémoire à la mémoire de  
mon père.*

*-A ma mère, ma femme et mes enfants*

*-A wail.*

*- A toute la famille.*

## Remerciements

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur le **Pr. H. SAYAH**, qui a dirigé ce travail, pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur, **Pr. A. MASSOUM**, Professeur à l'université Djillali Liabès, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant ce jury.

Je remercie très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineur,

- Monsieur, **Pr. M. KHATIR**, Professeur à l'université Djillali Liabès,
- Monsieur, **Pr. L. BOUKEZZI**, Professeur à l'université (Z. A) Djelfa,
- Monsieur, **Dr. M. FLITTI**, MCA à l'université (U.B.B) Ain Temouchent,
- Monsieur, **Dr. C LAKHMISSI**, MCA à l'université (Z. A) Djelfa.

Enfin, j'adresse également mes remerciements à celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

## Résumé

Ces dernières années, le domaine de l'électronique de puissance s'est développé considérablement et offre un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique, en particulier avec l'apparition des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors). Ceci a ouvert pour l'industrie de l'énergie, des horizons pour l'utilisation de la technologie des systèmes VSC-HVDC comme solution plus prometteuse.

La technologie VSC-HVDC présente des avantages adéquats de point de vue techniques et économiques, l'écoulement des puissances active et réactive peut être contrôlé de manière souple et autonome et la tension des lignes DC est alors maintenue constante par le control appliqué aux stations VSC-HVDC. Elle peut aussi renforcer la flexibilité des réseaux en courant alternatif existants et de raccorder les grands parcs éoliens.

Les travaux présentés dans cette thèse visent à développer une stratégie de commande qui permet de surmonter les inconvénients inhérents à la technique de commande conventionnelle afin d'avoir de bonnes performances dynamiques.

Les contrôleurs conventionnels de type PI sont les plus simples pour les systèmes complexes non linéaires et dynamiques mais présentent un manque de robustesse, vue la présence de fortes non linéarités et on ne dispose pas un modèle mathématique précis. En outre, les contrôleurs traditionnels PI avec des valeurs de gain fixe qui sont utilisés pour les systèmes de transmission VSC-HVDC produisent souvent une instabilité du système.

Ces difficultés ont conduit à l'avènement et au développement de nouvelles techniques de commande, afin d'améliorer les performances du comportement dynamique et l'élévation du niveau de la stabilité du système en présence des incertitudes paramétriques ou des perturbations (défauts). C'est dans ce cadre que les méthodes de commande floue se positionnent.

L'objectif de cette thèse est de développer une stratégie de commande basée sur la logique floue qui est systématique pour les systèmes HVDC intégrant des convertisseurs VSC et résoudre plusieurs problèmes dans la conversion et le transport d'énergie.

Afin de valider le modèle de façon complète (la modélisation et l'implantation de la stratégie de commande), plusieurs tests de simulation sont effectués permettant de visualiser le comportement du système VSC-HVDC à base d'IGBT à trois niveaux à la puissance nominale et en présence de multiples perturbations selon chaque loi de commande implantée.

## **Introduction générale**

## Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie continue à croître sans perspective de ralentissement dans un avenir proche. Cette tendance est motivée par différents facteurs, à la fois économiques et sociologiques [1]. La croissance permanente de la demande d'électricité exige l'expansion continue des plans pour augmenter la capacité de production, et celle du transport, et à promouvoir l'interconnexion des régions qui sont parfois séparées par de longues distances. Il ya une nécessité de transmettre l'énergie à travers la mer, et l'interconnexion de systèmes asynchrones de différentes fréquences.

Le transport et la distribution d'énergie électrique sont réalisés depuis le XIXème siècle sous forme de courant alternatif (AC), principalement en raison de la simplicité de la mise en place de systèmes de production d'électricité en courant alternatif et la possibilité d'ajuster le niveau de tension de manière relativement aisée par l'utilisation de transformateurs [2.3]. Néanmoins, les systèmes HVAC (High Voltage Alternative Current) montrent des insuffisances, car la transmission d'énergie électrique en utilisant des câbles sous-marins est limitée aux courtes distances en raison de leur haute capacité diélectrique [5]. Donc il faut trouver des systèmes qui sont techniquement et économiquement réalisables afin d'assurer la stabilité et de garantir un bon échange d'énergie.

Ces dernières années, le domaine de l'électronique de puissance s'est développé considérablement et offre un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique. Ce vaste développement dans le domaine du transfert d'énergie basé sur les convertisseurs de puissance [6], a permis aux sources d'énergie renouvelable de trouver un passage facile pour s'intégrer avec les sources d'énergie conventionnelles. Par conséquent, les systèmes de transmission HVDC (High Voltage Direct Current), ont émergé.

Le transport en HVDC s'impose alors comme étant la seule solution possible répondant aux diverses problématiques et inconvénients rencontrées en courant alternatif avec ces raisons environnementales, techniques et économiques. L'installation des systèmes HVDC est favorisée afin de maximiser l'efficacité de transmission d'électricité [7].



En outre, les systèmes de transmission HVDC ont permis d'interconnecter facilement des réseaux où la tension et la fréquence ne sont pas compatibles, ou quand il y a des obstacles géographiques tel que les mers, les océans, ou les montagnes.

La plupart des systèmes HVDC sont basés sur les convertisseurs de source de courant (CSC) utilisant la technologie du thyristor. Les inconvénients de cette technologie de transmission sont l'absorption de la puissance réactive, l'existence des harmoniques et en plus la valve (thyristor) ne peut pas être commutée en position ouverte en pilotant directement la grille. Ces inconvénients limitent la portée de l'application de cette technologie [9].

Ces dernières années, le domaine de l'électronique de puissance s'est développé considérablement et offre un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique, en particulier avec l'apparition des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors). Ceci a ouvert pour l'industrie de l'énergie, des horizons pour l'utilisation du HVDC basé sur les convertisseurs de source de tension (VSC) comme solution plus prometteuse pour le transport d'énergie électrique générée dans les parcs éoliens offshore [14].

Cette technologie (VSC-HVDC) offre des avantages compétitifs pour les systèmes d'énergie tels que [1.2.3].

- ✓ La puissance active transportée par la ligne DC et les puissances réactives de chaque terminal sont contrôlées indépendamment.
- ✓ Aucun problème de raté de commutation.
- ✓ Aucune communication n'est requise entre les stations interconnectées.

Les systèmes de transmission VSC-HVDC font l'objet de plusieurs axes de recherche comme les convertisseurs d'électronique de puissance, les topologies à deux niveaux, trois niveaux, multi-niveaux et les techniques de commande [19]

Dans ce contexte, cette thèse vise à apporter une contribution à l'amélioration des performances dynamiques d'une liaison VSC-HVDC à trois niveaux. Pour atteindre cet objectif, on a fait une présentation sur les systèmes de transmission VSC-HVDC avec une synthèse sur leur état de l'art ainsi qu'une exposition de l'état actuel de leurs performances.

Le détail de fonctionnement, la modélisation et la simulation d'un système VSC-HVDC à base d'IGBT à trois niveaux est étudiée, et pour favoriser ce système nous avons adapté une nouvelle commande basée sur le contrôle de la logique floue. A cet effet, les concepts de cette technique et les aspects méthodologiques nécessaires à la compréhension sont présentés.

A ce stade, les travaux présentés dans cette thèse visent à développer une stratégie de commande qui permet de surmonter les inconvénients inhérents à la technique de commande conventionnelle afin d'avoir de bonnes performances.

L'objectif majeur de cette thèse est donc de développer une stratégie de commande basée sur la logique floue qui est systématique pour les systèmes HVDC intégrant des convertisseurs VSC et résoudre plusieurs problèmes dans la conversion et le transport d'énergie.

Les techniques conventionnelles de réglage sont basées sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de la fonction de transfert ou d'équations d'état. Celles-ci ne sont pas toujours disponibles. On peut considérer que les contrôleurs conventionnels de type PI sont les plus simples pour les systèmes complexes non linéaires et dynamiques mais présentent un manque de robustesse. En outre, les contrôleurs traditionnels PI avec des valeurs de gain fixe qui sont utilisés pour les systèmes de transmission VSC-HVDC produisent souvent une instabilité du système [19].

En parallèle, la présence des non-linéarités larges dans la dynamique du système VSC-HVDC rend les modèles linéaires inadéquats pour la conception du contrôleur. Une situation qui motive l'utilisation des autres techniques de commande afin d'améliorer les performances du comportement dynamique et l'élévation du niveau de la stabilité du système en présence des incertitudes paramétriques ou des perturbations (défauts) [24].

En conséquence, les stratégies de commande avancées permettent de répondre aux exigences d'un certain nombre de systèmes fortement non linéaires. C'est dans ce même cadre que les méthodes de commande floue se positionnent [26].

La majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler à cause de leur non-linéarité, la variation de leurs paramètres et la qualité des variables mesurables. Ces difficultés ont conduit à l'avènement et au développement de nouvelles techniques telles que la commande floue particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander ou lorsque ce dernier présente de fortes non linéarités comme dans notre cas pour les systèmes de transmission VSC-HVDC.

Le plan de cette thèse est organisé comme suit :

Dans le chapitre 1, nous donnerons un état de l'art principalement orienté sur la présentation des systèmes VSC-HVDC, leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs applications. Les différentes configurations, les différentes topologies de VSC et les principales composantes seront étudiés.

Dans le chapitre 2, nous allons nous intéresser à la modélisation des systèmes de transmission VSC-HVDC. Nous expliquerons leur principe de fonctionnement. La modélisation, l'analyse mathématique et le contrôle du comportement dynamique du système sont bien détaillées.

Dans le chapitre 3, Nous présenterons les concepts de la logique floue (fuzzy logic), ses bases théoriques, la théorie des ensembles flous et nous définirons les notions nécessaires à la compréhension de cette technique en donnant des rappels sur les bases générales de la logique floue et les méthodes conventionnelles de réglage.

Le chapitre 4, introduira la description détaillée du modèle simulé, son exploitation, le fonctionnement et l'analyse du système afin de prévoir son comportement.

Finalement, pour prouver de nouveau la robustesse des systèmes de commande et vérifier le fonctionnement global du système en régime dynamique en présence de multiples perturbations, plusieurs résultats de simulation seront présentés et interprétés.

# **Chapitre 1**

**Etat de l'art sur les systèmes VSC-HVDC**

## 1.1 Introduction

La plupart des pays du monde ont engagé une transition énergétique où y réfléchissent sous l'influence d'une double pression d'une part la perception que les énergies fossiles constituent une ressource limitée, quel que soit le délai, et d'autre part la prise de conscience, dans un passé plus récent, qu'elles influent négativement sur le climat de la planète.

La transition énergétique désigne le passage d'un système de production et de consommation d'énergie, aujourd'hui axé sur des énergies non renouvelables (pétrole, gaz, charbon), à un autre mix énergétique plus efficace et plus décarboné. Ce type de transition n'est pas un phénomène sans précédent. Le charbon au milieu du XIXe siècle, le pétrole au milieu du XXe siècle, le nucléaire civil dans les années 1970 ont introduit des évolutions majeures dans les mix énergétiques, même si ces différentes sources ne se sont pas substituées les unes aux autres mais plutôt additionnées [1].

L'énergie électrique est traditionnellement produite, transportée et distribuée sous forme de courant alternatif. Ce choix technique fut effectué durant la fin du XIXème siècle, lors du conflit (guerre des courants) entre Nikola Tesla, dans sa lutte pour imposer la nouvelle technologie du courant alternatif, et Thomas Edison qui s'en tiendra au courant continu.

Les raisons majeures qui ont permis d'opter pour la technologie du courant alternatif sont la simplicité de production (les alternateurs sont plus simples et plus fiables que les génératrices à courant continu), la facilité de changer le niveau de tension à l'aide de transformateurs et la simplicité à interrompre le courant du fait que celui-ci s'annule naturellement de façon périodique. En conséquence, les réseaux électriques se sont donc développés, en courant alternatif, avec le déploiement de gros moyens de production centralisés raccordés aux réseaux de transport [2].

En outre, les besoins en consommation électrique sont en croissance. Les marchés de l'électricité se sont ouverts à la concurrence (libéralisation du marché de l'électricité) et les énergies renouvelables se développent pour la production d'énergie électrique dans le cadre des engagements de la transition énergétique, ce qui implique une nécessité de renforcer et d'interconnecter les réseaux électriques.

Ainsi, il est parfois nécessaire de construire de très longues lignes aériennes, des lignes souterraines enterrées ou sous-marines, ou de relier des réseaux asynchrones.

Dans ce domaine, le transport en courant alternatif montre ses faiblesses et limites, voir ses incapacités (interconnexion de réseaux asynchrones), et laisse la place au courant continu.

Pour lever ces problématiques, grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, l'utilisation du courant continu à haute tension est devenue possible, donnant naissance à l'appellation des systèmes de transmission HVDC, qui est une technologie permettant de transporter de très fortes puissances.

Le principe est de convertir (grâce à l'électronique de puissance) un courant alternatif en courant continu, transporter cette puissance sur de grandes distances, puis reconvertir la puissance en sens inverse.

Aujourd'hui, les connexions HVDC constituent un élément de réponse aux besoins énergétiques mondiaux croissants.

Dans ce chapitre, les systèmes de transmission HVDC sont étudiés, plus particulièrement les technologies de liaisons VSC utilisées pour des applications de transport d'électricité. Ensuite une synthèse sur l'état de l'art de ces systèmes de transmission est présentée, ainsi qu'une étude de leurs configurations, leurs topologies et l'état actuel de leurs performances.

## **1.2 Historique sur le développement du transport HVDC**

Bien que l'industrie de l'époque ait opté pour le courant alternatif, la technologie HVDC à beaucoup évolué depuis sa naissance. Nous présenterons les étapes avec les dates clés de son développement.

En 1941 les allemands ont construit la première liaison HVDC. Il s'agissait d'une liaison 200 kV de type CSC avec diodes à vapeur de mercure, offrant un transport de puissance de 60 MW sur 115 km de câble entre Berlin et Elbe [4]. Le projet est achevé en 1945, mais n'a jamais été mis en marche.

En 1954 la première liaison HVDC commerciale a permis de relier l'île Gotland avec la Suède continentale. Elle était réalisée par l'intermédiaire d'un câble sous-marin de 96 km de long, offrant un transport de puissance de 20 MW avec une tension nominale de 100 kV. Son développement fut dirigé par Uno Lamm, que l'on considère encore aujourd'hui comme (le père de l'HVDC) [11]. Il s'agit également de la première liaison sous-marine.

En 1972, la première liaison utilisant uniquement des thyristors (le projet EeL River) à permis de faire le lien entre deux zones asynchrones le Québec et le Nouveau-Brunswick [7]. C'est une connexion de type dos à dos (back-to-back) [12].

L'émergence des thyristors est une étape importante dans le développement des liaisons HVDC: ceux-ci coûtent moins cher que les diodes à vapeur de mercure et minimisent les coûts de fonctionnement [13].

En 1978, la première liaison à l'échelle du Méga volt (le projet de Cahora Bassa) relie une station hydroélectrique sur le Zambéze et la ville de Johannesburg via une liaison de 533 kV [14]. Ce projet est important pour plusieurs raisons, la tension sur sa ligne est la plus haute à l'époque, que ce soit sur des liaisons AC ou DC [18]. La longueur de la ligne (1360 km) est aussi un record, et il s'agit de la première liaison HVDC sur le continent africain.

Dès les années 1970, jusqu'en 1997, toutes les interconnexions HVDC furent implantées avec des thyristors à haute tension qui remplacèrent les valves à vapeur de mercure.

Cette amélioration considérable des thyristors, refroidis à l'eau et isolés à l'air [19] permettent de supporter des courants et des tensions plus importants. Cela diminue le besoin de mettre des thyristors en parallèle ou en série [13].

Le premier projet utilisant ces techniques (le projet Nelson River Bipole 2), donna lieu à une globalisation de l'utilisation des ces thyristors [14].

En 1986, le projet Itaipu est une liaison qui fait le lien entre la centrale hydro-électrique du barrage d'Itaipu et la ville de São Paulo. La mise en évidence de cette installation reste la plus importante liaison HVDC durant de nombreuses années (Puissance nominale de 6300 MW et tension 600 kV) [13]. Tout d'abord en matière de tension, elle ne fut dépassée qu'en 2010 par

la liaison Yunnan-Guangdong et sa tension de 800 kV [24]. Puis en puissance nominale, par la liaison Xiangjiaba - Shanghai et ses 6400 MW [18].

En 1986, l'installation du premier HVDC multi-terminal, a permis de relier la production d'Hydro-Québec avec plusieurs villes.

En 1986, la première liaison de type VSC offre une panoplie de nouvelles possibilités. Tel que le contrôle indépendant des puissances actives et réactives et l'alimentation d'un réseau faible [12].

La première liaison de type MMC, (le projet Trans Bay Cable) à San Francisco, est le premier à utiliser un type spécifique de VSC qui est une nouvelle topologie utilisant les convertisseurs multi-niveaux modulaires (MMC). Elle permet notamment de diminuer les pertes et les besoins de filtres. Aujourd'hui, la plupart des constructeurs de liaisons HVDC proposent des solutions VSC basées sur la technologie MMC [26]. La liaison Trans Bay Cable permet de transmettre 400 MW avec une tension DC de 200 kV et des convertisseurs comportant 216 sub-modules par bras.

En 2015, a été réalisé l'interconnexion HVDC France-Espagne: INELFE (INterconnexion ELectrique entre la France et l'Espagne).

Cette interconnexion se fait à l'aide de câbles souterrains, constituée de deux liaisons indépendantes de 1000MW chacune de technologie VSC-MMC [24]. Le contrat de construction des convertisseurs a été octroyé à SIEMENS et les câbles ont été fournis par PRYSMIAN CABLES AND SYSTEMS.

Après plus de 60 ans de recherche et de développement, les systèmes de transmission HVDC assurent aujourd'hui le transport d'énergie dans de nombreux pays, sont marqués par des augmentations au cours du temps de la puissance, de la longueur de la liaison et de niveau de la tension.

L'Annexe A1 [64] recense de manière plus exhaustive les liaisons installées depuis les années 50 opérant à des tensions excédant 60 kV. On peut remarquer que la puissance



cumulée installée augmente très significativement depuis les années 80. Plusieurs systèmes de transmission HVDC sont actuellement en cours d'installation.

### 1.3 Intérêts des systèmes HVDC par rapport aux systèmes alternatifs

Les systèmes alternatifs sont utilisés pour la transmission d'énergie depuis plus d'un siècle principalement en raisons majeures [40]:

- ✓ L'simplicité de production (les alternateurs sont plus simples et plus fiables que les génératrices à courant continu).
  - ✓ La facilité de changer de niveau de tension à l'aide de transformateurs.
  - ✓ La facilité de couper le courant alternatif.
- Néanmoins, la maîtrise des transferts d'énergie en AC pose des problèmes :
- ✓ La répartition des transits d'énergie dans les diverses branches des réseaux maillés se fait suivant des lois physiques et ne peuvent pas être maîtrisés facilement.
  - ✓ La puissance réactive doit être compensée au plus près de sa consommation afin de limiter les pertes et les chutes de tension.
  - ✓ La transmission d'énergie électrique en utilisant des câbles sous-marins est limitée aux courtes distances dans le cas du courant alternatif en raison de la haute capacité diélectrique des câbles.

Ces restrictions ont nécessité la recherche des solutions alternatives, l'exploitation des ressources d'énergie durables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'hydroélectricité nécessite aujourd'hui le développement de technologies de transmission de l'énergie électrique et le renforcement des réseaux. En effet, les ressources énergétiques renouvelables sont souvent situées dans des régions éloignées comme en mer, dans des zones inhabitées ou encore dans des régions désertiques. L'utilisation optimale de ces ressources requiert souvent la construction de nouveaux réseaux de transport d'électricité impliquant plusieurs régions et pays.

Les développements technologiques et les progrès en électronique de puissance ont permis de progresser dans la transmission d'énergie électrique. Par conséquent, les systèmes de

transmission HVDC ont émergé. En effet, cette solution offre de multiples avantages économiques et technologiques.

Le système de transport d'énergie en courant continu à haute tension HVDC possède des propriétés intrinsèques qui le rendent beaucoup plus pratique et plus efficace comparé au transport en alternatif.

Des avantages par rapport au système de transport en courant alternatif à haute tension prises sur des considérations techniques, économiques et environnementales [41].

### **1.3.1 Raisons techniques**

Les raisons techniques les plus importantes peuvent être liées à plusieurs avantages associés aux systèmes HVDC, tels que:

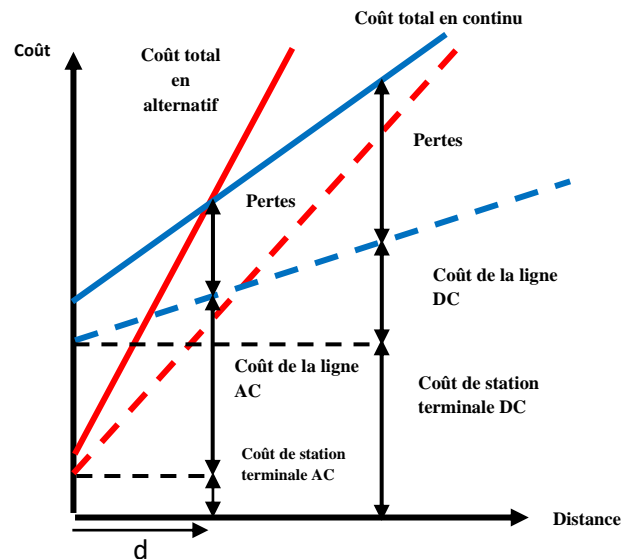
- ✓ L'interconnexion des zones éloignées pour faciliter les échanges d'énergies.
- ✓ Le raccordement des parcs éoliens offshore.
- ✓ L'acheminement de l'énergie hydro éloignée.
- ✓ Aucune limite de la longueur des liaisons HVDC (du fait de l'absence de courant capacitif).
- ✓ Les pertes dans les câbles HVDC inférieures aux pertes des câbles en AC (du fait de l'absence des pertes en conducteur, gaine, blindage).
- ✓ La possibilité de connexion entre réseaux non synchrones via des liaisons HVDC.
- ✓ La compétitivité économique pour des distances supérieures à des centaines de kilomètres.
- ✓ Le contrôle permanent du flux de puissance entre deux réseaux alternatifs triphasés connectés.
- ✓ L'interconnexion de deux réseaux de même fréquence ou de fréquences différents, et la stabilisation des réseaux alternatifs.

### **1.3.2 Raisons économiques**

A partir d'une certaine distance, il est financièrement intéressant de transporter l'énergie en courant continu. Nous constatons que le coût d'une ligne à DC est moins élevé que celui

d'une ligne à AC. Il est donc plus avantageux de choisir une ligne DC plutôt qu'une ligne AC qui n'est pas une solution techniquement et/ou économiquement acceptable (notamment les distances supérieures à 600 km pour les lignes et quelques dizaines de KM pour les câbles comme le montre la figure 1). L'économie réalisée sur le coût de la ligne de transport, aérienne ou souterraine, est moins élevée en continu qu'en alternatif.

Le transport de l'énergie électrique allant jusqu'à 800 MW sur des distances d'environ 300 km a déjà été réalisé avec les câbles sous-marins, et les longueurs de câble allant jusqu'à environ 1000 km sont en phase de planification. Avec ces avancées, la technologie HVDC est devenue une technologie fiable et mature [41].



**Figure 1.1:** Coûts relatifs comparés d'une liaison à courant continu et d'une liaison à courant alternatif.

### 1.3.3 Enjeux environnementaux

Le choix d'une liaison HVDC peut aussi être motivé pour des raisons liées à l'environnement qu'il traverse [44].

Les liaisons HVDC peuvent transporter plus de puissance que les liaisons HVAC pour une taille donnée de conducteurs. Ce qui signifie que pour une même puissance transmise, les liaisons HVDC nécessitent un droit de passage deux fois moins important [47].

La possibilité de relier des zones à fortes densités de population avec des productions d'énergies vertes (barrages hydro-électrique, éolien offshore) peut également être citée parmi les impacts positifs de l'HVDC sur l'environnement.

Un autre avantage environnemental notable réside dans le fait que les champs électriques et magnétiques sont de type DC plutôt que AC [2].

## 1.4 Configurations des systèmes HVDC

Le choix de la configuration des systèmes HVDC dépend principalement du fonctionnement attendu et de la localisation des stations de conversion. On constate plusieurs manières de configuration utilisées dans un système de transmission HVDC en se basant sur les coûts, la flexibilité, et les conditions opérationnelles [7].

La figure 1.2 montre cinq configurations de base d'un système de transmission HVDC

La figure 1.2 (a) montre la configuration la plus simple qui s'appelle dos à dos (back-to-back). Cette catégorie est couramment utilisée pour interconnecter deux systèmes AC asynchrones qui peuvent opérer à des fréquences différentes. Le redresseur et l'onduleur sont localisés dans une même station.

La figure 1.2 (b) montre une configuration monopolaire. Elle utilise un seul conducteur, et le chemin de retour est assuré par la terre ou l'eau. Les considérations économiques conduisent souvent à privilégier ces systèmes dans le cadre d'une transmission par câble. Cette configuration peut aussi être la première étape dans la conception d'un système bipolaire.

A la place d'un retour par la terre, un conducteur métallique à basse tension peut être utilisé lorsque la résistivité de la terre est trop importante, ou encore, lorsque les interférences avec des structures métalliques sous-terraines/sous-marines sont préjudiciables.

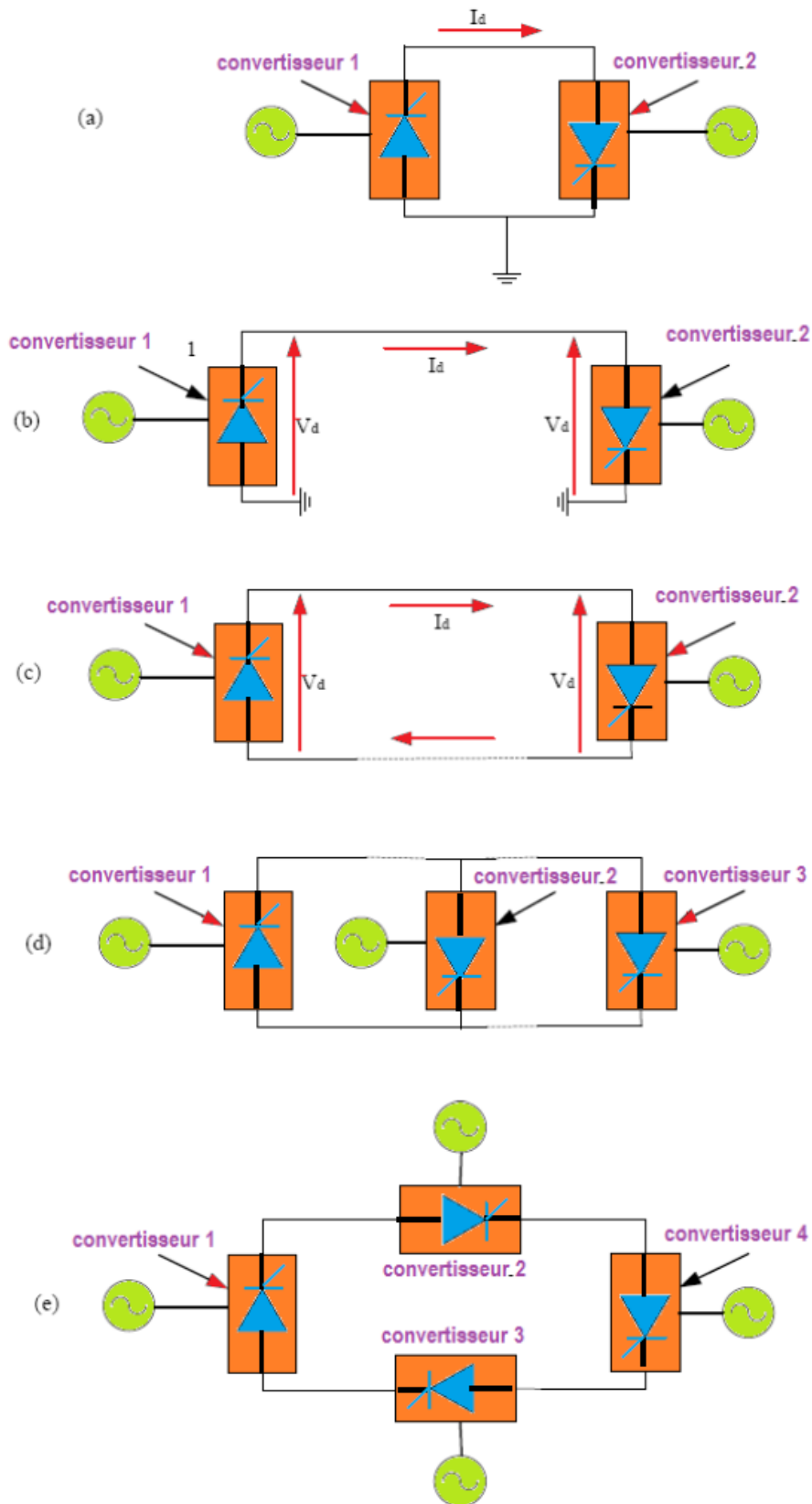


Figure 1.2: Configurations principales d'un système HVDC.

La figure 1.2 (c) montre une configuration bipolaire dont la station redresseuse et la station onduleur sont reliés par deux conducteurs (un par polarité  $\pm$ ). Cette configuration est généralement utilisée pour une transmission de puissance par voie aérienne.

Le développement et le succès grandissant des transmissions DC entre deux terminaux point à point (point to point), a poussé les concepteurs de systèmes de puissance à la réalisation des liaisons multi terminales (MTDC) qui pouvaient être beaucoup plus attractives, pour exploiter pleinement les avantages économiques et techniques de la technologie HVDC [44].

Les systèmes MTDC se déclinent suivant deux configurations :

- ✓ Les liaisons parallèles.
- ✓ Les liaisons sériees.

La figure 1.2 (d) montre une structure parallèle où le convertisseur 1 fonctionne comme redresseur et les convertisseurs 2 et 3 fonctionnent comme onduleur. Les convertisseurs opèrent tous à la même tension DC nominale [13].

La figure 1.2 (e) montre une structure série où quatre convertisseurs sont connectés en série. Le convertisseur 1 fonctionne en redresseur et les convertisseurs 2,3 et 4 fonctionnent en onduleur.

## 1.5 Technologie des systèmes HVDC

Il y'a deux grandes familles de solutions qui se distinguent fondamentalement du point de vue fonctionnel.

- ✓ Les convertisseurs à source de courant, commutés par les lignes utilisant des thyristors (l'ouverture naturelle de la valve au passage par zéro du courant appelée (CSC :current source converter ou LCC : Line Commutated Converter). C'est la technologie HVDC conventionnelle.

- ✓ Les convertisseurs à source de tension (l'ouverture commandée de la valve utilisant des IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor) appelés VSC (Voltage Source Converter). C'est la technologie VSC- HVDC.

La technologie classique CSC (la commutation naturelle) est caractérisée par l'utilisation de thyristors GTO (Gate Turn-Off). C'est-à-dire les dispositifs semi-contrôlés qui permettent de choisir l'instant d'amorçage. Le semi-conducteur devient passant, mais pas l'instant de blocage où le semi-conducteur cesse d'être passant. En effet, pour un thyristor, le blocage est naturel et intervient dès que le courant traversant le semi-conducteur est nul.

Les liaisons les plus récentes VSC-HVDC, ainsi que les projets aboutissant dans un avenir proche, utilisent soit des thyristors, soit des IGBT. Par la suite, c'est la technologie VSC qui s'intéressera à améliorer les performances de notre système.

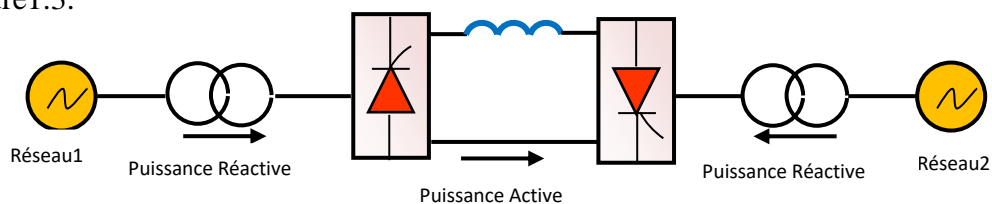
### 1.5.1 La technologie CSC -HVDC

Un système de transport à courant continu est conçu pour acheminer la puissance d'un réseau 1 vers un réseau 2 et vice versa en utilisant une liaison continue. Les convertisseurs constituent la partie principale d'un système HVDC.

La technologie CSC-HVDC est constituée de trois parties principales :

1. Une station de conversion pour convertir le courant alternatif en courant continu appelé également redresseur.
2. Une ligne de transmission à courant continu.
3. Une deuxième station de conversion pour convertir de nouveau le courant continu en courant alternatif appelé également onduleur.

Généralement, le redresseur et l'onduleur sont symétriques et réversibles (ils peuvent échanger leur rôle). Le schéma de principe d'une connexion en tension continue est illustré dans la figure 1.3.



**Figure 1.3:** Schéma de principe d'un système de transmission HVDC conventionnel.

### 1.5.2 Présentation du thyristor

Le thyristor est un composant commandé à la fermeture, mais pas à l'ouverture (figure 1.4). Il est réversible en tension et supporte des tensions  $V_{AK}$  aussi bien positives que négatives. Il n'est pas réversible en courant et ne permet que des courants  $I_{AK}$  positifs, c'est à dire dans le sens anode-cathode, à l'état passant.

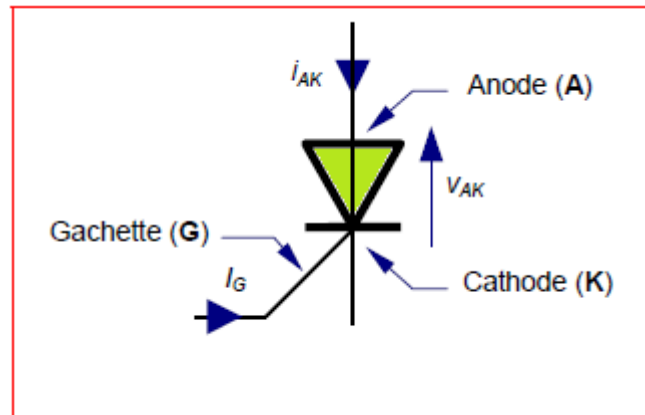


Figure 1.4: Symbole du thyristor

### 1.5.3 Caractéristiques et fonctionnement

Comme indiqué dans la figure 1.5, le composant est bloqué (OFF) si le courant  $I_{AK}$  est nul quelque soit la tension  $V_{AK}$ . Si la tension  $V_{AK}$  est positive, le thyristor est amorcé.

L'amorçage (A) est obtenu par un courant de gâchette  $I_G$  positif d'amplitude suffisante, alors que la tension  $V_{AK}$  est positive. L'état passant (ON) est caractérisé par une tension  $V_{AK}$  nulle et un courant  $I_{AK}$  positif.

Le blocage (B) apparaît dès annulation du courant  $I_{AK}$ . On ne peut pas commander ce changement, mais on en distingue deux types : La commutation naturelle par annulation du courant  $I_{AK}$ , ou la commutation forcée par inversion de la tension  $V_{AK}$ .



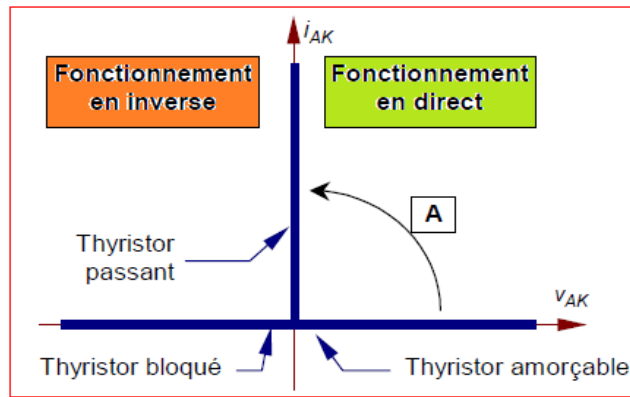


Figure 1.5 : Caractéristique du thyristor.

### 1.5.4 Le blocage par commutation naturelle

Ce blocage intervient par extinction naturelle du courant anode-cathode. Le montage de la figure 1.6 fournit un exemple de commutation naturelle qui se traduit par les chronogrammes de la figure 1.7.

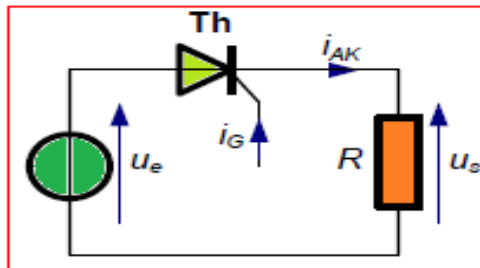


Figure 1.6 : Commutation naturelle.

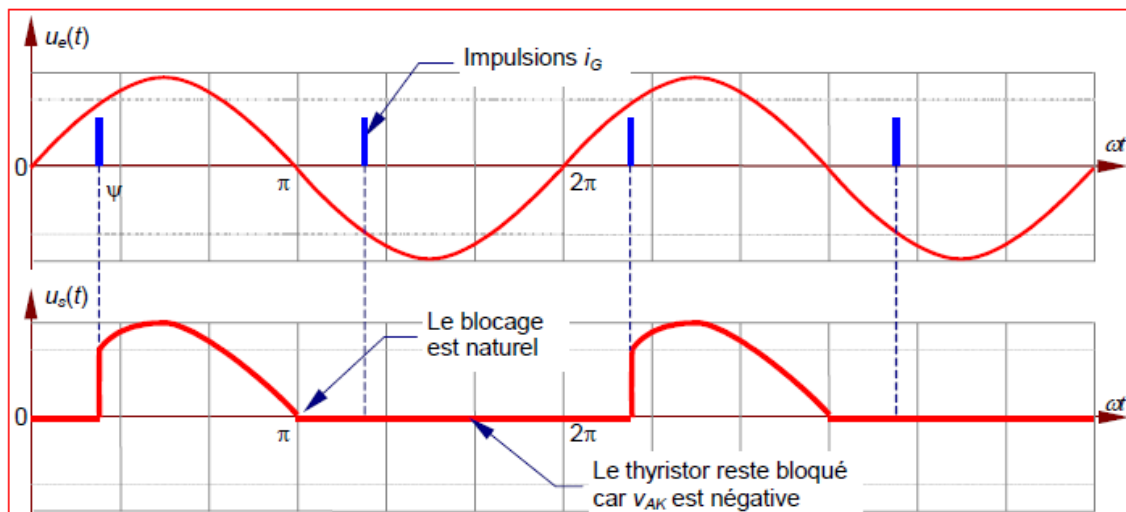


Figure 1.7: Chronogrammes illustrant d'une commutation naturelle.

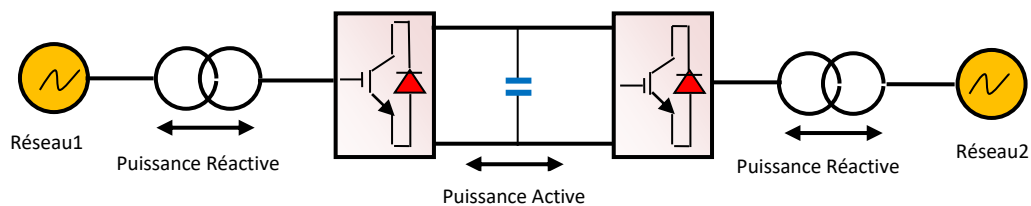
## 1.6 La présentation des systèmes de transmission VSC-HVDC

La seconde génération utilise la technologie VSC. La différence principale entre les stations basées sur les convertisseurs de source de courant (CSC) qui utilisent la technologie de thyristor, et les stations basées sur les convertisseurs de source de tension (VSC) consiste à utiliser d'autres composants à la place des thyristors. La plupart du temps, on utilise des IGBT.

Les défauts de la première catégorie de système de transport HVDC classique sont focalisés sur la consommation de la puissance réactive dans le système, la présence des harmoniques. Ainsi que le thyristor ne peut être commuté en position ouverte en conduisant directement la grille. Ce qui limite la portée de son utilisation.

Grâce aux interrupteurs électroniques d'IGBT, ces technologies utilisées dans le transport VSC-HVDC présentent des avantages adéquats de point de vue technique et économique en le comparant avec celles des systèmes de transmission CSC-HVDC.

L'avantage majeur de la transmission VSC est sa capacité à contrôler indépendamment la puissance active et réactive dans les deux terminaux, ainsi que la facilité de connecter plus de deux convertisseurs DC au même réseau. La figure 1.8 présente le schéma de principe d'un système de transmission VSC-HVDC.

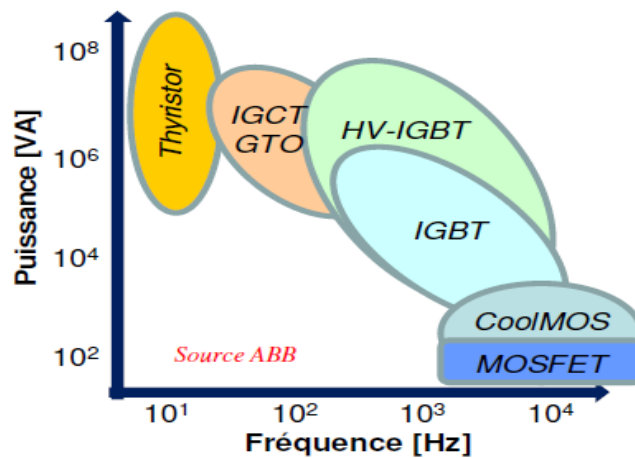


**Figure 1.8:** Schéma de principe d'un système de transmission VSC- HVDC.

L'utilisation des convertisseurs en source de tension est très intéressante dans des plateformes en mer (station offshore), et ceci est dû au fait que les convertisseurs VSC produisent moins d'harmoniques permettant de réduire le nombre de filtres passifs nécessaires, et il en résulte un gain du coût de l'installation.

## 1.7 État de l'art de la structure IGBT

Depuis l'avènement du composant IGBT vers le milieu des années 80, on peut remarquer la prépondérance de son utilisation dans la conception des convertisseurs de puissance, vis-à-vis de ses concurrents tels que le (GTO: Gate Turn-Off), le thyristor ou le MOSFET de puissance. En effet, l'IGBT est utilisable sur une large gamme de tension (600V à 6,5kV) et de courant (10A à 3,6kA) pour une gamme de fréquence également étendue ( $10^2$  à  $10^4$  Hz) comme montre la figure 1.9.



**Figure 1.9:** Gamme d'application des divers composants en fréquence et en puissance apparente.

Les convertisseurs à IGBT offrent les avantages suivants : dimension plus réduite, stabilité électrothermique du composant, commande en tension et un bon compromis chute de tension/vitesse de commutation.

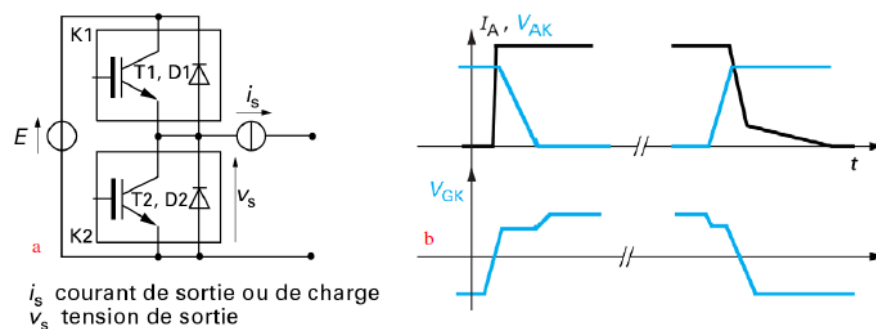
Il existe plusieurs structures d'IGBT dans la littérature, chacune offrant des performances électriques différentes. Suivant leur composition structurale, les dispositifs IGBT offrent des comportements différents d'un point de vue physique.

Le paragraphe suivant présente de façon générale les principes de fonctionnement du composant ainsi que ces différentes structures, et donne une indication sur l'orientation du choix technologique du composant.

### 1.7.1 La cellule de commutation

L'élément de base de tout convertisseur est appelé la cellule de commutation figure 1.10. (a). Telle qu'elle est généralement définie en électronique de puissance, celle-ci est constituée de deux interrupteurs (K1 et K2) réversibles en courant, ainsi que d'une source de tension ( $E$ ) non réversible.

La source de courant est généralement présente dans les structures réelles sous forme d'inductance et est réversible en courant. La figure 1.10 (b) montre les formes d'ondes de commutations à la fermeture, puis à l'ouverture.

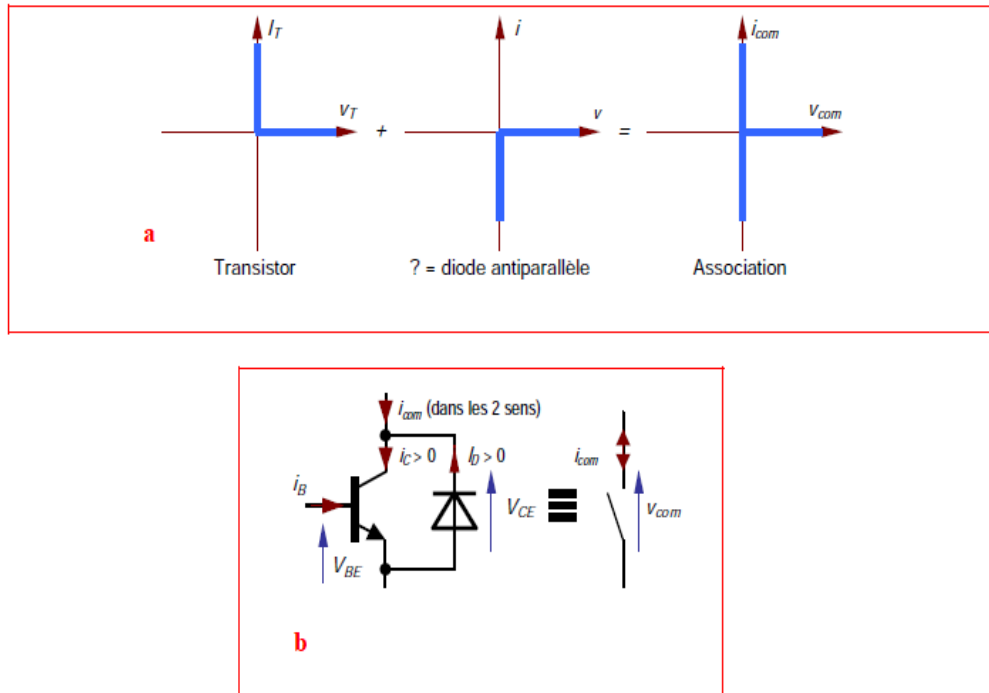


**Figure 1.10:** a) Schéma d'une cellule de commutation; b) Formes d'ondes schématiques de commutations (à la fermeture, puis à l'ouverture).

Les propriétés de commutation de la cellule sont fortement tributaires des caractéristiques de la charge, de la nature des interrupteurs actifs utilisés ainsi que du type de commande.

## 1.7.2 Caractéristiques et fonctionnement

Sur la figure 1.11(a), l'assemblage réversible en courant contient le transistor à gauche et un élément au centre qui se trouve être par inversion du sens des grandeurs une diode placée en parallèle inverse (antiparallèle). Le schéma résultant est indiqué à la figure 1.11 (b).



**Figure 1.11:**a)Schéma Construction de l'assemblage, b) Transistor IGBT monté antiparallèle avec une diode.

## 1.8 Avantage des systèmes VSC-HVDC

Avec la venue des nouvelles technologies les liaisons de type VSC à base de composants IGBT, plusieurs possibilités sont offertes pour la transmission efficace dans les systèmes HVDC. Ce progrès donne beaucoup d'avantages et de possibilités pour l'industrie de l'énergie en utilisant des convertisseurs en source de tension (VSC).

Le système VSC-HVDC présente les avantages suivants par rapport aux systèmes CSC HVDC [40.42] :

1. Le contrôle indépendant des puissances active et réactive.
2. L'inversement du flux de puissance plus simple (polarité des tensions ne change pas).
3. La commutation seulement par la présence des impulsions de gâchettes sur les IGBT. Elle ne nécessite pas de source alternative pour la commutation naturelle comme c'est le cas des thyristors.
4. La taille du convertisseur est plus petite que dans la liaison CSC-HVDC.

5. La facilité de mise en œuvre pour des systèmes à plusieurs terminaux, parce que la polarité du côté DC est la même du côté redresseur que du côté onduleur.
6. Contrairement à la technologie conventionnelle, il n'y a pas de communication entre chaque côté de la liaison, car le système de commande sur le redresseur et l'onduleur est fait indépendamment. Cet avantage peut améliorer la vitesse et la fiabilité du système de contrôle.
7. Le temps de réponse rapide grâce à une fréquence de commutation élevée avec la commande PWM.
8. Une offre dynamique plus élevée et, à la faveur des commandes de type MLI (les filtres sont plus réduits).

Les inconvénients de la technologie VSC-HVDC par rapport à la technologie CSC-HVDC sont :

- ✓ L'utilisation des IGBT, rend la liaison VSC-HVDC plus chère que la liaison CSC-HVDC.
- ✓ Les défauts des lignes mises à la terre sont très problématiques.
- ✓ En raison de la fréquence élevée de la PWM, les pertes sont plus grandes que dans la liaison CSC-HVDC.

Une brève comparaison entre le système HVDC classique et le système HVDC-VSC est résumée dans le tableau 1.1 [47].

**Tableau 1.1:** Comparaison entre HVDC classique et le système VSC-HVDC.

La technologie HVDC Classique (CSC)	La technologie VSC-HVDC
Thyristor commandé en fermeture	IGBT commandé en ouverture et fermeture
Contrôle de la puissance active	Contrôle indépendant de la puissance active et réactive
Besoin d'un filtre AC	Pas de filtre AC
Contrôle de la puissance par la polarité de tension	Contrôle de la puissance par la polarité de tension
Alimente un réseau fort (le rapport de court-circuit $SCR > 2$ )	Possibilité d'alimenté un réseau faible
Capacité limitée de l'inversion de la puissance	L'inversion de la puissance presque instantanée

## 1.9 Les composants élémentaires des systèmes VSC-HVDC

Les systèmes VSC-HVDC sont composés des liaisons entre plusieurs éléments tels que: transformateurs, filtres, convertisseurs, lignes de transmission, charges, et réseau. Par conséquent, nous pouvons les décrire comme un ensemble d'interconnexions entre des quadripôles. Seuls les transformateurs sont situés à l'extérieur du bloc de conversion. En suivant le flux de puissance à partir du réseau de départ figure 1.12 on trouve les éléments constitutifs suivants :

### 1.9.1 Les transformateurs de conversion

Le transformateur est un élément important dans un système HVDC. Il est utilisé pour transformer un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre la puissance électrique d'un réseau à un autre.

### 1.9.2 Les filtres alternatifs (AC)

Ces filtres ont pour fonction de réduire la perturbation harmonique dans le réseau en tension alternative en amont du poste de départ et en aval du poste d'arrivée. Les filtres AC sont constitués d'éléments passifs (condensateurs, inducteurs) dont le dimensionnement et les valeurs nominales sont calibrés en fonction des caractéristiques de la connexion.

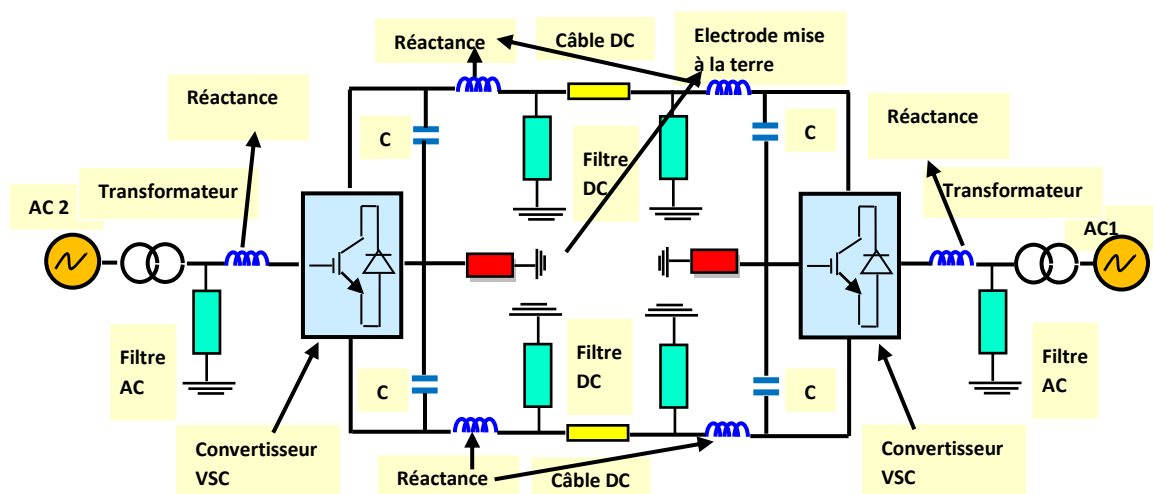


Figure 1.12: Schéma des éléments d'un système VSC-HVDC.

### 1.9.3 Les convertisseurs VSC

Le composant de base du convertisseur est un interrupteur statique capable d'établir et de couper un courant (contrairement au thyristor qui n'est capable que d'établir un courant). L'IGBT est couramment utilisé. Une diode de roue libre est connectée en antiparallèle avec cet interrupteur unidirectionnel en courant pour assurer le passage du courant dans les deux sens.

### 1.9.4 Les condensateurs DC

Les condensateurs à courant continu stabilisent la tension côté DC du convertisseur. Ils sont des éléments les plus importants dans le circuit DC, dont les fonctions principales sont:

- ✓ Servir comme accumulateur d'énergie.
- ✓ Réduire les harmoniques et les ondulations de la tension continue.
- ✓ Limiter les variations de tension.

### 1.9.5 Les réactances de phase

C'est l'élément AC le plus important dans le fonctionnement et la modélisation du système VSC-HVDC du côté AC du convertisseur. L'inductance de phase est constituée de bobines (éléments inductifs avec une faible résistance) pour chaque phase. Elle sert à atténuer les courants harmoniques de haute fréquence et limiter les courants de court-circuit. En outre, elle contrôle la puissance active et réactive. La taille de la réactance en phase détermine le comportement dynamique du côté AC du convertisseur

### 1.9.6 Les filtres DC

Les filtres du côté DC permettent la réduction du bruit harmonique sur les lignes (câbles) en courant continu. En général, le condensateur du côté DC et la réactance de ligne de lissage sont utilisés pour bloquer les harmoniques dans le côté DC. Mais dans certaines circonstances (interférences avec d'autres câbles comme les câbles de communication), on peut installer un filtre DC.



### 1.9.7 Les câbles DC

Dans les systèmes de transmission VSC-HVDC, les câbles souterrains présentent un grand nombre d'avantages significatifs par rapport aux lignes aériennes. Par exemple, étant donné que les VSC n'acceptent qu'une seule polarité de tension DC, les câbles n'ont pas besoin d'être conçus pour résister à une inversion de polarité, ce qui permet l'utilisation de certains types de câbles présentant des avantages conséquents. Généralement ces conducteurs en aluminium ou en fils de cuivre ronds à brins concentriques. Le câble sous-marin XLPE comprend une couche d'isolation, une gaine métallique, une enveloppe, une armure, et une gaine extérieure servant de deux couches de fils de polypropylène [44]. La figure 1.13 [47] représente un schéma d'un câble sous-marin unipolaire utilisé dans la transmission VSC-HVDC.

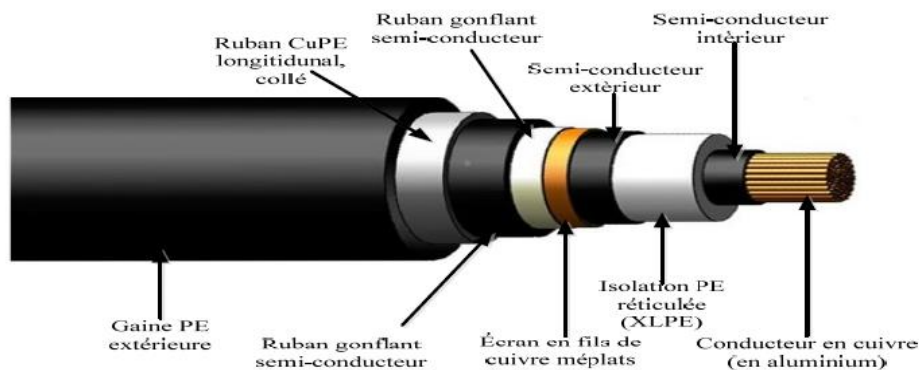


Figure1.13: Schéma d'un câble sous-marin unipolaire d'un système VSC-HVDC.

### 1.10 Domaines d'application des systèmes VSC-HVDC

Les systèmes VSC-HVDC présentent actuellement plusieurs avantages qui expliquent leur essor:

- ✓ Possibilité d'utiliser des câbles à isolation synthétique. Ces câbles ont l'avantage d'être moins couteux, moins lourds et plus respectueux de l'environnement que les câbles dont l'isolation est basés sur l'utilisation du papier imprégné ou de l'huile sous pression.
- ✓ Emprise au sol réduite comparativement à celle de la technologie HVDC conventionnelle à cause de l'absence de filtre. Par exemple les deux convertisseurs VSC-HVDC au poste de BAIXAS (liaison France Espagne) ont une emprise au sol de 225m x 170m (~3.8 ha) pour convertir 2000MW. Pour la même puissance de conversion, le poste de conversion

HVDC classique des Mandarins (liaison IFA2000 entre la France et le Royaume Uni) nécessite 360m x 280m (~10 ha) [49].

Les convertisseurs VSC offrent de nombreux avantages, à comparer à la technologie CSC, et représentent l'avenir pour la conception des systèmes HVDC, grâce à leur compacité et leur contrôlabilité dans les 4 quadrants.

Les principaux domaines d'application de la technologie VSC-HVDC sont les suivants [52]:

- ✓ La connexion de sources d'énergie renouvelables telles que les éoliennes.
- ✓ L'acheminement de l'électricité vers des îles.
- ✓ L'apport d'énergie à des grandes villes qui sont soumises à des contraintes environnementales et de sécurité.

## 1.11 Evolution des topologies des convertisseurs VSC

L'utilisation des convertisseurs en source de tension est très intéressante dans des plateformes en mer (station offshore) et ceci due au fait que les convertisseurs VSC produisent moins d'harmoniques permettant de réduire le nombre de filtres passifs nécessaires. il en résulte un gain du coût de l'installation.

Un système de transmission de type VSC-HVDC contient essentiellement deux blocs VSC situés de part et d'autre d'un câble DC, ou bien montés en tête bêche. Ces blocs sont en fait constitués de modules élémentaires assemblés selon une topologie variable.

On peut distinguer de façon générale, des topologies à 2 niveaux, 3 niveaux ou bien multi niveaux MMC (Modular Multi-level Converter).

En 2015, 25 liaisons HVDC-VSC sont en exploitation commerciale. Dans un système réel les IGBT/diodes sont assemblés en série par centaines pour former des valves à très haute tension. Les premières installations, sur une topologie à deux ou trois niveaux, suivant les constructeurs, utilisaient la technologie MLI (Modulation par Largeur d'Impulsions). La MLI

consiste à générer les signaux de commande des semi-conducteurs en comparant un signal de consigne avec un signal de type porteuse triangulaire (ou en dents de scie).

L'onde à la sortie du convertisseur est un signal fortement découpé, mais sa composante fondamentale a la même allure que le signal de référence avec la propriété de repousser les harmoniques autour de la fréquence de découpage.

Toutefois, des filtres doivent être construits pour éliminer les harmoniques. Ils prennent beaucoup de place, environ la moitié de la surface de la station, et restent coûteux.

Depuis 2007 pour SIEMENS, et 2010 pour les deux autres constructeurs, ABB et ALSTOM, une nouvelle topologie a été commercialisée, permettant de reproduire fidèlement un sinus en sortie de l'onduleur [53]. Ainsi, cette topologie, baptisée « Multi-Modular Converter » (MMC) ou encore Multi-Level Converter, apporte de nombreux avantages, tel que:

✓ la suppression des filtres harmoniques dont les gains associés sont :

- l'encombrement réduit (important pour l'offshore),
- l'économie sur le matériel,

La diminution du temps nécessaire pour la partie dimensionnement/engineering.

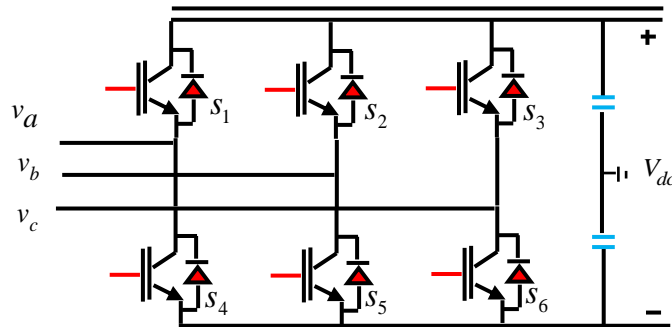
✓ La diminution des pertes de chacun des convertisseurs à un ordre de grandeur de 1% [55].

Ci-dessous la présentation des trois grandes catégories de topologie adaptée à cette transmission.

### **1.11.1 La topologie à deux niveaux**

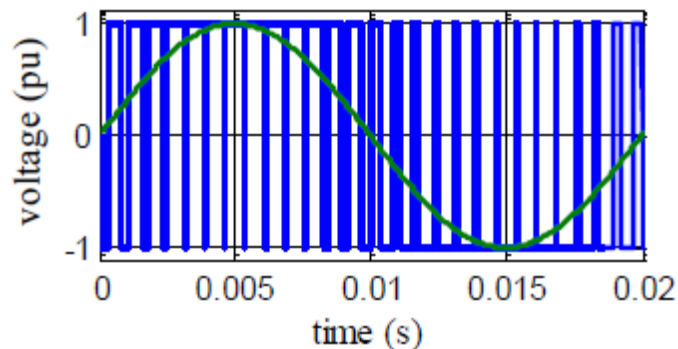
Les convertisseurs à deux niveaux sont la variante la plus simple de la technologie VSC. Ils reprennent les fondamentaux de la technologie LCC, c'est-à-dire les thyristors en les remplaçant par des IGBT, auxquels sont ajoutés des diodes antiparallèles pour la réversibilité du courant. Les interrupteurs sont contrôlés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les pertes de commutation sont réduites à un niveau plus bas.

Pour le convertisseur LCC, la bobine de lissage utilisée pour lisser le courant est remplacée par des capacités de filtrage de la tension, pour recréer une tension alternative avec seulement deux niveaux de tension. La structure de base d'un convertisseur VSC à deux niveaux trois phases est présentée à la figure 1.14.



**Figure 1.14:** Convertisseur VSC-HVDC à deux niveaux.

Quand l'interrupteur du côté supérieur du convertisseur est fermé, la ligne AC est reliée à la ligne DC positive. La tension de ligne devient alors égale à  $+V_{dc}$ . De la même manière, quand l'interrupteur du côté bas du convertisseur est fermé, la ligne AC est reliée à la ligne DC négative. La tension de ligne devient alors égale à  $-V_{dc}$ . Les deux interrupteurs (valves) d'une même phase ne doivent jamais être fermés simultanément. La figure 1.15 montre la tension de référence désirée (en vert) et la tension actuellement réalisée coté AC (en bleu).



**Figure 1.15:** Forme d'onde de la tension.

Les avantages de ce type de topologie, sont :

- ✓ Circuit simple.
- ✓ Des petits condensateurs à courant continu.
- ✓ Faible encombrement.

L'inconvénient majeur de cette topologie est la tension de blocage élevée des semi-conducteurs.

### 1.11.2 La topologie à trois niveaux

Une façon de réduire les harmoniques sans augmenter les pertes de commutation est de séparer la tension continue en plusieurs niveaux de tensions. Cette topologie, appelée NPC (Neutral Point Clamped), est constituée de deux diodes insérées dans chaque phase, ce qui permet de diviser la tension  $V_{dc}$  en deux. Cette structure multi-niveaux permet de réduire les pertes globales et les harmoniques. Toutefois, en raison de la complexité du processus de commutation, l'équilibrage des tensions des condensateurs et des limites pratiques, les installations de systèmes HVDC basées sur la topologie NPC ont été limitées à trois niveaux. La figure 1.16 montre un convertisseur VSC-HVDC à trois niveaux.

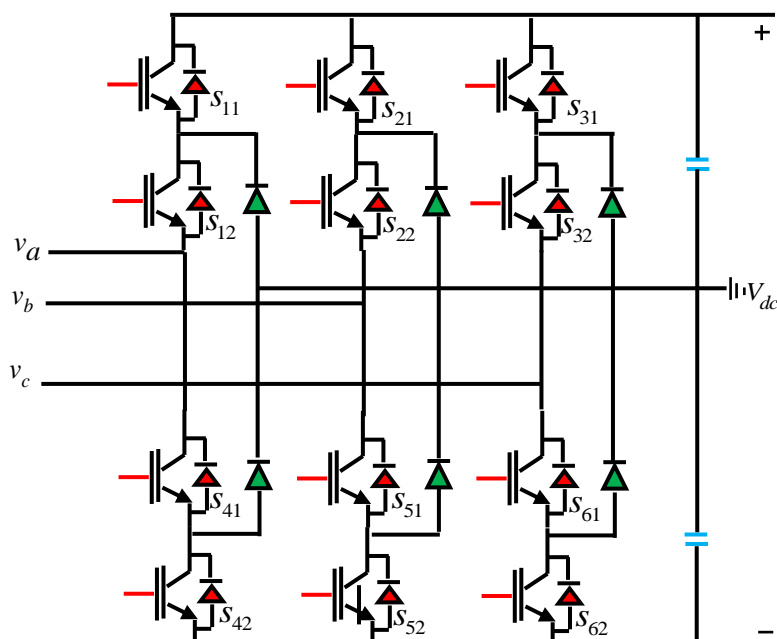
Cette topologie présente des avantages tels que:

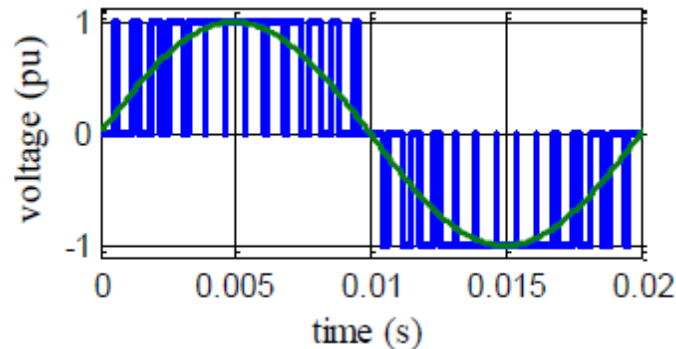
- ✓ Raisonnablement petits condensateurs à courant continu.
- ✓ Faible encombrement.
- ✓ Bonne forme d'onde CA.

Par contre, les inconvénients sont :

- ✓ La difficulté de stabiliser les tensions CC du condensateur.
- ✓ La complexité des circuits augmente en fonction du nombre de niveaux.

De même que le convertisseur a deux niveaux, la figure 1.17 présente la tension de référence désirée (en vert) et la tension actuellement réalisée coté AC (en bleu).



**Figure 1.16:** Convertisseur VSC-HVDC à trois niveaux.**Figure 1.17:**Forme d'onde de la tension.

### 1.11.3 Topologie MMC

La technologie VSC-HVDC est relativement récente. Sa structure n'a cessé d'évoluer, utilisant à ses débuts la MLI, d'abord sur une base à 2 niveaux, puis à 3 niveaux, mais avec la difficulté d'assembler des centaines de IGBT et de diodes en série pour former des valves à très haute tension et le besoin de maîtriser les pertes par commutation dissipées dans ses convertisseurs, les constructeurs ont privilégié des structures modulaires où de nombreux modules sont connectés en cascade. On parle donc de convertisseurs à multi-niveaux MMC (Modular Multilevel Converter) allant de quelques dizaines de niveaux à plusieurs centaines en fonction de la technologie et du niveau de tension.

Le convertisseur MMC triphasé est composé de trois bras, eux-mêmes composés de sous modules élémentaires constitués d'une cellule de commutation et d'un condensateur reliant chacune une ligne alternative AC à une ligne continue DC. Un grand nombre de sous-modules est connecté en série: les interrupteurs peuvent reproduire la forme de tension en escalier souhaitée, dans le cas des applications de transport de l'énergie électrique à VSC-HVDC.

Les premières installations que l'on retrouve possèdent une puissance de 400MW (exemple BorWin1 +/- 150kV), qui est le premier raccordement mondial entre un parc éolien marin et le réseau AC terrestre [22].

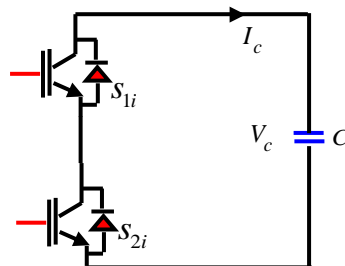
Les installations les plus récentes possèdent une puissance de 800MW, telles que BorWin2 (+/-300kV) et DolWin1 (+/-320kV). Enfin, la liaison France-Espagne, (INELFE) possède une puissance de 2x1000MW (+/- 320kV).

Les avantages principaux sont [55]:

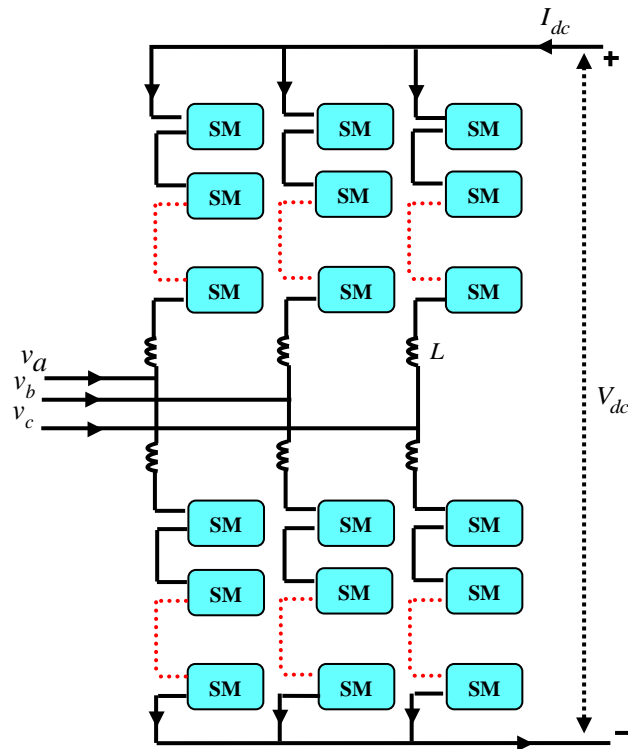
- ✓ Une fréquence de commutation et des crêtes de tension de commutation plus petites, ce qui entraîne la réduction des pertes globales.
- ✓ Les filtres côté alternatif ne sont pas nécessaires si le nombre de niveaux est suffisamment important.
- ✓ Une structure modulaire qui permet, d'une part, d'atteindre des tensions plus élevées et, d'autre part, d'améliorer la fiabilité en augmentant le nombre de sous-modules par demi-bras.

Chaque sous-module est constitué d'un convertisseur en demi-pont tel que présenté dans la figure 1.18. Il comprend principalement un condensateur et deux IGBT avec diodes antiparallèles. La commande de ces IGBT permet ainsi de connecter et de déconnecter le condensateur sur le réseau.

La figure 1.19 montre un schéma structurel du convertisseur de la topologie MMC, dont le regroupement de plusieurs sous-modules en série forme un demi-bras. Du côté alternatif, chaque phase est constituée de deux demi-bras, et des inductances sont rajoutées en série dans chaque demi-bras afin de lisser le courant et de le limiter lors de défauts [47.60].



**Figure1.18:** Schéma d'un sous module.



**Figure1.19:** Schéma d'un convertisseur MMC triphasé.

## 1.12 Conclusion

Dans ce premier chapitre, en premier lieu, on a établi un état de l'art sur l'identification des systèmes de transmission HVDC, puis les différents types de liaison utilisés pour transporter l'énergie et l'évolution historique sur le développement du transport HVDC ont été cités.

Le critère de choix de point de vue technico-économique entre la transmission à courant continu haute tension (HVDC) et celle à courant alternatif haute tension (HVAC), ainsi que leurs avantages et inconvénients ont été exhibés. Les technologies des systèmes HVDC (types des convertisseurs), les différentes configurations des liaisons HVDC ont été présentés.

En second lieu. L'analyse de la nouvelle technologie de transmission d'énergie à courant continu à haute tension à base des convertisseurs à source de tension VSC-HVDC est détaillée. Les avantages par rapport au système CSC HVDC ainsi que les éléments



élémentaires constitutifs de la liaison VSC-HVDC ont été évoqués. De plus, on a dévoilé dans ce chapitre, les domaines d'application des systèmes de transmission VSC-HVDC quelques projets réalisés sont cités.

Dans ce contexte, nous avons analysé les topologies existantes dans la littérature et les limites des technologies utilisées pour réaliser ces topologies. Par la suite, nous allons intéresser aux principes de fonctionnement et la modélisation des systèmes VSC-HVDC, qui sera l'objet principale du chapitre suivant.

## **Chapitre 2**

**Fonctionnement et modélisation des systèmes  
VSC-HVDC.**

## 2.1 Introduction

L'évolution rapide de l'électronique de puissance permet de développer le secteur de l'énergie électrique. Ce progrès considérable dans le domaine du transfert d'énergie donne beaucoup d'avantages et de possibilités pour l'industrie de l'énergie en utilisant des convertisseurs de source de tension VSC à base IGBT [1].

Grâce aux interrupteurs électroniques IGBT, la technologie utilisée dans le transport VSC-HVDC présente des avantages adéquats de point de vue technique et économique en les comparant avec celles des systèmes de transmission CSC-HVDC. L'écoulement des puissances actives et réactives peut être contrôlé de manière souple et autonome et la tension des lignes de transmission du bus DC est alors maintenue constante par le contrôle appliqué aux stations VSC-HVDC [2].

En outre, avec la venue de cette nouvelle technologie les sources d'énergie renouvelables ont trouvé un passage facile pour s'intégrer avec les sources d'énergie conventionnelles.

Notre but dans ce chapitre est de concevoir, modéliser et simuler un système VSC-HVDC à base d'IGBT à trois niveaux à point neutre calé (NPC).

La structure NPC trois niveaux est très utilisée à cause de sa simplicité et l'efficacité de la conversion. Cette topologie permet de générer une tension de bonne qualité et de réduire les besoins de filtrage. En effet, l'augmentation du nombre de pulses permet d'améliorer les taux de distorsion de la tension et du courant, ainsi que diminuer les pertes, de sorte que les pulses de la topologie de trois niveaux seront supérieures à celles à deux niveaux [3].

Pour favoriser ce système, nous avons adapté un schéma de principe d'un système VSC-HVDC et une nouvelle commande basée sur le contrôle de la puissance générée et sur la régulation de la tension continue. Cette commande est validée en utilisant la technique de modélisation de la largeur d'impulsion.

Avant de commencer la modélisation des différents éléments qui contribuent au transfert de la puissance active d'un système VSC-HVDC à trois niveaux à point neutres calés, il est

essentiel d'avoir une vision claire sur la plage de fonctionnement des ces systèmes et leurs principes.

## 2.2 Principe de fonctionnement et configuration d'un système VSC-HVDC

Le principe de fonctionnement peut être résumé comme suit:

Le système VSC-HVDC est composé de deux convertisseurs de type VSC à base de semi-conducteurs (IGBT), l'un fonctionne en redresseur injectant de la puissance active dans le système DC. L'autre fonctionne en onduleur en extrayant de la puissance active à partir de la liaison HVDC et en l'injectant dans le réseau AC. Ces rôles peuvent être inversés en changeant la direction du courant.

Les deux convertisseurs sont reliés par un bus à courant continu. La figure 2.1 montre la puissance continue transitée par l'intermédiaire d'un câble de transmission.

Le VSC peut fonctionner de façon capacitive ou inductive dans les deux modes: onduleur ou redresseur. Les systèmes VSC-HVDC peuvent augmenter la stabilité de la transmission, réduire les pertes de réseau et empêcher la propagation des défauts.

L'avantage majeur de la transmission VSC est sa capacité à contrôler indépendamment la puissance réactive dans les deux terminaux.

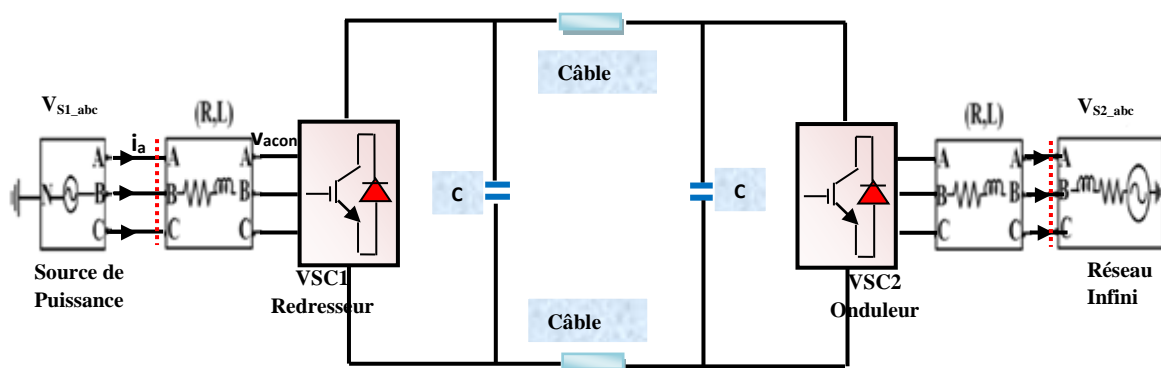


Figure 2.1:Schéma d'un système VSC-HVDC.

La direction du flux de puissance est déterminée par la direction du courant continu. Dans la figure 2.1 le courant et le flux de puissance circulent de la station VSC1 (terminal émetteur ou redresseur) vers la station VSC2 (terminal récepteur ou onduleur).

### 2.2.1 Fonctionnement de base d'un VSC

On considère le circuit simple à deux bus comme montre la figure 2.2. Les puissances actives et réactives sont déterminées par l'inductance équivalente  $X$  entre la source et le convertisseur ainsi que par l'amplitude et l'angle entre les deux vecteurs de tension.

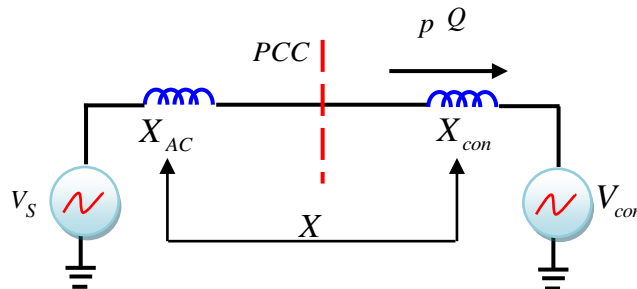


Figure 2.2: Schéma de principe d'un VSC.

À partir de la source vers le convertisseur, les puissances actives et réactives transférées sont données par les relations suivantes:

$$P = \frac{V_s V_{con}}{X} \sin(\delta) \quad (2.1)$$

L'équation (2.1) décrit la puissance active échangée entre le convertisseur VSC et le réseau AC.

Où  $V_s$  est la tension de la source du système AC,  $V_{con}$  est la tension aux bornes du convertisseur VSC,  $X$  est la réactance reliant le système AC au VSC et  $\delta$  indique l'angle de tension entre le système AC et le VSC.

La puissance réactive échangée entre le convertisseur VSC et le réseau AC est décrite par l'équation :

$$Q = \frac{V_s V_{con} \cos(\delta) - V_{con}^2}{X} \quad (2.2)$$

À partir de ces équations on peut voir qu'à travers le contrôle de l'angle de déphasage et l'amplitude de la tension du convertisseur, il est possible de réguler la puissance active et réactive respectivement, à un point de fonctionnement désiré.

Toute différence d'amplitude entre les tensions du réseau et du convertisseur se traduit par un échange avec le réseau de puissance réactive. Toute différence de phase entre les tensions du réseau et du convertisseur se traduit par un échange de puissance active avec le réseau.

Les puissances active et réactive sont alors contrôlées dans les quatre quadrants. En effet, pour une différence d'angle de tension nulle, la puissance active est égale à zéro et la puissance réactive est déterminée par la différence des magnitudes de tension.

Pour des amplitudes égales de tension, la puissance réactive est égale à zéro et la puissance active est déterminée par l'angle de tension entre les deux vecteurs.

### 2.2.2 Fonctionnement en quatre quadrants

La technologie VSC a la possibilité de commander le blocage des interrupteurs électroniques. Cet avantage a permis de développer des systèmes de conversion AC/DC autonomes. Par conséquent, ceci permet d'explorer le fonctionnement dans les quatre quadrants du plan P-Q, qui rend possible le contrôle des flux de puissances réactives et actives [5].

Dans un fonctionnement normal, l'amplitude de la tension DC reste presque constante. Ainsi, la puissance active est liée à la différence entre les angles de phase des tensions  $V_s$  et  $V_{con}$ . Le principe de contrôle du flux de la puissance active à travers l'inductance est contrôlé via l'angle de phase de la tension de sortie du convertisseur.

Si la tension  $V_{con}$  est en avance de phase par rapport à la tension  $V_s$  ( $V_{con} - V_s > 0$ ), alors le VSC va injecter de la puissance active dans le réseau AC (fonctionnement en onduleur).

Si la tension  $V_{con}$  est en retard de phase par rapport à la tension  $V_s$  ( $V_{con} - V_s < 0$ ), alors le VSC va extraire de la puissance active à partir du réseau AC et l'injecter dans le lien HVDC (fonctionnement en redresseur).

Dans un fonctionnement normal, la différence entre les angles de phases des tensions en deux nœuds d'un réseau AC est très petite. Ainsi, la puissance réactive dépend principalement de la différence entre les amplitudes des tensions  $V_{con}$  et  $V_s$ . Le principe de contrôle du flux

de la puissance réactive à travers l'inductance est contrôlé en agissant sur l'amplitude de la tension de sortie du convertisseur  $V_{con}$ .

Si l'amplitude de la tension  $V_{con}$  est plus grande que celle de la tension  $V_s$ , alors le convertisseur VSC va injecter de la puissance réactive dans le système AC (le VSC fonctionne en mode capacitif).

Inversement, si l'amplitude de la tension  $V_{con}$  est inférieure à celle de la tension  $V_s$ , alors le VSC va absorber de la puissance réactive à partir du réseau AC (le VSC fonctionne en mode inductif). Par conséquent, un système VSC peut fonctionner dans les quatre quadrants du plan P-Q comme illustré dans la figure 2.3. Le diagramme explique la capacité du VSC à fonctionner dans les quatre quadrants du cercle P-Q et à réaliser le contrôle indépendant de la puissance active et réactive.

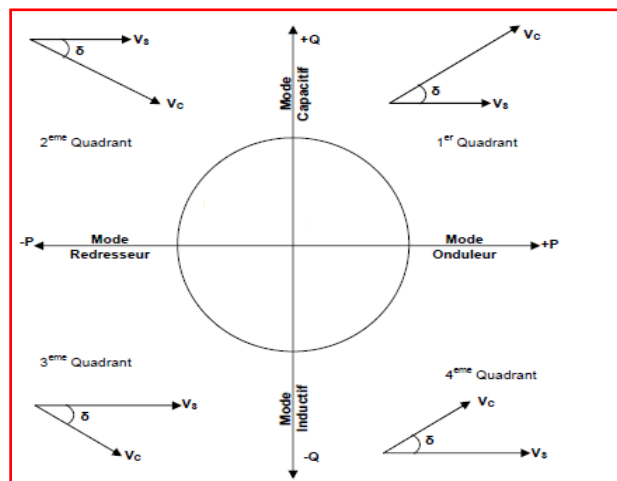


Figure2.3: Mode de fonctionnement en 4 quadrants d'un VSC

### 2.2.3 Technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les convertisseurs VSC sont du type quatre quadrants. De plus, ils opèrent à n'importe quel facteur de puissance et on associe des commandes conçues à partir de la modulation de la largeur d'impulsion (MLI) ou PWM (Pulse Width Modulation).

La technique de commande par modulation de largeur d'impulsion appliquée au contrôle des convertisseurs VSC consiste à engendrer des signaux d'amorçage des semi-conducteurs en comparant un signal de consigne ou de référence avec un signal de type porteuse triangulaire ou en dent de scie [7], comme le montre la figure 2.4.

L'onde à la sortie du convertisseur est un signal fortement découpé, mais sa composante fondamentale a la même allure que le signal de référence.

Ce procédé de modulation est utilisé pour l'élimination d'harmoniques et de réduire les pertes de conversion. Quand le courant est élevé, le convertisseur permet de réduire la commutation des interrupteurs.

Avec l'augmentation de la fréquence, les harmoniques sont devenues plus atténuées, mais l'efficacité du convertisseur diminue également, et on observe une augmentation des pertes et des problèmes de conception du dissipateur de chaleur. Par conséquent, le choix de la fréquence est l'une des décisions les plus importantes à faire dans la technologie VSC-HVDC [23].

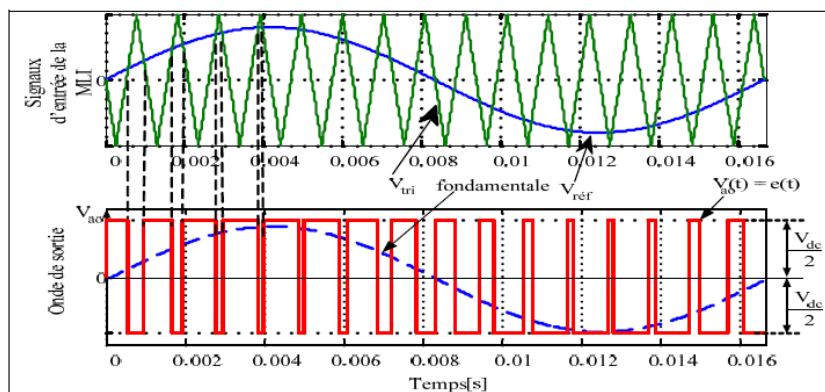
Deux paramètres caractérisent cette commande :

1 L'indice de modulation ( $m$ ) qui définit le rapport entre la fréquence du signal porteur ( $f_p$ ) et la fréquence du signal de référence ( $f_{ref}$ ).

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \tag{2.3}$$

2 Le taux de modulation ( $r$ ) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante ( $v_{ref}$ ) et la valeur crête du signal porteur ( $v_p$ ).

$$r = \frac{v_{ref}}{v_p} \tag{2.4}$$



**Figure 2.4:** Exemple technique de la Modulation de Largeur d'impulsion (MLI) [33].



## 2.3 Modélisation d'un système VSC-HVDC

Pour l'atteindre notre objectif, une méthodologie qui définit les étapes à entreprendre a été adoptée. Pour cela, nous modéliserons en premier lieu les différents éléments du système VSC-HVDC comprenant le convertisseur à trois niveaux à point neutre calé (modélisation du redresseur et de l'onduleur), la modélisation du circuit DC (les deux câbles et les condensateurs) et la modélisation du filtre. Des commandes ont été élaborées pour le contrôle de ces différents éléments.

Plusieurs travaux de recherche récents [39] ont été réalisés dans le domaine de transmission par la liaison HVDC. Dans ces travaux, le développement des nouvelles topologies, des nouvelles techniques de commande et de contrôle ont été l'objectif principal des chercheurs. Ces développements ont ciblé l'amélioration de la stabilité, la minimisation des pertes, la minimisation de l'impact des défauts AC et DC et l'augmentation du rendement du système global.

Dans notre travail, la stratégie de contrôle basée sur le mécanisme de contrôle vectoriel du courant direct pour le système VSC-HVDC est implantée.

Cette stratégie de contrôle permet d'éviter le problème de saturation de la tension de commande à l'entrée du MLI, d'assurer un contrôle plus stable et rapide de la tension du bus DC et permet un contrôle plus vigoureux de la puissance active et de la puissance réactive.

Les principaux inconvénients de cette commande se trouvent à la limite de saturation, à savoir que la tension du bus DC et la puissance de sortie ne sont pas correctement contrôlées. Une situation qui nous motive à proposer une autre stratégie de commande basée sur la logique floue qui sera l'objet du chapitre 3.

### 2.3.1 Modélisation d'un système VSC-HVDC à trois niveaux

Différentes méthodes permettent de modéliser les convertisseurs. Le choix de la méthode la plus adéquate contribuera à implanter la loi de commande désirée au sein du convertisseur statique sur lequel porte l'étude [13]. En effet, le modèle développé doit décrire le plus

fidèlement possible le comportement du convertisseur pour obtenir par le biais d'une commande adéquate, les meilleures performances possibles.

Le choix du convertisseur tri-phasé à trois niveaux à point neutre calé (PNC) en anglais (Neutral-PointClamped ou NPC) a été pondéré, puisqu'il accorde une meilleure utilisation dans le transport d'énergie. Ce choix nécessite une stratégie de contrôle assez avancée du convertisseur à trois niveaux basée sur un système de transmission VSC-HVDC.

Le convertisseur à trois niveaux à point neutre calé (comme montre la figure 2.8), est largement utilisé dans la transmission de grande puissance. Il permet de générer une tension de trois niveaux qui nécessite une bonne répartition des tensions entre les condensateurs.

La répartition de la tension sur les interrupteurs à l'état bloqué est assurée par les diodes connectées au point milieu. Un convertisseur est dit à trois niveaux lorsqu'il génère trois niveaux de tension qui sont:  $(+\frac{V_{dc}}{2}, 0, -\frac{V_{dc}}{2})$ .

Ce convertisseur présente deux avantages. D'une part, il permet de limiter les contraintes en tension: chaque interrupteur à l'état bloqué supporte une fraction plus faible de la pleine tension du bus continu.

D'autre part, la tension de sortie du convertisseur à trois niveaux présente une meilleure qualité [41].

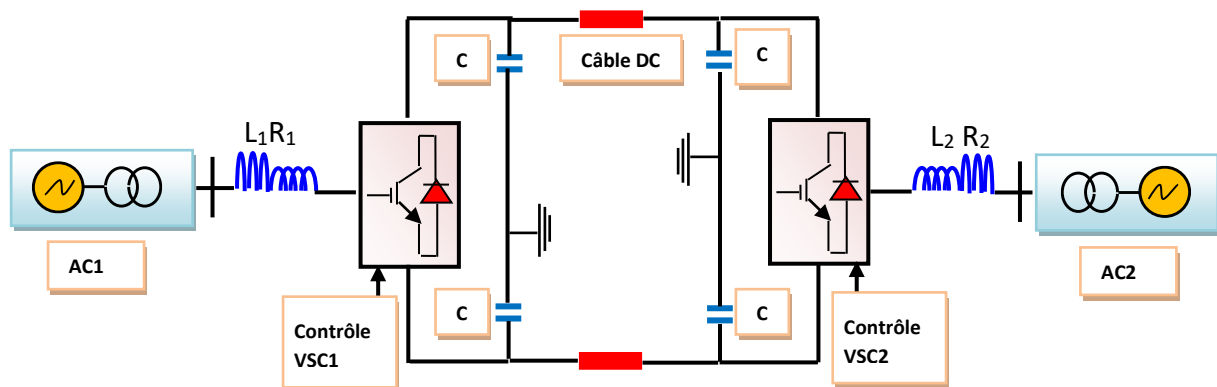
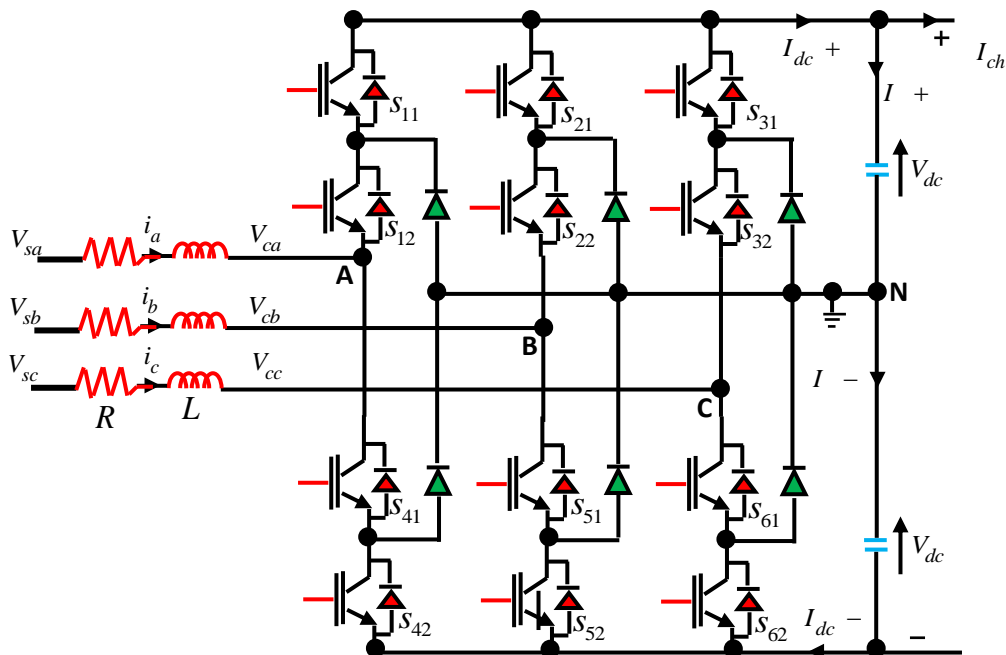


Figure2.5: Système VSC-HVDC à trois niveaux.

### 2.3.2 La topologie et principe de fonctionnement du convertisseur

Pour les applications nécessitant une puissance importante comme dans notre cas, la topologie la plus utilisée est le convertisseur à trois niveaux à point neutre calé par des diodes.

Cette structure a  $(n-1)$  condensateurs sur le bus à courant continu (DC) et produit  $n$  niveaux de tension continue comme présentée dans la figure 2.6.



**Figure 2.6:** Redresseur triphasé trois niveaux à point neutre calé des diodes.

Son principal avantage est la mise en série de ses interrupteurs de puissance qui permet de réduire considérablement la tension à leurs bornes. Aussi, une faible tension de blocage entraîne l'utilisation de semi-conducteurs avec de meilleures performances due à la faible résistance à l'état passant et à une grande vitesse de commutation. En outre, en produisant des tensions de ligne à trois niveaux, ce redresseur réduit le contenu harmonique du courant de ligne et réduit également la taille des composantes réactives.

Cette topologie permet aussi de garder la tension de sortie régulée même si on actionne des charges déséquilibrées. Elle peut donc minimiser les fluctuations de tension du bus continu.

Néanmoins, en raison de la charge et la décharge irrégulières des condensateurs de sortie, une commande additionnelle s'impose en réduisant au minimum les fluctuations du potentiel

du point neutre et équilibrant les tensions  $+V_{dc}$  et  $-V_{dc}$ . Ainsi, la tension appliquée aux bornes des interrupteurs ne dépasse en aucun cas la limite imposée par le fabricant.

Il est important de noter le rôle du point neutre (O) dans cette structure. Son principe consiste à connecter ce point neutre de la source triphasée au point milieu capacitif du bus DC. Si les tensions ( $+V_{dc}$  et  $-V_{dc}$ ) ne sont pas identiques, il y aura un courant homopolaire de valeur moyenne non-nulle qui circule dans la branche du neutre. Indépendamment de son signe, ce courant contribuera à la charge et à la décharge des condensateurs de sortie pour permettre l'équilibrage, en tout temps, des deux niveaux de tension.

### 2.3.3 Séquences de fonctionnement du convertisseur

Pour analyser les différentes séquences de fonctionnement du convertisseur en régime permanent, nous considérons le schéma équivalent simplifié du redresseur à trois niveaux, comme montre la figure 2.7.

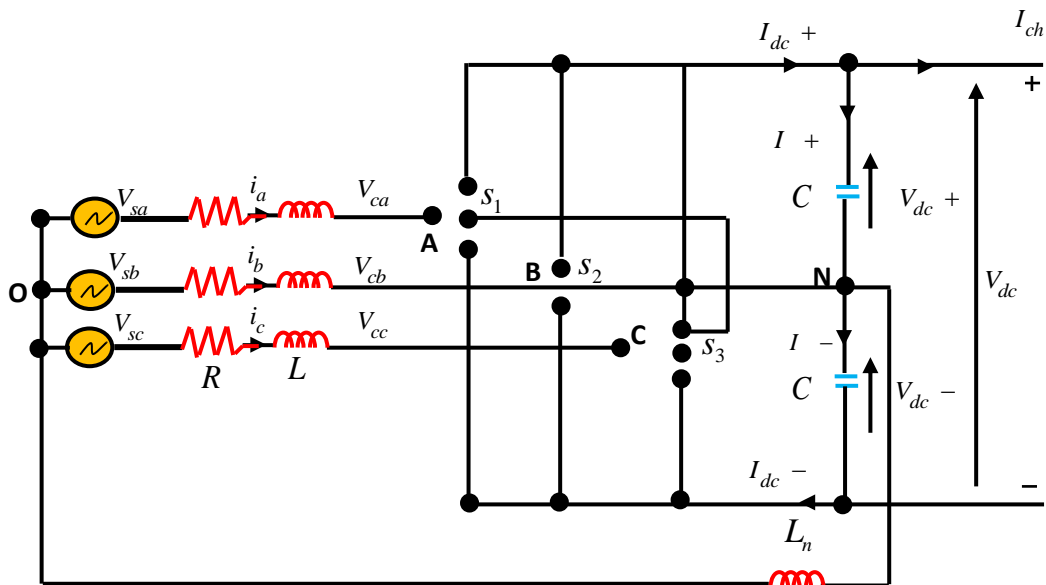


Figure 2.7 Schéma équivalent simplifié du redresseur triphasé trois niveaux.

L'analyse des différentes séquences de fonctionnement est comme suit:

On note (Si) pour la représentation groupe d'interrupteurs du bras (i). A titre d'exemple S1 est la représentation du bras 1. S1 peut avoir trois états qui sont:

- 1: D11 et D12 sont passants si  $i_1 > 0$  ou T11 et T12 sont passants si  $i_1 < 0$
- 0: D2 et T13 sont passants si  $i_1 > 0$  ou D1 et T12 sont passants si  $i_1 < 0$
- 1: T13 et T14 sont passants si  $i_1 > 0$  ou D13 et D14 sont passants si  $i_1 < 0$

Dans notre cas (convertisseur trois niveaux),  $V_{dc}$  est la tension de sortie et les tensions  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  et  $V_{CN}$  commutent entre  $\frac{+V_{dc}}{2}$ , 0 et  $\frac{-V_{dc}}{2}$ . Cela signifie que:

- ✓ Les phases A et/ou B et /ou C sont connectées à  $\frac{+V_{dc}}{2}$  si  $S_1 = 1$
- ✓ les phases A et/ou B et /ou C sont connectées à 0 si  $S_1 = 0$
- ✓ les phases A et/ou B et /ou C sont connectées à  $\frac{-V_{dc}}{2}$  si  $S_1 = -1$ .

### 2.3.4 Modélisation du redresseur

Nous développons dans ce paragraphe la modélisation du convertisseur de la figure 2.6 sur lequel est basée notre étude. Dans la première étape, on modélise le convertisseur dans le repère (abc) puis nous appliquons sur ce modèle la transformation (abc/dq). Le passage entre ces deux repères permet non seulement la simplification du circuit de commande, mais également la réduction des équations d'état de notre système.

Pour bien modéliser le convertisseur, nous avons supposé que la source de puissance est définie comme un bus infini qui est caractérisé par une source de tension triphasée et équilibrée  $v_s$ , des résistances de ligne  $R$  et des inductances de ligne  $L$ .

L'application des lois de Kirchhoff en tension (figure 2.6), nous permet d'écrire le système par les équations de tension suivantes:

$$\begin{cases} v_{sa} = V_{AO} + Ri_a + L \frac{di_a}{dt} \\ v_{sb} = V_{BO} + Ri_b + L \frac{di_b}{dt} \\ v_{sc} = V_{CO} + Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \end{cases} \quad (2.5)$$

Où:  $R$  et  $L$  sont les résistances et les inductances d'entrée du convertisseur. ( $v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$ ) et ( $i_a, i_b, i_c$ ) sortant du bus infini sont respectivement les tensions et les courants de réseau.

Aussi l'application de la loi de Kirchhoff en tension permet d'établir le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} V_{AO} = V_{AN} - V_{ON} \\ V_{BO} = V_{BN} - V_{ON} \\ V_{CO} = V_{CN} - V_{ON} \end{cases} \quad (2.6)$$

Considérant que le système triphasé est équilibré nous pouvons écrire que :

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} = V_{ON} \quad (2.7)$$

La sommation des équations (2.6) et (2.7), nous permet de déduire l'équation (2.8):

$$V_{ON} = \frac{1}{4}(V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}) \quad (2.8)$$

En remplaçant (2.8) dans (2.6), nous pouvons en conclure le système d'équations (2.9) :

$$\begin{cases} V_{AO} = V_{AN} - \frac{1}{4}(V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}) \\ V_{BO} = V_{BN} - \frac{1}{4}(V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}) \\ V_{CO} = V_{CN} - \frac{1}{4}(V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}) \end{cases} \quad (2.9)$$

Soit  $f_i$  la fonction de commutation des interrupteurs où  $i = (1, \dots, 3)$ . Cette fonction peut prendre les valeurs suivantes:  $(\frac{1}{2}, 0, -\frac{1}{2})$ .

La reformulation de l'équation (2.9), donne le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{AO} = V_{dc} (f_1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 f_i) \\ V_{BO} = V_{dc} (f_2 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 f_i) \\ V_{CO} = V_{dc} (f_3 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 f_i) \end{cases} \quad (2.10)$$

En remplaçant (2.10) dans (2.5), nous obtenons le système d'équations (2.11) qui régit notre convertisseur dans le repère (abc) :

$$\begin{cases} v_{sa} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{dc} (f_1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 f_i) \\ v_{sb} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + V_{dc} (f_2 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 f_i) \\ v_{sc} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + V_{dc} (f_3 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 f_i) \end{cases} \quad (2.11)$$

Il est nécessaire d'imposer les tensions de phase  $(V_{AO}, V_{BO}, V_{CO})$  quasi-sinusoïdales et en phase avec leurs courants respectifs  $(i_1, i_2, i_3)$ . Pour ce faire, la technique de commande utilisée

doit imposer la référence de la tension à l'entrée du redresseur par rapport au point neutre de la source. Ce qui se traduit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{AO} = v_{ca} \\ V_{BO} = v_{cb} \\ V_{CO} = v_{cc} \end{cases} \quad (2.12)$$

Où:  $v_{ca}$ ,  $v_{cb}$  et  $v_{cc}$  sont les tensions de ligne.

Ceci nous permet d'aboutir au système d'équation (2.13).

$$\begin{cases} v_{sa} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + v_{ca} \\ v_{sb} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + v_{cb} \\ v_{sc} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + v_{cc} \end{cases} \quad (2.13)$$

Les séquences de fonctionnement des groupes d'interrupteurs ( $S_i$ ) pour chaque bras  $i$  du convertisseur (figure 2.7) et en prenant comme base la figure 2.6, on obtient le système d'équations suivantes:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = -Ri_a - S_{a+}v - S_{a-} - v_{sa} \\ L \frac{di_b}{dt} = -Ri_b - S_{b+}v - S_{b-} - v_{sb} \\ L \frac{di_c}{dt} = -Ri_c - S_{c+} - S_{c-} - v_{sc} \end{cases} \quad (2.14)$$

Il est important de noter que ce sont les mêmes équations qui régissent le redresseur triphasé à deux niveaux.

L'unique différence réside dans la fonction de commutation  $S_i$  qui a trois états (1, 2, 3) et qui ne possède que deux états (0, 1) dans le cas du convertisseur deux niveaux à six interrupteurs actifs.

En outre, les équations au côté DC du redresseur sont exprimées par le système:

$$\begin{cases} C \frac{dv_{dc1}}{dt} = -i_{dc+} + S_{a+}i_a + S_{b+}i_b + S_{c+}i_c \\ C \frac{dv_{dc2}}{dt} = -i_{dc-} + S_{a-}i_a + S_{b-}i_b + S_{c-}i_c \end{cases} \quad (2.15)$$

### 2.3.5 Modélisation du circuit DC

Le circuit DC du système VSC-HVDC est composé de condensateurs de puissance et un câble à courant continu [21], comme montre la figure 2.8. Cette figure représente les deux côtés continus des stations VSC-HVDC et les deux câbles.

En appliquant les lois de Kirchhoff en courant, nous aboutissons au modèle mathématique du circuit défini par les équations suivantes:

$$\begin{cases} C \frac{dv_{dc1}}{dt} = -i_{dc1} - i_{dc} \\ C \frac{dv_{dc2}}{dt} = -i_{dc2} - i_{dc} \end{cases} \quad (2.16)$$

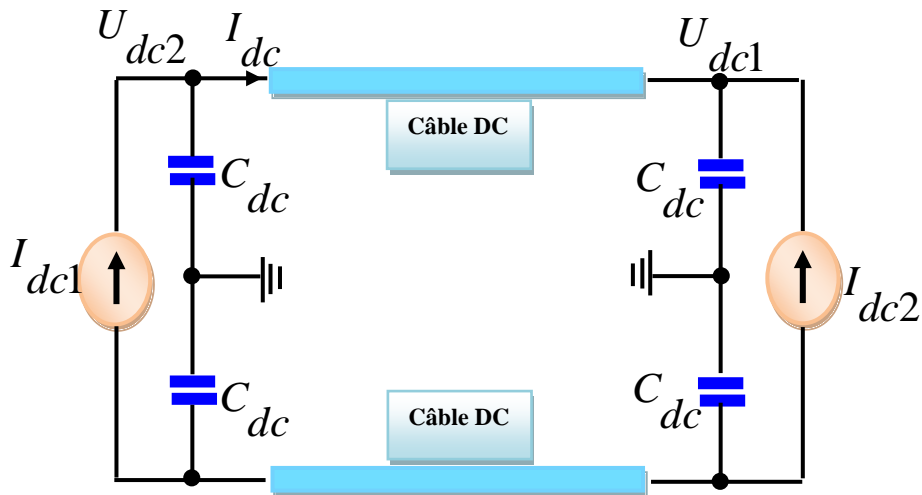


Figure 2.8: Schéma modèle de circuit DC du VSC-HVDC.

### 2.3.6 Modélisation du filtre

Différents filtres sont utilisés pour chaque type de liaison HDVC. Les filtres permettent de préserver la qualité de la tension en minimisant l'impact des harmoniques produits par le convertisseur. Ils peuvent également jouer un rôle de compensation en puissance réactive. Les structures utilisées sont différentes suivant le type de convertisseur.

Les VSC utilisent des convertisseurs contrôlés via (MLI). Ce type de convertisseur produit des harmoniques côté AC. Ces harmoniques sont moins importants que ceux produits par les



systèmes de transmission (CSC), mais doivent quand même être filtrés pour supprimer les ondulations de fréquences de commutation.

Dans notre cas, on utilise un filtre de troisième ordre comme pour la modélisation du filtre actif triphasé utilisé dans le schéma électrique de la figure 2.9.

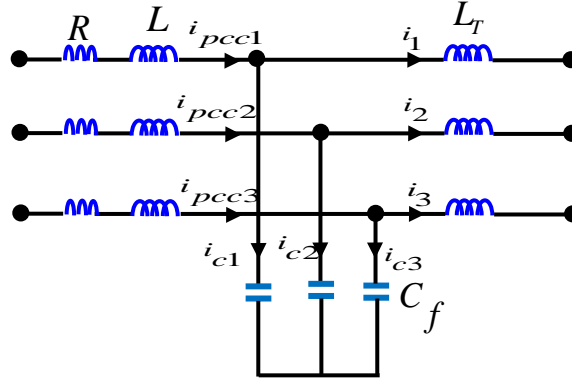


Figure2.9:Schéma diagramme de filtre.

Supposons que la résistance  $R$  est négligeable. Si  $i_K$  ( $K=1,..3$ ) est le courant traversant le filtre alors le modèle mathématique de filtre triphasé est modélisé à l'aide des équations suivantes:

$$i_{cK} = C_f \frac{dv_k}{dt} \quad (2.17)$$

$$i_{cK} = i_{pccK} - i_k \quad (2.18)$$

Où :

$C_f$  : La capacité de filtre.      $R$  : La résistance de ligne.      $L$  : L'inductance de ligne.

$v_K$  : Tension de phase.      $i_K$  : Courant traversant le filtre.      $i_{cK}$  : Le courant du condensateur.  
 $i_{pccK}$  : Le courant de phase à PCC (Point of Common Coupling).

En appliquant la transformation de Park (dq0) on trouve les équations:

$$i_{cdq} = C_f \frac{dv_{dq}}{dt} \quad (2.19)$$

Et

$$i_{cdq} = i_{pccdq} - i_{dq} \quad (2.20)$$

Dans le repère (dq0), on peut trouver les équations suivantes:

$$\begin{cases} C_f \frac{dv_d}{dt} = i_{cd} + \omega C_f v_q \\ C_f \frac{dv_q}{dt} = i_{cq} + \omega C_f v_d \end{cases} \quad (2.21)$$

Et

$$\begin{cases} i_{cd} = i_{pccd} - i_d \\ i_{cq} = i_{pccq} - i_q \end{cases} \quad (2.22)$$

Représentant la fonction de transfert du filtre par l'équation suivante :

$$T = \frac{1}{L} \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^3 + \omega_R s^2} \quad (2.23)$$

Où:  $\omega_R$  et  $\omega_0$  sont respectivement la fréquence de résonance et la fréquence antirésonance.

$$\text{Tel que : } \omega_R = \sqrt{\frac{L + L_T}{LL_T C_f}} \quad (2.24)$$

Nous obtenons le modèle mathématique de l'état final des différents éléments qui contribuent au transfert de la puissance active par l'intermédiaire de systèmes VSC-HVDC, indiqué dans le système d'équations dans les sections précédentes. Comme notre modèle est complété, nous pouvons à présent procéder à l'implantation des lois de commande désirées.

## 2.4 Contrôle d'un système VSC-HVDC

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés dans le domaine de transmission VSC-HVDC. Les nouvelles techniques de commande et de contrôle ont été l'objectif principal des chercheurs. Ces recherches ont ciblé l'amélioration de la stabilité, la minimisation des pertes et l'augmentation du rendement du système global.

D'après la littérature [24], la commande d'un convertisseur VSC peut se faire selon deux approches :

La commande directe et la commande vectorielle. La commande directe régule les flux de puissance à travers le convertisseur en agissant directement sur l'amplitude et la phase de la tension de sortie du VSC.

La commande vectorielle principalement utilisée dans la commande des convertisseurs électromécaniques a montré sa performance en termes de vitesse de réponse et de stabilité pendant le changement de consigne et pendant les défauts par rapport à la commande directe.

En conséquence, la commande vectorielle est largement adoptée dans les systèmes VSC-HVDC pour contrôler de façon indépendante et bidirectionnelle la puissance active et réactive [26].

Dans la commande vectorielle, les tensions et courants triphasés AC sont transformés du repère (abc) en repère (dq0), via la transformée de Park. Cette commande utilise deux étages de régulation.

Dans notre cas, la liaison est contrôlée par les deux convertisseurs aux extrémités du bus DC. L'un des deux se charge de contrôler la tension du bus DC, tandis que l'autre se charge de contrôler le flux de la puissance active.

La tension doit toujours être maintenue à une valeur de référence, et sa polarité ne peut en aucun cas s'inverser [27]. On inverse le flux de puissance en changeant le sens du courant DC. Parallèlement à cette commande de tension DC et le flux de la puissance active, chaque poste peut aussi être commandé pour débiter une certaine puissance réactive ou sortir une certaine tension AC, en fonction des besoins.

En effet, il est important de souligner que le contrôle des VSC-HVDC est un contrôle en cascade. Il consiste en une boucle de contrôle interne (rapide) commandée par une boucle de contrôle externe (plus lente). La structure de contrôle d'une liaison HVDC-VSC, est présentée par la figure 2.10. Dans cette figure, les valeurs de référence de la puissance réactive et de la tension AC et celles de la puissance active et de la tension DC sont renseignées à la boucle de contrôle externe. Ce contrôle génère la référence pour le courant exprimé dans un système (dq0).

Le contrôle interne se charge ensuite de générer le signal de référence pour la tension. Cette référence est fournie dans le repère (dq0). Il faut la traduire dans le repère (abc) pour la renseigner à la (PWM) qui se charge ensuite de contrôler les IGBT.

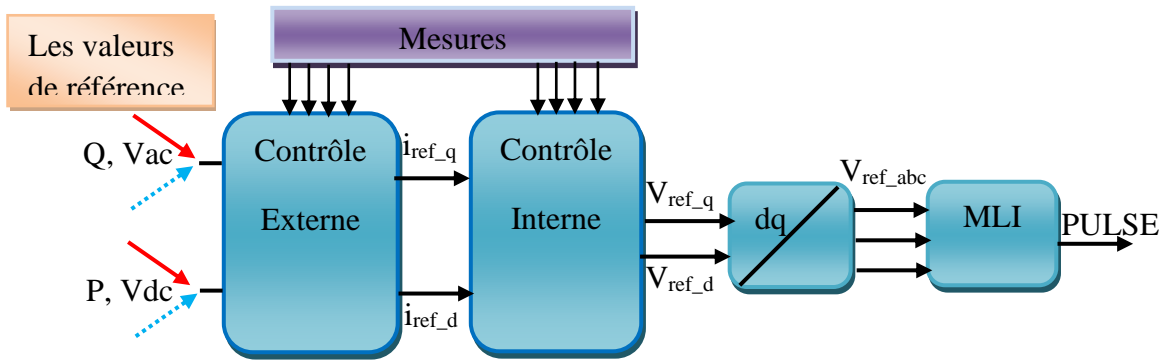


Figure 2.10: Structure de control d'un système VSC-HVDC.

### 2.4.1 Conception du régulateur de courant

Le contrôleur de courant interne est utilisé selon les références synchrones (dq0), vu que leurs structures sont associées aux régulateurs PI. Ainsi, l'amélioration de performance de ces régulateurs est basée sur le modèle de couplage croisé. La structure du régulateur de courant interne est inspirée du modèle présenté dans la figure 2.11 [28].

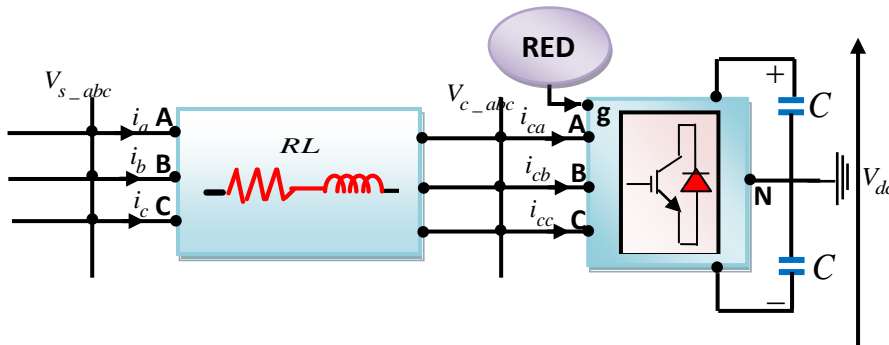


Figure 2.11: Bloc diagramme du convertisseur.

Sous forme matricielle l'équation du système s'écrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Nous appliquons la transformation de Park pour le passage du repère (abc) au repère (dq0) dans le système d'équations (2.2.5). Les détails de cette transformation (conservant l'amplitude) sont développés en Annexe A1.

En utilisant la matrice P de transformation donnée par l'équation (2.26).

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Où :  $\theta = \omega t$ , désigne l'angle entre l'axe d et l'axe magnétique de la phase a.

La matrice inverse de (P) est:

$$P^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

On en conclut l'équation dans le repère (dq0):

$$\frac{di_{dq0}}{dt} = -\frac{R}{L} i_{dq0} + \frac{1}{L} (v_{sdq0} - v_{cdq0}) - P \frac{dP^{-1}}{dt} I_{dq0} \quad (2.28)$$

Le système triphasé est un système symétrique équilibré. D'où on trouve l'équation suivante:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{cd} \\ v_{cq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Où:  $(i_{cd}, i_{cq})$  sont courants de ligne,  $(v_{sd}, v_{sq})$  et  $(v_{cd}, v_{cq})$  sont respectivement les tensions de source et les tensions cotées convertisseur.

Les équations de contrôle découplé s'écrit comme suit:

$$\begin{cases} v_{cd\_ref} = v_{sd} + \omega L i_{cq} - v_{cd} \\ v_{cq\_ref} = v_{sq} - \omega L i_{cd} - v_{cq} \end{cases} \quad (2.30)$$

À partir des deux équations de contrôle, on peut réaliser la commande de découplage. Le schéma bloc du contrôleur de découplage du système VSC-HVDC est illustré dans la figure 2.12.

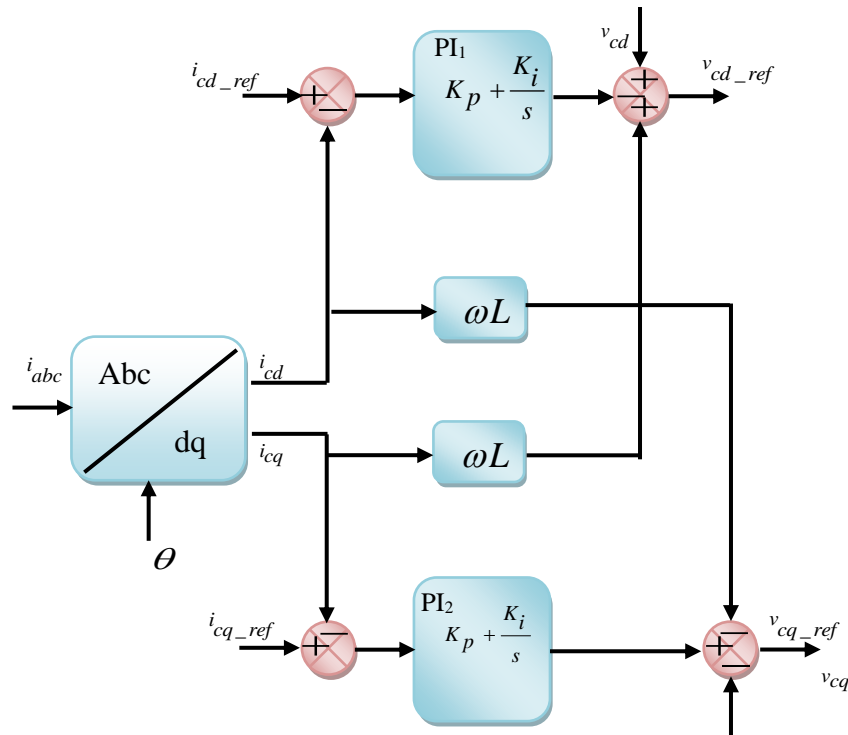


Figure 2.12: Structure de Contrôle interne d'une station VSC (Régulateur de courant suivant le plan dq0).

### 2.4.2 Contrôle de la tension DC

Notre but de la régulation de la tension DC est de maintenir la tension continue  $V_{dc}$  constante, de la réguler selon sa référence  $V_{dc\_ref}$  et de fournir à sa sortie la référence du courant directe dans le plan (dq0)  $i_{cd\_ref}$ . Ensuite, le MLI crée des harmoniques dans le courant circulant dans le système de transmission continu. Ce courant génère l'ondulation de la tension continue dont l'amplitude dépend de la taille du condensateur à courant continu.

Si on prend comme hypothèse que les pertes internes de puissance de l'onduleur sont très faibles, l'écoulement de la puissance sera du côté continu de l'onduleur vers le côté alternatif. Nous aurons la relation suivante:

$$P_{dc} = P_{ac} \tag{2.31}$$

La référence du système (dq0) est choisie de manière à ce que son axe d soit en phase avec la tension  $v_{dc}$ . On a donc  $v_{cq} = 0$ .

La relation (2.31) des puissances peut s'exprimer dans le repère (dq0) comme suit:

$$\begin{cases} P_{dc} = v_{dc} I_{dc} + C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} v_{dc} \\ P_{ac} = \frac{3}{2} [v_{cd} i_{cd} + v_{cq} i_{cq}] \end{cases} \quad (2.32)$$

Avec :

$$v_{cd\_ref} = v_{sd} - \omega L i_{cd} + C(s)(i_{cd\_ref} - i_{cd}) \quad (2.33)$$

À partir de l'égalité des deux termes de l'équation (2.32) et (2.33) on trouve :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \left[ \frac{v_{cd} i_{cd} + v_{cq} i_{cq}}{C_{dc}} \right] - \frac{I_{dc}}{C_{dc}} \quad (2.34)$$

Finalement:

$$\frac{V_{dc}}{C_{dc}} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{3}{2} \left[ \frac{K_d i_{cd} + K_q i_{cq}}{C_{dc}} \right] \quad (2.35)$$

Le transfert de la puissance active reçue par la station 1 (3L-NPC VSC-HVDC) vers la station 2 (3L-NPC VSC-HVDC) est directement lié au courant suivant l'axe (d). Ce courant est également responsable de la régulation de la tension continue du bus DC. Pour que le facteur de puissance soit unitaire, le courant de référence suivant l'axe (q) est mis à zéro. Le courant de référence  $i_{cd\_ref}$  est obtenu à l'aide de la régulation de la tension continue estimée à sa référence en utilisant un régulateur proportionnel-intégral (PI).

L'équation définissant le courant  $i_{cd\_ref}$  est donnée par :

$$i_{cd\_ref} = (K_P + \frac{K_I}{s})(V_{dc\_ref} - V_{dc}) \quad (2.36)$$

Où  $K_P$  est le gain proportionnel qui assure la stabilité des variables commandées, et  $K_I$  est le gain intégral du régulateur PI qui annule l'erreur statique et assure une poursuite parfaite entre les mesures et les références.

Un résumé des résultats précédents donne le schéma de principe du régulateur de la tension DC comme indiqué dans la figure 2.13.

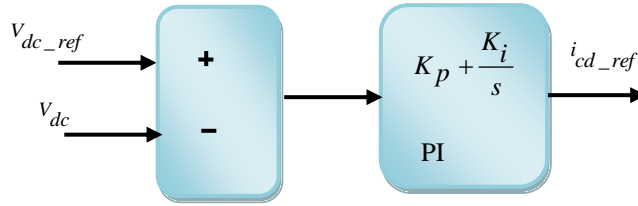


Figure 2.13: Schéma bloc de régulateur de la tension DC.

### 2.4.3 Contrôle de la puissance active et réactive

On désigne par  $P$  et  $Q$  les puissances instantanées actives et réactives sortant du côté AC de la station 1. Dans le fonctionnement en régime permanent, les composantes de la tension dans le repère (dq0) sont des valeurs nominales. Par conséquent, la tension  $v_{sd}$  est égale à la tension nominale  $v_s$  et  $v_{sq}$  sera nulle. En tenant compte des hypothèses précédentes, les puissances active et réactive sont exprimées par :

$$P = \frac{3}{2}(v_{sd}i_d + v_{sq}i_q) = \frac{3}{2}v_{sd}i_d \quad (2.37)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_{sd}i_q - v_{sq}i_d) = \frac{3}{2}v_{sd}i_q \quad (2.38)$$

Pour la régulation de la puissance active, on exprime le courant de référence  $i_{d\_ref}$  suivant l'axe (d) à partir de l'équation (2.37) par:

$$i_{d\_ref} = \frac{2}{3}P_{ref}v_{sd} \quad (2.39)$$

La fonction de transfert en boucle fermée associée à la fonction de transfert du régulateur PI en cas où la puissance active est une référence est de cette forme:

$$i_d = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}}{v_{sd}} + \left( K_{P2} + \frac{K_{i2}}{s} \right) (P_{ref} - P) \quad (2.40)$$

Où:  $P_{ref}$  est la puissance de référence active,  $K_{P2}$  et  $K_{i2}$  sont respectivement les gains proportionnel et intégral du régulateur de la puissance active.



De la même manière que pour la puissance active, le contrôle en boucle ouverte de la puissance réactive s'obtient facilement à partir de l'équation 2.38. On aura:

$$i_{q\_ref} = \frac{2}{3} Q_{ref} v_{sd} \quad (2.41)$$

Et en boucle fermée :

$$i_q = \frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{v_{sd}} + \left( K_{P3} + \frac{K_{i3}}{s} \right) (Q_{ref} - Q) \quad (2.42)$$

Où:  $Q_{ref}$  est la puissance de référence réactive.  $K_{P3}$  et  $K_{i3}$  sont respectivement les gains proportionnel et intégral du régulateur de la puissance réactive.

#### 2.4.4 La commande PLL (Phase Locked Loop)

La commande PLL (Phase Locked Loop) est nécessaire dans le contrôle des convertisseurs. Cette boucle à verrouillage de phase (PLL) a pour rôle d'extraire l'angle de synchronisation  $\theta$ . Elle permet de générer des références de courant. L'importance de la boucle à verrouillage de phase (PLL) dans ce contrôle, est de permettre de déterminer la phase instantanée d'un signal, ainsi que sa fréquence. Il est indispensable pour pouvoir traduire des signaux exprimés en valeurs de phase (abc) vers des coordonnées directe-quadrature-zéro (dq0), et inversement [42].

#### 2.4.5 Commande par MLI du convertisseur à trois niveaux

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), appelée (Pulse Width Modulation PWM) est utilisée pour synthétiser des signaux continus à l'aide de circuits discrets. Il s'agit de la technique de modulation utilisée pour les VSC [35]. Elle présente aussi l'intérêt de diminuer le contenu harmonique du signal modulé.

La technique (MLI) à trois niveaux qui permet de générer un signal de fréquence fixe et un rapport cyclique variable. Le MLI augmente aussi le taux de l'utilité de la tension continue. Cette technique nécessite deux porteuses triangulaires pour assurer les trois niveaux de tensions. On utilise ici deux porteuses de mêmes formes, mêmes amplitudes et mêmes fréquences, mais décalées verticalement comme montre la figure 2.14.

Les 3 états sont définis comme suit :

1 si le signal modulant a une valeur supérieure aux deux porteuses.

0 si le signal modulant a une valeur comprise entre celles des 2 porteuses.

-1 si le signal modulant a une valeur inférieure aux deux porteuses.

Principalement le MLI contrôle la tension de sortie et réduit les harmoniques de tension.

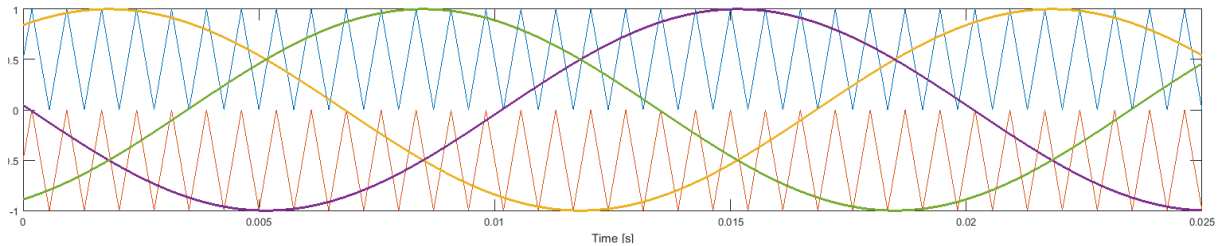


Figure 2.14: Signal de MLI à trois niveaux pour le contrôle d'un convertisseur 3-niveaux.

#### 2.4.6 Structure de commande du convertisseur (redresseur)

Sur la figure 2.15, on a présenté la structure détaillée du contrôle de convertisseur VSCHVDC côté redresseur. Cette structure peut être composée de deux parties: la première partie permet de générer les grandeurs de référence des courants directs  $i_{cd\_ref}$ , et la deuxième génère le courant de référence en quadrature  $i_{cq\_ref}$ .

On constate que la référence du courant direct dépend de la commande en puissance active ou en tension DC. Un contrôleur  $PI_2$  permet d'annuler l'erreur entre la référence du courant  $i_{cd\_ref}$  et le courant mesuré  $i_{cd}$ .

De la même manière, la référence en quadrature est dictée soit par une référence en puissance réactive, soit par une référence de tension AC. Un contrôleur  $PI_3$  permet de générer le signal de la référence du courant  $i_{cq\_ref}$ . Un deuxième contrôleur permet de générer la tension de référence en quadrature. A la sortie des deux contrôleurs, nous avons respectivement la tension de commande direct  $v_{cd\_ref}$  et en quadrature  $v_{qd\_ref}$ .

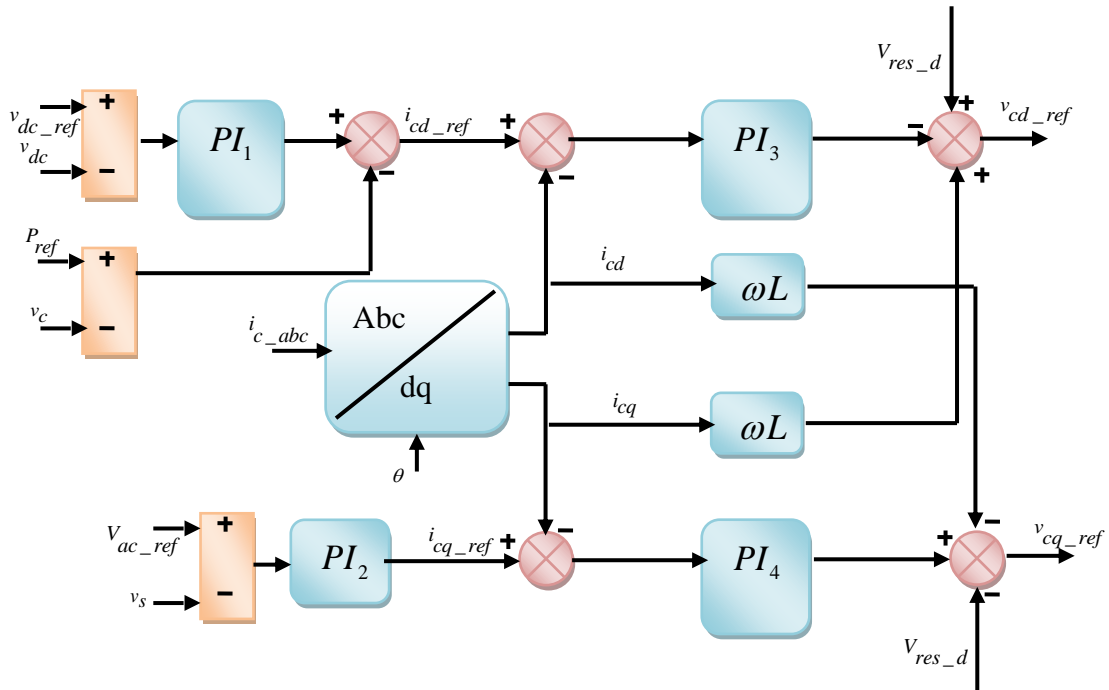


Figure 2.15: Schéma bloc de commande du redresseur.

### 2.4.7 Structure de commande du convertisseur (onduleur)

La station coté réseau de l'onduleur est contrôlée en tension DC, dans le but de maintenir la tension continue aux bornes du convertisseur à une valeur constante. La composante directe sera prioritaire sur la composante en quadrature, de manière à ce que la tension DC atteigne sa valeur de référence le plus vite possible.

Le régulateur de tension continu PI permet de générer le courant de référence direct  $i_{cd\_ref}$ . Le deuxième régulateur  $PI_1$  permet de générer la tension de référence. À la sortie, on trouve les lois de commande qui sont présentés par les tensions  $v_{cd\_ref}$  et  $v_{qd\_ref}$ .

La figure 2.16 montre cette structure de commande.

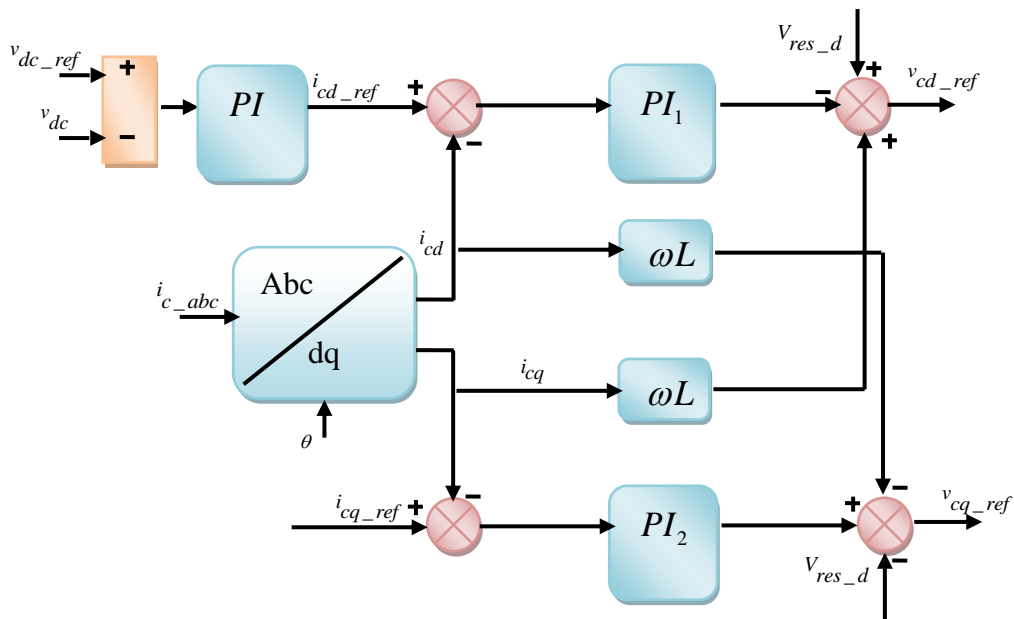


Figure 2.16: Schéma bloc de commande de l'onduleur.

### 2.4.8 Structure de contrôle globale

Le système implanté offre toutes les fonctionnalités nécessaires pour commander le système VSC-HVDC et garantir un flux d'énergie sûr, stable.

Le contrôle de la liaison s'effectue en trois temps: Un temps pour les mesures, un temps pour le contrôleur discret (contrôles externes et internes), et un dernier temps pour la génération d'impulsion via MLI.

Comme indiqué précédemment, un poste de conversion règle la puissance active qui transite sur la station1 du redresseur, tandis que la station 2 de l'onduleur règle la tension DC. Théoriquement, chaque station pourrait faire le choix entre une commande supplémentaire en puissance réactive, ou en tension AC. Les tensions de commande obtenues sur l'axe (dq0) sont transformées dans le plan (abc) en utilisant la transformation (dq0/abc) du Park associée avec l'angle de synchronisation de phase  $\theta$ . Les tensions de commande sont ensuite considérées comme l'entrée pour la technique de modulation MLI. À la sortie de MLI, des signaux de commande sont générés pour contrôler les interrupteurs des deux stations du convertisseur à trois niveaux (3L-NPC VSC-HVDC).

Le résumé des lois de commande précédentes est illustré dans la figure 2.17.

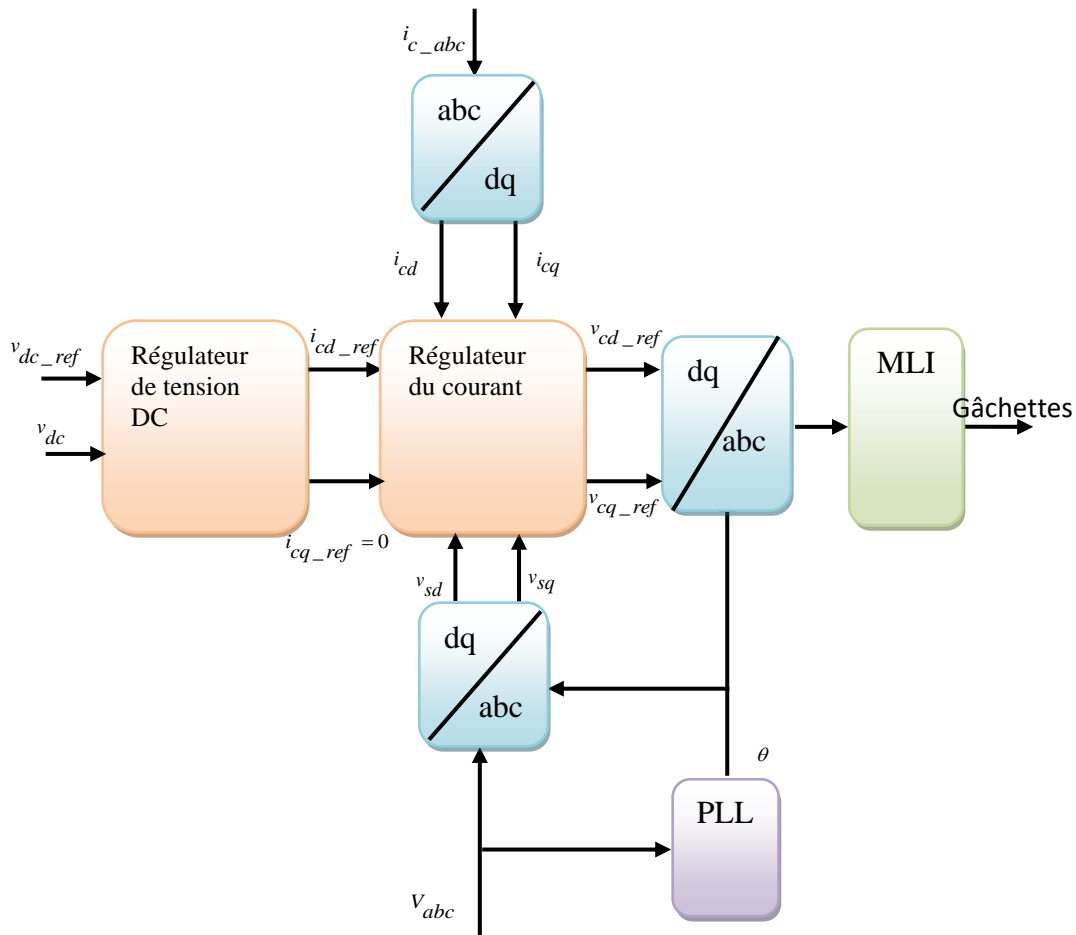


Figure 2.17: Schéma bloc de contrôle du convertisseur (VSC-HVDC).

## 2.5 Résultats de la simulation

Dans cette partie, nous allons utiliser le modèle illustré dans la figure 2.18, pour analyser les performances de la commande proposée. À cet effet, des résultats de simulation sont effectués sur le convertisseur à trois niveaux à base de point neutre calé (système VSC-HVDC à trois niveaux). Afin d'analyser les performances du système VSC-HVDC dans le cas d'un fonctionnement dans les conditions normales, on montre par simulation les réponses des régulateurs.

Toutes les simulations sont réalisées avec Sim Power Systems de Simulink [57], du logiciel MATLAB. En effet il est important d'affirmer que l'évaluation de la stratégie de la commande implantée, pour l'analyse du comportement général de notre système en présence de multiples perturbations sera l'objet d'une étude comparative à la nouvelle stratégie de

contrôle, qui sera décrit en détail dans le chapitre 3. Les résultats de simulation comparatifs sont présentés dans le chapitre 4.

### 2.5.1 Description du système étudié

On étudie le système suivant :

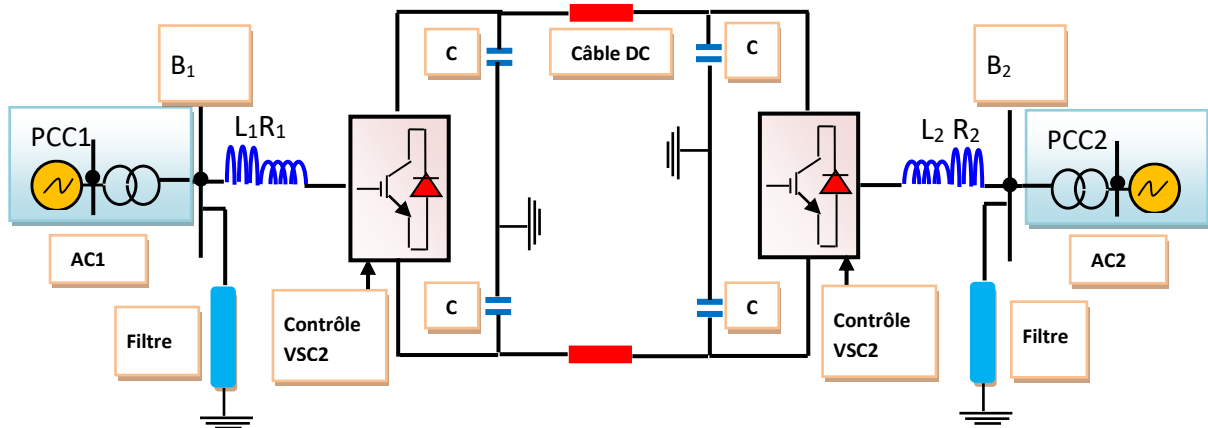


Figure 2.18: Modèle d'un système de transmission VSC-HVDC.

La Figure 2.18, montre le système étudié composé de deux réseaux AC1 et AC2 (230 kV, 2000MVA, 50Hz) qui sont représentés de la même manière, et deux stations (redresseur et onduleur), qui ont une structure identique (VSC1, VSC2) à trois niveaux point neutres calés (3L-NPC VSC-HVDC) à base d'IGBT pour la transmission.

L'énergie produite par le réseau AC1 est transportée au réseau AC2 via les deux stations HVDC qui sont reliées entre elles par deux câbles DC de 75 km chacun.

Le premier élément en lien avec le réseau est un transformateur Yg-D de puissance nominale  $S_n = 200$  MVA, qui permet de faire le lien avec la tension du réseau (230 kV) et une tension acceptable pour le convertisseur (100kV). La tension DC a une valeur  $+100$  kV.

Afin d'éliminer les harmoniques produites par le convertisseur, deux filtres sont placés en parallèle dans le circuit. Ces filtres sont de type passe-haut du second ordre.

Les condensateurs doivent être dimensionnés de manière à être assez petits pour avoir un contrôle de puissance suffisamment rapide, mais assez grands pour éviter une trop grande ondulation de la tension DC. La capacité du modèle vaut 70  $\mu\text{F}$ .

Le tableau 2.1 présente les paramètres du modèle du système VSCHVDC à trois niveaux utilisé dans cette étude.

**Tableau 2.1:** Paramètres du système VSC-HVDC.

<b>Paramètres du système VSC-HVDC</b>	
Tension nominale AC	230 kV
Résistance côté convertisseur	0.05 $\Omega$
Inductance côté convertisseur	0.0265 H
Tension continue DC	+/-100 KV
Capacité DC	70 $\mu\text{F}$
Puissance nominale	200 MW
Fréquence de commutation	1350Hz
Fréquence nominale	50Hz
Résistance de bus continu	0.0139 $\Omega/\text{Km}$
Inductance de bus continu	0.159 mH/Km
Capacité de bus continu	0.231 $\mu\text{F}/\text{Km}$

### 2.5.2 Fonctionnement du système dans les conditions normales

Dans cette section, nous étudions le démarrage d'une liaison entre deux réseaux infinis. Le système est programmé pour démarrer et atteindre le régime normal en 1.3s. Les flux de puissances actives, réactives et les tensions DC aux deux stations sont illustrés sur les figures 2.19 et 2.20. Les différentes étapes du démarrage de la liaison sont:

1- L'état initial ( $t < 0\text{s}$ ): Aucun courant ne circule sur la liaison, le lien DC n'est pas chargé.

- 2- Le raccordement de la liaison aux PCC ( $t=0s$ ): Les IGBT du convertisseur restent bloqués. Celui-ci joue le rôle d'un pont diode qui permet de charger le lien DC. On observe sur la figure 2.19 (station1) la puissance active entre de part et d'autre de la liaison pour charger le lien DC. La tension DC augmente au-delà de (1pu). Il faut donc rétablir le niveau de tension DC de référence.
- 3- l'activation de la station 2 ( $t=0,1s$ ): On active cette station en premier, car c'est elle qui règle la tension DC. On constate sur la figure 2.20 (station2) que la liaison évacue l'énergie excédentaire stockée dans la liaison via la station 2.
- 4- L'activation de la station 1 ( $t=0,3s$ ): Une fois que le lien DC a atteint son niveau de tension de référence, le transit de puissance active peut à nouveau transiter sur la liaison. Cette variation de commande de puissance active se fait de manière progressive.

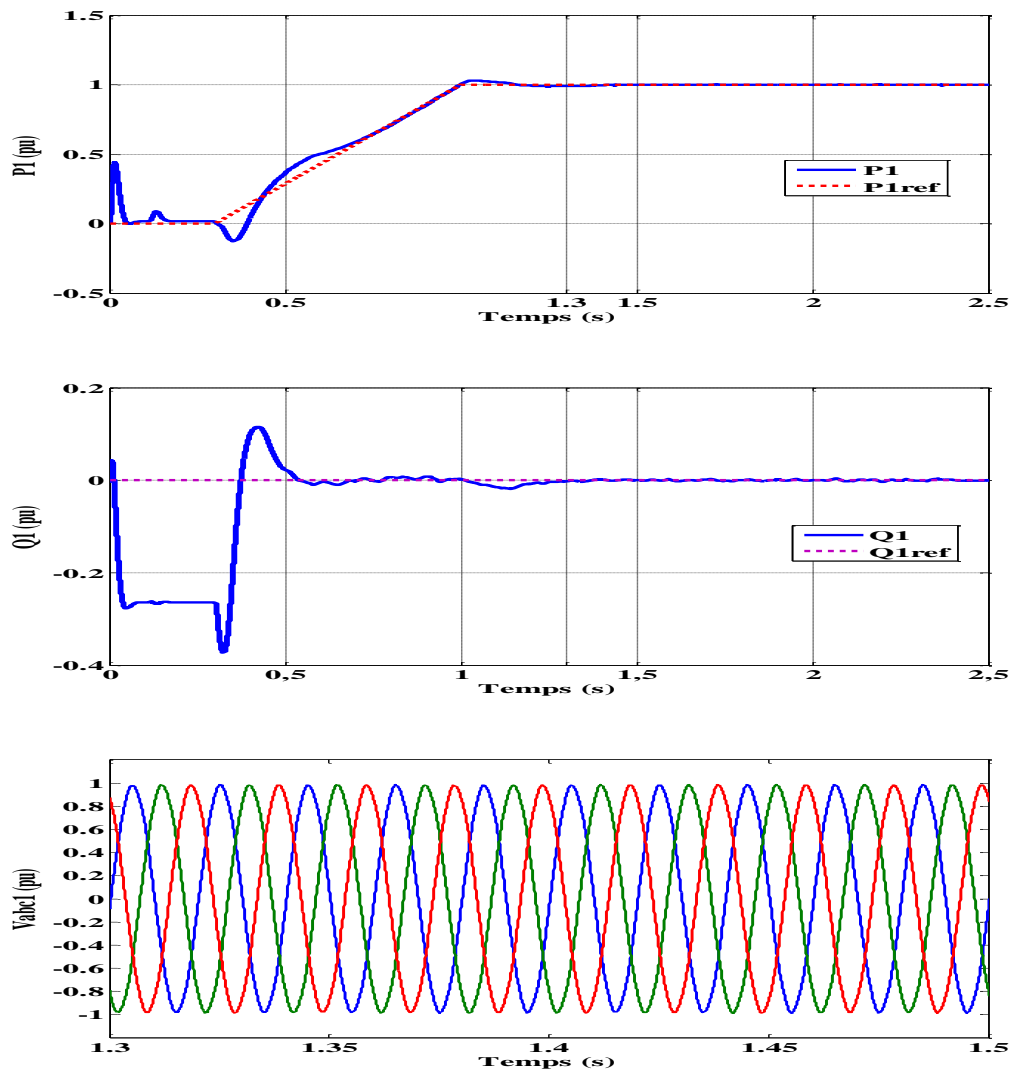


Figure 2.19: Démarrage et réponse en régime normal de la liaison VSC-HVDC (station1).



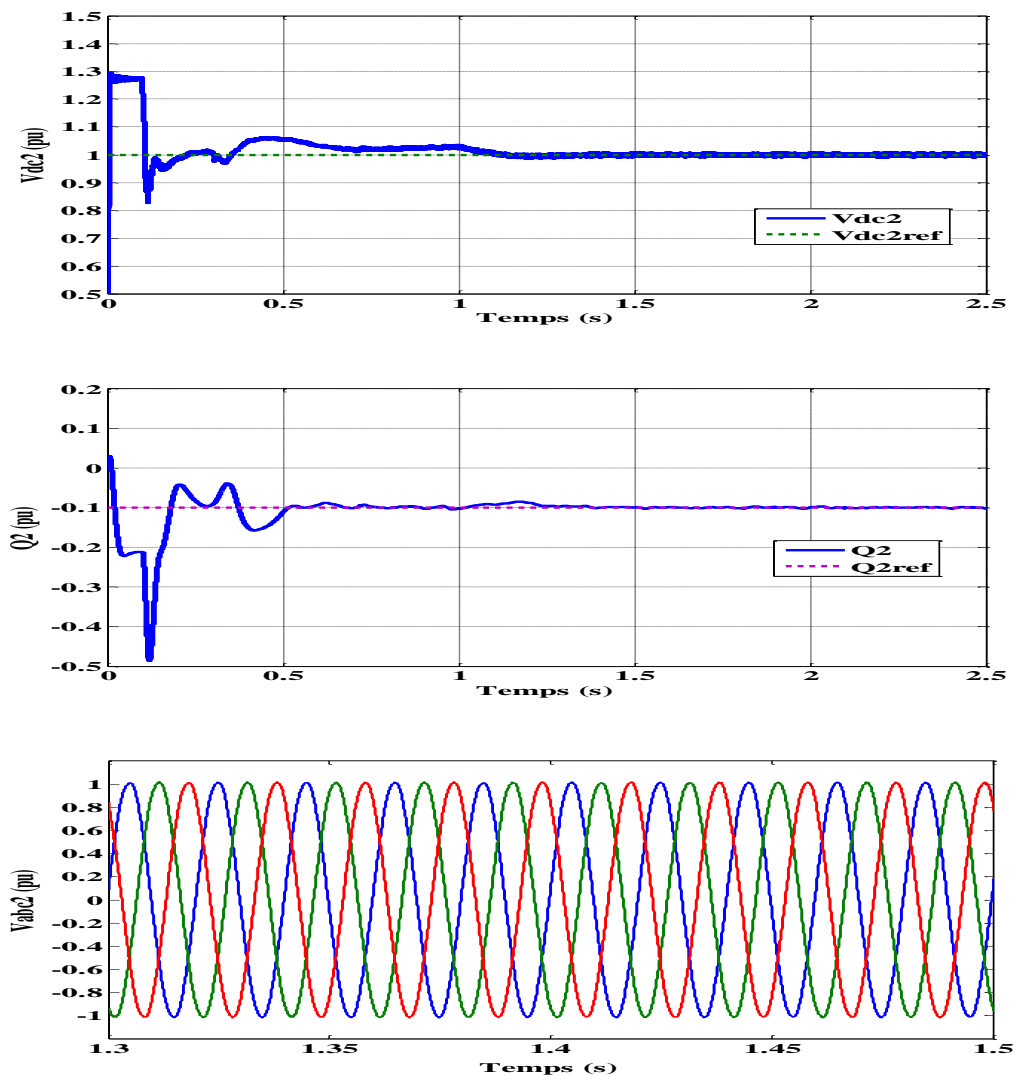


Figure 2.20: Démarrage et réponse en régime normal de liaison VSC-HVDC (station 2).

### 2.5.3 Réponses transitoires des régulateurs

Dans ce cas, des changements (échelons négatifs) de référence progressifs de puissance active, de tension continue et de puissance réactive sont appliqués aux contrôleurs implantés pour le système VSC-HVDC.

En effet, à  $t=1.5s$ , une diminution négative de 10% soit  $(-0.1p.u)$  est appliquée à la référence de la puissance active de la station1, puis à  $t=2s$  une diminution négative de 10% soit  $(-0.1p.u)$  est appliquée à la référence de la puissance réactive. Dans la station 2, à  $t=2.5s$  une diminution de  $(-0.5p.u)$  est appliquée à la référence de la tension continue DC.

La figure 2.21 montre la réaction du système de contrôle. On voit la réponse dynamique des régulateurs observés. Toutes les grandeurs suivent bien leurs consignes, et le système se stabilise approximativement à 0.3s. Il en résulte que les contrôleurs fonctionnent correctement et le système VSC-HVDC à des réponses stables et raisonnables.

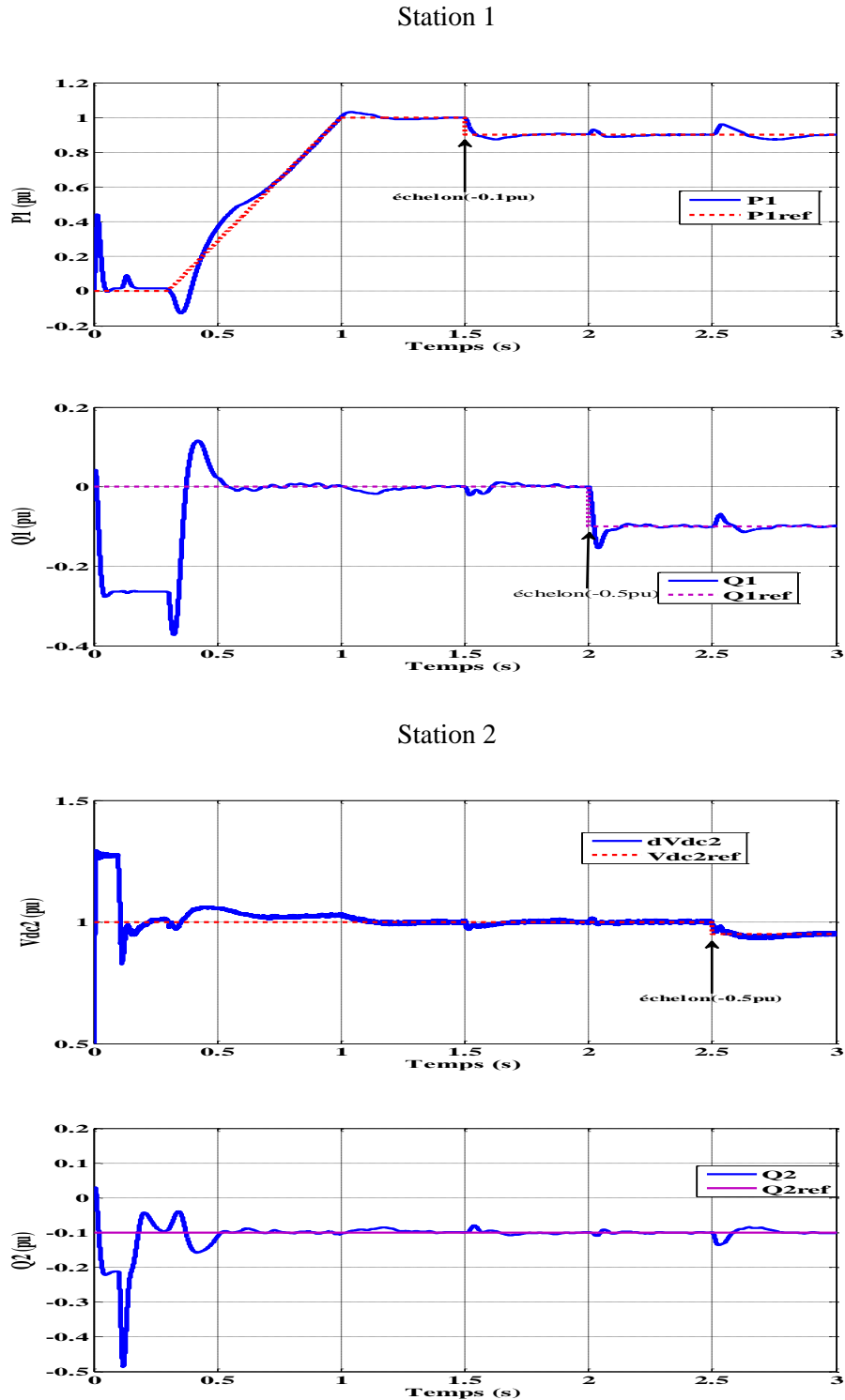


Figure 2.21: Réponse transitoire des régulateurs suite à un échelon.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué les aspects technologiques du système VSC-HVDC, les principes de fonctionnement de VSC-HVDC et toutes les composantes du système VSC-HVDC.

Nous avons choisi la topologie du convertisseur à trois niveaux à point neutre calé. Cette topologie permet de réduire les harmoniques sans augmenter les pertes de commutation et de séparer la tension continue en plusieurs niveaux de tensions.

Nous avons ensuite détaillé la technique de modulation utilisée à savoir la MLI à trois niveaux, et nous avons expliqué le principe de fonctionnement du convertisseur à trois niveaux ainsi que ses séquences de conduction.

Nous avons développé, les équations mathématiques permettant de modéliser le convertisseur et tous les éléments de notre système, afin de prendre en considération toute la dynamique du système en vue d'implanter les lois de commandes désirées.

Nous avons aussi proposé une structure de contrôle vectoriel appliquée au système VSC-HVDC. Cette stratégie de contrôle comporte deux boucles de contrôle : boucle de courant rapide (faster inner current loop) et boucle de contrôle lente (slower outer control loop). La technique de commande implantée permet d'éviter le problème de saturation de la tension de commande à l'entrée de la MLI, d'assurer un contrôle plus stable et rapide de la tension du bus DC et permet un contrôle plus vigoureux de la puissance active et de la puissance réactive.

Nous avons réalisé un test pour étudier la procédure de démarrage de la liaison, afin de valider le comportement du système.

En outre, des échelons sont appliqués sur les boucles externes, des changements de référence de la puissance active, de la tension continue et de la puissance réactive ont été présentés, afin de valider leurs performances.

L'effet de découplage entre les deux puissances active et réactive est démontré dans les résultats de simulation réalisés, ce qui démontre l'avantage principal du contrôle global, et de

permettre le contrôle indépendamment des puissances actives et réactives en maintenant la tension continue stable. Néanmoins, l'utilisation de ces régulateurs n'a pas permis d'aboutir aux résultats souhaités en régime dynamique (pour toutes les perturbations testées).

Le troisième chapitre consistera ainsi à implanter une technique de commande basée sur la logique floue. Une série de tests est effectuée illustrant la supériorité de cette loi de commande face aux perturbations de la source, aux variations des paramètres du système et aux défauts.

## **Chapitre 3**

**La commande à base de la logique floue**

### 3.1 Introduction

La problématique de notre recherche réside dans le fait que le système de transmission VSC-HVDC doit utiliser une technique de commande lui permettant d'atteindre les performances désirées, non pas en un point, mais sur toute la plage de fonctionnement, quelles que soient les perturbations auxquelles il peut être assujéti.

Le développement des nouvelles topologies, des nouvelles techniques de commande et de contrôles ont été l'objectif principal des chercheurs. Ces développements ont ciblé l'amélioration de la stabilité, la minimisation des pertes et l'augmentation du rendement du système global.

Après des recherches approfondies effectuées dans ces domaines, on a remarqué que des améliorations pourront être apportées aux différents niveaux, que ce soit au niveau du contrôle, ou au niveau des configurations.

Concernant la topologie, nous avons envisagé une solution basée sur l'utilisation de la topologie à trois niveaux à point neutre calé, qui permet une meilleure utilisation des interrupteurs de puissance [8]. D'une part, elle aide à limiter les contraintes en tension: Chaque interrupteur à l'état bloqué, supporte une faible fraction de la pleine tension du bus continu. D'autre part, la tension de sortie du convertisseur à trois niveaux présente une meilleure qualité [20].

Au niveau du contrôle, il y'a une nécessité d'utiliser une technique de commande qui sera appliquée au système, pour lui permettre d'atteindre les performances désirées sur une large plage de fonctionnement.

En effet, la majorité des techniques de commande utilisées sur ces systèmes non-linéaires se basent sur l'utilisation de régulateurs linéaires (la méthode de contrôle conventionnelle). Ce qui a pour effet de diminuer les performances du convertisseur et parfois même rendre le système incontrôlable, dans le cas où il y'a un changement du point de fonctionnement ou encore lors des variations des paramètres du système [21].

En effet, ces méthodes donnent une moindre performance lorsqu'il s'agit d'un régime transitoire important.

En outre, les choix des gains des paramètres des régulateurs linéaires (PI) utilisés dans les régulations, peuvent rendre le processus oscillant et même instable. Cela est dû à leurs limitations causées par la saturation. De plus, les contrôleurs PI offrent une réponse très lente à toute perturbation transitoire en raison de ses gains fixes. Par conséquent, on peut considérer que les contrôleurs de type PI sont les plus simples pour les systèmes complexes non linéaires et dynamiques. Toutefois, dans certaines circonstances, les contrôleurs traditionnels PI avec des valeurs de gain fixe qui sont utilisées pour les systèmes de transmission VSC-HVDC produisent souvent une instabilité des systèmes [22].

Malgré la simplicité des contrôleurs réglés par les approches conventionnelles, il y'a un manque de robustesse de ce type de contrôleurs. Ce n'est pas le seul problème rencontré. En effet, la présence des non-linéarités larges dans la dynamique du système VSC-HVDC rend les modèles linéarisés inadéquats pour la conception des contrôleurs.

Les méthodes conventionnelles de réglage sont basées sur une modélisation adéquate du système à régler, et un traitement analytique à l'aide de la fonction de transfert ou d'équations d'état. Malheureusement, celles-ci ne sont pas toujours disponibles.

Ces techniques de commande ont prouvé leur efficacité dans de nombreux problèmes de régulation industrielle. Les méthodes de commande avancées (Régulateur adaptatif, Commande prédictive, Commande robuste) permettent de répondre aux exigences d'un certain nombre de systèmes fortement non linéaires. C'est dans ce même créneau que les méthodes de modélisation et de commande floues se positionnent [23].

Notre système et la majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler automatiquement. Cette difficulté provient de :

- leurs non-linéarités.
- la variation de leurs paramètres.
- la présence de multiples perturbations (défauts).
- la qualité des variables mesurables.

Ces difficultés ont conduit à l'avènement et au développement de nouvelles techniques telle que la commande floue particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander, ou lorsque ce dernier présente de fortes non linéarités ou imprécisions [57].

Dans plusieurs applications, les résultats obtenus avec un contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec un algorithme de contrôle conventionnel. En particulier, la méthodologie du contrôle flou apparaît utile quand les processus sont très complexes à analyser par les techniques conventionnelles. Plusieurs travaux dans le domaine de commande ont montré qu'un régulateur par logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel.

Pour toutes ces raisons, notre deuxième contribution consiste à proposer l'implantation de nouvelles méthodes de commande basée sur la logique floue appliquée pour le système VSC-HVDC, pour rentabiliser et optimiser l'énergie transportée. Ainsi, il serait possible de se rapprocher d'un fonctionnement optimal du système en multiples perturbations (défauts, variation de paramètres et changement de charges). Ces améliorations qui sont développées dans ce chapitre sont déduites à partir des problématiques constatées dans les techniques de commande conventionnelle.

Dans ce chapitre, nous commençons par énoncer les fondements de la logique floue. Nous présentons ses concepts, et nous décrivons les aspects méthodologiques nécessaires à la compréhension de cette technique en donnant des rappels sur ses bases générales et la description des éléments de base de la théorie des systèmes flous.

Ensuite, nous présentons en détails les méthodes de raisonnement flou (propositions, implications et inférence) qui constituent la base de la commande floue.

Enfin, nous décrivons la structure générale d'un contrôleur flou et les différents sous-ensembles qui le constituent et ses différents types de commande.

Finalement, nous présentons les étapes nécessaires à la conception de cette technique de commande. Ensuite, nous effectuons une série de test de simulation qui permet de valider les lois de commande implantées à notre système.



## 3.2 La logique floue

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain.

Les travaux de Lotfi Zadeh dans les années soixante sur la théorie des ensembles flous et la logique floue, à l'université de Berkeley ont jeté les bases de la commande floue actuelle [88].

Ces travaux ont mis un certain temps avant d'être acceptés par la communauté de l'automatique et de l'industrie. En effet, la logique floue, de part ses aptitudes pluridisciplinaires (la gestion de base de données, les systèmes experts, le traitement du signal, la classification de données, la commande de systèmes automatiques....etc), s'est attirée les critiques des scientifiques qui se sentaient attaqués sur leurs positions [8].

En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, nous lui permettons d'être dans un autre état différent de vrai ou faux. C'est un ensemble de principes mathématiques pour la représentation et la manipulation des connaissances en se basant sur des degrés d'appartenance compris dans l'intervalle  $[0, 1]$ .

La logique floue confère ainsi une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent. D'où, le succès de la commande floue trouve aussi en grande partie son origine dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistiques «si... alors» facilement interprétables [22].

## 3.3 Les systèmes d'inférence floue

Les systèmes d'inférence floue (SIF) peuvent être considérés comme des systèmes logiques qui utilisent des règles linguistiques pour établir des relations entre leurs variables d'entrée et de sortie. Aujourd'hui, les applications des SIF sont très nombreuses. Ils sont largement utilisés pour la commande, la modélisation, le diagnostic et la reconnaissance de formes.

### 3.3.1 Les ensembles flous

La notion d'ensemble flou introduit un caractère graduel de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné. Cela permet une meilleure représentation des termes et des connaissances vagues. Dans la théorie floue, un élément peut appartenir en partie à un sous-ensemble : son degré d'appartenance est décrit par une valeur comprise entre 0 et 1.

### 3.3.2 Définitions

Un ensemble flou  $A$  dans un univers du discours  $X$  est caractérisé par sa fonction d'appartenance  $\mu_A(X)$  qui associe à chaque élément  $x$  de  $X$  une valeur dans l'intervalle des nombres réels  $[0, 1]$ .

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (3.1)$$

Ainsi un sous-ensemble flou  $A$  dans  $X$  peut être représenté par un ensemble de couples ordonnés

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad (3.2)$$

Le sous-ensemble classique n'est en fait qu'un cas particulier de sous-ensemble flou dont la fonction d'appartenance ne prend que les valeurs 0 ou 1. Un sous-ensemble flou  $A$  de  $X$  est aussi souvent représenté par la notation suivante qui indique pour tout élément  $x$  de  $X$  son degré  $\mu_A(x)$  d'appartenance à  $A$  :

$$A = \int_X \mu_A(x) / x \quad \text{si } X \text{ est continu} \quad (3.3)$$

$$A = \sum_{x_i \in X} \mu_A(x_i) / x_i \quad \text{si } X \text{ est discret} \quad (3.4)$$

Comme les valeurs  $\mu_A(x_i)$  représentent les degrés d'appartenance avec lesquels les  $x_i$  appartiennent à  $A$ , si  $\mu_A(x_i)$  prend la valeur 1 pour tous les éléments de  $X$ , cela signifie que  $A$  est identique à  $X$ . Au contraire,  $A$  est vide si  $\mu_A(x_i)$  prend la valeur 0 sur tout  $X$ .

### 3.3.3 Variables linguistiques et ensembles flous

La notion de variable linguistique permet de modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise est inconnue. Une variable linguistique, ou

variable floue, est donc une variable dont les valeurs floues appartiennent à des ensembles flous pouvant représenter des mots du langage naturel. Ainsi une variable floue peut prendre simultanément plusieurs valeurs linguistiques [29].

Une variable linguistique représente un état dans le système à régler. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que :

$$\{x, T(x), U, G, M\}$$

Où:  $x$  : est le nom de la variable,

$T(x)$  : est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre  $x$ ,

$U$  : est l'univers du discours associé avec la valeur de base,

$G$  : est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de  $x$ ,

$M$  : est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

### Exemple1

La variable linguistique  $x$  est la température ambiante, peut être définie avec un ensemble des termes :

$T(x) = \{\text{extrêmement froide, très froide, froide, chaude, très chaude, extrêmement chaude}\}$ , qui forment son univers du discours

$U = [-20C^0, 40C]$ . La variable de base est la température. Le terme froid représente une valeur linguistique. On peut l'interpréter, par exemple comme (les températures plus petites que  $15C^0$ ).

### Exemple2

La figure 3.1 illustre un autre exemple de variable linguistique (vitesse) avec trois termes linguistiques : petite, moyenne et grande.

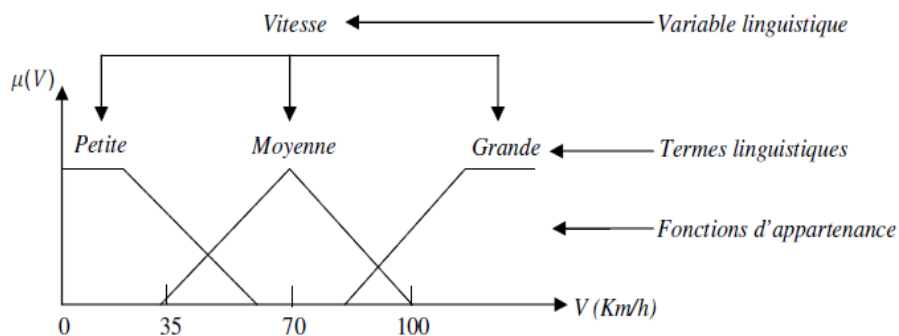


Figure3.1: Variables linguistiques.

### 3.3.4 Fonctions d'appartenances

Dans ce contexte on associe à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance désignée par  $\mu_A(x)$ , qui sera désignée par le degré ou le facteur d'appartenance. Il est à noter que l'ensemble des éléments de  $x$  pour lesquels  $\mu_A(x) > 0$ , Est appelé (support de A). En général la forme de fonctions d'appartenance dépend de l'application. Le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance les fonctions triangulaire, trapézoïdale ou en forme de cloche (Fonction gaussienne) [37].

#### a) Fonction triangulaire

Cette fonction est définie par trois paramètres  $\{a, b, c\}$  qui déterminent les coordonnées des trois sommets (figure 3.2a), peut être définie par:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in [a, b] \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{si } x \in [b, c] \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.5)$$

#### b) Fonction trapézoïdale

Elle est définie par quatre paramètres  $\{a, b, c, d\}$ , (figure 3.2b) :

$$\mu_x = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-d}), 0) \quad (3.6)$$

#### c) Fonction gaussienne

Elle est définie par deux paramètres  $\{\sigma, m\}$ , (figure 3.2c) :

$$\mu(x) = \exp(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}) \quad (3.7)$$

Où:

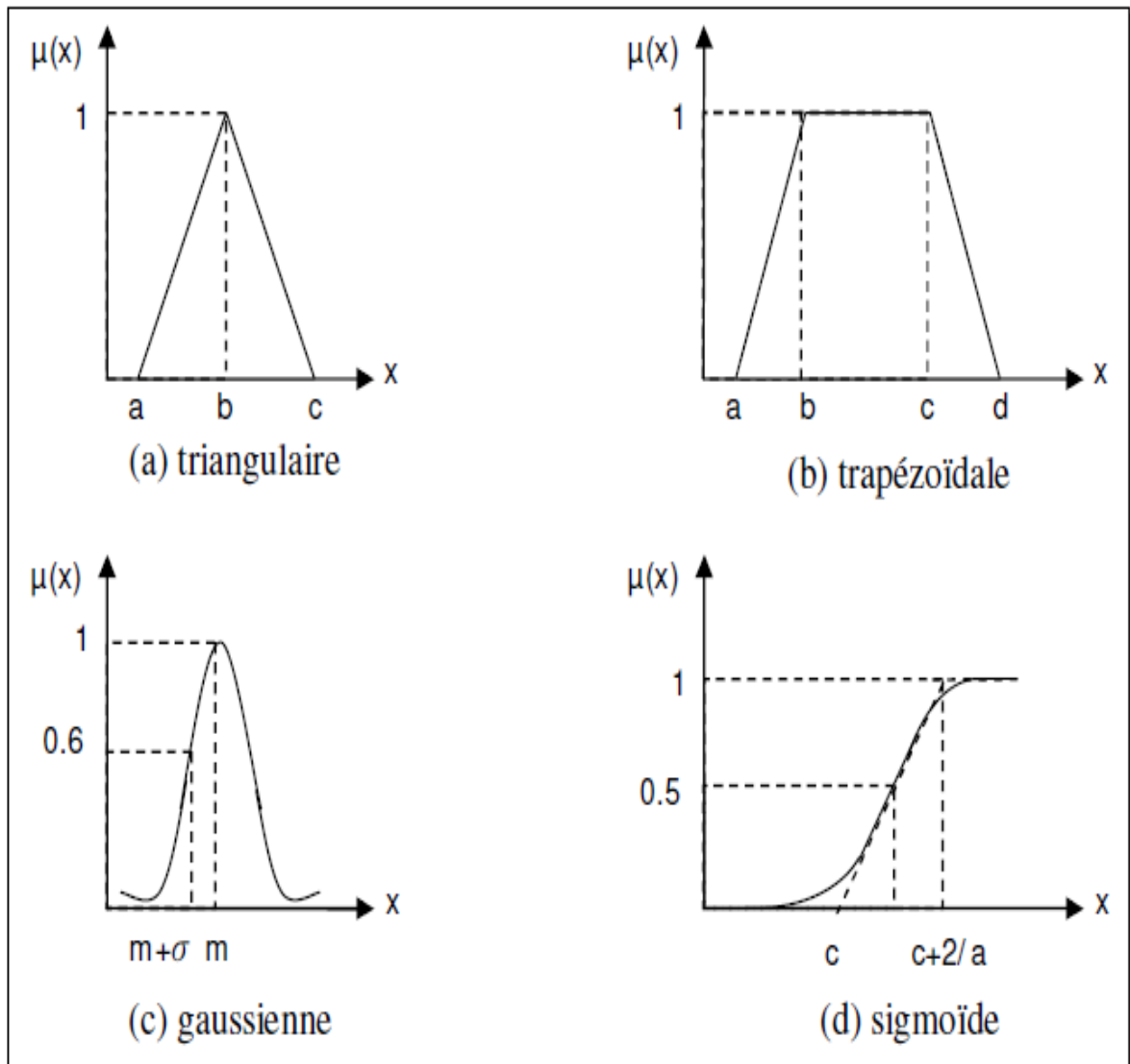
$\sigma$  : Centre de la gaussienne

Et  $m$  : Sa largeur.

**d) Fonction sigmoïde**

Elle est définie par deux paramètres  $\{a, c\}$ , (figure 3.2d).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x - c))} \quad (3.8)$$



**Figure3.2:**Différentes formes de fonctions d'appartenance.

### 3.4 Opérateurs de la logique floue

Supposant deux fonctions d'appartenance  $\mu_A$  et  $\mu_B$ . On peut définir des opérations telles que l'égalité, l'inclusion, l'intersection, l'union et le complément grâce à des opérations sur les fonctions d'appartenance.

#### a) Définition 1 (Egalité):

Les deux sous-ensembles flous  $A$  et  $B$  sont dits égaux, propriété que l'on note  $A=B$ , si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur en tout point de  $X$  :

$$\forall x \in X \quad \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (3.9)$$

#### b) Définition 2 (Inclusion) :

$A$  est dit inclus dans  $B$ , propriété que l'on note  $A \subseteq B$ , si tout élément  $x$  de  $X$  qui appartient à  $A$  appartient aussi à  $B$  avec un degré au moins aussi grand :

$$\forall x \in X \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (3.10)$$

Les définitions d'intersection (l'opérateur ET), d'union (l'opérateur OU) et de complément (l'opérateur NON) de sous-ensembles flous font intervenir les opérateurs de minimum, maximum et de complémentation à 1.

#### c) Définition 3 (Intersection) :

L'intersection de  $A$  et  $B$ , que l'on note  $A \cap B$ , est le sous-ensemble flou constitué des éléments de  $X$  affectés du plus petit des deux degrés d'appartenance  $\mu_A$  et  $\mu_B$  :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.11)$$

Cet opérateur est commutatif, associatif, admet 0 comme élément absorbant et 1 comme élément neutre.

**d) Définition 4 (Union) :**

L'union de  $A$  et  $B$ , que l'on note  $A \cup B$ , est le sous-ensemble flou constitué des éléments de  $X$  affectés du plus grand des deux degrés d'appartenance  $\mu_A$  et  $\mu_B$  :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.12)$$

Cet opérateur est commutatif, associatif, admet 1 comme élément absorbant et 0 comme élément neutre.

**Définition 5 (Complément):**

Le complément de  $A$ , que l'on note  $A^c$ , est le sous ensemble flou de  $X$  constitué des éléments  $x$  lui appartenant d'autant plus qu'ils appartiennent peu à  $A$  :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A^c} = 1 - \mu_A(x) \quad (3.13)$$

Dans certaines circonstances, il est judicieux de choisir d'autres opérateurs en plus de OU, ET et NON.

**3.5 Avantages et inconvénients de réglage par logique floue**

**a) les avantages**

Les principaux avantages des techniques floues sont les suivants [50]:

- L'incorporation directe des informations floues et linguistiques, provenant d'un expert humain, dans le système flou
- Il n'y a pas nécessaire d'établir un modèle mathématique du système à régler
- Le système flou est un approximateur universel, c'est-à-dire, il est suffisamment générale pour générer n'importe quelle action
- La logique floue permet de prendre en compte les typologies linguistiques et donc toutes les nuances que l'on a créées dans le but d'imiter au mieux le réel
- Le Traitement des systèmes à comportement complexe (même si on a un exemple simplifié, cela reste un système complexe en mathématique pure)
- L'ajoute ou le retrait des règles ne change quasiment rien au principe de la logique Floue, alors qu'en logique bivalente (logique classique), cela peut changer du tout au tout

- La logique floue est facile à comprendre par ceux qui ne sont pas des spécialistes, car elle imite la stratégie du raisonnement humain
- On peut maîtriser les systèmes non linéaires et difficiles à modéliser
- On peut augmenter facilement le nombre d'entrées sans réellement compliquer les calculs (alors qu'en logique simple la taille des calculs est exponentielle).

## b) les inconvénients

Cette technique représente donc plusieurs avantages liés à la simplicité d'implantation et à la robustesse vis-à-vis des variations paramétriques tout particulièrement. Néanmoins elle présente certains désavantages qui sont [45]:

- Les performances en boucle fermée dépendent de l'expertise.
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse (difficulté de certification dans le transport, espace)
- Le manque de directives précises pour la conception d'un régulateur
- La précision de réglage en général peu élevé.

## 3.6 La commande floue

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue, est d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme **Si...alors** ...Chaque règle a deux parties [39. 48]:

- partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par **Si**,
- partie conséquente (conclusion) exprimée par **alors**.

La partie antécédente est la description de l'état du système. La partie conséquente exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter. Chaque règle floue est basée sur l'implication floue.

Il y a plusieurs formes de **Si.....alors** ...la forme générale est :

**Si** (un ensemble de conditions est satisfait) **alors** (un ensemble de conséquences peut être exécuté).

Lorsqu'un opérateur humain commande manuellement un système, les actions qu'il réalise sont dictées par une connaissance subjective du fonctionnement de ce système. Par exemple,



s'il fait (froid) dans une pièce, on (augmente) le chauffage ; s'il fait (très froid), on (chauffe plus). Cette commande du système peut être envisagée de façon différente selon la personne qui la réalise: la sensation de (froid) n'est pas directement liée à une mesure de la température.

Ce principe est à la base de la commande floue. La mesure réalisée sur le système (température) est prise en compte par l'intermédiaire d'une variable linguistique (froid, tiède, chaud), qui est issue d'une analyse par un expert humain. Ensuite, l'action à réaliser est déduite à la fois d'un ensemble de règles de commande (s'il fait froid, on chauffe plus) et de l'état du système, qualifié par la variable linguistique. Enfin, la commande finale du système est créée en utilisant les conclusions de la déduction [36].

### 3.7 La structure générale d'une commande floue

Après avoir énoncé les concepts de base, les termes linguistiques et les théories des ensembles flous utilisés en logique floue, dans cette section nous présentons la structure d'un contrôleur flou. Le système à base de la logique floue est composé de quatre blocs principaux:

- ✓ L'interface de fuzzificateur
- ✓ La base de connaissances (règles) floues,
- ✓ Le moteur (engin) d'inférence floue,
- ✓ L'interface de défuzzificateur.

La figure 3.3 montre la structure générale d'un contrôleur flou. Le fonctionnement précis de chacun des sous-ensembles est décrit dans la suite.

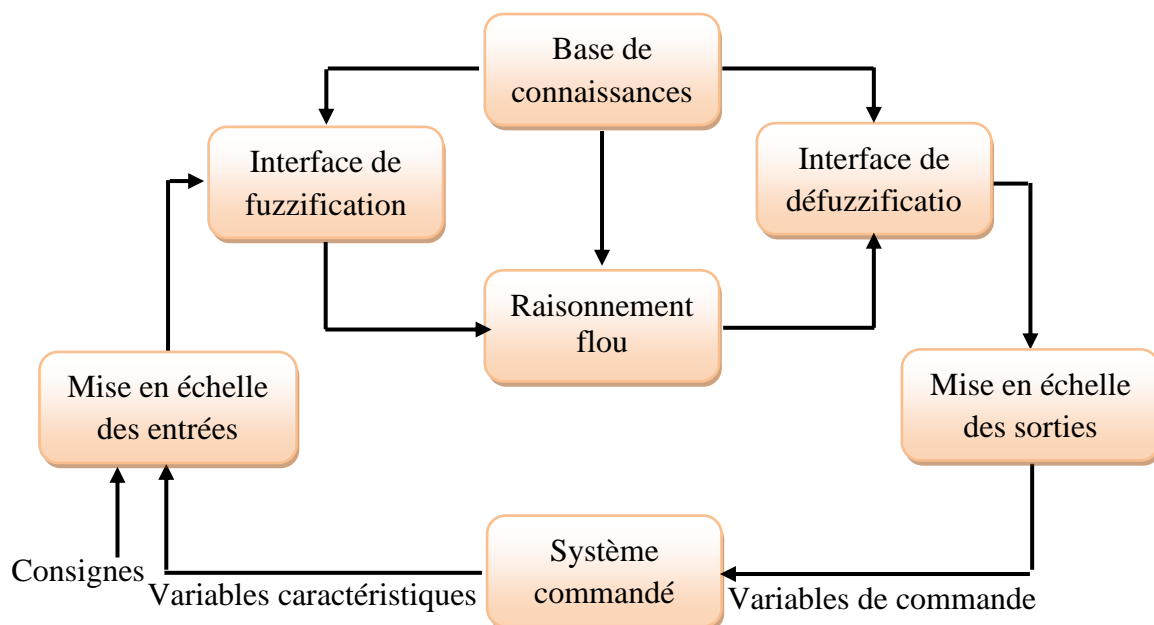


Figure 3.3: Structure de base d'un régulateur flou.

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrées du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont, en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du système.

Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes appliquées au processus. La Mise en échelle (normalisation/dé-normalisation) des grandeurs d'entrées/sorties permet d'adapter le traitement des signaux d'entrées/sorties. Par convention, la plage de variation des variables d'entrées/sorties est comprise entre -1 et +1.

### 3.7.1 Interface de fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques.

La fuzzification est le premier traitement qui entre en compte dans la structure d'un système flou. Elle consiste à donner un degré d'appartenance à une valeur réelle d'entrée en fonction des ensembles flous. Dans un système flou, il faut rendre floues (fuzzifier) les entrées et les sorties du système. Pour le système flou, la fuzzification des variables est une étape importante du processus de mise en œuvre. Les caractéristiques de cette étape sont habituellement déterminées par des experts ou des opérateurs qualifiés travaillant sur le processus et recourant le plus souvent à leurs connaissances.

Durant la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est modifiée pour fournir une valeur appartenant à un univers du discours relativement simple. On peut choisir comme univers du discours un intervalle centré sur zéro:  $[-c, +c]$ . Si la mesure initiale  $x$  est comprise dans un autre intervalle  $[a, b]$ , la normalisation est souvent réalisée par transformation linéaire, selon l'équation :

$$y = \frac{2c}{b-a} \left[ x - \frac{a+b}{2} \right] \quad (3.14)$$

L'univers du discours est ensuite représenté par une variable linguistique, qui comporte un nombre assez restreint de termes (en général trois, cinq ou sept) de façon à limiter le nombre de règles. Enfin, les valeurs normalisées déduites de chacune des entrées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant les variables linguistiques correspondantes.

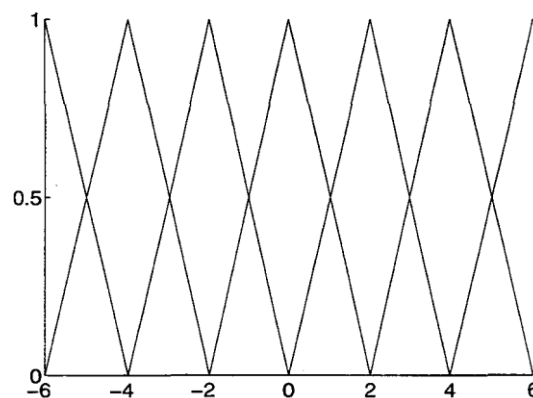
Exemple 3.5. Une variable linguistique sur l'univers de discours  $[-6, +6]$ , peut être définie de la façon précisée comme indiquer dans le tableau 3.1.

**Tableau 3.1** : Exemple de variable linguistique.

Terme linguistique	Signification	Règle sémantique
NG	Négatif grand	Environ -6
NM	Négatif moyen	Environ -4
NP	Négatif petit	Environ -2
EZ	Environ de zéro	Environ 0
PP	Positif petit	Environ +2
PM	Positif moyen	Environ +4
PG	Positif grand	Environ +6

Dans cet exemple, les termes linguistiques utilisés sont ceux initialement proposés par Mamdani lorsque la variable linguistique en comporte sept.

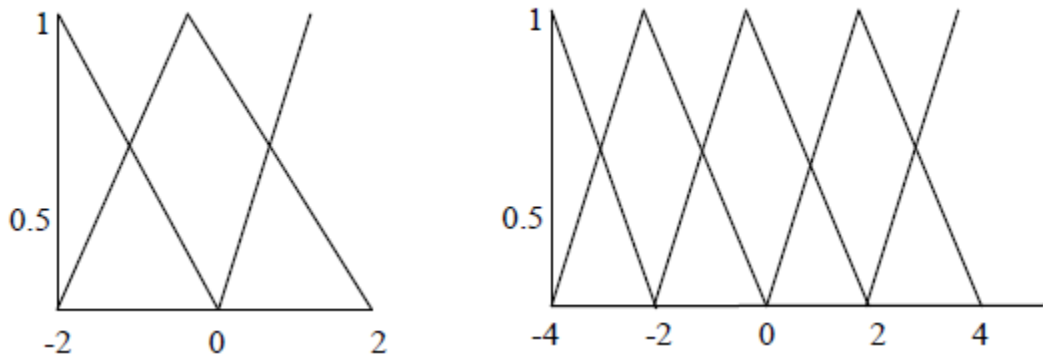
En outre la fonction d'appartenance est une représentation graphique de l'amplitude de participation de chaque entrée. Il existe de nombreux types de fonctions d'appartenance. Parmi eux, les deux plus couramment utilisés dans la pratique sont les fonctions triangulaires et trapézoïdales [45]. Pour cet exemple la figure 3.4 montre les fonctions d'appartenance associées aux différents termes linguistiques.



**Figure 3.4:** Univers du discours partitionné par les termes linguistique définis dans le tableau 3.1.

En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous. Le choix du nombre dépend de la précision souhaitée. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes [34].

Les graphiques ci-après (figure 3.5) sont tracés en prenant l'exemple les fonctions d'appartenance correspondant à des variables comportant trois et cinq termes.



(a) Désignations standard pour trois termes      (b) Désignations standard pour cinq termes

**Figure 3.5:** Désignations standard et fonctions d'appartenance.

### 3.7.2 Base de connaissance

Le noyau du dispositif de commande se trouve dans sa base de connaissances, constituée de règles floues qui décrivent la réaction du régulateur. Les règles floues permettent de déduire des connaissances concernant l'état du système en fonction des qualifications linguistiques fournies par l'étape de fuzzification. Ces connaissances sont également des qualifications linguistiques.

Ces règles stipulent la relation entre les ensembles flous d'entrée et les ensembles flous de commande correspondante [61]. La base de connaissances est composée d'une base de données et d'une base de règles.

La base de données regroupe :

- Les ensembles flous associés aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou,
- Les facteurs d'échelle (gains) en entrée (normalisation) et en sortie (dénormalisation).

La base de règle contient des règles de la forme :

$$\text{(Si } X_1 \text{ est } A_1 \text{ et } X_2 \text{ est } A_2 \dots \text{et } X_n \text{ est } A_n \text{ Alors } Y \text{ est } B) \quad (3.15)$$

Ou  $X_1, X_2, \dots, X_n$  et  $Y$  sont des grandeurs physiques caractéristiques du système et du problème de commande.

$A_1, A_2, A_n$  et  $B$  sont des variables linguistiques.

Suivant la nature de B on parlera de :

- Règles à conclusion symbolique (contrôleur de type Mamdani) : B est une valeur linguistique.

#### **Exemple 1 :**

**Si** l'erreur est (Négatif Moyen) et la variation de l'erreur est (Positif Petit) **Alors** la commande est (Négatif Petit).

- Règles à conclusion algébrique (contrôleur de Sugeno) : B est une valeur numérique (singleton) ou une équation mathématique bien précise (non floue).

#### **Exemple 2:**

**Si** l'erreur est (Négatif Moyen) et la variation de l'erreur est (Positif Petit) **Alors** la commande est -0.3.

Lorsque B est une valeur numérique on parle de règles de Takagi-Sugeno (d'ordre zéro), sinon, de règles à conclusion polynomiale.

### **3.7.3 Moteur d'inférence floue**

Le moteur d'inférence floue transforme, à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue afin de définir l'ensemble flou caractérisant la commande. En fait, le mécanisme d'inférence combine les règles floues pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie.

Aussi appelé le mécanisme d'inférence ou inférence floue, le moteur d'inférence est l'élément clé dans l'algorithme de logique floue qui émule la prise de décision de l'expert dans l'interprétation et l'application de connaissances sur la meilleure façon de contrôler le système

Cette étape consiste à définir les degrés d'appartenance de la variable de sortie aux ensembles flous [36].

Il existe plusieurs sortes d'inférences floues [60] on utilise souvent les inférences floues définies par Mamdani et Sugeno.

### 3.7.3.1 Inférence floue de Mamdani

Pour les moteurs d'inférences basés sur la méthode de Mamdani, les degrés d'appartenance de la variable de sortie, sont calculés à l'aide des opérateurs ET et OU réalisés par les deux fonctions Min et Max respectivement.

Supposons que la base de connaissances est constituée de  $n$  règles d'inférence contenant chacune  $m$  prémisses et une conclusion. Le fait est également constitué de  $m$  propositions floues.

Dans cette méthode, Le processus d'inférence peut être décrit de la façon suivante:

Règle 1 : si  $(x_1 \text{ est } A_{11}) \text{ et } \dots \text{ et } (x_m \text{ est } A_{1m})$  ; alors  $(y \text{ est } B_1)$

Règle 2 : si  $(x_1 \text{ est } A_{21}) \text{ et } \dots \text{ et } (x_m \text{ est } A_{2m})$  ; alors  $(y \text{ est } B_2)$

.....

Règle  $n$  : si  $(x_1 \text{ est } A_{n1}) \text{ et } \dots \text{ et } (x_m \text{ est } A_{nm})$  ; alors  $(y \text{ est } B_n)$

---

Fait :  $(x_1 \text{ est } A'_1) \text{ et } \dots \text{ et } (x_m \text{ est } A'_m)$

---

Conclusion :  $(y \text{ est } B')$

Où:  $x_1, \dots, x_m$  sont des éléments des univers du discours  $X_1, \dots, X_m$ .

Et  $A_{ji}, (j=1, \dots, m), A'_i$  sont des quantités floues sur l'univers du discours  $X_i$ .

Et  $B_{ji}, (j=1, \dots, m), B'$  sont également des quantités floues sur l'univers du discours  $Y$ .

Afin de définir une seule prémisse pour une règle  $i$ , les propositions:  $x_j \text{ est } A_{ij}$ , avec  $(j=1, \dots, m)$ , sont combinées par l'opérateur minimum.

La fonction d'appartenance de cette prémisse unique est donc donnée par [98]:

$$\mu_y^l = \max(\min(\mu_{A_i}, \mu_{R^l})) \quad (3.16)$$

Où:  $R^l$  est la relation floue entre les entrées  $x_i$  et les sorties  $y_i$ ,  $l=1, \dots, r$  avec  $r$  est le nombre des règles.

### 3.7.3.2 Inférence floue de Sugeno

Sugeno a proposé une méthode d'inférence floue qui garantit la continuité de la sortie.

Cette méthode d'inférence s'avère très efficace dans des applications faisant intervenir à la fois des techniques linéaires, d'optimisation et adaptatives [48].

Cette méthode utilise la même forme de règles que la méthode de Marndani, **Si Alors**, où l'antécédent est toujours une variable linguistique, mais le conséquent utilise des variables numériques.

Le conséquent peut être calculé à partir de n'importe quelle formule mathématique, une constante, un polynôme, ou une fonction de manière générale; tout dépend du comportement voulu.

Dans l'inférence de Sugeno, les règles floues sont exprimées de la façon suivante :

Règle  $i$  : si  $(x_1 \text{ est } A_{i1}) \text{ et } \dots \text{ et } (x_m \text{ est } A_{im})$  ; alors  $(y = f_i(x_1, \dots, x_m))$

Avec  $x_1, \dots, x_m$  et  $y$  sont des éléments des univers du discours  $X_1, \dots, X_m$

Et  $A_{i1}, \dots, A_{im}$  sont des termes linguistiques sur ces mêmes univers du discours  $y$  est une fonction de  $x_1, \dots, x_m$ .

### 3.7.4 Interface de défuzzification

C'est la dernière étape de la logique floue. Avant que les sorties du moteur d'inférence soient appliquées sur le processus à contrôler, ces dernières qui sont représentées comme des degrés d'appartenance aux fonctions de la sortie, doivent être converties. Alors l'étape de La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en variables réelles (commande précise) qui peuvent être utilisées [53].

Dépendamment de la forme de la sortie voulue, du type de contrôle, du type des fonctions d'appartenance de la sortie, il existe trois méthodes fondamentales de défuzzification [22].

#### 3.7.4.1 Méthode de centre de gravité

C'est l'une des méthodes les plus utilisées grâce à la haute précision qu'elle offre. La défuzzification par la méthode de centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance selon la formule suivante :

$$dU_n = \frac{\int x \mu_R(x) dx}{\int \mu_R(x) dx} \quad (3.17)$$

### 3.7.4.2 Méthode de centre de maximum

Cette méthode est connue pour sa simplicité vu qu'elle prend en considération que le sommet de l'espace actif sous la fonction d'appartenance, la valeur de sortie est estimé par l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle pour lequel la fonction d'appartenance est maximale. Dans le cas où les fonctions d'appartenance sont de type échelon, la précision de cette méthode est similaire à la première.

### 3.7.4.3 Méthode de moyenne de maximum

Dans cette méthode, le résultat de sortie correspond à la moyenne entre les maximums de chaque fonction d'appartenance. Elle est utilisée beaucoup plus dans les cas où la grandeur de sortie a des valeurs fixes et discontinues.

## 3.8 Les différents types de la commande à base de la logique floue

Dans le cadre des applications de la logique floue en commande des systèmes, les types de modèles les plus souvent utilisés sont ceux de Mamdani et de Takagi-Sugeno (noté TS).

### 3.8.1 Le modèle flou de type Mamdani

Dès 1975, Mamdani et Assilian publient les premiers résultats permettant une exploitation de cette théorie dans des systèmes de réglage. En utilisant une structure de contrôleur relativement simple, ils ont obtenu de meilleurs résultats lors de la commande de certains processus que ceux fournis par un régulateur standard de type PID.

Les systèmes d'inférence floue (SIF) sont composés par une collection de plusieurs règles. Dans le cas des SIF avec une structure Mamdani conventionnelle (modèle linguistique), la forme la plus commune de ces règles est la forme dite conjonctive donnée par l'équation :



$$R_1 : \text{Si } (x_1 \text{ est } A_{i1}) \text{ et } (x_2 \text{ est } A_{i2}) \text{ et} \dots \text{et } x_p \text{ est } A_{ip} ; \text{ alors } (y \text{ est } B_i) \quad (3.19)$$

Pour des entrées numériques précises,  $x_0$  et  $y_0$ , un sous-ensemble flou de sortie, noté  $F$ , est généré selon la relation :

$$\mu_F(z) = \max \min(\mu_{A_i}(x_0), \mu_{B_j}(y_0), \mu_{CK}(z)) \quad (3.20)$$

Plusieurs approches ont été proposées pour étudier le problème de stabilité. L'idée principale de ces approches est de considérer le contrôleur flou comme un contrôleur non linéaire et d'utiliser la théorie des systèmes non linéaire pour l'analyse de la stabilité [22].

### 3.8.2 Le modèle flou de type Takagi-Sugeno(T-S)

Un autre type de modèle flou, approprié pour l'approximation d'une classe générale de systèmes non linéaires est celui proposé en 1985 par Takagi-Sugeno [50]. Ce type de modèle est, comme celui de Mamdani, construit à partir d'une base de règles (Si...Alors...), dans laquelle si la prémisse est toujours exprimée linguistiquement, le conséquent utilise des variables numériques plutôt que des variables linguistiques. Le conséquent peut s'exprimer sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou d'une fonction ou d'une équation différentielle dépendant des variables associées à l'antécédent. D'une manière générale, un modèle de type Takagi-Sugeno (TS) est basé sur une collection des règles  $R_i$  du type :

$$R_i : \quad \mathbf{Si } x \text{ est } A_i \mathbf{ Alors } y_i = f_i(x), \quad (3.21)$$

Où  $R_i$  dénote la  $i$ -ème règle du modèle est  $r$  est le nombre de règles que contient la base de règles.  $x$  est la variable d'entrée (antécédent) et  $y$  est la variable de sortie (conséquent).  $A_i$  est le sous-ensemble flou de l'antécédent de l' $i$ -ème règle, définie, dans ce cas, par une fonction d'appartenance (multivariable) de la forme :

$$\mu_{A_i}(x) : R \rightarrow [0 \ 1] \quad (3.22)$$

La particularité d'un modèle T-S est que la logique floue est seulement utilisée dans la partie prémisse des règles. La partie conclusion est décrite par des valeurs numériques.

Il est intéressant de noter qu'il existe d'autres approches de commande en utilisant la logique floue comme la commande floue du type PI ou PID, la commande neuro-floue, la commande par mode glissant flou et la commande floue adaptative.

### 3.9 La commande par logique floue du système VSC-HVDC

Dans cette section, nous présentons le régulateur flou pour le réglage de la tension et de courant d'un système VSC-HVDC à trois niveaux à point neutres calés.

La figure 3.6 suivante, montre le schéma d'un contrôleur P.I. flou. Les gains  $K_1$  et  $K_2$  en entrées et  $K_3$  pour la sortie permettent la normalisation du contrôleur au sens où les variables sont comprises entre -1 et +1. On utilise cette configuration pour la commande des courants alternatifs et la tension continue dans le système VSC-HVDC.

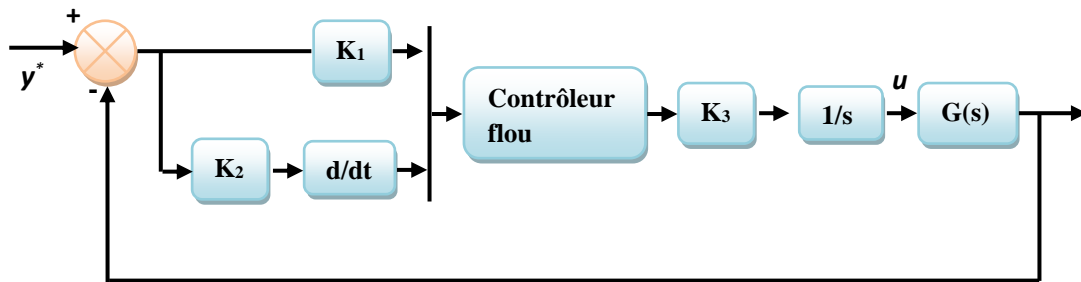


Figure 3.6: Schéma du régulateur P.I. flou.

La commande floue est une commande indirecte dans laquelle certaines caractéristiques du système sont exploitées pour déterminer la loi de commande permettant de garantir la validité du modèle découplé et obtenir des performances dynamiques élevées.

La figure 3.7 représente la commande floue des composantes (direct et quadrature dans le repère de park) de courants aux cotés alternatifs pour les deux convertisseurs (redresseur ou onduleur).

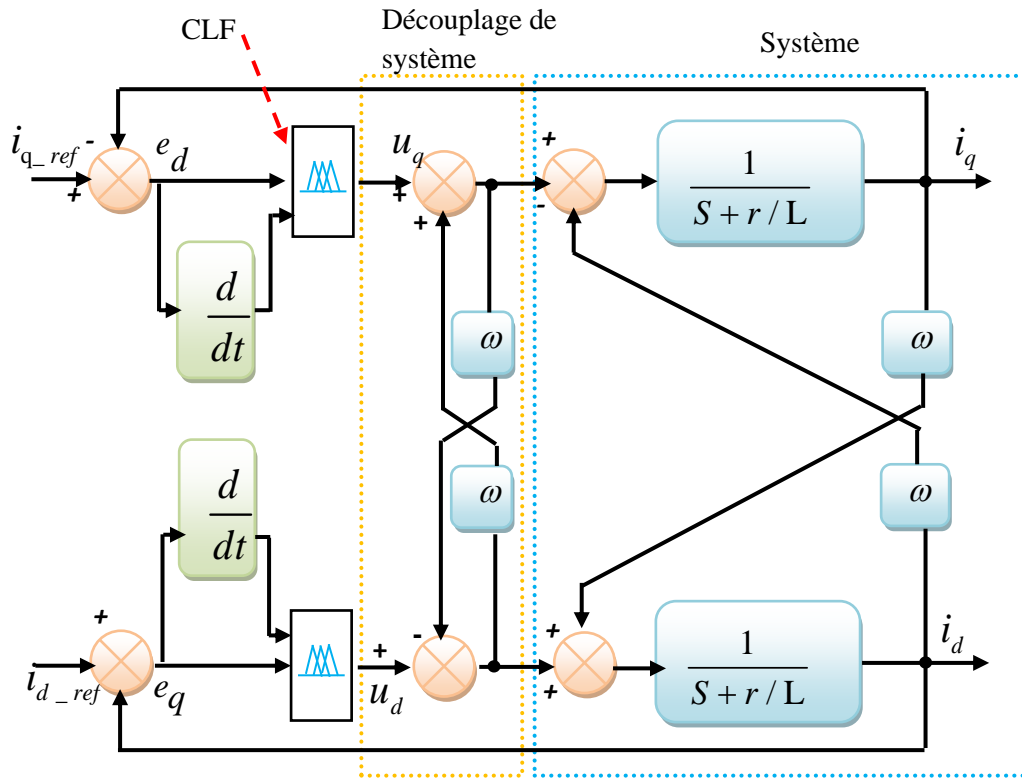


Figure 3.7: Commande floue des courants du VSC-HVDC (convertisseurs: redresseur et onduleur).

Nous donnons ci-dessous les trois étapes de mise au point du contrôleur flou :

- Fuzzification
- Règles d'inférence
- Défuzzification

### 3.9.1 Fuzzification

On dispose de quatre entrées  $ed$ ,  $eq$  et leurs variations  $ded$ ,  $deq$ . En se fixant deux lois pour chacune d'elles, le nombre de règles du contrôleur est 9.

Les fonctions de fuzzification utilisées ont la forme trapézoïdale pour les variables d'entrée et la forme triangulaire pour les variables de sortie. Dans le choix des fonctions d'appartenance, sont retenus trois ensembles flous pour les variables d'entrée et cinq ensembles flous pour les variables de sortie.

a) Ensembles flous pour les variables d'entrée :

N : Négatif

**P** : Positif

**Z** : Environ de Zéro

**b)** Ensembles flous pour les variables de sortie :

**NG** : Négatif grand

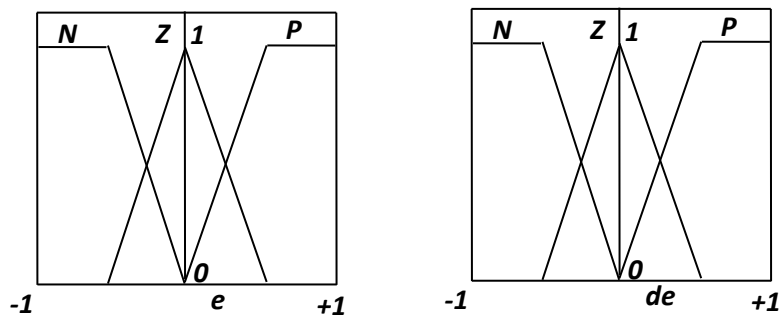
**N** : Négatif

**Z** : Environ de Zéro

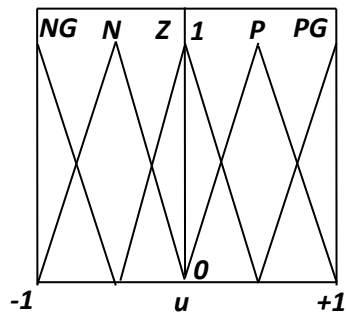
**P** : Positif

**PG** : Positif Grand

La figure 3.8 ci-dessous montre les formes des fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie.



a. Fuzzification de l'erreur et le dérivé de l'erreur



b. Fuzzification de la commande

**Figure 3.8:** Formes des fonctions d'appartenance utilisées.

Les valeurs des gains d'adaptation sont :

**a) pour les régulateurs de courant :**

$K_1=0.1$ ,  $K_2=40$  et  $K_3=100$ .

**b) pour le régulateur de tension continue :**

$K_1=0.1$ ,  $K_2= 40$  et  $K_3=100$ .

### 3.9.2 Règles d'inférence

Une comparaison instantanée entre les dynamiques des trois variables :  $e$ ,  $de$  et la commande  $u$  permet d'avoir les neuf règles du tableau 3.2 ci-dessous.

**Tableau 3.2:** Tableau des règles d'inférence.

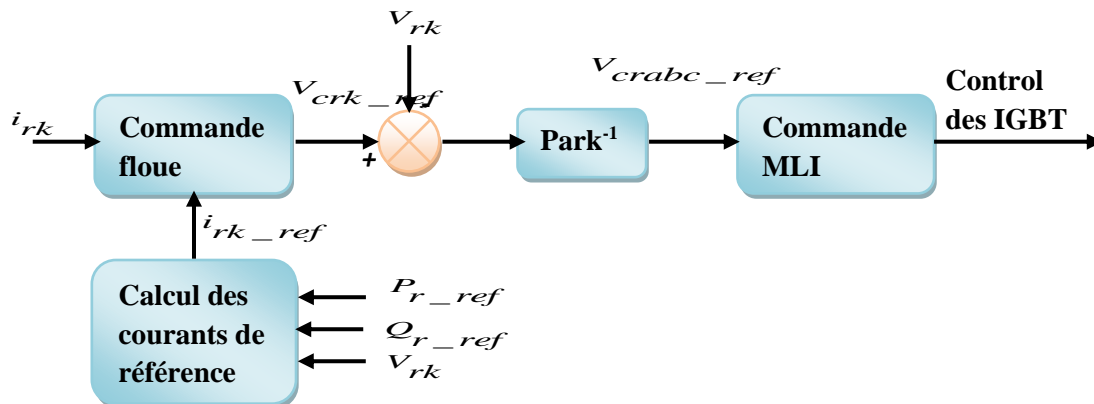
	$e$	$N$	$Z$	$P$
$de$				
$N$		$PG$	$P$	$Z$
$Z$		$P$	$Z$	$N$
$P$		$Z$	$N$	$NG$

### 3.9.3 Défuzzification

Pour la défuzzification, nous utiliserons la méthode du centre de gravité, plus simple à calculer et ce dans le but de faciliter l'implantation de la commande sur un système programmé.

### 3.9.4 Schéma de commande global

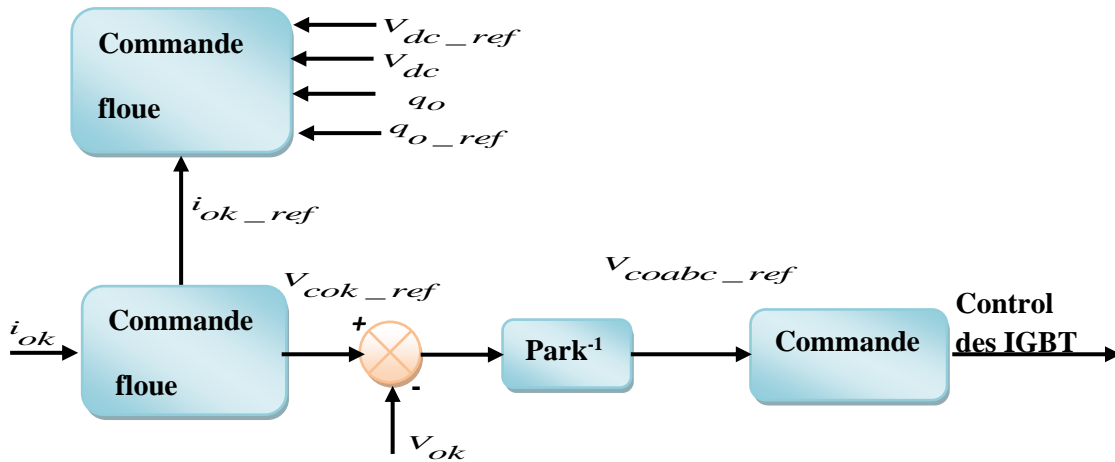
La figure 3.9 montre le diagramme de commande par la logique floue du HVDC que nous utilisons dans cette étude. Les figures 3.9 et 3.10 concernent respectivement la commande du convertisseur redresseur et la celle du convertisseur onduleur.



( $P_r$  et  $q_r$  : puissances active et réactive du redresseur,  $i_{rk\ k=d,q}$  : composantes de courant coté redresseur,  $V_{crk}$  : tensions de commande du redresseur,  $V_{rk}$  : tensions de réseau coté redresseur)

Schéma bloc de commande du redresseur

**Figure 3.9:** Commande floue du système VSC-HVDC (commande du redresseur).



( $P_o$  et  $q_o$  : puissances active et réactive de l'onduleur,  $i_{ok\ k=d,q}$  : composantes de courant coté onduleur,  $V_{cok}$  : tensions de commande de l'onduleur,  $V_{ok}$  : tensions de réseau coté onduleur,  $V_{dc}$  tension continue coté onduleur)

Schéma bloc de commande de l'onduleur

Figure 3.10: Commande floue du système VSC-HVDC (commande de l'onduleur).

### 3.10 Résultats de la simulation

Pour analyser les performances de la commande proposée avec la logique floue appliquée au modèle de conversion de l'énergie du système représenté par la Figure 2.18, le logiciel MATLAB / Simulink est utilisé en tenant compte le cas du fonctionnement du système dans les conditions normales et le cas de réponses des régulateurs en appliquant des changements (échelons négatifs) de référence progressifs de puissance active, de tension continue et de puissance réactive.

La description du système étudié et leurs caractéristiques sont déjà détaillées dans le chapitre 2 (section 2.5.1).

#### 3.10.1 Fonctionnement du système dans les conditions normales

Les Figures 3.11 et 3.12, montrent respectivement, les formes d'ondes de la puissance active, de la puissance réactive, de la tension DC et les tensions alternatives dans le réseau AC1 et AC2.

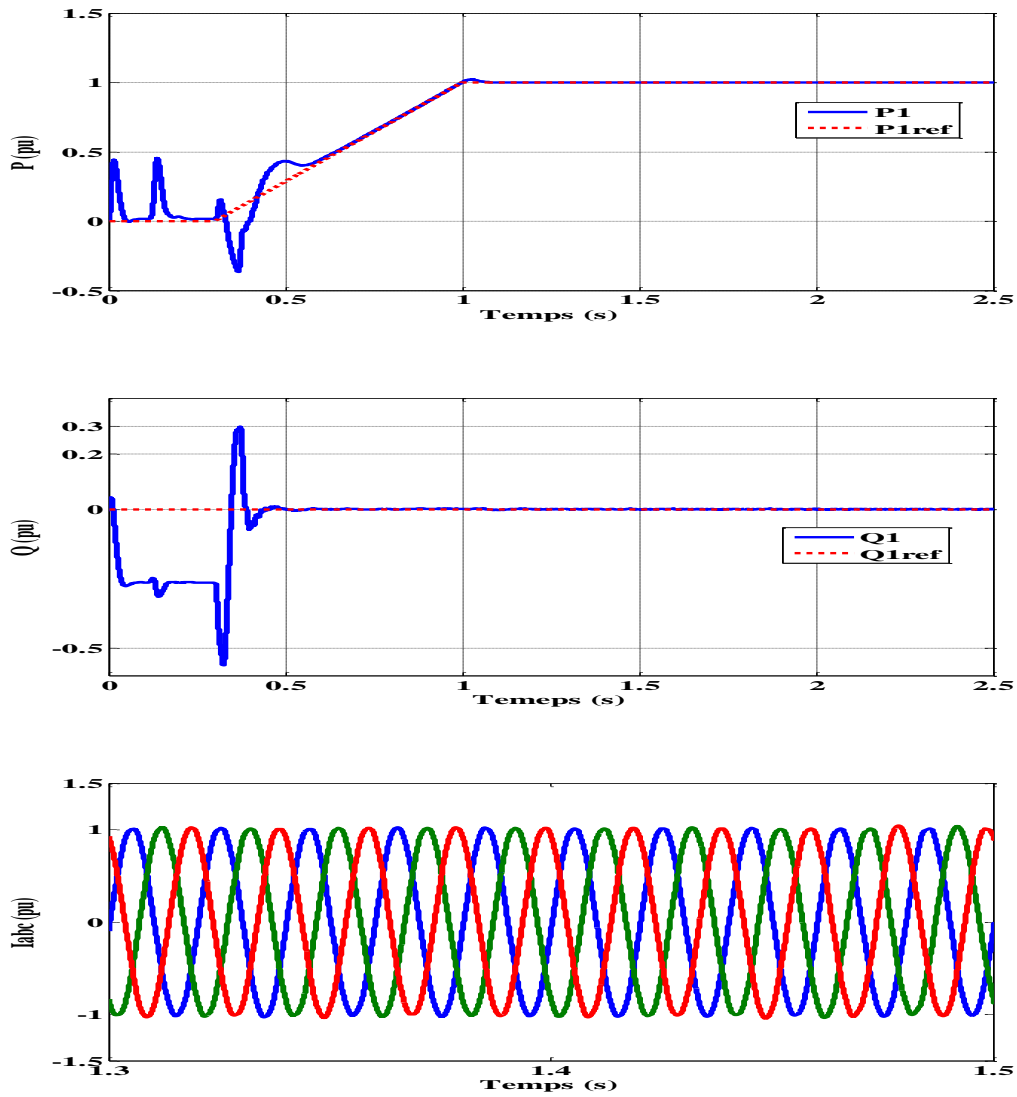
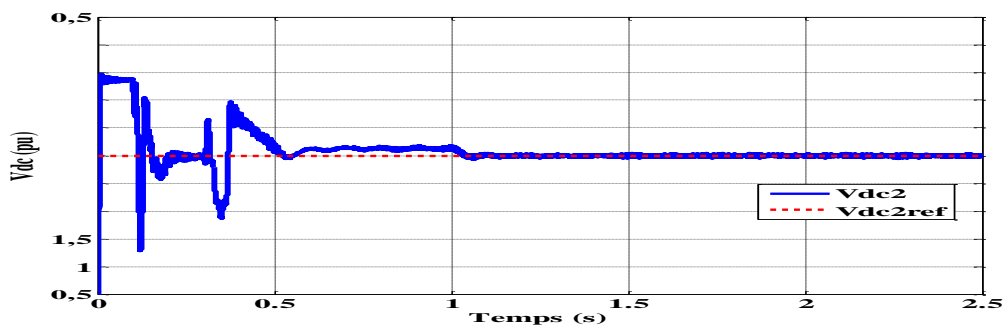
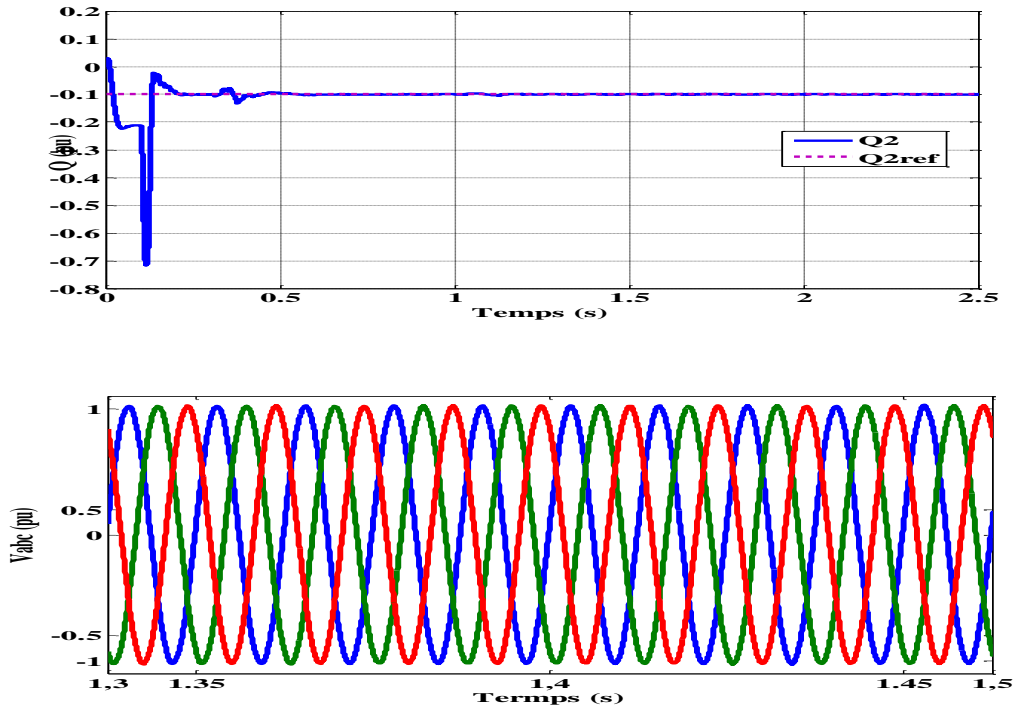


Figure 1.11: Démarrage et réponse en régime normal de liaison VSC-HVDC (station 1).





**Figure1.12:** Démarrage et réponse en régime normal de liaison VSC-HVDC (station 2).

Les résultats de simulations dans les figures 3.11 (station1) et 3.12 (station2), démontrent que le réseau AC1 fournit l'énergie demandée de 200 MW, une tension continue bien régulée à 100 KV et des signaux de tension sinusoïdaux.

Les résultats obtenus montrent l'évolution de la puissance active et réactive de notre système et le bon fonctionnement de cette simulation.

### 3.10.2 Réponses des régulateurs

Pour tester la robustesse du contrôleur logique flou nous avons appliqués des changements (échelons négatifs) de référence progressifs de puissance active, de tension continue et de puissance réactive.

À  $t=1.5s$ , une diminution négative de 10% soit  $(-0.1p.u)$  est appliquée à la référence de la puissance active de la station1, puis à  $t=2s$  une diminution négative de 10% soit  $(-0.1p.u)$  est appliquée à la référence de la puissance réactive. Dans la station 2, à  $t=2.5s$  une diminution de  $(-0.5p.u)$  est appliquée à la référence de la tension continue DC.

Les courbes obtenues sont présentées sur les figures 3.13 (station1) et 3.14 (station2).



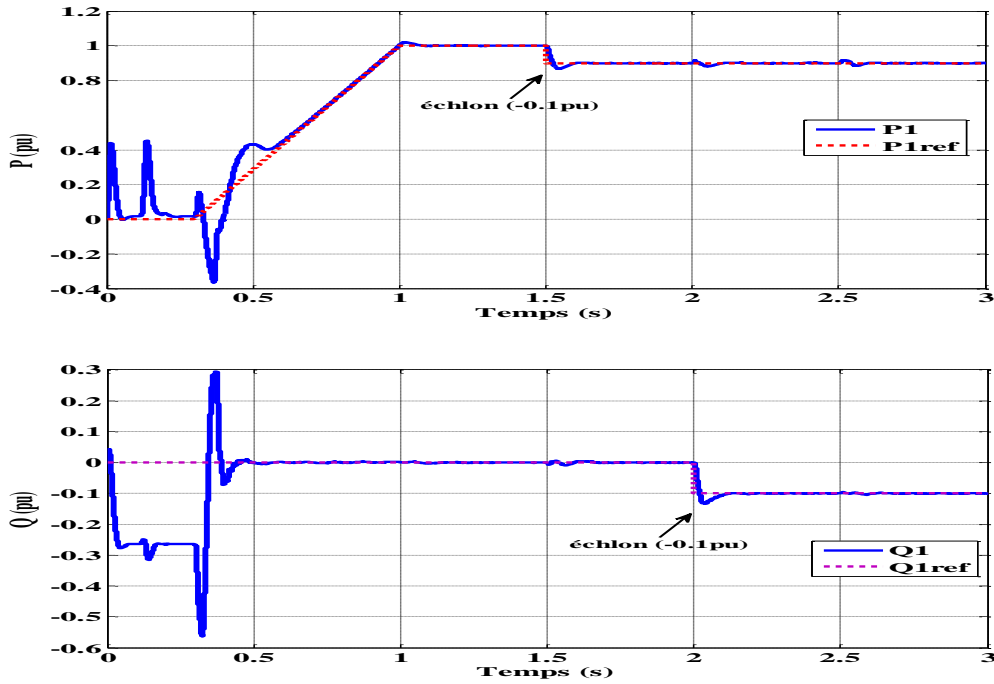


Figure 3.13: Réponse transitoire des régulateurs suite à un échelon (station 1).

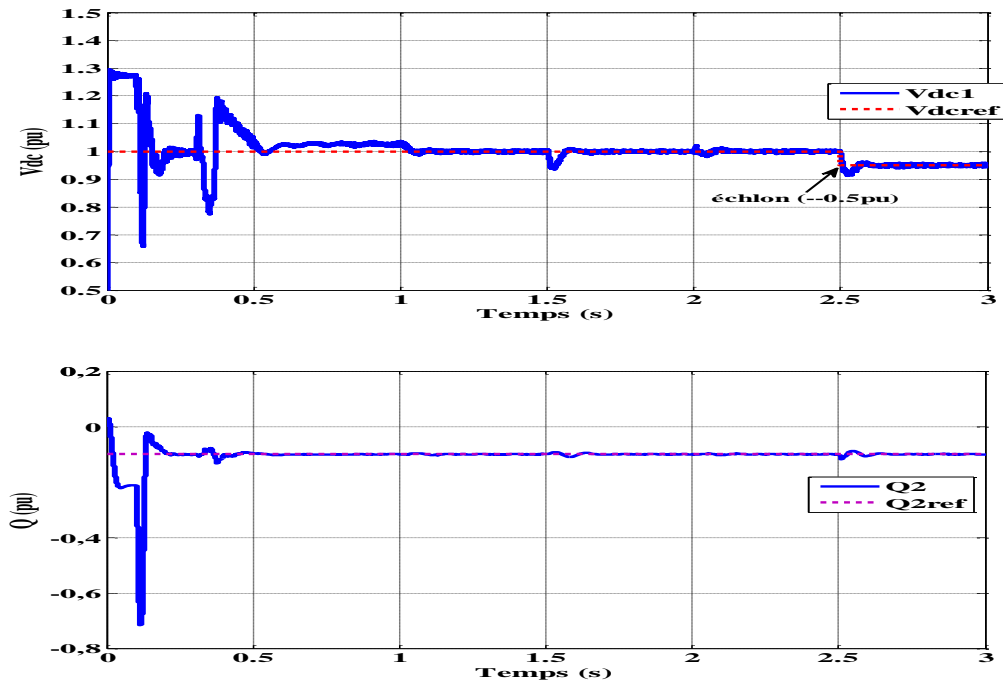


Figure 3.14: Réponse transitoire des régulateurs suite à un échelon (station 2).

Nous avons remarqué à partir de les figures 3.13 et 3.14 qui présentent le comportement de la tension continue coté redresseur et onduleur, ils arrivent à suivre la référence ce qui implique que le système est robuste.

Nous pouvons interpréter de la même manière que précédemment (chapitre 2 section 2.5.3) le comportement du système avec le régulateur flou.

En observant les résultats précédents, on voit que le comportement des deux régulateurs est identique durant les régimes permanents, mais le régulateur flou présente moins d'oscillations au démarrage et lors des changements de consigne.

### **3.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base de la logique floue et des ensembles flous.

Nous avons également montré l'intérêt de la logique floue dans le domaine du contrôle de processus. Cette approche permet de tenir compte à la fois des connaissances d'un expert humain et de l'incertitude et de l'imprécision des données traitées par le contrôleur.

Nous avons aussi montré l'intérêt de la théorie des ensembles flous pour formaliser le traitement de l'inconsistance et de l'incertitude sur le modèle du système, afin d'évaluer leur comportement dynamique par un ensemble de règles linguistiques. En effet, le fonctionnement d'un contrôleur flou dépend d'un nombre très important de paramètres (fonctions d'appartenance, règles floues, règles d'inférence, défuzzification) qu'il faut régler lors de la conception, et comme ces paramètres s'influencent mutuellement, il est peu probable qu'une méthode de synthèse traitant indépendamment chaque sous-système du contrôleur flou puisse fournir des résultats performants.

Dans ce cadre, nous avons présenté et analysé la structure interne d'un système d'inférence flou, ainsi que les différents types de commande floue.

En effet la conception d'un contrôleur flou n'est pas toujours chose aisée, lorsqu'on utilise un contrôleur, on dispose de nombreux outils de synthèse permettant de choisir au mieux les paramètres du régulateur en fonction de la structure ou du modèle du système à contrôler.

Nous avons effectué une série de tests de simulation par la technique de commande à base de logique floue appliquée au modèle de référence du système VSC-HVDC triphasé à trois-niveaux proposé.

Cette technique de commande a considérablement amélioré le fonctionnement de ce dernier, non seulement en régime permanent équilibré, mais également durant les perturbations que nous avons testées.

Nous pouvons ainsi conclure que cette technique de commande permet d'atteindre les résultats escomptés en limitant l'influence des variations paramétriques et en éliminant les répercussions des perturbations de la source sur les sorties du système.

Une fois l'implantation de la stratégie de commande est totalement complète, nous avons effectué une série de tests qui permet de valider d'une part le bon fonctionnement de notre système et d'autre part la robustesse de chacune des lois de commande implantées.

Le chapitre qui suit comprendra les résultats de simulations obtenus lors de l'application de la stratégie de commande à base de logique floue ainsi en comparaison avec les correcteurs conventionnels.

## **Chapitre 4**

**Simulations et analyse des résultats**

## 4.1 Introduction

Dans cette dernière partie, nous nous sommes intéressés à la comparaison du deux structures de contrôle (PI, logique floue) appliqué à notre système.

Les performances des techniques de commande appliquées à notre système sont évaluées.

Dans ce contexte, cette partie consiste à étudier et d'analyser le comportement dynamique du système VSC-HVDC à trois niveaux à point neutre calé.

Il s'agit d'améliorer les performances du système VSC-HVDC en régime dynamique par la comparaison des résultats obtenus de la simulation sous ces diverses perturbations et variations paramétriques selon chaque loi de commande implantée, en utilisant la commande adoptant le contrôleur PI et la nouvelle commande à base de la logique floue (aucun contrôleur PI n'est utilisé).

Ces deux structures de commande (PI, logique floue) ont été simulées en considérant le système représenté par la figure 4.1.

L'analyse et la simulation de système étudié sont développées sous l'environnement Matlab/Simulink/Simpowersystem.

Finalement, le comportement général du modèle en présence de multiples perturbations est analysé en tenant compte de la présence de quatre scénarios:

Scénario 1: Variation de paramètres.

Scénario 2: Changement de charge.

Scénario 3: Défaut AC triphasé au point de couplage commun (PCC) du réseau AC2.

Scénario 4: Défaut DC au niveau du câble de transmission DC.

Il est également important de mentionner que, la liaison VSC-HVDC est contrôlée par les deux convertisseurs aux extrémités du bus DC ou, la conception du contrôle des deux convertisseurs station1 (redresseur) et station 2(onduleur) est identique.

Le convertisseur 1 se charge de contrôler la puissance active et la puissance réactive, tandis que l'autre se charge de contrôler la tension DC et la puissance réactive.

## 4.2 Description du système étudié

Le système étudié est représenté dans la figure 4.1.

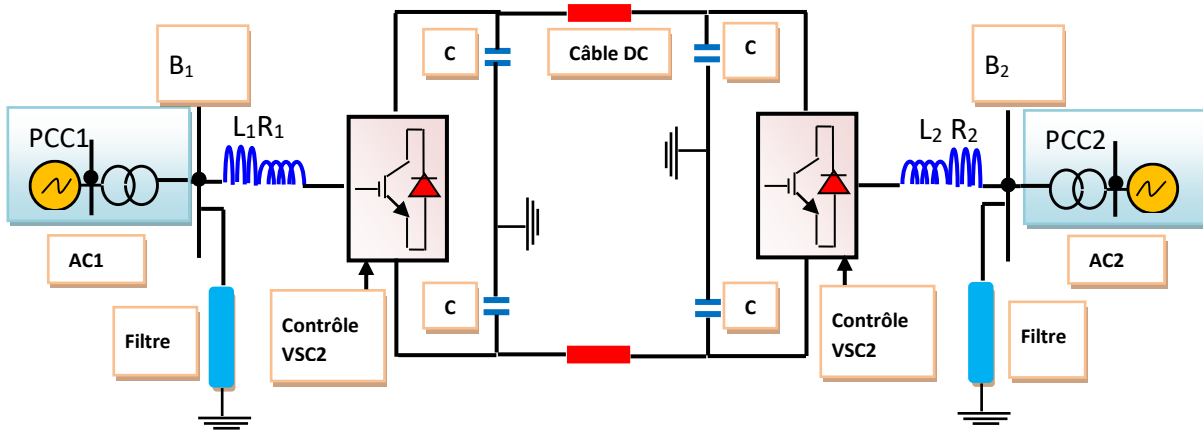


Figure 4.1: Modèle d'un système de transmission VSC-HVDC.

Le système étudié composé de deux réseaux AC1 et AC2 (230 kV, 2000MVA, 50Hz) qui sont représentés de la même manière, et deux stations (redresseur et onduleur), qui ont une structure identique (VSC1, VSC2) à trois niveaux point neutres calés (3L-NPC VSC-HVDC) à base d'IGBT pour la transmission.

L'énergie produite par le réseau AC1 est transportée au réseau AC2 via les deux stations HVDC qui sont reliées entre elles par deux câbles DC de 75 km chacun.

Notre système peut être divisé en trois parties principales :

- la partie alternative du système (système CA)
- la partie continue du système (système CC)
- et les deux stations conversion (redresseur et onduleur).

La description du modèle et les différents blocs qui le composent est indiqué dans la section 2.5.1.

Est également important de mentionner que la structure des lois de commande implantées ils ont été mentionnés aux sections (2.4 et 3.9.4), figure 2.10 et figures 3.10 et 3.11.

### 4.3 Simulations

Dans cette partie, on se concentre sur l'évolution et les performances dynamiques du système VSC-HVDC. Les résultats des simulations de système VSC-HVDC à trois niveaux sont présentés en vue de prendre en considération toutes les dynamiques du système.

La technique de commande basée sur l'utilisation de la logique floue est appliquée. Une série de tests est effectuée illustrant la supériorité de cette loi de commande face aux perturbations et aux variations des paramètres, pour démontrer l'amélioration des performances du système comparativement avec celle de commande basée sur l'utilisation de régulateurs linéaires proportionnel et intégral (PI). La robustesse de chacune des lois de commande implantées et aussi analyser.

Il est également important de mentionner que les formes d'ondes présentées pour chacun des scénarios sont: la forme d'onde de la puissance active et de la puissance réactive de la station 1 et de la tension DC et la puissance réactive de la station 2.

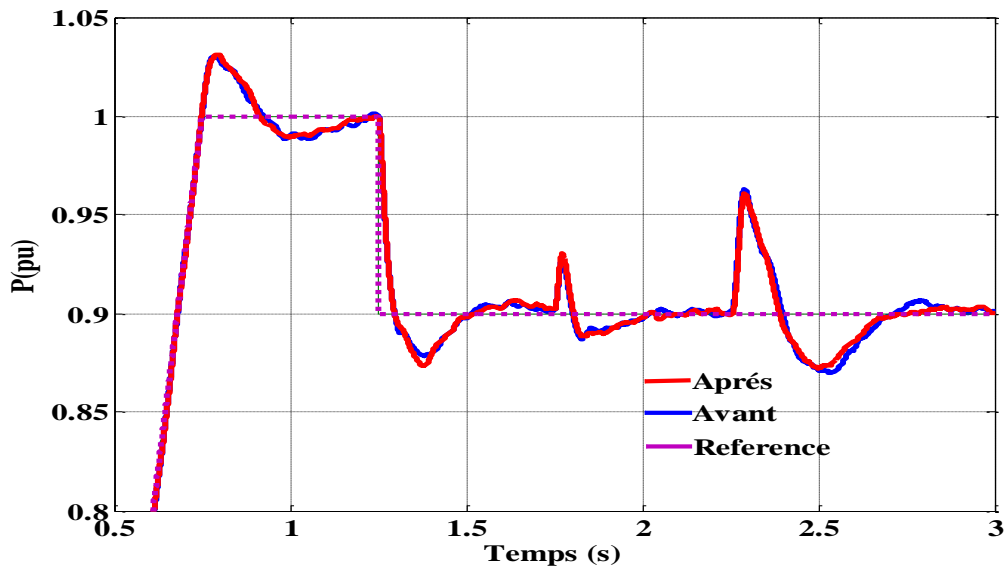
#### 4.3.1 Variation de paramètres

Dans ce cas, la comparaison des performances entre le contrôleur flou et les correcteurs conventionnels (PI) est effectuée. Ces performances sont également évaluées dans le cas de variation des paramètres du système VSC-HVDC à savoir: une diminution de 25% des valeurs nominales côté DC.

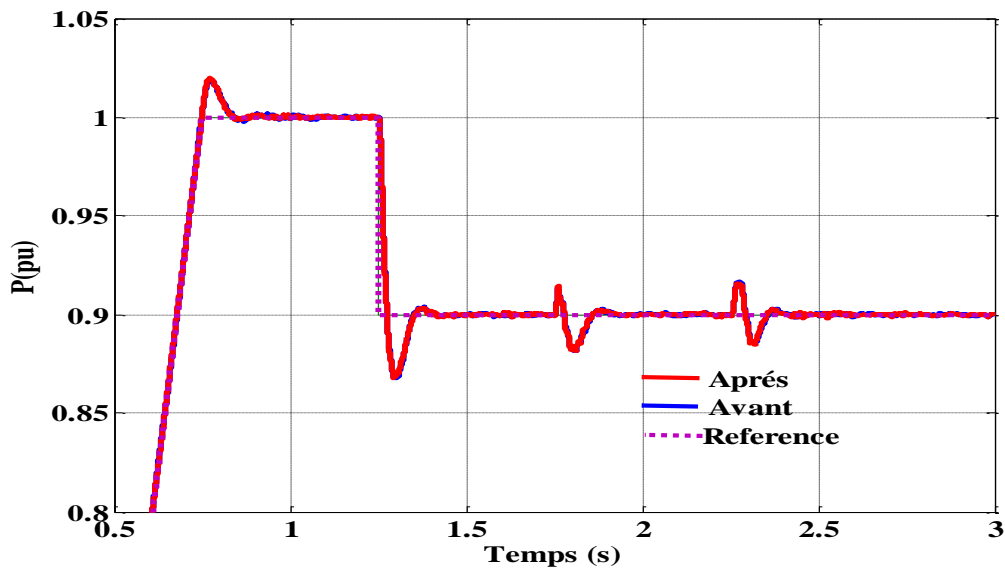
Pour tester la robustesse, on démunies de câble DC de 25% de leurs valeurs initiales. On applique des changements de consigne des puissances active et réactive de la station 01 et la puissance réactive et la tension DC de la station 02 afin de comparer les performances des deux types de commande : analogique et floue. Les figures 4.2 et 4.3 pour la station 01 montrent respectivement les comportements de la puissance active et de la puissance réactive. La variante 1 désigne l'état du système initial (avant la variation paramétrique) et la variante 2

désigne l'état du système quand les paramètres de cabale DC ont été démines de 25% de leurs valeurs initiales.

La comparaison des résultats observés dans les figures 4.2.a et 4.2.b montrent clairement que la robustesse est meilleure avec la logique floue. Cette performance de la logique floue se vérifie aussi pour le réglage de la puissance réactive dont les résultats sont montrés par la figure 4.2 (a et b).



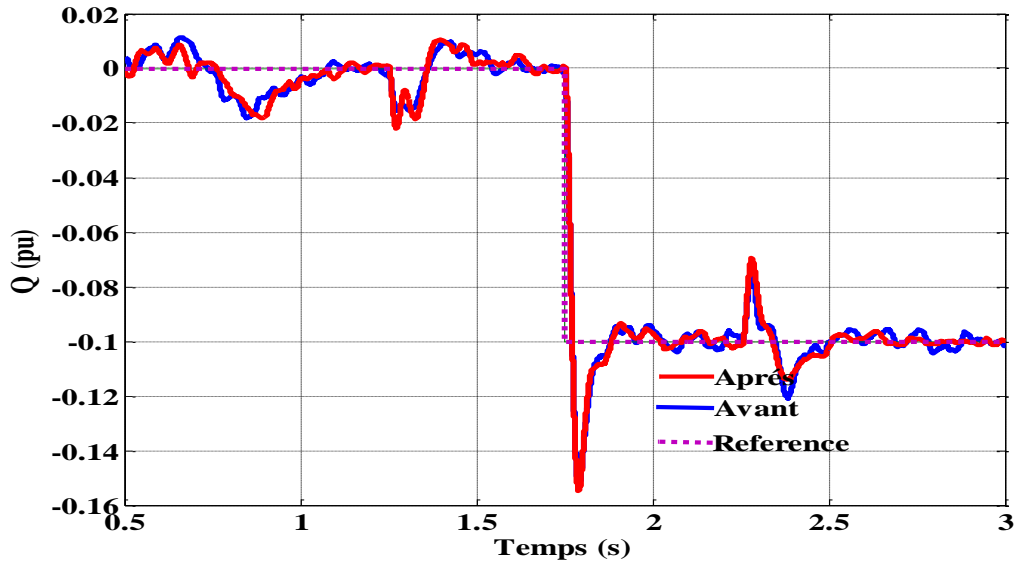
(a) Réglage par PI analogique



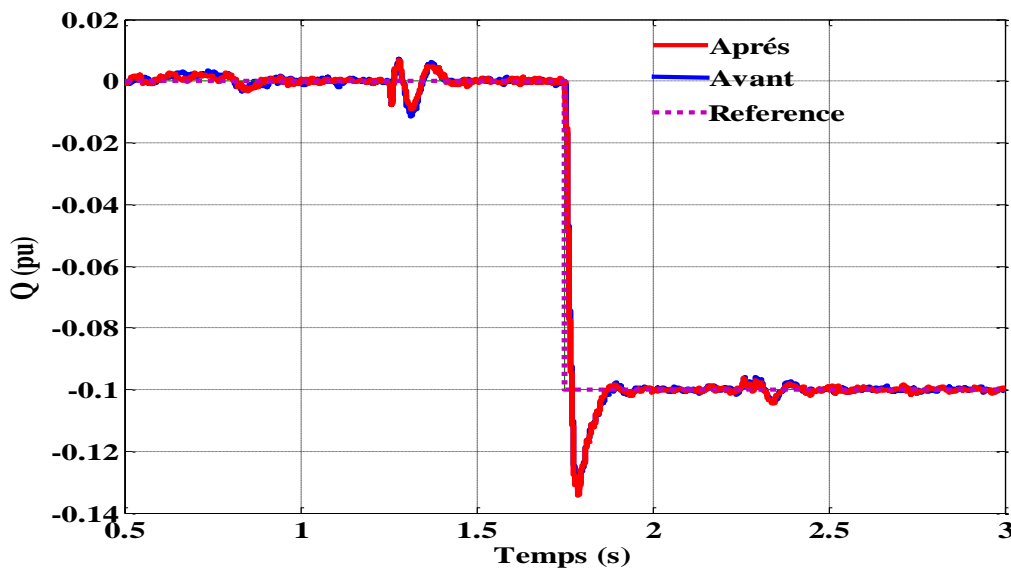
(b) Réglage par logique floue

**Figure 4.2:** Variation de la puissance active.





(a) Réglage par PI analogique

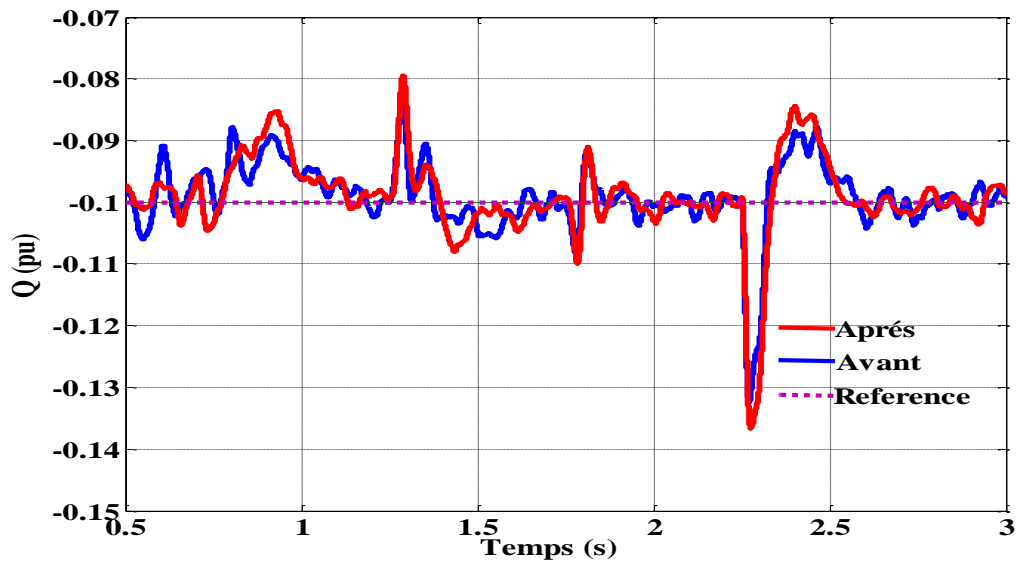


(b) Réglage par logique floue

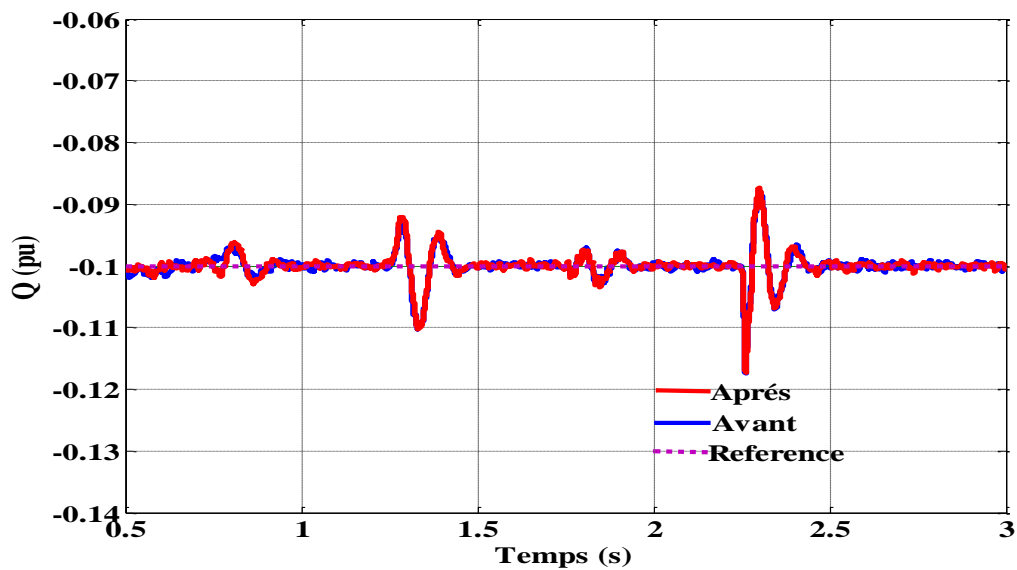
**Figure 4.3:** Variation de la puissance réactive.

La robustesse de la logique floue est également confirmée par le comportement de réglage de la station 02 comme le montrent les résultats des figures 4.4 et 4.5 ci-dessous. Tel que les performances dynamiques du système dans le cas de contrôle flou après la variation paramétrique reste inchangé, par contre on constate une dégradation considérable des performances dans le cas de réglage par le régulateur PI. Ce qui implique la supériorité de la technique de la logique floue pour la commande des systèmes. La robustesse appréciable de la logique floue en comparaison avec le PI analogique est justifiée vu, le dimensionnement de

contrôleur flou est effectuée de façon indépendante par rapport au comportement mathématique du système étudié, ce qui n'est pas le cas de réglage analogique qui est lié directement au modèle du système.

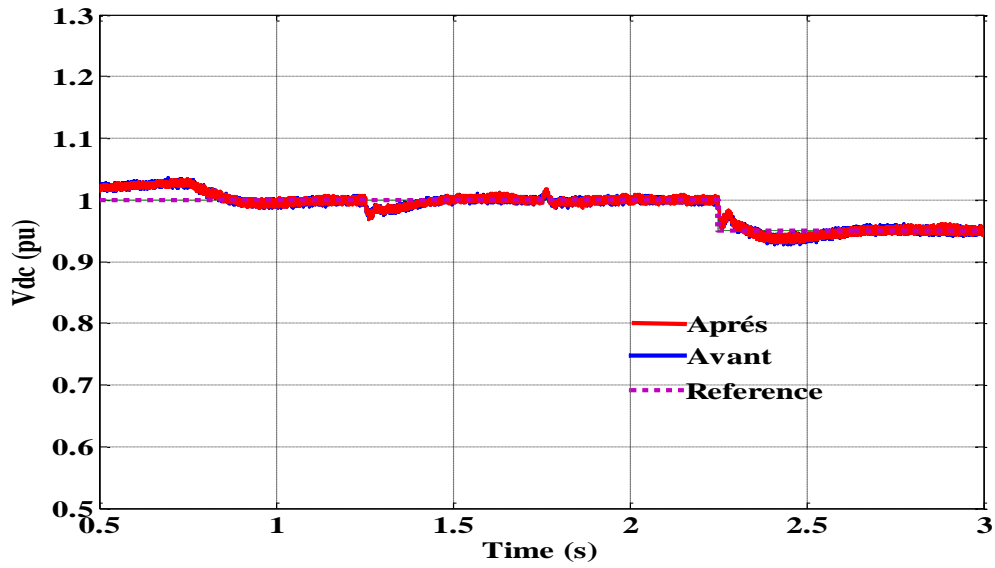


(a) Réglage par PI analogique

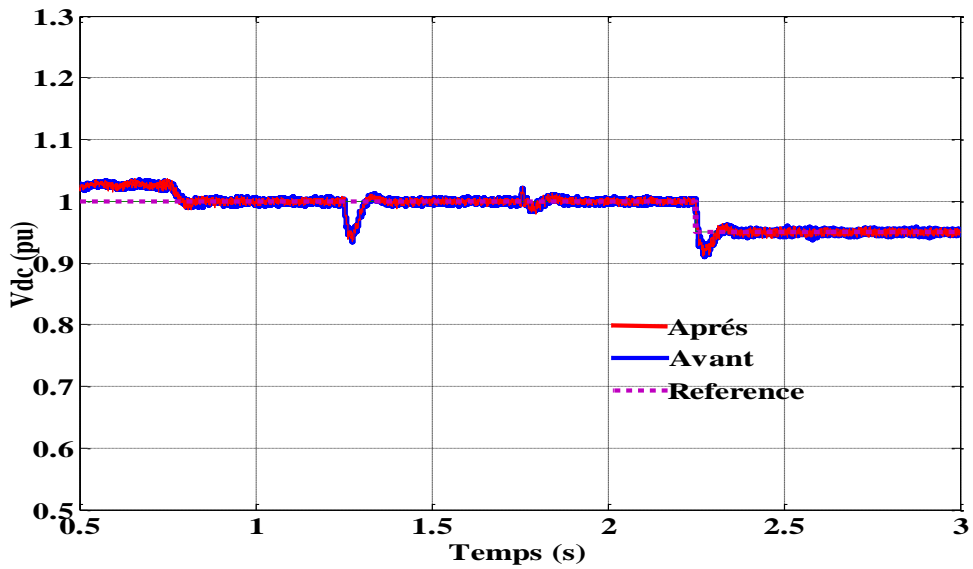


(b) Réglage par logique floue

**Figure 4.4:** Variation de la puissance réactive



(a) Réglage par PI analogique



(b) Réglage par logique floue

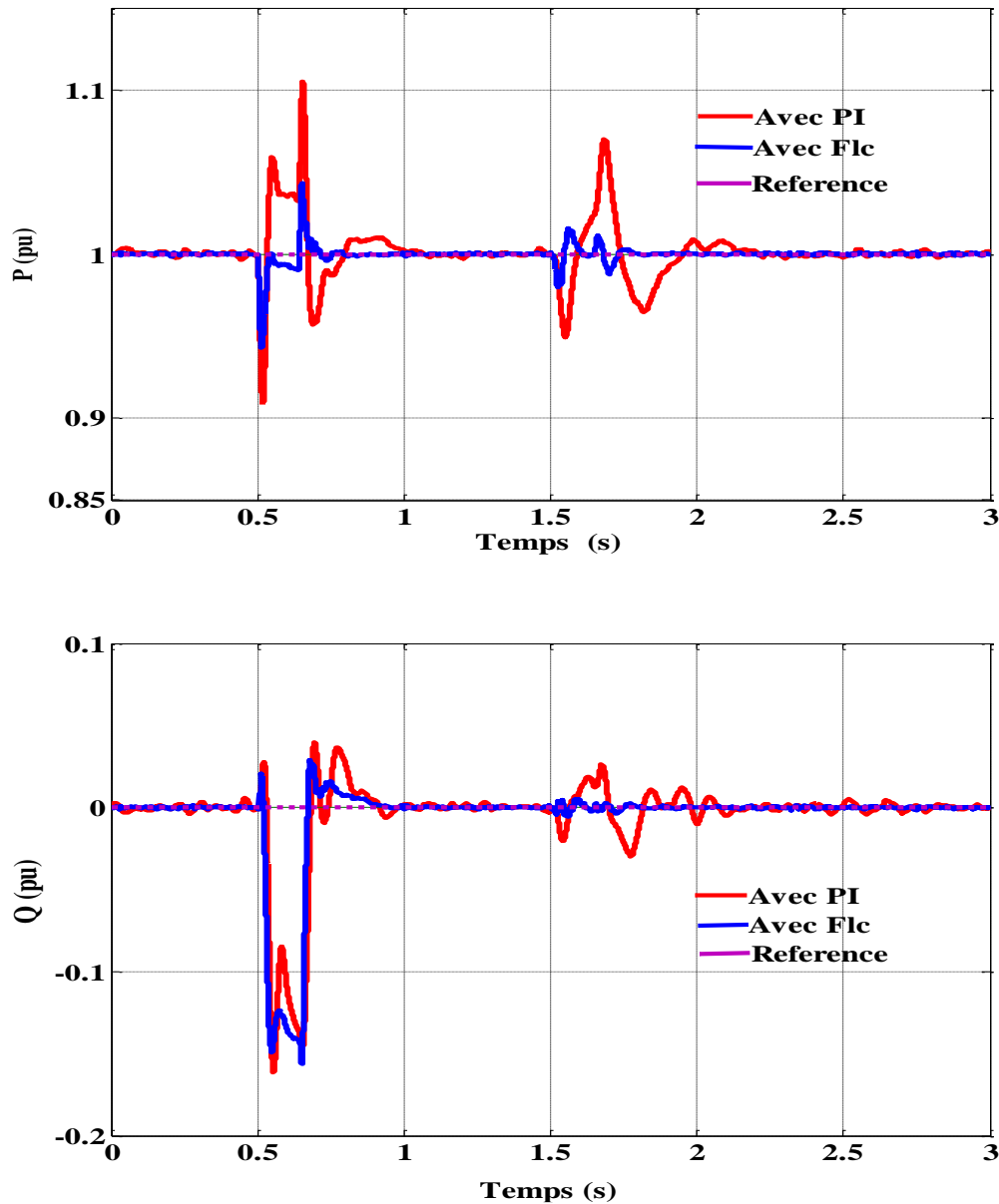
**Figure 4.5:** Variation de la tension DC

### 4.3.2 Changement de charge

Ce test montre le comportement du système lors du changement de charge. Dans ce cas, un changement de charge est appliqué aux deux côtés AC du système, nous faisons une

diminution de 20% de sa valeur nominale, une diminution à l'instant 0.5 s est appliquée a la station VSC1 puis à l'instant 1.5 s au VSC2.

Les résultats obtenus pour ce test sont donnés par les figures 4.6, 4.7.



**Figure 4.6:** La puissance active et réactive suite à un changement de charge (Régulateur PI, flou station1).

Face à ces variations de la charge, on constate la bonne efficacité de poursuite du contrôle par logique floue pour la correction des formes d'ondes des puissances (active et réactive),

comme montre la figure 4.6. La tension du bus continu est influencée par ces variations, elle présente une légère augmentation (figure 4.7) pendant la diminution de la charge.

Dans les deux cas, la tension DC revient à son état stable après le passage du régime transitoire. De plus la loi de commande à base de la logique floue permet la transition de la puissance avec un dépassement moins important que dans le cas d'un contrôleur PI.

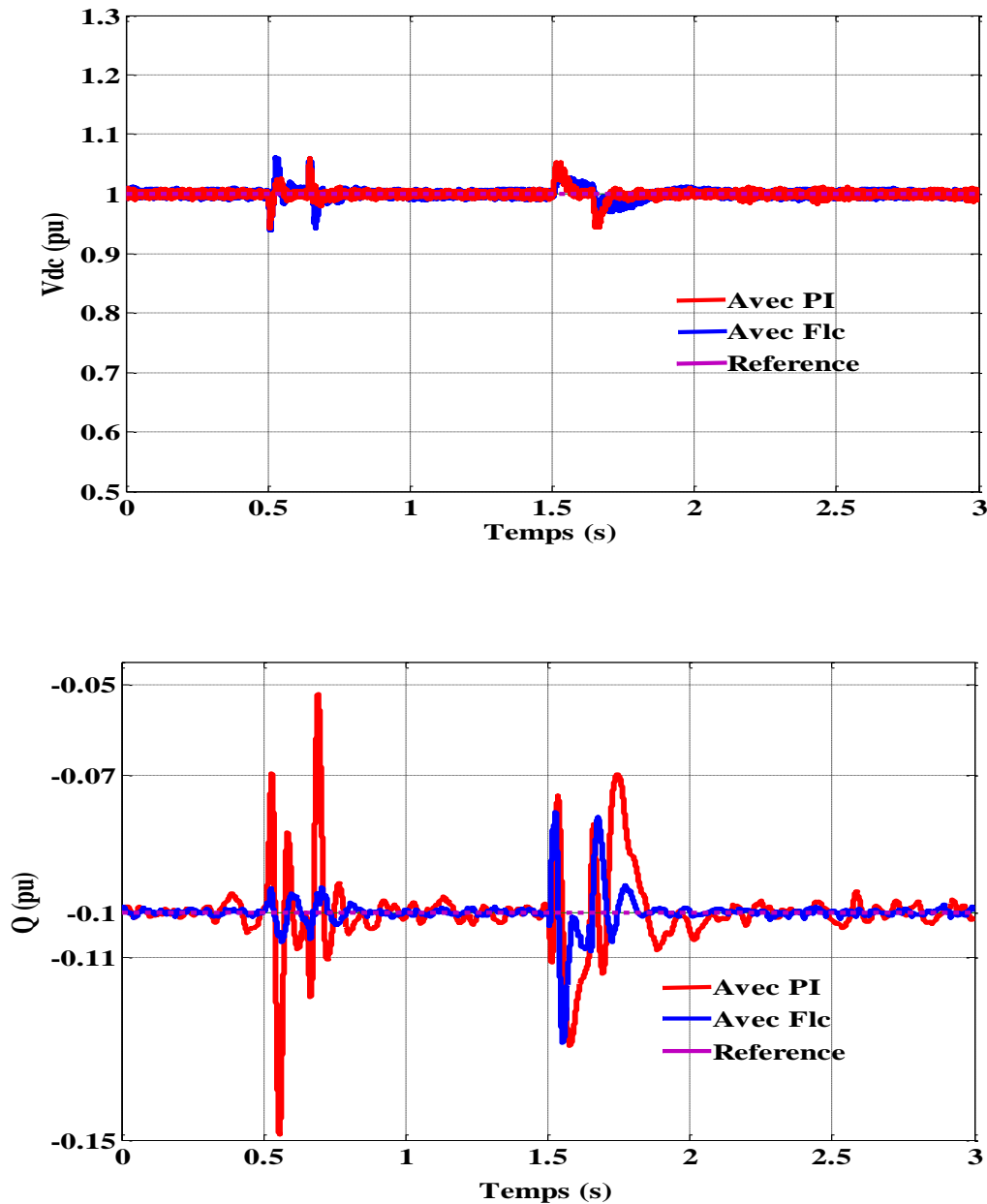


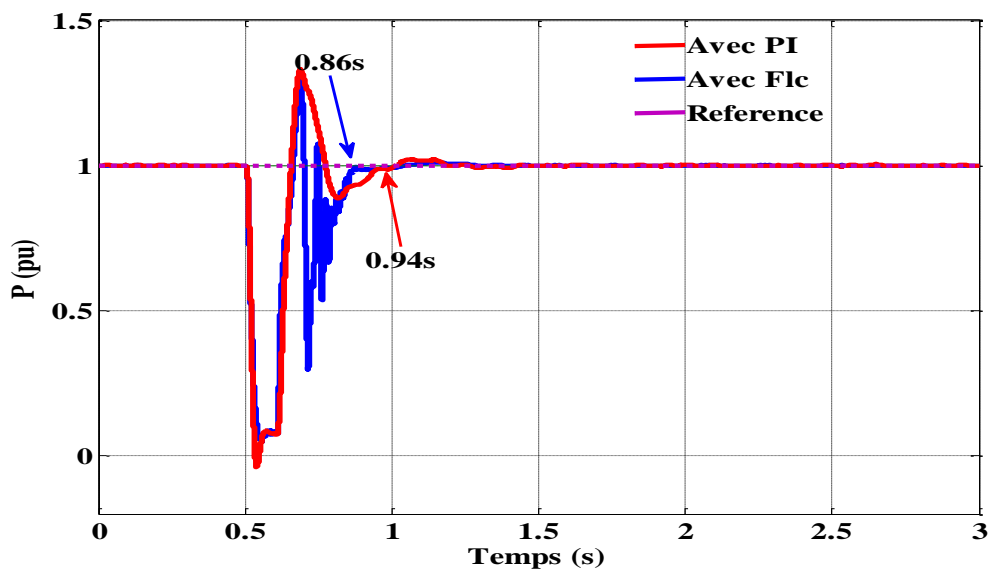
Figure 4.7: La tension DC et la puissance réactive suite à un changement de charge (Régulateur PI, flou station2).

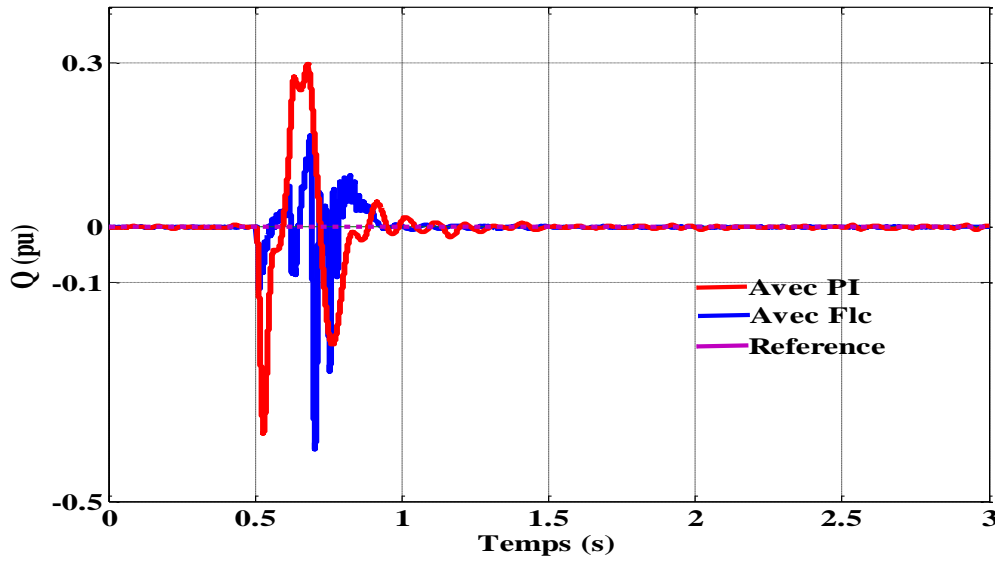
En comparaison avec les correcteurs conventionnels, cette loi de commande (contrôle flou) améliore considérablement les performances dynamiques désirées tels que le temps de réponse et le dépassement pour le système.

### 4.3.3 Défaut AC triphasé

Le défaut triphasé, est appliqué à l'instant  $t= 0.5s$  pour une durée de 0.1 s. les figures 4.8 et 4.9 montrent les résultats de cette simulation. Il est intéressant d'observer comment le système de contrôle réagit dans le cas où le défaut aurait lieu dans station 2, observons dans la figure 4.9 l'effet de ce défaut.

On constate que le flux de puissance qui transite sur la liaison est affecté par ce défaut, nous allons expliquer comment le contrôle réduit le flux de puissance, et donc les pertes, en plusieurs étapes.



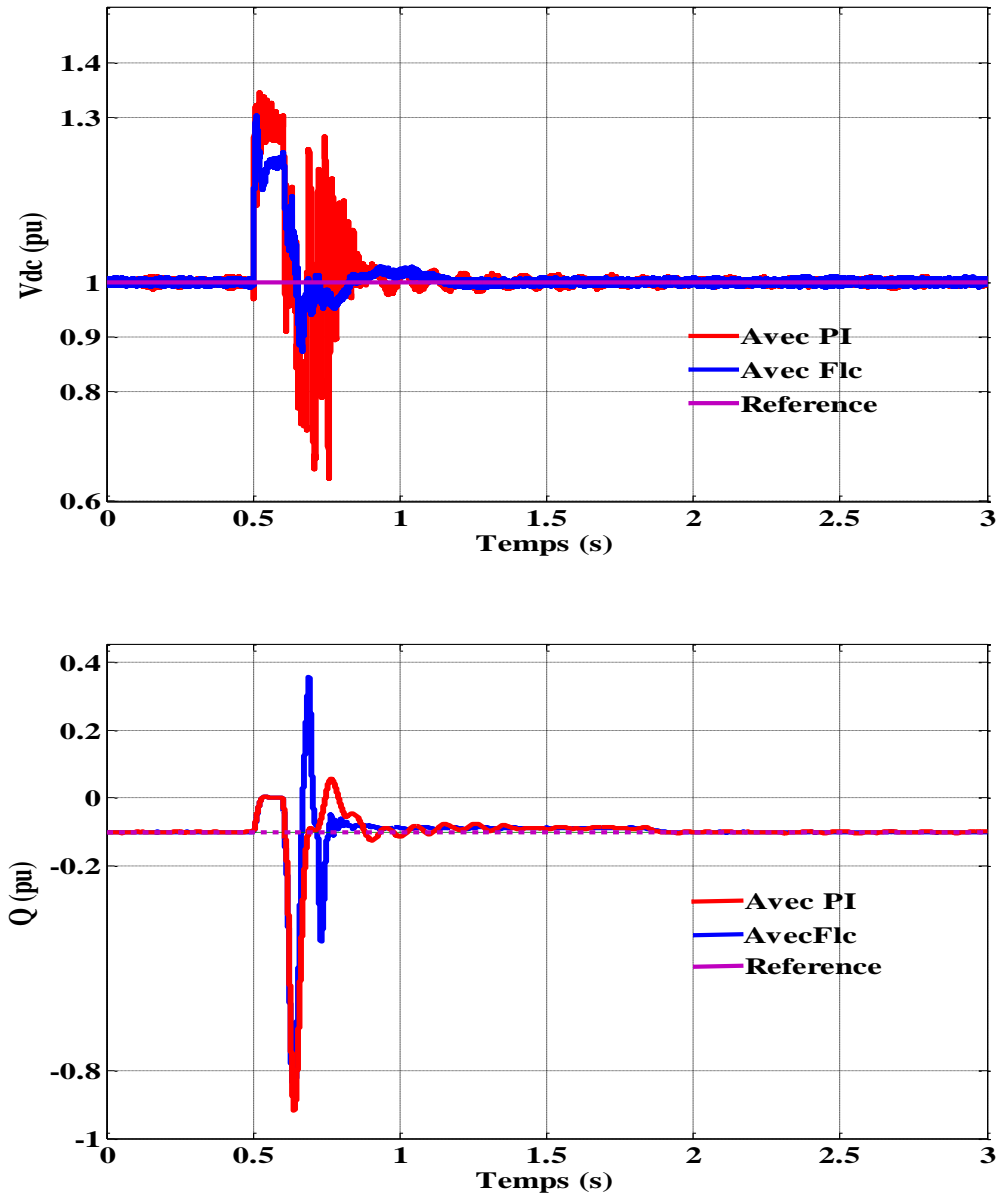


**Figure 4.8:** La puissance active et réactive suite à un défaut triphasé (Régulateur PI, flou station1).

Tout d'abord, le creux de tension au PCC2 entraîne une chute de tension, au niveau du filtre, via le transformateur.

La commande de la tension de la station 2 diminue elle aussi car, cette commande prend comme référence la tension au niveau du filtre. Cette diminution de tension entraîne une chute du transit de puissance active à travers le convertisseur et donc un déséquilibre entre la puissance entrante et la puissance sortante comme on peut le voir dans la figure 4.9.

Ce déséquilibre aura pour conséquence une hausse de la tension DC (figure 4.9). Or, le contrôle en puissance active de la station 1 est influencé par la valeur de la tension DC. En effet, étant donné que la tension DC dépasse les limites de sécurité (0.35pu) pour le contrôleur PI, (0.35pu) dans le cas du control flou la puissance active entrant dans la station 1 diminue également.



**Figure 4.9:** La tension DC et la puissance réactive suite à un défaut triphasé (Régulateur PI, flou station 2).

Dans le cas de la loi de commande floue, les résultats sont nettement satisfaisants, en effet la réponse est de (0.86s) plus rapide que celle de du contrôleur PI (0.94s), ce qu'on aperçoit également dans la figure 4.9. Il est également primordial de noter que la commande floue donne les meilleurs résultats.

Nous observons ici que la liaison VSC-HVDC peut surmonter un défaut AC grâce à cet algorithme de contrôle.

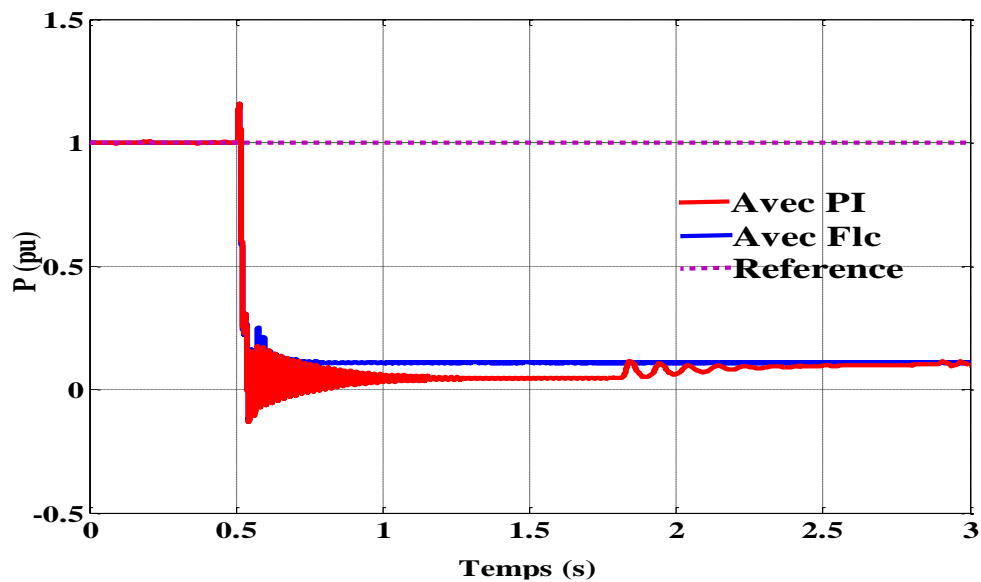


#### 4.3.4 Défaut DC

Un défaut DC a également été testé sur le câble DC de la liaison VSC-HVDC.

La forme d'onde de la puissance active et de la puissance réactive de la station 1 sont représentés dans la figure 4.10.

Pendant l'apparition du défaut DC à  $t=0.5$  s pour une durée de 100 ms, on observe que, le transfert de la puissance reçue par la station 1 (3L-NPC VSC-HVDC) vers la station 2 (3L-NPC VSC-HVDC) au moment de l'apparition du défaut est représenté dans la figure 4.10. On constate clairement que la puissance active est totalement chutée.



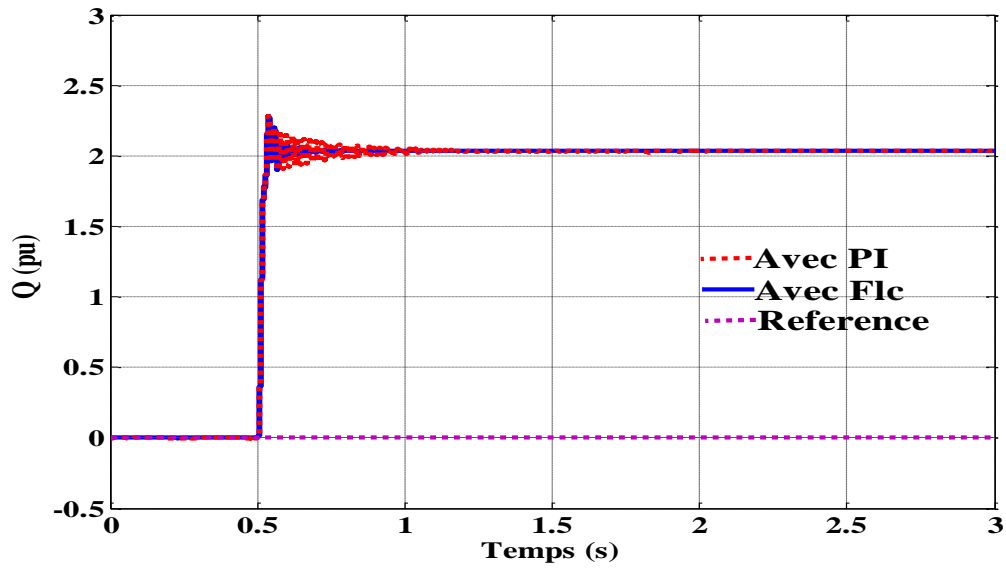
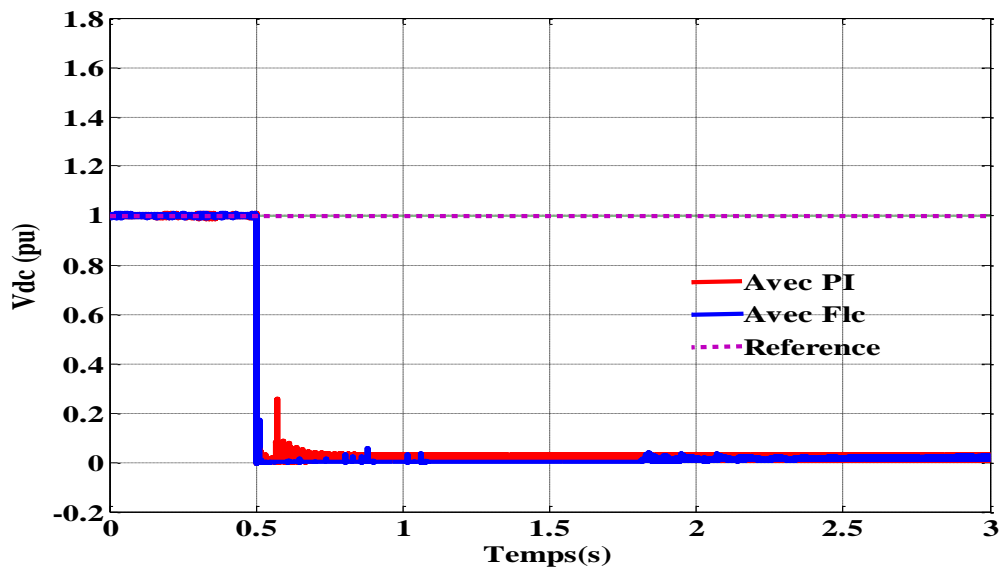
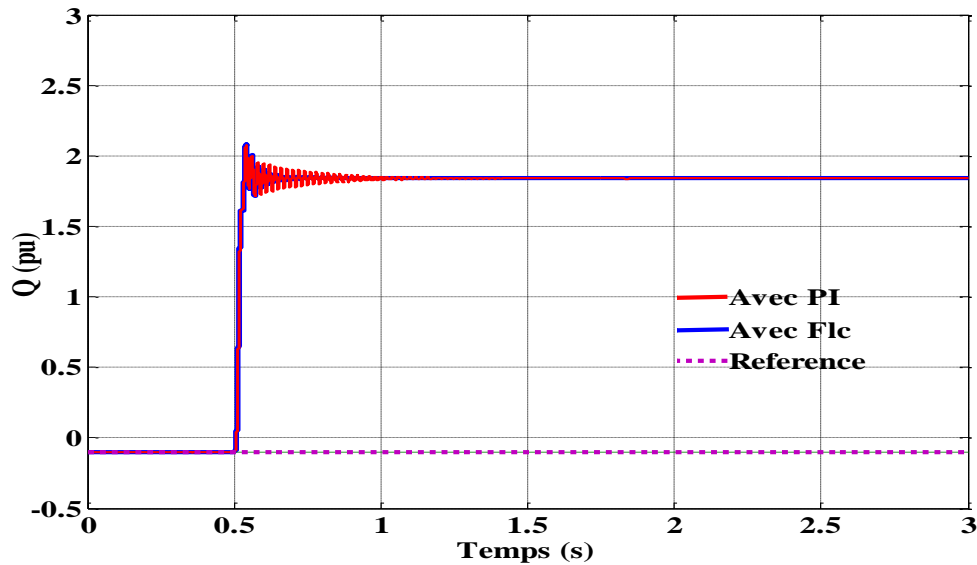


Figure 4.10: La puissance active et réactive suite à un défaut DC (Régulateur PI, flou station1).





**Figure 4.9:** La tension DC et la puissance réactive suite à un défaut DC (Régulateur PI, flou station2).

La variation de la tension continue du bus DC durant le défaut DC montrée à la figure 4.9, pour voir clairement l'impact du défaut sur l'amplitude. On constate qu'en présence de défaut DC, la tension continue tombe à zéro. Cette chute de tension DC nécessite un dispositif de protection contre le défaut DC, son disponibilité.

Il est également indispensable que la robustesse des systèmes de commandes implantées pour la liaison VSC-HVDC est assurée non seulement par ces lois de commandes, mais également par les fonctions de protection.

#### 4.4 Conclusion

Les résultats de simulation sont bien présents et interprétés, montrent explicitement la robustesse inhérente des contrôleurs sous des multiples perturbations.

En plus, la stabilité du système et son comportement dynamique sont renforcés par l'utilisation de contrôleur à base de la logique floue notamment en présence des variations de paramètres et des défauts.

Les résultats obtenus par la simulation, soit en fonctionnement équilibré ou déséquilibré, ont permis d'obtenir bons résultats.

Pour les quatre scénarios de simulation (défaut triphasé au PCC du réseau AC2, défaut DC, variation des paramètres et changement de charge), nous constatons que l'impact de ces multiples perturbations sur l'amplitude des formes d'ondes a diminué, stabilité du système meilleure et qualité de l'énergie améliorée selon nouvelle technique implantée en comparaison avec les régulateurs PI.

Les résultats de la simulation étant satisfaisants, nous avons résolu la problématique de la stabilité et la robustesse, en effet les commandes appliquées pour le contrôle des stations VSC-HVDC a une réponse dynamique, rapide et robuste.

Nous constatons également que l'application de la nouvelle technique de commande a réduit l'impact des défauts sur les variations de la grandeur captée plus précisément le niveau de dépassement d'amplitude.

Finalement, nous pouvons conclure que l'application des régulateurs linéaires proportionnel et intégral PI au système non-linéaire VSC-HVDC donne de très bons résultats pour le point de fonctionnement nominal (point d'équilibre). Concernant la technique de contrôle flou, la sensibilité aux variations paramétriques est considérablement réduite, le système rétabli rapidement son fonctionnement normal et demeure stable tout au long du processus de transfert de la puissance. Il donne, par conséquent, de très bons résultats comparativement à la commande conventionnelle.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans cette partie, nous présentons la conclusion de nos travaux de recherche.

Les systèmes VSC-HVDC sont en pleine expansion, suscite un grand intérêt depuis quelques années dans le monde universitaire. La technologie des systèmes de transmission VSC-HVDC s'impose de plus en plus comme la solution la plus prometteuse pour le transport d'énergie électrique générée dans les parcs éoliens.

Le travail réalisé dans cette thèse, apporte une contribution significative à la recherche des solutions aux problèmes de la stabilisation des systèmes de transmission VSC-HVDC. Afin d'améliorer les performances dynamiques de la liaison en présence de multiples perturbations.

Les travaux de cette thèse portent sur la modélisation, la commande et la simulation et la stabilisation des systèmes VSC-HVDC, avec trois axes de travail.

Le premier se focalise sur une synthèse sur l'état de l'art de ces systèmes de transmission, l'étude de leurs configurations, leurs topologies et l'état actuel de leurs performances. Ainsi, l'explication des aspects technologiques du système VSC-HVDC, les principes de fonctionnement de VSC-HVDC et toutes les composantes du système VSC-HVDC.

La solution proposée utilise la topologie d'un système VSC-HVDC à base d'IGBT à trois niveaux point neutre calé. Une méthodologie qui définit les étapes à entreprendre a été adoptée. Pour cela, nous modéliserons en premier lieu les différents éléments du système VSC-HVDC comprenant le convertisseur à trois niveaux à point neutre calé (modélisation du redresseur et de l'onduleur), la modélisation du circuit DC (les deux câbles et les condensateurs) et la modélisation du filtre. Des commandes ont été élaborées pour le contrôle de ces différents éléments.

Le deuxième se basant sur la conception et la synthèse générale des lois de commandes implantées au niveau du système étudié, basées sur deux techniques de commande, la commande basée sur la logique floue et la technique de commande linéaire basée sur l'utilisation de régulateurs linéaires proportionnel et intégral (PI). Ensuite, la robustesse et la

performance de contrôle a été comparée avec celle du contrôle linéaire face à des perturbations et variations paramétriques a été étudiée.

Le troisième vise à étudier l'influence de la commande sur l'amélioration des performances dynamiques de la liaison VSC-HVDC. Une fois tout le circuit monté, nous avons effectué une série de test de simulation qui permet de valider d'une part le bon fonctionnement du système et d'autre part la robustesse de chacune des lois de commande implantées.

Ces résultats sont ensuite comparés, afin d'évaluer cette technique de commande (à base de la logique floue) et conclure de la nécessité de cette stratégie

Les résultats de la simulation étant satisfaisants, nous avons adopté de la technique de commande floue. Le comportement du système face aux différentes perturbations de la source et des variations paramétriques testées a été nettement amélioré et le système présente d'excellentes performances comparativement à la technique de commande conventionnelle.

## **Perspectives**

Le travail présenté dans le cadre de cette thèse ouvre de larges perspectives dans le domaine des systèmes VSC-HVDC. À la lumière des résultats que nous avons obtenus dans cette thèse, nous recommandons pour les futurs travaux les propositions:

- ✓ l'implantation de d'autres stratégies de commande non-linéaire linéaire pour les systèmes VSC-HVDC.
- ✓ Le développement de dispositif de protection pour la surveillance contre des défauts DC.
- ✓ L'étude des topologies des convertisseurs multi-niveaux de type VSC-HVDC.
- ✓ L'intégration des énergies renouvelables, en particulier éolienne, et son application à grande échelle dans les transports pour les systèmes onshore et offshore.
- ✓ Finalement, La comparaison par simulation entre les lois de commande non-linéaires peut être effectuée.



## **Annexes**

## Annexe 1

## Projets HVDC dans le monde

La liste a été établie et mise à jour (Mars 2012)\* par l'IEEE-Power and Energy Society.

Système / projet	Fournisseur	Année mise en Service	Puissance -MW-	Tension DC -kV-	Long. - km-***	Technologie**	Pays
Moscow-Kashira	Gvt URSS (Elbe, Berlin)	1951 (>1970)	30	±100	100	Merc	Russie
Volgograd-Donbass	Gvt URSS	1962/65	720	±400	473	Merc /Thy	Russie
Vyborg	Gvt URSS	1981	355	1x170 (±85)	B-B	Thy	Russie / Finlande
Vyborg	Gvt URSS	1982	710	2x170	B-B	Thy	Russie / Finlande
Vyborg	Gvt URSS	1984	1065	3x170	B-B	Thy	Russie / Finlande
Vyborg	Gvt URSS	1999	4x405	±85	B-B	Thy	Russie / Finlande
Estlink	ABB	2006	350	±150	105	Tra	Estonie / Finlande
Estlink 2	Siemens	2014	670	±450	171	Thy	Estonie / Finlande
Fenno-Skan	ABB/Alcatel	1989/98	500	400	303	Thy	Finlande / Suède
Fenno-Skan II	ABB/Nexas	2011	800	500	303	Thy	Finlande / Suède
Gotland I	ASEA	1954 (1986)	20	±100	96	Merc	Suède
Gotland Extension	ASEA	1970 (1986)	30	±150	96	Thy	Suède
Gotland II	ASEA	1983	130	150	100	Thy	Suède
Gotland III	ASEA	1987	260	±150	103	Thy	Suède
Gotland HVDC Light	ABB	1999	50	±60	70	Tra	Suède
Visby-Nas	ABB	1999	50	80	70	Thy	Suède
Konti-Skan 1	ASEA	1965	250	±250	180	Merc	Danemark / Suède
Konti-Skan 1	AREVA	2005	250	±250	180	Thy	Danemark / Suède
Konti-Skan 2	ASEA	1988	300	285	150	Thy	Danemark / Suède
Baltic Cable	ABB	1994	600	450	261	Thy	Suède / Allemagne
Swepol Link	ABB	2000	600	±450	254	Thy	Suède / Pologne
Valhall	ABB	2011	78	150	292	Tra	Norvège
Skagerrak I	ASEA	1976	275	±250	240	Thy	Norvège / Dk
Skagerrak II	ASEA	1977	275	±250	240	Thy	Norvège / Dk
Skagerrak III	ABB	1993	500	±350	240	Thy	Norvège / Dk
Skagerrak IV (Construction)	ABB	2014	700	500	244	Tra	Norvège / Dk
Norned	ABB	2008	700	±450	580	Thy	Norvège / P.Bas
Storebaelt	Siemens	2010	600	400	56	Thy	Danemark
Kontek	ABB/NKT Cables	1995	600	400	171	Thy	Dk / Allemagne
Norde.On 1	ABB	2009	400	150	203	Tra	Allemagne
Borwin1	ABB	2013	400	±150	200	Tra	Allemagne

Projet	Fournisseur	Année	P-MW-	V -kV-	L-km-	Techn.	Pays
Etzenricht	Siemens	1993 (1997)	600	160	B-B	Thy	Rép. Tchèque /Allemagne
Duernrohr 1	BBC/Siemens	1983 (1997)	550	145	B-B	Thy	Autriche
Vienna South-East	Siemens	1993 (1997)	600	145	B-B	Thy	Autriche/Hongrie
Kingsnorth	English Electric	1972 (1987)	640	±266	82	Thy	Angleterre
East-West Interconnector	ABB	2012	500	±200	261	Tra	Irlande-Angleterre
Britned	Siemens	2011	1000	±400	260	Thy	Angleterre / P. Bas
Moyle Interconnector	Siemens	2001	2x250	2x250	64	Thy	Irlande du Nord /Ecosse
English Channel	ASEA	1961 (1984)	160	±100	64	Merc	Angleterre - France
Cross Channel Bp 1+2	CGEE Alsthom/GEC	1985/86	2000	±270	70	Thy	France / Angleterre
France - Spain Interconnection Link	Siemens	<i>Construction</i> 2013	2000	±320	65	Thy	France / Espagne
Sapei	ABB	2011	1000	±500	435	Thy	Italie / Sardaigne
Sacoi 1	English Electric	1965	200	200	385	Thy	Italie
Sacoi Corsica	CGEE/Alsthom	1985	50	200	415	Thy	Italie / Corse
Sacoi (C & S)	Ansado/GE	1993	300	±200	385	Thy	Italie / Corse
Sardinia	English Electric	1967 (1992)	200	200	413	Thy	Italie
Grita	Pirelli/ABB	2001	500	400	316	Thy	Grèce / Italie
Cometa	Prysmian/Nexans/Siemens	2012	400	250	247	Thy	Espagne
Black Sea Transmission Network	Siemens	2013	2x350	96	B-B	Thy	Géorgie / Turquie
Al Fadhili	AREVA	2009	3 x 600	3 x 222	B-B	Thy	Arabie/Saoudite
Inga-Shaba	ASEA/GE	1983	560	±500	1700	Thy	Zaïre
Caprivi	ABB	2010	300	350	950	Tra	Namibie
Cahora-Bassa	AEG/BBC/Siemens	1978/1998	1920	±533	1456	Thy	Afrique du Sud / Mozambique
Cahora-Bassa ( <i>Rénovation</i> )	ABB	2008	1920	±533	1420	Thy	Afrique du Sud / Mozambique
The Apollo Converter Station ( <i>Rénovation</i> )	ABB	2008	2500	±533	1420	Thy	Afrique du Sud
Vancouver I	ASEA	1968/69	312	±260	74	Merc	Canada
Vancouver II	GE	1977/79	370	±280	74	Thy	Canada
Eel River	GE	1972	320	±80	B-B	Thy	Canada
Nelson River 1	English Electric /GEC Alsthom	1973	1854	±463	890	Merc	Canada
Nelson River 1	GEC Alsthom	1992/93	1854	±463	890	Merc/ Thy	Canada
Nelson River 1	Siemens	2001/02	1854	±463	890	Thy	Canada
Nelson River 2	AEG/BBC /Siemens	1978	900	±250	940	Thy	Canada
Nelson River 2	AEG/BBC /Siemens	1985	2000	±500	940	Thy	Canada
Madawaska	GE	1985	350	130,5	B-B	Thy	Canada

Projet	Fournisseur	Année	P-MW-	V -kV-	L-km-	Techn.	Pays
Outaouais	ABB	2009	2x625	315	B-B	Thy	Canada
Chateauguay Upgrade	ABB	2009	2x500	145	B-B	Thy	Canada
Poste Chateauguay	BBC/Siemens	1984	2x500	145	B-B	Thy	Canada / USA
Des Cantons-Comferford	GE	1986	690	±450	172	Thy	Canada / USA
Quebec-New England (Three Terminal)	ABB	1990-92	2250	±450	1500	Thy	Canada / USA
Square Butte	GE	1977	500	±250	749	Thy	Etats-Unis
Cu	ASEA	1979	1000	±400	701	Thy	Etats-Unis
Pacific Intertie	ASEA/GE	1970	1440	±400	1362	Merc	Etats-Unis
Pacific Intertie	ASEA/GE	1982	1600	±400	1362	Merc	Etats-Unis
Pacific Intertie (Extension)	ASEA	1985	2000	±500	1362	Thy	Etats-Unis
Pacific Intertie (Extension)	ABB	1989	3100	±500	1362	Thy	Etats-Unis
Sylmar East (Remplacement Valves)	Siemens	1995	550	500	1200	Thy	Etats-Unis
Pacific Intertie Sylmar (Extension)	ABB	2004	3100	±500	1362	Thy	Etats-Unis
Eddy County	GE	1983	200	82	B-B	Thy	Etats-Unis
Oklahoma	GE	1984	200	82	B-B	Thy	Etats-Unis
Miles City Hvd System (Mccs)	GE	1985	200	82	B-B	Thy	Etats-Unis
Intermountain Power Project (I.P.P.)	ASEA	1986	1920	±500	785	Thy	Etats-Unis
I.P.P. (mise-à-jour)	ABB	2011	2400	±500 kV	785	Thy	Etats-Unis
Welsh	Siemens	1995	600	170	B-B	Thy	Etats-Unis
Welch-Monticello	Siemens	1998	600	162	B-B	Thy	Etats-Unis
Cross Sound	ABB	2002	330	±150	40	Tra	Etats-Unis
Celilo (Remplacement Valves)	Siemens	2004	3100	±400	1200	Thy	Etats-Unis
Neptune	Siemens	2007	660	500	105	Thy	Etats-Unis
Trans Bay Cable	Siemens / Pirelli	2010	400	200	88	Tra	Etats-Unis
Hudson Transmission	Siemens / Prysmian	2013	660	±345	12	Thy	Etats-Unis
Itaipu 1	ASEA	1984	1575	±300	785	Thy	Brésil
Itaipu 1	ASEA	1985	2383	±300	785	Thy	Brésil
Itaipu 1	ASEA	1986	3150	±600	785	Thy	Brésil
Itaipu 2	ASEA	1987	3150	±600	805	Thy	Brésil
Rio Madeira (Construction)	ABB (Bipole 1) Alstom (Bipole 2)	2014 2014	2 x 3150	±600	2375	Thy	Brésil
Rio Madeira	ABB	2013	2x400 -TB	100	B-B	Thy	Brésil
Melo Interconnector	Alstom	2012	500	525	B-B	Thy	Uruguay-Brésil
Garabi 1	ABB	2000	1100	±70	B-B	Thy	Argentine-Brésil
Garabi 2	ABB	2002	2000	±70	B-B	Thy	Argentine-Brésil

Projet	Fournisseur	Année	P-MW-	V -kV-	L-km-	Techn.	Pays
Sakuma	ASEA	1965 (1993)	300	2x125	B-B	Merc	Japon
Shin-Shinano 1	Hitachi/Toshiba /Nisshin	1977	300	125	B-B	Thy	Japon
Shin-Shinano 2	Hitachi/Toshiba /Nisshin	1992	300	125	B-B	Thy	Japon
Hokkaido-Honshu	ASEA	1979	150	125	167	Thy	Japon
Hokkaido-Honshu	Hitachi /Toshiba	1980	300	250	167	Thy	Japon
Hokkaido-Honshu	Hitachi /Toshiba	1993	600	±250	167	Thy	Japon
Sakuma	Hitachi/Toshiba/Mitsubishi /Nisshin	1993	300	±125	B-B	Thy	Japon
Minami-Fukumitzu	Hitachi/Toshiba	1999	300	125	B-B	Thy	Japon
Kii Channel	Hitachi/Toshiba/Mitsubishi	2000	1400	±250	102	Thy	Japon
Higashi-Shimizu	Hitachi/Toshiba	2001	300	125	B-B	Thy	Japon
Qinghai-Tibet	CET/SGCC	2012	1500	±400	1038	Thy	Chine-Tibet
Zhou Shan Project	1982	50	100	42	Thy	Chine	
Gesha (Gezhouba-Shanghai)	BBC/Siemens	1989	600	500	1000	Thy	Chine
Gesha (Gezhouba-Shanghai)	BBC/Siemens	1990	1200	±500	1000	Thy	Chine
Tian-Guang	Siemens	2001	1800	±500	960	Thy	Chine
Three Gorges-Changzhou	ABB/Siemens	2003	3000	±500	860	Thy	Chine
Three Gorges-Guangdong	ABB	2004	3000	±500	940	Thy	Chine
Three Gorges-Shanghai	ABB	2006	3000	±500	900	Thy	Chine
Three Gorges - Shanghai 3	Alstom	2010	3000	±500	1000	Thy	Chine
Gui-Guang I	Siemens	2004	3000	±500	980	Thy	Chine
Gui-Guang II	Siemens	2007	3000	±500	1200	Thy	Chine
Lingbao	2005	360	168	B-B	Thy	Chine	
Lingbao II	ABB/Alstom	2010	750	168	B-B	Thy	Chine
Yunnan-Guangdong	Siemens	2010	5000	±800	1418	Thy	Chine
Xianjiaba-Shanghai	ABB	2010	6400	±800	1980	Thy	Chine
Hulunbeir-Liaoning	ABB	2010	3 000	±500	920	Thy	Chine
Jinping - Sunan (Sgcc)	ABB	2013	7200	±800	2090	Thy	Chine
Ningdong - Shangdong	Alstom	2011	4000	±660	1335	Thy	Chine
Nuozhadu-Guangdong	Siemens	Prévu 2015	5000	800	1500	Thy	Chine
Xiluodu-Hanzhou	Siemens	Prévu 2015	6400	800	1300	Thy	Chine
Haenam-Cheju	GEC Alsthom	1997	300	±180	101	Thy	Corée
Jindo-Jeju	Alstom	2011	400	±250	105	Thy	Corée
Vindhyachal	ASEA	1989	500	2x69.7	B-B	Thy	Inde

Projet	Fournisseur	Année	P-MW-	V -kV-	L-km-	Techn.	Pays
Barsoor Lower Sileru	BHEL	1989/91	100	±200	196	Thy	Inde
Rihand-Delhi	ABB/BHEL	1991	750	500	814	Thy	Inde
Rihand-Delhi	ABB/BHEL	1992	1500	±500	814	Thy	Inde
Chandrapur-Ramagundum	GEC Alsthom	1997/98	1000	2x205	B-B	Thy	Inde
Chandrapur Back-To-Back	ABB	1998	1500	±500	736	Thy	Inde
Vizag 1	GEC Alsthom	1999	500	205	B-B	Thy	Inde
Vizag 2	ABB	2005	500	±88	B-B	Thy	Inde
Sasaram	GEC Alsthom	2002	500	205	B-B	Thy	Inde
East-South Interconnector II	Siemens	2003	2000	±500	1450	Thy	Inde
East-South Interconnector II (Rénov.)	Siemens	2007	2500	±500	1450	Thy	Inde
Ballia - Bhiwadi	Siemens	2010	2500	500	800	Thy	Inde
Mundra – Haryana (Construction)	Siemens	2012	2500	±500	960	Thy	Inde
Biswanath-Agra (Construction)	ABB	2014-2015	6000	±800	1728	Thy	Inde
Leyte-Luzon	ABB/Marubeni	1998	440	350	455	Thy	Philippines
Thailand-Malaysia	Siemens	2001	300	±300	110	Thy	Thaïlande-Malaisie
Sumatra-Java (Projet)		2013	3000	±500	700	Thy	Indonésie
Directlink	ABB	2000	3 x 60	±80	59	Tra	Australie
Murraylink	ABB	2002	200	±150	176	Tra	Australie
Basslink	Siemens	2006	500	400	350	Thy	Australie
New Zealand Hybrid Inter Island Link	ASEA	1965	600	±250	609	Merc	Nouvelle-Zélande
New Zealand Hybrid Inter Island Link	ABB	1992	1240	+270/-350	612	Thy	Nouvelle-Zélande
New Zealand Inter-Island 2		1992	640	350	610	Thy	Nouvelle-Zélande
Inter Island Connector	Siemens	2013	700	±350		Thy	Nouvelle-Zélande

## Annexe 1

### Transformée abc/dq0 appliquée au modèle dynamique de station convertisseur1

Le système d'équation régissant le convertisseur peut être généralisé en une seule équation (A.1):

$$L \frac{di_k}{dt} = e_k - v_k \quad (A.1)$$

$k = 1, 2, 3$

Nous nous limiterons dans la transformation aux composantes directes  $\alpha$  et  $d$  et aux composantes en quadrature  $\beta$  et  $q$ .

Soit le repère  $(\alpha, \beta)$  suivant:

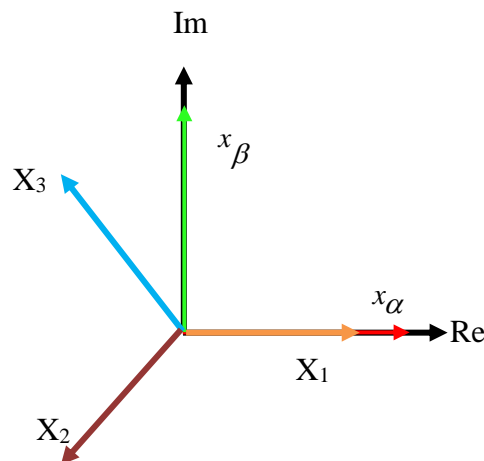


Figure A. 1: Coordonnées dans le référentiel biphasé  $(\alpha, \beta)$

Ceci nous permet de convertir les grandeurs triphasées (a, b, c) en grandeur biphasées  $(\alpha, \beta)$ . En appliquant la matrice de transformation de Clark:

$$\begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad (A.2)$$

En considérant cette matrice de transformation, l'équation (A. 1) devient:

$$L \frac{di_{\alpha}}{dt} = e_{\alpha} - v_{\alpha} \quad (\text{A.3})$$

$$L \frac{di_{\beta}}{dt} = e_{\beta} - v_{\beta} \quad (\text{A.4})$$

Considérons que tout vecteur  $X_{\alpha\beta}$  (X pouvant être le vecteur courant I ou les vecteurs tensions v ou e) s'écrit selon l'équation (A.5) :

$$X_{\alpha\beta} = x_{\alpha} + jx_{\beta} \quad (\text{A.5})$$

Si nous considérons l'équation (A.3) + j(A.4), et que nous la combinons avec l'équation (A.5) nous obtenons l'équation suivante:

$$L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = e_{\alpha\beta} - v_{\alpha\beta} \quad (\text{A.6})$$

La transformation de (Park) consiste à passer du référentiel stationnaire synchrone ( $\alpha, \beta$ ) à la vitesse  $\omega$  au référentiel synchrone (dq), ce qui peut être traduit par l'équation suivante:

$$X_{\alpha\beta} = X_{dq} e^{j\theta} \quad (\text{A.7})$$

$$\text{Où: } \theta = \int \omega dt$$

$$\text{Avec } \omega = 2\pi f$$

En substituant (A.7) dans (A.6), nous parvenons à l'équation suivante :

$$L \frac{di_{dq} e^{j\theta}}{dt} = e_{dq} e^{j\theta} - v_{dq} e^{j\theta} \quad (\text{A.8})$$

Ou encore:



$$L \left[ \frac{di}{dt} e^{j\theta} + j e^{j\theta} \frac{d\theta}{dt} i \right] = e_{dq} e^{j\theta} - v_{dq} e^{j\theta} \quad (\text{A.9})$$

En simplifiant par le terme  $e^{j\theta}$  nous obtenons :

$$L \frac{di}{dt} + j\omega L i = e_{dq} - v_{dq} \quad (\text{A.10})$$

D'autres part, nous pouvons écrire que :

$$X_{dq} = x_d + jx_q \quad (\text{A.11})$$

Si nous décomposons l'équation (A.10) selon les axes d et q en utilisant l'équation (A.11), nous aboutissons à l'équation suivante :

$$L \frac{d(i_d + ji_q)}{dt} + j\omega L(i_d + ji_q) = e_d + je_q - (v_d + jv_q) \quad (\text{A.12})$$

L'équation équivalente par rapport à chaque axe devient alors:

$$\begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q &= e_d - v_d \\ L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d &= e_q - v_q \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

D'où nous retrouvons les équations d'état modélisant la première partie du système (station1).

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{e_d}{L} + \omega i_q - \frac{v_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{v_q}{L} - \omega i_d \\ \frac{di_0}{dt} &= \frac{e_0}{L} - \frac{v_0}{L} \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

## **Références bibliographiques**

---

## References bibliographiques

- [1] Arrillaga J, Liu Y.H, Aston N.R, **“Flexible power transmission the HVDC options”**, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, ISBN 978-0-470-05688-2 (cloth), England, 2007.
- [2] Vijay K. S, **“HVDC and FACTS controllers, applications of static converters in power systems”**, Kluwer Academic Publishers, EBook ISBN1-4020-7891-9, Boston, 2004.
- [3] Hongyang H, Zheng X, Xi L, **“Improving performance of multi-infeed HVDC systems using grid dynamic segmentation technique based on fault current limiters”**, IEEE Transactions on power systems, Vol. 27, NO 3, 2012.
- [4] Haiping Y, Lingling F, Zhixin M, **“Fast power routing through HVDC”**, IEEE transactions on power electronics, Vol. 27, No.3, July 2012.
- [5] Ramesh D, Pandey R. K, **“HVDC converter control performance during faults”**, IEEE-international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM - 2012) March 30, 31, 2012.
- [6] Yong L, Zhiwen Z, Christian R, **“Study on steady- and transient-state characteristics of a new HVDC transmission system based on an inductive filtering method”**, IEEE Transactions on power electronics, Vol. 26, No. 7, 2011.
- [7] Bhookya N and V. RamanaRaoP, M. Sydulu, **“Improvement of Power System Stability using Artificial Neural Network based HVDC Controls”**, Majlesi Journal of Electrical Engineering Vol. 7, No.2, June 2013.
- [8] Brouwer R.K, **“Fuzzy rule extraction from a feed forward neural network by training a representative fuzzy neural network using gradient descent”**, IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2004, vol.3, no., pp. 1168- 1172 Vol. 3, 8-10 Dec. 2004.
- [9] Ramezani A, Rahimi A, Roosta A, **“Control of Multi-variable Processes using Self-Tuning Fuzzy”**, Majlesi Journal of Electrical Engineering Vol. 10, No. 1, March 2016.
- [10] Hameurlaine A; Zidi S-A, Kouzou A; Djehaf M A, **“Improvement of the HVDC link performances based on the protection functions”**, 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2015.
- [11] Nayak N, Keshari Routray S, Kumar Rout P, **“Non-linear control and stabilisation of VSC-HVDC transmission system based on Type-2 fuzzy sliding mode control”**, Int. J. Automation and Control, Vol. 7, Nos. 1/2, 2013.

- 
- [12] Hameurlaine A; Zidi S-A, “**Amélioration des performances et protection des liaisons CCHT**”, Ouvrage Publisher:Éditions universitaires européennes (November 6, 2015), ISBN-10:3841673600 ISBN-13: 978-3841673602.2015.
- [13] Saad H, Ould-Bachir T, Mahseredjian J, Dufour, Denetiere C, Nguéfeu S, “**Real-Time Simulation of MMCs Using CPU and FPGA**”, Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.30, no.1, pp.255,261, 2015.
- [14] Rama Krishna K, Nagarjuna K ranthi KumarT.K, “**DC Current Flow Controller for Multilevel Converter Multi terminal HVDC Grids using Fuzzy logic controllers**”, 2017 International Journal of Advanced Engineering and Global Technology I Vol-05, Issue-02, March 2017.
- [15] Piccin R “**Partial Discharge Analysis in HVDC Gas Insulated Substations**”, Department of intelligent electrical power grids, Delft University of Technology, Netherlands, July 2013.
- [16] Bernal-Perez S, Salvador Añó-Villalba, Ramon Blasco-Gimenez, and Johel Rodríguez-Derlée D “**Efficiency and Fault Ride-Through Performance of a Diode-Rectifier-and VSC-Inverter-Based HVDC Link for Offshore Wind Farms**”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, Issue 6, pp. 2401-2409, 2013.
- [17] Haileselassie M.T, Torres-Olguin R.E, Vrana, K.Uhlen T.K, Undeland T “**Main Grid Frequency Support Strategy for VSC-HVDC Connected Wind Farms with Variable Speed Wind Turbines**”, In: Proceedings of the Power Tech, IEEE, Trondheim, Norway, June, 2011.
- [18] Imhof M and Andersson G, “**Dynamic modeling of a VSC-HVDC converter,**” In 2013 48th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), no. Vo2. IEEE, Sep. 2013.
- [19] Benhalima S “**La conception, la modélisation et la simulation du système VSC-HVDC offshore**”, thèse maîtrise en génie électrique Montréal, 2012.
- [20] Abdelouahab B, Fateh K and Jean-Paul G, “**Fuzzy-logic-based switching state selection for direct power control of three-phase PWM rectifier**”, IEEE,Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 6, June 2009.
- [21] Dell Aquila A et al, “**A fuzzy-logic CC-PWM three-phase AC/DC converter**”, IEEE, Proc, LAS 2000, pp. 987-992, Octobre 2000.
- [22] Jain S.K, Agrawal P and Gupta H.O, “**Fuzzy logic controlled shunt active power filter for power quality improvement**”, IEE, Proc-Electr Power-Appl. Vol. 149, No. 5, pp.317-328, 2002.
- [23] Benadja M, “**Approches pour la réduction de l’impact de défaut dans le Transport d’énergie du parc éolien offshore via VSC-HVDC**”, Doctorat en génie Ph.D Montréal, 2016.
- [24] Hiteshkumar P, “**Modeling of Voltage Source Converter Based HVDC Transmission System in EMTP-RV**”, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
-

- Degree of Master of Applied Science Electrical and Computer Engineering University of Ontario Institute of Technology, 2010.
- [25] Robert R, “**VSC-HVDC System Modeling and Validation**”, Master's degree project KTH Electrical Engineering stockholm, sweden 2014.
- [26] Tamiru W S, “**VSC-HVDC based Network Reinforcement**”, Thesis Electrical power Engineering, Delft University of Technology STEDIN, 2009.
- [27] Benfeng G, Ruixue Z and Xuewei Z, “**A Novel Procedure for Protection Setting in an HVDC System Based on Fault Quantities**”, J Electr Eng Technol.2016; 12 1921-718.
- [28] Behzad K, “**Mathematical Modelling of Multi-terminal VSC-HVDC Links in Power Systems using Optimal Power Flows**”, A Thesis submitted to the Department of Electronics and Electrical Engineering of The University of Glasgow For the degree of Doctor of Philosophy, 2011.
- [29] Alireza D, “**Artificial neural network and fuzzy Logic control for hvdc systems**”, A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY, Department of Electrical and Computer Engineering University of Manitoba Winnipeg, 1997.
- [30] Johel R D D, “**Control strategies for offshore wind farms based on PMSG wind turbines and HVdc connection with uncontrolled rectifier**”, Doctoral Dissertation, Universitat politècnica de valència, 2013.
- [31] Sanjay K C, “**Control and Protection of Wind Power Plants with VSC-HVDC Connection**”, Doctor of Philosophy, Department of Energy Technology, Aalborg University, 2011.
- [32] Mike R, “**A Multi-port Power Flow Controller for HVDC Networks**”, degree of Master of Applied Science, University of Toronto, 2015.
- [33] Hani A S, “**Modélisation et simulation d’une liaison hvdc de type VSC-MMC**”, Thèse présentée en vue de l’obtention du diplôme de philosophiae doctor (Ph.D.) (génie électrique), école polytechnique de Montréal, 2015.
- [34] Haitham S M R, “**Non-linear control and stabilization of VSC-HVDC transmission systems**”, génie électrique - automatique, Thèse de doctorat en sciences de l’université paris sud xi, 2012.
- [35] Vijay S P. H, “**Comparison between Direct and Vector control Strategy for VSC-HVDC system in EMTP-RV**”, In: proceedings of Joint International Conference on Power Electronics , Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, IEEE. New Delhi, India, 2010.
- [36] Gopala K A R, Amarendra R B, Durga P B, “**Fuzzy Pi and Integrating Type Fuzzy PID Controllers of Linear, Nonlinear and Time -Delay Systems**”, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 1, No. 6, 2010.

- [37] Hameurlaine. A, Sayah. H, Boudiaf. M, **“Improvement of the VSC-HVDC System Performances Based on the Intelligent Controller”**, Majlesi Journal of Electrical Engineering Vol. 13,No.4, pp 51-59, December 2019.
- [38] Lutfu S, Mehmet T and Dlyas E, **“Performance Analysis of Fuzzy Logic Based Unified Power Flow Controller”**, World Academy of Science, Engineering and Technology 45, pp. 320- 325.2008.
- [39] Venjakob O, Kubera S, Hibberts R, Caswell, Forsyth PA and Maguire T.L, **“Setup and performance of the real-time simulator used for hardware-in-loop-tests of a VSC-based HVDC scheme for offshore applications”**, Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST'13) in Vancouver, Canada July 18-20, 2013.
- [40] Beddard A, Barnes M and Preece R, **“Comparison of Detailed Modeling Techniques for MMC Employed on VSC-HVDC Schemes”**, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 579-589, April 2015.
- [41] Natarajan, **“KLU A high performance sparse linear solver for circuit simulation problems”**, Master’s Thesis, University of Florida, 2005.
- [42] Bauer J. G, Wissen M, Gutt T, Biermann J, Schäffer C, Schmidt G, F Pfirsch, **“New 4.5 kV IGBT and diode chip set for HVDC Transmission Applications”**, PCIM Europe 2014, 20 – 22 May 2014, Nuremberg, Germany, 2014.
- [43] Hassanpoor A, Norrga S, Nami A, **“Loss Evaluation for Modular Multilevel Converters with Different Switching Strategies”**, Proceedings of ICPE 2015 – ECCE Asia, 1-5 June 2015, Seoul, South Korea,2015.
- [44] Cuiqing D, **“VSC-HVDC for Industrial Power Systems”**, Thesis for the degree of Doctor of philosophy, Goteborg, Sweden 2007.
- [45] Senthil K S, Palanisamy V, **“A hybrid fuzzy dynamic programming approach to unit commitment”**, Journal of the Institution of Engineers (India); Vol. 88, pp. 3-9, 2008.
- [46] Chaudhary S K, **“Control and Protection of Wind Power Plants with VSC-HVDC Connection”**, Doctor of Philosophy, Department of Energy Technology, Aalborg University, 2011.
- [47] Chaudhary S K, Teodorescu R, Rodriguez P, Kjær P C and Christensen P W, **“Chopper Controlled Resistors in VSC-HVDC Transmission for WPP with Full-scale Converters”**, in Proc. of Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), 2009.
- [48] Harnefors L , **“Control of VSC-HVDC transmission”**, in Tutorial Presented at the IEEE PESC, Rhodos, Greece, Jun 15-19, 2008. 2008.
- [49] Jensen S, Fuchs FW, Kiel C, and Kiel D, **“Load-Frequency Control of Synchronous Areas Using a Wind Farm Connected via HVDC-VSC”**, 2nd EPE Wind Energy Chapter Seminar, KTH, Stockholm, 23-24 April, Stockholm , Sweden: 2009.

- [50] Sandeep N D, Shri Harsha J, Dr.B Rajesh Kamath, Umesha K L ,**“Fuzzy Logic Controller Based on Voltage Source Converter-Hvdc System”**, International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 4, Issue 3, May 2015.
- [51] Magne L K, **“Integrating Offshore Wind Power and Multiple Oil and Gas Platforms to the Onshore Power Grid using VSC-HVDC Technology”**, Master of Science in Electric Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [52] Padiyar K R and Prabhu N, **“Modeling, control design and analysis of VSC based HVDC transmission systems”**, in Power System Technology, 2004. Power Con 2004.2004 International Conference on, 2004, pp. 774-779 Vol.1.2004.
- [53] Rault P, **“Dynamic modeling and control of multi-terminal HVDC grids”**, PhD dissertation, École Centrale de Lille, March 2014.
- [54] Hameurlaine A, Zidi S-A, Kouzou A, Sayah h, **“Improvement of Commutation Failure Prediction in HVDC and Performance Evaluation with ESCR Variation”**, The 3rd International Conference on Power Electronics and their Applications-ICPEA 2017 16-17 September 2017.
- [55] Rault P, Colas F, Guillaud X, Nguéfeu S, **“Method for small signal stability analysis of VSCMTDC grids”**, Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE , vol.,no., pp.1,7, 22-26 July 2012.
- [56] Barker C D, Kirby N M, **“Reactive power loading of components within a modular multi-level VSC HVDC converter”**, IEEE Electric power and energy conference, Winnipeg, , 2011 C D Barker, N M Kirby, IEEE Electric power and energy conference, Winnipeg, Canada, 2011.
- [57] Bergna G, Berne E, Egrot P, Lefranc P, Arzande A, Vannier J C, Molinas M , **“An Energy-Based Controller for HVDC Modular Multilevel Converter in Decoupled Double Synchronous Reference Frame for Voltage Oscillation Reduction”**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.60, no.6, pp.2360,2371, June 2013.
- [58] Whitehouse R S, Oates C D M, Maneiro J, MacLeod N M , **“A new simulator laboratory for research and development of VSC HVDC topologies and control algorithms”**, 9th IET International Conf. on AC and DC Power Trans., pp. 1-5, 19-21 Oct. 2010.
- [59] Adam G P, et al., **“AC fault ride-through capability of VSC-HVDC transmission systems”**, in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 2010, pp. 3739-3745.2010.
- [60] Zhang Y, et al., **“Voltage source converter in high voltage applications: Multilevel versus two-level converters”**, in AC and DC Power Transmission, 2010. AC/DC. 9th IET International Conference on, 2010, pp. 1-5.2010.

- [61] Jacobs K, Saad H, Dennetière S, “**Modelling of semiconductor losses of MMC in EMTP**”, 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Trondheim, Norway, June 2016.
- [62] Wang X, Carrasco M, Mancilla D F and Connors D, “ **Accelerating detailed simulations of an HVDC system based on modular multilevel converters in a multi-core environment**”, North American Power Symposium (NAPS), 2015, Charlotte, NC, pp. 1-6. 2015.
- [63] Li X, Yuan Z, Fu J, Wang Y, Liu T and Zhu Z , “**Nanao multi-terminal VSC-HVDC project for integrating large-scale wind generation**”, 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, National Harbor, MD, pp. 1-5. 2014.
- [64] <http://www.ece.uidaho.edu/hvdcfacts/>.



## ملخص

خلال السنوات الأخيرة نمت مجال إلكترونيات الطاقة بشكل كبير، حيث يوفر إمكانيات هائلة لتحويل الطاقة الكهربائية، وقد نتج عن هذا آفاق واعدة لاستخدام تكنولوجيا أنظمة VSC-HVDC. تتمتع هذه التكنولوجيا بمزايا تقنية واقتصادية كافية، حيث يمكن التحكم في تدفق الاستطاعة الفعالة والغير فعالة (الارتدادية) بمرونة واستقلالية كما يمكن الاحتفاظ بجهد تيار مستمر ثابت من خلال التحكم المطبق على الأنظمة ويعزز أيضاً مرونة شبكات التيار المتردد وإدماج الطاقات المتجددة. يهدف العمل المقدم في هذه الرسالة إلى تطوير إستراتيجية تحكم تحسن العيوب الملازمة لتقنية التحكم التقليدية من أجل الحصول على أداء ديناميكي جيد. تهدف هذه الأطروحة إلى تطوير إستراتيجية تحكم تعتمد على المنطق الغامض (المضرب) وتطبيقها على هذه الأنظمة لحل العديد من المشاكل في تحويل الطاقة ونقلها. من أجل التحقق من صحة النموذج بطريقة كاملة (نمذجة وتنفيذ إستراتيجية التحكم)، يتم إجراء العديد من اختبارات المحاكاة لهذا لرابط ذو ثلاث مستويات في وجود اضطرابات متعددة وفقاً لكل قانون تحكم مطبق.

## Résumé

Ces dernières années, le domaine de l'électronique de puissance s'est développé considérablement et offre un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique, Ceci a ouvert pour l'industrie de l'énergie, des horizons pour l'utilisation de la technologie des systèmes VSC-HVDC comme solution plus prometteuse.

La technologie VSC-HVDC présente des avantages adéquats de point de vue techniques et économiques, l'écoulement des puissances active et réactive peut être contrôlé de manière souple et autonome et la tension des lignes DC est alors maintenue constante par le control appliqué aux stations VSC-HVDC. Elle peut aussi renforcer la flexibilité des réseaux en courant alternatif existants et de raccorder les grands parcs éoliens.

Les travaux présentés dans cette thèse visent à développer une stratégie de commande qui permet de surmonter les inconvénients inhérents à la technique de commande conventionnelle afin d'avoir de bonnes performances dynamiques.

L'objectif de cette thèse est de développer une stratégie de commande basée sur la logique floue qui est systématique pour les systèmes HVDC intégrant des convertisseurs VSC et résoudre plusieurs problèmes dans la conversion et le transport d'énergie. Afin de valider le modèle de façon complète (la modélisation et l'implantation de la stratégie de commande), plusieurs tests de simulation sont effectués permettant de visualiser le comportement du système VSC-HVDC à base d'IGBT à trois niveaux à point neutre calé (PNC) à la puissance nominale et en présence de multiples perturbations selon chaque loi de commande implantée.

## Abstract

In recent years, the field of power electronics has grown considerably and offers enormous potential for the conversion of electrical energy, this has opened up for the energy industry, horizons for the use of VSC-HVDC systems technology as a more promising solution.

The VSC-HVDC technology has adequate technical and economic advantages, the flow of active and reactive powers can be controlled flexibly and autonomously and the DC voltage is then kept constant by the control applied to stations of the VSC-HVDC. It can also strengthen the flexibility of existing AC networks and connect large wind farms.

The work presented in this thesis aims to develop a control strategy that overcomes the drawbacks inherent in the conventional control technique in order to have good dynamic performance.

The objective of this thesis is to develop a control strategy based on fuzzy logic which is systematic for HVDC systems integrating VSC converters and to solve several problems in energy conversion and transport.

In order to validate the model in a complete way (modeling and implementation of the control strategy), several simulation tests are carried out allowing to visualize the behavior of the VSC-HVDC system based on IGBT on three-level neutral point clamped (NPC) at nominal power and in the presence of multiple disturbances according to each control law implemented.