REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master

en Génie Electrique

Spécialité : Réseaux Electriques

ECOULEMENT DE PUISSANCE AVEC HVDC

Présenté par : BENREKIA Mohamed Redha

REGHMIT Bachir

Proposé et Dirigé par : PR. SEBAA Karim

Année Universitaire **:** 2019/2020

Remercîment

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr SEBAA Karim pour son soutien et ses conseils.

Nous remercions le président de jury et les membres Du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de Juger ce travail.

Nous adressons également nos remerciements aux Personnels (enseignants et administrateurs) du Du département de Génie Electrique.

Résumé

Le transport d'énergie électrique sous haute tension a des nombreux problèmes d'ordre technique et économique. Le transport d'énergie électrique sous haute tension en courant continu (HVDC) peut donner des solutions pour plusieurs problèmes opérationnels.

Ce travail, présente l'étude de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson avec l'insertion un système VSC-HVDC au réseau électrique et voir son l'influence sur les paramètres de réseau électrique (phase et module de la tension, puissance active et réactive).

Mots clés : HVDC, l'écoulement de puissance, VSC-HVDC.

Abstract

The transmission of electrical energy under high voltage has many technical and economic problems. The transmission of electrical energy under high voltage direct current (HVDC) can provide solutions for several operational problems,

This work presents the study of the power flow by the Newton-Raphson method with the insertion of a VSC-HVDC system to the electrical network and see its influence on the parameters of the electrical network (phase and modulus of the voltage, active and reactive power).

Keywords: HVDC, power flow, VSC-HVDC.

ملخص

ينطوي نقل الطاقة الكهربائية تحت الجهد العالي على العديد من المشاكل الفنية والاقتصادية. يمكن أن يوفر نقل الطاقة الكهربائية عالي الجهد بتيار مباشر (HVDC) حلولًا للعديد من مشاكل التشغيل

يقدم هذا العمل دراسة تدفق الطاقة بطريقة Newton-Raphson مع إدخال نظام VSC-HVDC إلى الشبكة الكهربائية و معرفة تأثيره على معلمات الشبكة الكهربائية (المرحلة والمعامل من الجهد ، القوة النشطة والمتفاعلة).

الكلمات المفتاحية: HVDC , تدفق الطاقة, VSC-HVDC.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale……1

CHAPITRE I : ECOULEMENT DE PUISSANCE

I.1 Introduction ……..3

I.2 Généralités sur les réseaux électriques …….3
I.2.1 Définition ……3
I.2.2 Niveaux de tensions des réseaux ……4
I.2.3 Eléments du réseau électrique ……5
I.2.3.1 Modélisation des transformateurs ……...5

I.3 Ecoulement de puissance ……....5
I.3.1 Définition ……...….5
I.3.2 Analyse de l'écoulement de puissance ……...6
I.3.3 Equations de l'écoulement de puissance ……7
I.3.4 Equations de l'écoulement de puissance dans les lignes et les pertes ……8
I.3.5 Méthodes numériques de résolution d'écoulement de puissance ……...9
I.3.5.1 Méthode de Gauss Seidel ……....9
I.3.5.2 Méthode de Newton-Raphson ……...10
I.3.5.3 Méthode de Découplée Rapide ……..13

I.4 Conclusion ……16

CHAPITRE II : SYSTEMES DE TRANSMISSION HVDC

II.1 Introduction ……17

II.2 Historique ……...17

II.3 Comparaison entre HVAC et HVDC ……18

II.4 Avantage d'un système de transmission HVDC ……....20

II.5 Applications des systèmes HVDC ……20

II.6 Présentation des systèmes HVDC ……..21
II.7 Type des systèmes HVDC ……..22
II.7.1 Système HVDC dos-à-dos ……22
II.7.2 Système HVDC point-à-point ……....22
II.7.3 Système HVDC multi-terminal ……..23
II.8 Type des liaisons HVDC ……....23
II.8.1 Monopolaire ……...23
II.8.2 Bipolaire ……....24
II.8.3 Homopolaire ……24
II.9 Systèmes de conversion d'énergie ……25
II.9.1 Système CSC (Current source converter) ……25
II.9.2 Système VSC (Voltage Source Converter) ……..26
II.9.2.1 VSC à 2 niveaux ……...27
II.9.2.2 VSC à 3 niveaux ……...28
II.10 Les convertisseurs modulaires multi-niveaux (MMC) ……...29
I.10.1 Topologie du MMC ……..30
II.11 Théorie du convertisseur et les équations de performance ……32
II.11.1 Analyse en supposant une inductance de source négligeable ……34
II.11.1.1 Sans retard d'allumage ……..34
II.11.1.2 Avec retard d'allumage ……....36
II.11.2 Analyse avec chevauchement de commutation ……...37
II.12 Conclusion ……...42

CHAPITRE III : CONTROLE ET MODELISATION D'UN SYSTEME HVDC

III.1 Introduction ……...43
III.2 Contrôle des systèmes HVDC ……..43
III.2.1 Moyens de contrôle de base ……44
III.2.2 Base de sélection des contrôles ……....44
III.2.3 Caractéristiques de contrôle ……44

III.2.3.1 Caractéristiques idéales ……...44

III.2.3.2 Caractéristiques réelles ……....45

III.2.3.3 Caractéristiques combinées du redresseur et d'onduleur …….46

III.2.4 Stabilisation d'un mode ……47

III.3 Modélisation des systèmes HVDC ……..48

III.3.1 Représentation de la solution du flux de puissance ……48

III.3.1.1 Interface AC / DC sur le nœud HT ……...49

III.4 Conclusion ……...56

CHAPITRE IV : APPLICATION

IV.1 Introduction ……..57

IV.2 structure d'une liaison VSC-HVDC ……57

IV.3 avantages de technologie VSC-HVDC ……59

IV.4 Fonctionnement des convertisseurs VSC ……60

IV.5 Domaine d'application de I 'écoulement de puissance ……61

IV.6 Equations de l'écoulement de puissance …….....61

IV.7 Application …….....62

IV.7.1 Application (1) : Sans l'insertion d'un système HVDC ……64

IV.7.2 Application (2) : Avec l'insertion d'un système HVDC ……...65

IV.8 Commentaire sur les résultats ……..68

IV.9 Conclusion ……...69

Conclusion générale …….……70

Liste des figures

Figure I.1 : Les différents types de réseau électrique ……....4

Figure I.2 : Niveaux de répartition de tension normalisés ……4

Figure I.3 : Modèle de transformateur de puissance …….5

Figure I.4 : Réseau à trois nœuds ……..6

Figure II.1 : L'évolution de la puissance transmise en HVDC selon la commission IEEE transport et distribution …….18

Figure II.2 : Comparaison des coûts de lignes aériennes AC et DC en incluant les pertes. (1) coût de station, (2) coût de ligne, (3) coût des pertes ……..19

Figure II.3 : HVDC dos-à-dos …….22

Figure II.4 : HVDC point à point ……22

Figure II.5 : HVDC multi-terminal …….23

Figure II.6 : Liaison monopolaire asymétrique avec retour métallique ……..23

Figure II.7 : Liaison monopolaire symétrique ……24

Figure II.8: Liaison bipolaire ……..24

Figure II.9 : Liaison homopolaire ……...24

Figure II.10 : Installation type d'une liaison HVDC-CSC ……..25

Figure II.11 : Système CSC. La puissance active est transférée du réseau 1 vers le réseau 2 et vice versa. L'inversion de puissance est réalisée par inversion de polarité du conducteur ……26

Figure II.12 : Installation type d'une liaison HVDC-VSC …….27

Figure II.14 : Topologie de convertisseur en source de tension à 2 niveaux …….28

Figure II.15 : Forme d'onde de la tension du VSC à 2 niveaux …….28

Figure II.16 : Topologie de convertisseur en source de tension à 3 niveaux ……..29

Figure II.17 : Forme d'onde de la tension du VSC à 3 niveaux ……..…29

Figure II.18 : a) Topologie du MMC, b) convertisseur en demi-pont du ième SM ……31

Figure II.19 : Forme d'onde de la tension du MMC-9 niveaux ……..32

Figure II.20 : Circuit de pont triphasé plein onde ……...32

Figure II.21 : Convertisseur de pont triphasé plein onde ……...33

Figure II.22 : Formes d'onde des tensions et des courants du convertisseur de pont triphasé pleine onde …….34

Figure II.23 : commutation des valves sans retard d'allumage et sans chevauchement ..36

Figure II.24 : Formes d'onde de tension et courants de valve, avec retard d'allumage ..37

Figure II.25 : L'effet de l'angle de chevauchement sur les périodes de conduction des valves ……...38

Figure II.26 : Périodes de conduction de la valve avec retard d'allumage …….38

Figure II.27 : Circuit équivalent pendant la commutation ……..39

Figure II.28 : Courants de valve pendant la commutation par rapport à la tension ……41

Figure II.29 : Formes d'onde de tension montrant l'effet du chevauchement pendant la commutation de la valve 1 à 3 ……..42

Figure III.1 : Liaison de transmission HVDC ……43

Figure III.2 : Caractéristiques (V- I) à l'état d'équilibre idéal ……45

Figure III.3 : Caractéristiques réelles de contrôle d'un convertisseur en régime permanent …….46

Figure III.4 : Fonctionnement de deux convertisseurs ont des caractéristiques combinées d'onduleur et du convertisseur 47

Figure III.6 : Modification de la caractéristique (V-I) pour la stabilisation d'un mode ..48

Figure III.7 : bus HT du transformateur d'un convertisseur …….….50

Figure III.8 : Etude le flux de puissance avec le Mode de contrôle 1 ……...…52

Figure III.9 : Etude le flux de puissance avec le Mode de contrôle 2 ……...53

Figure III.10 : Etude le flux de puissance avec le Mode de contrôle 3 …….54

Figure IV.1 : Les composants d'une liaison VSC-HVDC …….57

Figure IV.2 : Circuit équivalent d'un convertisseur VSC connecté à un système AC ..60

Figure IV.3 : Circuit équivalent d'un lien de transmission VSC-HVDC ……..62

Figure IV.4 : Schéma du réseau électrique de test à 15 nœuds …….63

Figure IV.5 : Schéma du réseau électrique de test à 15 nœuds avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) ……66

Liste des tableaux

Tableau (IV.1) : Résultat des tensions et des angles en appliquant l'écoulement de puissance sans l'insertion d'un système HVDC sur le réseau de 15 nœuds …….64

Tableau (IV.2) : Résultat des puissances actives et réactives des générateurs en appliquant l'écoulement de puissance sans l'insertion d'un système HVDC sur le réseau de 15 nœuds ……..64

Tableau (IV.3) : Résultat des puissances actives et réactives entre quelques nœuds en appliquant l'écoulement de puissance sans l'insertion d'un système HVDC sur le réseau de 15 nœuds ……..65

Tableau (IV.4) : Résultat des tensions et des angles en appliquant l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) sur le réseau de 15 nœuds …….67

Tableau (IV.5) : Résultat des puissances actives et réactives des générateurs en appliquant l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) sur le réseau de 15 nœuds …….67

Tableau (IV.6) : Résultat des puissances actives et réactives entre quelques nœuds en appliquant l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) sur le réseau de 15 nœuds ……68

Tableau (IV.7) : Résultat des angles, des tensions et des puissances de redresseur et onduleur en appliquant l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) sur le réseau de 15 nœuds …….68

Liste des abréviations

HVDC	Haute tension à courant continue (Hight Voltage Direct Courant)
HVAC	Haute tension à courant alternatif (Hight Voltage Alternating Courant)
VSC	Voltage Source Converter
CSC	Current source converter
LCC	Line Commutated Converter
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
AC	Alternating Courant
DC	Direct Courant
NPC	Neutral Point Clamped
MMC	Modular Multilevel Converter
CC	Constant Courant
CIA	Constant Ignition Angle
CEA	Constant Extinction Angle
PST	Power System Toolbox

Liste des symboles

E_{ac}	Tension ligne à ligne RMS sur nœud HT
V_{basedc}	Tension de base HVDC
T	Rapport de transformation
B	Numéro de ponts en série
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
X_c	Réactance commutée par pont / phase
V_d	Tension par pôle
I_d	Courant continu par pôle
I_{ord}	Courant de variation
γ	Angle de la phase de l'onduleur
α	Angle de la phase du redresseur

INTRODUCRTION GENERALE

Introduction générale

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.

Le transport et la distribution d'énergie électrique sont réalisés depuis le XIXème siècle sous forme de courant alternatif (AC) principalement en raison de la simplicité de la mise en place de systèmes de production d'électricité en AC et la possibilité d'ajuster le niveau de tension de manière relativement aisée par l'utilisation de transformateurs. Ainsi, les réseaux HVAC se sont développés en même temps que les grandes centrales de production et occupent aujourd'hui une place importante dans le transport d'énergie.

En parallèle, les besoins en énergie électrique se sont accrus et les sources, distribuées d'énergie renouvelable prennent une part croissante des ressources, ce qui implique la nécessité de multiplier, renforcer et interconnecter les réseaux électriques. Ceci requiert généralement la construction de longues lignes aériennes ainsi que des liaisons souterraines ou sous-marines, et/ou de relier des réseaux frontaliers asynchrones. Dans ce domaine, les systèmes HVAC montrent des limitations liées aux pertes par courant capacitif et en conséquence sont inenvisageables pour le transport d'énergie sur de très longues distances. Le transport HVDC s'impose alors comme étant la seule solution possible répondant aux diverses problématiques rencontrées en AC. Par ailleurs, les progrès entrepris dans le domaine de l'électronique de puissance permettent d'envisager aujourd'hui le transport HVDC de très forte puissance. **[1]**

Le calcul d'écoulement de puissance est une étude en régime permanent du réseau électrique qui consiste à déterminer en premier lieu, à chaque nœud, l'amplitude et la phase de la tension ainsi que les puissances active et réactive injectées. Connaissant les tensions (amplitude et phase) aux jeux de barres ainsi que les puissances injectées (active et réactive), nous pouvons calculer, en deuxième lieu, les courants et les puissances dans les lignes et ceux fournis par les sources. **[2]**

Dans notre travaille, nous allons intéresser à l'influence du système de transmission HVDC sur l'écoulement de puissance en utilisant la méthode de Newton-Raphson pour contrôler les puissances obtenus.

Pour atteindre notre objectif de recherche, cette mémoire est repartie en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons présenter l'objectif de l'analyse de l'écoulement de puissance et les méthodes de résolution les plus importantes.

Dans le deuxième chapitre nous allons présenter la structure d'un système HVDC, ses avantages les équations de performance de ce système.

Dans le troisième chapitre nous allons discuter le contrôle et la modélisation des systèmes HVDC.

Et dans le dernier chapitre nous allons faire la simulation d'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC.

CHAPITRE I

ECOULEMENT DE PUISSANCE

I.1 Introduction

Le calcul de l'écoulement de puissance est l'outil de base pour déterminer l'état du réseau en régime statique. Le problème est de déterminer l'angle et l'amplitude de la tension dans chaque nœud du réseau pour, ensuite, déduire l'écoulement de puissance sur les lignes en fonction des différentes puissances consommées par les clients ou injectées par les générateurs.

Les équations du calcul de l'écoulement de puissance sont non-linéaires de sorte qu'il est nécessaire d'utiliser des méthodes itératives pour résoudre numériquement ces équations et trouver les différents paramètres comme :

- Le courant dans chaque branche.
- La puissance transitée dans chaque branche.
- Les pertes totales de puissance active et réactive dans le réseau
- La tension de chaque jeu de bar.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les méthodes du calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau de distribution comme : la méthode de Gauss Seidel, la méthode Newton-Raphson, et la méthode découplé rapide.

I.2 Généralités sur les réseaux électriques

I.2.1 Définition

La production de l'énergie électrique à proximité des lieux d'utilisation n'est pas toujours possible, généralement, cette énergie est produite par des groupes de production sous une moyenne tension (15,5 kV ; 12,5 kV ; 11 kV ; 5,5 kV) dans des lieux de plus au moins distants des centres de consommation. Elle est ensuite transformée sous une haute tension (90kV ; 150kV ; 225kV…..) par des transformateurs élévateurs installés à la sortie des générateurs. **[3]**

La totalité de l'énergie produite ou le sur plus disponible est transporté par un ensemble de lignes électriques sous une haute tension sur plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres, jusqu'aux centres de consommation, elle est de nouveau transformée par des transformatrices abaisseur et distribuée sous une moyenne-tension (30V ; 10 kV….) pour la mettre à la disposition des usagers. Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution (Figure I.1).

La notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs. **[4]**

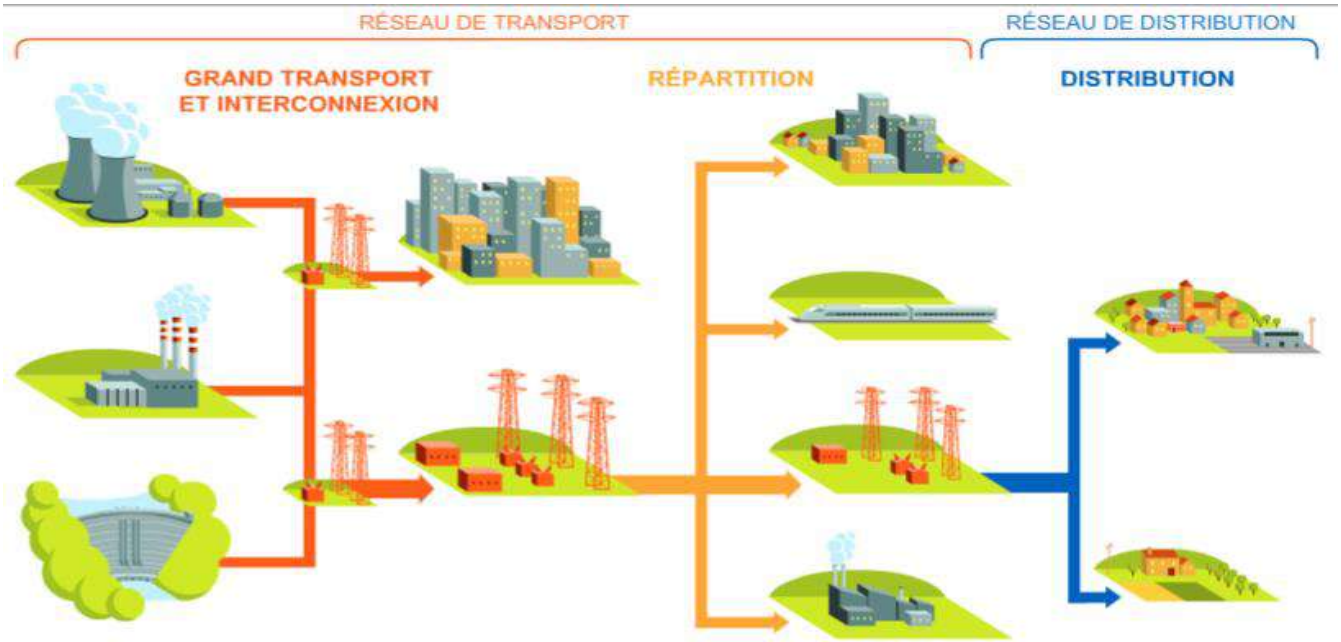


Figure I.1 : Les différents types de réseau électrique.

I.2.2 Niveaux de tensions des réseaux

La nouvelle norme de La Commission électrotechnique internationale CEI (ainsi que les textes législatifs en vigueur en Algérie depuis juin 2002) définissent les niveaux de tension alternative comme suit (Figure I .2) :

- HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV
- HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.
- BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV.
- BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V.
- TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V.

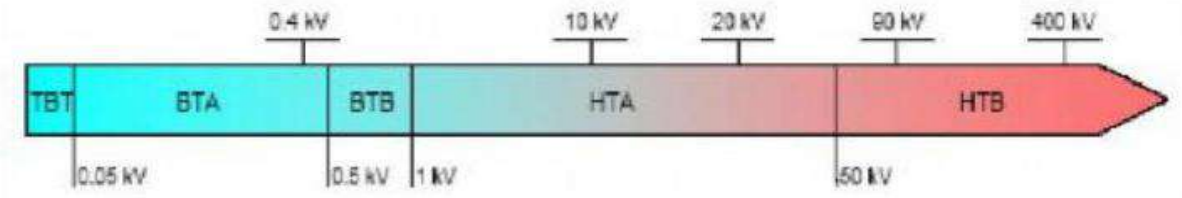


Figure I.2 : Niveaux de répartition de tension normalisés.

I.2.3 Eléments du réseau électrique

Les éléments du réseau électrique sont :

- Des générateurs.
- Des transformateurs.
- Des charges.
- Des lignes de transport.

I.2.3.1 Modélisation des transformateurs

Il existe deux types de transformateur à modéliser : le transformateur régulateur de tension à changeur de prises de charges et le transformateur déphaseur. Dans la modélisation des systèmes électriques, les rapports de déviations et les décalages de phase sont typiquement représentés comme des modifications à la matrice admittance. La Figure I.3 présente le schéma unifilaire équivalent d'un transformateur triphasé symétrique à changeur de prises de charge et déphaseur. **[7]**

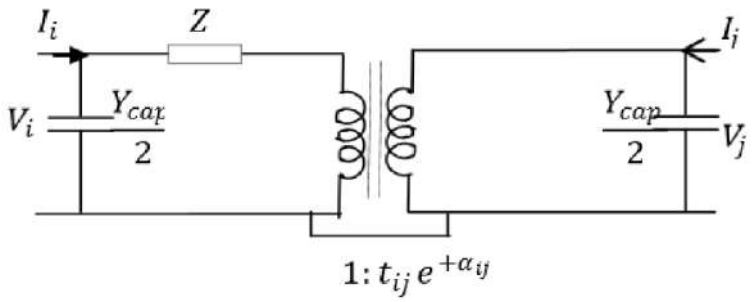


Figure I.3 : Modèle de transformateur de puissance.

I.3 Ecoulement de puissance

I.3.1 Définition

L'étude de l'écoulement de puissance consiste à rechercher un point de fonctionnement stable à un moment donné à travers une information complète du courant et de la puissance. En fait, il s'agit principalement de calculer les quatre paramètres suivants au niveau de chaque nœud de réseau : la Puissance active **P**, la Puissance réactive **Q**, la Tension **V**, et L'angle de phase **δ**. **[6]**

I.3.2 Analyse de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance est une étape primordiale de toute analyse sérieuse d'un réseau électrique. En effet, elle nous permet de calculer les grandeurs d'un réseau en régime permanent équilibré à savoir les modules et phases des tensions en tout point du réseau. A partir de ces dernières, on peut calculer les courants dans les lignes de transport, les puissances actives et réactives transitées et les pertes de puissances provoquées lors du transport d'énergie électrique. Cette analyse est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique.

Les équations de l'écoulement de puissance utilisant la formulation des admittances nodales pour un réseau à trois nœuds, sont d'abord développées, puis elles sont généralisées système nœuds.

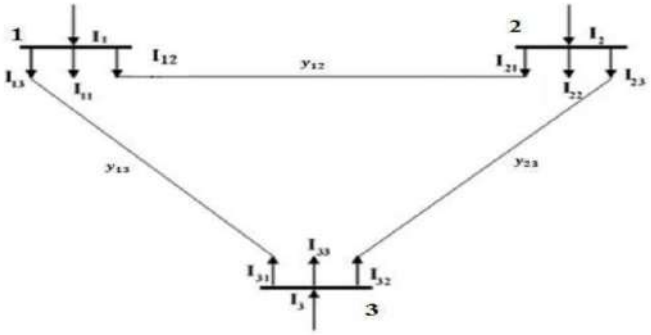


Figure I.4 : Réseau à trois nœuds.

$$I_1 = I_{11} + I_{12} + I_{13} \quad \textbf{(I.1)}$$

$$I_1 = V_1 y_{11} + (V_1 - V_2) y_{22} + (V_1 - V_3) y_{13} \quad \textbf{(I.2)}$$

$$I_{1=} V_1 (y_{11} + y_{12} + y_{13}) - V_2 y - V_3 y_{13} \quad \textbf{(I.3)}$$

En posant :

$$Y_{11} = y_{11} + y_{12} + y_{13} \quad \textbf{(I.4)}$$

$$Y_{12} = -y_{12} \quad \textbf{(I.5)}$$

$$Y_{13} = -y_{13} \quad \textbf{(I.6)}$$

On aura l'expression du courant ci-dessous :

$$I_1 = V_1 Y_{11} + V_2 Y_{12} + V_3 Y_{13} \quad \textbf{(I.7)}$$

De la même manière, on trouve les équations des courants nodaux pour les autres nœuds :

$$I_2 = V_1Y_{21} + V_2Y_{22} + V_3Y_{23} \quad \textbf{(I.8)}$$

Ces équations peuvent être écrites sous la forme matricielle :

$$I_3 = V_1Y_{31} + V_2Y_{32} + V_3Y_{33} \quad \textbf{(I.9)}$$

Le courant injecté au jeu de barres i peut se mettre sous la forme :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}Y_{12}Y_{13} \\ Y_{21}Y_{22}Y_{23} \\ Y_{31}Y_{32}Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.10)}$$

Le courant injecté au jeu de barres i peut se mettre sous la forme :

$$I_i = \sum_{m=1}^{3} Y_{im}.V_m \quad \textbf{(I.11)}$$

Cette dernière équation, qui traite un système à trois nœuds, peut être généralisée pour un système à n nœuds :

$$I_i = \sum_{m=1}^{n} Y_{im}.V_m \qquad i = 1,2,\ldots..,n \quad \textbf{(I.12)}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}\ Y_{12}\ldots Y_{1n} \\ Y_{21}\ Y_{22}\ldots Y_{2n} \\ \vdots\quad \vdots\quad \ddots\quad \vdots \\ Y_{n1}\ Y_{n1}\cdots Y_{3n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.13)}$$

I.3.3 Equations de l'écoulement de puissance

Le bilan de puissance électrique à un jeu de barres i d'un réseau électrique de n jeux de barres est égal à la différence entre la puissance générée SGi et la puissance demandée SDi au niveau du même jeu de barres.

$$\mathrm{S_i} = \mathrm{S_{Gi}} + \mathrm{S_{Di}} = (\mathrm{P_{Gi}} - \mathrm{P_{Di}}) + \dot{\mathrm{J}}(\mathrm{Q_{Gi}} - \mathrm{Q_{Di}}) \quad \textbf{(I.14)}$$

$$S_i^* = \mathrm{P_i} - \dot{\mathrm{J}}\mathrm{Q_i} = V_i^*.I_i \qquad i = 1,2\ldots..,n \quad \textbf{(I.15)}$$

Le courant Ii peut se mettre sous la forme suivant :

$$I_i = \sum_{m=1}^{n} |Y_{im}||V_m| \angle(\theta_{im} + \delta_m) \quad \textbf{(I.16)}$$

En remplaçant l'expression du courant, l'équation (I.15) peut d'écrire :

$$S_i^* = \mathrm{P_i} - \mathrm{jQ_i} = V_i^* \angle - \delta_i \sum_{m=1}^{n} |Y_{im}||V_m| \angle(\theta_{im} + \delta_m) \quad \textbf{(I.17)}$$

$$P_i = \sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \cos(\theta_{im} - \delta_m + \delta_m) \qquad i = 1,2, \ldots\ldots, n \quad \textbf{(I.18)}$$

$$Q_i = -\sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\theta_{im} - \delta_m + \delta_m) \qquad i = 1,2, \ldots\ldots, n \quad \textbf{(I.19)}$$

I.3.4 Equations de l'écoulement de puissance dans les lignes et les pertes

La détermination des valeurs des puissances réparties dans les lignes de transport est indispensable afin de localiser les lignes électriques surchargées et de calculer la valeur des pertes de puissance. Le courant circulant entre les deux jeux de barres i et k est considéré positif lorsqu'il est di ragé de i vers k et son expression est la suivante **[5]** :

$$I_{ik} = y_{ik}(V_i - V_k) + V_I y_P \quad \textbf{(I.20)}$$

y_{ik}: L'admittance de la ligne entre les deux jeux de barres i et k ;
$V_i y_p$: La contribution shunt du courant au jeu de barres i
y_p: L'admittance shunt au jeu de barres.
De la même manière, le courant qui circule du nœud k vers le nœud i donne par :

$$I_{ik} = y_{ik}(V_k - V_i) + V_k y_P \quad \textbf{(I.21)}$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* I_{ik} \quad \textbf{(I.22)}$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^*(V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* V_i y_p \quad \textbf{(I.23)}$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_k^*(V_k - V_i) y_{ik} + V_k^* V_k y_p \quad \textbf{(I.24)}$$

La valeur des pertes de puissance dans la ligne entre les deux jeux de barres i et k est la somme algébrique de répartition des puissances déterminées à partir les équations (I.23) et (I.24).

I.3.5 Méthodes numériques de résolution d'écoulement de puissance

Il existe plusieurs méthodes de calcul d'écoulement de puissance, mais nous ne citerons que les trois les plus importantes :

- Méthode de Gauss-Seidel (G-S);
- Méthode de Newton-Raphson (N-R);
- Méthode Découplée Rapide (FDLF).

I.3.5.1 Méthode de Gauss Seidel [8]

Cette méthode consiste à enlever séquentiellement chaque nœud et actualiser sa tension en fonction des valeurs disponibles de toutes les tensions des autres nœuds. Pour le cas de l'étude de l'écoulement de puissance, les solutions recherchées sont déduites de la résolution de l'équation nodale suivante :

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 \ldots . + Y_{in}V_n = \sum_{m=1}^{n} Y_{im}V_M \quad \textbf{(I.25)}$$

En général, on calcule le vecteur V qui satisfait le système non linéaire et qui est donné par :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{P_i - jQ_i}{\left(V_i^*\right)^k} + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq m}}^{n} Y_{im}V_M^*\right] \quad \textbf{(I.26)}$$

Pour les expressions des puissances actives et réactives, elles sont calculées à partir des deux expressions ci-après respectivement.

$$P_i^{(k+1)} = \Re\left[V_i^{*(k)}\left[V_i^{(k)}Y_{ii} - \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq m}}^{n} Y_{im}V_m^{(k)}\right]\right] \quad \textbf{(I.27)}$$

$$Q_i^{(k+1)} = \Im\left[V_i^{(k)}\left[V_i^{(k)}Y_{ii} - \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq m}}^{n} Y_{im}V_M^{(k)}\right]\right] \quad \textbf{(I.28)}$$

La convergence du système est atteinte lors que la condition suivante est satisfaite (10^{-3}) :

$$\max|V^{k+1} - V^K| \leq \varepsilon \quad \textbf{(I.29)}$$

Dans le cas pratique, la condition d'arrêt est choisie par rapport aux puissances actives et réactives.

$$\max|P^{k+1} - P^K| \leq \varepsilon \quad \textbf{(I.30)}$$

$$\max|Q^{k+1} - Q^k| \leq \varepsilon \quad \textbf{(I.31)}$$

I.3.5.2 Méthode de Newton-Raphson [8]

Cette méthode nécessite plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. Par conséquent, cette méthode permet de réduire fortement le temps d'exécution du calcul de l'écoulement de puissant surtout pour les grands réseaux. Par contre, elle nécessite une très grande mémoire de stockage.

Les expressions des puissances actives et réactives de chaque nœud i du réseau peuvent se mettre sous la forme ci-dessous :

$$\left.\begin{aligned} P_i &= \sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \\ Q_o &= -\sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \end{aligned}\right\} i = 1,2,\dots,n \quad \textbf{(I.32)}$$

Avec :
i = 1: Représente le nœud de référence
n : Nombre de nœuds
i : Numéro du nœud

Après développement de Pi et Qi en série de TAYLOR autour de la première approximation :

$$\left.\begin{aligned} P_i &= P_i^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \cdots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} + \cdots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} \\ Q_i &= Q_i^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \cdots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} + \cdots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} \end{aligned}\right\} \textbf{(I.33)}$$

A partir de relation de : $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta\Delta Q \end{bmatrix}$

Avec :
$$\left.\begin{aligned} \Delta P_i^{(0)} &= P_i - P_i^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - Q_i^{(0)} \end{aligned}\right) \quad \textbf{(I.34)}$$

Les deux systèmes d'équation (I.33) et (I.34) donnent :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \frac{\Delta P_2^{(0)}}{\Delta Q_2^{(0)}} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\Delta P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Delta P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \frac{\Delta \delta_n^{(0)}}{\Delta V_2^{(0)}} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.35)}$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathrm{P}^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = \left[J^{(0)}\right] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.36)}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} = \left[J^{(0)}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.37)}$$

On rappelle que :

$$\Delta \delta^k = \Delta \delta_i^{(k+1)} - \Delta \delta_i^k \quad \textbf{(I.38)}$$

$$\Delta |V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)} \quad \textbf{(I.39)}$$

L'adaptation d'équation (I.37) avec (I.39) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.40)}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \left[J^{(k)}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.41)}$$

En remplacent l'expression de l'équation (I.37) dans l'équation ci-dessus on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \mathrm{P} \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.42)}$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.43)}$$

Avec J_1, J_2, J_3 et J_4 : sont les sous-matrices de Jacobéenne :

Sous matrice J_1 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_i||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}),\ i \neq m \quad \textbf{(I.44)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_i||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}),\ i = m \quad \textbf{(I.45)}$$

Sous matrice J_2 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |Y_{im}||V_m|cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}),\ i \neq \quad \textbf{(I.46)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|Y_{im}||V_m|cos(\theta_{im}) + \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_i||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}),\ i = m \quad \textbf{(I.47)}$$

Sous matrice J_3:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_i||V_m|cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}),\ i \neq m \quad \textbf{(I.48)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_i||V_m|cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}),\ i = m \quad \textbf{(I.49)}$$

Sous matrice J_4 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|Y_{im}||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}),\ i \neq m \quad \textbf{(I.50)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = 2|Y_{im}||V_m|sin(\theta_{im}) + \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_i||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}),\ i = m \quad \textbf{(I.51)}$$

Les étapes de calcul sont :

1. A partir des données du système, on prend la matrice d'admittance bus Y bus.
2. On estime les valeurs initiales V(0) et ð(0) pour les nœuds de charge et ð(0) pour les nœuds de contrôle.
3. On calcule Pi, Qi qui nous donne AP, AQ.
4. Formation de la matrice Jacobéenne J.
5. On trouve l'inverse de Jacobéenne
6. On calcule :

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = |J|^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad \textbf{(I.52)}$$

On obtient :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^k + \Delta\delta_i^k \quad \textbf{(I.53)}$$

$$\left|V_i^{(k+1)}\right| = \left|V_i^k\right| + \left|\Delta V_i^k\right| \quad \textbf{(I.54)}$$

7. Le processus se répète jusqu'à ce que la tolérance suivante se vérifie

$$\max\left|\Delta P_i^k\right| \leq \varepsilon \quad \textbf{(I.55)}$$

$$\max\left|\Delta Q_i^k\right| \leq \varepsilon \quad \textbf{(I.56)}$$

On prend les résultats obtenus.

I.3.5.3 Méthode de Découplée Rapide [8]

En observant la valeur numérique des éléments du Jacobéenne utilisé dans plusieurs systèmes, on découvre que les éléments de J1et J4sont invariablement beaucoup plus grands que ceux de J2 et J3. Et, en se basant sur les découplés (P ð) et (Q V), on peut supposer que J2 et J3 à partir de cela, on peut avoir deux systèmes d'équations linéaires indépendantes pour chaque itération. On calcule les éléments du Jacobéenne J2 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |m|} = |V_i||Y_{im}|cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\theta_{im} \approx 90^\circ \quad \delta_i \approx \delta_m \quad \textbf{(I.57)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |m|} = |V_i||Y_{im}|cos(90^\circ) = 0$$

On calcule les éléments du Jacobine J3 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} = -|V_i||V_m||Y_{im}|cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\theta_{im} \approx 90^\circ \quad \delta_i \approx \delta_m \quad \textbf{(I.58)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} = -|V_i||V_m||Y_{im}|cos(90^{\circ}) = 0$$

Par conséquent, les sous matrices du JacobineJ2 etJ3 sontnules.et l'équation (I.45) s'écrit :

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}J_1 & 0\\ 0 & J_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta \mathrm{P}\\ \Delta|V|\end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \Delta P = J_1 \Delta\delta = \frac{\partial P}{\partial \delta}\,\Delta\delta \\ \Delta Q = J_4 \Delta|V| = \left|\frac{\partial P}{\partial |V|}\right|\,\Delta|V| \end{cases} \quad \textbf{(I.59)}$$

Il nous reste à calcule les éléments du jacobéen J_1 et J_4 :

Calcule du jacobéen J_1 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = \ ?$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_i||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i|^2|Y_{im}|sin(\theta_{im}) - Q_i$$

Avec :

$$Q_i = \sum_{m=1}^{n} |Y_{im}||V_i||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$B_{ii} = |Y_{ii}|\sin(\theta_{ii})\, B_{ii} \gg Q_i \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = -|V_i|^2 B_{ii} \quad \textbf{(I.60)}$$

$$|V_i|^2 \approx |V_i| => \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = |V_i|B_{ii}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = \ ?$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_i||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\delta_m - \delta_i \approx 0$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_i||V_m|sin(\theta_{im}) \quad \textbf{(I.61)}$$

$$B_{im} = |Y_{im}|sin(\theta_{im})$$

$$|V_m \approx 1|$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} = -|V_m|B_{im}$$

Calcule les éléments du jacobéen J_4 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{im}|sin(\theta_{im}) + \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_i||V_m|sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{im}|sin(\theta_{im}) + Q_i \quad \textbf{(I.62)}$$

$$B_{ii} = |Y_{ii}|sin(\theta_{ii}) \quad B_{ii} \gg Q_i \quad \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = -|V_i|^2 B_{ii}$$

$$\delta_m - \delta_i + \delta_{im} \approx 0 \quad \textbf{(I.63)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} = -|V_m|B_{im}$$

Les équations de changement de puissance individuel dans J_1 et J_4 sont :

$$\Delta P + \sum_{m=1}^{n} -|V| \cdot B_{im} \cdot \Delta\delta_i \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta P}{|V_i|} + \sum_{m=1}^{n} -B_{im} \cdot \Delta\delta_i$$

$$\Delta Q + \sum_{m=1}^{n} -|V| \cdot B_{im} \cdot \Delta|V_i| \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta Q}{|V_i|} + \sum_{m=1}^{n} -B_{im} \cdot |V_i|$$

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -[B]\,\Delta\delta \qquad \Rightarrow \quad \Delta\delta \; = -[B']^{-1}\frac{\Delta P}{|V_i|} \quad \textbf{(I. 64)}$$

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -[B]\;\Delta|V_i| \quad \Rightarrow \quad \Delta|V_i| \; = -[B'']^{-1}\frac{\Delta P}{|V_i|}$$

I.4 Conclusion

L’importance de l’étude de l'écoulement de puissance est capitale pour l’obtention de tous les paramètres du réseau électrique, pour chaque nœud tel que la puissance (active et réactive), et la tension (module et angle).

Dans ce chapitre, Nous avons présenté des généralités sur les réseaux électriques ainsi que l’objectif de l’analyse de l’écoulement de puissance et les méthodes de résolution de ce problème comme la méthode de Gauss Seidel, la méthode Newton-Raphson, et la méthode découplé rapide.

CHAPITRE II

SYSTEMES DE TRANSMISSION HVDC

II.1 Introduction

L'évolution future dans le monde risque cependant de modifier le besoin en puissance électrique et la durée d'utilisation d'une façon importante, c'est pourquoi, il convient de prévoir des transmissions hautes tension à courant continue pour éviter les surcharges des lignes électriques.

Le principe de fonctionnement peut être résumé comme suit : la puissance alternative fournie par une (ou plusieurs) source(s) d'énergie est dans un premier temps transformée en une puissance continue, ensuite, un convertisseur d'énergie AC/DC (redresseur) assure l'opération, après, la puissance continue transitée ensuite par l'intermédiaire d'un câble de transmission continue, un autre convertisseur d'énergie DC/AC (onduleur) transforme cette puissance continue en une puissance alternative, et finalement, la puissance de sortie est délivrée au réseau urbain.

Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur les systèmes de transmissions HVDC et les théories du convertisseur et les équations de performance de ces systèmes.

II.2 Historique

La première transmission en courant continu date de 1954, il s'agissait d'une liaison entre l'ile de Gotland, en mer Baltique, et la Suède de 20MW, 200A, 100kV. Bien qu'évidemment les composants utilisés étaient des valves à vapeur de mercure. Cette première réalisation a permis d'initialiser le contrôle et d'identifier les impacts sur les réseaux raccordés.la venue sur le marché. Au début des années 60 des thyristors a favorisé l'essor de cette technique.

Rapidement les valves de vapeur de mercure ont été abandonnées à leur profit. En 1970 on comptait plus d'une dizaine de transmission HVDC dans le monde .En 1997 il y avait plus de 50 systèmes HVDC à travers le monde et beaucoup d'autres en phase de conception ou de construction .Aujourd'hui, plus de centaine de liaisons ont été construites dans le monde.
La Figure II.1 montre la croissance des projets de transport d'énergie électrique en HVDC dans le monde selon la puissance maximale en fonction de l'année. **[9]**

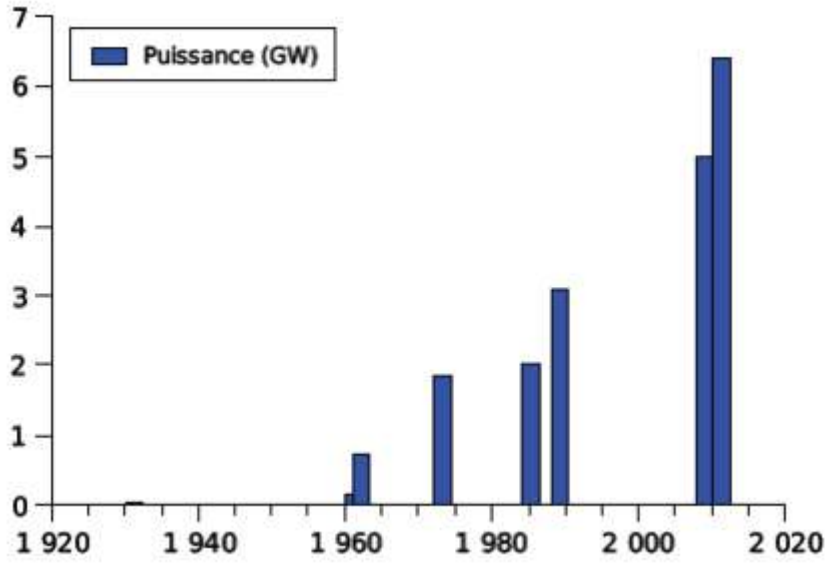


Figure II.1 : L'évolution de la puissance transmise en HVDC selon la commission IEEE transport et distribution. **[9]**

II.3 Comparaison entre HVAC et HVDC

Au début du XXème siècle, les réseaux électriques étaient plutôt régionaux et leur niveau d'interconnexion était loin du niveau atteint aujourd'hui. Cependant, la nature alternative du courant, qui a priori offre de nombreux avantages, peut devenir un désavantage pour la conduite des réseaux très maillés du fait que :

-Les flux de puissance ne peuvent être contrôlés facilement.

-La fréquence et la phase des générateurs connectés aux réseaux AC doivent être surveillées et coordonnées régulièrement afin de garantir un fonctionnement stable de l'ensemble.
- Des dispositifs de compensation de l'énergie réactive doivent être installés afin de contrôler les profils de tension et les pertes. **[10]**

Grâce aux nombreux progrès réalisés au cours des dernières décennies, le transport de l'énergie électrique en DC est devenu une réalité et peut donc se faire en haute tension soit en AC (HVAC) soit en DC (HVDC). Le choix entre l'une ou l'autre des solutions dépend de plusieurs facteurs :

Le premier point clé est bien entendu économique **[10]** , la décision de construire une transmission ou une connexion HVDC n'est prise qu'après d'assez lourdes études prenant en compte ,dans une pluralité de situation ,les besoins de transfert de puissance .La puissance moyenne étant e l'ordre du GW, très vite les questions relatives ou cout d'exploitation apparaissent et en particulier le coût de pertes. Il correspond sur la durée de vie de l'équipement a un manque à gagner pour l'exploitation, cela signifie que lors d'une soumission, ce coût des pertes vient s'ajouter au coût du matériel, des études, de la construction et de la mise en service. **[9]**

Le second point clé est en relation avec la disponibilité d'exploitation des transmissions ou connexion. Il est bien clair que la disponibilité est en relation avec la fiabilité et la maintenabilité des installations. La disponibilité demandée, dans le cahier des charges est globalement supérieure à 99%.La disponibilité pour le service est égale au quotient : heures de disponibilité pour le service /heures de la période considérée. La fiabilité des matériels, nécessaire pour réaliser ces objectifs de disponibilité, est obtenue au moyen de deux axes principaux:

-D'une part en mettant en œuvre les composant qui permettant les respecter une rigoureuse coordination des isolements face aux perturbations les plus sévère des réseaux.
-D'autre part avec la mise en œuvre de contrôle redondent. **[9]**

Généralement, les coûts d'investissement d'une ligne aérienne à courant continu DC sont supérieurs par rapport à une ligne AC, surtout à cause des stations de conversion. L'aérien est moins cher (une liaison aérienne à courant continu serait plus chère que l'aérien alternatif jusqu'à 500 km environ). La Figure II.2 montre la structure de coût des éléments de réseau en courant continu et en courant alternatif.

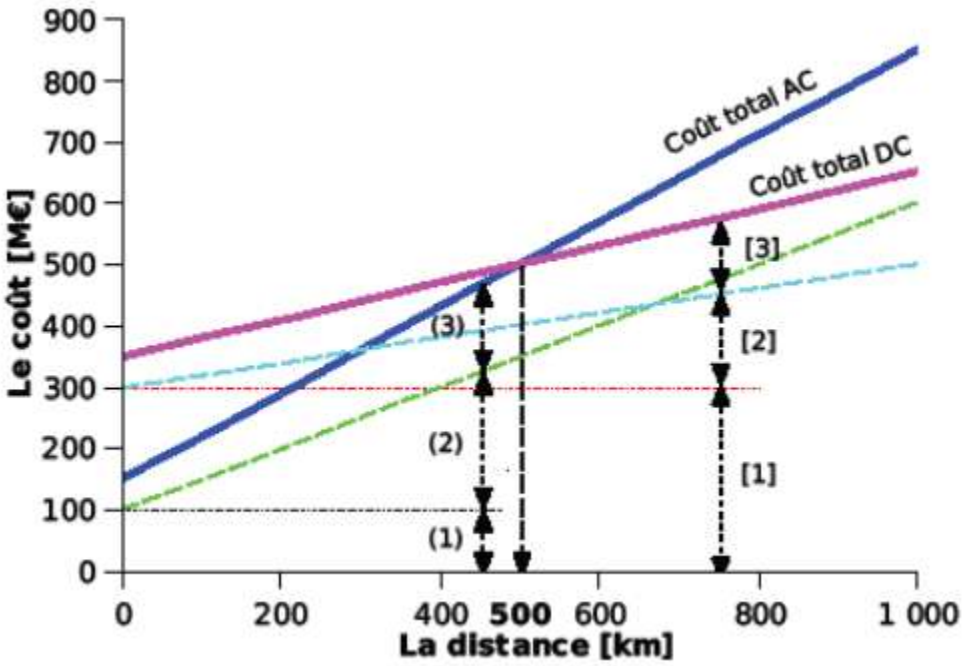


Figure II.2 : Comparaison des coûts de lignes aériennes AC et DC en incluant les pertes.
(1) coût de station, (2) coût de ligne, (3) coût des pertes. **[9]**

II.4 Avantage d'un système de transmission HVDC

La haute tension à courant continu est employée afin de réduire l'énergie perdue dans la résistance des fils. Pour une quantité de puissance donnée, une tension plus élevée avec une réduction du courant permet de réduire les pertes parce que la puissance est proportionnelle à la tension. Dans un certain nombre d'applications, le système HVDC est plus efficace que celui du AC, cette évaluation est basée sur les données suivantes :

1. Câble sous-marin, où la capacité élevée cause des pertes additionnelles à AC.

2. L'installation des capacités dans les situations où les fils sont additionnels est coûteuse.

3. Permettre le transport d'énergie entre les systèmes de distribution à AC non synchronisé (différentes fréquences).

4. Utilisation de la totalité de la section, (effet de peau) n'existant pas en courant continu; d'où la possibilité d'utiliser une intensité plus élevée pour une même section utilisée en courant alternatif.

5. Meilleure utilisation de l'isolation, le gradient de potentiel pouvant être plus élevé en courant continu qu'en courant alternatif. D'autre part, l'isolation est prévue pour la tension nominale et non pour la tension crête; d'où la possibilité de choisir une tension plus élevée pour une même ligne. L'intensité et la tension étant plus élevées, la puissance transportée par la même ligne (en AC) sera plus importante en courant continu.

6. La conduite de la puissance du régime continue peut se faire indépendamment de la puissance installée dans deux réseaux non liés.

7. Possibilité de supporter la puissance rapidement en cas de perturbations. **[11]**

8. Optimisation de conducteurs : Deux conducteurs pour le système bipolaire et un conducteur pour le système mono-polaire.

9. La liaison (HVDC) dans une interconnexion constitue une barrière contre la propagation du défaut en cascade, à travers un réseau en courant alternatif (la puissance réactive n'est pas transmissible en HVDC).

II.5 Applications des systèmes HVDC

Par le passé, pour une série de projets, la construction d'une liaison HVDC s'est avérée être la meilleure solution, voire la seule, pour répondre à un besoin de 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. 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 près de 12 millions d'habitants. **[11]**

– Impossibilité de production locale : Le choix de l'HVDC peut également être cause par la zone nécessitant un apport de puissance. La ville de Visby, sur l'ıle 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 avancé 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 sa grande demande en énergie. **[5]**

– Asynchronisme : En faisant fonctionner les deux extrémités d'une liaison à des fréquences différentes, il est possible de relier deux réseaux asynchrones. C'est par exemple le cas de la liaison de Garabit, qui lie l'Argentine et le Brésil. Les réseaux de ces deux pays ont respectivement des fréquences propres de 50 Hz et 60 Hz. **[12]**

– 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 du marché de l'électricité. Une interconnexion via liaisons HVDC permet un contrôle aise, 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 . 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. **[13]**

II.6 Présentation des systèmes HVDC

Un système de transmission à courant continu à haut tension (HVDC) (High Voltage Direct Current) 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 valves à vapeur de mercure. Récemment ils sont réalisés avec des thyristors ou avec des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT). **[14]**

II.7 Type des systèmes HVDC

Le choix de la configuration des systèmes HVDC dépend principalement du fonctionnement attendu et de la localisation des stations de conversion.

II.7.1 Système HVDC dos-à-dos

Dans ce type de système, deux stations de conversion sont localisées sur un même site et la chute de tension sur le lien est négligeable. Un lien dos-à-dos peut être utilisé pour interconnecter deux systèmes voisins asynchrones. La tension DC est moins élevée dans ce cas (50kV-150kV). **[15]**

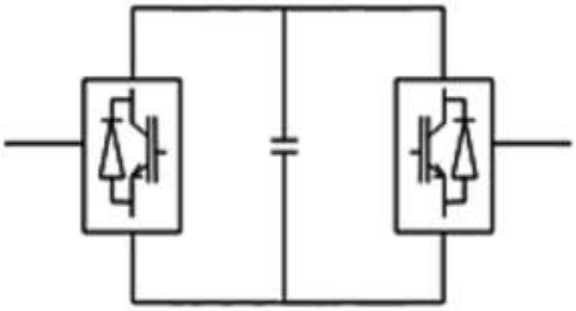


Figure II.3 : HVDC dos-à-dos.

II.7.2 Système HVDC point-à-point

La transmission HVDC point à point est utilisée pour lier des convertisseurs situés dans des zones géographiques éloignées. Par conséquent, la puissance DC est transportée à partir d'une station de conversion fonctionnant en tant que redresseur vers l'autre station fonctionnant en onduleur. C'est le type de système HVDC qu'on retrouve le plus.

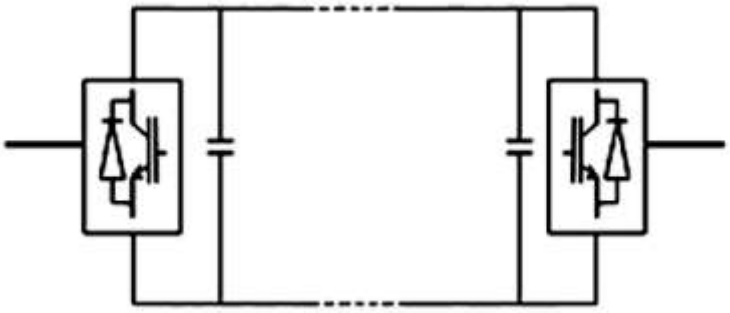


Figure II.4 : HVDC point à point.

II.7.3 Système HVDC multi-terminal

Quand trois ou plusieurs stations HVDC sont séparées géographiquement et interconnectées via des lignes ou des câbles alors le système HVDC est dit multi-terminal "MTDC". Si toutes les stations sont connectées à la même tension alors il s'agit d'un système multi-terminal parallèle. Si un ou plusieurs convertisseurs sont ajoutés en séries à l'un des pôles ou aux deux, alors le système est multi-terminal série. Une combinaison de connections de convertisseurs parallèle et séries est un système multi-terminal hybride.

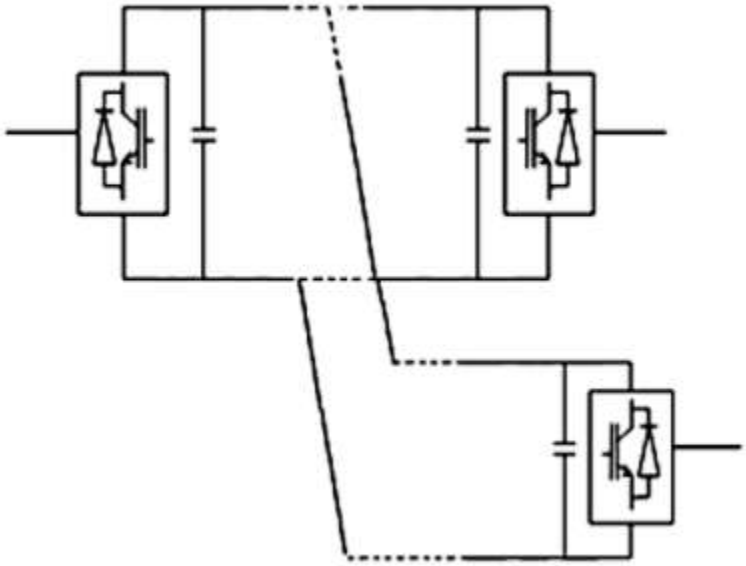


Figure II.5 : HVDC multi-terminal.

II.8 Type des liaisons HVDC

II.8.1 Monopolaire

Dans un lien HVDC monopolaire, une seule station de conversion se trouve de chaque côté du lien. On distingue deux types de liaisons HVDC monopolaires : les liaisons asymétriques et les liaisons symétriques.

-Liaison monopolaire asymétrique : les convertisseurs sont connectés entre un conducteur à haute tension et soit la terre ou un conducteur à moyenne tension.

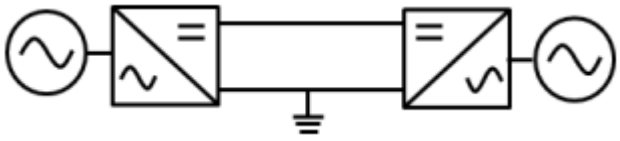


Figure II.6 : Liaison monopolaire asymétrique avec retour métallique.

-Liaison monopolaire symétrique : dans ce type de liaison les convertisseurs sont connectés via deux conducteurs à haute tension de polarité opposée.

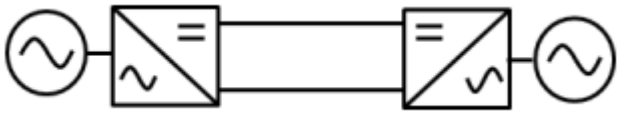


Figure II.7 : Liaison monopolaire symétrique.

II.8.2 Bipolaire

Dans une configuration bipolaire, il y a deux convertisseurs sur chaque côté du lien HVDC. L'une des deux convertisseurs est connecté entre le pôle positif et la terre (ou le retour métallique de moyenne tension) et l'autre convertisseur est connecté entre la terre (ou le retour métallique de moyenne tension) et le pôle négatif.

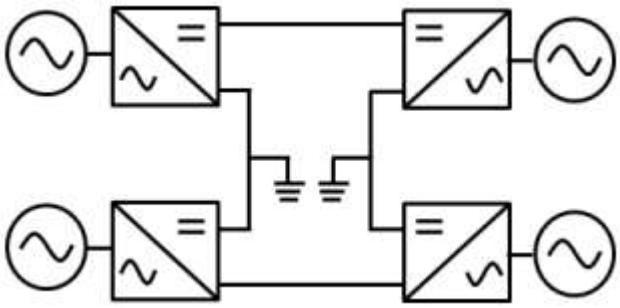


Figure II.8: Liaison bipolaire.

II.8.3 Homopolaire

Dans ce type de liaisons, 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 homo-polaires réside dans un coût moins élevé pour l'isolation.

Néanmoins, les désavantages liés à un retour par la terre l'emportent. Les liaisons bipolaires sont donc les plus utilisées. **[16]**

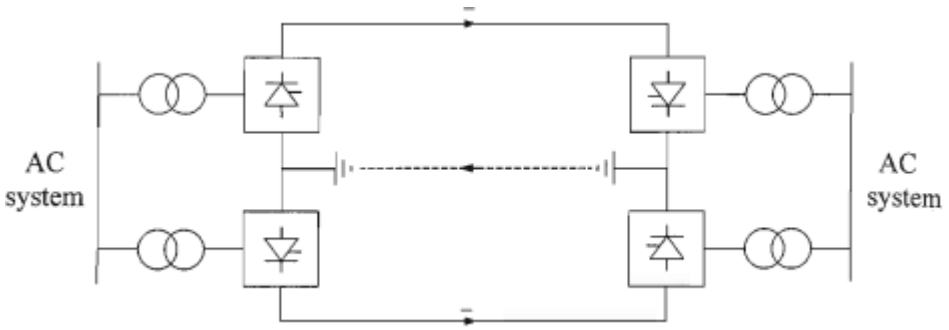


Figure II.9 : Liaison homopolaire.

II.9 Systèmes de conversion d'énergie

Il existe deux systèmes de conversion d'énergie HVDC :

II.9.1 Système CSC (Current source converter)

Un convertisseur source de courant CSC "Current source converter" utilise des thyristors pour la commutation, c'est un type de Line Commutated Converter (LCC), le courant de ligne circule dans un même sens quel que soit le flux de puissance (de par les caractéristiques des thyristors qui sont des interrupteurs unidirectionnels en courant). Des bobines de forte inductance, appelées "bobines de lissage", disposées de part et d'autre de la ligne de transmission, permettent d'éliminer les composantes harmoniques du courant générées par les commutations successives des thyristors **[17]**. Dans cette technologie, le courant de ligne est déterminé par la chute de tension entre les deux stations et par la résistance de la ligne. Les convertisseurs LCC présentent cependant le défaut de consommer de la puissance réactive. La puissance réactive consommée est compensée au moyen de bancs de condensateurs disposés en amont des transformateurs Figure II.10 Le flux de puissance peut être inversé par inversion de la polarité de la tension de ligne HVDC. **[9]**

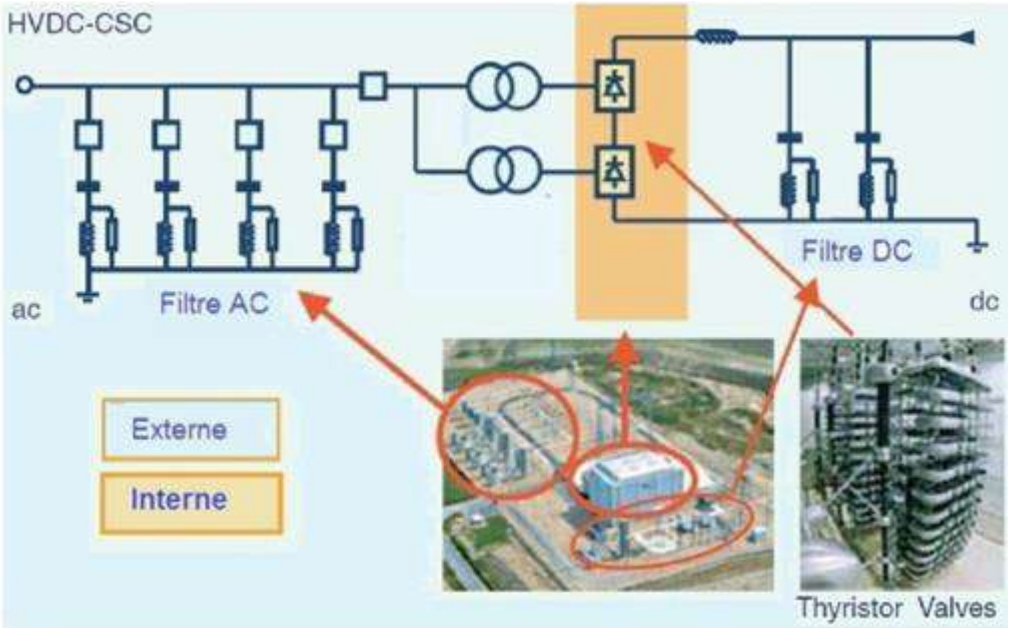


Figure II.10 : Installation type d'une liaison HVDC-CSC

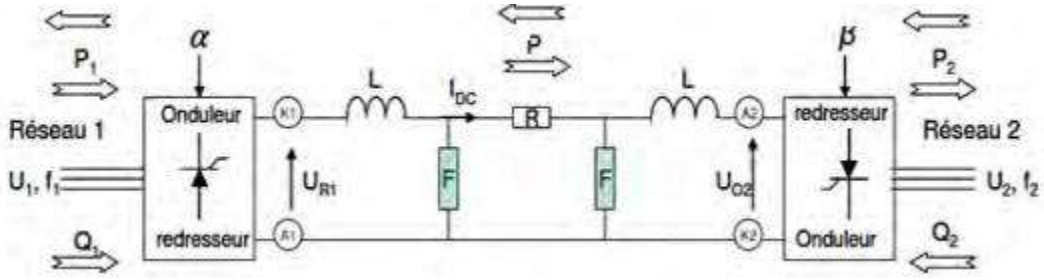


Figure II.11 : Système CSC. La puissance active est transférée du réseau 1 vers le réseau 2 et vice versa. L'inversion de puissance est réalisée par inversion de polarité du conducteur.

II.9.2 Système VSC (Voltage Source Converter)

La conversion d'énergie basée sur VSC utilise l'électronique de puissance moderne, telle que: IGBT, MOSFET, GTO, VSC est commercialise sous le nom HVDC Light TM par ABB. Siemens propose également la variante VSC-HVDC, proposé par le nom commercial HVDC Plus TM **[18]**, **[19]**.Cette technologie est développée à la fin des années 90 est en train de se diffuser dans le monde entier, grâce à son coût compétitif et à sa plus grande simplicité. Cette technologie ne nécessite pas de réseau fort en amont et en aval (aucune nécessité de compenser le réactif par des moyens extérieurs) et elle est très intéressante pour acheminer par voie terrestre, l'énergie produite par les éoliennes en haute mer. **[20]**

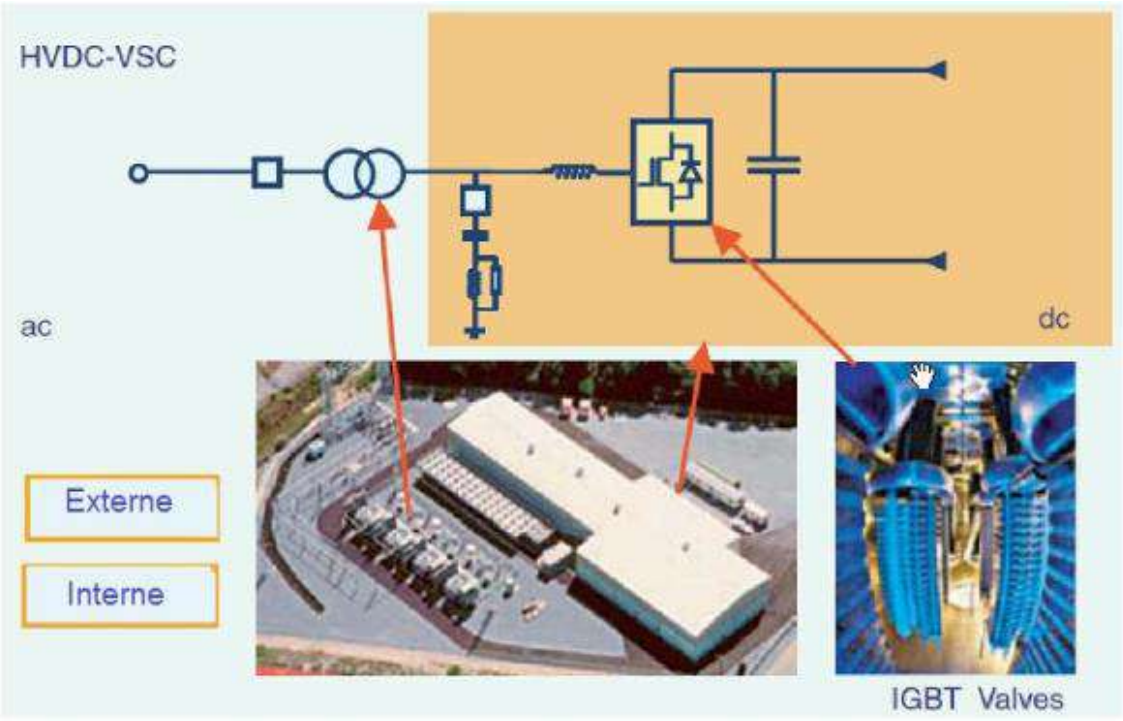


Figure II.12 : Installation type d'une liaison HVDC-VSC.

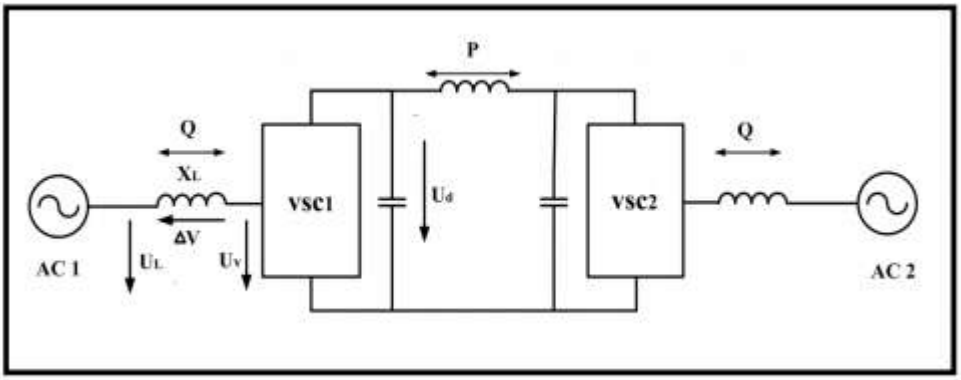


Figure II.13 : Schéma de transmission VSC-HVDC.

II.9.2.1 VSC à 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 II.14 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 ($+{V_{dc}}^2$) ou égale à son opposée ($-V_{dc}$). 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 II.15 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. **[21]**

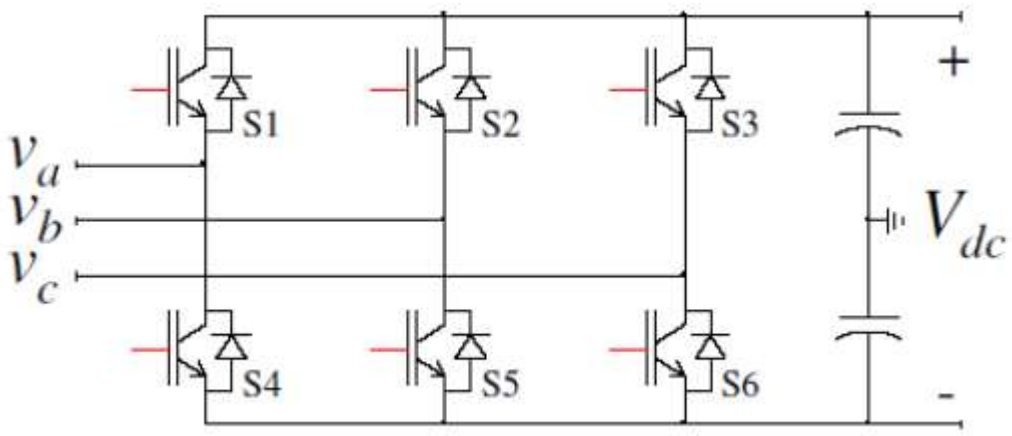


Figure II.14 : Topologie de convertisseur en source de tension à 2 niveaux.

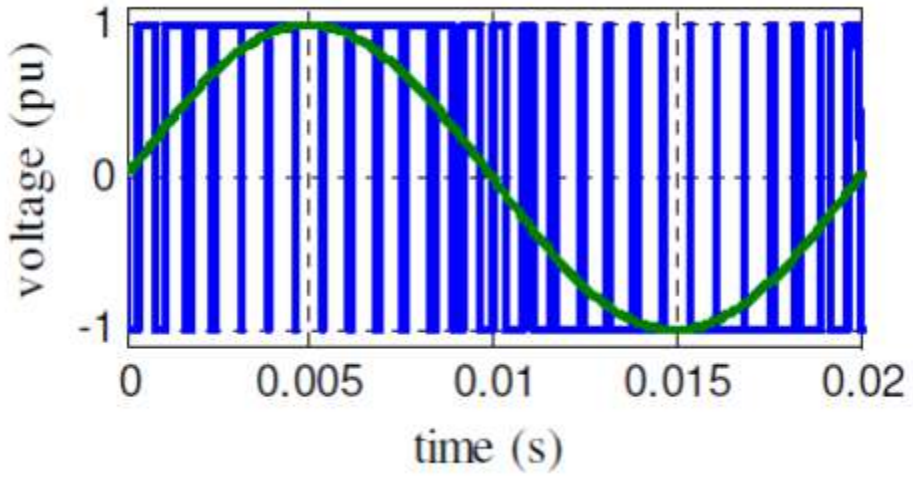


Figure II.15 : Forme d'onde de la tension du VSC à 2 niveaux.

II.9.2.2 VSC à 3 niveaux

Une façon de réduire les harmoniques sans augmenter les pertes de commutation est de séparer la tension continue en plusieurs niveaux de tensions. Une séparation en 3 niveaux est présentée à la Figure II.16 Cette topologie, appelée NPC (Neutral Point Clamped), est constituée de deux diodes insérées dans chaque phase, ce qui permet de diviser la tension *Vdc* en deux. Il convient de souligner que le nombre total d'IGBTs physiquement installés pour cette topologie est le même que le nombre d'IGBTs pour un VSC 2 niveaux (Figure II.14) puisque uniquement la moitié de la tension continue est supportée par les IGBTs.

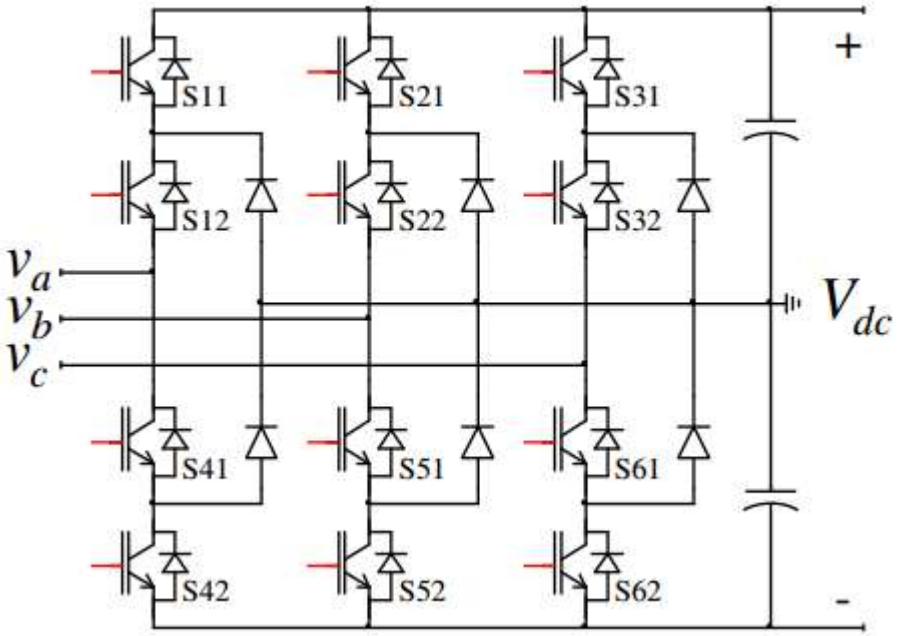


Figure II.16 : Topologie de convertisseur en source de tension à 3 niveaux.

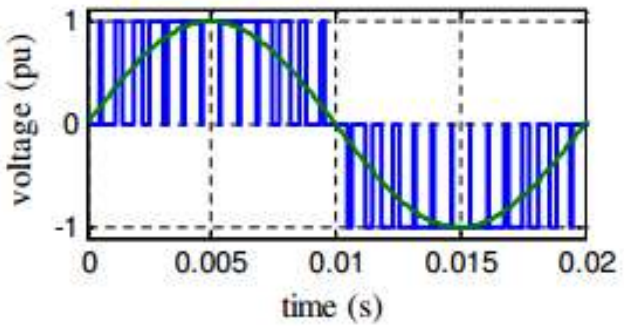


Figure II.17 : Forme d'onde de la tension du VSC à 3 niveaux.

Cette topologie multi-niveaux permet de réduire les pertes globales (puisque les crêtes des tensions de commutation sont diminuées) et les harmoniques. Toutefois, en raison de la complexité du processus de commutation, l'équilibrage des tensions des condensateurs et des limites pratiques, les installations de système HVDC basées sur la topologie NPC ont été limitées à trois niveaux.

II.10 Les convertisseurs modulaires multi-niveaux (MMC)

Les convertisseurs multi-niveaux génèrent une tension quasi sinusoïdale en utilisant plusieurs niveaux de tension à partir des condensateurs utilisés comme sources de tension. Ces convertisseurs sont un type de VSC ; donc la théorie globale et les principes de fonctionnement des VSC leur sont applicables. Il y a n´néanmoins des différences importantes dans le fonctionnement de ces convertisseurs telles que les stratégies de contrôle interne et le design. Ces différences justifient le fait que nous traitons cette technologie s´emparement des VSC classiques ´études

jusqu'à présent. Ils ont aussi la capacité de réduire significativement les stress de tension sur chaque composant servant d'interrupteur. La tension AC ainsi générée se rapproche d'une onde sinusoïdale, ce qui permet de minimiser les besoins de filtres. La fréquence d'interrupteur est fortement diminuée par rapport à un convertisseur VSC classique, ce qui présente l'intérêt de réduire considérablement les pertes de commutation. **[22]**

La première installation mise en service utilisant cette topologie est le projet Trans Bay Câble **[23]** avec une capacité de 400 MW/ ±200 kV. Toutefois, plusieurs dizaines de projets, utilisant cette topologie, sont en construction dans le monde.

I.10.1 Topologie du MMC

La Figure II.18 montre la configuration en trois phases de la topologie du MMC. Le MMC est composé de *N* SMs par demi-bras, ce qui se traduit par une tension phase-terre ayant une forme d'onde de (*N + 1*) niveaux **[24]**. Le regroupement de plusieurs sous-modules en série forme un demi-bras. Coté alternatif, chaque phase est constituée de deux demi-bras. Des inductances L_{arm} sont rajoutées en série dans chaque demi-bras afin de lisser le courant et de le limiter lors de défauts **[25]**. Chaque SM est constituée d'un convertisseur en demi-pont tel que présenté dans Figure II.18.b. Il comprend principalement un condensateur *C* et deux IGBTs avec diodes antiparallèles (S1i et S2i). La commande de ces IGBTs permet ainsi de connecter et de déconnecter le condensateur sur le réseau.

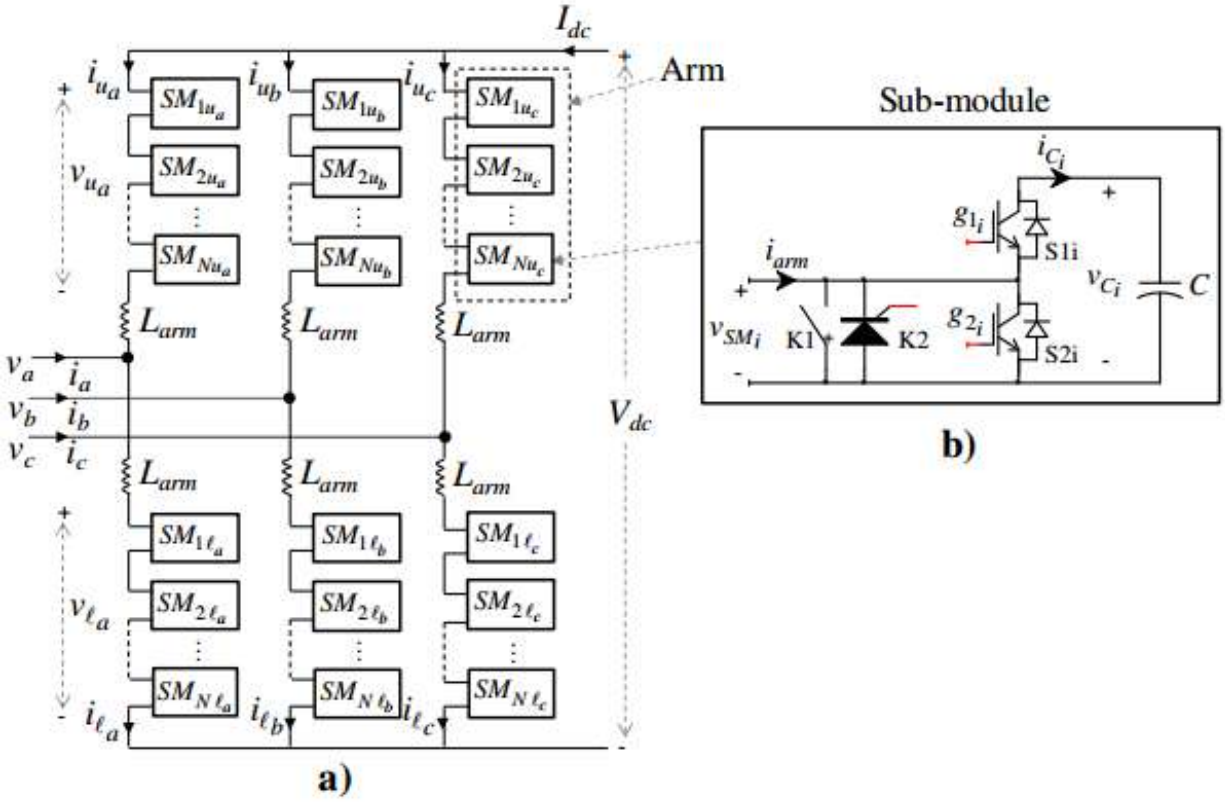


Figure II.18 : a) Topologie du MMC, b) convertisseur en demi-pont du ième SM.

Une forme d'onde type pour un MMC à 9 niveaux (c.à.d. 8 SMs/demi-bras) est présentée à la Figure II.19 La courbe bleue représente la tension de référence désirée et la courbe verte représente la tension réalisée du coté AC du convertisseur.

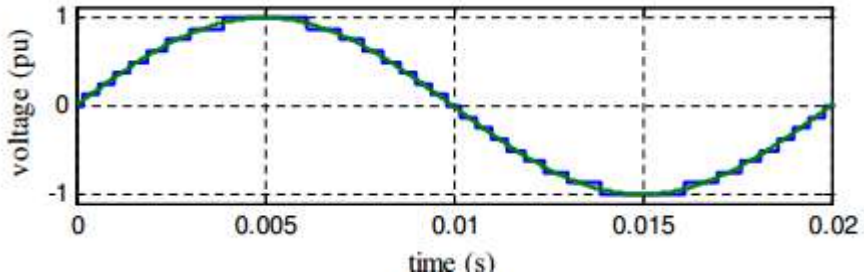


Figure II.19 : Forme d'onde de la tension du MMC-9 niveaux.

Il convient de souligner, que le nombre de niveaux du MMC peut changer en fonction des constructeurs et en fonction de chaque projet d'installation. Pour le constructeur ABB, en général un MMC de 39 niveaux est disponible commercialement, quant aux constructeurs Siemens et Alstom Grid, des MMCs de plusieurs centaines de niveaux sont privilégiés.

II.11 Théorie du convertisseur et les équations de performance

Le module de base d'un convertisseur HVDC est le pont triphasé plein onde, le circuit illustré à la Figure II.20 est également connu sous le nom de pont de Graetz, Bien qu'il existe plusieurs configurations possibles, le pont de Graetz a des abeilles, universellement utilisé pour les convertisseurs HVDC car il permet une meilleure utilisation du transformateur converti et une tension plus faible aux bornes de la valve lorsqu'elle n'est pas conductrice **[26]**. Le dernier est appelé la tension inverse de crête et il est un facteur important qui détermine la cote des valves.

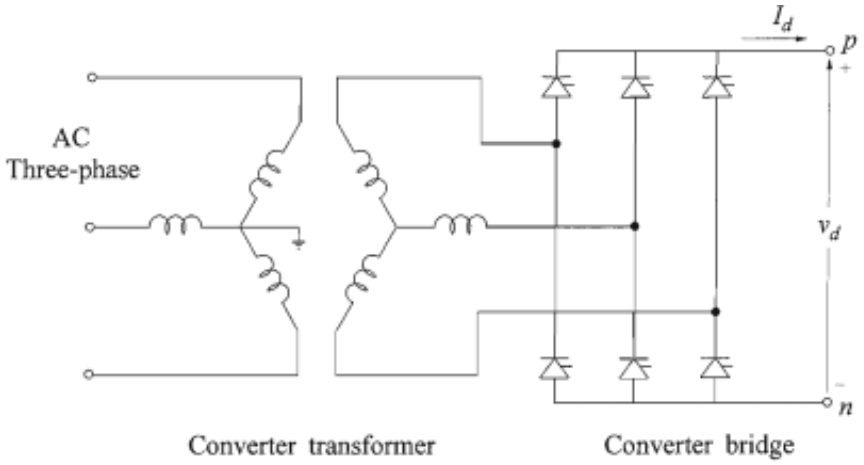


Figure II.20 : Circuit de pont triphasé plein onde.

Le transformateur du convertisseur a des prises en charge sur le côté AC pour le contrôle de la tension. Les enroulements latéraux AC du transformateur sont généralement connectés en étoile avec un neutre mis à la terre; les enroulements latéraux de la valve sont connectés en triangle ou en étoile avec un neutre non mis à la terre.

Sur la base des hypothèses ci-dessus, le convertisseur en pont de la Figure II.20 peut être représenté par le circuit équivalent illustré à la Figure II.21 que les tensions instantanées de la ligne au neutre sont :

$$\begin{aligned} e_a &= E_m cos(\omega t + 60°) \\ e_b &= E_m cos(\omega t - 60°) \\ e_a &= E_m cos(\omega t - 180°) \end{aligned} \qquad \textbf{(II.1)}$$

Les tensions entre phases sont :

$$\begin{aligned} e_{ac} &= e_a - e_c = \sqrt{3} E_m cos(\omega t + 30°) \\ e_{ba} &= e_b - e_a = \sqrt{3} E_m cos(\omega t - 90°) \\ e_{cb} &= e_c - e_b = \sqrt{3} E_m cos(\omega t + 150°) \end{aligned} \qquad \textbf{(II.2)}$$

La Figure II.22 (a) montre les formes d'onde de tension correspondant aux équations **(**II.1) et (II.2). Pour simplifier l'analyse et aider à comprendre le fonctionnement du convertisseur en pont, nous allons d'abord considérer le cas avec une inductance de source négligeable ($L_c = 0$) et aucun retard d'allumage. Après avoir développé une compréhension de base des performances du convertisseur, nous allons étendre l'analyse pour inclure l'effet de retarder l'allumage de la vanne par contrôle gate/grid puis l'effet de l'inductance de la source. **[27]**

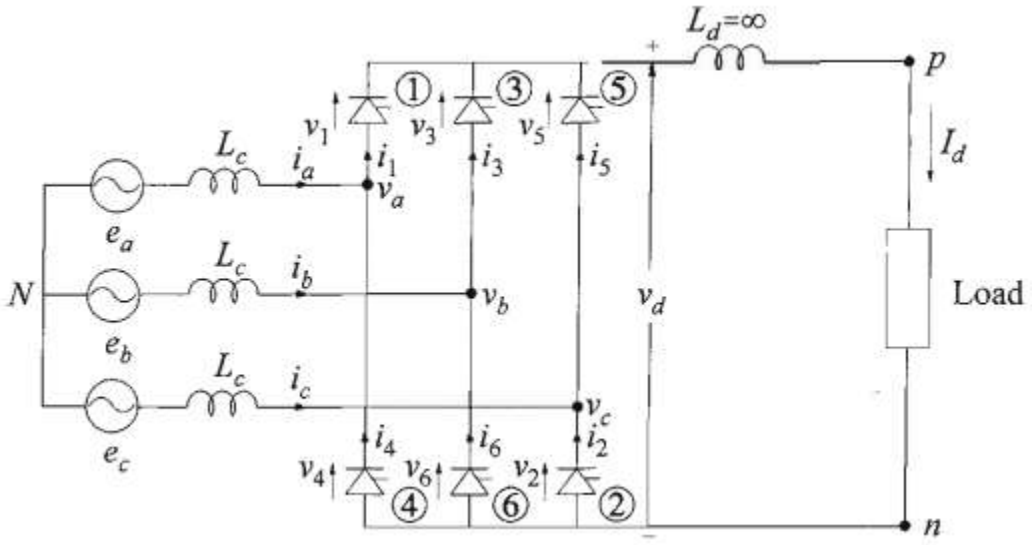


Figure II.21 : Convertisseur de pont triphasé plein onde.

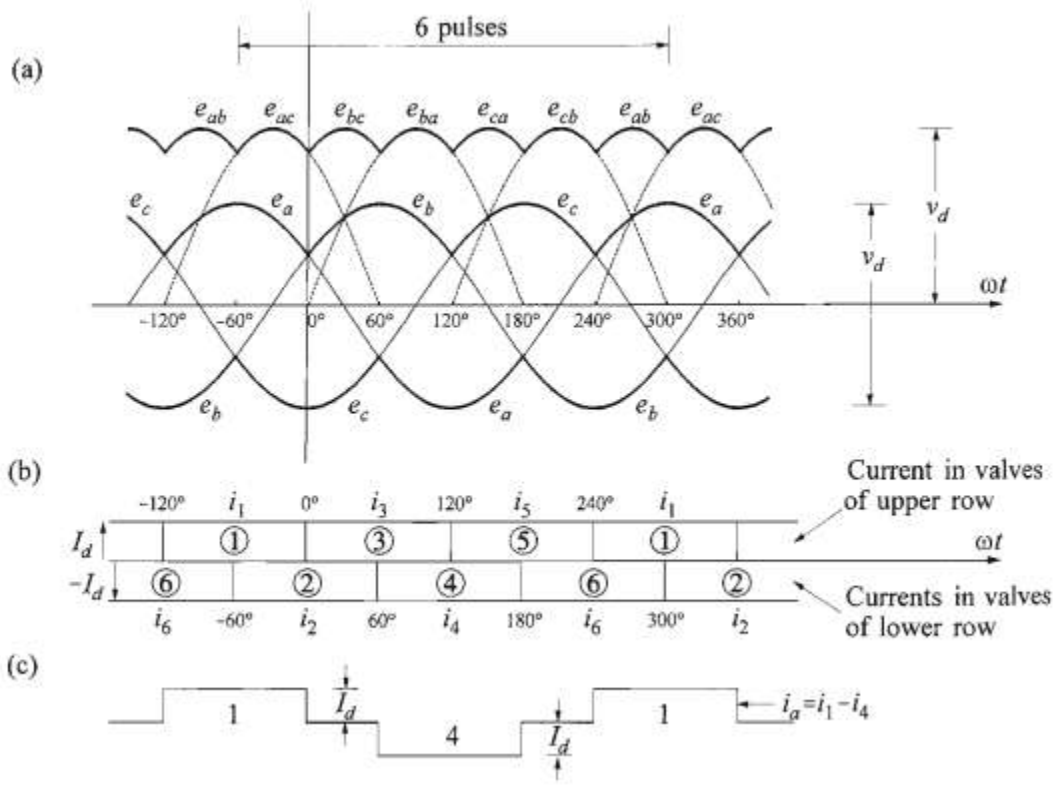


Figure II.22 : Formes d'onde des tensions et des courants du convertisseur de pont triphasé pleine onde.

Avec:

(a) Tension de ligne à neutre et tension de ligne à source.

(b) Courants des valves et périodes de conduction.

(c) courant de la phase i_a.

II.11.1 Analyse en supposant une inductance de source négligeable

II.11.1.1 Sans retard d'allumage

Sur la Figure II.21, les cathodes des valves 1, 3 et 5 de la rangée supérieure sont connectés ensemble. Par conséquent, lorsque la tension phase-neutre de la phase a est plus positive que les tensions des deux autres phases, la valve 1 conduit. Le commun le potentiel des cathodes des trois valves est alors égal à celui de l'anode de la valve 1. Les cathodes des valves 3 et 5 étant à un potentiel plus élevé que leurs anodes, ces valves ne conduisent pas.

Dans la rangée inférieure, les anodes des valves 2, 4 et 6 sont connectées ensemble. Par conséquent, la valve 2 conduit lorsque la tension de la phase c'est plus négative que les deux autres phases.

À partir des formes d'onde illustrées à la Figure II.22 (a), on remarque que la valve 1 conduit lorsque ωt est compris entre -120° et 0°, puisque e_a est supérieur à e_b ou e_c , la valve 2 conduit lorsque ωt est compris entre -60° et 60°, puisque e_a est plus négatif que e_b ou e_c , pendant cette période. Ceci est illustré à la Figure I.22 (b), qui identifie la période de conduction de chaque valve, ainsi que l'amplitude et la durée du courant à l'intérieur. Étant donné que, par hypothèse, le courant continu I_d est supposé constant, le courant dans chaque vanne est I_d lorsqu'elle conduisant et zéro en ne conduisant pas.

La période où ωt est compris entre 0° et 120°, avant de $\omega t = 0°$, les vannes 1 et 2 sont conductrices, après $\omega t = 0°$,e_c devient plus positif que e_b et la valve 3 s'allume; la valve 1 est éteinte car sa cathode est désormais à un potentiel plus élevé que son anode, jusqu'à 60 °, les valves 2 et 3 conduisent, à $\omega t = 60°$, e_a est plus négatif que e_b provoquant l'allumage de la valve 4 et l'extinction de la valve 2.

À s $\omega t = 120°$ e_c est plus positif que e_b , entraînant l'allumage de la valve 5 et l'extinction de la valve 3. De même, à $\omega t = 180°$, la conduction passe de la valve 4 à 6 dans la rangée inférieure; à $\omega t = 240°$ la conduction passe de la valve 5 à la valve 1 dans la rangée supérieure. Ceci termine un cycle et la séquence continue.

La séquence de commutation des valves est illustrée à la Figure I.23, qui montre uniquement les valves conductrices pendant les six périodes distinctes d'un cycle complet.

Chaque valve conduit ainsi pendant une période de 120 °. Lorsqu'il est conducteur, l'amplitude du courant de vanne est I_d, les valves de la rangée supérieure transportent un courant positif et les valves de la rangée inférieure transportent un courant négatif (ou de retour).

Le courant dans chaque phase de la source alternative est composé de courants dans les deux valves connectées à cette phase. Par exemple, le courant dans la phase a, comme le montre la Figure II.22 (c), est égal à $i_a - i_4$, cela représente le courant dans l'enroulement secondaire (côté vanne) du transformateur convertisseur de la Figure I.20.

Le transfert de courant d'une vanne à une autre dans la même rangée est appelé «commutation». Dans l'analyse ci-dessus, nous avons supposé que l'inductance de source L est négligeable. Par conséquent, la commutation se produit instantanément, c'est-à-dire sans «chevauchement». Le résultat est que pas plus de deux valves (une de la rangée supérieure et l'autre de la rangée inférieure) ne conduisent à tout moment.

D'après la Figure II.22 (a), on remarque que le nombre de pulsations (cycles d'ondulation) de v_d par cycle de tension alternative est de six. Par conséquent, le circuit de pont de la Figure I.20 est appelé «circuit de pont à 6 impulsions».

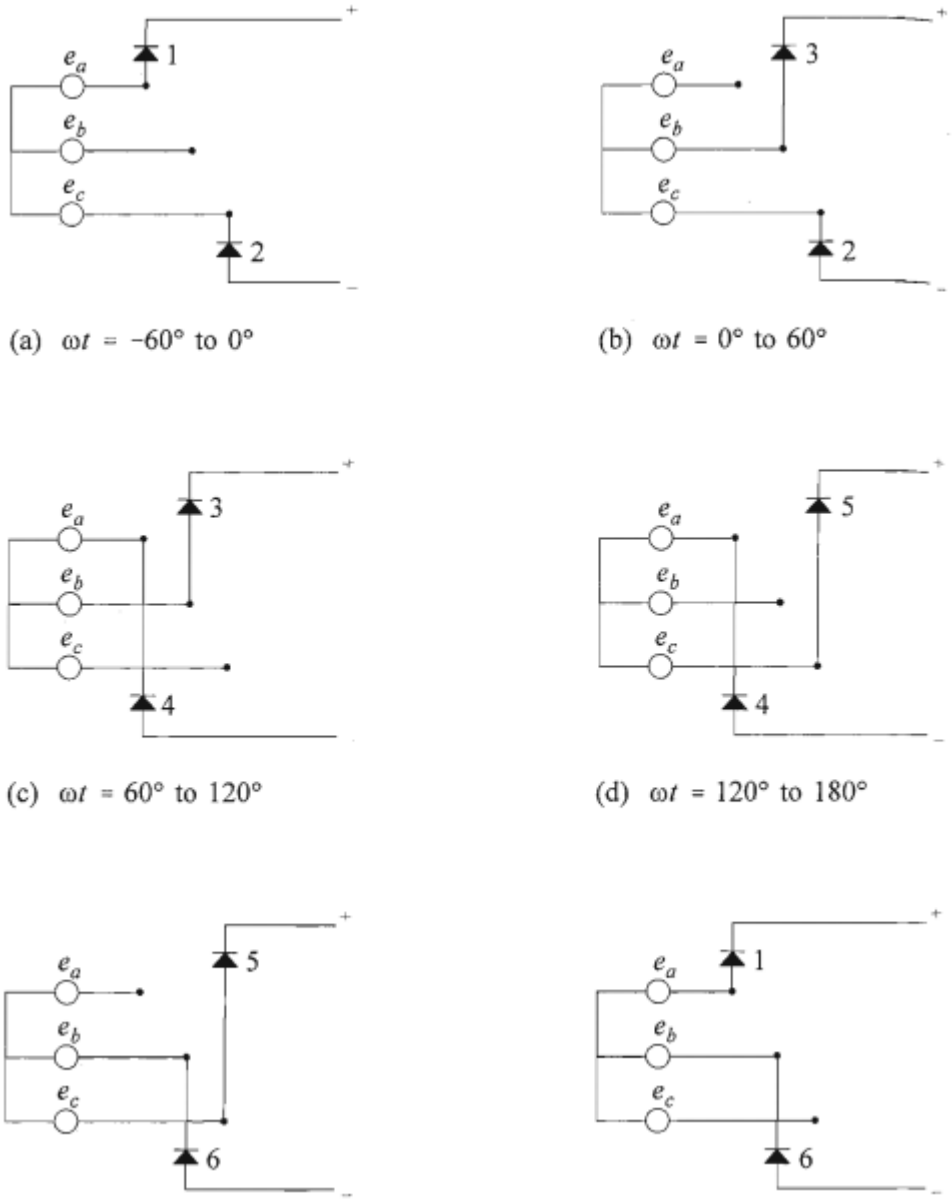


Figure II.23 : commutation des valves sans retard d'allumage et sans chevauchement.

II.11.1.2 Avec retard d'allumage

La commande de grille ou porte peut être utilisée pour retarder l'allumage des valves, «L'angle de retard» est désigné par α, cela correspond à une temporisation de α/ω secondes.

Avec retard, la valve 3 s'allume lorsque $\omega t = \alpha$ (au lieu de $\omega t = 0$), la valve 4 lorsque $\omega t = \alpha + 60°$, la valve 5 lorsque $\omega t = \alpha + 60°$, etc. Ceci est illustré à la Figure I.24.

L'angle de retard est limité à 180°. Si α dépasse 180°, la valve ne s'allume pas, par exemple, considérons l'allumage de la valve 3, avec $\alpha = 0$, la valve 3 s'allume à $\omega t = 0$, l'allumage peut

être retardé jusqu'à $\omega t = 180.°$,au-delà de ça, e_b n'est plus supérieur à e_a, et donc la valve 3 ne s'allumera pas.

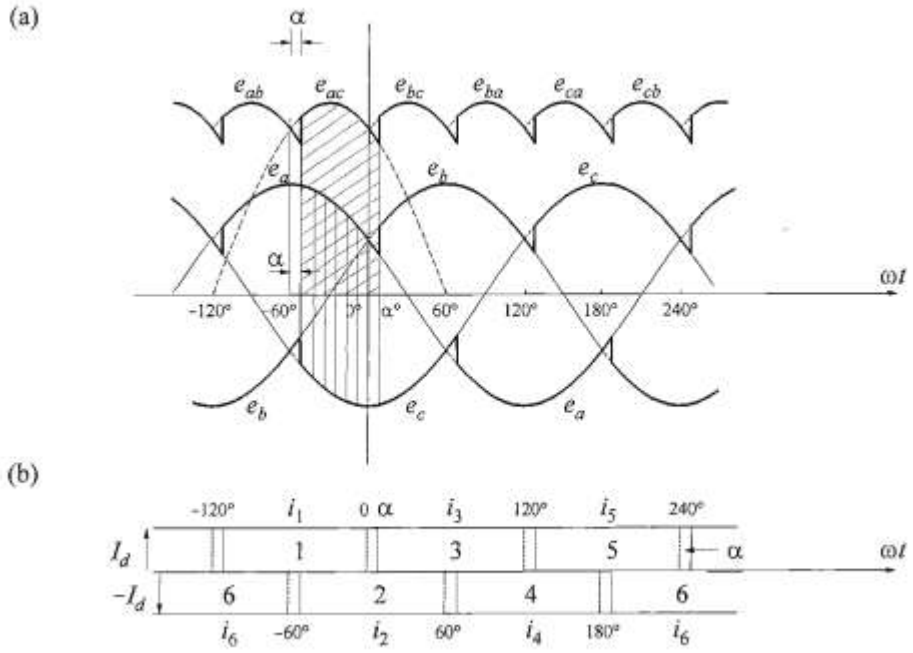


Figure II.24 : Formes d'onde de tension et courants de valve, avec retard d'allumage.

II.11.2 Analyse avec chevauchement de commutation

À la raison de l'inductance L_c de la source alternative (voir la Figure II.21), les courants de phase ne peuvent pas changer instantanément. Par conséquent, le transfert de courant d'une phase à une autre nécessite un temps fini, appelé temps de commutation ou temps de chevauchement. L'angle de chevauchement ou de commutation correspondant est désigné par μ.

En fonctionnement normal, l'angle de chevauchement est inférieur à 60°; les valeurs typiques à pleine charge sont comprises entre 15° et 2 °, avec $0° < \mu < 60°$, pendant la commutation, trois vannes conduisent simultanément. Cependant, entre les commutations, seules deux vannes sont conductrices.

Une nouvelle commutation commence tous les 60° et elle dure pendant une période angulaire de μ. Par conséquent, la période angulaire lorsque deux vannes conduisent sans retard d'allumage ($\alpha = 0$) est de $60° - \mu$, comme le montre la Figure I.25 . Pendant chaque période de commutation, le courant dans la valve entrante augmente de 0 à I_d, et le courant dans la valve sortante diminue de I_d à 0. Pour simplifier, sur la Figure II.25 nous avons identifié uniquement les périodes de conduction de la vanne, mais pas les courants de la valve. **[27]**

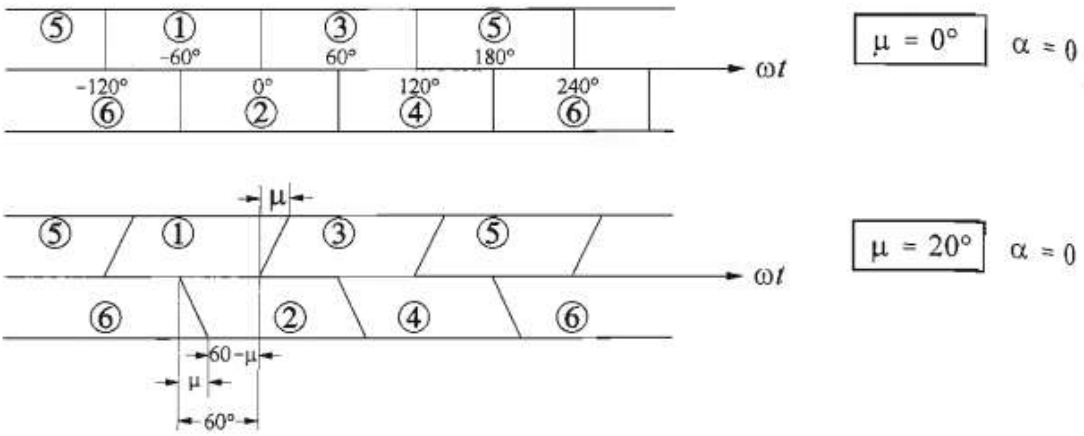


Figure II.25 : L'effet de l'angle de chevauchement sur les périodes de conduction des valves.

Si $60° < \mu < 120°$, un mode de fonctionnement anormal se produit dans lequel alternativement trois et quatre vannes conduisent **[28]**. Ici, nous ne considérerons que le fonctionnement normal lorsque μ est inférieur à 60°.

L'analyse l'effet du chevauchement en considérant la commutation de la valve 1 à la valve 3. La Figure II.26 montre les périodes de conduction de valve, lorsque le retard d'allumage est inclus. La commutation commence lorsque $\omega t = \alpha$ (angle de retard) et se termine lorsque $\omega t = \alpha + \mu = \sigma$, où σ est l'angle d'extinction (égal à la somme de l'angle de retard α et l'angle de commutation μ).

Au début de la commutation ($\omega t = \alpha$), $i_1 = I_d$ et $i_3 = 0$

En fin de commutation ($\omega t = \alpha + \mu = \sigma$), $i_1 = 0$ et $i_3 = I_d$

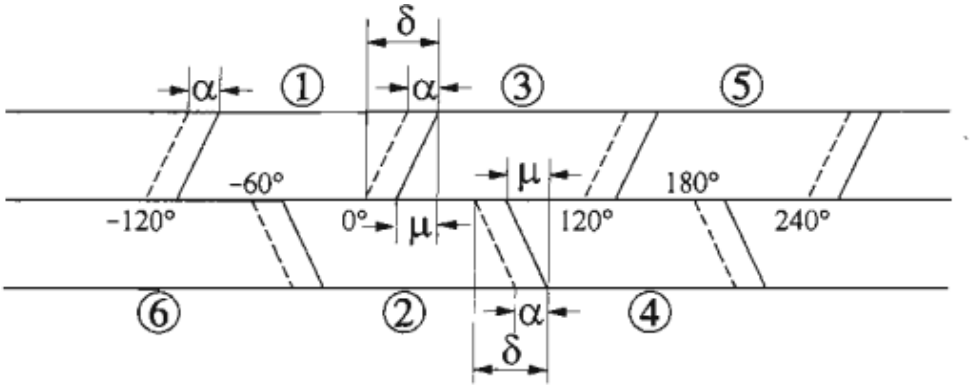


Figure II.26 : Périodes de conduction de la valve avec retard d'allumage.

Pendant la période de commutation, les valves 1, 2 et 3 sont passantes et le circuit convertisseur efficace est comme indiqué sur la Figure II.27.

Pour la boucle contenant les valves 1 et 3, on a :

$$e_a - e_b = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad \textbf{(II.3)}$$

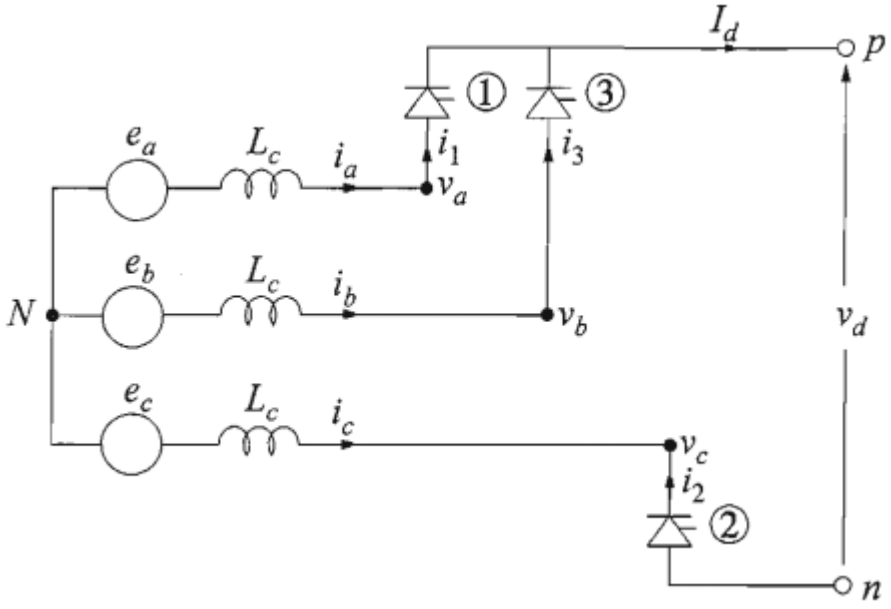


Figure II.27 : Circuit équivalent pendant la commutation.

La tension $e_a - e_b$, est appelée «la tension de commutation». De l'équation (II.2) elle est égal $\sqrt{3}E_m sin\omega t$, donc :

$$\sqrt{3}E_m sin\omega t = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt}$$

Puisque $i_1 = I_d - i_3$:

$$\frac{di_1}{dt} = 0 - \frac{di_3}{dt}$$

Par conséquent :

$$e_a - e_b = \sqrt{3}E_m sin\omega t = 2L_c \frac{di_3}{dt} \quad \textbf{(II.3)}$$

Où :

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2L_c} sin\omega t \quad \textbf{(II.4)}$$

En prenant une intégrale définie par rapport à f, la limite inférieure correspondant au début de la commutation ($\omega t = \alpha$ ou $t = {}^{\alpha}/_{\omega}$) et une limite supérieure courante, on a:

$$\int_0^{i_3} di_3 = \frac{\sqrt{3}E_m}{2L_c} \int_{{}^{\alpha}/_{\omega}}^{t} sin\omega t$$

L'intégration de l'équation ci-dessus donne :

$$i_3 = \frac{\sqrt{3}E_m}{2\omega L_c} (cos\alpha - cos\omega t) = I_{S2}(cos\alpha - cos\omega t) \qquad \textbf{(II.5)}$$

Où :

$$I_{S2} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2\omega L_c} \qquad \textbf{(II.6)}$$

Le courant i_3 de la valve entrante pendant la commutation est composé d'un terme constant ($I_{S2}cos\alpha$) et d'un terme sinusoïdal ($-I_{S2}cos\omega t$) retardant la tension de commutation de 90 °.

Il faut s'y attendre car ce que nous avons ici est un court-circuit ligne à ligne par une inductance de $2L_c$. La composante constante de i_3 dépend de α, il sert à faire $i_3 = 0$ au début de la commutation.

Comme la Figure II.28 montre le courant pendant la commutation est un segment d'un courant sinusoïdal avec une valeur de crête $I_{S2} = \frac{\sqrt{3}E_m}{2L_c}$. La forme du segment est fonction de l'angle contral α. Par conséquent, l'angle de chevauchement dépend de I_d, L_c

et α.

Pendant la commutation, la forme de i_1 satisfait $i_1 = I_d - i_3$, pour un temps presque égal à 0° (ou 180°), la période de commutation ou le chevauchement est le plus important. Le chevauchement est le plus court lorsque α =90 °, puisque i_3 est associée au segment de l'onde sinusoïdale qui est presque linéaire. De même, si la tension source E_m est abaissée ou si I_d est augmentée, le chevauchement augmente. **[27]**

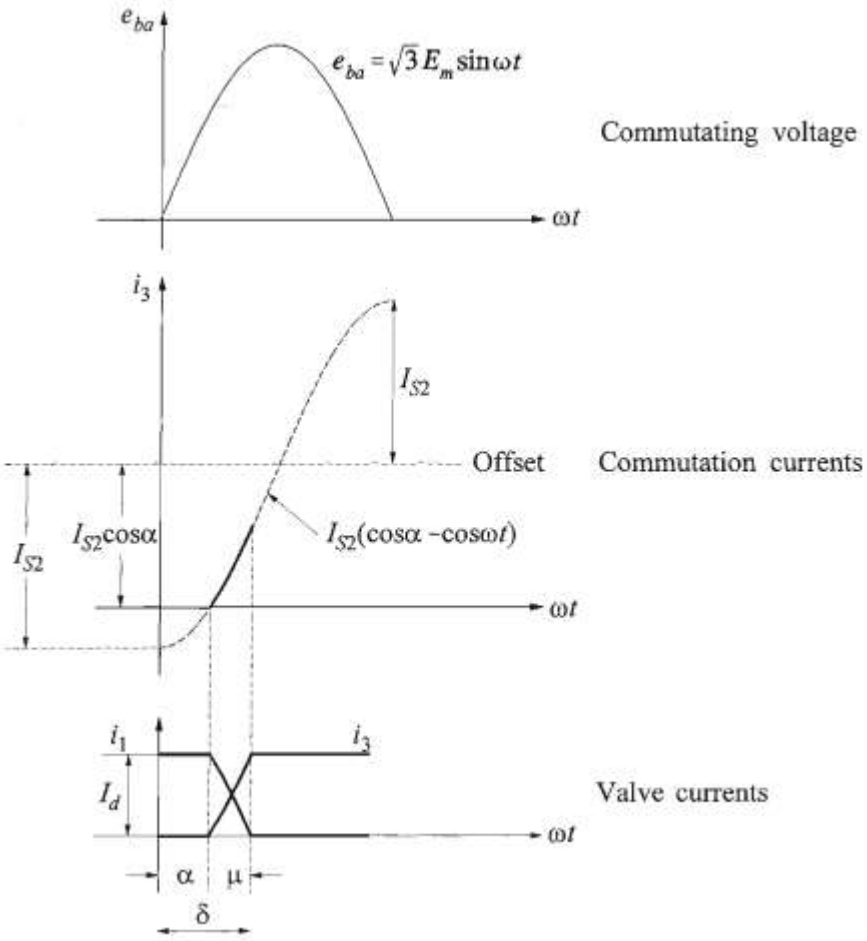


Figure II.28 : Courants de valve pendant la commutation par rapport à la tension.

Pendant la commutation :

$$v_a = v_b = e_b - L_c \frac{di_3}{dt}$$

Depuis l'équation (II.3) :

$$\frac{e_a - e_b}{2} = L_c \frac{di_3}{dt}$$

Donc :

$$v_a = v_b = e_b - \frac{e_a - e_b}{2} = \frac{e_a + e_b}{2} \qquad \textbf{(II.7)}$$

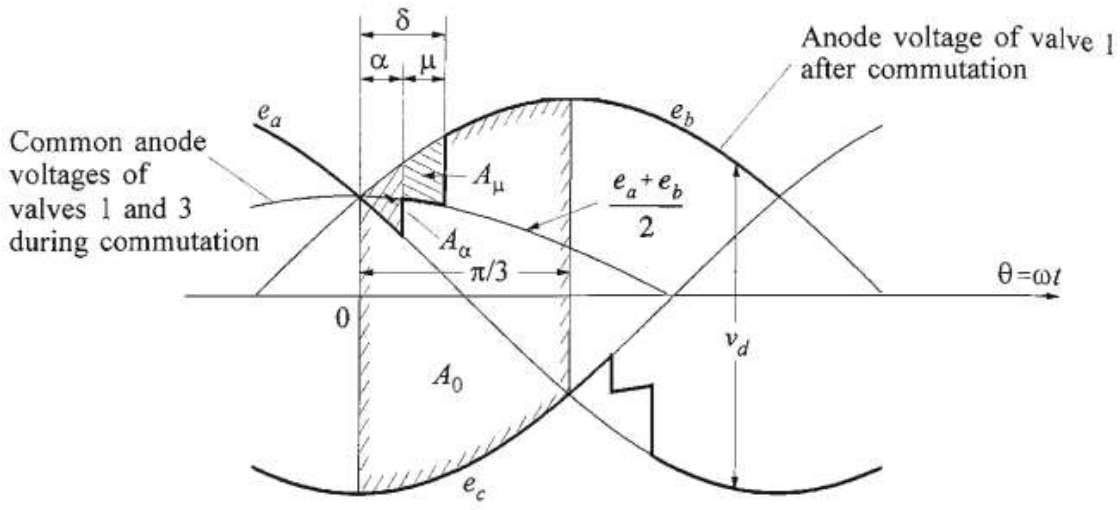


Figure II.29 : Formes d'onde de tension montrant l'effet du chevauchement pendant la commutation de la valve 1 à 3.

II.12 Conclusion

Le réseau électrique mondial s'est complexifie depuis des années, des nouvelles technologies ont été développées, des nouvelles applications sont apparues sur les réseaux et des nombreuses recherches ont été effectuées. Le transport d'énergie électrique sous haute tension en courant continu (HVDC) pouvait être le meilleur choix grâce à sa flexibilité et ses avantages nombreux.

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure d'un système HVDC, ses types et ses types de liaisons et les systèmes de conversion d'énergie, et, les théories du convertisseur et les équations de performance de ce système.

CHAPITRE III

CONTROLE ET MODELISATION D'UN SYSTEME HVDC

III.1 Introduction

Au cours de l'analyse des systèmes de transmission HVDC, on distingue deux étapes très importantes, le contrôle de ces systèmes pour garantir les performances souhaitées du système d'alimentation, et la modélisation pour la facilitation d'analyser le flux de puissance de stabilité et faire une approche consiste à résoudre les deux ensembles d'équations de manière itérative.

III.2 Contrôle des systèmes HVDC

Un système de transmission HVDC est hautement contrôlable, son utilisation efficace dépend de l'utilisation appropriée de cette contrôlabilité pour garantir les performances souhaitées du système d'alimentation dans le but de fournir un fonctionnement efficace et stable et de maximiser la flexibilité du contrôleur de puissance sans compromettre la sécurité de l'équipement, divers niveaux de contrôle sont utilisés de manière hiérarchique.

Considérant la liaison HVDC illustrée à la Figure III.1 (a). Il représente une liaison monopolaire ou un pôle d'une liaison bipolaire. Le circuit et le profil de tension équivalents correspondants sont représentés sur les Figures III.1 (b) et (c), respectivement. **[27]**

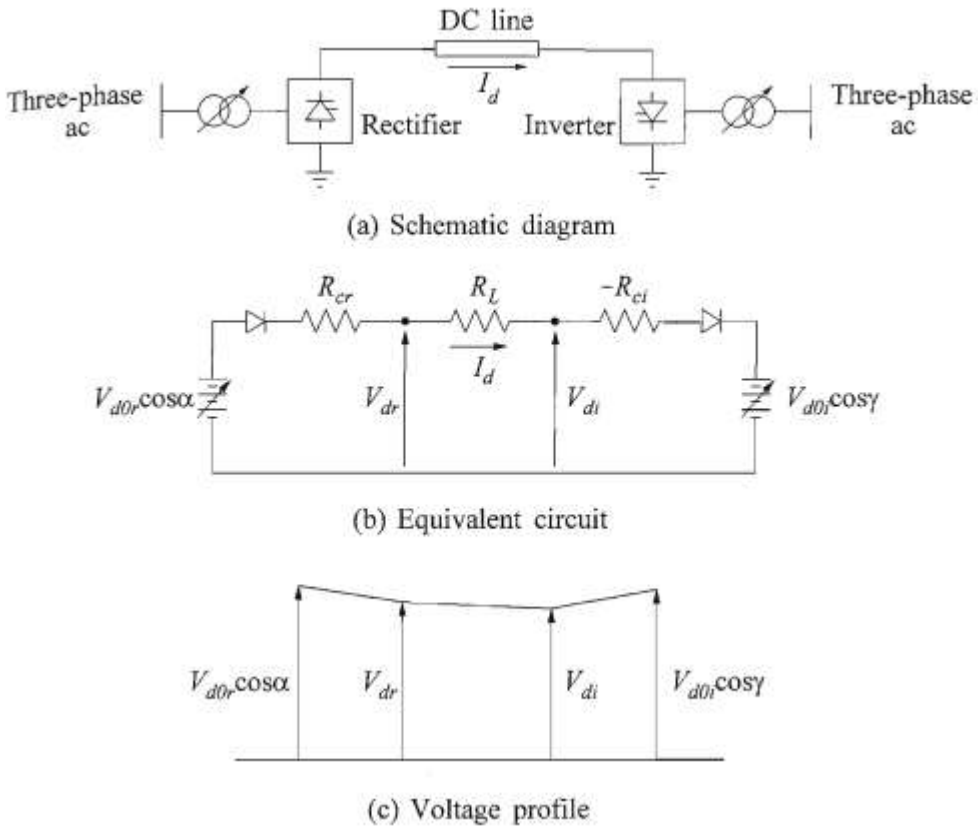


Figure III.1 : Liaison de transmission HVDC.

Le courant continu circulant du redresseur vers l'onduleur est :

$$I_d = \frac{V_{dor}cos\alpha - V_{doi}cos\gamma}{R_{cr}+R_L-R_{ci}} \quad \textbf{(III.1)}$$

La puissance aux bornes du redresseur est :

$$P_{dr} = V_{dr}I_d \quad \textbf{(III.2)}$$

Et à la borne de l'onduleur est :

$$P_{di} = V_{di}I_{d=}P_{dr} - R_L{I_d}^2 \quad \textbf{(III.3)}$$

III.2.1 Moyens de contrôle de base

La tension continue en tout point de la ligne et le courant (ou la puissance) peut être contrôlée en contrôlant les tensions internes ($V_{dor}cos\alpha$) et ($V_{doi}cos\gamma$). Ceci est accompli par un contrôle grid/gate de l'angle d'allumage de la valve ou un contrôle de la tension alternative par le changement de prise du transformateur du convertisseur.

Le contrôle de grid/gate, qui est rapide (1 à 10 ms), et le changement de prise, qui est lent (5 à 6 s par pas), sont utilisés de manière complémentaire. Le contrôle de grid/gate est utilisé initialement pour une action rapide, suivi d'un changement de prise pour restaurer les quantités du convertisseur. (α pour le redresseur et γ pour l'onduleur) à leur intervalle normale.

L'inversion de la puissance est obtenue par l'inversion de la polarité des tensions directes aux deux extrémités.

III.2.2 Base de sélection des contrôles

Les considérations suivantes influent sur la sélection des caractéristiques de contrôle :

1. Prévention des grandes fluctuations de courant continu dues aux variations de la tension du système alternatif.
2. Maintien de la tension continue près de la valeur nominale.
3. Maintenir des facteurs de puissance aussi élevés que possible aux extrémités émettrice et réceptrice possible.
4. Prévention des pannes de commutation dans les onduleurs et des retours d'arc dans les redresseurs en utilisant des vannes à arc au mercure.

III.2.3 Caractéristiques de contrôle

III.2.3.1 Caractéristiques idéales

Les responsabilités en matière de régulation de tension et de courant restent distinctes et sont affectés à des terminaux séparés. En fonctionnement normal, le redresseur maintient un

courant constant (CC), et l'onduleur fonctionne avec un angle d'extinction constant 'constant extinction angle' (CEA), en maintenant une marge de commutation adéquate. La base de cette méthode de contrôle est mieux expliquée par l'utilisation des caractéristiques tension-courant (V- I) en régime permanent,La tension V_d et le courant I_d formant les coordonnées, peuvent être mesurés à un point commun sur la ligne. Dans la Figure III.2 nous avons choisi que ce soit au terminal du redresseur. Les caractéristiques du redresseur et de l'onduleur sont mesurées par le redresseur, la caractéristique de l'onduleur inclut ainsi la chute de tension aux bornes de la ligne. **[27]**

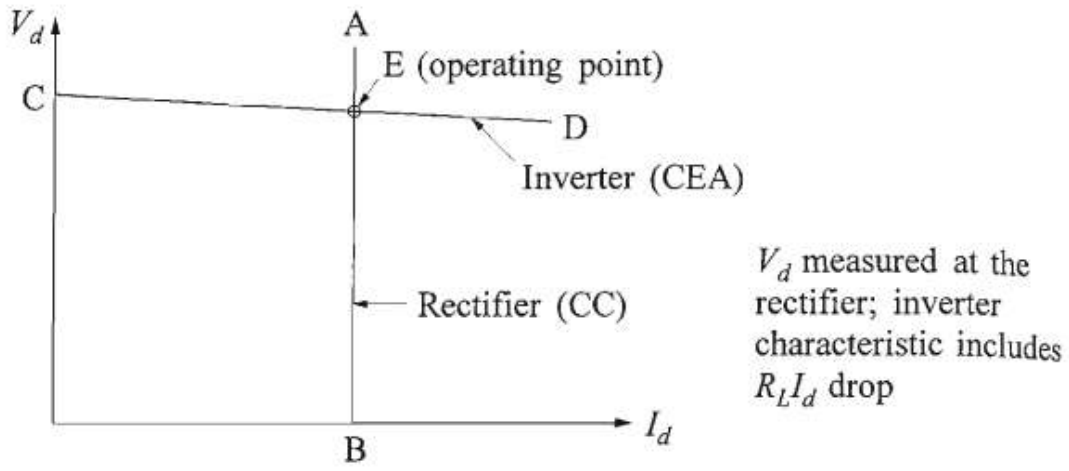


Figure III.2 : Caractéristiques (V- I) à l'état d'équilibre idéal.

Le redresseur conserve un courant constant, sa caractéristique (V- I) , représentée par la ligne AB sur la Figure III.2 est une ligne verticale.

De la Figure III.1 (b) :

$$V_d = V_{doi} cos\gamma + (R_L - R_{ci}) I_d \qquad \textbf{(III.4)}$$

Ça donne la caractéristique de l'onduleur, avec γ maintenu à une valeur fixe. Si la résistance de commutation R_{ci} est légèrement supérieure à la résistance de la ligne R_L , la caractéristique de l'onduleur, représentée par la ligne CD sur la Figure III.2 a une petite pente négative.

III.2.3.2 Caractéristiques réelles

Le redresseur maintient un courant constant en changeant α. Cependant, α ne peut pas être inférieur à sa valeur minimale (α_{min}). Une fois α_{min} atteint, aucune autre augmentation de tension est possible et le redresseur fonctionnera à un angle d'allumage constant (CIA). Par conséquent, la caractéristique du redresseur a vraiment deux segments (AB et FA) comme le montre la Figure III.3 Le segment FA correspond à l'angle d'allumage minimum et représente le

mode de contrôle CIA, le segment AB représente le mode de commande normal à courant constant (CC).

En pratique, la caractéristique de courant constant ne peut pas être vraiment verticale, selon le régulateur de courant. Avec un contrôleur proportionnel, il a une pente négative élevée en raison du gain fini du régulateur de courant, comme illustré ci-dessous.

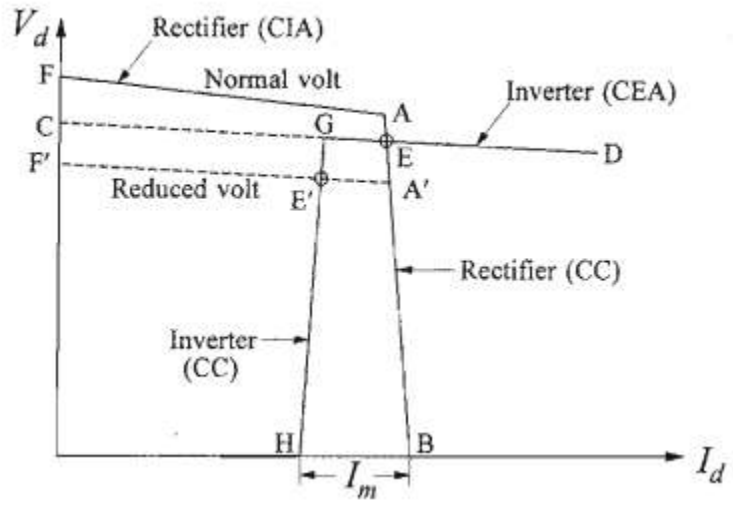


Figure III.3 : Caractéristiques réelles de contrôle d'un convertisseur en régime permanent.

III.2.3.3 Caractéristiques combinées du redresseur et d'onduleur

Dans la plupart des systèmes HVDC, chaque convertisseur doit fonctionner comme un redresseur et un onduleur. Par conséquent, chaque convertisseur est doté d'une caractéristique combinée, comme la Figure III.4 montre La caractéristique de chaque convertisseur se compose de trois segments : un angle d'allumage constant (CIA) correspondant à α_{min} courant constant (CC), et un angle d'extinction constant (CEA).

Le transfert de puissance s'effectue du convertisseur 1 au 2, lorsque les caractéristiques sont représentées sur la Figure III.4 par des lignes continues. La condition de fonctionnement dans ce mode de fonctionnement est représentée par le point E_1.

Le flux de puissance est inversé lorsque les caractéristiques sont illustrées par les lignes pointillées. Ceci est réalisé en inversant le "réglage de la marge", c'est-à-dire en faisant passer le réglage de l'ordre actuel du convertisseur 2 dépasse le convertisseur 1. La condition de fonctionnement est maintenant représentée par E_2 sur la Figure III.4 le courant I_d est le même qu'avant, mais la polarité de la tension a changé.

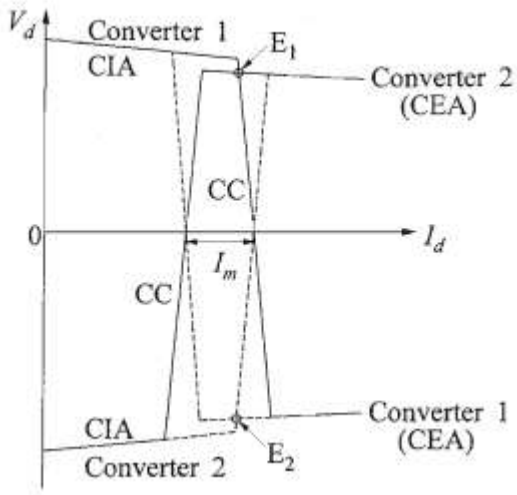


Figure III.4 : Fonctionnement de deux convertisseurs ont des caractéristiques combinées d'onduleur et du convertisseur.

III.2.4 Stabilisation d'un mode

Comme la Figure III.4 montre, l'intersection de la caractéristique du redresseur α_{min}et de l'onduleur (CEA) ne peut pas être bien définie à certains niveaux de tension près de la transition entre les caractéristiques (CEA).et (CC), de l'onduleur. Dans cette région, une petite variation de la tension alternative entraînera une variation importante (10%) du courant continu. Il y aura également une tendance à «chasser» entre les modes et à changer de robinet pour d'éviter ce problème, une caractéristique avec une pente positive (constante B) à la transition entre la caractéristique de commande (CEA). et (CC), de l'onduleur est souvent fournie, comme le montre la Figure III.6 (a). Une autre variation illustrée à la Figure III.6 (b) contrôle la tension continue avec une boucle de rétroaction de tension.

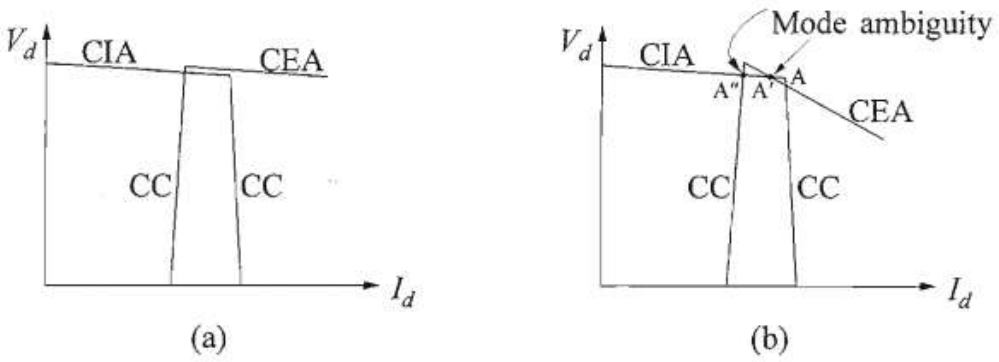


Figure III.5 Régions d'ambiguïté d'un mode.

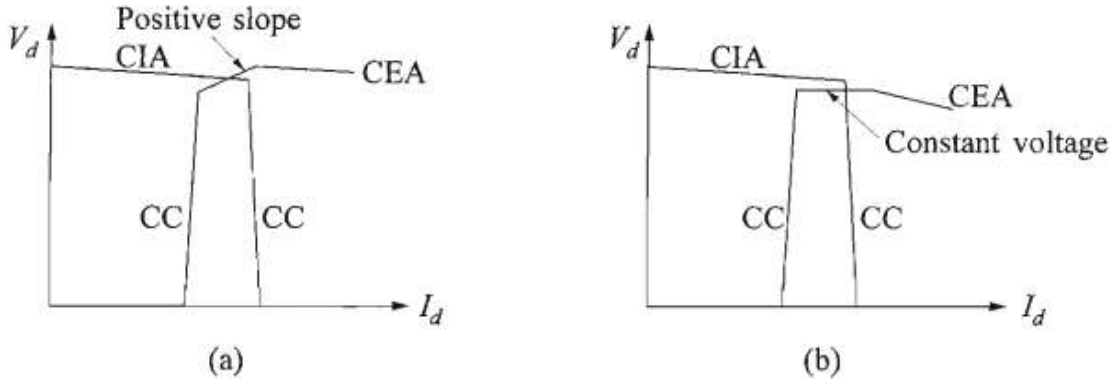


Figure III.6 : Modification de la caractéristique (V-I) pour la stabilisation d'un mode.

III.3 Modélisation des systèmes HVDC

Dans cette section, on va discuter de la modélisation des systèmes HVDC dans les études de flux de puissance et de stabilité. La représentation des systèmes à courant continu nécessite la prise en compte des éléments suivants **[27]** :

- Modèle de convertisseur.
- Modèle de ligne / réseau de transmission DC.
- Interface entre systèmes AC et DC.
- Modèle de contrôle du système DC.

La représentation des convertisseurs est basée sur les hypothèses de base suivantes **[29]** :

a- Le courant continu I_d est sans ondulation.

b- Les systèmes à courant alternatif de l'onduleur et du redresseur sont constitués de sources de tension parfaitement sinusoïdales, à fréquence constante et équilibrées derrière des impédances équilibrées. Ceci suppose que tous les courants et tensions harmoniques introduits par le système de commutation ne se propagent pas dans le système à cause du filtrage.

c- Les transformateurs du convertisseur ne saturent pas.

III.3.1 Représentation de la solution du flux de puissance

À partir de l'analyse présentée à la section II.12, les équations du convertisseur peuvent être résumées comme suit :

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} BTE_{ac}$$

$$V_d = V_{do}cos\alpha - \frac{3}{\pi} X_c I_d B$$

Où :

$$V_d = V_{do}cos\gamma - \frac{3}{\pi}X_c I_d B$$

$$\Phi = \cos^{-1}(V_d/V_{do}) \qquad \textbf{(III.5)}$$

$$P = V_d I_d = P_{ac}$$

$$Q = P\tan\Phi$$

Où :

E_{ac}: Tension ligne à ligne RMS sur bus HT.

T: rapport de transformation.

B: numéro de ponts en série.

P: la puissance active.

Q: la puissance réactive.

$X_c = \omega L_c$: réactance commutée par pont / phase.

V_d, I_d: tension et courant continu par pôle.

L'équation utilisée ci-dessus pour déterminer l'angle du facteur de puissance (Φ) est approximative. Elle simplifie considérablement l'analyse et donne des résultats d'une précision acceptable, cohérente avec le niveau de précision associé aux techniques de solutions itératives utilisées pour l'analyse du flux de puissance. Pour des applications spécifiques nécessitant une plus grande précision, des relations exactes entre les quantités AC et DC dérivées dans la section II.12 peuvent être utilisées.

Aux fins d'illustration, nous considérerons une liaison à deux terminaux. En utilisant les indices r et i pour désigner respectivement les quantités de redresseur et d'onduleur, l'équation pour une ligne ayant une résistance R_L est donnée par :

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_d \qquad \textbf{(III.6)}$$

III.3.1.1 Interface AC / DC sur le nœud HT

L'analyse du flux de puissance nécessite une solution conjointe des équations du système AC et DC. Une approche consiste à résoudre les deux ensembles d'équations de manière itérative, comme illustré à la Figure III.7, avec le bus HT du transformateur d'un convertisseur (côté AC) fournissant l'interface entre le système AC et des équations.

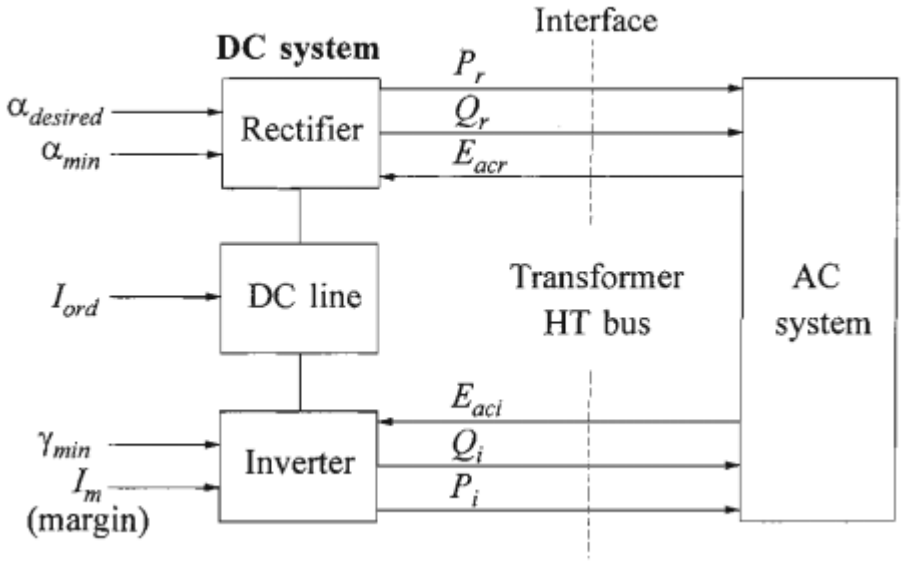


Figure III.7 : bus HT du transformateur d'un convertisseur.

E_{aci} et E_{acr}Sont considérés comme des grandeurs d'entrée pour la solution des équations de système. Ils sont connus de l'étape précédente en solution AC.

Les variables P_i, Q_i, P_r et Q_r sont considérés comme les résultats de la solution des équations du système. Ils sont utilisés dans la prochaine itération pour résoudre les équations du système à courant alternatif.

Les variables dépendantes et indépendantes dans la solution des équations à courant continu dépendent des modes de contrôle du redresseur et de l'onduleur. Les trois modes de fonctionnement possibles sont **[27]** :

Mode 1 : redresseur sur commande CC; onduleur sur commande CEA.

Mode 2 : onduleur sur commande CC; redresseur sur contrôle CIA.

Mode 3 : Redresseur sur contrôle CIA; onduleur sur caractéristique.

-Mode 1 : redresseur sur commande CC et inverseur sur commande CEA

En mode 1, nous avons :

- L'angle de tir de l'onduleur ajusté pour donner la veine $\gamma = \gamma_{min}$.
- L'angle de tir du redresseur ajusté pour donner $I_d = I_{ord}$.
- Le robinet de transformateur du redresseur ajusté à donner α dans une gamme souhaitée.
- Le robinet de transformateur de l'onduleur est réglé pour donner la tension souhaitée.
-

D'après l'équation (III.5), avec $I_{d=}I_{ord}$, nous pouvons écrire les équations de l'onduleur comme suit :

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B_i T_i E_{aci}$$

$$V_{di} = V_{doi} cos\gamma_{min} - \frac{3}{\pi} X_{ci} B_i I_{ord} \quad \textbf{(III.7)}$$

$$\Phi_i = \cos^{-1}(V_{di}/V_{doi})$$

$$P_i = V_{di} I_{ord}$$

$$Q_i = P_i \tan \Phi_i$$

Puisque γ_{min} et I_{ord} sont connus etE_{aci} est donné par la solution AC précédente V_{di}, P et Q_i peut être calculé. Le robinet du transformateur peut être réglé pour donner V_{di} dans la gamme souhaitée.

Les équations du redresseur sont :

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_{ord}$$

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B_r T_r E_{acr} \quad \textbf{(III.8)}$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left[\frac{V_{dr}}{V_{dor}} + \frac{X_{cr} I_{ord}}{\sqrt{2} E_{acr} T_r}\right]$$

Dans les équations ci-dessus, la tension E_{acr}est connue de la solution AC précédente. Le rapport de virage T_r est ajusté pour donner un dans la gamme souhaitée

$$\Phi = \cos^{-1}(V_d/V_{do})$$

$$P = V_d I_d = P_{ac} \quad \textbf{(III.9)}$$

$$Q = P \tan \Phi$$

Les variables P_i, Q_i, P_r et Q_r sont des sorties à utiliser dans la prochaine itération de la solution AC.

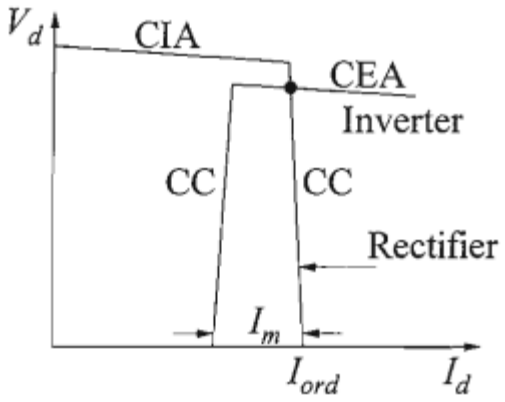


Figure III.8 : Etude le flux de puissance avec le Mode de contrôle 1.

-Mode 2 : onduleur sur commande CC et redresseur sur commande CIA

En mode 2, nous avons :

- L'angle de tir du redresseur $\alpha = \alpha_{min}$.
- L'angle de tir de l'onduleur ajusté pour donner $I_d = I_{ord} - I_d$.
- Le robinet de transformateur du redresseur ajusté pour maximiser la tension.
- Le robinet de transformateur de l'onduleur ajusté de sorte que $\gamma > \gamma_{min}$ et la consommation de var est minimisée.

Avec $I_d = I_{ord} - I_d$, les équations du redresseur sont:

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B_r T_r E_{acr}$$

$$V_{dr} = V_{dor} cos\alpha_{min} - \frac{3}{\pi} X_{cr} B_r (I_{ord} - I_m) \qquad \textbf{(III.10)}$$

$$\Phi_r = \cos^{-1}(V_{dr}/V_{dor})$$

$$P_r = V_{dr} I_{ord}$$

$$Q_r = P_r \tan \Phi_r$$

Dans les équations ci-dessus E_{acr} Est connu de la solution alternative précédente, et I_d est maintenu à $I_{ord} - I_m$ par l'onduleur, le taux de rotation T_r peut être ajusté pour maximiser V_{dr}.

Avec E_{aci} Connu de la solution AC, les équations de l'onduleur peuvent être résolues comme suit :

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B_i T_i E_{aci}$$

$$V_{di} = V_{dr} - R_L I_d$$

$$V_{di} = V_{dr} - R_L(I_{ord} - I_m) \qquad \textbf{(III.11)}$$

$$\gamma = \cos^{-1}\left[\frac{V_{di}}{V_{doi}} + \frac{X_{ci}(I_{ord} - I_m)}{\sqrt{2}E_{aci}T_i}\right]$$

$$\Phi_i = \cos^{-1}(V_{di}/V_{doi})$$

$$P_i = V_{di} I_d = V_{di}(I_{ord} - I_m)$$

$$Q_i = P_i \tan \Phi_i$$

Rapport de virage T_i peut être ajusté pour garantir $\gamma > \gamma_{min}$ et minimiser la consommation de var. Les variables P_i, Q_i, P_r et $Q_r$sont les sorties des calculs à utiliser pour l'itération suivante de la solution AC.

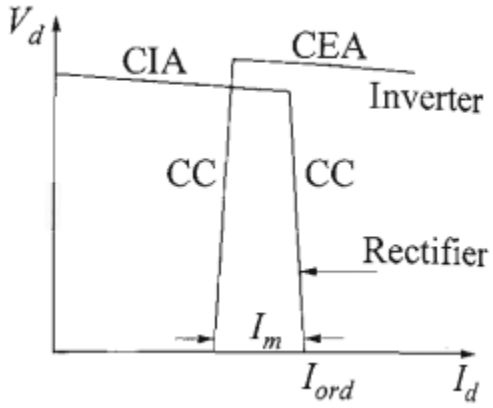


Figure III.9 : Etude le flux de puissance avec le Mode de contrôle 2.

-Mode 3 : redresseur sur commande CIA et inverseur sur caractéristique modifiée

Pour les études de flux de puissance, il suffit généralement de considérer les modes 1 et 2. Cependant, pour les solutions du flux de puissance (solution d'équations algébriques de réseau) associées aux études de stabilité, il est nécessaire de considérer la transition entre les modes 1 et 2. La caractéristique de l'onduleur est modifiée comme illustré à la Figure II.38. Le segment JK, avec une pente positive, fournit un mode de commande plus stable que le segment FK. Une méthode pour réaliser cette caractéristique modifiée consiste à faire fonctionner l'onduleur en mode constant-β.

En mode 3, nous avons :

- L'angle de retard d'allumage du redresseur α_{min}.
- L'angle d'avance à l'allumage de l'onduleur β_c.
- $I_d = I'_d$ tel que $I_{ord} > I'_d > (I_{ord} - I_m)$.

Les équations du système DC sont résolues comme suit pour calculer le courant de ligne.

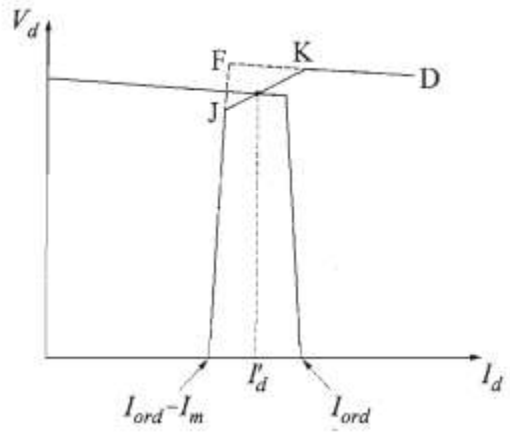


Figure III.10 : Etude le flux de puissance avec le Mode de contrôle 3.

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B_r T_r E_{acr} \qquad \textbf{(III.12)}$$

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B_i T_i E_{aci}$$

Les variables E_{acr}et E_{aci} sont connus à partir de la solution AC précédente.

$$V_{dr} = V_{dor} cos\alpha_{min} - \frac{3}{\pi} X_{cr} B_r I'_d \qquad \textbf{(III.13)}$$

$$V_{di} = V_{doi} cos\beta_c + \frac{3}{\pi} X_{ci} B_{i} I'_d$$

De l'équation de ligne, nous avons :

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I'_d$$

Par conséquent :

$$I'_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_L}$$

$$I'_d = \frac{1}{R_L}\left[V_{dor} cos\alpha_{min} - V_{doi} cos\beta_c - \frac{3}{\pi} I'_d (X_{cr} B_r + X_{ci} B_i) \right]$$

Arrangement, nous avons l'expression suivante pour I'_d en termes de V_{dor}, V_{doi} α_{min} et β_c, dont les valeurs sont connues.

$$I'_d = \frac{V_{dor}cos\alpha_{min} - V_{doi}cos\beta_c}{R_L + \frac{3}{\pi}X_{cr}B_r + \frac{3}{\pi}X_{ci}B_i} \quad \textbf{(III.14)}$$

Avec la valeur de I'_d connus, V_{dr} et V_{di} sont calculés en utilisant l'équation (III.13) Les quantités en courant alternatif peuvent ensuite être calculées comme suit:

$$\Phi_r = \cos^{-1}(V_{dr}/V_{dor})$$

$$\Phi_i = \cos^{-1}(V_{di}/V_{doi})$$

$$P_r = V_{dr}I'_d \quad \textbf{(III.15)}$$

$$Q_r = P_r \tan\Phi_r$$

$$P_i = V_{di}I'_d$$

$$Q_i = P_i \tan\Phi_i$$

Pour les simulations de stabilité transitoire, l'action du changeur de prises est trop lente et donc non prise en compte.

Pour une condition donnée du système, les modes de fonctionnement du redresseur et de l'onduleur peuvent ne pas être connus avant la résolution des équations du système. Par conséquent, la procédure suivante peut être utilisée pour établir des modes de fonctionnement et résoudre les équations AC et DC.

1. on résout des équations en courant alternatif, sortie E_{acr}, E_{aci}.

2. (a) On résout les équations du mode 1. Si $\alpha > \alpha_{min}$, en mode 1 la condition est satisfaite, on passe à l'étape 3.

(b) Si $\alpha < \alpha_{min}$ on résout les équations du mode 2.

Si $\gamma > \gamma_{min}$ la condition Mode 2 est satisfaite, on passe à l'étape 3.

(c) Si $\gamma \leq \gamma_{min}$ min » on résout les équations du mode 3.

3. On calcule P_i, Q_i, P_r et Q_r Si le décalage est supérieur à la tolérance ,on revenait à l'étape

1 et résoudre des équations en courant alternatif.

5. Si la non-concordance est inférieure à la tolérance, la solution est terminée.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a discuté les différentes caractéristiques de contrôle des systèmes HVDC, les bases de contrôle et la stabilisation d'un mode de contrôle, ainsi que la modélisation des systèmes HVDC dans les études de flux de puissance.

CHAPITRE IV

APPLICATION

IV.1 Introduction

La résolution du problème de l'écoulement de puissance nous permet de déterminer les valeurs du module et de la phase de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement données. Ce qui nous permettra de calculer les puissances transitées et générées et les pertes.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence de l'implantation d'un dispositif VSC-HVDC de type dos-à-dos dans un réseau électrique de 15 nœuds sur l'écoulement de puissance.

IV.2 structure d'une liaison VSC-HVDC

Un système HVDC à base de VSC est constitué des convertisseurs, des transformateurs, des inductances, des capacités CC et des câbles à courant continu (Figure IV.1).

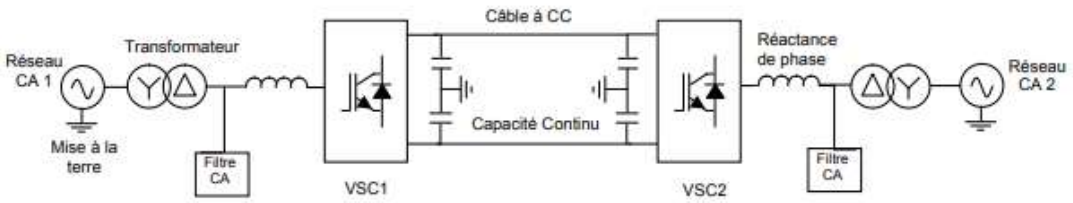


Figure IV.1 : Les composants d'une liaison VSC-HVDC.

1. Convertisseurs :

Les convertisseurs sont des VSC utilisant des semi-conducteurs de puissance IGBT. Les deux convertisseurs sont identiques. L'un fonctionne comme un redresseur, l'autre nécessairement comme onduleur. Les deux convertisseurs peuvent être connectés directement (station dos à dos), ou par l'entremise d'un câble à courant continu. Cela dépend de la nature de l'application de la liaison.

2. Transformateurs :

Évidemment, les convertisseurs sont connectés aux systèmes CA par des transformateurs. La fonction la plus importante des transformateurs consiste à transformer la tension CA à des valeurs adéquates pour le bon fonctionnement du convertisseur. Un transformateur permet des fonctions supplémentaires comme l'adaptation de la tension, l'association d'unités de conversion ou l'isolement vis-à-vis de la composante homopolaire. L'inductance de fuite des transformateurs utilisés dans ce mode de transport est généralement entre 0,1pu et 0.2pu.

3. Réactances de phase :

La réactance de phase peut être soit une inductance, soit l'inductance de fuite du transformateur d'interface, soit une combinaison des deux. Cette inductance est nécessaire pour

pouvoir connecter l'unité de conversion et le réseau alternatif qui sont deux sources de tension. Elle transforme ainsi une différence de tension entre le réseau et le convertisseur en courant circulant entre ces derniers. Les réactances de phase sont utilisées pour contrôler à la fois les puissances active et réactive. Elles fonctionnent également comme des filtres à courant alternatif pour réduire les harmoniques de rangs élevés causés par le fonctionnement des convertisseurs VSC. Généralement, la valeur de la réactance est de 0.15 pu.

4. Capacité continue :

La capacité continue a pour fonction de maintenir une tension continue stable pendant les commutations des interrupteurs de l'unité de conversion. Sa valeur doit être suffisante pour limiter l'ondulation de la tension continue mais c'est au détriment du coût, du temps de réponse du système et de l'encombrement qui augmentent en proportion. Le dimensionnement de cette capacité dépend de la tension continue nécessaire. Toute inductance parasite entre cette capacité et les interrupteurs est nocive, particulièrement à cause des surtensions apparaissant lors de la coupure d'un courant inductif. Cette capacité doit donc être placée au plus près des interrupteurs, même si elle n'est pas représentée ainsi sur les schémas.

5. Filtres :

En fonction du réseau alternatif, des filtres peuvent être nécessaires pour empêcher toute pénétration d'harmoniques vers la station de conversion. Ces filtres sont souvent omis, d'autant plus qu'aucune compensation de réactif n'est nécessaire. D'autre part, la fréquence élevée des commutations dans l'unité de conversion rend les harmoniques qu'elle génère plus nocifs pour le matériel mais également plus faciles à filtrer. Aussi, ces filtres permettent de cantonner les harmoniques HF à l'intérieur de la station de conversion. Des filtres peuvent être installés sur le bus continu pour limiter l'ondulation de tension continue sans pour autant augmenter la valeur de la capacité continue, dans les cas où cette dernière est limitée par d'autres contraintes.

6. Inductance continue :

Une inductance peut être ajoutée en série dans le circuit continu pour atténuer les harmoniques sans augmenter la capacité continue. Une autre fonction de cette inductance est de modifier la fréquence de résonance du circuit continu, au cas où celle-ci est trop proche d'une fréquence générée par le convertisseur. Il faut noter qu'une inductance série modifie la dynamique du système en s'opposant aux variations brutales du courant continu, donc de la puissance active transmise.

7. Mise à la terre du point neutre :

Le point neutre, point milieu de la capacité continue, est mis à la terre de façon à imposer deux tensions symétriques par rapport au potentiel nul sur les pôles positif et négatif, pour une utilisation optimale des câbles connectant les deux stations de conversion. Cela peut être fait par une mise à la terre directe ou via des éléments passifs (inductance, filtre, résistance, parafoudre)

8. Disjoncteur principal :

Un disjoncteur situé au point de connexion sert à (dé)-connecter la station de conversion et le réseau alternatif. Il peut être équipé de résistances de pré-insertion pour limiter la pointe de courant d'enclenchement lors de la charge des capacités continues via les diodes de roue libre.

9. Disjoncteur continu rapide :

Les convertisseurs source de tension craignent les courts-circuits sur leur côté continu car le défaut est alimenté par les diodes et ne peut être éliminé que par l'ouverture du disjoncteur principal. Dans ce cas, les courants de défaut ont le temps d'atteindre des amplitudes rédhibitoires pour les composants d'électronique de puissance. Ces défauts sont extrêmement rares si la liaison est effectuée par câbles mais fréquents dans le cas de lignes aériennes. Une liaison à convertisseur source de tension par ligne aérienne peut nécessiter l'ajout en série d'un disjoncteur rapide pour la protéger des défauts continus. Vu le temps d'ouverture exigé (de l'ordre de la milliseconde), il faut utiliser un interrupteur statique, ce qui pose des problèmes de coûts et de pertes joule dans ce composant supplémentaire.

10. Câbles à courant continu :

Dans l'immense majorité des cas, les lignes à haute tension sont alimentées en courant alternatif triphasé ; mais dans le cadre particulier de certaines traversées sous-marines ou de lignes enterrées, le transport se fait en courant continu (HVDC) pour des raisons d'économie, d'encombrement et de fiabilité. (ex : Liaison France-Angleterre ; Grondines, 100 km au sud-ouest de Québec). Les lignes souterraines sont utilisées dans quelques cas particuliers : transport sous-marin, franchissement de sites protégés, alimentation de grandes villes, de métropoles ou autres zones à forte densité de population. De même, ces lignes sont plus répandues en basse et moyenne tension, moins en haute tension du fait des couts prohibitifs. On note que l'isolation de ce type de ligne à courant continu s'est d'abord faite par papier imprégné d'huile, puis par de nouvelles technologies : isolation synthétique (LIS, XPLE), isolation gazeuse (LIG, CIG), supraconducteurs.

IV.3 Avantages de technologie VSC-HVDC

La technologie VSC-HVDC offre des avantages compétitifs pour les systèmes d'énergie actuels Comme :

-L'échange des puissances active et réactive peut être contrôlée de manière flexible et indépendante

- Aucun problème de défaut de commutation
- Aucun communication n'est requise entre les stations interconnectées. **[30]**
- Le VSC-HVDC permet de contrôler la tension au point de raccordement et de éventuellement de Participer au réglage de la fréquence. Ainsi, il peut être utilisé pour améliorer le niveau de la Stabilité du réseau AC.

IV.4 Fonctionnement des convertisseurs VSC

Le fonctionnement d'un convertisseur VSC-HVDC peut être expliqué en considérant chaque terminal en tant que source de tension connectée en série à un réseau AC par l'intermédiaire de réactances de phase (Figure IV.2). Le convertisseur VSC fournit, à partir de la tension continue UDC, une tension alternative réglable U_v de la forme :

$$U_v = \frac{1}{2} U_{DC} M . \sin(wt + \delta) + harmonique \quad \textbf{(IV.1)}$$

Où M est l'indice de modulation, ω, δ sont respectivement la fréquence et le déphasage de la tension U_V. Les quantités M, ω et δ peuvent être ajustées pour contrôler les flux de puissance active et réactive. **[11]**

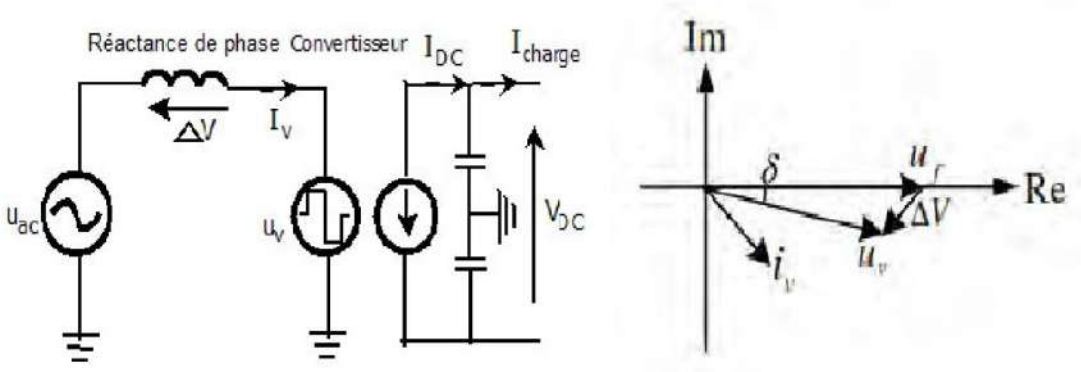


Figure IV.2 : Circuit équivalent d'un convertisseur VSC connecté à un système AC.

La puissance active circulant entre le système AC et le convertisseur peut être contrôlé par le déphasage δ entre la tension U_v générée par le VSC et la tension AC U_f . En négligeant les pertes au niveau de la réactance de phase, la puissance active P est calculée par l'expression suivante :

$$P = \frac{U_f U_v \sin\delta}{X} \quad \textbf{(IV.2)}$$

Où X est la réactance de phase La puissance réactive est déterminée par :

$$Q = \frac{U_f(U_f - U_v \sin\delta)}{X} \quad \textbf{(IV.3)}$$

Dans une connexion VSC-HVDC, la puissance active du côté AC est égale à la puissance active transmise du côté DC (pertes négligeables). En pratique, l'un des deux convertisseurs contrôle la transmission de puissance active tandis que l'autre commande la tension DC. La génération de la puissance réactive et la consommation peuvent être utilisées pour commander la tension alternative du réseau.

IV.5 Domaine d'application de I 'écoulement de puissance

Les applications de la fonction écoulement de puissance peuvent être classées en application d'exploitation :

-Minimisation de cout exploitation de réseau électrique.
-Minimisation de pertes de transmission.
-Amélioration de profil de tension.
-Amélioration de la stabilité de tension.
-Maximisation de la puissance transmissible.

IV.6 Equations de l'écoulement de puissance

Le flux de puissance à travers un système VSC-HVDC peut être obtenu sur la base du schéma équivalent illustré dans la Figure (IV.3). Les puissances dans les nœuds, i a j (tel que $i = k, m; j = k, m; avec\ j \neq i$) (m et k sont les extrémités AC de schéma équivalent la Figure (IV.3). sont données par les équations suivantes **[31]** :

$$P_{ij}^{inj} = V_i^2 G_{ci} - V_i V_{ci}[G_{ci}\cos(\theta_i - \theta_i) + B_{ci}\sin(\theta_i + \theta_{ci})] \quad \textbf{(IV.4)}$$

$$Q_{ij}^{inj} = -V_i^2 B_{ci} - V_i V_{ci}[G_{ci}\cos(\theta_i - \theta_i) - B_{ci}\sin(\theta_i + \theta_{ci})] \quad \textbf{(IV.5)}$$

Où : $G_{ci} + JB_{ci} = {}^{1}\!/_{\vec{Z}_{ci}}$ **(IV.6)**

Le flux de puissance dans le convertisseur relié au nœud i = k, m sont donnés par :

$$P_{ci} = V_i^2 G_{ci} - V_i V_{ci}[G_{ci}\cos(\theta_i - \theta_i) + B_{ci}\sin(\theta_i + \theta_{ci})] \quad \textbf{(IV.7)}$$

$$Q_{ci} = -V_i^2 B_{ci} - V_i V_{ci}[G_{ci}\cos(\theta_i - \theta_i) - B_{ci}\sin(\theta_i + \theta_{ci})] \quad \textbf{(IV.8)}$$

V_{ci} Est l'amplitude de la tension de côté alternatif du convertisseur connecte au noeuds i et k est donné par :

$$V_{ci} = \frac{M_{ci}V_{ci}}{2\sqrt{2}} \quad \textbf{(IV.9)}$$

Avec :M_{ci} indice de modulation $0 \leq M_{ci} \leq 1$

V_{ci} est la tension moyenne aux bornes du condensateur
Les contraintes opérationnelles considérées dans le modèle sont :

$$\begin{cases} V_{ci}^{min} \leq V_{ci} \leq V_{ci}^{max} \ \text{(a)} \\ M_{ci}^{min} \leq M_{ci} \leq M_{ci}^{max} \text{(b)} \\ V_{dci}^{min} \leq V_{dci} \leq V_{dci}^{max} \ \text{(c)} \end{cases} \quad \textbf{(IV.10)}$$

Il devrait être noté que la dernière contrainte (c) est appliquée lorsque V_{dci} n'est pas commandé à une valeur spécifique.

La contrainte de l'équation relative à puissance active transitant entre les convertisseurs est obtenue en négligeant les pertes dans les convertisseurs. Pour le schéma (BtB), la puissance est donnée par :

$$Re = \{\vec{V}_{ck}\vec{I}^{*}_{ck} + \vec{V}_{cm}\vec{I}^{*}_{cm}\} = 0. \qquad \textbf{(IV.11)}$$

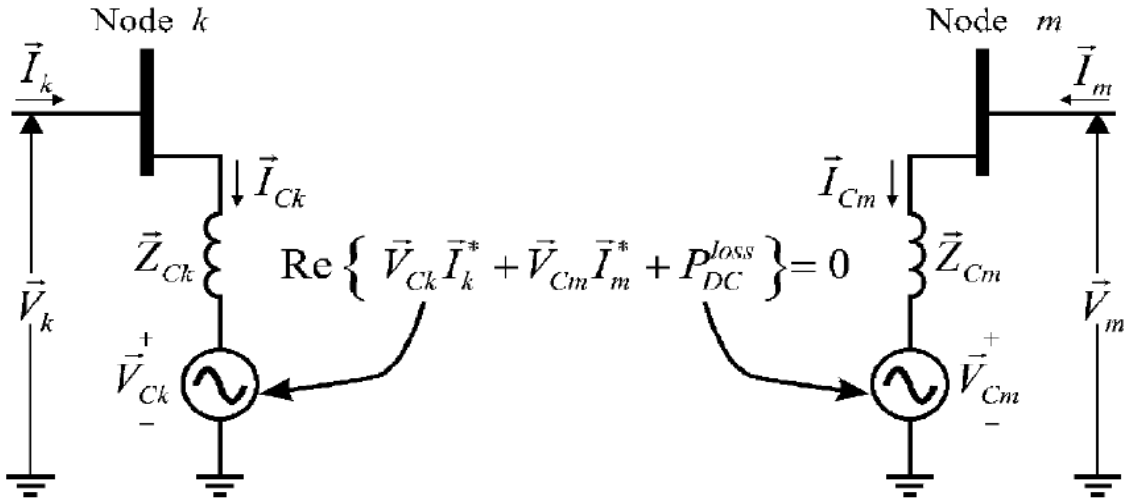


Figure IV.3 : Circuit équivalent d'un lien de transmission VSC-HVDC.

IV.7 Application

Les réseaux électrique actuellement implantes sont caractérisé par leurs charges électriques qui sont nombreuse et distances des centres de production d'énergie .On propose un réseau électrique qui constitué de 4 générateurs, et 15 nœuds :

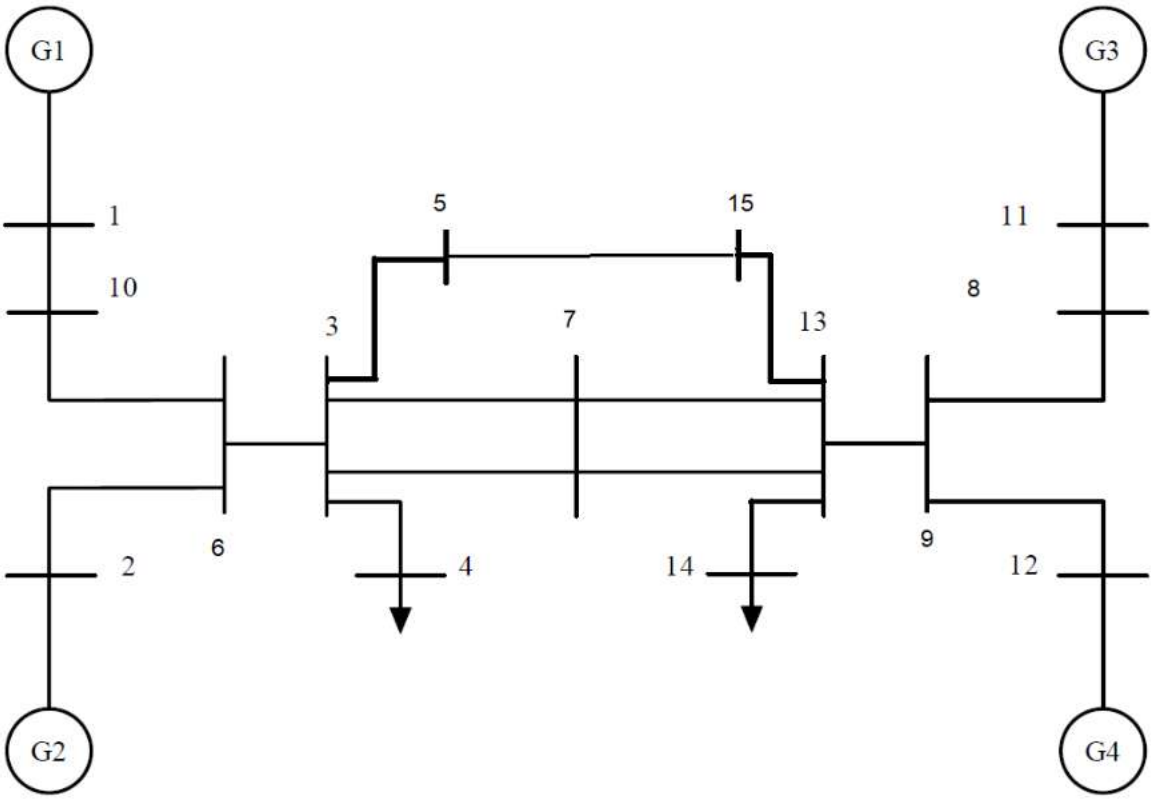


Figure IV.4 : Schéma du réseau électrique de test à 15 nœuds.

On va faire la simulation avec logiciel MATLAB, On va calculer l'écoulement de puissance sur le réseau électrique de 15 nœud proposé en appliquant la méthode de Newton-Raphson par deux différents PST (power system toolbox) PST ROGER et PST HADI SAADAT et après on va insérer un dispositif VSC-HVDC de type dos-à-dos entre les nœuds 5 et 15 et voir son influence sur les paramètres de réseau électrique.

IV.7.1 Application (1) : Sans l'insertion d'un système HVDC

Tableau (IV.1) : Résultat des tensions et des angles en appliquant l'écoulement de puissance sans l'insertion d'un système HVDC sur le réseau de 15 nœuds.

	PST ROGER		PST HADI SAADAT	
Nœud	**V(pu)**	**Angle(˚)**	**V(pu)**	**Angle(˚)**
1	1.030	18.500	1.030	18.500
2	1.010	8.215	1.010	8.215
3	1.000	-7.498	1.000	-7.498
4	0.994	-10.313	0.994	-10.313
5	0.998	-9.142	0.998	-9.142
6	0.998	1.079	0.998	1.079
7	1.062	-10.791	1.062	-10.791
8	1.015	4.827	1.015	4.827
9	0.999	-5.262	0.999	-5.262
10	1.014	11.636	1.014	11.636
11	1.030	11.395	1.030	11.395
12	1.010	1.388	1.010	1.388
13	1.000	-13.361	1.000	-13.361
14	0.991	-18.476	0.991	-18.476
15	1.001	-11.720	1.001	-11.720

Tableau (IV.2) : Résultat des puissances actives et réactives des générateurs en appliquant l'écoulement de puissance sans l'insertion d'un système HVDC sur le réseau de 15 nœuds.

	PST ROGER		PST HADI SAADAT	
Nœud	**P(MW)**	**Q(MVAR)**	**P(MW)**	**Q(MVAR)**
1	7.472	1.453	7.472	1.453
2	7.500	1.177	7.500	1.177
3	0	-2.957	0	-2.957
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	2.000	0	2.000
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	7.160	0	7.160	0
11	7.000	1.348	7.000	1.348
12	0	1.045	0	1.045
13	0	3.797	0	3.798
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Tableau (IV.3) : Résultat des puissances actives et réactives entre quelques nœuds en appliquant l'écoulement de puissance sans l'insertion d'un système HVDC sur le réseau de 15 nœuds.

		PST ROGER		PST HADI SAADAT	
De Nœud	**Au Nœud**	**P(MW)**	**Q(MVAR)**	**P(MW)**	**Q(MVAR)**
1	**10**	7.472	1.453	7.472	1.453
2	**6**	7.500	1.177	7.500	1.177
3	**4**	9.760	1.487	9.760	1.487
3	**5**	2.864	0.195	2.864	0.195
3	**6**	-14.614	2.742	-14.614	2.742
3	**7**	0.495	-0.691	0.495	-0.691
10	**6**	7.472	0.541	7.472	0.541
11	**8**	7.160	1.348	7.160	1.348
12	**9**	7.000	1.045	7.000	1.045
13	**14**	17.670	2.595	17.670	2.595
13	**15**	-2.866	-0.026	-2.866	-0.025
13	**7**	-0.483	-0.599	-0.483	-0.599
13	**9**	-13.837	2.427	-13.837	2.427
8	**9**	7.160	0.512	7.160	0.512

L'erreur de simulation de puissance maximale = 5.02218×10^{-7}MW.

IV.7.2 Application (2) : Avec l'insertion d'un système HVDC

Maintenant on va insérer un dispositif VSC-HVDC de type dos-à-dos entre les nœuds 5 et 15 et faire la simulation en utilisant le mode (1) de modélisation qui nous avons déjà expliqué en chapitre III.

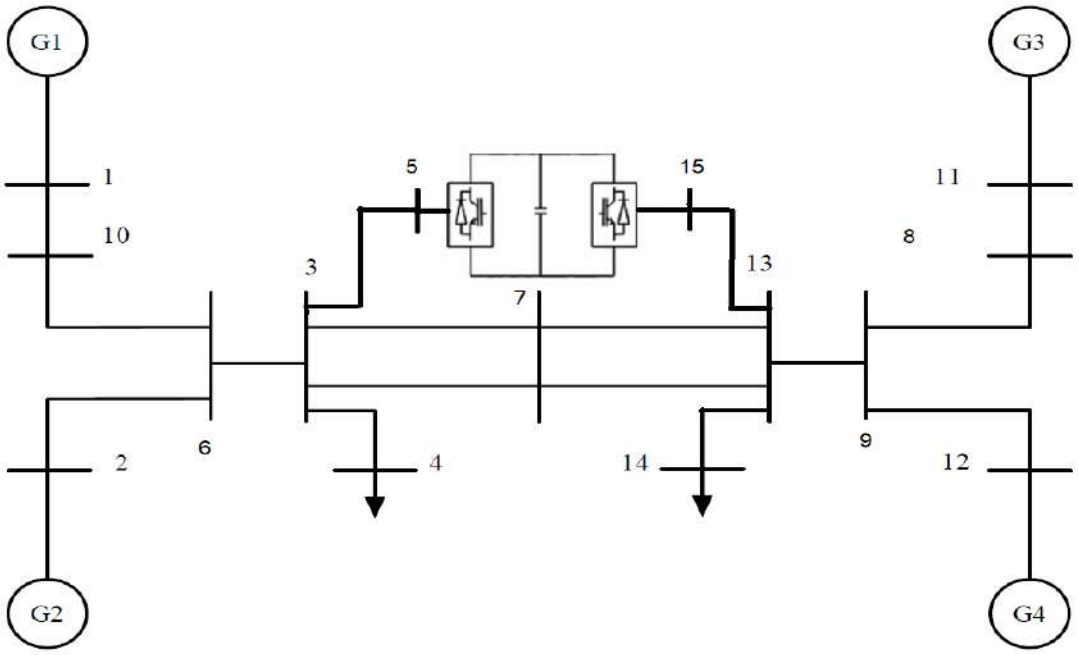


Figure IV.5 : Schéma du réseau électrique de test à 15 nœuds avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15).

Les paramètres du dispositif VSC-HVDC de simulation :

$B_i = 4\,ponts$

$B_r = 4\,ponts$

$X_{ci} = 3\,\Omega/pont$

$X_{cr} = 3\,\Omega/pont$

$T_i = 1$

$T_i = 1$

$V_{basedc} = 500\,kV$

$\alpha_{min} = 5°$

$\alpha_{min} = 30°$

$\gamma_{min} = 18°$

$\gamma_{min} = 25°$

I_{ord}=200 A

Tableau (IV.4) : Résultat des tensions et des angles en appliquant l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) sur le réseau de 15 nœuds.

	PST ROGER		PST HADI SAADAT	
Nœud	**V(pu)**	**Angle(˚)**	**V(pu)**	**Angle(˚)**
1	1.030	18.500	1.030	18.500
2	1.010	7.916	1.010	7.916
3	1.000	-7.873	1.000	-7.873
4	0.994	-10.688	0.994	-10.688
5	0.994	-8.477	0.998	-8.477
6	0.998	0.778	0.998	0.778
7	1.052	-16.961	1.052	-16.968
8	1.015	-7.127	1.015	-7.14
9	0.999	-17.215	0.999	-17.228
10	1.013	11.519	1.013	11.519
11	1.030	-0.558	1.030	-0.560
12	1.010	-10.565	1.010	-10.571
13	1.000	-25.587	1.000	--25.327
14	0.991	-30.430	0.991	-30.442
15	0.894	-24.587	0.892	-24.597

Tableau (IV.5) : Résultat des puissances actives et réactives des générateurs en appliquant l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) sur le réseau de 15 nœuds.

	PST ROGER		PST HADI SAADAT	
Nœud	**P(MW)**	**Q(MVAR)**	**P(MW)**	**Q(MVAR)**
1	7.596	1.492	7.596	1.492
2	7.500	1.194	7.500	1.194
3	0	-2.339	0	-2.339
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	2.000	0	2.000
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	7.160	1.348	7.160	1.348
12	7.000	1.045	7.000	1.045
13	0	3.922	0	3.733
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Tableau (IV.6) : Résultat des puissances actives et réactives entre quelques nœuds en appliquant l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) sur le réseau de 15 nœuds.

		PST ROGER		PST HADI SAADAT	
De Nœud	**Au Nœud**	**P(MW)**	**Q(MVAR)**	**P(MW)**	**Q(MVAR)**
1	**10**	7.596	1.492	7.596	1.492
2	**6**	7.500	1.194	7.500	1.194
3	**4**	9.760	1.487	9.760	1.487
3	**5**	1.048	0.559	1.048	0.560
3	**6**	-14.730	2.801	-14.730	2.801
3	**7**	1.461	-0.594	1.461	0.594
10	**6**	7.596	0.548	7.596	0.548
11	**8**	7.160	1.348	7.160	1.348
12	**9**	7.000	1.045	7.000	1.045
13	**14**	17.670	2.595	17.670	2.595
13	**15**	-1.008	-0.450	-1.008	-0.639
13	**7**	-1.412	-0.325	-1.412	-0.325
13	**9**	-13.837	2.427	-13.837	2.427
8	**9**	7.160	0.512	7.160	0.512

Tableau (IV.7) : Résultat des angles, des tensions et des puissances de redresseur et onduleur en appliquant l'écoulement de puissance avec l'insertion d'un système VSC-HVDC entre les nœuds (5-15) sur le réseau de 15 nœuds.

	PST ROGER	PST HADI SAADAT
$\alpha(^{\circ})$	27.373	27.741
$\gamma(^{\circ})$	18	18
V_{di}(kV)	504.27	503.30
V_{dr}(kV)	524.27	523.30
P_i(MW)	100.85	100.66
P_r(MW)	104,85	104.66

L'erreur de simulation de puissance maximale= 5.2120510^{-12} MW.

IV.8 Commentaire sur les résultats

On a calculé l'écoulement de puissance sans l'insertion d'un système VSC-HVDC sur le réseau électrique de 15 nœuds on a obtenu les résultats des tensions et des angles, et es puissances actives et réactives des générateurs, aussi les puissances actives et réactives des lignes. Après on a inséré un dispositif VSC-HVDC de type dos-à-dos entre les nœuds (5-15) et calculer les mêmes paramètres, les résultats obtenu prévu qu'avec le système HVDC on peut interconnecter entre deux réseaux de même ou diffèrent fréquence, et on peut aussi contrôler les puissances par la variation de courant.

Les résultats obtenus par PST ROGER et PST HADI SAADAT sont très similaires.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait la simulation de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson sur un réseau électrique de 15 nœuds, on a inséré un système VSC-HVDC au réseau pour interconnecter les réseaux et contrôler les puissances obtenues.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L’industrie de l’énergie électrique a subi des changements profonds suite aux différents bouleversements politiques et économiques de plusieurs pays dans le monde. Ce nouvel environnement du marché de l’électricité a mis en évidence une clientèle plus importante et plus exigeante vis-à-vis du fonctionnement des réseaux à travers la flexibilité de leur contrôle, la fiabilité et la qualité de l’énergie offerte sur le marché.

Les moyens classiques de contrôle des réseaux qui étaient les dispositifs d’électromécanique pourraient dans l'avenir s’avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations des réseaux électriques. Il faut compléter leur action en mettent en œuvre des dispositifs d'électronique de puissance ayant des temps de réponse courts.

Notre travail explique la flexibilité du système de transmission HVDC sur l'écoulement de puissance qui détermine l'angle et l’amplitude de la tension dans chaque nœud de réseau électrique. Le système HVDC peut interconnecter entre deux réseaux de même ou diffèrent fréquence, stabiliser les réseaux, et contrôler les puissances et les tensions entre deux réseaux connectés, qui donne des solutions pour plusieurs problèmes opérationnels.

Bibliographie

[1] Martin FUNCK, Joseph VANDENDORPE « Liaisons HVDC: structure, contrôle et modélisation »,These de master, Ecole polytechnique de Louvain, 2016

[2] DRAIDI ABDELLAH « Répartition optimale de puissance utilisant les techniques d'intelligence artificielle », Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine, 2016.

[3] M.RICHARDOT Olivier « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée », Thèse de doctorat INPG, 2000.

[4] Schneider Electric « Architecteur de Réseau de électrique », 2007. B. M Weedy, "Electric Power System", 3rd éd., John Wiley& Sons Ltd., London, 1979.

[5] L.Slimani « optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode de colonie de fourmis », Université de Sétif mémoire de Magister, 2006.

[6] A Hellal « Cours de modélisation et optimisation des réseaux électriques », Département de Génie Electrique, UAT Laghouat, Algérie 2006.

[7] R. Missoum, « Etude d'un dispatching économique des puissance active par les algorithmes de fourmis », Mémoire de Magister, Université de Chlef 2008.

[8] Bouaraguia Abdelmoudjib Benhamada Abdelmounaim « L'écoulement de puissance dans les réseaux De distribution », These de master Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2017.

[9] A.HAMMOUD « Etude de convertisseur haut tension pour la protection et la coordination des réseaux de distribution », Thèse de Doctorat département de génie électrique de l'université Tichreen de Syrie.

[10] T .Jean-Luc, M.Boyra, G.Bergna « Les technologies de liaisons à courant continu pourl'interconnexion des réseaux électriques du pourtour méditerranéen », REE N°5/2011

[11] N. THI THU « Etude des phénomènes des charges d'espace dans des matériaux de câbles et câbles modèles destinés à des applications au transport d'énergie en haute tension contenue (HVDC) », université de Toulouse III discipline génie électrique 2014.

[12] Roberto Rudervall, JP Charpentier, and Raghuveer Sharma « High voltage direct current (hvdc) transmission systems technology review paper », Energy week, 2000:2, 2000.

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

[14] Thorsten Volker « Power transmission from offshore wind farms», Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, (74) :51–59, 2012.

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

[16] ALSTOM grid « HVDC for beginners and beyond », 2008.

[17] M.S. RAMADAN « Commande Non Linéaire et Stabilisation des Systèmes de Transmission VSCHVDC », thèse de Doctorat Génie Electrique -Automatique, universite de Paris sud, 2012-03-15.

[18] B.R. Andersen, L. Xu, est P. Cartwright «Topologies for VSC transmission », Power Engineering Journal, 2002.

[19] G. Venkataramanan and B.K.Johnson « A superconducting DC transmission system based on VSC transmission technologies », IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2003.

[20] HANI AZIZ « Modélisation Et Simulation D'une Liaison HVDC De Type VSC-MMC », université de Montréal, thèse de Doctorat Mars 2015.

[21] B.HOUSSEINI « Prototype rapide a base de FPGA d'un algorithme de contrôle avancé pour le moteur à induction », université de Québec a trios rivières décembre 2010.

[22] Pierre RAULT « Dynamic Modeling and Control of Multi-Terminal HVDC Grids », PhD these, 2014.

[23] S. P. Teeuwsen « Simplified dynamic model of a voltage-sourced converter with modular multilevel converter design », IEEE PE Power System Conf. and Exp., pp. 1-6, Seattle, WA, USA, Mars. 2009

[24] M. Hagiwara et H. Akagi《PWM Control and experiment of modular multilevel converter », IEEE Power Electronics specialists Conference, pp. 154-161, Tokyo, Juin 2008.

[25] B. Gemmell, J. Dorn, D. Retzmann, et D. Soerangr《 Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission », Proc. IEEE Transmission and Distribution Conf. Exp., Milpitas, CA, pp. 1-16, Avril. 2008.

[26] J. Arrillaga « High Voltage Direct Current Transmission », IEE Power Engineering Series 6, Peter Peregrinus Ltd., 1983.

[27] Prabha Kundur « power system stability and control », 1 Mars 1994.

[28] E.W. Kimbark « Direct Current Transmission, Wiley-Ioterscience », 1971.

[29] B.K. Johnson, F.P. DeMello, et J.M. Undrill, « Comparing FundamentalFrequency and Differential Equation Representation of AC/DC », IEEE Trans.,Vol. PAS-101, pp. 3379-3384, Septembre 1982.

[30] L. Weimers. «HVDC light: a new technology for a better environment», IEEE Power Engineering Review, 1998.

[31] Alejandro Pizano-Martinez, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Member, IEEE, H. Ambriz-Pérez, and Enrique Acha, Senior Member, « Modeling of VSC-Based HVDC Systems for a Newton-Raphson OPF Algorithm», IEEE, Novembre 2007.