الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du Diplôme

de MASTER en Electrotechnique

Option : **Commande et Electronique Industrielle**

THEME

Modélisation et commande d'un système de transmission HVDC

Proposé et dirigé par :

Pr. TLEMÇANI Abdelhalim

Dr. SEBAA Karim

Préparé et présenté par :

Mr. KOUDRI Benyoucef

Année Universitaire2015-2016

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout premièrement, à dieu le tout puissant de m'avoir donné courage et patience durant la réalisation de ce travail.

Je remercie mon encadreur Mr. ***TLEMÇANI Abdelhalim***, professeur à l'université Yahia FARÈS de Médéa, pour la confiance qu'il m'a prodigué et ses encouragement, je le remercie aussi pour le suivi et la direction de prés de mon travail, ainsi que pour ses conseils judicieux.

J'adresse mes remerciements à Mr. MORSLI Abdelkader, enseignant à l'université Yahia FARÈS de Médéa, pour son aide, sa disponibilité, et son soutien surtout au moment difficile que j'ai rencontré durant la réalisation de ce travail.

Je tiens également à présenter mes sincères remerciements à Mr. Dr. MOUALDIA Abdelhafidh, je n'oublie pas son aide qu'il m'a apporté, pour accomplir le présent travail, par la maîtrise du logiciel de simulation.

Je remercie également tout les membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury.

Je voudrais particulièrement remercie mes amis : Mr. Skender Mohammed Réda, Mr Khadraoui Said et Mr.Sabour Mustapha de m'avoir beaucoup soutenu lors des différentes phases des travaux de cette thèse, pour leurs aides, pour leurs encouragements.

Je remercie vivement Mon frère Mr. Pr ABDELLAH ELHADJ Abdellah , pour ses encouragements, et son soutien.

Un grand merci à tous les enseignants de Master 2 Commande : Dr. Kaddour Benyoucef,

Dr Bentouati Smaine et Dr. Abbadi .A.

J'exprime ma profonde reconnaissance pour les personnes qui m'ont aidé et accompagné au cours de mon expérience.

Enfin, je dédie ce travail à mes parents, ma femme, mes frères, mes sœurs et mes enfants :

Mohammed el Bachir , Oussama ,Abdelfattah qui ont été une source d'encouragement et de soutien.

Merci à tout le monde!

ملخص :

الهدف من عملنا هو وضع نموذج للتحكم ومحاكاة نظام VSC-HVDC قائم على اساس IGBT دو مستويين. وحدة تحكم PI المستخدمة وتقنية MLI يعطيانا أداء أفضل على المقوم و المموج على حد سواء.

لأسباب بيئية وتقنية واقتصادية، وتشجيع تركيب خطوط HVDC لتحقيق أقصى قدر من الفعالية لنقل الكهرباء. يتم إحراز تقدم سريع وكبير في مجال الأجهزة الإلكترونية ذات القوة يتيح لنا التحكم في الترانزيستور IGBT.وهذا يفتح فرصا للاستثمار في قطاع الطاقة من خلال استخدام HVDC على أساس تحويل مصدر الجهد (VSC) مع تكنولوجيا IGBT التي يتم تسويقها تحت اسم HVDCخفيف بواسطة ABB

النتائج المتحصل عليها مع أداة محاكاة Matlab/simulink تمكننا من رؤية واضحة لمدى فعالية الضوابط المستخدمة.

كلمات مفتاحية : محول (VSC-HVDC) ، نمذجة عرض النبضة (MLI) ، منظم(PI) ، ترانزيستور IGBT.

Résumé :

L'objectif de notre travail est de modéliser, commander et simuler un système VSC-HVDC à base d'IGBT à deux niveaux. Le régulateur PI utilisé nous donne de meilleures performances sur le redresseur ainsi la technique MLI sur les deux convertisseurs.

Pour les raisons environnementales, techniques et économiques, l'installation de lignes HVDC est favorisée afin de maximiser l'efficacité de transmission d'électricité. Un avancement rapide et considérable est réalisé dans le domaine des dispositifs d'électroniques de puissance qui peuvent non seulement mettre active mais aussi désactive immédiatement l'IGBT. Cela ouvre des possibilités d'investissement à l'industrie de l'énergie via l'utilisation du HVDC basé sur les convertisseurs de source de tension (VSC) avec la technologie IGBT qui est commercialisée sous le nom HVDC Light par ABB.

Les résultats obtenus avec l'outil de simulation Matlab/simulink nous permettent de voir clairement l'efficacité des commandes utilisées.

Mots clés : Convertisseur (VSC-HVDC), Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), Régulateur PI, Transistor IGBT.

Abstract :

The aim of our work is to model, control and simulate a VSC-HVDC to two level system based IGBT. The PI controller used gives us better performance on the rectifier and the PWM technique on both converters.

For environmental reasons, technical and economic, installation of HVDC lines is encouraged to maximize the efficiency of electricity transmission. Rapid and substantial progress is made in the field of power electronics devices that can not only active but also immediately put off the IGBT. This opens opportunities for investment in the energy industry through the use of HVDC based on voltage source converters (VSC) with IGBT technology which is marketed under the name HVDC Light ABB.

The results obtained with the simulation tool Matlab / Simulink enable us to clearly see the effectiveness of the controls used.

Key words : (VSC-HVDC) converter, Pulse Width Modulation (PMW), IGBT transistor, PI controller,

TABLE DES MATIÈRES

Pages

Introduction générale ……1

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

1.1 Introduction…… 3

1.2 Présentation des systèmes HVDC ……..…….....4

1.2.1 Choix et comparaison entre les systèmes CCHT/CAHT. ……..….4

1.2.2 Intérêt par rapport à une ligne CAHT…….…….6

1.2.3 Configuration d'une transmission CCHT…….…….…..7

1.2.3.1 La liaison mono polaire …….…….7

1.2.3.1 La liaison bipolaire ..….…….……...……..…..8

1.2.3.2 La liaison dos à dos …….…….……..……...……9

1.2.3.3 Transmission DC entre deux terminaux …..…….……10

1.2.3.4 Transmission multi-terminale ……..……...……10

1.3 Systèmes de conversion d'énergie ……12

1.3.1 Convertisseurs de tension…….…..……...….12

1.3.2 Système de conversion d'énergie ……..……12

1.3.3 Système convertisseur à commutateur …….…….……...……12

1.3.4 Système de conversion source de tension (VSC)…..……..……...…13

1.4 Topologie des convertisseurs…… 14

1.4.1 Topologie à deux niveaux ……..…….…….14

1.4.2 Convertisseurs multi-niveaux (diode-série)……..…….…….…..15

1.4.3 Topologie des condensateurs flottante ……..……..16

1.5 Conclusion …….……17

CHAPITRE 2 : MODÉLISATION DU SYSTÈME VSC-HVDC À DEUX NIVEAUX

2.1 Introduction……..…….…….....……..…..18

2.2 Configuration du système……...…..…….…...18

2.3 Modélisation des convertisseurs …….…….……..….18

2.3.1 Fonctionnement de convertisseur avec MLI……...…..…….…23

2.3.2 PLL (Phase Locked Loop)……..24

2.3.3 Régulation de courant …….……..……..24

2.3.4 Contrôle de tension à CC……..……..26

2.3.5 Contrôle de convertisseur (VSC-HVDC)…….…….28

2.4 Conclusion …….…….28

CHAPITRE 3 : COMMANDE DES SYSTEMES VSC-HVDC

3.1 Introduction……...……..……29

3.2 Éléments de système HVDC……..…..…….29

3.2.1 Transformateur …….……..30

3.2.2 Réactances en phase …….…….30

3.2.3 Condensateurs CC …….…….……30

3.2.4 Convertisseurs d'électronique de puissance ……..……31

3.3 Simulation de système VSC-HVDC à deux niveaux……..….31

3.4 Conclusion …..……37

Conclusion générale …….……39

Bibliographie

Liste des figures

Figure : 1.1 Coût d'une transmission en fonction de la longueur d'une ligne ….……..…6

Figure : 1.2 Configuration mono-polaire CSC ou VSC suivant la présence d'inductances ou de condensateurs …….7

Figure : 1.3 Configuration bipolaire……..…….……9

Figure : 1.4 Liaison dos à dos à base CSC……..…..…..……9

Figure : 1.5 Liaison dos à dos à base VSC….……..……..……10

Figure : 1.6 Configuration mono-polaire CSC ou VSC suivant la présence d'inductances ou de condensateurs …….10

Figure : 1.7.a Connexion radiale …….……..……11

Figure : 1.7.b Connexion maillée….……..……11

Figure : 1.8 Schéma de transmission LCC-HVDC……13

Figure : 1.9 Schéma de transmission VSC-HVDC……..13

Figure : 1.10 Diagramme de phase Tirée de Flourentzou, Agelidis et Demetriades (2009)...…14

Figure : 1.11 Trois phases d'un convertisseur à 2 niveaux.……15

Figure : 1.12 Convertisseurs à trois niveaux (diode-série) …..……16

Figure : 1.13 Topologie à trois niveaux (Condensateur flottante)……...17

Figure : 2.1 Le système VSC-HVDC…….……18

Figure : 2.2 Topologie de deux niveaux avec 6 interrupteurs..….……19

Figure : 2.3 La régulation de courant de système à deux niveaux.....25

Figure : 2.4 La régulation de courant de système à deux niveaux.....26

Figure : 2.5 La régulation du courant de système à deux niveaux……26

Figure : 2.6 Régulateur de la tension CC.…….…….27

Figure : 2.7 Structure de contrôle du convertisseur triphasé (VSC-HVDC)…….28

Figure : 3.1 Système VSC_HVDC à deux niveaux……..…….……30

Figure : 3.2 Commande MLI…….32

Figure : 3.3 Forme d'onde de la tension Vdc1 (redresseur)….……...33

Figure : 3.4 Forme d'onde du courant Vdc1 (redresseur)……...…33

Figure : 3.5 État d'écoulement de puissance active (P-RED) de VSC1-HVDC……..…34

Figure : 3.6 État d'écoulement de la puissance réactive (Q-RED) de VSC1-HVDC ……...…34

Figure : 3.7 Tension Vabc de la source du côté redresseur…….…...35

Figure : 3.8 Forme d'onde de la tension Vdc2(onduleur)……..…….35

Figure : 3.9 État d'écoulement de puissance active (P-ON) de VSC2-HVDC……..……36

Figure : 3.10 État d'écoulement de puissance réactive (Q-ON) de VSC2-HVDC……...36

Figure : 3.11 Tension Vabc du côté onduleur ….…..……..……..…..37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Paramètres du câble CC Tirée de MATLAB (2009)…….31

Tableau 3.2 Paramètres du système VSC-HVDC……..…32

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

HVDC Haute tension à courant continue (Hight Voltage Direct Courant)

DC Courant continu (Direct Courant)

CAHT Haute tension à courant alternatif (HVAC)

VSC Convertisseur source de tension (Voltage Source Converter)

CSC Convertisseur source de courant (courant Source Converter)

MLI Modulation de largeur d'impulsion (PWM)

PLL Phase Locked Loop

IGBT Transistor bipolaire à grille isolé (Insulated Gate Bipolar Transistors)

LCC Line Commutated Converters

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A ampère

V volt

Inductance électrique

mH milli henry

Capacitance électrique

mF milli farad

μF microfarad

Ω Ohm

Puissances

Sn : puissance apparente [KVA]

P : puissance active [MW]

Q : puissance réactive [MVAR]

Courants

I_m : 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

Tensions

V_{lnabc} Tension de ligne, Volt

V_{labc} Tension de réseau, Volt

V_m 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 Inductance de ligne, Henry

Resistance

R Résistance de ligne, Ohm

Capacité

C Capacité du bus de tension continue, Farad

INTRODUCTION GENERALE

La production de l'énergie, son transport ainsi que sa distribution, ont connu un très grand développement grâce à l'évolution rapide de l'électronique de puissance dans les dernières années. Dans ce développement considérable dans le domaine du transfert d'énergie basé sur les convertisseurs de puissance, les sources d'énergie renouvelable ont trouvé un passage facile pour s'intégrer avec les sources d'énergie conventionnelles.

Le système VSC-HVDC fait l'objet de plusieurs recherches. Les convertisseurs d'électronique de puissances, les topologies à deux niveaux et les topologies multi – niveaux sont les axes de recherche dans ce domaine.

Dans notre recherche, on propose une stratégie de contrôle dans l'objectif d'améliorer le rendement du système et d'augmenter sa fiabilité.

La solution proposée est basée sur l'utilisation de la topologie à deux niveaux, qui va résoudre plusieurs problèmes dans la conversion et le transport d'énergie.

L'objectif spécifique de ce mémoire est de mettre au point un système d'aide à la conception, la modélisation et la simulation d'un système VSC-HVDC à deux niveaux.

Afin d'améliorer la capacité de transmission et de résolution des problèmes de la qualité de l'énergie [1].

Grandes Lignes de mémoire :

Chapitre 1 : introduit un aperçu des systèmes de transmissions HVDC des principaux types des systèmes de transmissions d'énergie est présenté. Les aspects environnementaux, techniques et économiques des systèmes de transmissions HVDC sont explicités. Les avantages de la mise en œuvre des systèmes HVDC plutôt qu'utiliser des systèmes de transmissions HVAC. Les configurations HVDC les plus récentes selon la technologie d'électronique de puissance et les catégories de transmission sont montrées.

Chapitre 2 : les modèles mathématiques de système VSC-HVDC à deux niveaux reliant deux réseaux.

Chapitre 3 : les simulations avec le logiciel Matlab/Simulink et discussion des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale décrire tout ce qu'on a fait sur les chapitres précédents.

1.1 Introduction

Les besoins en énergie électrique sont en croissance constante, et les infrastructures basées sur des réseaux de transport interconnectés) arrivent pas à pas en limite de leurs capacités. Le recours à de nouveaux moyens de production et de construire des infrastructures pour acheminer cette énergie permet de nouvelles opportunités [1].

Le développement considérable dans le domaine du transport d'énergie basé sur les convertisseurs de puissance, les sources d'énergie renouvelable ont trouvé un passage facile pour s'intégrer avec les sources d'énergie conventionnelles .l'énergie électrique est aujourd'hui, transportée et distribuée en courant alternatif (AC) .ce choix tient à quelques raisons majeurs : la simplicité de production. Ainsi que la facilité de changer de niveau de tension à l'aide de transformateurs.

Ce pendant, la maîtrise des transferts d'énergie en courant alternatif pose dans les réseaux denses, des problèmes de plus en plus difficiles à résoudre :

- ✓ La répartition des transits des 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 est les chutes de tension.
- ✓ Les réglages de la fréquence des alternateurs interconnectés doivent être cordonnés.

Le courant continu (DC) pose aussi des problèmes : sa production nécessite le redressement des ondes de courant alternatif et le changement de tension ne peut se concevoir qu'au moyen de dispositifs complexes. Dans l'un et l'autre cas, le recours à une électronique de puissance très couteuse s'avère nécessaire. Le problème de la coupure du courant continu et techniquement résolu mais au prix de procédés sophistiqués et chers. Par ailleurs, il y a des situations dans lesquelles le courant continu est plus intéressant que le courant alternatif [2].

La production de l'énergie électrique dans l'avenir sera basée sur l'exploitation des sources renouvelables. L'énergie éoliennes de mer sera efficace et plus productive, parce que la vitesse moyenne du vent à la mer et plus élevée que la vitesse aux sites terrestres (ONSHORE).La puissance fournit par les parcs éoliennes (OFFSHORE) doit être transportée sur de très longues distances pour établir la connexion sur le réseau de distribution.

La solution la plus prometteuse pour le transport d'énergie électrique générée dans les parcs éoliens (ONSHORE) est celui [VSC-HVDC] puisqu' elle présente moins de pertes que le système [1].

1.2 Présentation des systèmes HVDC

Un système de transmission à courant continu haut tension (HVDC) est un équipement d'électronique de puissance utilisé pour la transmission de l'électricité en courant continu Haut Tension.

Une liaison à courant continu est constituée d'une ligne à courant continu reliant au moins deux réseaux alternatifs par l'intermédiaire de stations de conversion. Elle est donc constituée de trois éléments :

- un redresseur.
- une ligne de transmission.
- un onduleur.

Généralement le redresseur et l'onduleur sont symétriques et réversibles (ils peuvent échanger leur rôle. Le redresseur et l'onduleur ont été d'abord réalisés avec des soupapes à vapeur de mercure. Récemment ils sont réalisés avec des thyristors, ou avec des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) [2].

1.2.1 Choix et comparaison entre les systèmes CCHT/CAHT

Malgré leur première utilisation massive, les systèmes DC ont été très vite dépassés par les systèmes AC. Leurs limitations étaient devenues de plus en plus

apparentes : ils ne pouvaient délivrer de la puissance que sur des petites distances. En effet, pour que les pertes de puissance (RI^2) et les chutes de tension restent dans des proportions acceptables. Les niveaux de tension devaient être très élevés pour les transmissions de puissance longue distance [3].

Les études menées sur les transformateurs et le transport alternatif, ont conduit à la considération des systèmes de puissance électrique alternatifs. Le développement des systèmes polyphasés par NICKOLA TESLAS à ensuite marqué l'émergence des systèmes AC, si bien qu'ils sont sortis vainqueurs de la (bataille) menée contre les systèmes DC pour les raisons suivantes :

- Les niveaux de tensions peuvent être facilement transformés dans les systèmes AC permettant ainsi une flexibilité dans l'utilisation de tensions différentes pour la génération, la transmission, et la consommation.
- Les génératrices (ou moteurs) AC sont plus simples à concevoir que les génératrices (ou moteurs) DC.

Dans les années 1950, avec le développement des interrupteurs au mercure, les systèmes de transport CCHT sont devenues attractifs pour les transmissions de puissance longue distance [3].

Le système CCHT n'est possible que dans des conditions dans lesquelles le coût des lignes à CC est inférieur à ceux des lignes à CA, à cause des stations de conversion d'énergie pour passer du courant alternatif (AC) au courant continu (CC). De même, les lignes CC sont moins couteuses que les lignes AC. Il est donc plus avantageux de choisir une ligne CC, lorsque l'utilisation des distances supérieure à quelque dizaine de kilomètres, le cas de la plupart des câbles sous-marins (figure 1.1) [1].

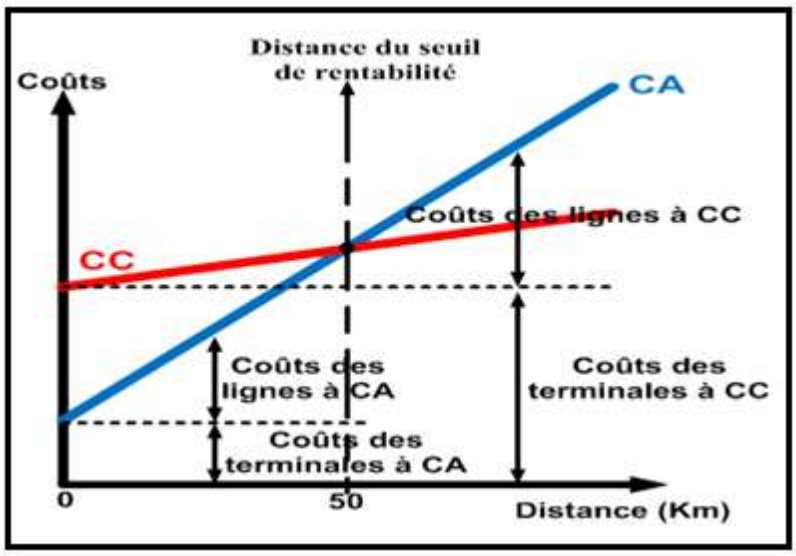


Figure 1.1 : *Coût d'une transmission en fonction de la longueur d'une ligne*
Tirée d'ABB (2009)

D'après la figure (1.1) donnée par (ABB ,2009) nous constatons que le coût d'une ligne à CC est moins élevé que celui d'une ligne à AC si la longueur de la ligne dépasse 50 km.

1.2.2 Intérêt par rapport à une ligne CAHT

Lors de la conception d'une interconnexion entre deux ou plusieurs stations, il devient actuellement critique de faire un choix entre les utilisations d'une transmission de puissance AC ou DC. Le système HVDC est employé afin de réduire l'énergie perdue dans la résistance des fils .dans certain nombre d'applications, le système CCHT est plus efficace que celui du CA, cette évaluation est basée sur les données suivantes [3] :

1. Utilisation de câbles sous-marins de plus de 30 Km, dans une transmission AC, les câbles sont fortement capacitifs. Ils sont donc nécessaires d'avoir des stations intermédiaires pour assurer la compensation.
2. Liaison asynchrone entre deux systèmes AC (différentes fréquences).
3. Utilisation de la totalité de section, la possibilité d'utiliser une intensité plus élevée pour une même section utilisée en AC.

4. Meilleur utilisation de l'isolation, l'intensité et la tension étant plus élevés la puissance transportée par la même ligne (en AC) sera plus importante en CC.
5. Possibilité de supporter la puissance rapidement en cas de perturbation.
6. Optimisation de conducteurs : deux conducteurs pour le système bipolaire et un conducteur pour le système mono polaire.
7. La puissance réactive n'est pas transmissible en CCHT.

1.2.3 Configuration d'une transmission CCHT

1. Les systèmes HVDC peuvent être classifiés en plusieurs catégories :
2. La liaison mono-polaire.
3. Transmission bipolaire.
4. Les liaisons dos à dos « back to back ».
5. Les liaisons entre deux terminaux.
6. Les liaisons multi-terminales [3].

1.2.3.1 La liaison mono polaire

Dans une transmission mono polaire une des bornes du redresseur est mise à la terre (ou l'eau). L'autre borne est reliée à une ligne de transmission (voir Figure 1.2).

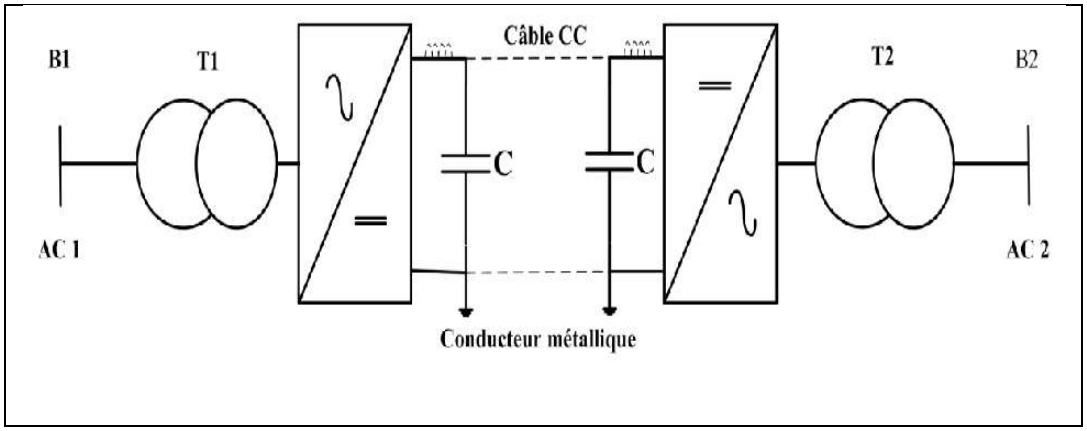


Figure 1.2 : *Configuration mono-polaire CSC ou VSC suivant la présence d'inductances ou de condensateurs.*

Le problème de cette configuration est :

- ✓ Le retour d'électrodes en eau peut produire le chlore
- ✓ Le courant non équilibré provoquant un champ magnétique, ce qui résulte des problèmes de navigation pour les bateaux passants au-dessus des câbles sous-marins [4].

1.2.3.2 Liaison bipolaire

La configuration mono-polaire peut être aussi 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 très importante, ou encore, lorsque les interférences avec des structures métalliques sous-terraines ou sous-marines sont préjudiciables [3].

La configuration bipolaire (figure1.3) est généralement utilisée pour une transmission de puissance par voie aérienne. Dans ces systèmes, nous trouvons deux conducteurs, un par polarité (positive ou négative), et chaque terminal possède deux convertisseurs en série du côté DC et fonctionnant à la même tension nominale. Les jonctions entre les convertisseurs sont réalisées par la terre. Les courants qui traversent les conducteurs sont égaux et il n'ya pas des courants qui s'écoulent dans la terre. Lorsqu' il y a un défaut sur une ligne, la moitié de puissance peut continuer à être transmise en utilisant les électrodes installées à chaque extrémité de la ligne, en plus de fonctionner comme le système mono-polaire [1].

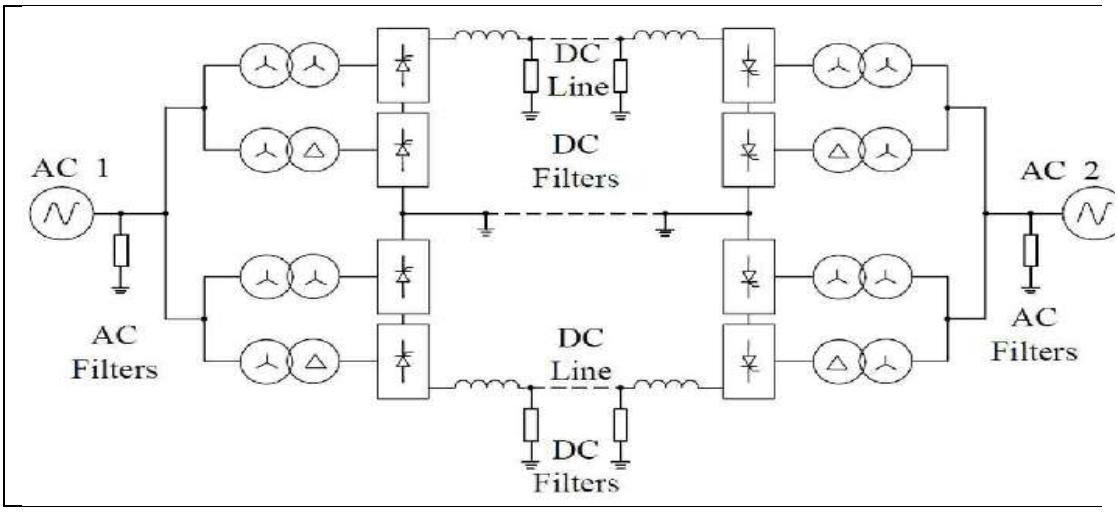


Figure 1.3 : *Configuration bipolaire.*

1.2.3.3 Liaison dos à dos

Dans un système de transmission dos à dos "back to back", le redresseur (convertisseur AC-DC) et l'onduleur (convertisseur DC-AC) sont d'une part localisés dans une même station, c'est-à-dire un même bâtiment, et d'autre part reliés par l'intermédiaire d'une inductance en série pour les convertisseurs CSC (figure1.4). Ou d'un condensateur en parallèle pour les convertisseurs VSC (Figure 1.5). Cette catégorie de système est couramment utilisée pour interconnecter deux systèmes AC asynchrones qui peuvent soit opérer à des fréquences nominales différentes, soit le faire sans être synchronisés. [1]

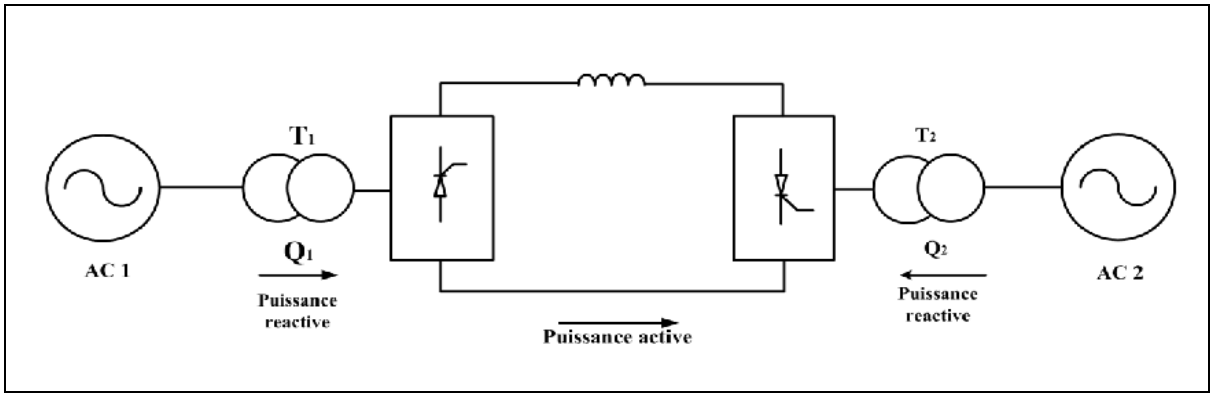


Figure 1.4 : *Liaison dos à dos à base CSC.*

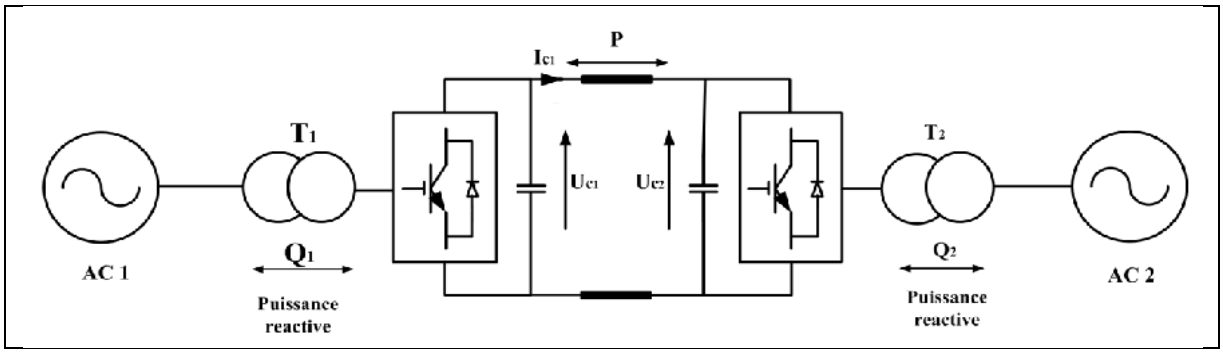


Figure 1.5 : *Liaison dos à dos à base VSC.*

1.2.3.4 Transmission DC entre deux terminaux

Les transmissions CC entre deux terminaux peuvent être bipolaires ou mono-polaire. Une configuration mono-polaire est montrée dans la figure1.6.Elle utilise un seul conducteur et le chemin de retour est assuré par la terre ou l'eau. Cette configuration peut aussi être la première étape dans la conception d'un système bipolaire [1].

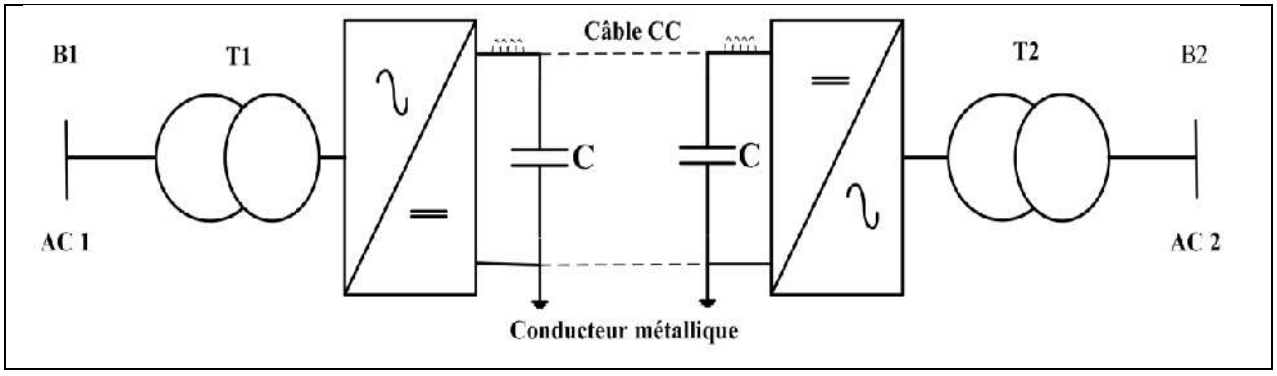


Figure 1.6 : *Configuration mono-polaire CSC ou VSC suivant la présence d'inductances ou de condensateurs.*

1.2.3.5 Transmission multi-terminale

De par le développement et le succès grandissant des transmissions DC entre deux terminaux (point to point), les concepteurs de systèmes de puissance ont réalisé que les liaisons multi- terminale (MTDC) pouvaient être plus attractives, et ce afin d'exploiter pleinement les avantages économiques et technique de la topologie HVDC.

Les systèmes MTDC présentent trois configurations :

1. Liaisons parallèles.
2. Liaisons séries (utilisations des CSC).
3. Liaisons hybrides (séries /parallèle).

Dans une configuration parallèle, les convertisseurs opèrent tous à la même tension DC nominale, les connections peuvent être soit radiales (figure1.7.a) soit maillées (figure 1.7.b) [3].

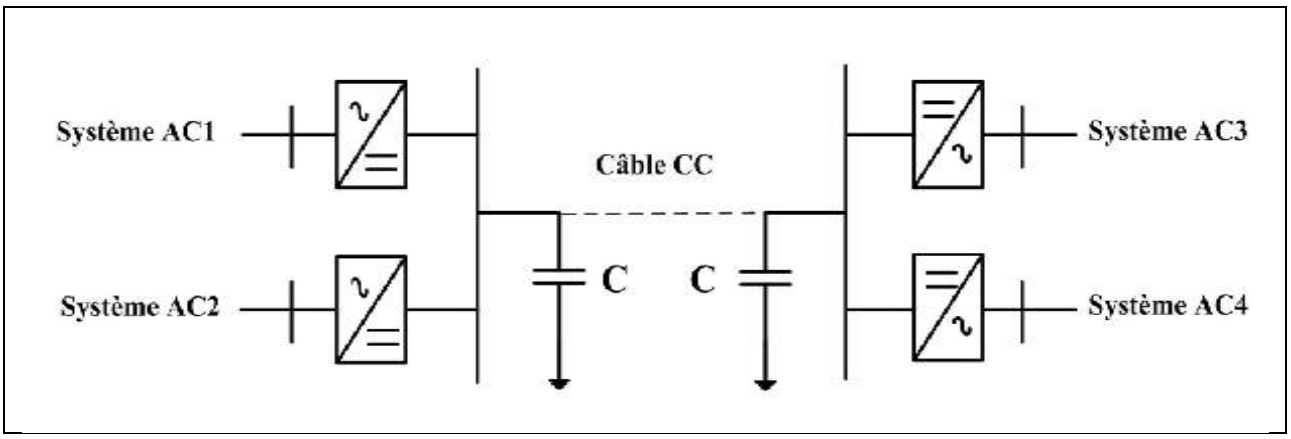


Figure 1.7.a : *Connexion radiale.*

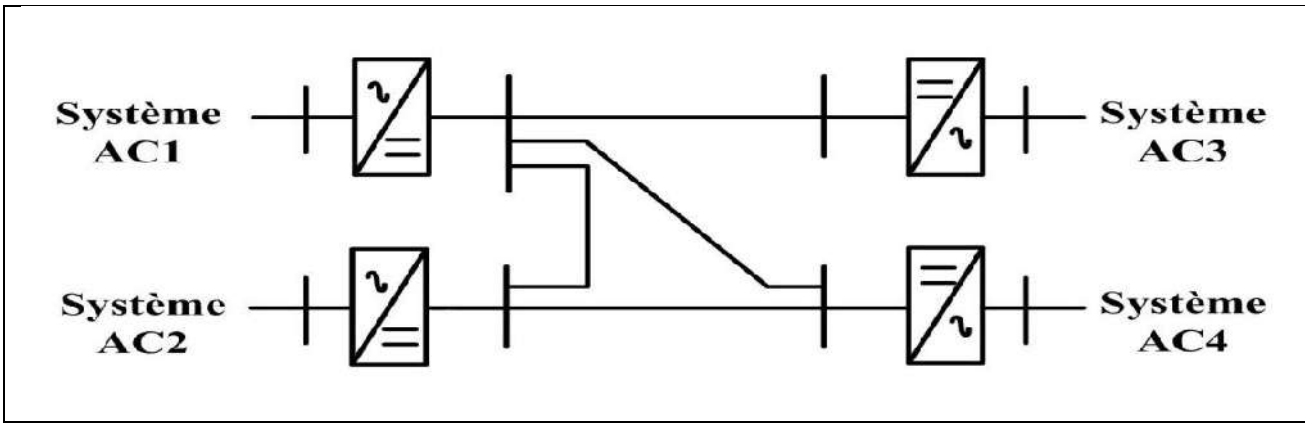


Figure 1.7.b : *Connexion maillée.*

La majorité des études et des applications impliquant des systèmes MTDC utilisant des connections parallèles. Dans celles-ci la connexion est préférée. Comparées aux configurations série, il est reconnu que les configurations parallèles réduisent les pertes des lignes. Sont plus simples à commander et offrent plus de flexibilité pour des futures extensions. Nous pouvons toutefois noter que les configurations séries sont confinées aux applications où il est plus économique d'opérer sous un courant important et basse tension [2].

1.3.1 Convertisseurs de tension

Le IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) est maintenant employé en raison de sa commande qui est simple et de son coût réduit. La principale différence entre les thyristors et les transistors IGBT, vis-à-vis le fonctionnement du convertisseur de puissance, est la capacité de d'amorçage (turn-off) des IGBT. L'intégration et la conception des stations de conversion ont grandement élargie la gamme des applications de la transmission HVDC [1].

1.3.2 Système de conversion d'énergie

Il existe deux types de conversion d'énergie HVDC : Le système VSC-HVDC qui est un convertisseur source de tension et celui de convertisseur du courant CSC-HVDC qui moins souple et encombrant par rapport au VSC.

1.3.3 Système convertisseur à commutateur

LCC (Ligne Commutated Converters). Les convertisseurs à commutation de ligne(LCC), dont les éléments de base sont des thyristors (figure 1.8). Les LCC sont adaptés pour le transport de grandes quantités d'énergie au niveau de la tension la plus élevée. Ce système nécessite d'importants réseaux en amant et en aval et permet la circulation de flux de puissance dans les deux sens. D'un autre côté, il nécessite des filtres et des bancs de condensateurs pour la compensation de la puissance réactive et pour atténuer les harmoniques de courant générés par les convertisseurs [1].

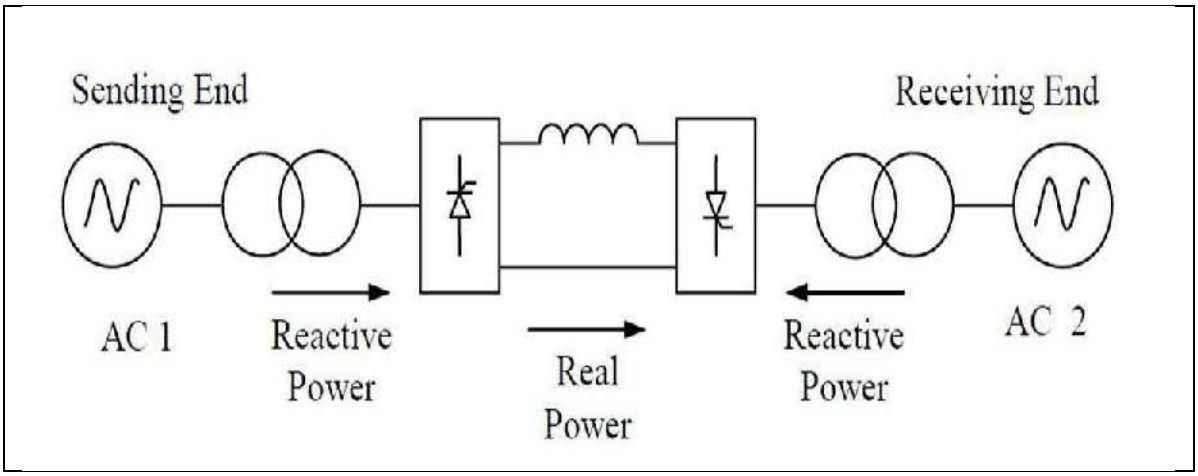


Figure 1.8 : *Schéma de transmission LCC-HVDC.*

1.3.4 Système de conversion source de tension(VSC)

Le système VSC utilise l'électronique de puissance moderne. Telle que : IGBT, MOSFET, GTO. Cette technologie ne nécessite pas de réseau fort en amant et en aval. Aucune nécessité de compenser la puissance réactive par des moyens extérieurs. Il permet de contrôler indépendamment la puissance réactive dans les deux terminaux. Ainsi la facilité de connecter plus de deux convertisseurs CC au même réseau. Elle est très intéressante pour acheminer par voie terrestre, l'énergie produite par les éoliennes en haute mer. Par contre, les pertes en puissance et les coûts d'investissement sont plus élevés par rapport au CCHT classiques (figure 1.9).

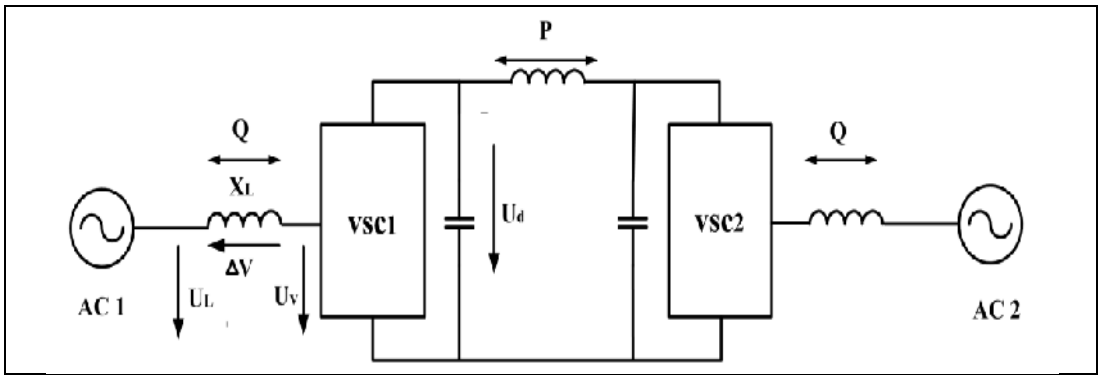


Figure 1.9 : *Schéma de transmission VSC-HVDC.*

La tension *Uv* côté réseau et proportionnelle à la tension continue *Ud* après la conversion.

$$Uv=Ku*Ud \qquad (1.1)$$

A la fréquence fondamentale la figure montre le phaseur du système avec δ angle entre la tension phaseur U_1 et la tension Uv à la fréquence fondamentale figure (1.10).

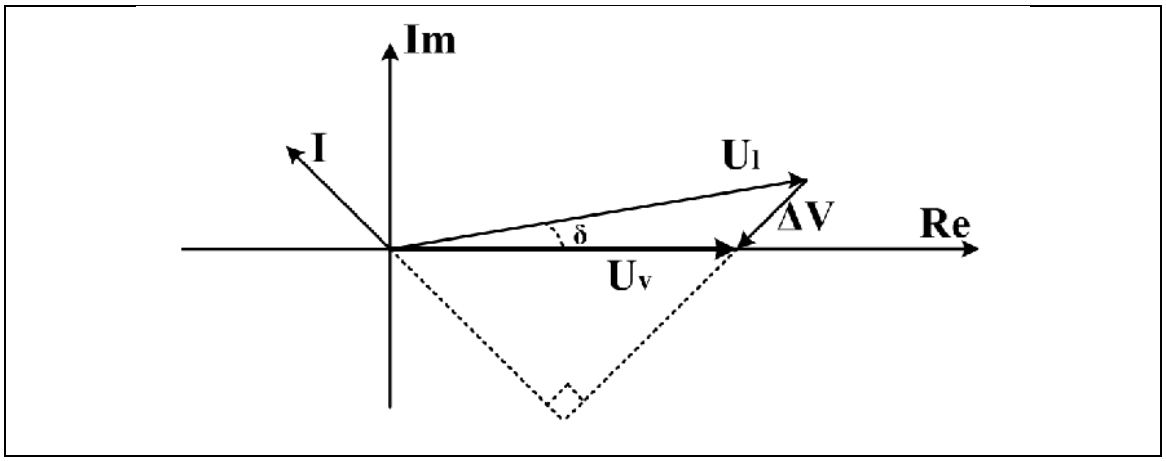


Figure : 1.10 *Diagramme de phase Tirée de Flourentzou, Agelidis et Demetriades (2009).*

Les puissances active et réactive (P et Q) aux bornes du système sont représentées sous la forme [4] :

$$P=U_l \sin(\delta)\frac{Uv}{X} \quad (1.2)$$

$$Q=(Ul \cos(\delta)-Uv)\frac{Uv}{X} \quad (1.3)$$

1.4 Topologies des convertisseurs

Il existe trois grandes catégories de topologie adaptée à la transmission CC :

1. Topologie deux niveaux.
2. Topologie multi-diode serrée.
3. Topologie multi-condensateur flottante.

1.4.1Topologie à deux niveaux

Cette catégorie, qui est caractérisée par une large gamme de niveaux des puissances, peut même dépasser 50 MVA. Come application, elle est utilisée pour compenser la puissance réactive. Pour améliorer la qualité de la production, les interrupteurs sont contrôlés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et les

pertes de commutation sont réduites à un niveau plus bas la figure (1.11) montre trois phases à deux niveaux [1].

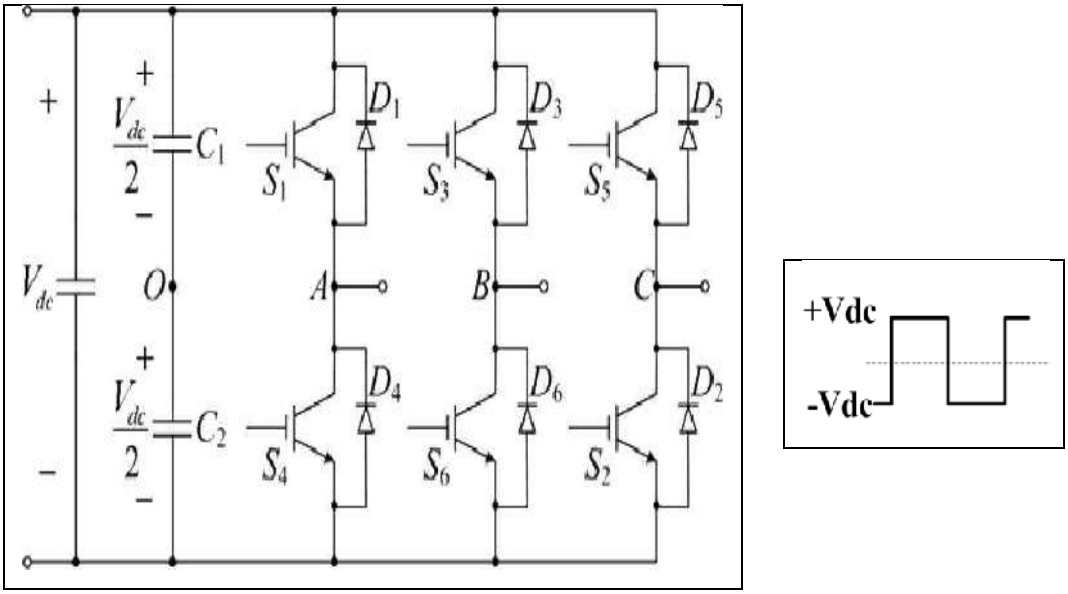


Figure 1.11 : *Trois phases d'un convertisseur à 2 niveaux.*

Les avantages de topologie à deux niveaux sont :

- Circuit simple.
- Des petits condensateurs à CC.
- Faible encombrement.

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

1.4.2 Convertisseurs multi-niveaux (diode-série)

Il utilise un certain nombre de condensateurs à CC en série et des diodes supplémentaires (figure1.12).La MLI servit pour contrôler les interrupteurs et peut être utilisé pour améliorer le rendement des signaux [1].

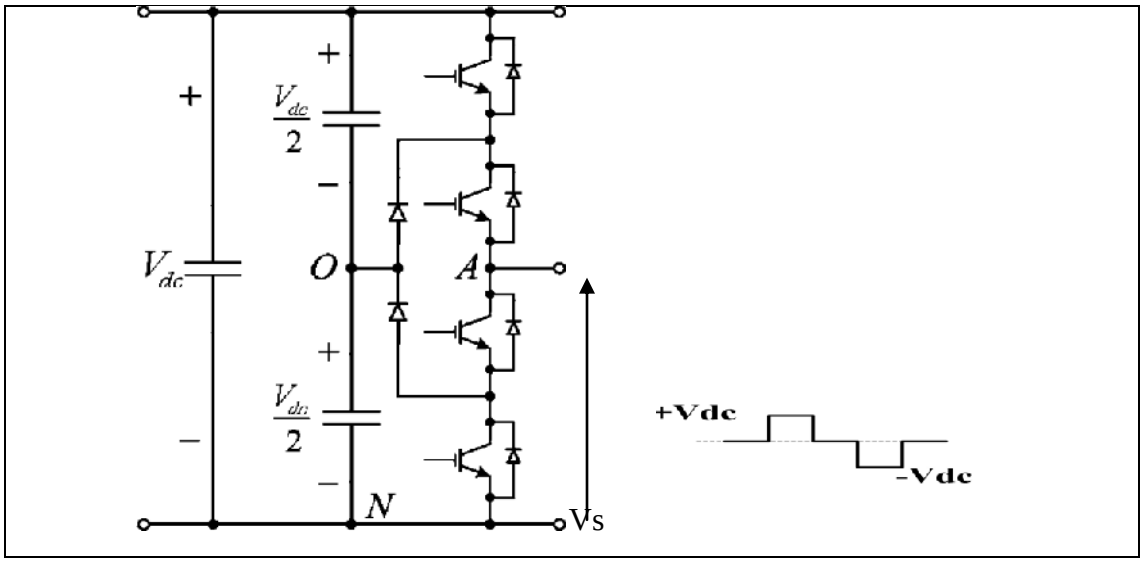


Figure 1.12 : *Convertisseurs à trois niveaux (diode-série).*

Les avantages de la topologie multi-niveaux :

- Petits condensateurs à CC.
- Faible encombrement.
- Bonne forme d'onde.

Les inconvénients de la topologie multi-niveaux :

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

1.4.3 Topologie des condensateurs flottante

La topologie des condensateurs flottante à courant continu ne possède pas des diodes supplémentaires, son circuit est relativement simple et ayant de bonne forme d'onde (figure1.13).

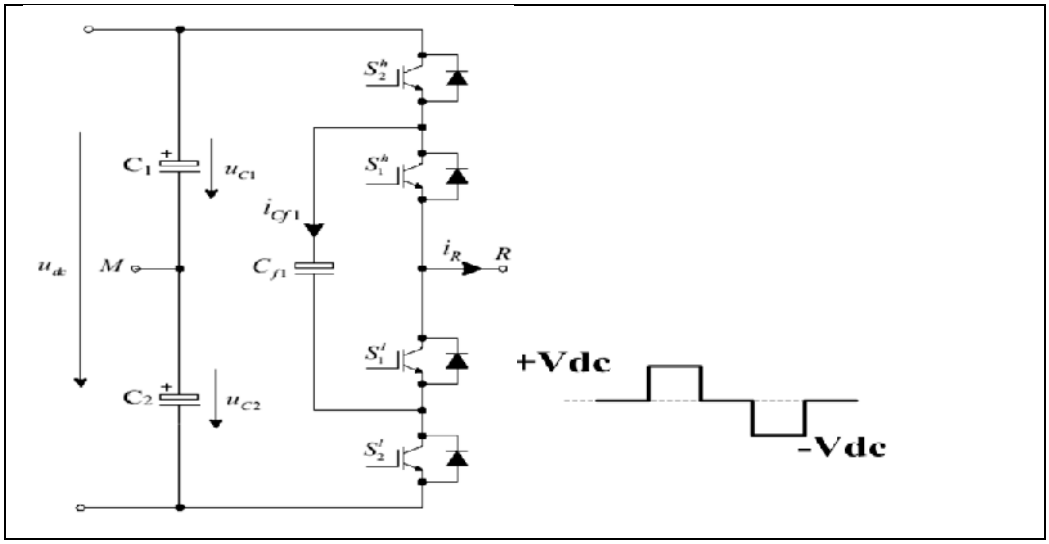


Figure : 1. 13 *Topologie à trois niveaux (Condensateur flottante)*

1.5 Conclusion

Nous venons de présenter les différentes configurations dans lesquelles nous pouvons rencontrer les systèmes HVDC. Nous nous intéresserons tout particulièrement dans la suite de notre étude à la transmission de puissance entre deux terminaux, lorsque celle-ci intègre une seule ligne de transmission (configuration mono polaire de type VSC). Nous avons mentionné les caractéristiques techniques et économiques des formes de transmission et de production d'énergie. L'évolution rapide du secteur d'énergie et sa mondialisation sont fortement associées aux problèmes d'environnement résultant de l'utilisation de cette énergie.

2.1 Introduction

Le système que nous avons proposé dans ce travail est composé d'une source de puissance est un bus infini, connecté à une ligne de transmission de haute tension à courant continu, via deux convertisseurs VSC et un condensateur de lissage (figure2.1).

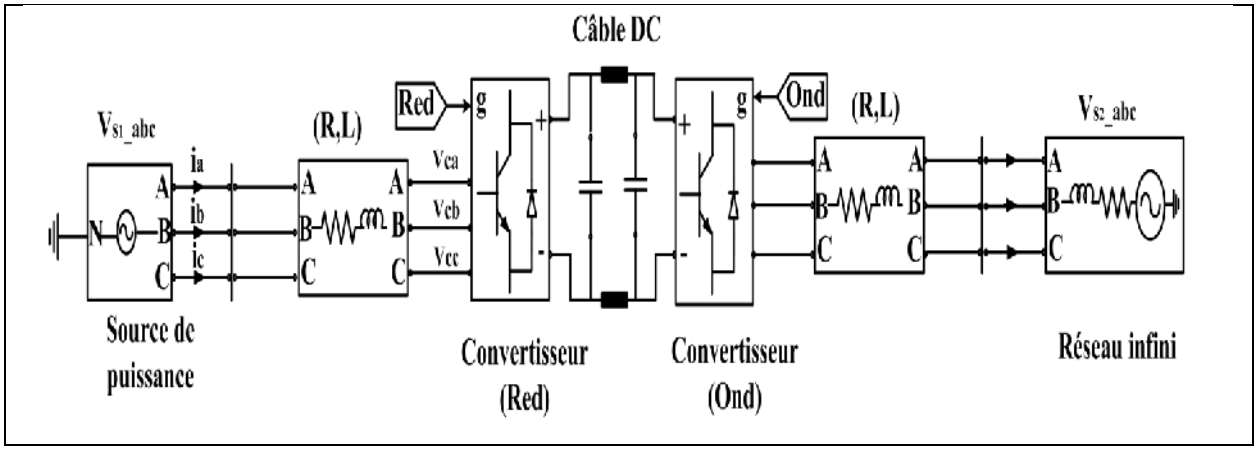


Figure 2.1 : *Le système VSC-HVDC.*

La problématique sera choisir un modèle qui soit adapté à la commande et couvre un large domaine d'application.

2.2 Configuration du système

Le système à deux niveaux est présenté par les convertisseurs à base de semi-conducteurs 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 réseaux, stabilisé la tension et empêcher la propagation des défauts (figure2.1) [1].

2.3 Modélisation des convertisseurs

Les convertisseurs sont les principaux acteurs dans une transmission HVDC puisqu'ils assurent la transformation de la puissance active alternative en une puissance continue et vice versa. Dans les applications haute puissance, on pouvoir utiliser des structures (pont à deux niveaux, trois niveaux, multicellulaire…)

permettant d'une part d'obtenir une haute tension de sortie, et d'autre part de pouvoir faire varier la puissance transmise.

La topologie de deux niveaux est la plus utilisé dans la transmission VSC-HVDC et comme le montre la (figure 2.2) le convertisseur peut générer seulement deux valeurs de tension ($+V_{dc}$) et ($-V_{dc}$) [1].

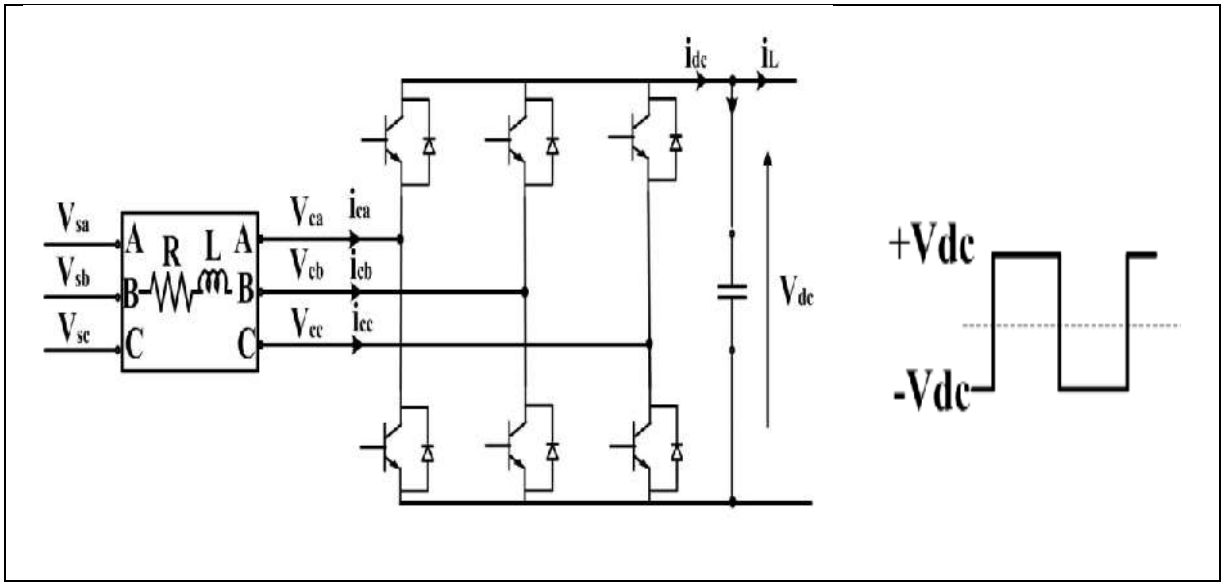


Figure 2.2 : *Topologie de deux niveaux avec 6 interrupteurs*.

On suppose que la source de puissance est définie comme un bus infini qui est caractériser par une source de tension triphasée et équilibrée *Vs*, des résistances de ligne *R* et des inductances de ligne *L*. Désignant par *Vs_abc* la tension côté réseau et par *ic_abc*, le courant sortant du bus infini.

Nous représentant le système par les équations suivantes :

$$\begin{cases} L\frac{dia}{dt} = Vsa - Vca - Rica \\ L\frac{dib}{dt} = Vsb - Vcb - Ricb \\ L\frac{dic}{dt} = Vsc - Vcc - Ricc \end{cases} \quad (2.1)$$

Ou:

$$\begin{cases} \frac{dia}{dt} = \frac{1}{L}Vsa - \frac{1}{L}Vca - \frac{1}{L}Rica \\ \frac{dib}{dt} = \frac{1}{L}Vsb - \frac{1}{L}Vcb - \frac{1}{L}Ricb \\ \frac{dic}{dt} = \frac{1}{L}Vsc - \frac{1}{L}Vcc - \frac{1}{L}Ricc \end{cases} \quad (2.2)$$

Ou encore sous forme matricielle [2]:

$$\frac{di_abc}{dt} = \frac{1}{L}Vs_abc - \frac{1}{L}Vc_abc - \frac{R}{L}ic_abc \quad (2.3)$$

OÙ:

Vs_abc : tension de réseau.

Vc_abc : tension de ligne.

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 :

$$P = \frac{2}{3}\begin{pmatrix} \text{Cos}\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{Sin}\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

En multipliant chaque terme de l'équation (2.3) par la matrice *P*, nous obtenons :

$$P\frac{di_abc}{dt} = \frac{1}{L}V_{s_dq0} - \frac{1}{L}V_{c_dq0} - \frac{R}{L}i_{c_dq0} \quad (2.5)$$

Où les variables indexées par l'indice 0 sont les variables stationnaires. Elles sont proportionnelles à la séquence zéro des grandeurs électriques (courant, tension) [2].

En ne considérant que le terme de gauche dans l'équation (2.5), nous avons :

$$P\frac{di_abc}{dt} = \frac{d(Pi_abc)}{dt} - \frac{dP}{dt} i_abc$$

$$= \frac{d(i_dq0)}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \frac{\partial P}{\partial \theta} i_abc \qquad (2.6)$$

Les axes magnétiques des phases de bus infini tournent, par définition, à une vitesse angulaire constante ω_1, donc nous avons $\theta = \omega_1 t$ et ainsi :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_1 \qquad (2.7)$$

En s'intéressant maintenant au calcul de $\frac{\partial P}{\partial \theta} i_abc$.

Nous avons [2]:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} i_abc = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} -sin\theta & -sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -cos\theta & -cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} i_abc = \begin{pmatrix} iq \\ id \\ 0 \end{pmatrix} \qquad (2.8)$$

À partir des équations (2.5), (2.7), et (2.8) nous avons alors :

$$\begin{cases} \frac{did}{dt} = \frac{1}{L}Vsd - \frac{1}{L}Vcd - \frac{1}{L}Rid + \omega iq. \\ \frac{diq}{dt} = \frac{1}{L}Vsq - \frac{1}{L}Vcq - \frac{1}{L}Riq + \omega id. \\ \frac{di0}{dt} = \frac{1}{L}Vs0 - \frac{1}{L}Vc0 - \frac{1}{L}Ri0. \end{cases} \qquad (2.9)$$

Nous avons supposés que les tensions de ligne de bus infini étaient équilibrées, par conséquent nous avons la relation :

$$Vsa + Vsb + Vsc = 0 \tag{2.10}$$

Les courants sortant tous de neutre du réseau, nous pouvons écrire :

$$ica + icb + icc = 0 \tag{2.11}$$

Enfin, en sommant les équations (2.1, 2.4 et 2.11) nous obtenons :

$$Vca + Vcb + Vcc = 0 \tag{2.12}$$

C'est-à-dire que les tensions au bout du réseau sont équilibrées.

Du fait que chacune des grandeurs électriques est équilibrée, il n'existera pas de séquence zéro et par conséquent, le modèle de bus infini se réduit aux deux équations suivantes :

$$\frac{did}{dt} = \frac{1}{L}Vsd - \frac{1}{L}Vcd - \frac{1}{L}Rid + \omega iq.$$

$$\frac{diq}{dt} = \frac{1}{L}Vsq - \frac{1}{L}Vcq - \frac{1}{L}Riq + \omega id. \tag{2.13}$$

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

$$Vca = Vm\cos(\omega t)$$

$$Vcb = Vm\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \tag{2.14}$$

$$Vcc = Vm\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

OÙ *Vm* est l'amplitude maximale de la tension. Le courant à la sortie du convertisseur peut s'écrire :

$$idc = c\ \frac{dVdc}{dt} + i_L \tag{2.15}$$

La puissance active avec ($Vsq = 0$) s'écrit par :

$$P = \frac{3}{2}(Vsd\ id + Vsq\ iq) = \frac{3}{2} Vsd\ id \quad (2.16)$$

Et la puissance réactive (Vsq = 0).

$$Q = \frac{3}{2}(Vs.iq - Vs.iq) = \frac{3}{2} Vsd\ iq \quad (2.17)$$

Vsd et *Vsq* sont des tensions de source, *id* et *iq* sont les courants de ligne *Vcd* et *Vcq* sont les tensions d'entrée du convertisseur, *P* et *Q* sont les puissances actives et réactives respectivement transmissent au réseau, et encore *Vdc* la tension continue.

Suivant l'axe dq on trouve que la tension *Vsq* = 0 et *Vsd* = *Vmax* .

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 :

$$P = \frac{3}{2} Vsd\ id = Vdc\ idc \quad (2.18)$$

2.3.1 Fonctionnement de convertisseur avec MLI

La modulation est le processus de variation d'une caractéristique d'une porteuse à l'aide d'une information. En électronique de puissance, cette information est l'amplitude, la fréquence et la phase d'une tension ou d'un courant [1].

Lors de fonctionnement en redresseur de tension, la tension continue garde la valeur de référence, en mesurant la tension *Vdc* est en la comparant avec *Vdc_réf* l'erreur produite est utilisée pour commuter les six interrupteurs à la fermeture et à l'ouverture. Selon la charge et décharge des condensateurs, le système définit le sens de l'écoulement de puissance et la commande MLI fait contrôler la puissance active et réactive [1].

2.3.2 PLL (Phase Locked Loop)

PLL (phase locked loop) est un système de contrôle en boucle fermé, qui suit la fréquence et la phase d'un signal sinusoïdal en utilisant un oscillateur de fréquence interne. Le système de contrôle ajuste la fréquence de l'oscillateur interne pour maintenir la différence de phases 0. La commande PLL est nécessaire dans le contrôle des convertisseurs. Le rôle de PLL est la Synchronisation et détecte l'angle θ, elle permet de générer des références de courant. 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 [1].

2.3.3 Régulation de courant

La régulation de courant est mise dans le repère dq qui est associé au régulateur PI. Les Courants *id* et *iq* 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.

Nous pouvons écrie l'équation (2.1) sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Vca \\ vcb \\ Vcc \end{pmatrix} + (R+L\frac{d}{d\ t}) \begin{pmatrix} ica \\ icb \\ icc \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Vca \\ vcb \\ Vcc \end{pmatrix} = (R+L\frac{d}{d\ t}) \begin{pmatrix} ica \\ icb \\ icc \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Nous appliquons sur cette équation la transformation *abc-dq* et nous constatons les résultats suivants :

$$\begin{pmatrix} Vsd - Vcd \\ Vsq - Vcq \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R + L\frac{d}{dt} & \omega L \\ -\omega L & R + L\frac{d}{dt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} icd \\ icq \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Sachant que *Vcd* et *Vcq* se sont des composantes de la tension *Vc* du convertisseur dans le repère dq, ainsi que les courants *icd* et *icq* sont celle du courant *ic* de celui-ci. Donc, la tension de référence est [5]:

$$\begin{cases} V^*cd = Vsd - (Ricd + \omega Licq) - [K\,pd\,(i^*cd - icd) + Kid.\int (i^*cd - icd)dt]. \\ V^*cq = Vsq - (Ricq + \omega Licd) - [K\,pq\,(i^*cq - icq) + Kiq.\int (i^*cq - icq)dt]. \end{cases} \quad (2.22)$$

On suppose que :

$$Ud = [K\,pd\,(i^*cd - icd) + Kid.\int (i^*cd - icd)dt]. \quad (2.23)$$

Donc l'équation (2.23) devient :

$$V^*cd = Vsd - (Ricd + \omega Licq) - Ud. \quad (2.24)$$

On peut schématiser la tension *Ud* par le bloc suivant :

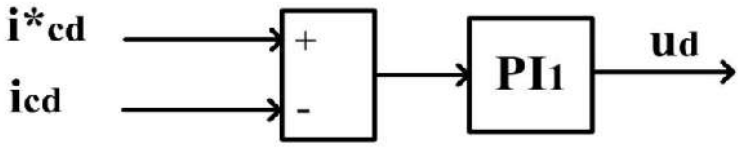


Figure 2.3 : *La régulation de courant de système à deux niveaux.*

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

$$V^*cq = Vsq - (Ricq + \omega Licd) - Uq \quad (2.25)$$

On peut schématiser la tension *Uq* par le bloc suivant :

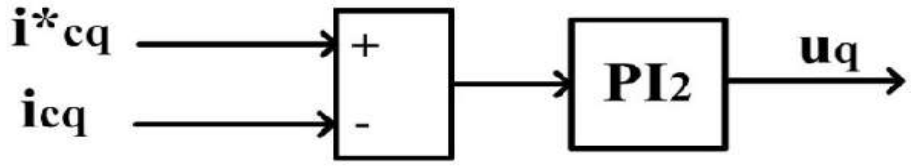


Figure 2.4 : *La régulation de courant de système à deux niveau.*

On peut développer le régulateur du courant suivant les équations (2.24) et (2.25) :

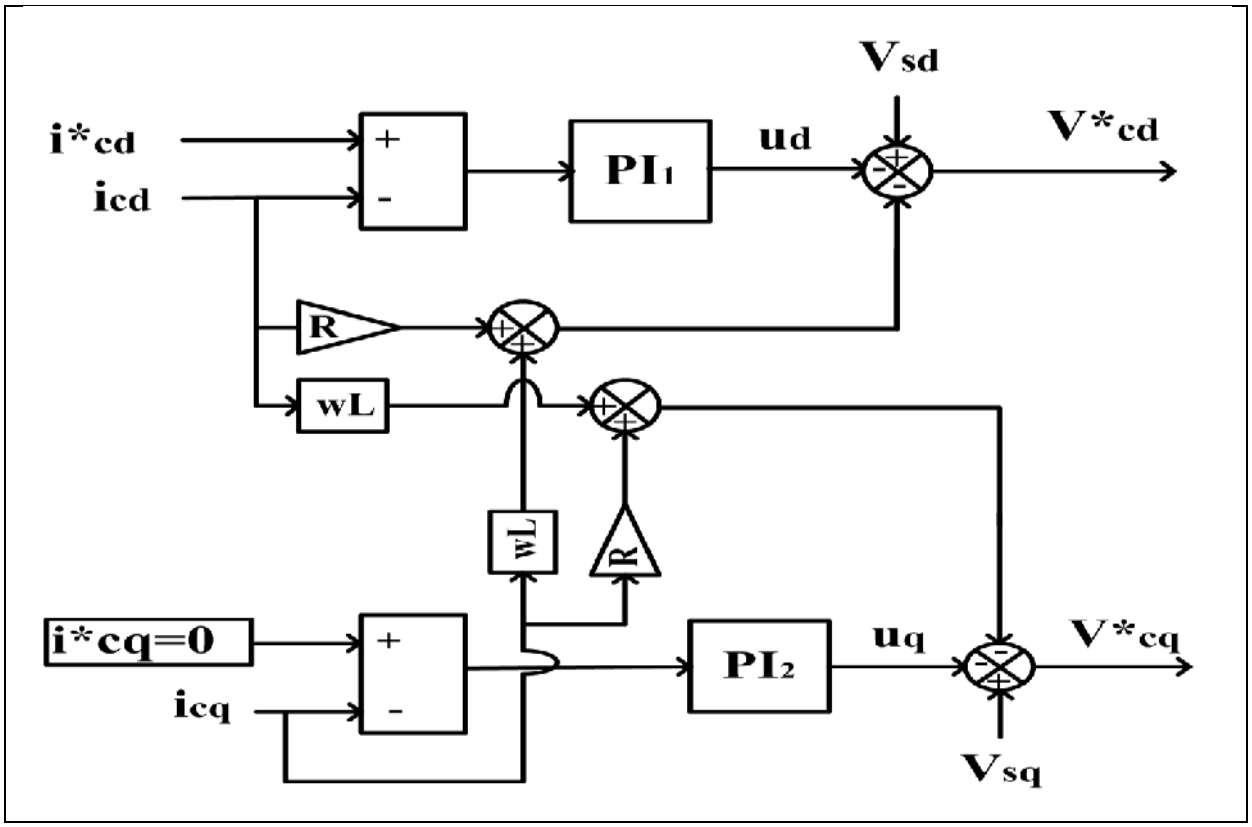


Figure 2.5 : *La régulation du courant de système à deux niveaux*

2.3.4 contrôle de tension à CC

La régulation de la tension à CC permet de maintenir la tension continue *Vdc* constante, de la réguler selon sa référence *Vdc-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 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 :

$$Pac=Pdc \tag{2.26}$$

On peut écrire les puissances dans le repère dq :

$$Pdc = Vdc.Idc + Cdc\frac{Vdc}{dt}Vdc \tag{2.27}$$

Et *:*
$$Pac = \frac{3}{2}[Vdc.Idc + Vqc.Iqc] \tag{2.28}$$

Sachant que :

$$V^*cd = Vsd - L\omega\, Icd + C(s)(I^*cd - Icd) \tag{2.29}$$

A partir des équations (2.27) et (2.28) nous trouvons :

$$\frac{Vdc}{dt} = \frac{3}{2}\frac{Vdc.Icd+Vcq.Icq}{Cdc} - \frac{Idc}{Cdc} \tag{2.30}$$

$$\frac{Vdc}{Cdc} = \frac{Idc}{Cdc} - \frac{3}{2}\left[\frac{Kp.Icd+Kq.Icq}{Cdc}\right] \tag{2.31}$$

On peut schématiser le régulateur de la tension CC dans la figure suivante :

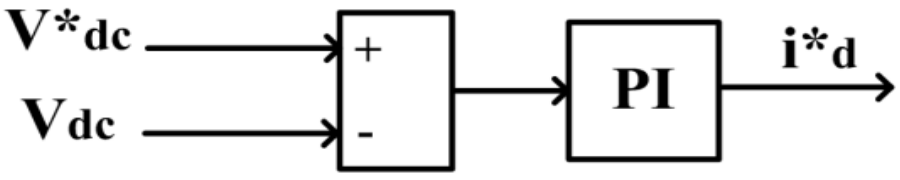


Figure 2.6 : *Régulateur de la tension CC*

2.3.5 Contrôle de convertisseur (VSC-HVDC)

Le convertisseur est contrôlé par la loi de commande dans le système comme le montre la figure (3.7).

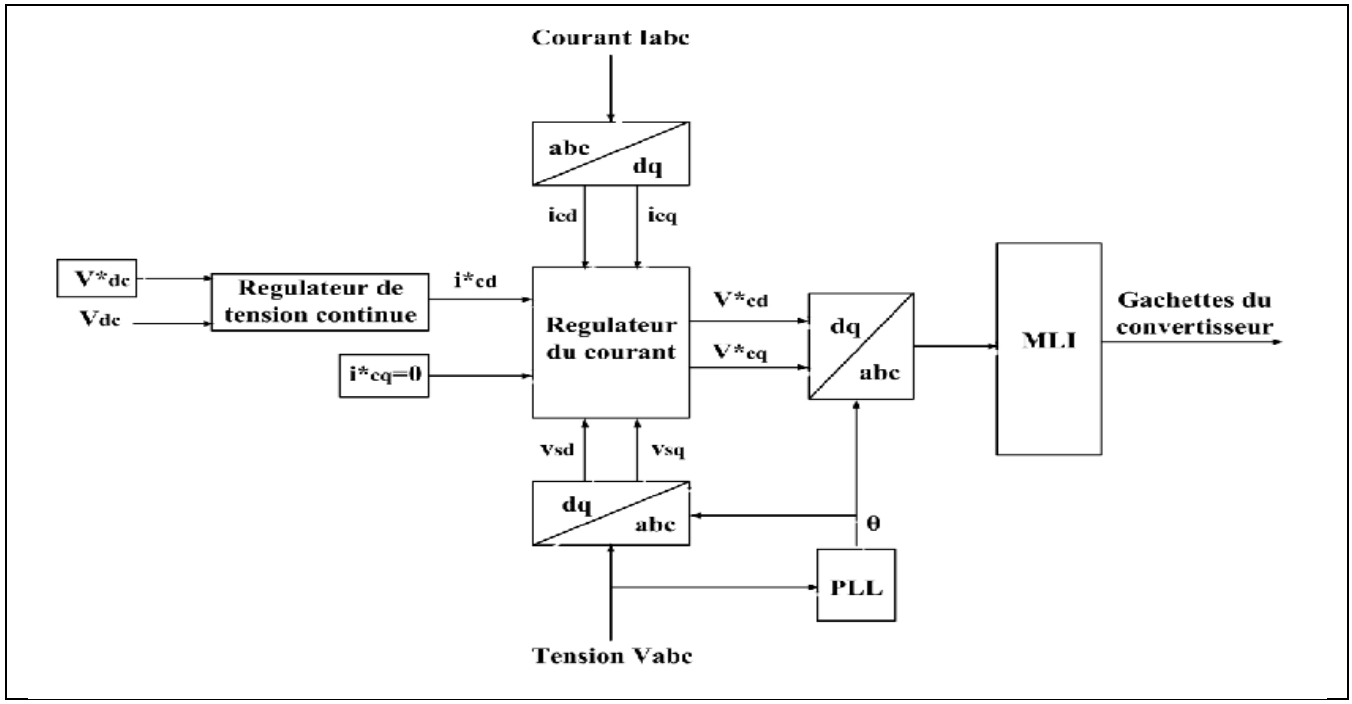


Figure 3.7 : *Structure de contrôle du convertisseur triphasé (VSC-HVDC)*

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une idée générale sur le système VSC - HVDC à deux niveaux, sa modélisation et son contrôle.

Ainsi, nous venons d'établir le modèle d'une source de puissance que l'on peut qualifier d'idéale. Ce modèle élémentaire est très utilisé dans la littérature du fait de sa simplicité.

De plus, il permet d'établir des premiers résultats lorsque l'on veut élaborer des lois de commande.

3.1 Introduction

Actuellement, le problème de la stabilisation des systèmes de transmission VSCHVDC a attiré l'attention de la communauté d''énergie et aussi d'automatique. La conception de contrôleurs PI classique considère habituellement une condition de fonctionnement unique du système.

Par conséquent, on peut considérer que les contrôleurs de type PI sont les plus simples pour les systèmes complexes non linéaires et dynamiques.

Pour les systèmes VSC-HVDC, les contrôleurs conventionnels PID sont conçus pour réduire l'impact des incertitudes paramétriques et perturbations sur les performances dynamiques du système. Les actions de commandes générées sont directement exprimées comme une fonction de l'erreur, ses dérivés ou intégrales. Les commandes conventionnelles proposées garantissent une performance acceptable de trajectoire quand les paramètres du régulateur PID sont choisis de manière appropriée. Après le choix convenable des gains de réglage afin d'obtenir une réponse adéquate, les commandes classiques sont vérifiées afin d'être efficaces en gérant la tension DC ainsi en contrôlent les puissances réactive indépendamment et d'une manière flexible [3].

3.2 Éléments de système HVDC

Les systèmes HVDC (figure 3.1) sont composés des liaisons entre plusieurs éléments (Sources de puissance (éolienne), transformateurs, filtre, 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, mais les composants ne sont pas tous affichés. Dans le côté du CC, on doit prendre en considération l'inductance qui réduit les harmoniques, généralement très petites, mais elle influe le taux de changement de courant, donc sur la dynamique à CC [1].

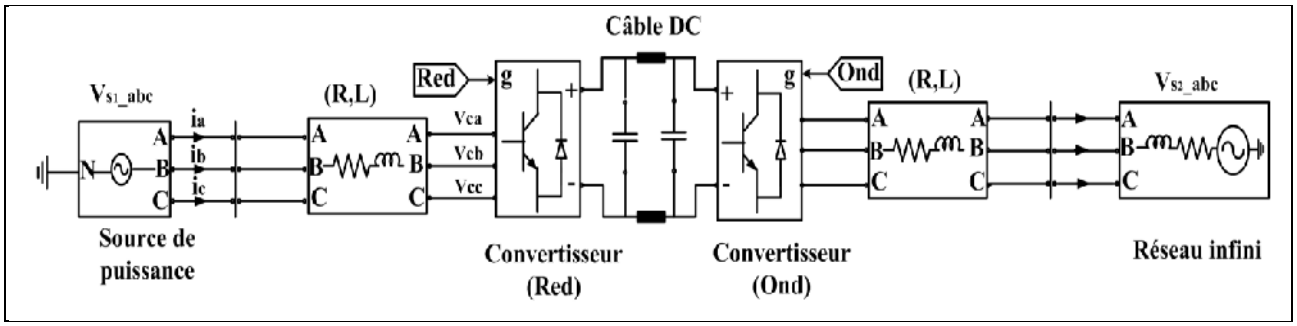


Figure 3.1: *Système VSC-HVDC à deux niveaux.*

3.2.1Transformateur

Le transformateur est un élément important dans un système CCHT. Les transformateurs sont des convertisseurs qui permis de modifier les valeurs de la tension et l'intensité, aussi présentent des pertes élevées, en raison des courants harmoniques ils sont soumis, à des niveaux élevés de vibration causés par la base en raison de petits composants du courant continu. Souvent, les transformateurs sont équipés d'un chargeur de prises pour augmenter la gamme de puissance réactive.

3.2.2 Réactances en phase

La réactance en phase constitue un l'élément très important dans la modélisation VSC-HVDC du côté CA du convertisseur. C'est un grand, élément inductif avec une faible résistance. Son but est de contrôler la puissance active et réactive. En outre, il empêche les signaux hauts fréquence de propager vers le transformateur. La taille de la réactance en phase détermine le comportement dynamique du côté CA du convertisseur.

3.2.3 Condensateurs CC

Les condensateurs à courant continu stabilisent la tension côté convertisseur à CC. Ils sont des éléments les plus importants dans le circuit à CC : Ils stockent l'énergie, pour le bon fonctionnement de VSC-HVDC. La tension continue est maintenue dans une fourchette étroite en cas de charge ou décharge des condensateurs. De même, leur taille détermine le comportement dynamique du circuit

CC. C'est pourquoi ils sont importants pour la modélisation dynamique des systèmes CCHT.

3.2.4 Convertisseurs d'électronique de puissance

La plupart des systèmes de génération d'énergie exigent l'utilisation de l'électronique de puissance pour la conversion et la commande d'énergie électrique. En outre, les circuits d'électroniques de puissance peuvent fournir des services supplémentaires pour la stabilité et la qualité de l'énergie du réseau. Ainsi, ces systèmes représentent une technologie clé de l'avenir, permettant de faire face aux défis des réseaux de distribution d'électricité.

3.3 Simulation de système VSC-HVDC à deux niveaux

Dans cette partie, on simule le système VSC-HVDC à deux niveaux (figure 3.1). En outre, la commande MLI sinusoïdale (figure 3.2) 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 75 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 Tirée de MATLAB (2009).*

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

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	200 kv
Fréquence	50 Hz
Fréquence MLI	900 Hz
Tension de source 1(entre phases)	120 kv
Tension de source 2(entre phases)	120 kv
Langueur de câble DC	75 Km

La commande MLI utilisée dans notre simulation est représentée sur la figure (3,2).

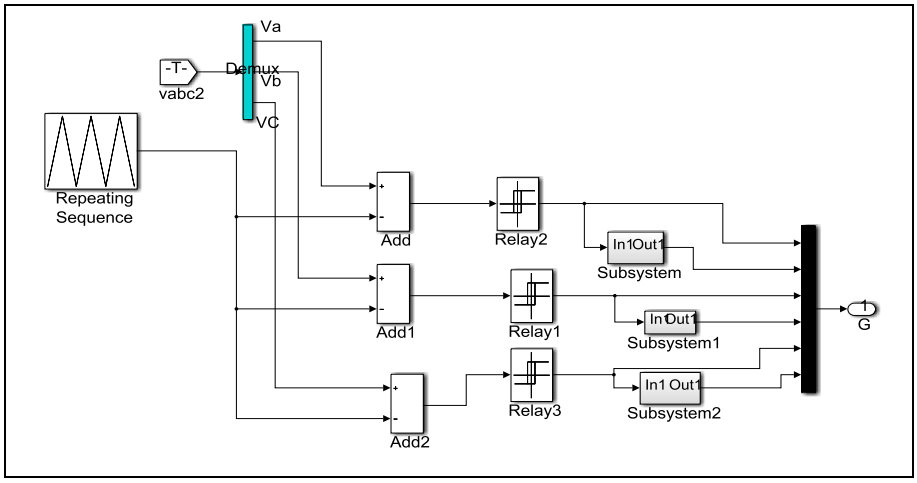


Figure 3.2 : *Commande MLI.*

Les résultats de simulations du courant et tension continue sont illustrée par les figures suivantes. Des contrôleurs PI sont utilisée, la tension et le courant sont bien régulés.

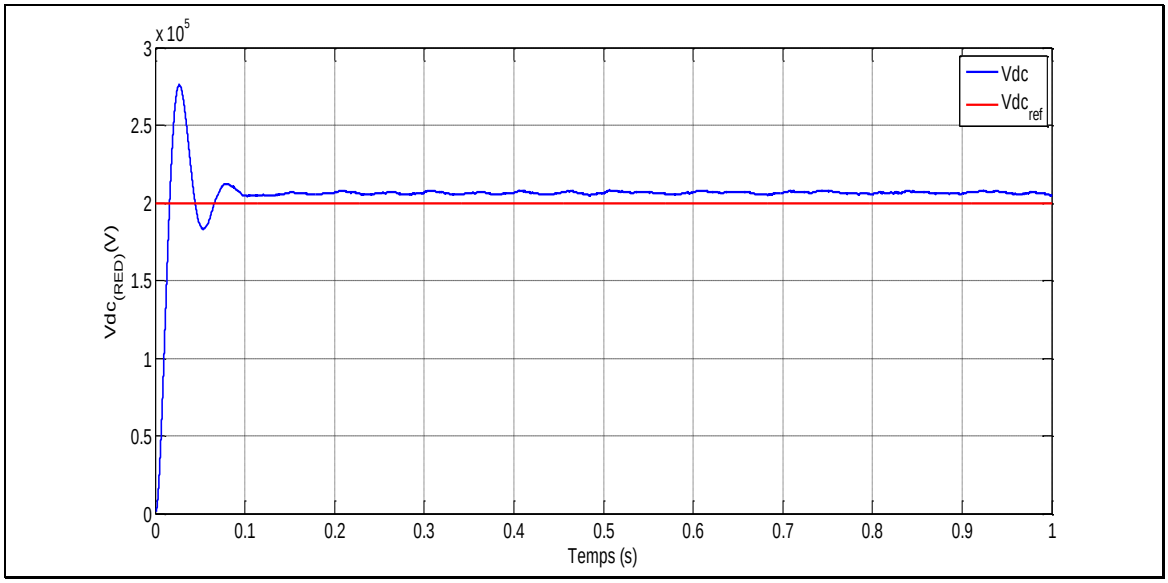


Figure 3.3 : *Forme d'onde de la tension Vdc1 (redresseur).*

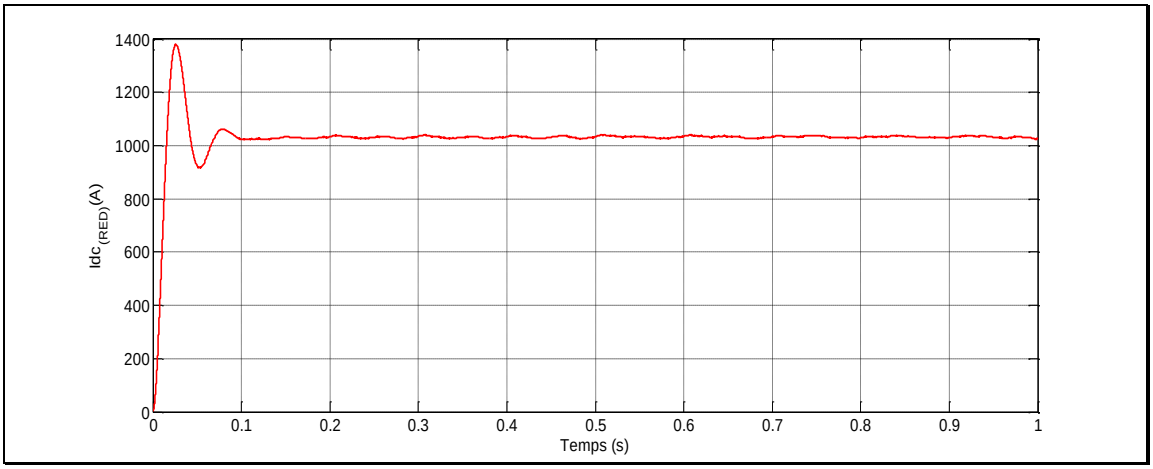


Figure 3.4 : *Forme d'onde du courant Idc1 (redresseur).*

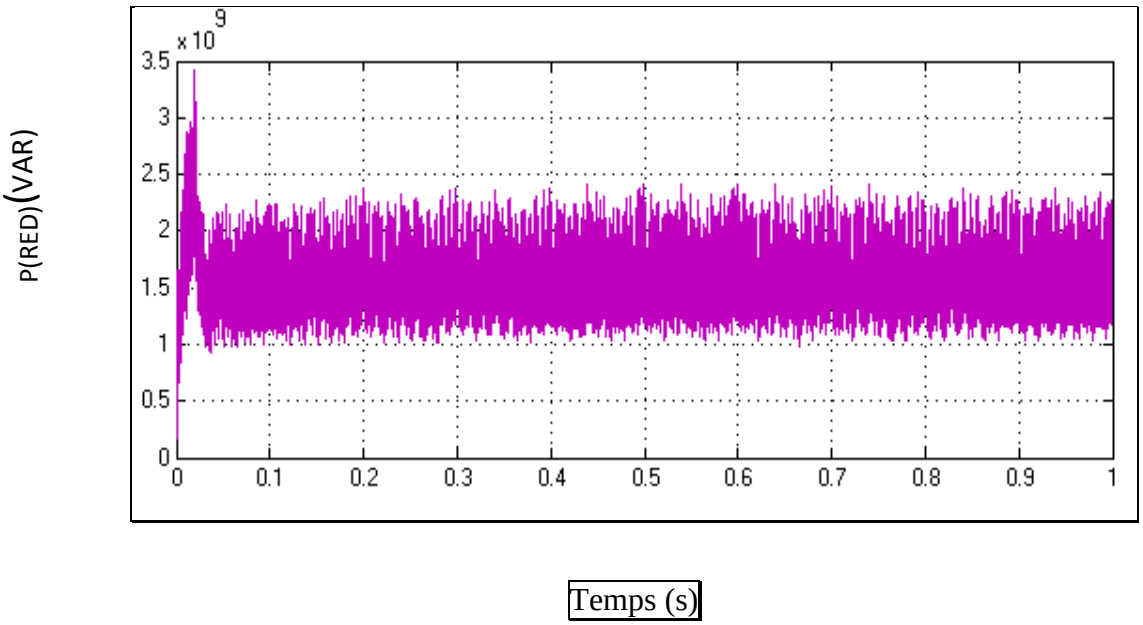


Figure 3.5 : *État d'écoulement de puissance active (P-RED) de VSC1-HVDC.*

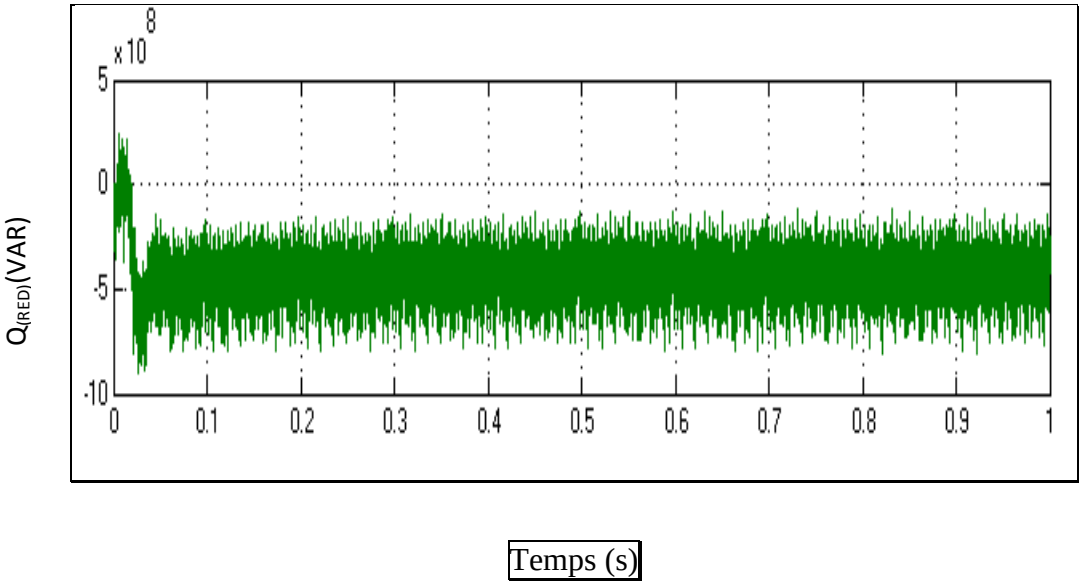


Figure 3.6 : *État d'écoulement de la puissance réactive (Q-RED) de VSC1-HVDC.*

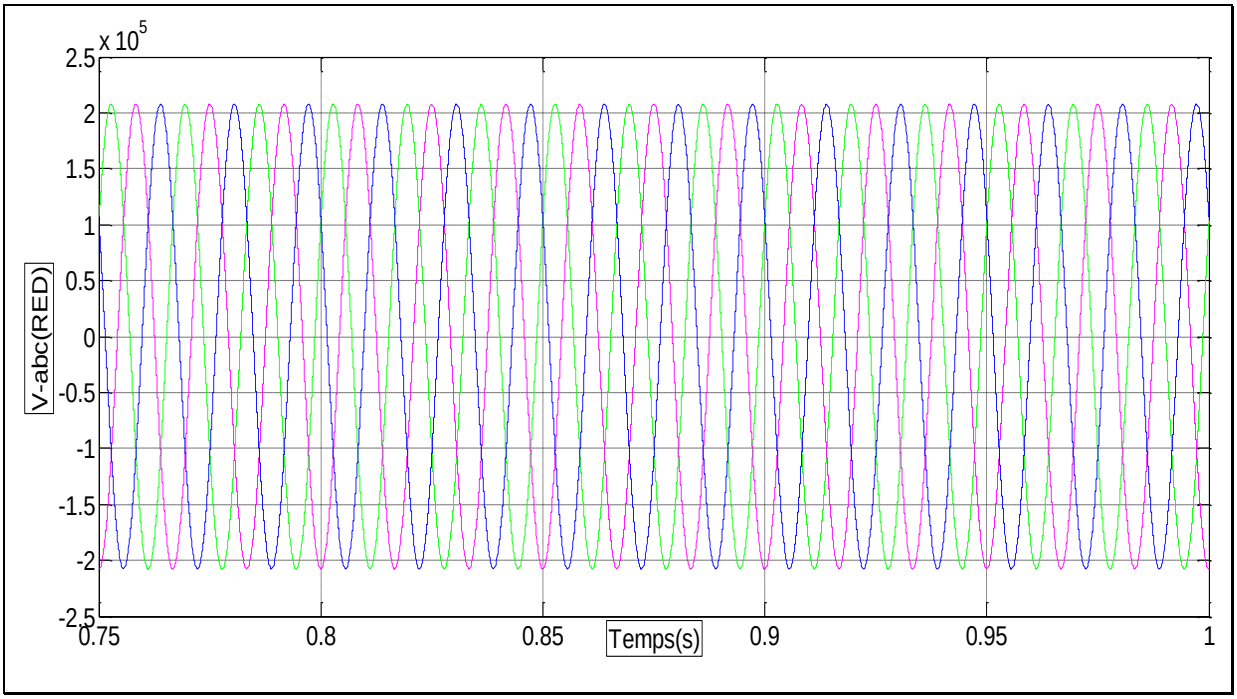


Figure 3.7 :*Tension Vabc de la source du côté redresseur.*

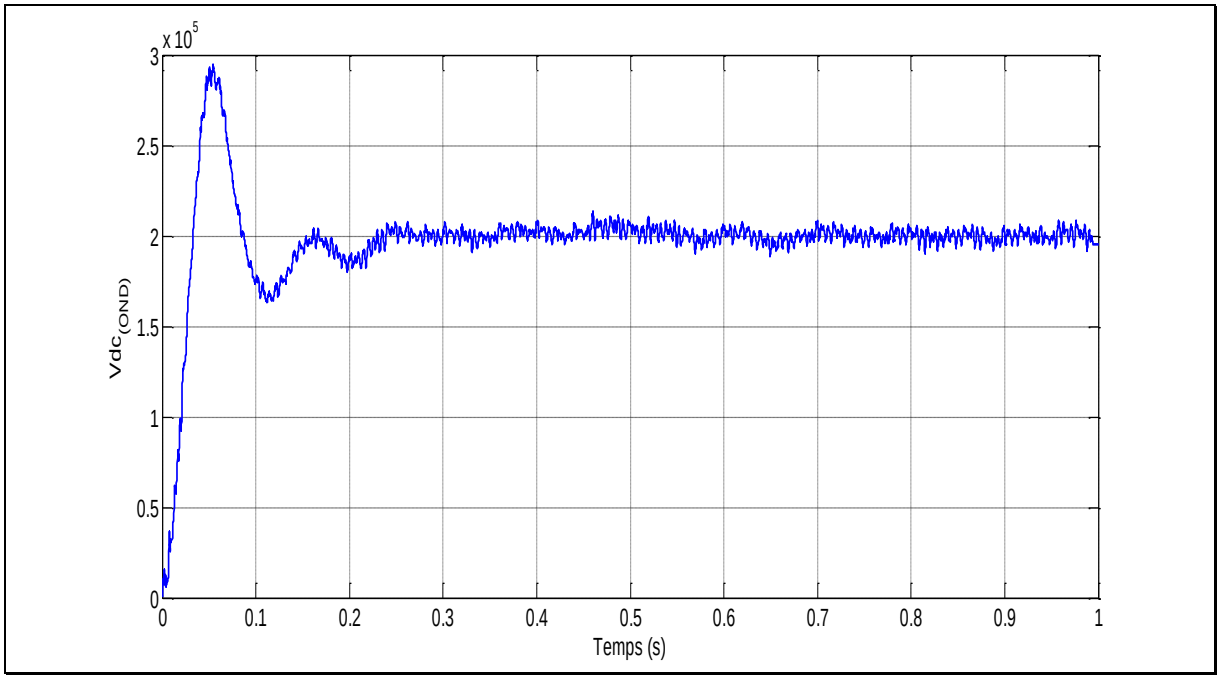


Figure 3.8 : *Forme d'onde de la tension Vdc2(onduleur*).

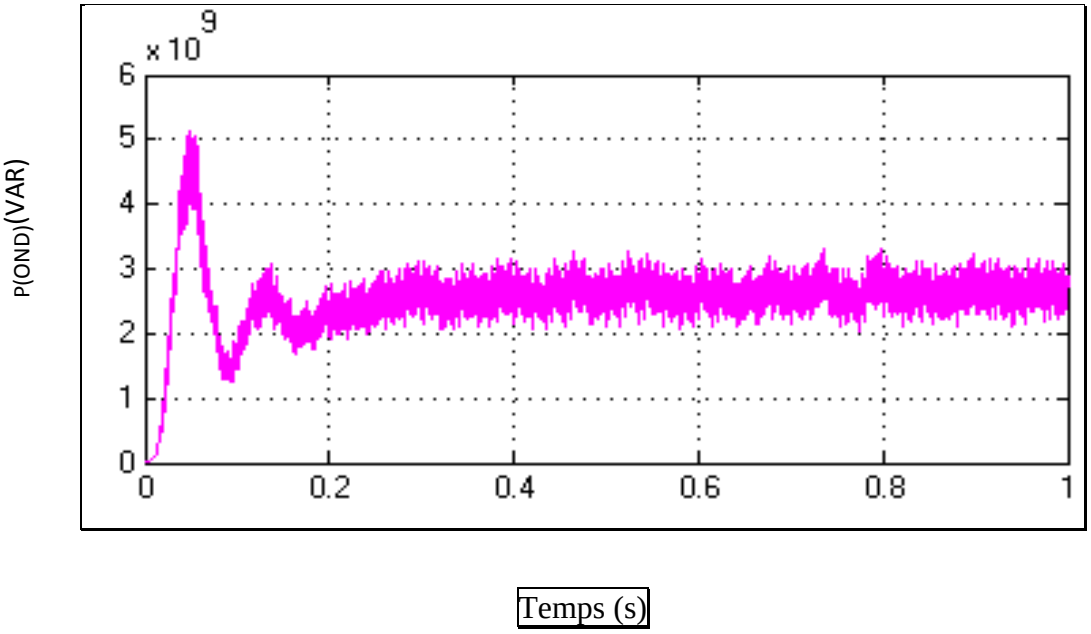


Figure 3.9 : *État d'écoulement de puissance active (P-ON) de VSC2-HVDC.*

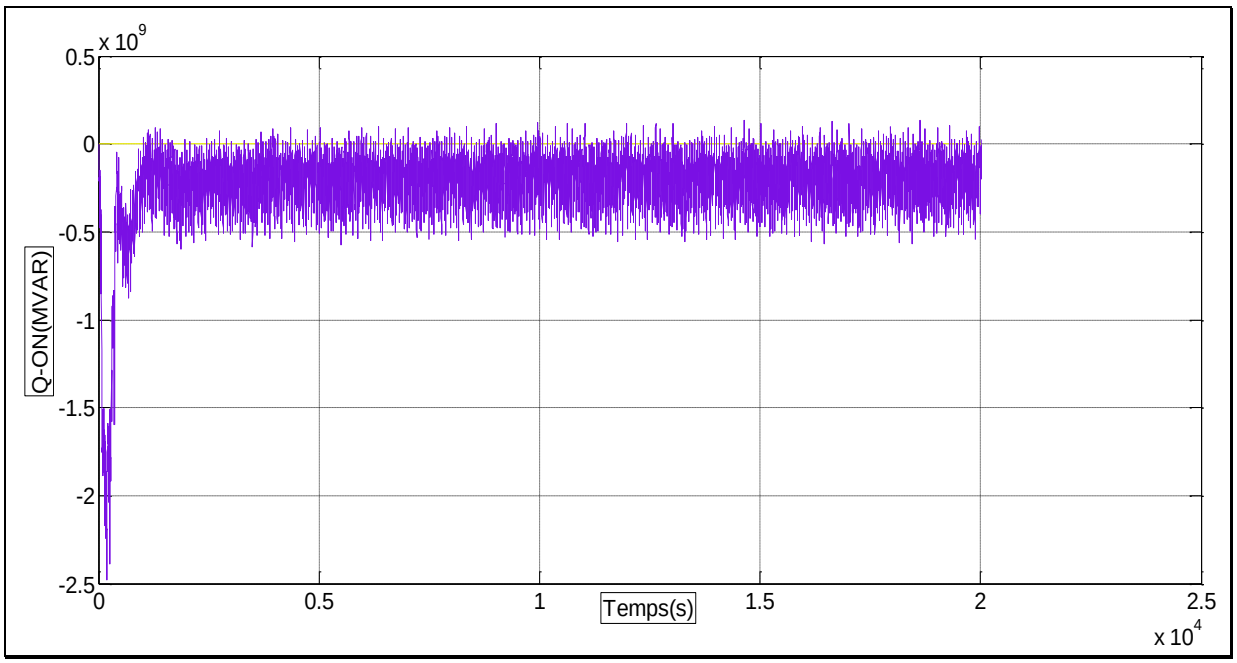


Figure 3.10 : *État d'écoulement de puissance réactive (Q-ON) de VSC2-HVDC.*

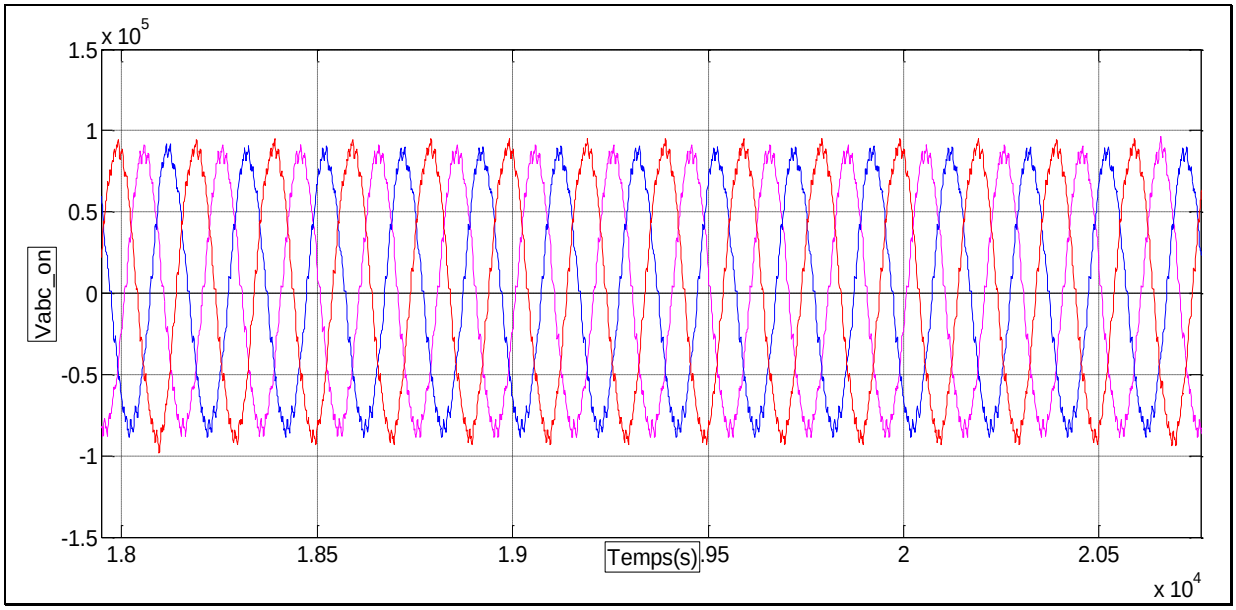


Figure 11 : *Tension Vabc du côté onduleur.*

Les résultats de simulations du courant et tension continue sont illustrée par les figures (3.3), (3.4) et (3.8) des contrôleurs PI sont utilisée, les tensions et les courants sont bien régulés. La tension continue cotée redresseur et onduleur arrivent à suivre la référence.

Les figures (3.5), (3.6), (3.9) et (3.10) présentent l'écoulement de puissance, ils résultent que les contrôleurs fonctionnent correctement et le système VSC-HVDC deux niveaux à des réponses stable et raisonnables.

3.4 Conclusion

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

L'évolution rapide de l'électronique de puissance permet de développer le secteur de l'énergie électrique.

Les résultats de simulation vérifient la possibilité de l'utilisation de la commande classique PI, qui est relativement simples à mettre en œuvre, pour asservir la tension au niveau du convertisseur afin de garantir une amélioration acceptable des performances dynamiques du système.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La réduction des pertes de puissance, celle des coûts des lignes de transmission, l'augmentation de la stabilité des systèmes, un meilleur contrôle de la puissance active et le développement permanent des semi-conducteurs ont rendu les systèmes HVDC plus compétitifs que les systèmes AC.

L'apparition des convertisseurs VSC et leurs associations avec des commandes MLI ont apporté de précieux avantages vis-à-vis de : réduction des harmoniques, absorption et génération de la puissance réactive par les convertisseurs, temps de réponse plus court, ...

En effet, la présence de ces convertisseurs offre des degrés de liberté supplémentaires et autorise donc de nouveaux comportements.

Après avoir étudié la modélisation des systèmes VSC-HVDC, nous nous sommes intéressés à leurs commandes. Nous avons utilisé des régulateurs PI où les (k_p et k_i) sont calculés à l'aide de la méthode d'imposition des pôles. Dans le cadre d'une étude portant sur le transport d'énergie.

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.

Enfin pour les futurs travaux, on suggère :

- Utiliser la topologie de trois niveaux et la comparer avec celle de deux niveaux.
- Pour la commande utiliser des régulateurs flous.
- Alimenter le système VSC-HVDC par les parcs éoliens et solaires.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Seghir BENHALIMA, " La conception, la modélisation et la simulation du système VSC-HVDC offshore ",2012

[2] Laurent Teppoz, "Commande d'un système de conversion de type VSC-HVDC. Stabilité - Contrôle des perturbations",2007

[3] Haitham Saad MOHAMED RAMADAN, "Commande Non Linéaire et Stabilisation des systèmes de Transmission VSC-HVDC",2012

[4] Jean-Luc Thomas, Maialen Boyra, Gilbert Bergna, " Les technologies de liaisons à courant continu pour l'interconnexion des réseaux électriques du pourtour méditerranéen" Article extrait de REE 2011-5

[5] Fernando D., Bianchi, José Luis Domínguez, García, Oriol Gomis-Bellmunt "Control of multi-terminal HVDC networks towards wind power integration". Renewable and sustainable energy reviews 55, 1055-1068, 2016.

[6] Stefan Laurentiu CAPITANEANU, " Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux",2002

[7] Bresesti, P., W. L. Kling, R. L. Hendriks et R. Vailati. 2007. « HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System ». Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 22, no 1, p. 37-43.

[8] R.C. Dorf, editor. The Electrical Engineering Handbook, Second Edition. CRC Press in cooperation with IEEE Press, University of California, 1997.

[9] W.F. Long, J. Reeve, J.R. Mc Nichol, M.S. Holland, and al. Application Aspects of Multiterminal DC Power Transmission. IEEE Transactions Power Delivery, 5(4) :2084 – 2095, 1990

[10] P.C.S. Krishnayya, S. Lefebvre, and V.K. Sood. Simulator Study of Multiterminal HVDC System with Small Parallel Tap and Weak AC Systems. IEEE Transactions on Power Apparus and Systems, PAS - 103(10) :3125 – 3132, 1984.

[11] Flourentzou, N., V. G. Agelidis et G. D. Demetriades. 2009. « VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview ». Power Electronics, IEEE Transactions on,vol. 24, no 3, p. 592-602.

[12] TeixeiraPintoR, BauerP, RodriguesSF, Wiggelin khuizenEJ, PierikJ, FerreiraB. Noveldistributeddirect-voltagecontrolstrategyforgridintegrationofoff- shore wind energy systems through MTDC network. IEEE Trans Ind Electron 2013;60(6):2429–41.

[13] Aragüés-PeñalbaM, Egea-AlvarezA, ArellanoSG , Gomis-BellmuntO. Droop control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms.ElectrPowSystRes2014;112:48–55