الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MÉDÉA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Électrique

Option : Commande Électrique Industrielle

THEME

Commande de liaisons dans un réseau HVDC à deux Terminaux

Proposé et dirigé par :

Dr. HENINI Noureddine

Pr. TLEMCANI Abdelhalim

Préparé et présenté par :

AMMI Elhosseyn.

SLIMANE Hamza.

2018– 2019.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A l'âme du défunt de mon cher père, à ma très chère mère ;

A mon grand père et mes grandes mères

A mes chères sœurs

Mes chers frères

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux

Commande Electrique industrielle

À tous les professeurs

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment

AMMI Elhosseyn

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A l'âme du défunt de mon cher père, à ma très chère mère ;

A mon grand père et mes grandes mères

A mes chères sœurs
Mes chers frères

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux
Commande Electrique industrielle
À tous les professeurs

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment

SLIMANE Hamza

Remerciement

Nous remercions ALLAH de nous avoir prêté vie, santé
Et volonté pour achever ce travail.
Nous remercions vivement, Dr. HENINI Noureddine notre
Encadreur et Mr. TLEMCANI Abdelhalim qui nous avons
aidé Dans ce modeste travail.
Nous remercions profondément touts professeur qui
Nous avons enseigné durant tout le cycle de nos études.
Nos sincères remerciements accompagnés de vive
Reconnaissance vante aux nos amis de l'université
Dr. YAHIA FARES de Médéa, pour leurs encouragement et
Leur soutien moral.
Nous remercions pareillement tous les membres de jury
Qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.
Nous adressons les plus chaleureux remerciements et
Tout gratitude à tous nos amis chacun de son nom.
Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de
Prés ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Elhosseyn.Hamza

الملخص:

تنقسم أهداف هذه الرسالة بشكل أساسي إلى قسمين:

يُقترح هيكل تحكم لتحقيق .VSC على أساس محول MTDC و HVDC الأول هو نمذجة والتحكم في أنظمة النقل
تم توضيح طريقة التحكم المقترحة من .VSC-MTDC و VSC-HVDC الاستقرار وتحسين السلوك الديناميكي لأنظمة
باستخدام نماذج متوسطة من المحولات التي (SPS) SimPowerSyem و Matlab / Simulink خلال المحاكاة تحت
الكلمات الأساسية: شبكة .تمت دراستها

على مستويين VSC ، تحكم MMC ، محول VSC ، محول HVDC

Résumé :

Les objectifs des travaux de ce mémoire sont répartis principalement sur deux volets : Le premier consiste à modéliser et à contrôler les systèmes de transport HVDC et MTDC à base du convertisseur VSC. Une structure de commande est proposée pour la stabilisation et l'amélioration du comportement dynamique des systèmes VSC-HVDC et VSC-MTDC.

L'approche de commande proposée a été illustrée par simulation sous Matlab/Simulink et SimPowerSyem (SPS) en utilisant des modèles moyens des convertisseurs étudiés.

Mots clés : Réseau HVDC, Convertisseur VSC, Convertisseur MMC, Commande VSC à deus niveaux.

ABSTRACT :

The objectives of the work of this thesis are mainly divided into two parts: The first is to model and control the HVDC and MTDC transport systems based on the VSC converter. A control structure is proposed for the stabilization and improvement of the dynamic behavior of the VSC-HVDC and VSC-MTDC systems.
The proposed control approach was illustrated by simulation under Matlab / Simulink and SimPowerSyem (SPS) using average models of the converters studied.

Key words: HVDC network, VSC converter, MMC converter, VSC control at two levels.

Table des matières

Résumé
Table des figures
Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale……..1

CHAPITRE01 : ÉTAT DE L'ART SUR LA TECHNOLOGIE HVDC

1.1Introduction…….…...2

1.2Etat de l'art sur les réseaux de transport à courant continu……2

1. 2.1.Limitation technique pour le transport sous-marin……..2

1.2.2Transport d'énergie moins coûteux sur de longues distances ……3

1.2.3Impact environnemental…….4

1.2.4Liaisons de réseaux asynchrones……4

1.2.5Contrôlabilité et stabilité…….5

1.3 Historique…….....6
1.4Applications……6
1.5Types de configurations HVDC…….7
1.5.1 Lien mono-polaire…….....7

1.5.2 Lien bipolaire……...7
1.5.3 Lien homopolaire …….....8
1.6 Présentation des différents systèmes de conversion……..8

1.6.1HVDCàbasede LCC……9

1.6.2HVDCà base de VSC……....10

1.7VSC 2 niveaux……...10

1.8Vue d'ensemble d'une liaison VSC…….....12
1.8.1 Groupes d'interrupteurs VSC……13
1.8.2Transformateurs…….13
1.8.3l'indice de modulation k ……13
1.8.4Inductances de phase…….13
1.8.5Filtres AC…….....13
1.8.6Condensateurs DC…….13
1.8.7Lien DC…….13
1.9Démarrage de la liaison…….13
1.10Conclusion……...14

CHAPITRE02 : MODÉLISATION DU SYSTÈME VSC-HVDC À DEUX NIVEAUX

2.1Introduction……...15
2.2Configuration du système…….15
2.3Modélisation des convertisseurs……...…16
2.3.1 Principe de fonctionnement de convertisseur avec MLI.....19
2.3.2 PLL (*Phase Locked Loop*)……..19
2.3.3 Régulation de courant……19
2.3.4 Contrôle de tension à CC……...22
2.4 Contrôle du convertisseur (VSC-HVDC)…….....23
2.5Conclusion…….24

CHAPITRE03 : COMMANDE D'UNE LIAISON HVDC-VSCC

3.1INTRODUCTION…….....25
3.2.Contrôle d'une liaison HVDC-VSC…….25
3.3Structure de contrôle…….26
3.4 Contrôle externe……27
3.4.1Contrôledelapuissanceactive……..27

3.4.2Contrôledelapuissanceréactive……..28

3.4.3ContrôledelatensionAC…….29

3.4.4Contrôleéxterneglobal……..….29

3.5 Contrôle interne……30

3.5.1Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse WidthModulation)..32

3.5.2PWMintersectée……...32

3.6 Caractéristiques ……..33

3.7 Simulation et discussion…….33
3.7.1 Simulation de système VSC-HVDC à deux niveaux……33

3.8 Résultat de simulation……..35
3.9Conclusion…….38

Conclusion générale

Annexe

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 − Comparaison des pertes dans une liaison HVAC ou HVDC……..3

Figure 1.2 −Lien mono-polaire…….....8

Figure 1.3 –Lien bipolaire……..8

Figure 1.4 – Lien homopolaire……8

Figure 1.5 − Schéma illustratif des réseaux de transport en haute tension……..9

Figure 1.6 − Convertisseur VSC à 2 niveaux……..11

Figure 1.7 − Convertisseur VSC à 3 niveaux……..12

Figure 1.8 − Aperçu d'une liaison VSC-HVDC……..12

Figure 2.1- Le système VSCHVDC……15

Figure 2.2 -Topologie de deux niveaux avec 6 interrupteurs…….16

Figure 2.3- La régulation de courant de système à deux niveaux……20

Figure 2.4- La régulation du courant de système à deux niveaux……21

Figure 2.5- La régulation du courant de système à deux niveaux……21

Figure 2.6- Régulateur de la tension DC……..23

Figure 2.7- Structure de contrôle du convertisseur triphasé (VSC-HVDC)……23

Figure 3.1- Structure de contrôle d'une liaison HVDC VSC…….25

Figure 3.2 - Station d'une liaison VSC-HVDC……26

Figure 3.3 – Structure de contrôle d'une station VSC-HVDC……..26

Figure 3.4 – Contrôle externe d'une station VSC……..30

Figure 3.5 – Contrôle interne d'une station VSC…….....32

Figure 3.6 – PWM intersectée pour une phase……...33

Figure3.7- Forme du courant du réseau à côté redresseur……..35

Figure3.8-forme de la tension à de côté redresseur de 3 phases MLI…….35

Figure 3.9- forme de tentionVdc_3L…….36

Figure 3.10- forme de la tension courant de réseaux trois phases…….36

Figure3.11-forme de tension de réseau pu……...37

Figure3.12-forme de la puissance active……..37

Figure3.13-forme de la puissance réactive……...38

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AC	Courant alternatif
DC	Courant continu
GTO	Gate Turn Off Thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
HV AC	High Voltage Alternating Curren
MTDC	Multi-Terminal DC grids
CSC	Current Source Converter
VSC	Convertisseur source de tension (Voltage Source Converter)
HVDC	Haute tension à courant continue (Hight Voltage Direct Courant)
DC	Courant continu (Direct Courant)
PLL	Phase Locked Loop
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolé (Insulated Gate Bipolar Transistors)
SCC	Convertisseur Source du Courant
MLI	Modulation de largeur d'impulsion (PWM)
LCC	Line Commutated Converters

Puissance

Sn	puissance apparente, Kva
Pw	puissance active
Q	puissance réactive

Courant

Im	L'amplitude du courant, Ampère
I_{dq}	Courant de ligne dans le repère dq, Ampère
i^*_{dq}	Courant de référence, Ampère
i_{cdq}	Courant du convertisseur dans le repère dq, Ampère
i_l	Courant de ligne, Ampère
i_k	Courant traversant le filtre, Ampère
i_{ck}	Courant du convertisseur (redresseur), Ampère
i_{pcck}	Courant de phase au PCC, Ampère

Tension

V_{lnabc} Tension de ligne, Volt

V_{labc} Tension de réseau, Volt

Vm Amplitude de la tension, Volt

V_{sdq} Tension de la source dans le repère dq, Volt

V_{cdq} Tension d'entrée du convertisseur dans le repère dq, Volt

V_{dc} Tension continue, Volt

$V_{dc_réf}$ Tension de référence, Volt

Inductance

L_l Inductance de ligne, Henry

Resistance

R Résistance de ligne

Capacité

C Capacité du bus de tension continue, Farad

C_f Capacité de filtre

Liste des tableaux

Tableau 3.1 Paramètres du câble CC……..34

Tableau 3.2 Paramètres du système VSC-HVDC……...34

Introduction générale

Les besoins en énergie électrique sont en pleine croissance, et les infrastructures basées sur des réseaux de transport interconnectés et maillés arrivent peu à peu en limite de leurs capacités. Ainsi, le recours à de nouveaux moyens de production et le besoin de construire de nouvelles infrastructures pour acheminer cette énergie nous conduit à l'exploration de nouveaux axes de recherche dans le domaine de production et transport d'énergie électrique.

En effet, l'énergie électrique est aujourd'hui produite, transportée et distribuée en courant alternatif (AC) via les réseaux de transport à courant alternatif haute tension (HVAC). Cette technologie est appuyée par les spécialistes en domaine de l'électronique de puissance en raison de la simplicité de la production (les alternateurs sont plus simples à manipuler et plus ables que les générateurs à courant continu (DC)) ainsi que la possibilité de modifier le niveau de tension moyennant les transformateurs en haute tension (HT).

C'est ainsi, qu'au cours de la dernière décennie, un intérêt mondial a été porté pour la recherche et le développement de nouvelles topologies de convertisseurs AC/DC. En été, des progrès significatifs ont été établis dans le développement des composants semi-conducteurs contrôlables grâce à l'apparition des dispositifs à base de thyristor et d'IGBT. De telles innovations on fait apparaître deux grandes familles de technologies de conversion, à savoir ; les convertisseurs à commutation de ligne (LCC) et les convertisseurs à source de tension (VSC).

Les études considérées sont présentées dans ce mémoire organisée en trois chapitres.

Le premier chapitre commence par une introduction du transport de l'énergie en courant continu qui illustre l'intérêt du recours au transport à courant continu et son avantage par rapport à technologie classique à courant alternatif. Nous y mettons ensuite l'accent sur les différences entre les systèmes de conversion utilisés à savoir LCC et VSC et les types de configuration et les applications d'un système **HVDC** nous avons introduit les différents types de convertisseurs VSC.
La dernière section est dédiée à un exposé de l'état de l'art des stratégies de contrôle des réseaux HVDC à base de convertisseurs VSC à deux niveaux.
Le deuxième chapitre nous avons modélisé un système VSC-HVDC. Afin que nous avons proposé dans ce chapitre est composé d'une source de puissance et un bus infini, connecté à une ligne de transmission de haute tension à courant continu, via deux convertisseurs VSC et un condensateur de lissage.
Le dernier chapitre, on simulé le système VSC-HVDC à deux niveaux En outre, la commande MLI sinusoïdale.

CHAPITRE I

*É*TAT DE I'ART SUR LA TECHNOLOGIE HVDC

1.1Introduction

Dans ce chapitre nous avons exposées dans la première partie, une introduction des réseaux de transport à courant continu est présentée. La deuxième section présente les différentes technologies des systèmes de conversion utilisées pour les applications HVDC. Dans la troisième section, deux modèles moyens de convertisseurs VSC sont présentés.
Les stratégies de commande des systèmes HVDC et MTDC à base des convertisseurs VSC sont exposées dans la quatrième partie. La dernière section est dédiée à un exposé de l'état de l'art des stratégies de contrôle des réseaux HVDC à base de convertisseurs VSC à deux niveaux.

1.2Etat de l'art sur les réseaux de transport à courant continu

Le dilemme entre courants alternatifs et continus ne date pas d'hier. En effet, à la fin des années 1880, Thomas Edison et Nikola Tesla s'opposaient déjà à ce sujet. Le premier était détenteur de nombreux brevets sur les courants continus, et soucieux de conserver sa mainmise dans le domaine de l'électricité. Le second apportait une innovation conséquente au monde de l'électricité en développant le courant alternatif ainsi que d'autres technologies associées, dont le moteur a induction polyphasée et le transformateur.

Les expériences de Tesla constituaient une menace pour l'empire d'Edison, donnant lieu à un arrosement appelée "Lutte des courants". Associe à George Westinghouse, Nikola Tesla remporté une bataille majeure en décrochant un contrat leur permettant d'installer l'ensemble de l'infrastructure électrique des USA, en courant alternatif. La distribution d'énergie électrique en courant alternatif devint ensuite la norme dans le monde entier.

Le choix du courant alternatif était en grande partie du à sa compatibilité avec le transformateur, lui permettant d'élever ou d'abaisser le niveau de tension. Depuis, plus de 130 années sont passées, et le réseau électrique mondial s'est complexe. De nouvelles technologies ont été développées, de nouvelles applications sont apparues sur le réseau et de nombreuses recherches ont été exécutées. Celles-ci ont amende la conclusion que, dans certains cas, le courant continu pouvait être une meilleure option pour le transport d'énergie électrique à haute tension. Nous allons passer en revue les différents critères qui peuvent justifier l'utilisation des transmissions HVDC.

1.2.1Transport d'énergie moins coûteux sur de longues distances :

Il s'agit là de l'atout principal des liaisons HVDC. Comme illustré sur la figure (1.1), à partir d'une certaine distance de liaison, il est financièrement intéressant de transporter l'énergie en courant continu.

Le dilemme entre courants alternatifs et continus ne date pas d'hier. En effet, a la fin des années 1880, Thomas Edison et Nikola Tesla s'opposaient déjà à ce sujet. Le premier était détenteur de nombreux brevets sur les courants continus, et soucieux de conserver sa mainmise dans le domaine de l'électricité. Le second apportait une innovation conséquente au

monde de l'électricité en développant le courant alternatif ainsi que d'autres technologies associées, dont le moteur a induction polyphasée et le transformateur.

Les expériences de Tesla constituaient une menace pour l'empire d'Edison, donnant lieu à un arrosement appelée "Lutte des courants". Associe a George Westinghouse, Nikola Tesla re-mporte une bataille majeure en décrochant un contrat leur permettant d'installer l'ensemble de l'infrastructure électrique des USA, en courant alternatif. La distribution d'énergie électrique en courant alternatif devint ensuite la norme dans le monde entier.

Le choix du courant alternatif était en grande partie du a sa compatibilité avec le transformateur, lui permettant d'élever ou d'abaisser le niveau de tension. Depuis, plus de 130 années sont passées, et le réseau électrique mondial s'est complexe. De nouvelles technologies ont été développées, de nouvelles applications sont apparues sur le réseau et de nombreuses recherches ont été exécutées. Celles-ci ont amende la conclusion que, dans certains cas, le courant continu pouvait être une meilleure option pour le transport d'énergie électrique à haute tension. Nous allons passer en revue les différents critères qui peuvent justifier l'utilisation des transmissions HVDC.

1.2.2Transport d'énergie moins coûteux sur de longues distances :

Il s'agit là de l'atout principal des liaisons HVDC. Comme illustré sur la figure (1.1), à partir d'une certaine distance de liaison, il est financièrement intéressant de transporter l'énergie en courant continu.

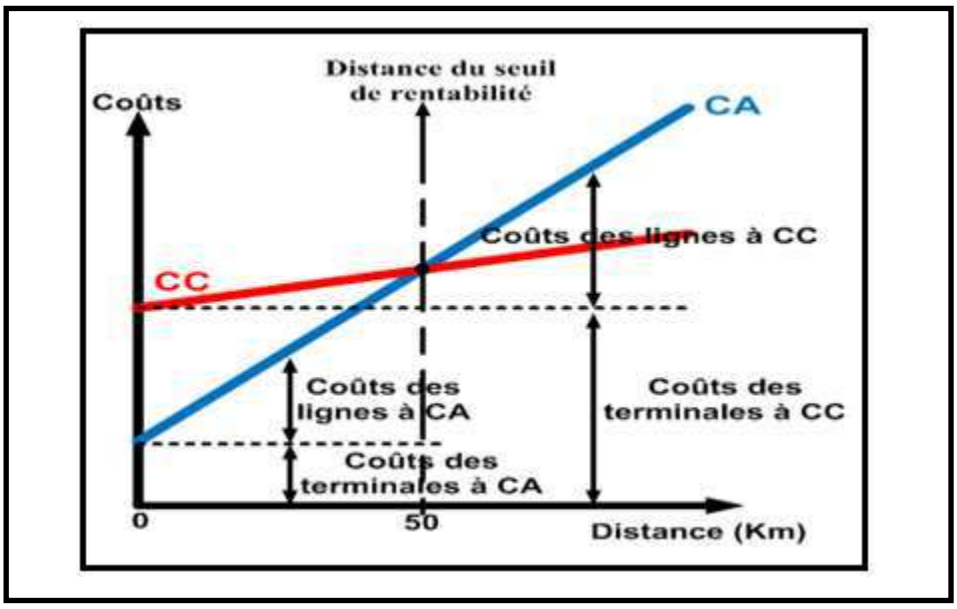


Figure 1.1 − Comparaison des pertes dans une liaison HVAC ou HVDC

Pour estimer le coût total d'une installation, il faut prendre en compte plusieurs aspects. En considérant des liaisons HVDC et HVAC ayant les mêmes puissances nominales, on relève les observations suivantes :

- **Coût lie aux stations :** il est plus relevé pour des liaisons HVDC que pour les stations HVAC [1]. Les stations HVDC sont plus complexes, elles contiennent, entre autres, un convertisseur et des filtres [2]. Cela augmente le coût des stations par rapport à l'HVAC, aussi bien au niveau de leur construction que de leur fonctionnement (dû à des pertes plus importantes).
- **Coût lie a la longueur de la liaison :** Ce prix par kilomètre est plus élevé pour les liaisons HVAC que pour les HVDC. Le prix à la construction est plus élevé car une liaison AC nécessite la présence de compensateurs [2]. Les pertes sur la liaison AC sont aussi plus élevées à cause de l'effet de peau [2]. Pour une même puissance transportée, un lien DC ne nécessite que deux conducteurs, pour trois dans le cas des liaisons AC, ce qui réduit de 33% les pertes par conduction. Notons aussi que les pertes par effet couronnent pour les lignes aériennes [3] et les pertes par hystérésis diélectrique pour les longs câbles [3] sont également des désavantages majeurs en termes de pertes/km pour les liaisons AC.

De plus, la résistivité de l'eau de mer étant très peu élevée, la mer peut elle-même assurer le rôle de lien de retour, ce qui diminue les frais de construction [6].

1.2.3Impact environnemental

Le choix d'une liaison HVDC peut aussi être motive pour des raisons liées a l'environnement qu'il traverse [8]. Les liaisons HVDC peuvent transporter plus de puissance que les liaisons HVAC pour une taille donnée de conducteurs, ce qui signifié que pour une même puissance transmise, les liaisons HVDC nécessitent un droit de passage deux fois moins important [6][9].

La possibilité de relier des zones a 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 qu'AC [1].

1.2.4Liaisons de réseaux asynchrones

Une connexion directe entre deux réseaux asynchrones n'est pas possible en courant alternatif [7]. Les liaisons HVDC permettent, elles, de les lier. Ce lien peut être de type "back-to-back" , ou via une liaison plus longue.

1.2.5Contrôlabilité et stabilité

Chaque extrémité de la liaison se trouve une station de contrôle. Celle-ci sert à régler le transit de puissance active sur la liaison. Elle permet un contrôle de puissance rapide et précis [9]. Cette contrôlabilité permet également de résoudre des problèmes lies à la stabilité d'un réseau.

1.3 Historique

La technologie HVDC à beaucoup évolue depuis sa création. Nous allons passer en revue Les dates clues de son développement :

1941 _ _ __ Construction de la première liaison HVDC : Le premier contrat pour une liaison HVDC fût signe en Allemagne. Il s'agissait d'une liaison ±200 kV de type CSC avec diodes a vapeur de mercure, dimensionnée pour un transit de 60 MW Sur 115 km de câble entre Berlin et Elbe [7]. Le projet fût achevé en avril 1945, mais n'a jamais été mis en marche. En effet, a la fin de la guerre, l'URSS démonta la liaison pour la réinstaller entre Moscou et Kashima. [10]. Elle servira ensuite de centre de recherche.

1954 _ _ __ Première liaison HVDC commerciale : Elle permit de relier l'ile Gotland avec la Suède continentale. Son développement fut dirige par Unau 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.

1972 _ _ __ Première liaison utilisant uniquement des thyristors : Le projet "Eel River" a permis de faire le lien entre deux zones asynchrones : Le Québec et le Nouveau-Brunswick [11]. Cette connexion de type "back-to-back" utilisait quatre thyristors en parallèle [12] par bras pour pouvoir transporter sursèment de courant. L'émergence du thyristor est une étape importante dans le développement des liaisons HVDC, ceux-ci coutent moins cher à l'achat que des diodes a vapeur de mercure et minimisent les coûts de fonctionnement [12].

1978 _ _ __ Première liaison a l'échelle du Méga volt : Le projet de Cahora Bassa relie une station hydro-électrique sur le Zambèze et la ville de Johannesburg via une liaison de ±533 kV [12]. Ce projet est important pour plusieurs raisons. La tension sur sa ligne est la plus haute a l'époque, que ce soit sur des liaisons AC ou DC [12]. La longueur de la ligne (1360 km) est aussi un record, et il s'agit de la première liaison HVDC sur le continent africain. Ce projet d'envergure sera malheureusement souvent qualifié d'éléphant blanc par la suite [13].

1985 _ _ __ Amélioration considérable des thyristors : Les thyristors refroidis à l'eau [14] et isoles a l'air [17] permettent de supporter des courants et des tensions plus

importants. Cela diminue le besoin de mettre des thyristors en parallèle ou en série, ou de faire appel a différents services auxiliaires, comme on le faisait par le passé [14]. Le premier projet utilisant ces techniques est le projet "Nelson River Bipole 2", qui donna lieu a une globalisation de l'utilisation de celles-ci [12].

1986 _ _ __ Projet Itaipu : Cette liaison fait le lien entre la centrale hydro-électrique du barrage d'Itaipu, et la ville de Sao Paulo. Nous mettons en évidence cette installation car elle est restée la plus importante liaison HVDC durant de nombreuses années (Puissance nominale de 6000 MW et tension ±600 kV [12]). Tout d'abord en er matière de tension, elle ne fut dépassée qu'en janvier 2010 par la liaison Yunnan-Guangdong et sa tension de ±800 kV [16]. Puis en puissance nominale, par la liaison Xiangjiaba - Shanghai et ses 6400 MW [17].

1986 _ _ __ Premier HVDC multi-terminal : Cette installation a permis de relier la production d'Hydro-Québec avec plusieurs villes : Des Cantons, Comerford, Nicolet, Radisson et Sandy Pond. Certains terminaux ne faisaient pas partie du projet initial et ont été greffes par après [12].

1986 _ _ __ Première liaison de type VSC : Après avoir accueilli la première liaison HVDC commerciale, l'ile Gotland est une fois de plus pionnière dans le domaine des liaisons HVDC en inaugurant la première liaison de type VSC. Elle offre une panoplie de nouvelles possibilités, citons notamment le contrôle indépendant des puissances réactives et actives [18] et l'alimentation d'un réseau faible, sans génération puissance.

2010 _ _ __ Première liaison de type MMC : Le projet Trans Bay Câble, à San Francisco, est le premier à utiliser un type spécifique de VSC : 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 [19]. La liaison Trans Bay Câble permet de transmettre 400 MW avec un bus DC de ±200 kV.

1.4Applications

Par le passée, pour une série de projets, la construction d'une liaison HVDC s'est avérée être la meilleure solution, voire la seule, pour répondre a un besoin transmission d'énergie. Nous allons passer en revue les raisons qui ont pu amener à faire le choix d'une liaison HVDC.

- **Sources lointaines :** dans certains cas, les zones de production de masse peuvent être très éloignées des zones de consommation de masse [1]. Il s'agit de sources dont l'emplacement ne peut être choisi facilement. Prenons l'exemple de la liaison de 800 km entre le barrage d'Itaipu, qui profite de la puissance hydro-électrique du Rio Paraná, et la ville de São Paulo, qui accueille prés de 12 millions d'habitants.

- **Impossibilité de production locale :** Le choix de l'HVDC peut également être causé par la zone nécessitant un apport de puissance. La ville de Visby, sur l'ile suédoise Gotland, a fait le choix de s'alimenter via une liaison HVDC par câble souterrain pour éviter d'endommager son environnement avec une production locale. Comme avancée précédemment, le transport par câble en AC est impossible au-delà d'une certaine distance. Ce centre archéologique et touristique y a vu une solution à grande demande en énergie.

- **Asynchronisme :** En faisant fonctionner les deux extrémités d'une liaison a des fréquences déférentes, il est possible de relier deux réseaux asynchrones [8]. C'est par exemple le cas de la liaison de Garabi, qui lie l'Argentine et le Brésil. Les réseaux de ces deux pays ont respectivement des fréquences propres de 50 Hz et 60 Hz [6].

- **Contrôle de puissances :** Une interconnexion de réseaux permet d'avoir une meilleure tenue en fréquence, une assistance mutuelle en cas d'incident, une réduction des réserves tournantes et une facilitation de la marche de l'électricité [8]. Une interconnexion via liaisons HVDC permet un contrôle aisé, rapide, et précis de cette interconnexion en commandant le flux de puissance active. Aux Philippines, les performances de contrôle de la liaison sous-marine entre la centrale géothermique de l'île Leyte et l'île de Luzon ont permis d'améliorer la stabilité du réseau AC de Manille [8]. Notons également que les liaisons de type VSC permettent de contrôler indépendamment les flux de puissances actives et réactives, ce qui est utile dans certaines applications, notamment pour des éoliennes offshores [21].

1.5Types de configurations HVDC

1.5.1 Lien mono-polaire

Ces liaisons, représentées sur la figure (1.2) sont constituées d'un seul conducteur polarisé, et utilisent soit la terre, soit la mer ou bien un câble métallique pour le retour. Ce câble métallique est utilisé pour éviter les interférences harmoniques et la corrosion. Le retour par la terre ou la mer est la solution la plus économique. Vu que l'effet couronne est plus important dans un conducteur de polarité positive [22], ces liens mono-polaires opèrent généralement avec une polarité négative.

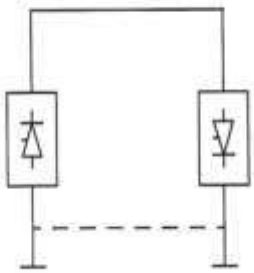
1.5.2 Lien bipolaire

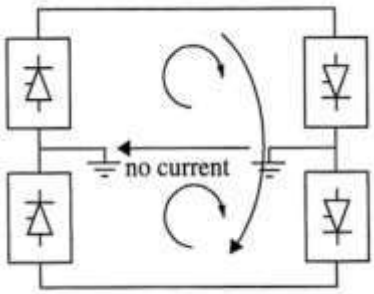
Une liaison bipolaire a deux conducteurs : un positif et un négatif. Chaque terminal a deux séries de convertisseurs de même puissance, positionnes en série sur le coté DC (voir figure 1.3). La jonction entre les deux convertisseurs est connectée à la masse. Les liaisons bipolaires sont donc une combinaison de deux liens mono-polaires.

En situation normale, les deux stations d'un terminal fonctionnent et le même courant transite dans les deux pôles. Il n'y a donc pas de courant vers la terre. Pour des raisons de maintenances ou de défaut d'un pôle, il est toujours possible de fonctionner en liaison mono-polaire. Les liaisons bipolaires sont utilisées lorsque les besoins de capacité de transmission dépassent ceux d'un seul pôle [8].

1.5.3 Lien homopolaire

Dans ce type de liaisons (voir figure 1.4), les deux conducteurs ont la même polarité et le retour se fait par la terre ou par un câble métallique. Le seul avantage des liens homopolaires réside dans un coût moins élevée pour l'isolation.
Néanmoins, les désavantages liés à un retour par la terre l'emportent. Les liaisons bipolaires Sont donc les plus utilisées [22].





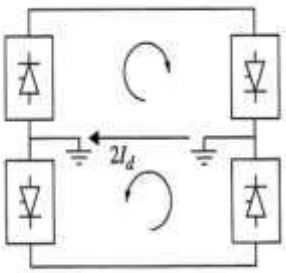


Figure 1.2 −Lien mono-polaire **Figure 1.3** –Lien bipolaire **Figure 1.4** – Lien homopolaire

1.6 Présentation des différents systèmes de conversion

L'élément le plus important dans un réseau HVDC est le système de conversion d'énergie entre AC et DC. La station de conversion située à l'extrémité d'émission est appelée le redresseur (conversion du courant alternatif en courant continu), tandis que celui de l'extrémité de réception est appelée l'onduleur (conversion du courant continu en courant alternatif). Comme illustré sur la figure 1.1, il existe deux principales technologies de conversion dans les systèmes de transport HVDC : Le convertisseur à commutation de ligne (LCC) et le convertisseur à source de tension (VSC).

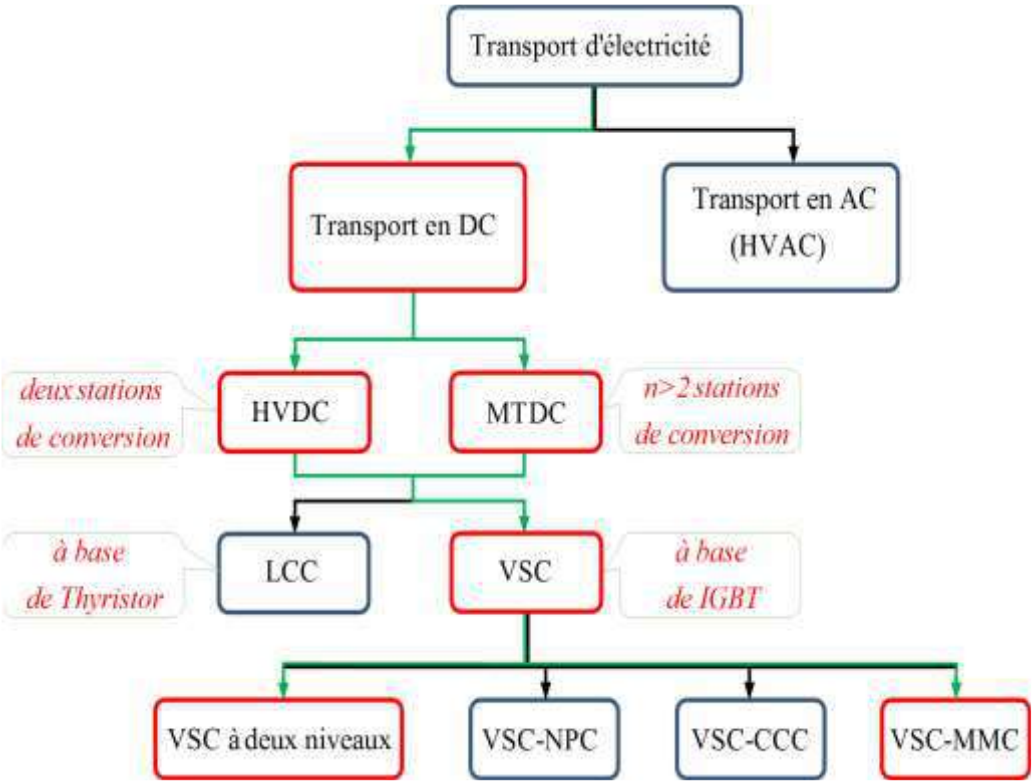


Figure 1.5 − Schéma illustratif des réseaux de transport en haute tension.

1.6.1 HVDC à base de LCC

Les systèmes HVDC conventionnels (ou classiques) sont basés sur LCC avec valves à thyristors qui sont utilisés pour convertir le courant entre AC et DC. Le composant principal d'un LCC est le pont de six impulsions (pont de Graetz) composé par six commutateurs commandés ou valves à thyristors. Pour faire fonctionner le convertisseur à la tension nominale souhaitée, les thyristors sont généralement connectés en série pour constituer un commutateur à thyristors approprié. L'inconvénient du pont à six impulsions est que les harmoniques considérables du courant AC et tension DC sont produits à cause du changement de phase à chaque60°. Pour remédier à ce problème, deux ponts à six impulsions sont connectés en série pour constituer un pont à douze impulsions. De cette manière, chacun des deux ponts à six impulsions est connecté à un rail de courant continu, dont le changement de phase à chaque 30° permet d'éliminer certaines harmoniques [21].

Un LCC a un seul degré de liberté, à savoir, l'angle d'amorçage qui représente le décalage de la phase du courant alternatif en arrière de la tension. En outre, les LCC ne peuvent pas mis hors tension par eux-mêmes. Pour contourner ce problème, une source de tension AC externe relativement forte est nécessaire pour effectuer la commutation. De plus, pour changer le sens de flux de la puissance dans un réseau LCC-HVDC, il est nécessaire d'inverser les polarités des tensions aux niveaux des

commutateurs. La tension de bus DC est contrôlée seulement à travers la commande de l'angle d'amorçage des commutateurs [22].

1.6.2 HVDC à base de VSC

En raison de certains avantages tels que l'inversion du sens de transfert de la puissance sans besoin de changer la polarité de la tension DC, les convertisseurs VSC sont préférés par rapport au LCC dans certains cas de transport.

Cette topologie est construite avec des dispositifs à semi-conducteurs qui peuvent être activés et désactivés librement, à savoir : IGBT et GTO. Il offre plusieurs avantages par rapport au LCC, tels que :

- La modulation de largeur d'impulsion (MLI) peut être appliquée au fonctionnement de VSC pour produire librement sa propre onde de tension sinusoïdale indépendamment du système AC et donne lieu à des performances dynamiques élevées.
- De plus, le VSC à base de MLI peut générer une tension avec un angle de phase et amplitude désirée. À cause du retard de phase du courant AC par rapport de la tension AC, le LCC a besoin de consommer la puissance réactive pour maintenir l'amplitude de la tension AC dans la plage acceptable, alors que le VSC n'a pas besoin de consommer la puissance réactive. Par conséquent, le VSC est exile par rapport au LCC et il peut se placer partout dans le réseau.
- Contrairement aux LCC, une source de tension AC forte n'est pas indispensable pour le VSC connecté au réseau AC, et donc, il n'y a aucune restriction sur caractéristiques inhérentes sur les réseaux AC connectés aux VSC.
- Puisque le VSC possède deux degrés de liberté, il a la possibilité de contrôle puissance active et réactive de façon indépendante.
- Le transport de puissance bidirectionnelle peut être réalisé avec le VSC en changeant le sens du courant sans besoin de changer la polarité de la tension de sortie.

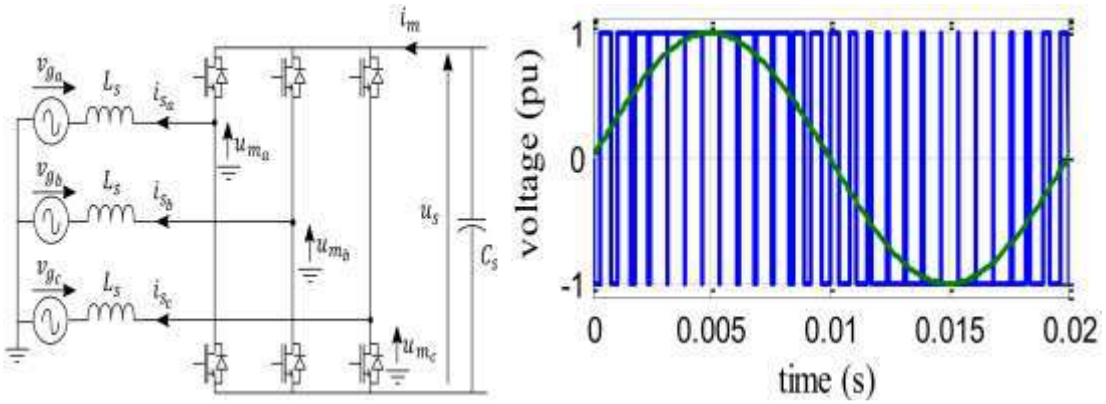
Dans l'industrie, ces types de convertisseurs sont HVDC (Siemens) et HVDC (ABB), qui ont une conception des stations presque semblable où la principale différence réside dans le nombre de niveaux du convertisseur. Les topologies des convertisseurs d'énergie VSC évoluent pour augmenter la puissance transférée, et elles sont classées selon trois types à savoir ; convertisseur à deux niveaux, convertisseur à trois niveaux, convertisseur multi niveaux et modulaire (MMC) [23],

1.7VSC 2 niveaux :

La topologie 2 niveaux a été utilisée pour plusieurs niveaux de puissance. La configuration de base d'un convertisseur 2 niveaux trois phases est présentée à la Figure (2-3.a). Dans un système réel les IGBT/diodes sont assemblés en série par centaines pour former des valves à très haute tension. Chaque IGBT est capable de supporter des courants entre 1 à 2kA et des tensions jusqu'à environ 3kV.

Grâce à la capacité d'allumage et de coupure de l'IGBT, chaque valve peut commuter plusieurs fois par cycle. Une diode antiparallèle est insérée afin de permettre le passage du courant négatif. À chaque instant, la tension phase-phase à la sortie du convertisseur peut être égale à la tension continue (+ *V*) ou égale à son opposée (- *V)*. En utilisant une stratégie de commande appropriée, il est donc possible de créer une tension alternative coté alternative.

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM- Pulse Width Modulation) est utilisée afin de réduire les harmoniques générés par ces commutations. Il existe plusieurs techniques de PWM, la plus classique consiste à comparer la tension de référence désirée (la modulante) à une fonction triangulaire (la porteuse). À la Figure (2-3.b), la tension de référence désirée (en vert) et la tension actuellement réalisée coté AC (en bleue), sont présentées. En ajoutant des filtres passifs à la sortie du convertisseur, les harmoniques générés par le PWM sont éliminés.



(a) Topologie. (b) Forme d'onde de la tension.

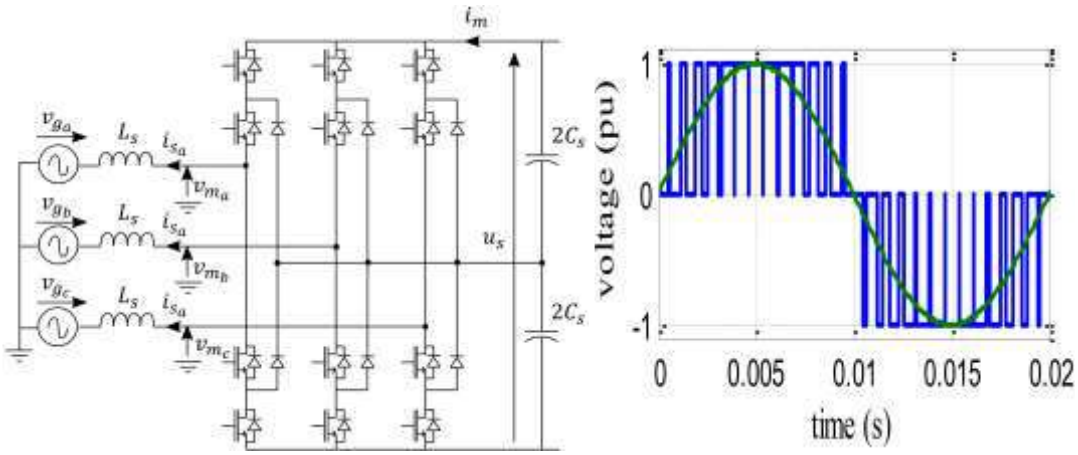
Figure 1.6 − Convertisseur VSC à 2 niveaux.

La figure (1.6) montre la structure la plus simple d'un convertisseur VSC. Le pont est constitué de six modules, et chaque module comprend un dispositif de commutation et une diode antiparallèle. Chaque phase du VSC peut être connectée soit à la borne positive continue, ou à la borne négative en courant continu. En ajustant les signaux de commande commutateurs, la tension de référence peut être reproduite, comme il est indiqué dans la figure (1.6b). Après filtrage par les filtres AC, cette série d'impulsions de tension ressemble à la forme d'onde de la tension de référence.

La topologie VSC à trois niveaux, montrée dans la figure (1.7), est aussi appelée convertisseur clampé par le neutre (NPC : Neutral Point Clamped converter). Le concept NPC

est basé sur la répartition de la tenue en tension sur les deux composants placés en série en utilisant des diodes de serrage (clamps). Ces deux diodes serrent le commutateur de tension à la moitié de la tension continue. Ainsi, chaque phase du VSC peut basculer sur trois niveaux de tension différents, à savoir ; la borne positive en courant continu, la borne continue négative et le point milieu.

Le convertisseur NPC à trois niveaux permet de minimiser les harmoniques pour rapprocher le signal de sortie à la référence, comme indiqué dans la figure (1.7b).



(a) Topologie. (b) Forme la tension.

Figure 1.7 − Convertisseur VSC à 3 niveaux.

1.8Vue d'ensemble d'une liaison VSC

Passons en revue les différents éléments de la figure (3.1) qui composent une liaison HVDC VSC [24].

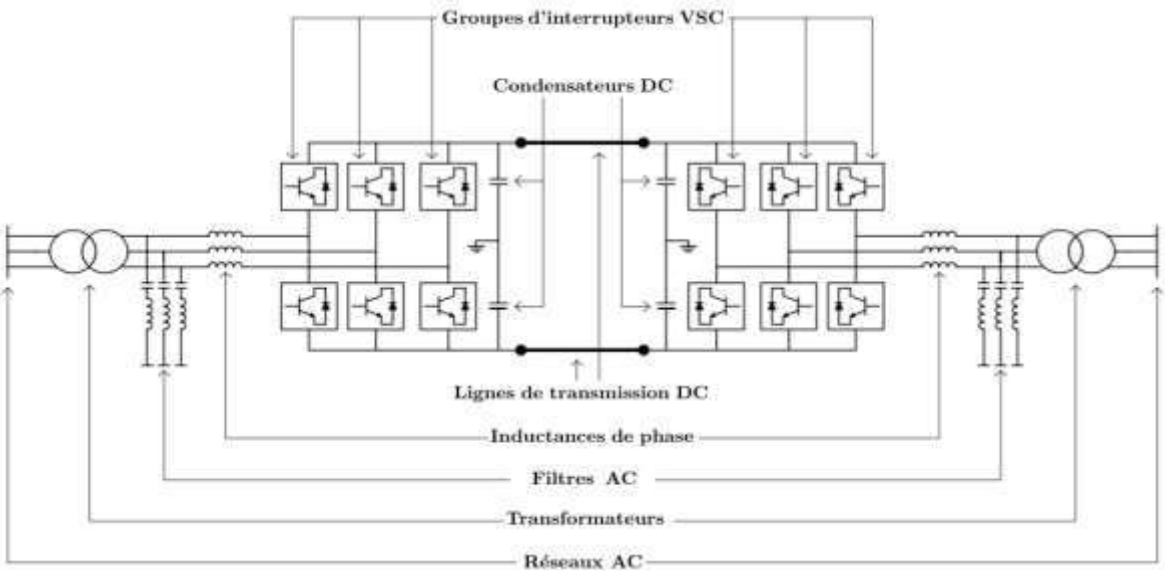


Figure 1.8 − Aperçu d'une liaison VSC-HVDC

1.8.1 Groupes d'interrupteurs VSC

Il s'agit d'une mise en série d'interrupteurs IGBT/-diode. Étant donne que les IGBT ne peuvent pas supporter une trop grande tension et que le lien DC est directement relie a ce groupe, le nombre d'interrupteurs mis en série dépendra de l'ordre de grandeur [25]. Tous les interrupteurs d'un groupe actives/désactives simultanément, en fonction de la commande générée par le générateur PWM, que nous aborderons plus en détail dans la section 3.2.4. Le fonctionnement d'un groupe est similaire a celui d'un seul couple IGBT/diode [26].

1.8.2Transformateurs

Ces transformateurs servent à faire le lien entre la tension du réseau et un niveau de tension convenable pour le convertisseur [25]. Ils permettent de fixer

1.8.3l'indice de modulation k

Qui vaut le rapport entre les tensions crête a crête de la fondamentale cotée AC et pôle à pôle cotée DC, de part et d'autre du convertisseur. Les rapports de conversion peuvent être modifies à l'aide d'un changeur de prise, suivant les besoins des réseaux. Notons que sa valeur a un impact sur la génération d'harmoniques [27].

1.8.4Inductances de phase

Cette inductance sert de lien énergétique entre le réseau et la source de tension que forme le VSC : ses paramètres sont bien connus et sont utiles pour le contrôle de la liaison, comme nous le verrons dans la section 3.2. Elle a aussi un rôle dans le filtrage des harmoniques de hautes fréquences.

1.8.5Filtres AC

Ces filtres servent à atténuer les harmoniques causées par la modulation PWM. Ces harmoniques sont d'ordres très élevées. Contrairement au cas des CSC, des bancs de condensateurs supplémentaires ne sont pas nécessaires pour avoir une production de puissance réactive sue sante. Les filtres apportent eux-mêmes une base de puissance réactive de manière à corriger le facteur de puissance. Les filtres AC en sortie de liaisons HVDC sont la plupart du temps des filtres passifs [27].

1.8.6Condensateurs DC

Ces bancs de capacités servent à stocker l'énergie au sein du lien DC afin de pouvoir contrôler le flux de puissance. Ils servent également à limiter l'ondulation de tension causée par la

PWM. Leur taille dépendra des lors à la fois de la tension désirée, et de l'ondulation de tension autorisée.

1.8.7Lien DC

Pour les liaisons CSC, ces liens DC sont soit des lignes aériennes, soit des câbles souterrains. Ces deux possibilités possèdent chacune leurs avantages. Pour les liaisons VSC, les câbles souterrains présentent un grand nombre d'avantages significatifs par rapport aux liaisons aériennes [23]. Par exemple, étant donne 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 câble présentant des avantages conséquents.

1.9Démarrage de la liaison

Comme dans le cas d'un défaut DC, la liaison HVDC peut être amenée être déconnectée. Il faut ensuite la redémarrer en rétablissant les contrôles un à un. Dans cette section, nous étudions le démarrage d'une liaison entre deux réseaux infinis. D'autres méthodes sont appliquées si la liaison relie un autre type de réseaux (passif, éteint ...).Les flux des puissances actives et les tensions DC aux deux stations sont illustres .Observons les différentes étapes du démarrage de la liaison.

Conclusion

Le premier volet de ce premier chapitre a été consacré à la présentation des réseaux de transport HVDC et à l'étude de ses différents constituants. L'idée était de souligner les avantages d'un réseau de transport à courant continu par rapport aux anciens systèmes de transport à courant alternatif (HVAC). De plus, nous avons introduit les différents types de convertisseurs VSC.

Dans le but de développer un modèle d'état qui décrit le comportement dynamique d'une station de conversion VSC connectée au réseau DC, deux modèles ont été présentées sans tenir compte de la dynamique de la ligne DC. Ces deux modèles seront utilisés dans le second chapitre afin de développer des approches de commande avancées de type non linéaire permettant d'assurer des performances meilleures que celles obtenues moyennant les méthodes classiques de contrôle.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les différentes techniques de commandes appliquées aux réseaux de transport HVDC et MTDC à base de convertisseurs VSC.

CHAPITRE II

MODÉLISATION DU SYSTÈME VSC-HVDC À DEUX NIVEAUX

2.1Introduction

Avant de commencer à modéliser un système VSC-HVDC, il est essentiel d'avoir une vision claire de ses composantes, les principes et de la plage de fonctionnement. Dans ce mémoire, nous avons utilisé le système VSC-HVDC, en exploitant ses derniers développements, sa capacité de transmission et la plage de puissance élevée.

Le système que nous avons proposé dans ce chapitre est composé d'une source de puissance et un bus infini, connecté à une ligne de transmission de haute tension à courant continu, via deux convertisseurs VSC et un condensateur de lissage.

2.2Configuration du système

Le système à deux niveaux est présenté par les deux convertisseurs à base de semi-conducteur IGBT qui fonctionne comme redresseur et onduleur et vice versa. Ces convertisseurs sont reliés par un bus à courant continu. Les systèmes VSC-HVDC peuvent augmenter la stabilité de la transmission, réduire les pertes de réseau, stabilise la tension et empêcher la propagation des défauts.

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et présenté les différents éléments constituant le système de conversion et de transport d'énergie. Premièrement, nous modélisons la source de puissance par un bus infini. Ensuite, nous modélisons les convertisseurs et les lignes de transmissions du système.

Enfin, un système de contrôle a été développé pour être adapté et fonctionnel. Le modèle présenté dans ce chapitre est un système de deux niveaux à base d'IGBT.

La configuration de système VSC-HVDC est présentée dans la figure (2.1):

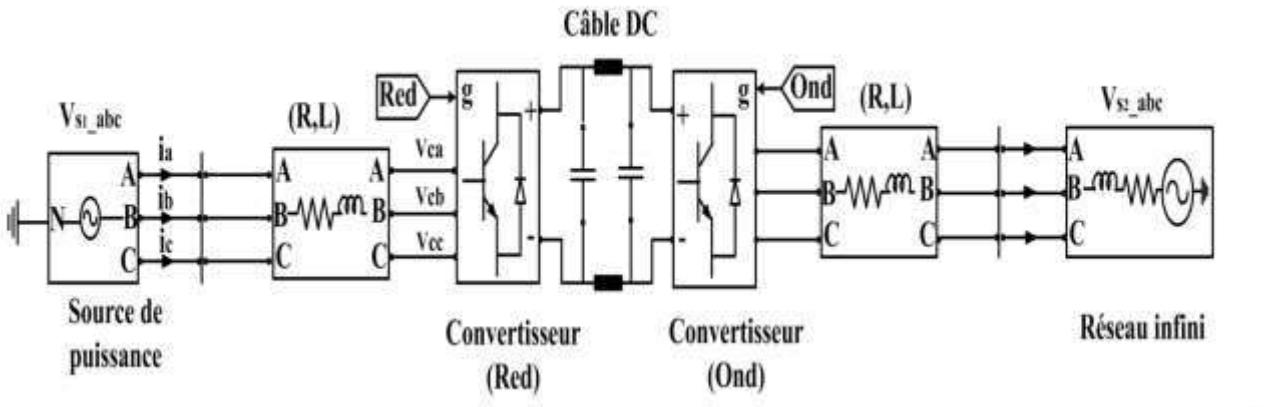


Figure 2.1- Le système VSC-HVDC

Dans la fin de ce chapitre, une comparaison des résultats de simulation sera présentée entre deux convertisseurs de puissance à deux et trois niveaux. Nous allons présenter aussi notre analyse suite à un défaut phase/terre imposé aux systèmes, afin de juger son comportement, sa stabilité et sa fiabilité.

2.3Modélisation des convertisseurs

Le système de transmission CCHT est basé sur les convertisseurs de puissance qui font la conversion de puissance alternative en continu .En effet dans les applications de puissance élevée, nous aimerions utiliser le système de conversion à deux niveaux figure (3.2). Après, nous ferions une comparaison entre celui-ci et le système à trois niveaux, le plus utilisé dans la transmission CCHT.

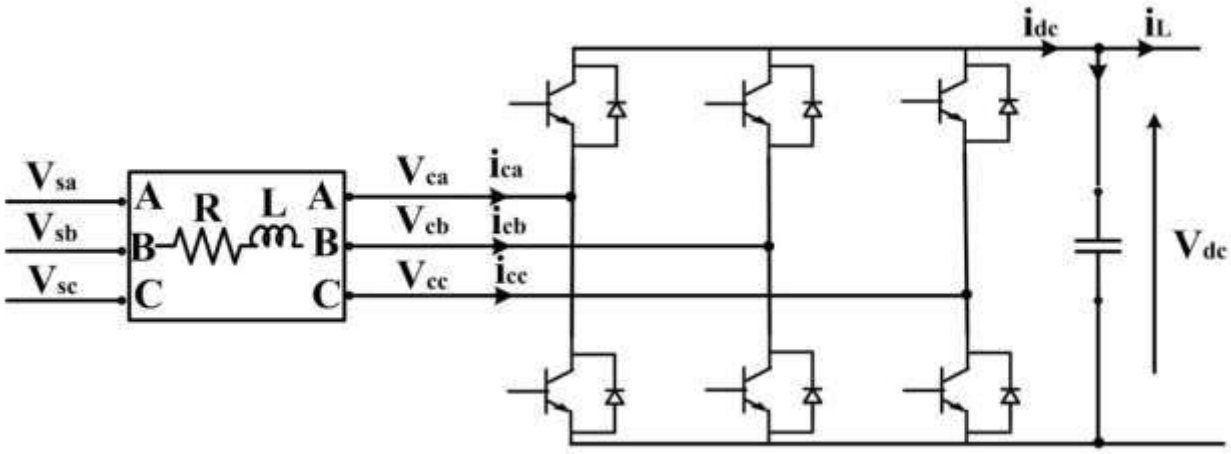


Figure 2.2 -Topologie de deux niveaux avec 6 interrupteurs

Cette topologie de deux niveaux est la plus simple à utiliser dans la transmission VSC-HVDC, et comme la montre la figure 3.2, le convertisseur peut générer seulement deux valeurs de tension ($+V_{dc}$) Et ($-V_{dc}$).

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.

Désignons par V_{s_abc} , la tension du côté réseau et par i_{c_abc} ; le courant sortant du bus infini. Nous représentons le système par les équations suivantes :

$$\begin{cases} L\frac{di_a}{dt} = v_{sa} - v_{ca} - R\, i_{ca} \\ L\frac{di_b}{dt} = v_{sa} - v_{cb} - R\, i_{cb} \\ L\frac{di_c}{dt} = v_{sc} - v_{cc} - R\, i_{cc} \end{cases} \quad (2.1)$$

Où,

V_{s_abc} : Représente la tension de réseau

V_{c_abc} : Tension de ligne

Pour simplifier les équations du bus infini en considérant la transformation de Park qui est définie à partir des grandeurs (tension, courant) et les exprimer dans le repère dq selon la transformation de Park suivante :

$$P = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Nous supposons que la somme des courants égale zéro.

$$i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = 0 \quad (2.3)$$

Ainsi, les tensions de ligne de bus infini sont équilibrées en les présentant par l'équation suivante :

$$v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0 \quad (2.4)$$

Donc en sommant les équations (3.1, 3.2 et 3.3), nous obtenons l'équation.

$$v_{ca} + v_{sb} + v_{cc} = 0 \quad (2.5)$$

Cette équation signifie que les tensions sont équilibrées, alors la séquence zéro n'existe plus, donc les équations de modèle du bus infini seront réduites en deux équations suivantes :

$$\begin{cases} L\frac{di_d}{dt} = v_{sd} - v_{cd} - R\, i_d + L\, \omega i_q \\ L\frac{di_q}{dt} = v_{sq} - v_{cq} - R\, i_q - L\omega i_d \end{cases} \quad (2.6)$$

Et pour simplifier le système on suppose que le réseau est triphasé symétrique et équilibré, on peut donc écrire les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{ca} = V_m \cos \omega t \\ v_{cb} = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{cc} = V_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.7)$$

Où,

V_M : L'amplitude maximale de la tension
Le courant à la sortie du convertisseur peut s'écrire :

$$i_{dc} = C\frac{dv_{dc}}{dt} + i_L \quad (2.8)$$

La puissance active avec ($V_{sq} = 0$) s'écrit par :

$$p = \frac{3}{2}\left(v_{sd} i_d - v_{sq} i_q\right) = \frac{3}{2} v_{sd} i_d \quad (2.9)$$

Et la puissance réactive ($V_{sq} = 0$) s'exprime par :

$$q = \frac{3}{2}\left(v_{sd} i_q - v_{sq} i_d\right) = \frac{3}{2} v_{sd} i_q \quad (2.10)$$

Sachant que v_{sd} et v_{sq} sont des tensions de source, i_d et i_q sont les courants de lignes, v_{cd} et v_{cq} ce sont les tensions d'entrée du convertisseur, p et q sont les puissances actives et réactives respectivement transmissent au réseau, ainsi la tension continueV_{dc}.

Suivant l'axe dq on trouve que la tension v_{sq} =0 et $v_{sd} = v_{smax}$.

En supposant que les pertes dans le redresseur sont nulles et pour un fonctionnement en régime permanent, la puissance active au niveau du côté courant alternatif est égale à la puissance au niveau du bus CC.

On trouve donc :

$$p = \frac{3}{2} v_{sd} i_d = v_{dc} i_{dc} \quad (2.11)$$

2.3.1 Principe de fonctionnement de convertisseur avec MLI

Lors de fonctionnement du redresseur de tension, la tension continue garde la valeur de référence, en mesurant la tension v_{dc} et en la comparant avec $v_{dc-réf}$. L'erreur produite est utilisée pour commuter les six interrupteurs à la fermeture et à l'ouverture. Selon la charge la décharge des condensateurs, le système définit le sens de l'écoulement de puissance et la commande MLI fait contrôler la puissance active et la puissance réactive.

2.3.2 PLL (*Phase Locked Loop*)

La commande PLL est nécessaire dans le contrôle des convertisseurs. Celle-ci jeu un rôle de synchronisation et détecte l'angle θ, elle permet de générer des références de courant. Cependant, il existe plusieurs méthodes de PLL, mais dans notre mémoire on utilise l'algorithme PLL sinusoïdal, afin de synchroniser la sortie du convertisseur au système et obtenir un facteur de puissance unitaire.

2.3.3 Régulation de courant

La régulation de courant est mise dans le repère dq qui est associé au régulateur PI. Les courants i_d, i_q sont comparés aux courants de références i_d^* et i_q^* . Sachant aussi que l'équation suivante est utilisée pour le contrôle des convertisseurs redresseurs/onduleur [29] :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} + (R + L\frac{d}{dt}) \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Donc

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} = \left(R + L\frac{d}{dt}\right) \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

On peut appliquer sur cette équation la transformation abc-dq et nous constatons les résultats suivants :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} - v_{cd} \\ v_{sq} - v_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L\frac{d}{dt} & \omega L \\ -\omega L & R + L\frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Sachant queV_{cd} et V_{cq} se sont des composantes de la tension V_c du convertisseur dans le repère dq, ainsi que les courants i_{cd} et i_{cq} sont celle du courant $i_c$de celui-ci. Donc, la tension de référence est :

$$\begin{cases} v^*_{cd} = v_{sd} - \left(Ri_{cd} + \omega L i_{cq}\right) - \left[K_{pq}(i_{cd}^* - i_{cd}) + K_{id} \times \sum (i_{cd}^* - i_{cd})\right] \\ v^*_{cq} = v_{sq} - \left(Ri_{cq} + \omega L i_{cd}\right) - \left[K_{pq}(i_{cq}^* - i_{cq}) + K_{iq} \times \sum (i_{cq}^* - i_{cq})\right] \end{cases} \quad (2.15)$$

$$v^*_{cd} = v_{sd} - (Ri_{cd} + \omega L_{cd}) - \left[K_{pd}(i_{cd}^* - i_{cd}) + K_{id} \times \sum (i_{cd}^* - i_{cd})\right] \quad (3.16)$$

On suppose que :

$$u_d = \left[K_{pd}(i_{cd}^* - i_{cd}) + K_{id} \times \sum (i_{cd}^* - i_{cd})\right] \quad (2.17)$$

Donc l'équation (3.16) devient :

$$v_{cd}^* = v_{sd} - \left(Ri_{cd} + \omega L i_{cq}\right) - u_d \quad (2.18)$$

On peut schématiser la tension u_q par le bloc suivant :

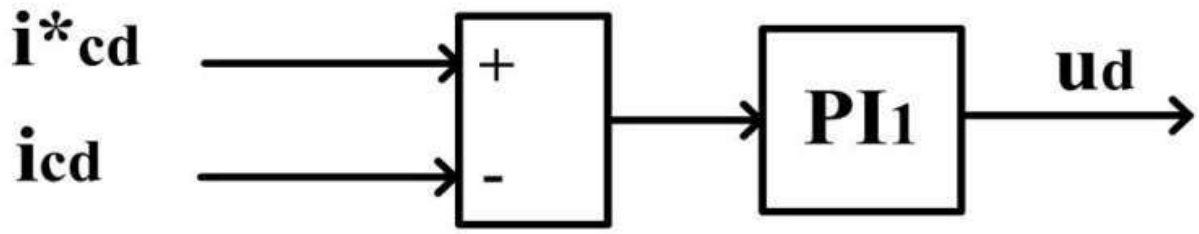


Figure 2.3- La régulation de courant de système à deux niveaux

La même chose pour la tension u_d qui est donnée par l'équation suivante :

$$v^*_{cd} = v_{sd} - \left(Ri_{cd} + \omega L i_{cq}\right) - u_d \quad (2.19)$$

On la représente comme suit :

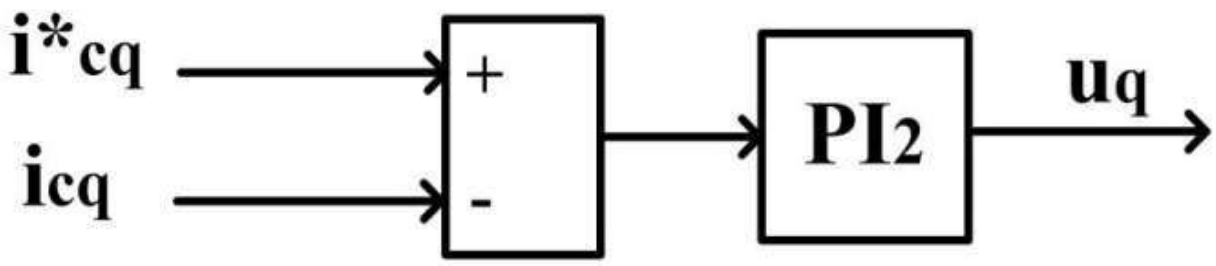


Figure 2.4- La régulation du courant de système à deux niveaux

Le régulateur du courant développé sur la base des équations (3.18) et (3.19) est illustré par La figure suivante :

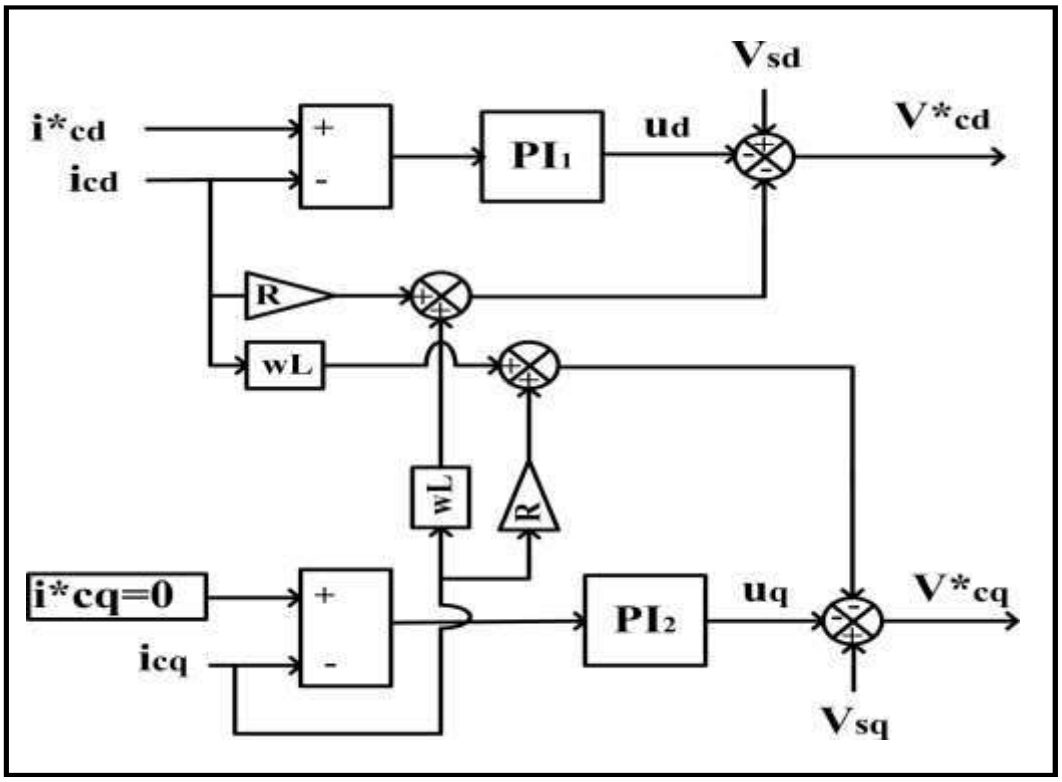


Figure 2.5- La régulation du courant de système à deux niveaux

2.3.4 Contrôle de tension à CC

Le but de la régulation de la tension CC est de maintenir la tension continue V_{dc} constante, de la réguler selon sa référence $V_{dc_réf}$ et de fournir à sa sortie la référence du courant directe dans le plan dq. Ensuite, le MLI crée des harmoniques dans le courant circulant dans le figure (2.5) La régulation du courant de système à deux niveaux système de transmission continu. Ce courant génère l'ondulation de tension continue dont l'amplitude dépend de la taille de condensateur à courant continu.

Si on prend comme hypothèse que les pertes internes de puissance de l'onduleur sont très faible, l'écoulement de puissance sera du côté continu de l'onduleur vers le côté alternatif et peut s'écrire sous l'équation suivante :

$$\mathrm{P_{dc}} = \mathrm{P_{ac}} \tag{2.20}$$

Ces puissances peuvent s'écrire dans les coordonnées dq :

$$P_{dc} = v_{dc} I_{dc} + C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} v_{dc} \tag{2.21}$$

Et

$$P_{ac} = \frac{3}{2}\left[v_{cd} i_{cd} + v_{cq} i_{cq}\right] \tag{2.22}$$

Sachant que :

$$v^*_{\ cd} = v_{sd} - L\omega i_{cd} + C(s)(i^*_{\ cd} - i_{cd}) \tag{2.23}$$

Donc, on utilise les équations (3.21) et (2.22) on trouve 2 :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}\left[\frac{v_{cd} i_{cd} + v_{cq} i_{cq}}{C_{cd}}\right] - \frac{I_{dc}}{C_{dc}} \tag{2.24}$$

$$\frac{V_{dc}}{C_{dc}} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{3}{2}\left[\frac{K_d I_{cd} + K_q i_{cq}}{C_{dc}}\right] \tag{2.25}$$

Le schéma de principe du régulateur de la tension CC est présenté dans la figure suivante :

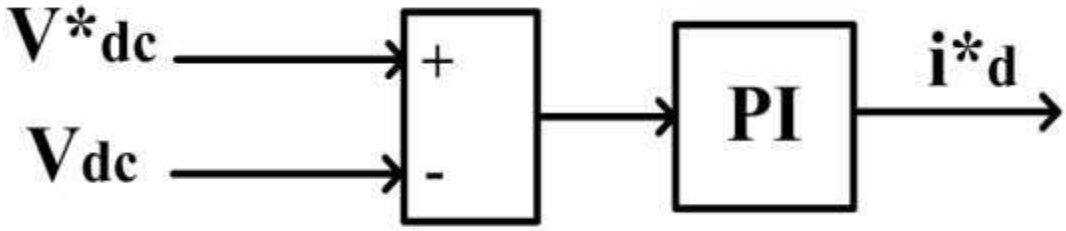


Figure 2.6- Régulateur de la tension DC

2.3.5 Contrôle du convertisseur (VSC-HVDC)

Dans notre système le convertisseur est contrôlée par la loi de commande comme le montre la figure (2.7).

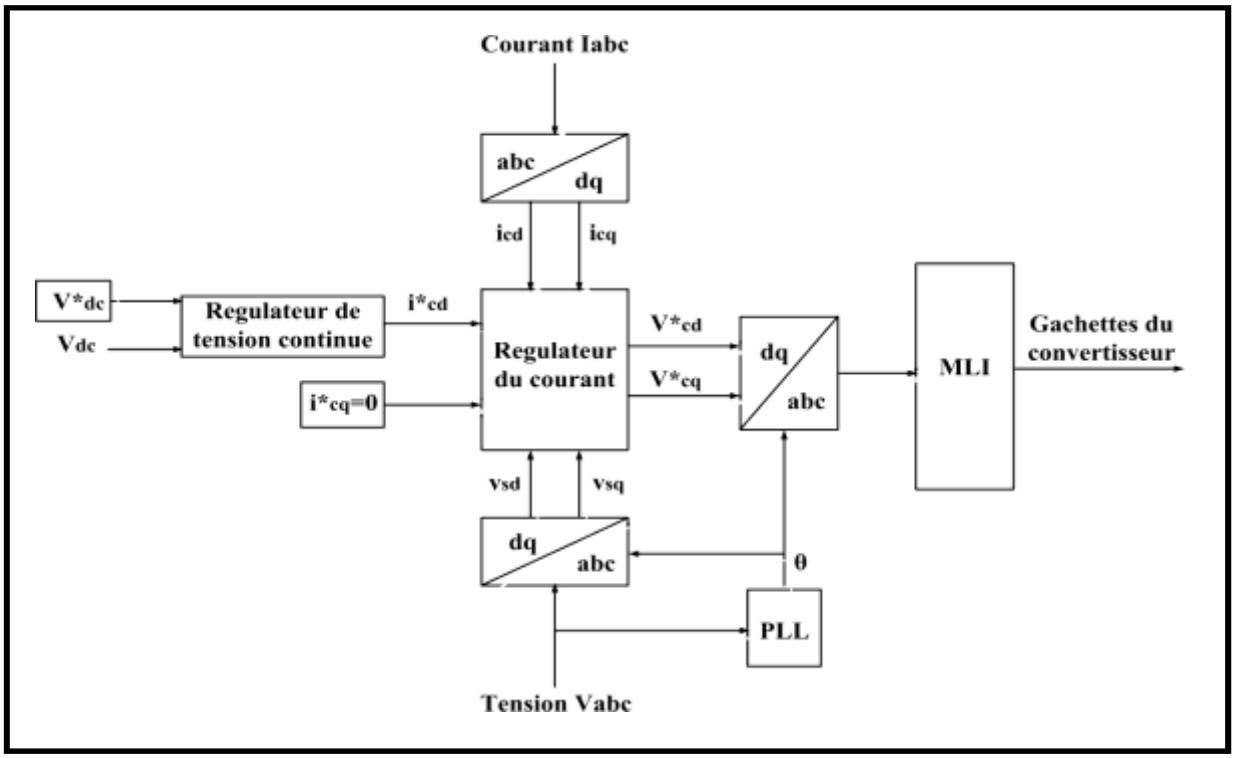


Figure 2.7- Structure de contrôle du convertisseur triphasé (VSC-HVDC)

2.5Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une idée générale sur le système VSC -HVDC, deux niveaux. Toutes les composantes du système VSC-HVDC sont expliquées, ainsi que sa modélisation et son contrôle.

A fin nous avons expliquons le Principe de fonctionnement de convertisseur avec MLI et la régulation de courant et tension de système HVDC –VSC à deux niveaux.

CHAPITRE III

COMMANDE D'UNE LIAISON HVDC-VSC

3.1INTRODUCTION

Dans cette chapitre nous avons donnée une idée générale sur le contrôle d'un système HVDC-VSC à deux niveaux, on simulé le système VSC-HVDC à deux niveaux En outre, la commande MLI sinusoïdale.

Afin de tester différentes techniques de contrôle. Les éléments de commutation sont modélise dans le modèle détaille. Nous appliquons ensuite les différentes techniques de contrôle sur ce modèle. Le contrôle d'énergie et le Contrôle de la tension et le contrôle de la puissance et réactive.

3.2 Contrôle d'une liaison HVDC-VSC

Sur la figure (3.1), on observe la structure de contrôle d'une liaison HVDC-VSC. Cette 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 puissance active ou la fréquence. La tension doit toujours être maintenue à une valeur de référence, et sa polarité ne peut en aucun cas s'inverser. On inverse le flux de puissance en changeant le sens du courant DC. Parallèlement à cette commande ; De tension DC/puissance active, chaque poste peut aussi être commande pour débiter une certaine puissance réactive ou sortir une certaine tension AC, en fonction des besoins.

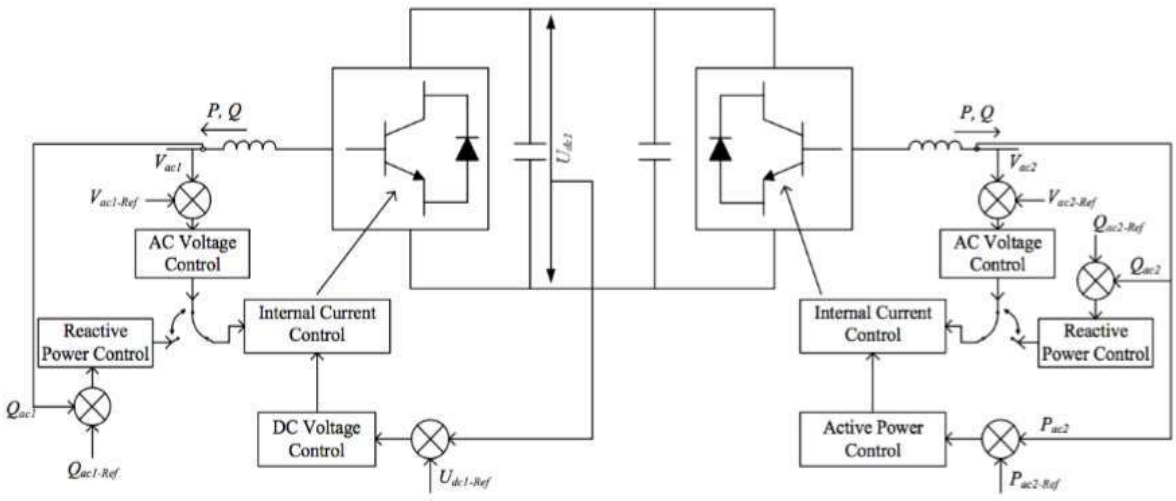


Figure 3.1- Structure de contrôle d'une liaison HVDC VSC

3.3 Structure de contrôle

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). Les notations utilisées dans les prochains développements, et dans toute la suite de ce rapport, sont référencées sur la figure (3.2)

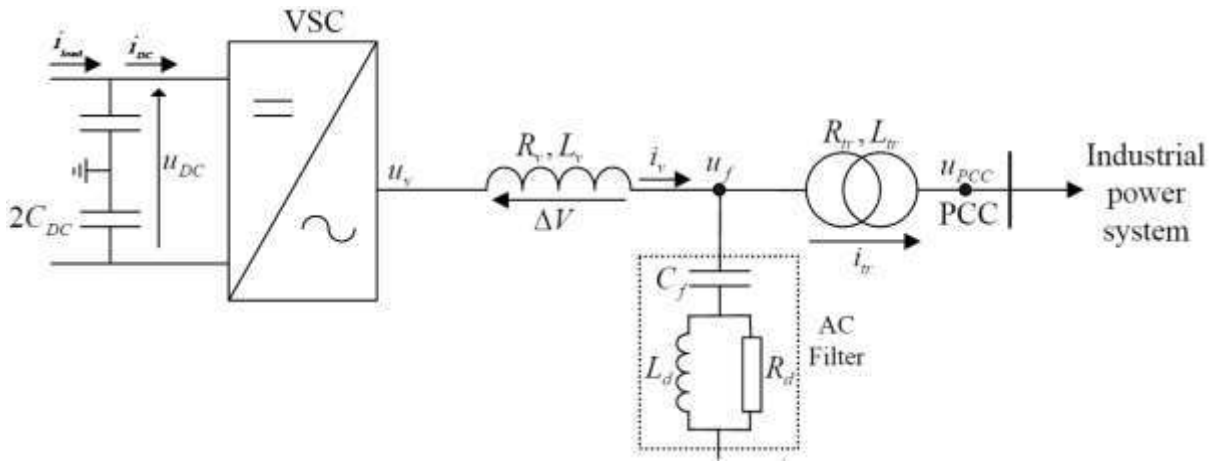


Figure 3.2 - Station d'une liaison VSC-HVDC

En sortie de ce convertisseur, on observe une tension u_v et un courant sortant i_v. Ce convertisseur est relie à un filltre via une impédance de phase qui consiste en la mise en série d'une inductance L_v et d'une résistance R_v. La tension au niveau du filtre est notéeU_f. Ce poste de conversion est finalement relie au réseau via un transformateur d'inductance L_{tr} et de résistance Rtr. Ces notations seront par la suite utilisées tout au long de ce rapport. Observons la structure de contrôle d'une station VSC-HVDC dans la figure (3.3).

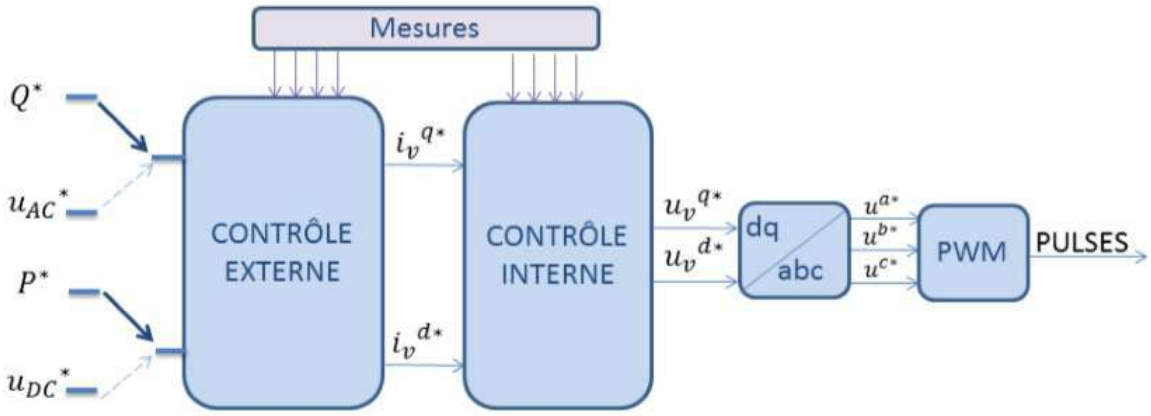


Figure 3.3 – Structure de contrôle d'une station VSC-HVDC

Les valeurs de référence Q^*/u^*_{ac} et P^*/u^*_{dc} sont renseignées à la boucle de contrôle externe. Ce contrôle génère la référence pour le courant iv, exprimée dans un système dq0. Le contrôle interne se charge ensuite de générer le signal de référence pour la tension U_v. 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 suite de ce chapitre. Notons aussi l'importance de la PLL dans ce contrôle. Ce montage électronique permet de déterminer la phase instantanée d'un signal, ainsi que sa fréquence. Il est indispensable pour pouvoir traduire des signaux exprimes en valeurs de phase (abc) vers des coordonnées directe-quadrature- zéro (dq0), et inversement.

3.4 Contrôle externe

3.4.1Contrôle de la tension DC

Soient $P_f(t)$ et $Q_f(t)$ les puissances instantanées actives et réactives sortant de la côte AC de la station, et $P_{DC}(t)$ la puissance instantanée reçue cote DC, nous avons les relations Suivantes :

$$P_f(t)=u^d_f(t)\ i^d_v+u^q_f(t)\ i^q_v(t)$$

$$Q_f(t)=U^q_f(t)\ i^d_v- u^d_f(t)i^q_v(t)$$

$$P_{DC}(t)=u_{DC}(t).i_{load}(t)$$

La référence du système dq0 est choisie de manière a ce que son axe d soit en phase Avec la tensionu_f, on a donc $u^f_q= 0$.

$$P_f(t) = V^d_f(t)i^d_v(t)$$

$$Q_f(t) = -u^d_f(t)i^d_v(t)$$

La boucle de contrôle éxterne étant beaucoup plus lente que la boucle interne, on peut Considérer que les courants U^d_v et I^f_q valent leurs valeurs de référence. Les valeurs de références sont notées d'un astérisque :

$$P_f(t)=u_f{}^d(f)\ .i^{d*}{}_v(t) \qquad (3.1)$$

$$Q_f{}^d(t)=-\ u_f{}^d(f)\ .i^{d*}{}_v(t) \qquad (3.2)$$

Si les puissances P(t) ≠ PDC(t), on aura une variation de la tension DC telle que :

$$C_{DC}\frac{d}{dt}u_{DC}(t) = i_{load}(t) - i_{DC}(t)$$

Les signaux reçus par le contrôleur sont échantillonnes à une fréquence Ts. En appliquant la formule d'Euler, on obtient :

$$\frac{C_{DC}}{T_s}\left(u_{DC}^{*}(k)-u_{DC}(k)\right)=i_{load}(k)-i_{DC}(k) \qquad (3.3)$$

En n´négligeant les pertes dans le convertisseur et dans l'inductance de liaison, on peut considérer que :

$$u_{DC}(t).i_{DC}(t)=u_f^d(t).i_v^{d*}(t)$$

On injecte cette relation dans 1.3 :

$$\frac{C_{DC}}{T_s}\left(u_{DC}^{*}(k)-u_{DC}(k)\right)=i_{load}(k)-\frac{u_f^d(k).i_v^{d*}(k)}{u_{DC}(k)}$$

Ce qui donne l'équation de contrôle :

$$i_v^{d*}(k)=\frac{u_{DC}(k)}{u_f^d(k)}i_{load}(k)+k_{p,DC}\frac{u_{DC}(k)}{u_f^d(k)}\frac{C_{DC}}{T_s}\left(u_{DC}^{*}(k)-u_{DC}(k)\right)$$

Le facteur $K_{p,\ DC}$ est le gain proportionnel du contrôle de tension DC. On constate qu'en condition de régime (u*DC = uDC), on a bien PDC = Pf.

3.4.2Contrôle de la puissance active

Le contrôle en boucle ouverte s'obtient facilement a partir de l'équation 3.1 :

$$\boldsymbol{i_v^{d*}=\frac{P_f^*}{u_f^d}}$$

Un feedback peut être ajoute facilement, sous la forme d'un contrôle PI par exemple :

$$\boldsymbol{i_v^{d*}=\frac{P_f^*}{u_f^d}\ +\ (k_{p,Pf}+\frac{k_{i,Pf}}{s})(P_f^*-p_f)}$$

Avec k p, Pf et ki, Pf les gains de l'action proportionnelle et de l'intégrale.

Contrôle de la puissance réactive

De la même manière que pour la puissance active, le contrôle en boucle ouverte s'obtient Facilement à partir de l'équation 1.2 :

$$i_v^{q*}=\frac{-Q_f^*}{u_f^d}$$

Et en boucle fermée :

$$i_v^{q*} = \frac{-Q_f^*}{u_f^d} - (k_{p,Qf} + \frac{k_{i,Qf}}{s})(Q_f^* - Q_f) \qquad (3.4)$$

Avec kp,Qf et ki,Qf les gains de l'action proportionnelle et de l'intégrale.

3.4.3Contrôle de la tension AC

La chute de tension sur l'impédance $R_v + j\omega L_v$ figure (3.3) peut être approximée par :

$$\Delta V = u_u - u_f \cong \frac{R_u R_f + w L_v Qf}{u_f}$$

Si on considère que $Xv = \omega L_v$ supérieurR_v, on peut supposer que cette chute de tension est

Proportionnelle au flux de puissance réactive Q_f :

$$u_u - u_f \cong \frac{X_u Q_f}{u_f} \qquad (3.5)$$

3.4.4Contrôle externe global

Un résume des résultats précédents est illustre dans la figure (3.4) Comme indique Précédemment, on constate que la référence $I^{q*}v$ est dictée soit par une référence en puis-Sancie réactive, soit par une référence de tension AC. De la même manière, la référence $I^{q*}v$ dépend elle de la commande en puissance active ou en tension DC. On observe aussi un l'imitateur de courant à la sortie du contrôle.

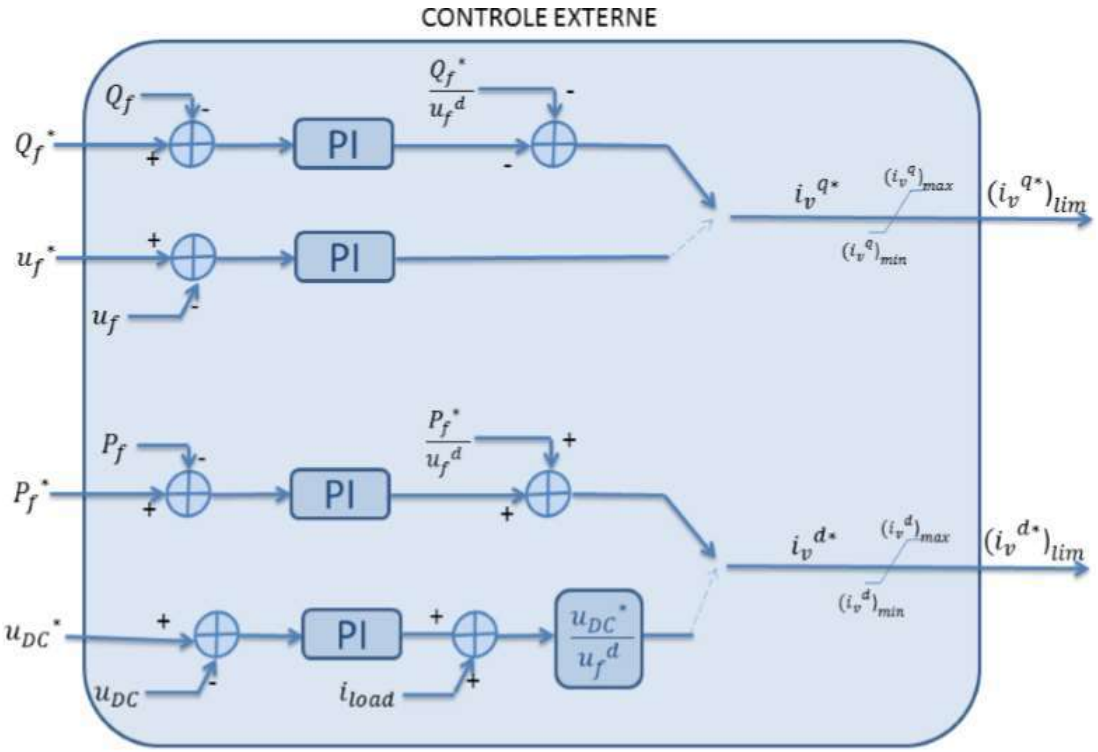


Figure 3.4 – Contrôle externe d'une station VSC

3.5 Contrôle interne

A partir de la figure 1.3, on peut obtenir la relation suivante :

$$u_u^{(abc)} - u_f^{(abc)} = L_v \frac{d}{dt} i_v^{'abc)} + R_v i_v^{(abc)}$$

$$u_u^{(abc)} = u_f^{(abc)} - L_v \frac{d}{dt} i_v^{'abc)} - R_v i_v^{(abc)}$$

On passe cette équation dans le repère de α β à l'aide de la transformée de Concordia.

$$u_v^{(\alpha\beta)} = u_f^{(\alpha\beta)} + L_v \frac{d}{dt} i_v^{(\alpha\beta)} + R_v i_v^{(\alpha\beta)}$$

Passons ensuite dans le repère dq0 de sorte que $x^{(\alpha\beta)} = x^{(dq)}. e^{j\omega t}$

$$u_v^{(dq)}. e^{jwt} = u_f^{(dq)}. e^{jwt} + L_v \frac{d}{dt}\left(i_v^{(dq)}. e^{jwt}\right) + R_v i_v^{(dq)}. e^{jwt}$$

$$(u_v^{(dq)}). e^{jwt} = (u_f^{(dq)} + L_v \frac{d}{dt}\left(i_v^{(dq)}\right) + jwL_v i_v^{(dq)} + R_v i_v^{(dq)}). e^{jwt}$$

$$(u_v^{(dq)})(t) = (u_f^{(dq)}(t) + L_v \frac{d}{dt}\left(i_v^{(dq)}\right)(t) + (R_v + jwL_v) i_v^{(dq)}(t)$$

Discrétisons à présent cette équation. Soit Ts la période d'échantillonnage, on obtient :

$$u_u^{(dq)} = u_f^{(dq)}(k, k+1) + \frac{L_v}{T_s}\left(i_u^{(dq)}(k+1) - i_u^{(dq)}(k)\right) + (R_u + jwL_V)I_V^{(dq)}(k, +1)$$

Faisons les hypothèses que sur une période Ts:

- Le courant i(dq)v change linéairement.
- –U ^{dq} f varie lentement par rapport à I ^{dq} V, et peut donc être considère constant.

En considérant que le régulateur cherche à atteindre les valeurs de référence en une itération, on a que x (k + 1) = x∗(k) et donc :

$$u_v^{(dq)}(k, k+1) = u_f^{(dq)}(k) + \frac{L_v}{T_s}\left(i_v^{(dq)*}(k) - i_v^{(dq)}(k)\right) + \frac{R_v + j\omega L_v}{2}\left(i_v^{(dq)*}(k) + i_v^{(dq)}(k)\right)$$

$$u_v^{(dq)}(k, k+1) = u_f^{(dq)}(k) + R_v i_v^{(dq)*}(k) + \frac{J\omega L_v}{2}(i_v^{(\boldsymbol{dq})*}(k) + i_v^{(dq)*}(k))$$

$$+\left(\frac{L_v}{T_s} + \frac{R_v}{2}\right)(i_v^{(dq)*}(k) - i_v^{(dq)}(k))$$

$$u_u^{(dq)}(k, k+1) = u_f^{(dq)}(k) + \frac{L_v}{T_s}\left(i_u^{(dq)*}(k) - i_u^{(dq)}(k)\right)$$

En remplaçant U ^{dq} *V (k, k + 1) =U ^{dq}∗v, on obtient finalement les deux équations de contrôle :

$$u_v^{d*} = u_f^d + R_v i_v^{d*} - \frac{\omega L_S}{2}\left(i_v^{q*} + i_v^q\right) + \left(K_{P,i_v}\frac{K_{I,i_v}}{S}\right)\left(\frac{L_V}{T_s} + \frac{R_v}{2}\right)(i_v^{d*} - i_v^d)$$

$$u_v^{q*} = u_f^q + R_v i_v^{q*} - \frac{\omega L_S}{2}(i_v^{d*} + i_v^d) + \left(K_{P,i_v}\frac{K_{I,i_v}}{S}\right)\left(\frac{L_V}{T_s} + \frac{R_v}{2}\right)\left(i_v^{q*} - i_v^q\right)$$

Le système de contrôle interne total est illustre dans la figure (1.6). On observe également un l'imitateur de tension à la sortie du contrôle.

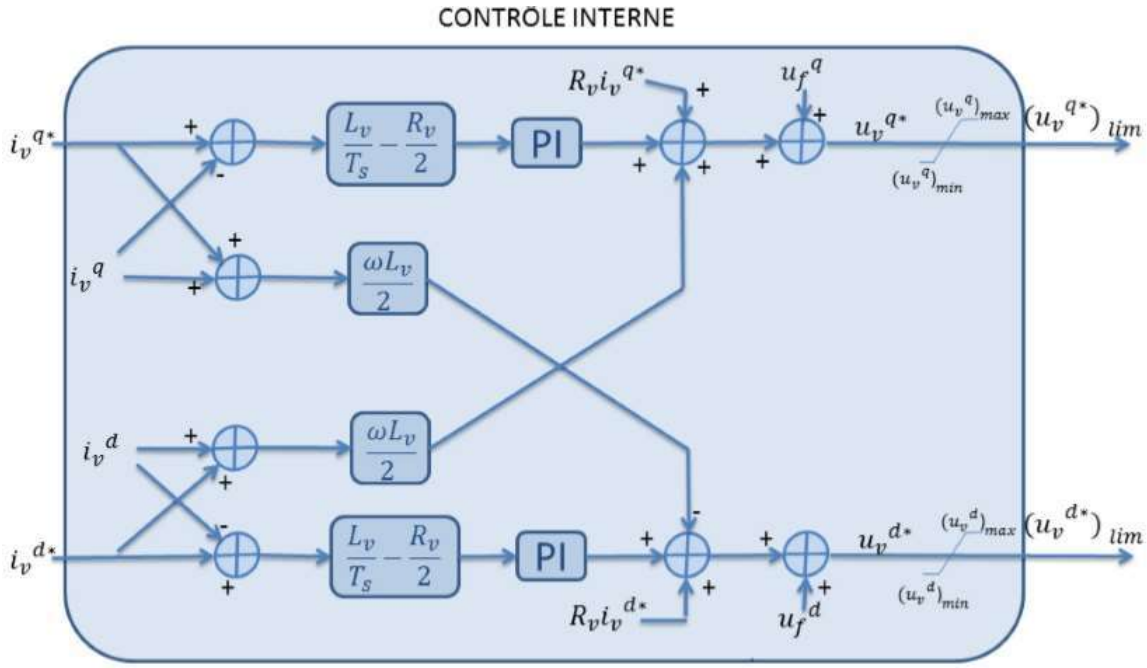


Figure 3.5 – Contrôle interne d'une station VSC.

3.5.1 Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation)

Aussi appelée "Modulation de Largeur d'Impulsions" (MLI), la technique "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. Elle présente aussi l'intérêt de diminuer le contenu harmonique du signal module, par rapport à un signal issu d'un CSC. Cette méthode consiste à enchainer une succession d'états discrets pendant certaines Durées choisies, de manière à obtenir un signal moyen valant une valeur intermédiaire. Ce type de modulation présente plusieurs avantages pour les VSC :

- Contrôle rapide des puissances actives et réactives.
- Haut niveau de qualité de tension : faible THD.

3.5.2PWM intersectée

Il existe plusieurs types de PWM. Nous allons vous décrire ici la méthode dite "inter-estive". Cette méthode est illustrée sur la figure (3.6). Elle consiste à comparer un signal modulant (noir) et une porteuse (bleue). En effet, si à un moment donne la valeur du signal modulant

est plus élevé que celle de la porteuse, le signal de commande fm vaudra 1.Dans le cas inverse, fm vaudra -1 La fréquence de la porteuse vaut, dans le cadre des liaisons VSC-HVDC, entre 1 et 2 kHz . Notons que cette fréquence sera plus élevé si on utilise une

modulation PWM dans des applications de plus faibles puissances. Le signal fm obtenu permet de commander les interrupteurs si fm = 1, A sera passant et B bloquant, et l'inverse si fm = −1.Le signal vs finalement obtenu aura la forme de fm, mais variera entre -E/2 et E/2.

Une fois filtrée, cette tension aura la forme du signal modulant, autrement dit la référence donnée par le contrôle éxtèrne.

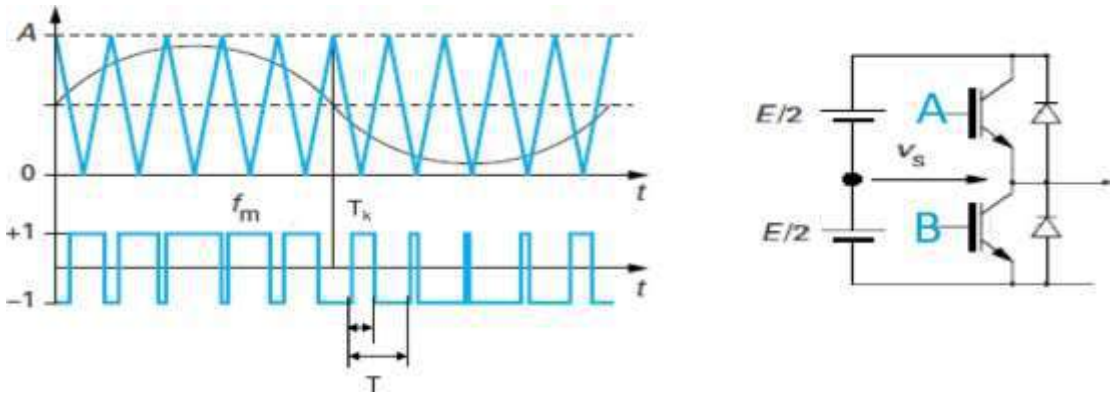


Figure 3.6 – PWM intersectée pour une phase

3.6 Caractéristiques :

Une des difficultés liées à l'utilisation des VSC réside dans sa difficulté à mettre un grand nombre d'IGBT en série de manière a supporter une tension suffisante. En effet, il est nécessaire de les commander de manière simultanée, ce qui n'est pas chose aisée .On utilise un système de commande PWM pour commander leur actionnement. Cette technologie implique l'utilisation d'une porteuse haute fréquence, ce qui diminue fortement la présence des harmoniques d'ordres peu élevées, mais qui augmentent les pertes par commutation. Les principales caractéristiques de la technologie VSC sont donc leur design compact, la liberté de commande en puissance réactive, des pertes plus élevées, la possibilité d'alimenter des réseaux faibles, et des liaisons ne véhiculant pas de trop grandes puissances (Maximum ~ 1000MW) [35].

3.7 Simulation et discussion

Dans ce chapitre, on se concentre sur l'évolution et la performance du système VSC-HVDC. Les résultats des simulations de système VSC-HVDC à deux niveaux sont présentés dans les figures (3-7.8.9.1.11.12.13). Le système est exposé à un défaut sujet d'analyse. Afin d'analyser le système, nous avons procédé à sa simulation par le logiciel MATLAB/Simulink.

3.7.1 Simulation de système VSC-HVDC à deux niveaux

Dans cette partie, on simule le système VSC-HVDC à deux niveaux figure (2.1). En outre, la Commande MLI sinusoïdale a adopté la méthode de MLI sinusoïdale de fréquence 900 Hz et une tension continue ($V_{dc_réf}$ =U = 200 KV). Deux condensateurs de 65µF sont reliés avec les bornes de deux convertisseurs. Aussi, les câbles CC sont identiques ayant une longueur 25 Km. Les paramètres de circuit RLC par unité de longueur du câble, sont fournis dans le Tableau 3.1 ci-après.

Tableau 3.1 Paramètres du câble CC

Paramètres du câble	Valeurs par km
Résistance	0.0139ohm
Inductance	0.159mh
Capacité	0.231µF

Les paramètres de simulation du système VSC-HVDC sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Paramètres du système VSC-HVDC

Paramètres	Valeur
Tension DC	200KV
Fréquence	60Hz
Fréquence (MLI)	900Hz
Tension source 1 (entre phases)	120KV
Tension source 2 (entre phases)	120KV
Longueur de câble DC	25Km

3.8 Résultat de simulation (ts=1.5s)

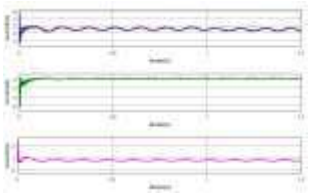


Figure3.7- Forme du courant du réseau à côté redresseur

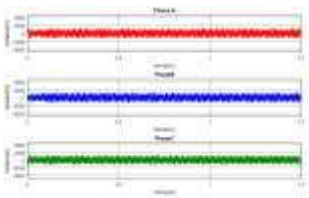


Figure3.8-forme de la tension à de côté redresseur de 3 phases MLI

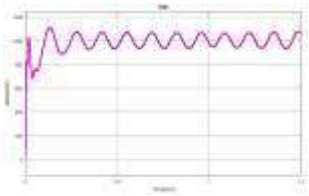


Figure3.9-forme de tentionVdc_3L

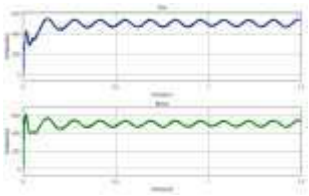


Figure 3.10-forme de la tension de réseaux trois phases

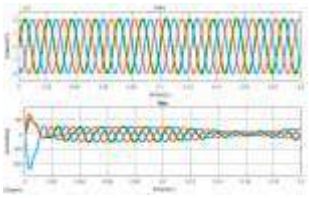


Figure 3.11- forme de la tension courant de réseaux trois phases

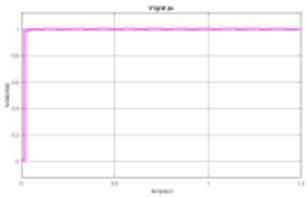


Figure3.12-forme de tension de réseau pu

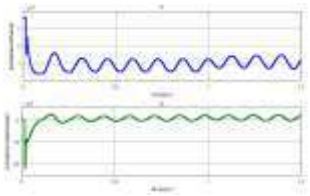


Figure3.13-forme de la puissance réactive/réactive

3.9Conclusion

Dans e chapitre nous illustrons les techniques de contrôle d'une liaison HVDC-VSC à deux niveaux. Plusieurs simulations ont été réalisées afin d'observer et d'analyser les différents algorithmes de contrôle et justifier la présence des filtres. Nous avons également simule des situations particulières telles que les défauts et le démarrage de la liaison.
Afin de tester différentes techniques de contrôle. Les éléments de commutation sont modélise dans le modèle détaille. Nous appliquons ensuite les différentes techniques de contrôle sur ce modèle. Le contrôle d'énergie et le Contrôle de la tension et le contrôle de la puissance et réactive.

Conclusion générale

Dans la première partie de ce travail, nous avons explorée la technologie et les avantages D'un système HVDC. Nous avons expliquée les différentes Types de configurations HVDC et présentée les différents systèmes de conversion topologies existantes en nous focalisant sur la de topologie plus récente : VSC.et nous avons présentée la topologie de VSC à deux niveaux.

Dans la seconde partie de ce travail, nous sommes donnés une idée générale sur le système VSC –HVDC et nous avons expliqué le principe de fonctionnement de convertisseur avec MLI et modélisé le système VSC-HVDC à deux niveaux.

Dans e chapitre nous illustrons les techniques de contrôle d'une liaison HVDC-VSC à deux niveaux. Plusieurs simulations ont été réalisées afin d'observer et d'analyser les différents algorithmes de contrôle et justifier la présence des filtres. Afin de tester différentes techniques de contrôle. Les éléments de commutation sont modélise dans le modèle détaille. Nous appliquons ensuite les différentes techniques de contrôle sur ce modèle. Le contrôle d'énergie et le Contrôle de la tension et le contrôle de la puissance et réactive.

Les principales contributions de ce mémoire sont les suivantes :

Les résultats des simulations du système VSC-HVDC avec une stratégie de contrôle simple Et efficace montrent le bon fonctionnement du système, durant toutes les phases opérationnelles. Nous constatons ainsi que :

• le système à une réponse rapide;

• les puissances actives et réactives dans les deux côtés du système peuvent être contrôlées Indépendamment;

• la tension continue varie brusquement et elle dépend de la quantité de débit de la Puissance active;

• pendant le défaut, une certaine oscillation apparaît sur les tensions et sur les courants, Mais le système se stabilise rapidement après la disparition du défaut;

• d'adopter un dispositif de contrôle commandé à distance en temps réel pour améliorer le Système et éviter les imprévues en cas de défauts ;

• utiliser la topologie de deux niveaux.

Bibliographie

[1] Dennis A Woodford. Hvdc transmission. Manitoba HVDC Research Centre, pages 400{1619, 1998.

[2] KR Padiyar. HVDC power transmission systems : technology and system interactions. New Age International, 1990.

[3] Emmanuel De Jaeger. LELEC2753, systèmes d'énergie électrique - question approfondies, 2015.

[4] Narain G Hingorani. High-voltage dc transmission : a power electronics workhorse. Spectrum, IEEE, 33(4) :63{72, 1996.

[5] Siemens AG. High voltage direct current transmission - proven technology for power Exchange. 2011.

[6] Cuiqing Du. VSC-HVDC for industrial power systems. PhD thesis, 2007.

[7] Emmanuel De Jaeger. LELEC2520, réseaux d'Énergie Électrique, 2014.

[8] Cuiqing Du. VSC-HVDC for industrial power systems. PhD thesis, 2007.

[9] Roberto , JP Charpentier, and Raghuveer Sharma. High voltage direct.
[10] Deepak Tiku. dc power transmission : Mercury-arc to thyristor hvdc valves [history]. Power and Energy Magazine, IEEE, 12(2) :76{96, 2014.

[10] ABB. The early hvdc development - the key challenge in the hvdc technique. https://library.e.abb.com/public/93e7f5ea0e800b7cc1257ac3003f4955/HVDC_50years.pdf, . Consult_e le : 28-05-2016.

[11] ETWH. Milestones :eel river high voltage direct current converter station, 1972. http://ethw.org/Milestones:Eel_River_High_Voltage_Direct_Current_Converter_Station,_1972. Consult_e le : 28-05-2016.

[12] Jos Arrillaga. High voltage direct current transmission. Number 29. Iet, 1998.

[13] Allen Isaacman and Chris Sneddon. Portuguese colonial intervention, regional conict and post-colonial amnesia : Cahora bassa dam, mozambique 1965{2002. Portuguese studies review, 11(1) :207{236, 2003.

[14] Giovanni Mazzanti and Massimo Marzinotto. Extruded cables for high-voltage direct-current transmission : advances in research and development, volume 93. John Wiley & Sons, 2013.

[15] Michael A Laughton and Maurice George Say. Electrical engineer's reference book. Elsevier, 2013.

[16] Bao-ying WU, Yun-peng CHEN, Xu CHEN, and Xiao-ming JIN. Study on impacts of_800 kv yunnan-guangdong hvdc transmission project on security and stability of china southern power grid [j]. Power System Technology, 22 :002, 2006.

[17] Siemens AG. High voltage direct current transmission - unrivaled practical experience. 2012.

[18] M. Hern_andez _ Angeles D. Perez Dorantes, J.L. Monroy Morales. A _lter design methodology of a vsc-hvdc system. 2013.

[19] A Beddard and M Barnes. Modelling of mmc-hvdc systems{an overview. Energy Procedia, 80 :201{212, 2015.

[20] Thorsten Volker. Power transmission from o_shore wind farms. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, (74) :51{59, 2012.

[21] J. Arrillaga : High voltage direct current transmission. Numéro 29. 2 édition, 1998.

[22] L. Carlsson : "classical" HVDC : still continuing to evolve. Modern power systems, 22(6):19_22, 2002.

[23] K. Sood. HVDC and FACTS Controllers. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2004.

[24] Udana Niranga Gnanarathna. E_cient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs. PhD thesis, 2014.

[25] Tamiru Woldeyesus Shire. VSC-HVDC based network reinforcement. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2009.

[26] Radnya A Mukhedkar. Introduction to hvdc lcc & vsc-comparison.

[27] Pierre RAULT. Dynamic Modeling and Control of Multi-Terminal HVDC Grids. PhD thesis, 2014.

[28] Underground vs. Overhead : Power Line Installation-Cost Comparison and Mitigation. http://www.elp.com/articles/powergrid_international/print/volume-18/issue-2/features/underground-vs-overhead-power-line-installation-cost-comparison-.html.

[29] Haque, M. E., K. M. Muttaqi et M. Negnevitsky. 2008. « Control of a stand alone variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator ». In *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE* (20-24 July 2008). p. 1-9.

Annexe

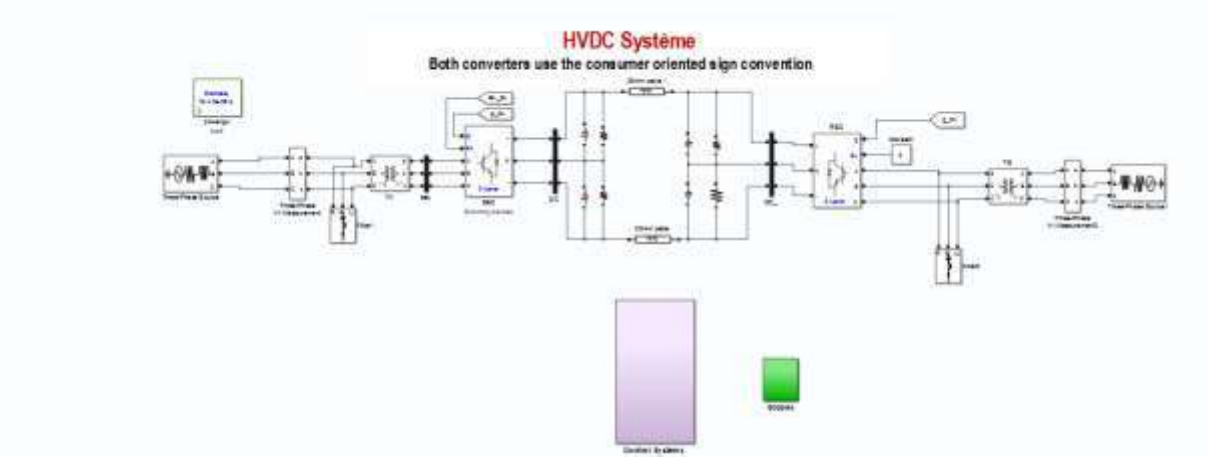


Figure A.1-Modèle du réseau

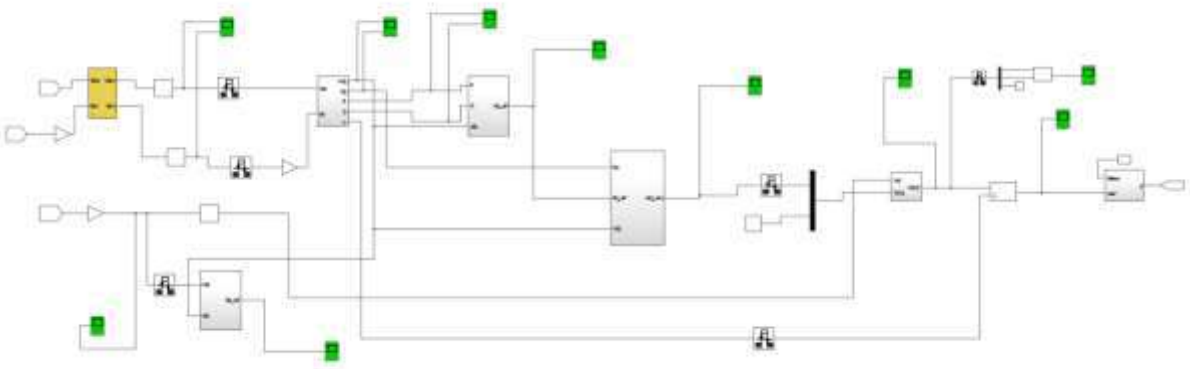


Figure A.2 - Station de conversion

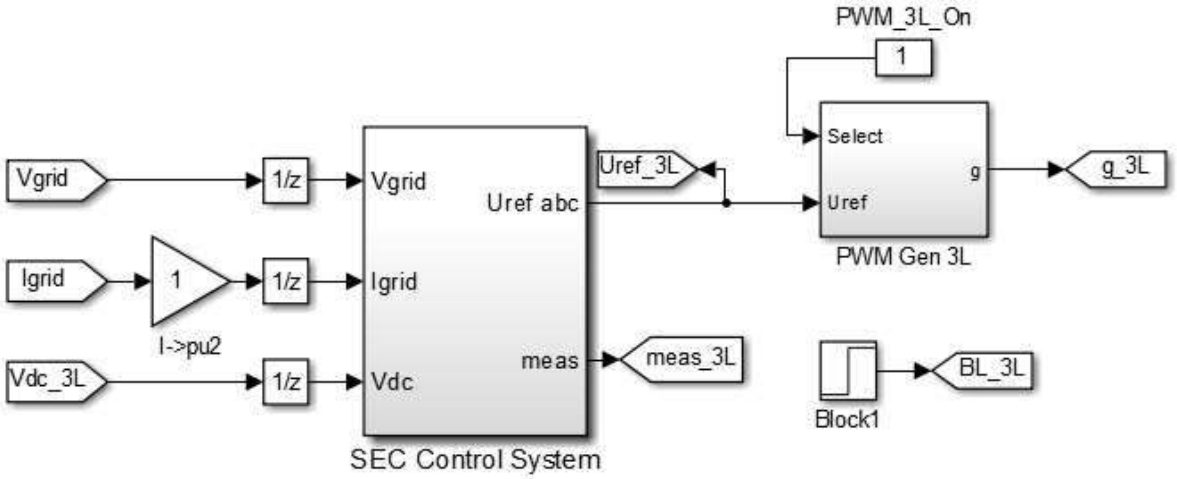


Figure A.3 - Contrôle interne d'une station VSC

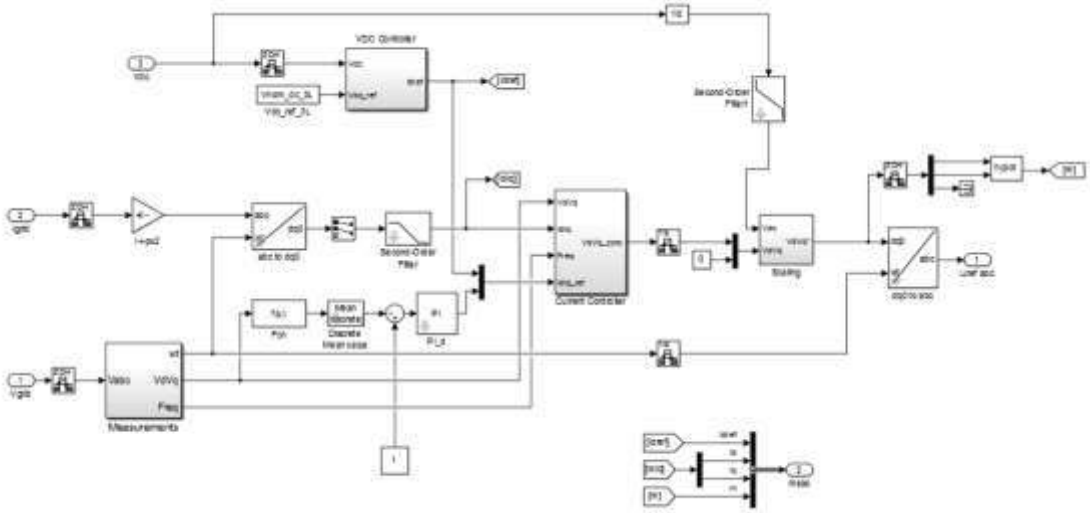


Figure A.4 - Contrôle externe d'une station VSC