الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique
et de l'Informatique



Mémoire de Fin d'Études

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

Option : réseau électrique

THEME

Ecoulement de puissance optimal avec HVDC

Proposé et dirigé par,

Dr. karim. SBAA

Dr. Abdelhalim. TLEMCANI

Préparé et présenté par,

Melle. Naoual KHATTAR

Melle. Selma KETTABI

Remerciements

Nous avant tout tenons de remercier « Allah » le tout puissant qui nous a fait ouvrir les portes du savoir et qui nous a donner le courage et la volonté de réaliser ce mémoire.

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier notre promoteur Monsieur «SEBAA Karim ». A qui nous a fait proposer ce sujet, pour tout ces efforts et aides sa disponibilité qui a fait preuve tout au long de ce travail et ces précieux conseils.

Mes vifs remerciements au membre de jury examinatrices d'avoir accepté de composer nôtre jury.

Avec un grand remerciement et reconnaissance à mes enseignants qui m'ont appris durant toutes mes étapes d'étude.

DEDICACE

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail recherché.

- Aceux qui passé des nuit trops longues pour mon bonheur , et qui se sont fatigués pour mon repos et me poussent vers la réussite e que dieu les protèges et le garde pour nous **MA MERE **
- A ma chèrs et seul sœur **DJASMINNE**et je souhaite une longue vie pleine de bonheur et de réussite
- A mon cher marié **BILAL**
- A mes chères *Nanati* & *Hadjourti*&*Ratoubti*&*Achoak*
- A mes cousines IMENE ,ASMA,SOUMIA,et à tout mes famille Kettabi etBeldjoharet Aziri et Sans oublier tous mes amis et mes collègues de M2 *Reseaux elctrique*
- A mes professeurs de l'Université de Medea spécialement Monsieurs
  * SEBAA & HAOUASSINE & ABADI & KASSAB*
- A mes chères collégues *SISSI-DJIMI-BASSOUMA*

A *Abd Wahab* & Toute personne qui a aidé de prés ou de loin, je leurs souhaite la réussite et le bonheur jusqu'à l'éternité merci

KETTABI SELMA



Résumé:

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

Ce travail présente l'étude de l'écoulement de puissance optimal avec un système HVDC et en utilisant le système VSC-HVDC avec l'exécution par la méthode optimisation de points intérieure et voir son l'influence sur les paramètres de réseaux électrique

Abstract :

The traditional method of control of the networks which were the devices of electromechanical could in the future S prove too slow and insufficient to answer effectively the disturbances of the electrical communications .il will thus be necessary to supplement their action implement of them devices of electronics of power having short response times.

This work presents the study of the optimum flow of capacity with a system HVDC and by using system VSC-HVDC with the execution by the method interior optimization of points and to see its influence on the parameters of networks electrical supply

Acronymes

CAHT	Haute tension à courant alternatif (HVAC)
CCHT	Haute tension à courant contenu
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolé (Insulated Gate Bipolar Transistors)
GOT	Gate turn off thyristor
MOSFET	Metal oxide substrate field effect transistor
CSC	Convertisseur source de courant
PWM	Pulsation with modilation MLI
LCC	Line Commutated Converters
VSC	Convertisseur source de tension (Voltage Source Converter)
HVDC	Haute tension à courant continue (Hight Voltage Direct Courant)
DC	Direct Courant
AC	Courant alternatif (alternatif courant)
CC	Courant continu
HT	Haut tension
THT	Très haut tension
OPF	Optimal Power Flow

Symbole

P	Puissance active
Q	Puissance réactive
V	Tension complexe
PG	Puissance active générée
QG	Puissance réactive générée
PD	Puissance active de la charg
QD	Puissance réactive de la charge
Yij	Admittance entre deux nœuds
Ybus	Matrice admittance nodale
Zbus	Matrice impédance nodale
Tol	Erreur admissible

SOMMAIRE

Introduction générale…….. 01

CHAPITRE I
Généralité sur les systèmes HVDC

I.1.Introduction ……..……. 03
I .*2.*Un peu d'historique ……..... 03
I .3.Les inconvénients des systèmes AC maillés…… 04
I.4.Les point clés de la transmission en courant contenu…… 04
I.5. Avantage d'un système de transmission à CC à haute tension 05
I.6. Les composant du système HVDC……..…… 06
I.7. Systèmes de conversion d'énergie ……..…… 07
I.7.1. Système convertisseur à commutateur LCC ……..…… 07
I.7.2.Système VSC……..……..…….. … 09
I.8. Configurations d'une transmission à courant continu 10
1.8. 1. La liaison monopôle …….....…….....……. ……..... 10
1.8. 2. Transmission bipolaire…….....…….....……. ……..... 11
1.8.3. Systèmes dos à dos…….....…….....……. ……... 13
I.8.4. Un système multi-terminal ……..…….....……. … 14
1.9. Conducteur de retour……..…….....……. …… 15
I.9.1.La liaison souterraine ……..…….....……. …… 16
I.9.2.La liaison sous-marine ……..…….....……. …… 16
I.10.Topologies de convertisseur à deux niveaux en source de tension (VSC) 16
I.11.Conclusion……..…….....……. …… 20

CHAPITRE II
ECOULMENT DE PUISSANCE OPTIMAL

II.1. Introduction……..…….....……. …… 21
II.2. Modélisation des éléments électriques……..…….....……...… 21
II.2.1. Modélisation des générateurs……..…….....……..…. 21
II.2.2. Modélisation des transformateurs……..…….....……. 22
II.2.3. Modélisation d'une charge……..…….....……. …… 23
II.2.4. Modélisation d'une compensation shunt..…….....……. 24
II.2.5. Modélisation d'une ligne de transport 24
II .3. Ecoulement de puissance……..…….....……... 25
II .3.1. Définition ……..…….....……. …….. 25
II .3.2. Calcul de l'écoulement de puissance……..…….....…… 25

II.3.3 Techniques de calcul d'écoulement de puissance……..……..... 26
II .3.3.1. Calcul de l'E.P par la méthode de Gauss-Seidel..……..... 26
II .3.3.2. Calcul de l'E.P par la méthode de Newton-Raphson…...……..... 28
II.3.3.3. Calcul de l'E.P par la méthode découlée rapide (*FD)*..……..... 30
II .4.Problème de l'écoulement de puissance optimal.…..……....……..... 32
II .4.1.Formulation de problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF) 32
II .4.2. Contraintes d'égalités……..…….....……..... 33
II .4.3.Contraintes d'inégalités……..…….....…… 33
II .4.4.Fonction objective……...…….....…….. …… 35
II.4.5.Méthodes classiques appliquées au problème de l'écoulement de puissance optimal……. ……...…….....…….……. 35
II .4.6.Résumé sur la formulation de l'OPF……. ……. …...…….. 34
II.4.6.1. Méthode de point intérieur 35
II .5.Conclusion ……...…….....……. ……. …...…… 37

CHAPITRE III
CALCULE DU OPF AVEC L'INTEGRATION D'UN HVDC

III.1.Introduction……...…….....……. ……. …...……... 39
III.2. Etude du système VSC-HVDC……...…….....……. ……. 39
III.3 Les avantages de technologie VSC-HVDC …….. 40
III.4 Domaine d'application de I 'écoulement de puissance optimal…….. 40
III.5. les équations d'écoulement de puissance……...…….....…… 40
III.6 Fonctionnement des convertisseurs VSC……. 42
III.7. Application d'un HVDC VSC de type Beck to Beck……. ……. …..... 44
III.7.1. Application(1)……...…….....……..……..... 44
III.7.1.1 les résultats de programmation ……...…….....…….. 44
III.7.2. Application(2)……...…….....……. …… 49
III.7.2.1 les résultats de programmation …….....…… 50
III.8 Commentaire……. 54
III.9.Conclusion……...…….....……. ……. …...…… 55
Conclusion général ……...…….....……. ……. …...……. 56

Liste des figures

Figure I.1.L'évolution de la puissance transmise en HVDC …….. 3

Figure I.2. Comparaison des cout de lignes aériennes AC et DC…….. 5
Figure I.3. les composants d'un système HVDC……... 7
Figure I.4.Installation de liaison type HVDC-CSC ……. 8

Figure I.5. Schéma d'un HVDC-LCC ……. …….. 8
Figure I.6 installation de liaison type HVDC-VSC…….. …….. 9
Figure I.7. Schéma d'un HVDC-VSC 10
Figure I.8. Configuration monopolaire, retour par terre……... 10
Figure I.9. Configuration monopolaire, reour métallique……... 11

Figure I.10. Configuration Monopolaire, point intermédiaire a terre……..... 11

Figure I.11.configuration bipolaire d'un HVDC……..... 12
Figure I.12. Configuration bipolaire d'un HVDC , retour métallique 12
Figure I.13. Configuration bipolaire d'un HVDC avec convertisseur connecté on série 13
Figure.I.14. Schéma d'une ligne Beck to Beck(Dos a Dos) ……..... 14

Figure I.13. Configuration multi-terminaux d'un HVDC……..... 15
Figure I.16. Typologie de convertisseur en source de tension a deux niveaux……. 17
Figure I.17 La forme d' onde de la tension …. ……..……..…. 17
Figure II.1. Le modèle d'une génératrice……..... 22

Figure II.2. Une source de tension…….....……..……... 22

Figure II.3. Modèle de transformateur de puissance ……..... 23

Figure II.4. Modèled'une charge électrique ……..……..... 24

Figure II.5.Modèle des éléments shunt ……...……... 24
Figure II.6. Modèle en π de ligne de transport 25

Figure. III.1. Lien de transmission de VSC-HVDC……... 39

Figure.III. 2. Circuit équivalent du lien de transmission de VSC-HVDC. ……. 42
Figure.III.3 Circuit équivalent d'un convertisseur VSC connecté à un système AC…… 43

Figure III.4. Schéma d'un réseau test a13 jeux de barres……. 44
Figure III.5. Schéma d'un réseau test a13 jeux de barres avec un VSC-HVDC 46

Figure III.6. Les puissances actives générées 48
Figure.III.7. La variation de tension en fonction des nœuds …… 48

Figure III.8. Le réseau IEEE-30 nœuds……...……...… 50
Figure III.9. la variation de la tension dans les différents emplacements……... 54

Liste des tableaux

Tableau I.1. Projets VSC-HVDC……..……..…….. 18
Tableau III.1 Données de programmation ……..…… 44
Tableau III-2 Résultat de la tension et l'angle avec la méthode d'optimisation avec intérieur point sans HVDC ……..…….. 45
Tableau III-3 Résultat de puissance actif et réactif, avec la méthode d'optimisation avec intérieur point……..…….. 45
Tableau III-4 Ecoulement de puissance optimal avec un VSC dans les nœuds (8,9) avec une puissance transmise de 450MW ……..…… 46
Tableau III-5 Ecoulement de puissance optimal avec un VSC dans les nœuds (5,6) avec une puissance transmise de 600 MW ……..…… 47
Tableau III-6 Comparaison entre les puissances actives transite dans les réseaux…….. 49
Tableau III-7 Comparaison entre les résultats obtenus…….. 49
Tableau III-8 Ecoulement de puissance optimal sans HVDC…… 50
Tableau III-9 Ecoulement de puissance optimal avec HVDC entre les nœuds (15.18)……. 51
Tableau III-10 Ecoulement de puissance optimal avec HVDC entre les nœuds (24,25)…… 52
Tableau III-11 Ecoulement de puissance optimal avec HVDC entre les nœuds (9.10)…….. 53
Tableau III-12 Comparaison des résultats obtenus avec un réseau a30 nœuds …….. 54

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

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

Nous nous intéressons a l'impact de HVDC sur l'écoulement optimal de puissance. C'est-à-dire la minimisation des couts de production .Ou nous mettrons en évidence l'apport apporte par un cet équipement au fonctionnement du réseau électrique

Pour atteindre notre objectif de recherche, ce mémoire est reparti en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une façon générale des concept de base d'un HVDC, leurs nécessités d'application dans le réseau électrique, leurs différents systèmes, puis en présente quelque ouvrages comprenant des dispositif HVDC autour le monde

Le second chapitre a été consacré a l'étude de l'écoulement de puissance optimal ou différents méthodes ont été exposés.

Le troisième chapitre est consacré a la modélisation et l'application d'un d'un systéme de VSC HVDC dans un réseaux électrique l'écoulement de puissance optimal

Et en fin en terminons par une conclusion générale

.

CHAPITER I

GENETALITE SUR LES HVDC

I .1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons expliquer les raisons pour lesquelles la considération des systèmes HVDC apporte un intérêt dans la transmission de puissance par rapport a un transport alternatif. Nous présentons en suite le développement d'utilisation des systèmes avec le progrès dans le domaine d'électronique de puissance

I .*2. Un peu d'historique*

La première transmission en courant contenu 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 que évidemment les composants utilisés étaient des valves a 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 a leur profit. En 1970 on complait plus d'une dizaine de transmission HVDC dans le monde .En 1997 il y avait plus de 50 systèmes HVDC a travers le monde et beaucoup d'autres en phase de conception ou de construction .Aujourd'hui, plus de cent centaine de liaisons ont été construites dans le monde. La figure (I.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. [1]

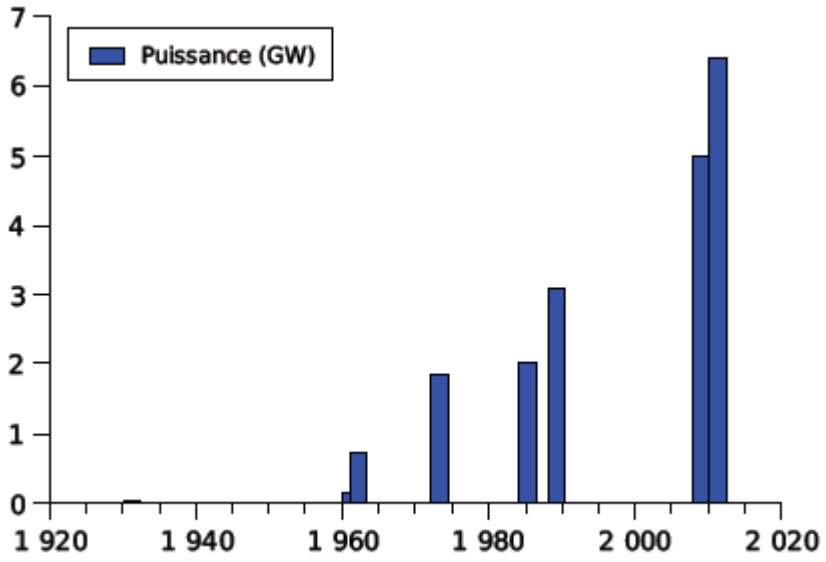


Figure I.1.L'évolution de la puissance transmise en HVDC selon la commission IEEE transport et distribution

I .3. Les inconvénients des systèmes AC maillés [16] :

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 [2]

1.4. Les point clés de la transmission en courant contenu:

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 points clés est bien entendu économique [2] .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 cout de pertes. Il correspond sur la durée de vie de l'équipement a un manque a gagner pour l'exploitation. Cela signifie que lors d'une soumission, ce cout des pertes vient s'ajouter au cout du matériel, des études, de la construction et de la mise en service [1]

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 a 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 objectif 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. [1]

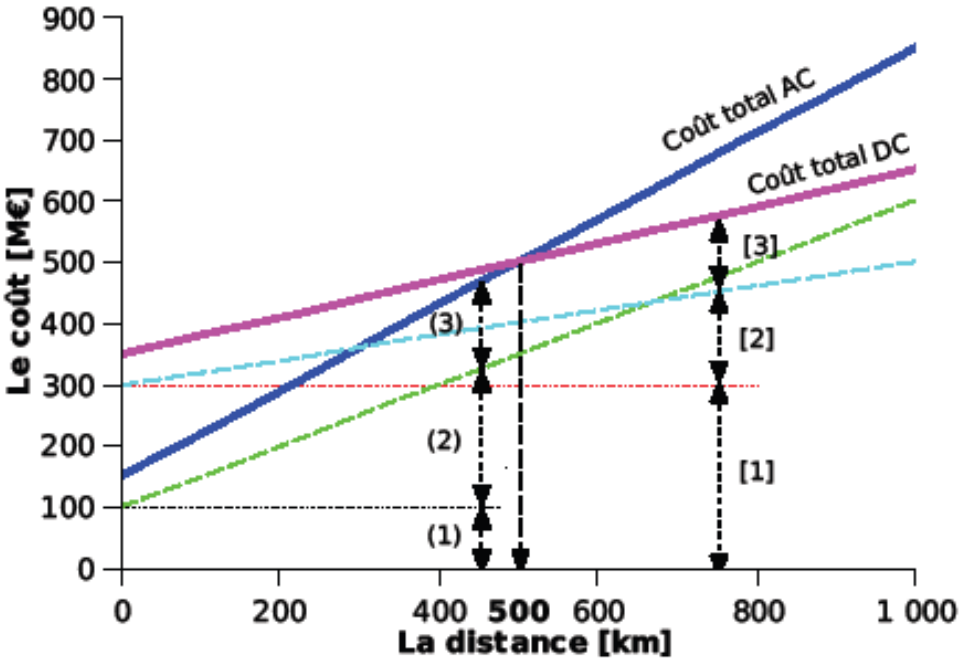


Figure I.2. Comparaison des cout de lignes aériennes AC et DC en incluant les pertes.

(1)cout de station ,(2) cout de ligne , (3) cout de pertes

1.5. Avantage d'un système de transmission à CC à haute tension

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 CCHT est plus efficace que celui du CA, cette évaluation est basée sur les données suivantes [15] :

1) Câble sous-marin, où la capacité élevée cause des pertes additionnelles à CA;

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 CA 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 CA) 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 [16];

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

9) La liaison CCHT(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 CCHT).

1.6. Les composant du systéme HVDC

Les composants qui constituent un système HVDC [1], sont les suivant:

1. Les interrupteurs de puissance sont associés pour former des valves. celles-ci effectuent la conversion AC-DC et elles sont l'élément principal de tout convertisseur HVDC. Chaque valve unique se compose d'un certain nombre de composant (IGBT, par exemple) connectés en série ;
2. Les transformateurs qui modifient le niveau de tension
3. L'inductance de lissage, dont les principaux fonctions sont : -
Limitation des courants de défaut contenus -
Prévention de la résonance dans les circuits a courant contenu
4. Les filtres d'harmoniques , du cote AC d'une station de conversion HVDC, qui ont deux fonctions principales :

-Absorber les courants harmoniques générer par les convertisseur HVDC

-Fournir de la puissance réactive.

En outre les filtres d'harmonique actifs peuvent être un complément aux filtres passif en raison de leur meilleure performance.

5. Parafoudre, dont la tache principale est protéger l'équipement des surtension
6. circuit de transmission DC , qui comprend la ligne de transmission DC, des commutateurs a fort courant contenu et l'électrode de terre
7. système de contrôle et protection

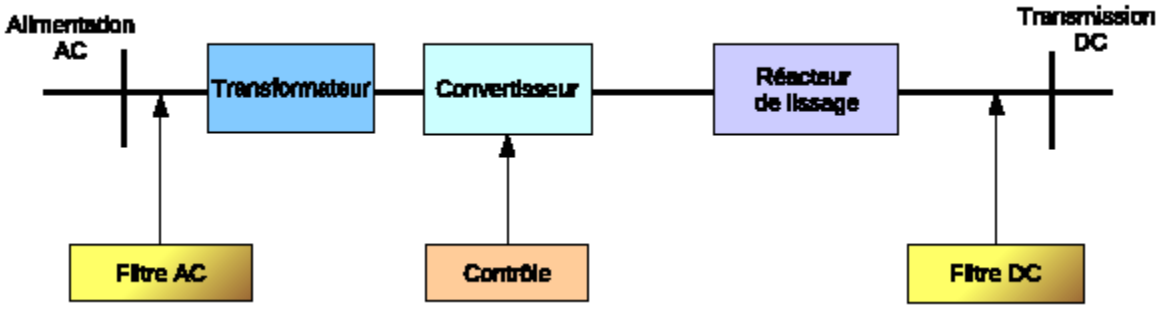


Figure I.3. Les composants d'un système HVDC

1.7. Systèmes de conversion d'énergie

Il existe deux systèmes de conversion d'énergie CCHT :

1.7.1 Système convertisseur à commutateur LCC [16]

Dans la technologie 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 [16]. 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 (I.5). Le flux de puissance peut être inversé par inversion de la polarité de la tension de ligne HVDC [1].

Ainsi, dans le cas des convertisseurs LCC, les câbles utilisés doivent pouvoir supporter les contraintes d'inversion de polarité

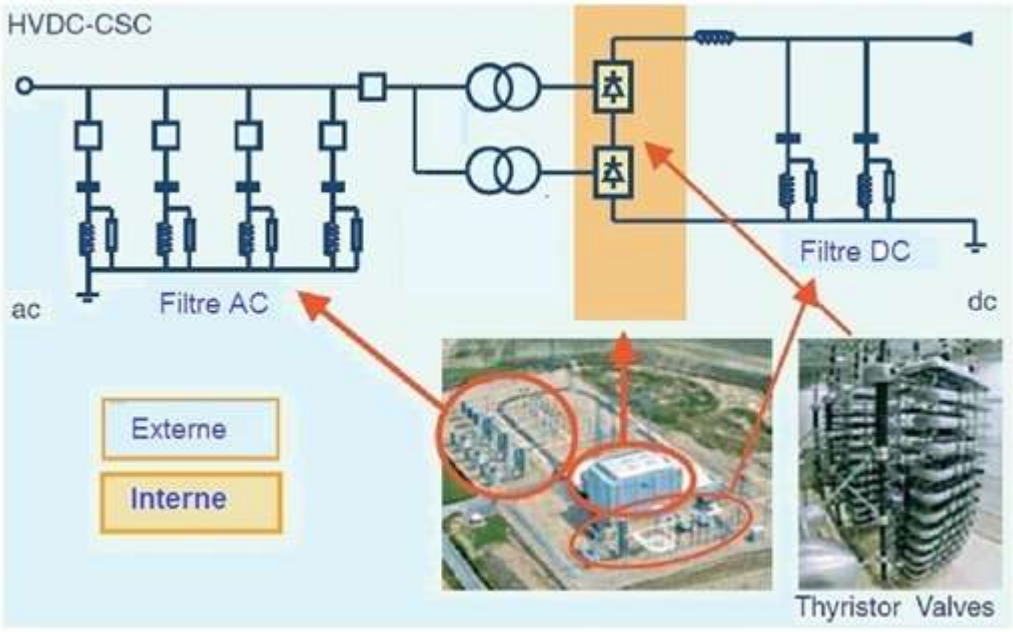


Figure I.4. Installation type d'une liaison HVDC-CSC

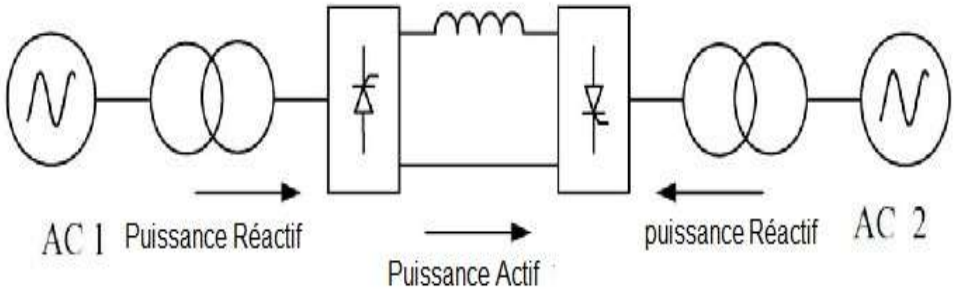


Figure I.5. Schéma d'un HVDC LCC

1.7.2 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} [17], [18].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 [14].

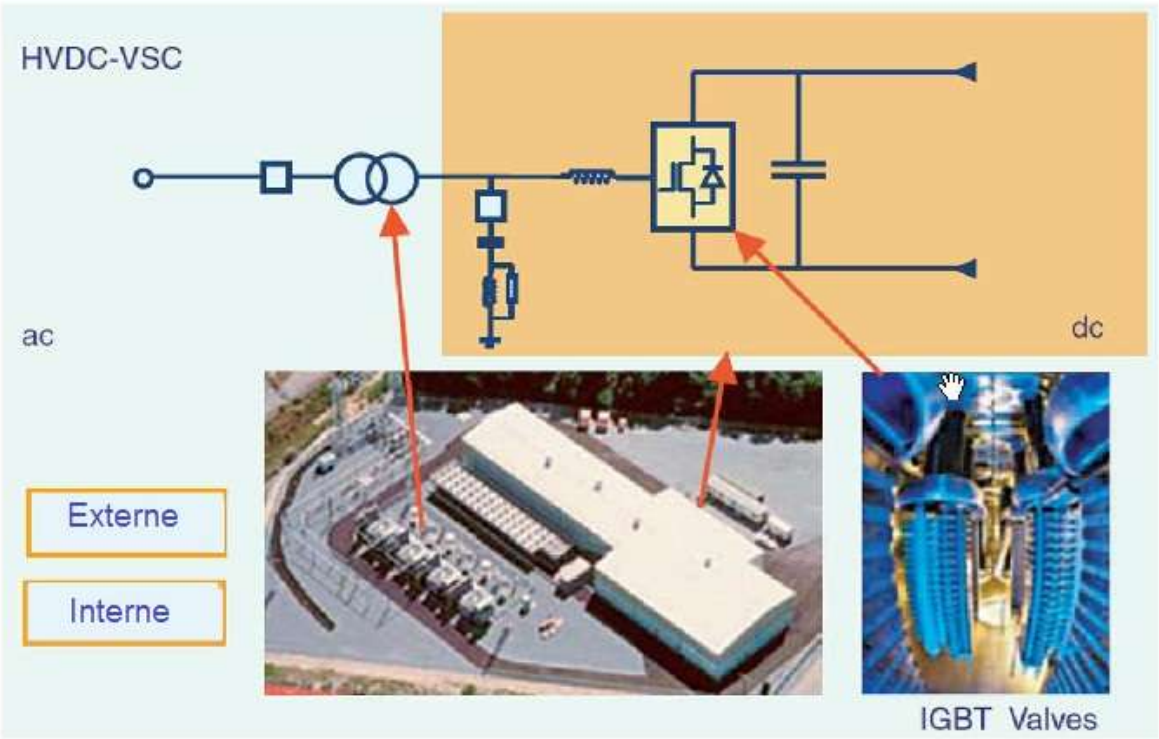


Figure I.6. Installation type d'une liaison HVDC-VSC

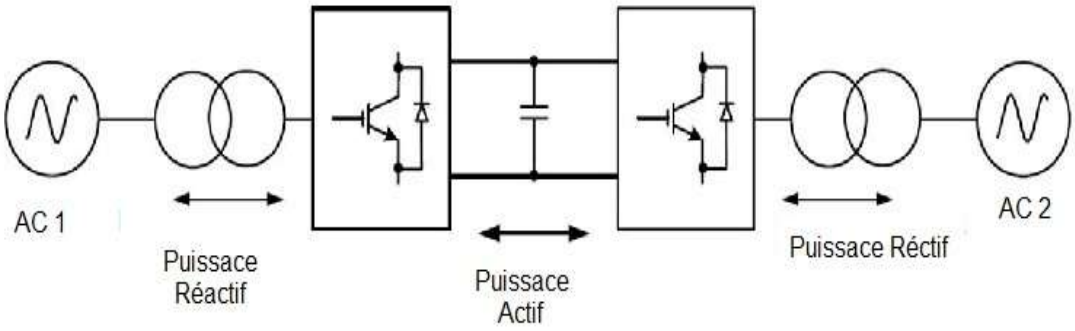


Figure I.7.Schéma d'un VSC -HVDC

1.7. Configurations d'une transmission à courant continu sous plusieurs catégories

Les systèmes CCHT peuvent être classifiés en plusieurs catégories [3] :

1.7. 1. La liaison monopôle : dans une commune configuration (monopôle), une des bornes du redresseur est mise à la Terre, l'autre borne est reliée à une ligne de transmission. Le problème de cette configuration est :

-le retour d'électrodes en eau de mer peut produire le chlore

-le courant non équilibré provoquant un champ magnétique ce qui en résulte des problèmes de navigation pour les bateaux passants au-dessus des câbles sous-marins [6].

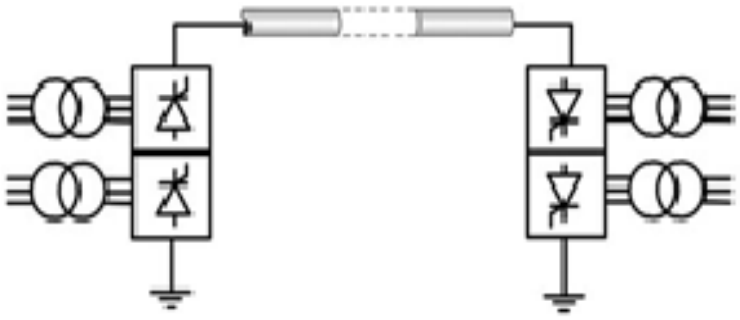


Figure 1.8. Configuration mono polaire a retour par terre

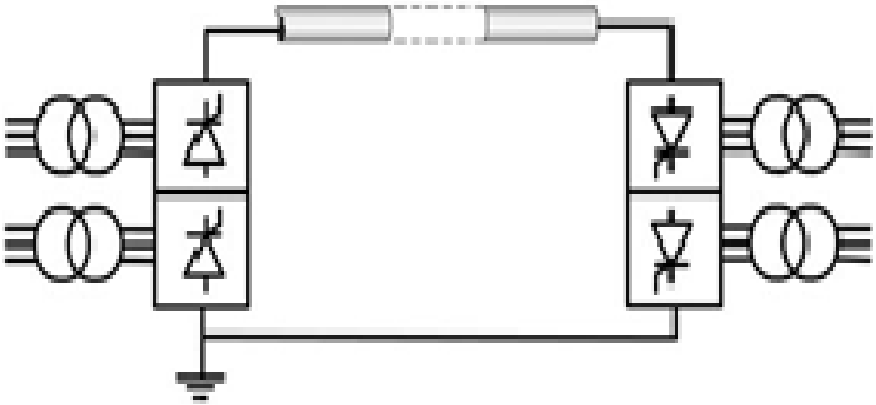


Figure 1.9. Configuration monopolaire a retour métallique

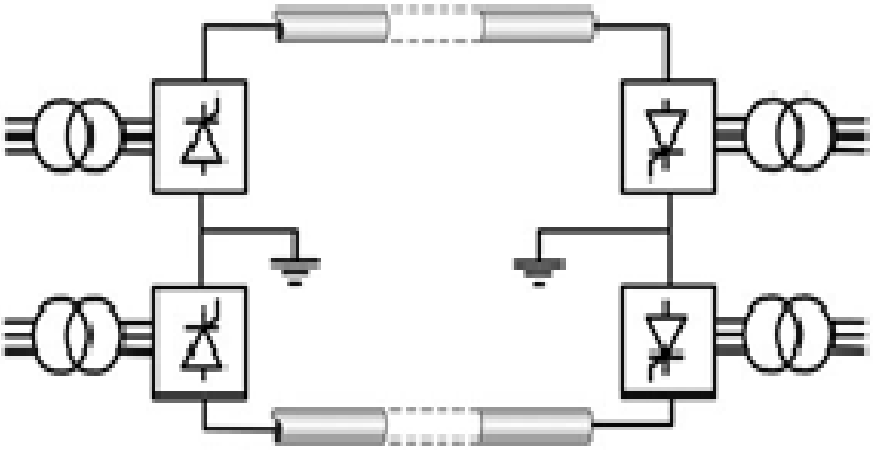


Figure 1.10. Configuration monopolaire, point intermédiaire a terre

1.7. 2. Transmission bipolaire [2] : c'est une transmission par deux conducteurs chacun à un potentiel par rapport à la terre avec une polarité opposée. Cette transmission a les avantages suivants :

- Moins d'effet sur l'environnement, et réduction des pertes (retour de la terre)
- Lorsqu'il y a un défaut sur une ligne, la moitié de puissance peut continuer à être transmise en utilisant les électrodes installées à chaque extrémité de la ligne, en plus de fonctionner comme le système mono-polaire.

et les Inconvénients suivant[6] :

- Une chute de tension importante dans les thyristors.
- L'utilisation des thyristors à courant admissible élevé sont très dimensionnés et très

chères.

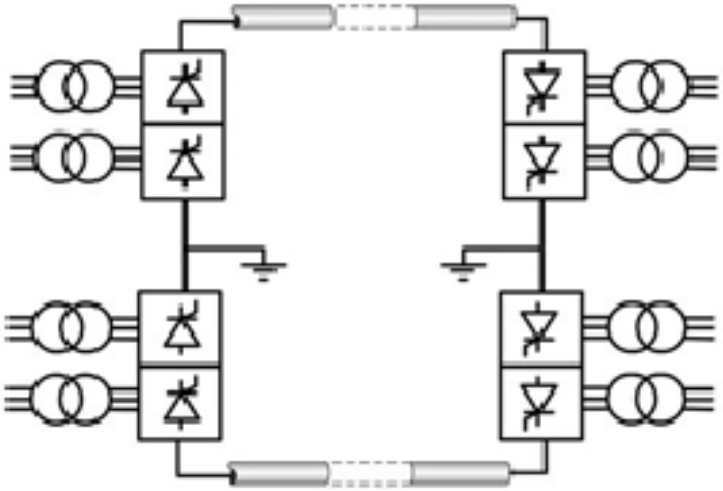


Figure I.11. Configuration bipolaire d'un HVDC

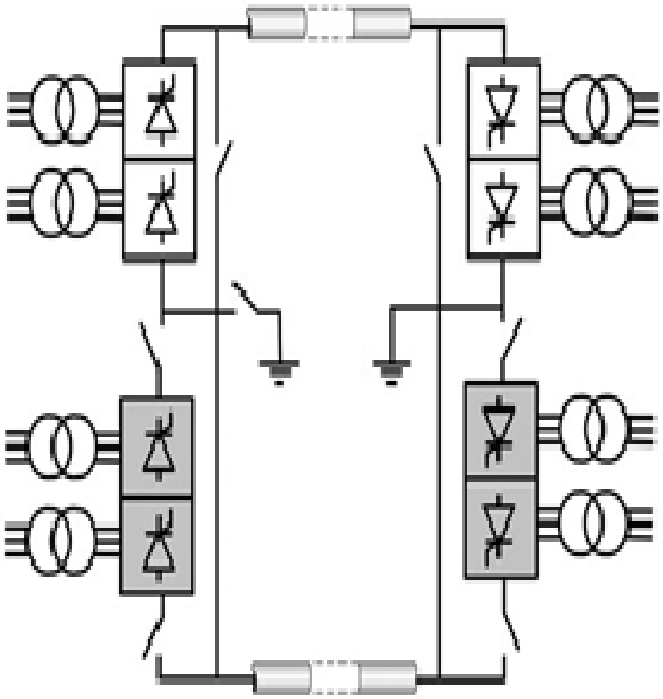


Figure I.12. Configuration bipolaire d'un HVDC, retour métallique

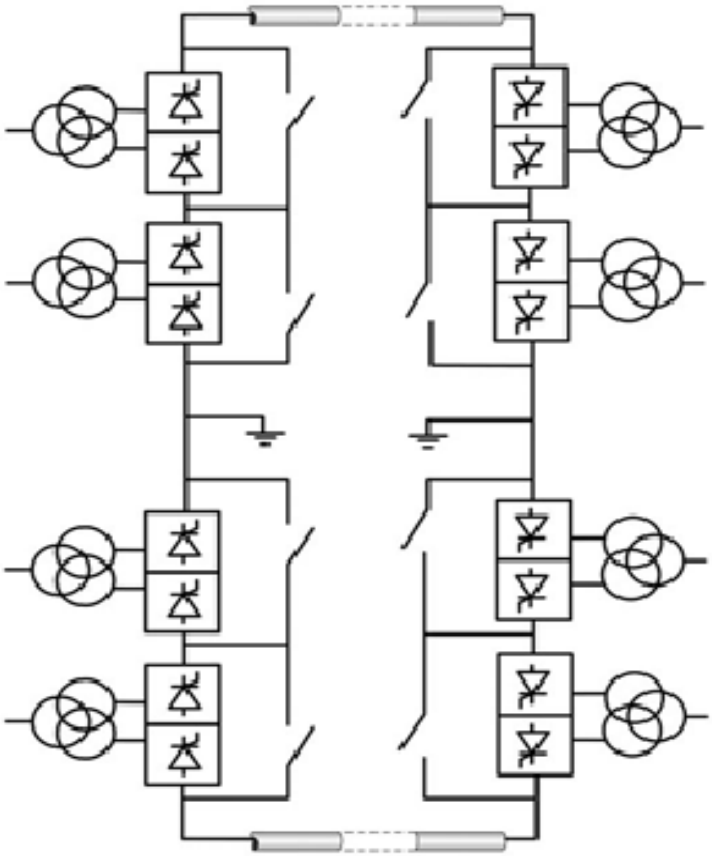


Figure I.13. Configuration bipolaire d'un HVDC avec convertisseur connectés en série

1.7.3. Systèmes CC dos à dos (*Back-to-Back*) [2]

Dans un système de transmission de puissance dos à dos, le redresseur et l'onduleur sont d'une part localisés dans une même station et sont liés par une ligne continue de quelques mètres. D'autre part, ils sont reliés par l'intermédiaire d'une inductance en série pour les convertisseurs LCC. Ou d'un condensateur en parallèle pour les convertisseurs VSC, elle est utilisée généralement dans les applications d'interconnexions des réseaux alternatifs, lorsque l'interconnexion de ces derniers en courant alternatif pose des problèmes inacceptables de : Stabilité, court-circuit, déphasage et de fréquence.

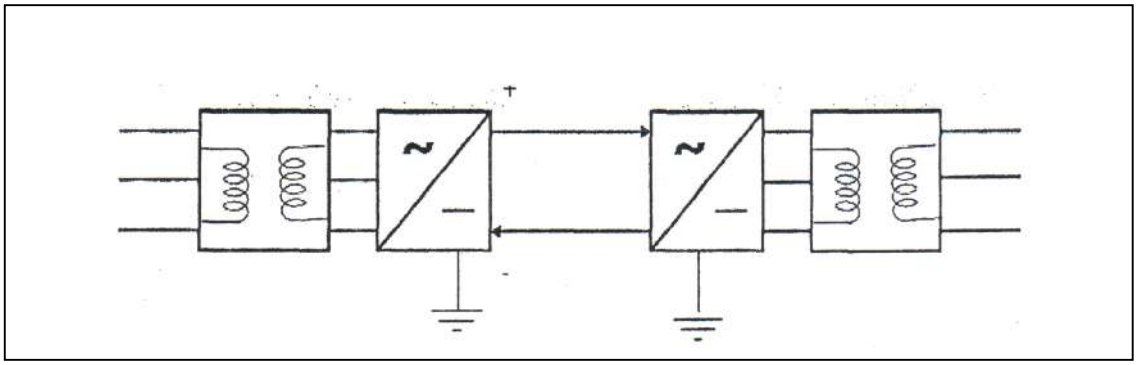


Figure I.14. Schema d'une ligne Beck to Beck (Dos Dos)

1.7. 4. Un système multi-terminaux [15] [2]:

Un système multi-terminaux HVDC (MTDC) est composé de plus de deux convertisseurs connectés par des câbles de courant continu et qui partagent le même bus DC, comme l'illustre la figure I.15. Les systèmes multi-terminaux HVDC ont des avantages sur les HVDC à deux terminaux, sur plusieurs aspects :

• les MTDC permettent l'interconnexion de plusieurs réseaux alternatifs sur des distances moyennes ou longues,

• Ils ont des avantages économiques du fait que le coût total des convertisseurs installés dans un système MTDC est généralement inférieur à celui de plusieurs HVDC équivalents à deux terminaux

• Les systèmes MTDC peuvent offrir une plus grande flexibilité dans la distribution des flux de puissance dans des grands réseaux interconnectés,

• Ils peuvent aider à amortir les oscillations dynamiques non-désirées des réseaux.

En contrepartie, les systèmes multi-terminaux requièrent plus d'appareillage de connexion, pour s'adapter à configuration des interconnexions, ainsi que des systèmes complexes de coordination, de commande et de télécommunications. La possibilité de mettre en œuvre des systèmes MTDC dépend fortement de la disponibilité de disjoncteurs à courant continu.

Les MTDC sont une réalité depuis plus de vingt ans, mais ils n'ont jamais dépassé le nombre de quatre terminaux.

En outre, la plupart des MTDC utilisent des technologies à base de thyristors.

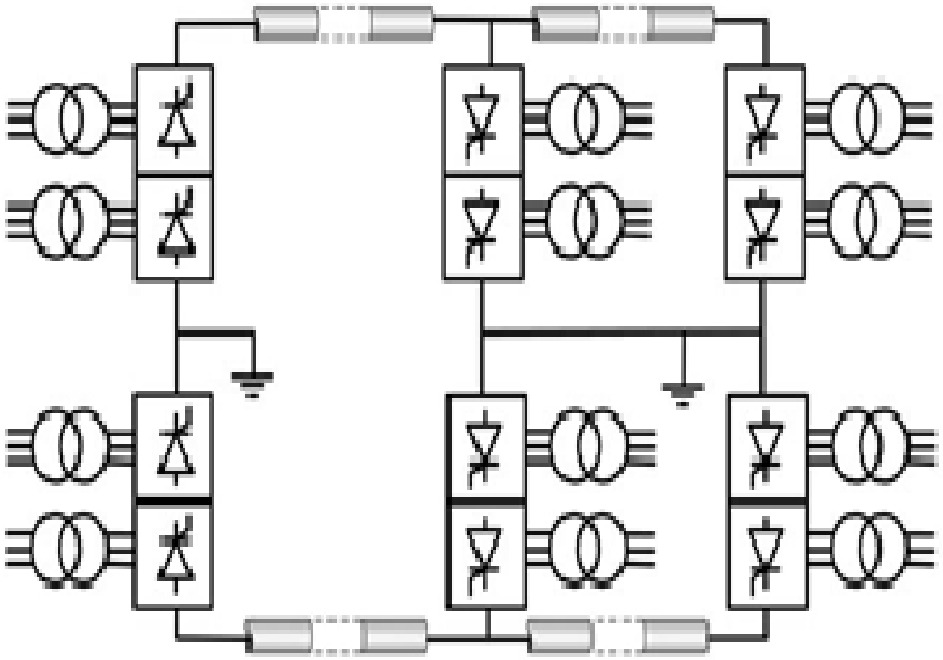


Figure 1.15. Configuration multi-terminaux d'un HVDC

1.8. Conducteur de retour [6] :

Certaines liaisons emploient la terre ou la mère comme conducteur de retour du courant, alors le circuit à courant continu peut ce réduire à un seul conducteur et à des prises de terre, on économise de cette façon au conducteur et minimise les valeurs des pertes qui y y auraient été produites.

Mais une liaison a deux conducteurs présente du point de vue de la puissance garantie, l'avantage de pouvoir être exploiter a puissance réduite en cas d'avarie d'un des pôles , dans ce cas on utilise la terre comme conducteur de retour, alors une telle liaison exige quelques précautions qui doivent être prises en considération. Les courants dans le sol sont également capables d'influencer certains dispositifs de signalisation sensibles aux courants continus.

Cas d'avarie d'un des pôles, dans ce cas on utilise la terre comme conducteur de retour, alors une telle liaison exige quelques précautions qui doivent etre prises en considération. Les courants dans le sol sont également capables d'influencer certains dispositifs de signalisation sensibles aux courants continus.

I.8.1. La liaison souterraine :

Lorsque le transport d'énergie par lignes aériennes n'est plus acceptable, sous la pression de l'opinion publique ou au point de vue économique (en certains pays les frais de l'autorisation de passage d'une ligne aérienne attiennent 66% des frais totales de la liaison). Dans ce cas le transport d'énergie se fait par des liaisons souterraines. Dés que une telle liaison dépasse 50km), il est économiquement intéressant de l'effectuer en courant continu qui permet d'une part de réduire notablement le cout des câbles et d'autre part d'affranchir les problèmes de la sur dimensionnement de ces derniers causés par l'énergie réactive.

I.8.2. La liaison sous-marine :

Les liaisons sous-marines dépassant 50 km offrent les mêmes avantages que celle souterraines en courant continu. D'autant plus, elles permettent d'éviter les problèmes d'emplacement des compensateurs d'énergie réactive qui sont impossibles à les installés.

I.9. Topologies de convertisseur à deux niveaux en source de tension (VSC) [22] [15]

La topologie a 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 I.16.. 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 (+ $dc\ V\ 2$) ou égale à son opposée (- $dc\ V$). En utilisant une stratégie de commande appropriée, il est donc possible de créer une tension alternative coté alternative.

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM- Pulse Width Modulation) est utilisée afin de réduire les harmoniques générés par ces commutations. Il existe plusieurs techniques de PWM, la plus classique consiste à comparer la tension de référence désirée (la modulante) à une fonction triangulaire (la porteuse). À la figure I.17 la tension de référence désirée (en vert) et la tension actuellement réalisée coté AC (en bleue), sont présentées. En

En ajoutant des filtres passifs à la sortie du convertisseur, les harmoniques générés par le PWM sont éliminés.

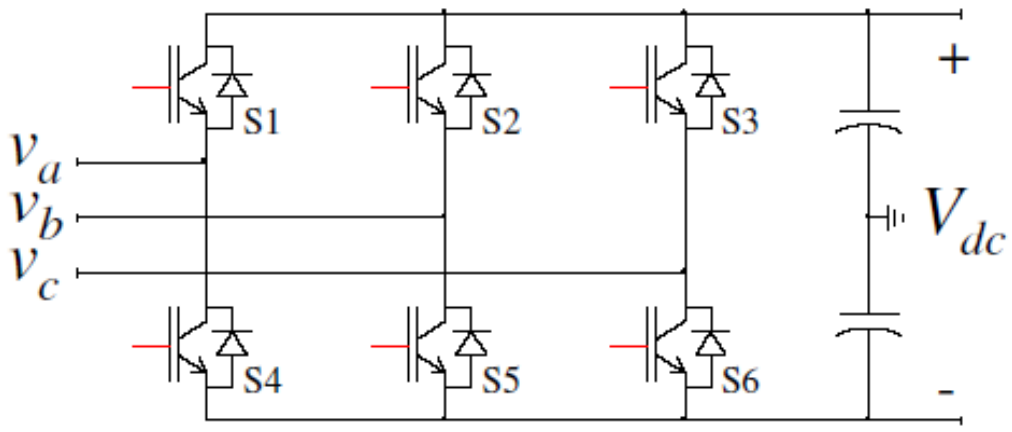


Figure I.16. Topologie de convertisseur en source de tension a 2 niveau

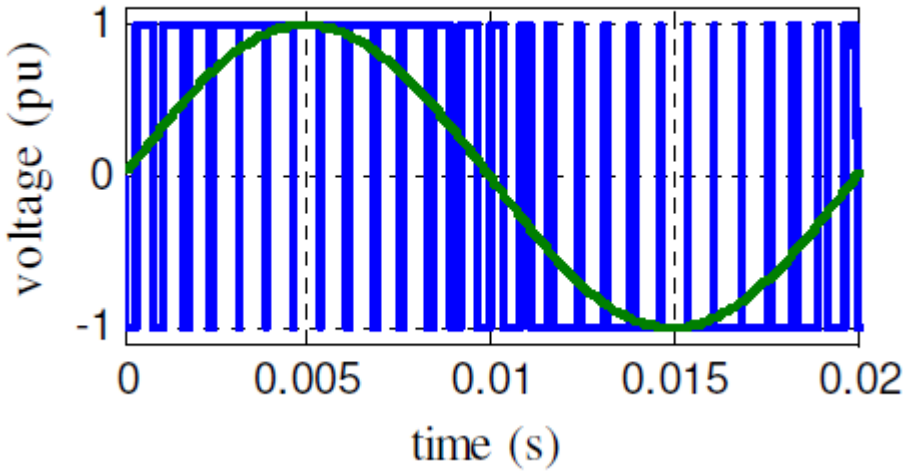


Figure I.17. Forme d'onde de la tension

Tableau I.1. Projets VSC-HVDC [2], [23].

Non de projet	*Annés de la coman de*	*Puissane nominal*	*Tensio n DC*	*Longueur des cable*	*Commentaire*	*Topologie*	*Valves*
Hellsjon, suède	1997	+3MW ±3MVAr	±10K V	10 Km (lignes)	Connexion de test .Réseau AC synchrone	2 niveaux	IGBT(série)
Gotland HVDC Light, Suède	1999	50MW -55/+50 MVAr	± 80 kV	2×70 km (câble sous-marin)	Pour éolien (support de tension)	2 niveaux	IGBT (série)
Eagle Pass, EEUU	2000	36 MW ±36MVAr	± 15.9 kV	HVDC-Light (B2B)	Connexion asynchrone pour échanges	3 niveaux (NPC)	IGBT (série)
Tjreborg, Danemark	2000	7.2 MW -3/+4 MVAr	± 9 kV	2×4.3 km (câble sous-marin)	Pour éolien. Projet démonstrateur	2 niveaux	IGBT (série)
Terrenora Interconnection, Australia	2000	180 MW -165/+90 MVar	± 80 kV	6×59 km (câble sousterrain	Connexion asynchrone pour échanges	2 niveaux	IGBT (série)
MurrayLink, Australia	2002	220 MW - 150/+140 MVA	± 150 kV	2×40 km (câble sous-marin)	Connexion synchrone contrôlée pour échanges	3 niveaux (ANPC)	IGBT (série)
Cross Sound, EEUU	2002	330 MW ±150 MVAr	± 150 kV	2×40 km (câble sous-marin)	Connexion synchrone contrôlée pour échange	3 niveaux (ANPC)	IGBT (série)
Troll A offshore, Norvège	2005	84 MW -20/+24 MVAr	± 60 kV	4×70 km (câble sous-marin)	Environnement . Taxe carbone	2 niveaux	IGBT (série)
Estlink Estonia, Finland	2006	350MW ±125 MVAr	±150kV	2×31 km (câble sousterrain (2×74 km (câble sous-marin)	Connexion asynchrone Câbles sous-marins longues	2niveaux	IGBT (série)
Nord Eon1, Allemagne	2000	400 MW	± 150kV	2×75 km (câble sous-terrain (2×128km (câble sous-marin)	Connexion ferme éolienne offshore	2 niveaux	IGBT (série)

Caprivi Link, Namibia	2009	300 MW	350 kV	970 km (lignes)	Réseaux faibles	2 niveaux	IGBT (série)
Valhall offshore, Norvège	2009	78 MW	150 kV	292 km (sous-marin)	Environnement. Augmentation de l'efficacité	2 niveaux	IGBT (série)
TransBay Cable, EEUU	2010	400 MW ± 300 MVAr (max)	± 200kV	86 km		Multi-niveaux	IGBT (MMC)

I.10 Conclusion

Les raisons du choix du transport d'énergie électrique sous haute tension en courant continu (**HVDC**) sont nombreuses, on peut citer entre autres le fait qu'il permet :

- L'interconnexion de deux réseaux de même fréquence ou de fréquences différentes et la stabilisation des réseaux ;
- Un transport à très longue distance (> 500 km pour les lignes), à partir de 40 km (cela dépend de la puissance transitée), le transport d'énergie sous **HVDC** par câbles sous-marins devient intéressant car son coût est plus faible ;
- Un contrôle permanent du flux de puissance, entre deux réseaux alternatifs triphasés connectés ;
- L'injection de puissance importante sous **HVDC** dans un réseau, sans accroissement de la puissance de court-circuit.

CHAPITER II

ECOULEMENT DE PUISSANCE OPTIMAL

II.1. Introduction

Un réseau d'énergie électrique comprend des génératrices, des lignes de transport et distribution, et un ensemble de consommateurs, qui constituent la charge de réseau, en outre le réseau comporte également des transformateurs et des appareils de protection. L'ensemble des systèmes électriques comporte en gros trois sous-systèmes :

-Production (génératrice).

-Transport, répartition et distribution (lignes).

-Utilisation (consommateur).

Vu la complexité d'un réseau d'énergie électrique, il faut simplifier leur représentation pour établir des modèles ou schéma équivalent des principaux composant à savoir, des générateurs, les différents types de transformateurs, des lignes et des charges.

II.2. Modélisation des composants de réseau électriques

II.2.1. Modélisation des générateurs

Une machine synchrone est une machine à courant alternatif, dans laquelle la fréquence de la tension induite engendrée et la vitesse sont en rapport constant. Elle est composée : d'un induit fixe, un inducteur tournant. On appelle une machine synchrone toutes les machines qui tournant exactement à la vitesse correspondant à la fréquence des courants et des tensions à ses bornes. [24]

Les machines de faible vitesse angulaire sont à pôles saillants. Pour les grandes machines à grande vitesse (3000 tr/min, dans les centrales à fuel ou charbon), (1500 tr/min dans les centrales nucléaires), on utilise des rotors lisses à entrefer constant. Le schéma équivalent est représenté par figure (II.1).

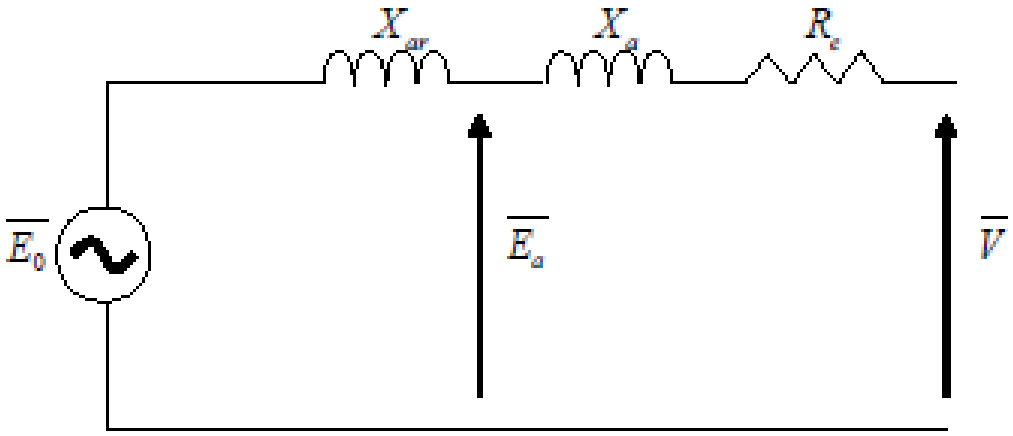


Figure II.1. Le modèle d'une génératrice

$S_i = P_i + j\,Q_i$: La puissance apparente délivré par le générateur.

$V_i = |V_i|\angle\delta_i$: La tension simple.

E_0 : La f.e.m à vide

E_a : La f.e.m En charge.

V : tension de sortie.

X_{ar} : Réactance de réaction d'induit.

X_a : Réactance de fuite.

X_s :Xa+Xar Réactance synchrone.

R_e : Résistance d'enroulement

Dans le calcule d'écoulement de puissance, il est représenté par une source de tension.

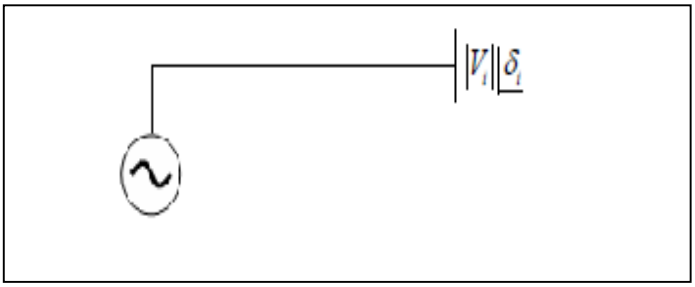


Figure II.2. Une source de tension

.

II.2.2. Modélisation des transformateurs

Il ya deux types de transformateur à modéliser :

Le transformateur régulateur de tension à changeur de prise de charge 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 (II.3) présente le schéma unifilaire équivalent d'un transformateur triphasé symétrique à changeur de prises de charge et/déphaseur [25].

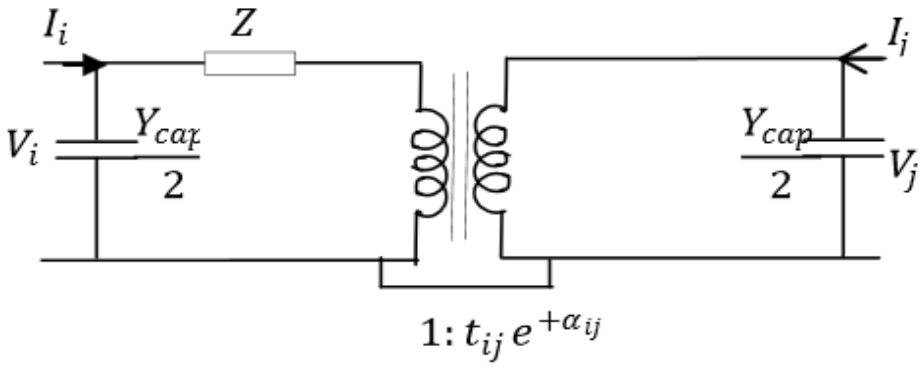


Figure II.3. Modèle de transformateur de puissance

Z : représente les pertes par effet joule et les inductances de fuite de transformateur ramenées au secondaire.

La modélisation retenue suppose que les pertes sont séparées pour moitié au primaire et pour l'autre moitié au secondaire. Le paramètre t_{ij} symbolise la ration de régleur de tension en charge. Le paramètre a_{ij} symbolise la déphasage introduit par le transformateur entre les jeux de barres **i** et **j** .Il important de noter que la matrice admittance du réseau électrique qui prend en considération ces variables va être donc ajustée à chaque itération.

Y : c'est la matrice admittance du transformateur

II.2.3. Modélisation d'une charge [24]

Une charge peut être modélisée par une impédance qui consomme une quantité constante de puissance active et réactive figure (II.3).

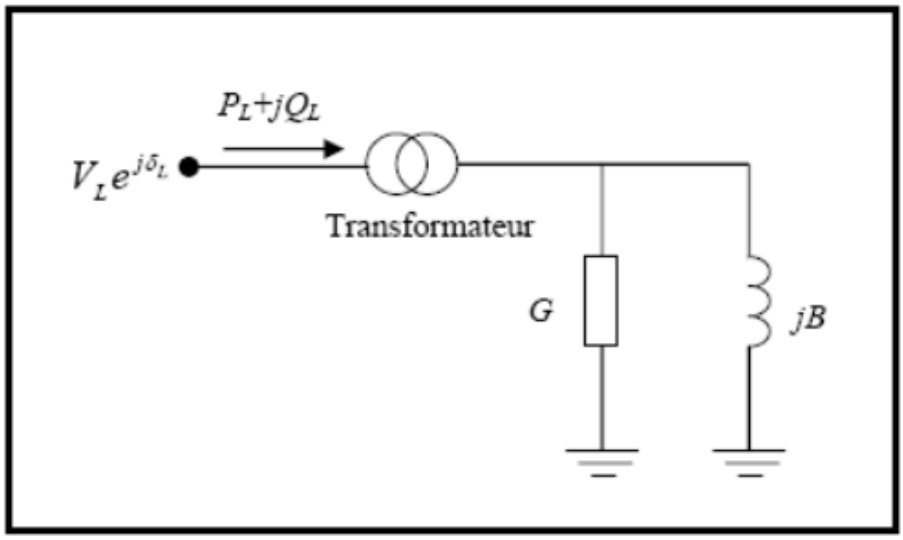


Figure II.3. Modèle d'une charge électrique

II.2.4. Modélisation d'une compensation shunt [9]

Une compensation shunt qui peut être fixe ou variable, qui donne au réseau de l'énergie réactive contrôlable.

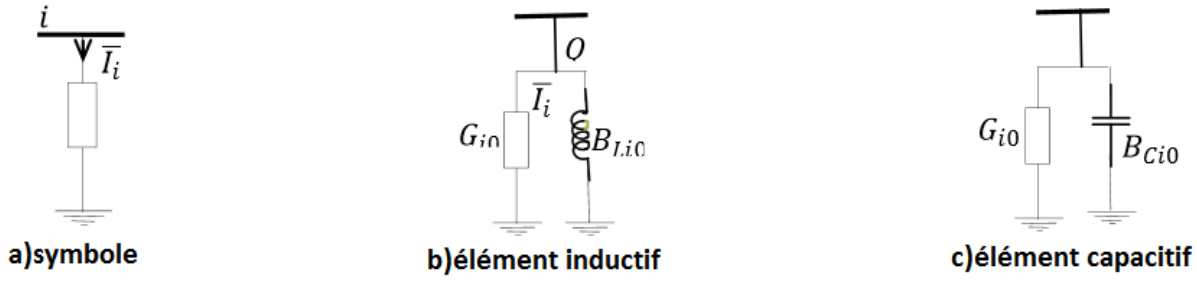


Figure II.4. Modèle des éléments shunt

II.2.5. Modélisation d'une ligne de transport [26]

Une ligne électrique entre les jeux de barres i et j sera donc représentée par le schéma équivalent en π, illustré dans la figure (II.5) :

Les pertes longitudinale les totales par effet joule dans l'ensemble des conducteurs de la ligne sont Représentée par la résistance R (Ω) ;

L'énergie magnétique emmagasinée dans l'ensemble de conducteurs de la ligne est représentée par la réactance longitudinale total X (Ω) ;

La capacité totale de la ligne est répartie équitablement aux deux jeux de barres et les pertes transversales par effet couronne dans le cas des lignes de transport sont négligeables. Dans la plupart des cas la valeur de G est si petite qu'on peut la négliger.

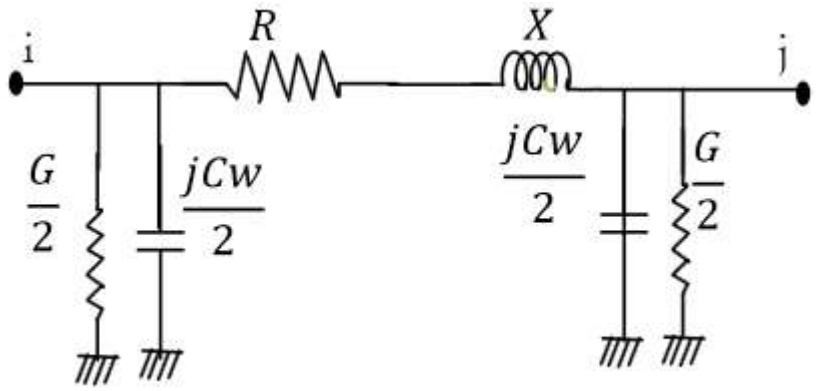


Figure II.5. Modèle en π de ligne de transport

II.3. Ecoulement de puissance

II.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 : $\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{Q}$,$|\boldsymbol{V}|$et δ. [27]

En d'autres termes, l'étude de l'écoulement de puissance (Load Flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux noeuds, les puissances injectées aux noeuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent. Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux. [8]

II.3.2. Calcul de l'écoulement de puissance [8]

Pour chaque type de nœud (quelque soit le type de noeud), on définit la puissance d'injection comme suit

$$\boldsymbol{S_i = P_i + j\, Q_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j\,(Q_{Gi} - Q_{Di})} \qquad \textbf{(II.1)}$$

Sachant que l'on a aussi :

$$S_i = V_i I_i^* \qquad \textit{(II.2)}$$

alors:

$$I_i = (P_i - jQ_i) / V_i^* \qquad \textbf{(II.3)}$$

II.3.3. Techniques de calcul 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);

II.3.3.1. Calcul de l'E.P par la méthode de Gauss-Seidel

L'objectif est de déterminer tous les *Pi, Qi,* $|Vi|$ et δi, pour les n noeuds d'un réseau électrique. La procédure est de calculer les *Vi* et δi des nœuds PQ, ensuite les *Qi* et δi des nœuds PV et finalement le *P* et *Q* du nœud slack :

• *Nœuds PQ :*

On détermine les tensions $|Vi|$ et les angles δi par la formulation suivante à programmer :

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{y_{ij}}\left(\frac{P_i - j\,Q_i}{V_l^{*(k-1)}} - \sum_{k=1}^{i-1} y_{ik} V_k - \sum_{l=i+1}^{n} y_{il} V_l \right) \qquad \textbf{(II.4)}$$

$$V_i^{(k)} = \left|V_i^{(k)}\right| \angle \delta_i^{(k)}$$

Avec : i = NPQ (nombre des nœuds P.Q).

• *Nœuds PV :*

On à déterminer les *Qi* et les δi , par les formules suivantes :

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{Q_i^{(k)}} &= \mathbf{Im}\left(\mathbf{V_i^*}\left(\sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{y_{ij}V_j}\right)\right) \\ \boldsymbol{\delta_i^{(k)}} &= \mathbf{arg}\left[\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{y_{ii}}}\left(\frac{\mathbf{P_i - JQ_i}}{\mathbf{V_i^*}} - \sum_{\substack{\mathbf{j=1} \\ \mathbf{j\neq i}}} \mathbf{y_{ij}V_j^{(k)}}\right)\right] \end{aligned}\right\} \quad (\mathbf{II.5})$$

$$\boldsymbol{V_i^{(*)} = \left|V_i^{(spe)}\right| \angle \delta_i^{(k-1)}} \quad \mathbf{(II.6)}$$

• *neaud Slack :* détermine ici juste *Pi* et *Qi* , à l'ordre k seulement (c-à-d à la k ème itération) :

$$\boldsymbol{P_s - jQ_s = V_s^* \sum_{j=1}^{n} Y_{sj} V_j^{(k)}} \quad (\mathbf{II.7})$$

Ensuite, on exécute le test de la convergence pour les amplitudes de tension des noeuds PQ (les amplitudes de tensions des noeuds PV et du slack bus étant spécifiées) :

$$\left||\boldsymbol{V}|^{(k)} - \left|\boldsymbol{V_i^{(spe)}}\right|\right| \leq \boldsymbol{Tol}$$

Remarque : Il faut que tous les éléments réalisent cette condition.

❖ Amélioration de la convergence par relaxation (par facteur d'accélération):

$$\boldsymbol{|V_i|_{acc}^{(k)} = |V_i|^{(k-1)} + \alpha\left(\left|V_i - |V_i|^{(k+1)}\right|\right)} \quad \mathbf{(II.8)}$$

α : facteur d'accélération, prise généralement entre [1,4 ≤ α ≤ 1,6].

❖ commentaire [7]

La méthode de GAUSS-SEDIEL se caractérise par sa faible convergence : elle peut diverger complètement si la valeur initiale mal choisie. Mais si les petits réseaux ne nécessitent que peu d'itération pour converge , par contre les grands réseaux , demandent un grand nombre d'itérations si toutefois ils convergent .Ce qui amena les chercheurs a développer la méthode de Newton – Raphson

II.3.3.2. Calcul de l'E.P par la méthode de Newton-Raphson

$$X^{(k)} = X^{(k-1)} - j^{-1}\left(X^{(n-1)}\right)F\left(X^{(k-1)}\right) \quad \textbf{(II.9)}$$

Le calcul de l'écoulement de puissance par cette méthode présente deux formulations possibles :

Formulation par coordonnées rectangulaires :

$$\boldsymbol{S_i = P_i - jQ_i = VI_i^* = V_i - \sum Y_{ij} \times V_i^*} \quad \textbf{(II.10)}$$

$$\boldsymbol{V_i = e_i + jf_i}$$

$$\boldsymbol{y_{ij} = G_i - jB_{ij}}$$

$$\left.\begin{matrix} \boldsymbol{P_i = \sum_{j=1}^{n} \left[e_i\left(G_{ij}e_i + B_{ij}f_i\right) + f_i\left(G_{ij}f_i - B_{ij}e_j\right)\right]} \\ \boldsymbol{Q_i = \sum_{j=1}^{n} \left[f_i\left(G_{ij}e_i + B_{ij}f_i\right) - f_i\left(G_{ij}f_i - B_{ij}e_j\right)\right]} \end{matrix}\right\} \quad \textbf{(II.11)}$$

Les mismatchs seront calculés comme suit :

$$\left\{\begin{matrix} \Delta\boldsymbol{P_i^{(k)} = P_{ispec} - P_{ical}^{(k)} = Tol} \\ \Delta\boldsymbol{Q_i^{(k)} = Q_{ispec} - Q_{ical}^{(k)} = Tol} \\ \Delta|\boldsymbol{V_i}|^{2(k)} = |\boldsymbol{V_i}|_{spec}^2 - |\boldsymbol{V_i}|_{cal}^{2(k)} = \boldsymbol{Tol} \end{matrix}\right\} \quad \textbf{(II.12)}$$

-Pour les noeuds PQ :

Il s'agira de résoudre le système matriciel correspondant suivant :

$$\begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{p_i} \\ \Delta|\boldsymbol{V_i}|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial e} & \frac{\partial P_i}{\partial f} \\ \frac{\partial |V_i|^2}{\partial x} & \frac{\partial |V_i|^2}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{e} \\ \Delta\boldsymbol{f} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.13)}$$

-Pour les nœuds PQ :

Le système matriciel correspondant s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{p_i} \\ \\ \Delta \boldsymbol{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{P_i}}{\partial \boldsymbol{e}} & \frac{\partial \boldsymbol{P_i}}{\partial \boldsymbol{f}} \\ \\ \frac{\partial \boldsymbol{Q_i}}{\partial \boldsymbol{x}} & \frac{\partial \boldsymbol{Q_i}}{\partial \boldsymbol{f}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{e} \\ \\ \Delta \boldsymbol{f} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.14)}$$

La forme générale du système matriciel à résoudre se présente alors comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ . \\ \Delta P_{m+1} \\ \Delta P_{m+2} \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_{m+2} \\ \Delta Q_n \\ \Delta |V_2|^2 \\ \Delta |V_{m+1}|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{e}} & \frac{\partial \boldsymbol{P_i}}{\partial \boldsymbol{f}} \\ \\ \frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{e}} & \frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{f}} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \frac{\partial |\boldsymbol{V}|^2}{\partial \boldsymbol{e}} & \frac{\partial |\boldsymbol{V}|^2}{\partial \boldsymbol{f}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \\ \Delta e_3 \\ \\ \Delta e_n \\ \\ \Delta f_2 \\ \\ \Delta f_n \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.15)}$$

Avec J la matrice Jacobienne :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial e} & \frac{\partial P_i}{\partial f} \\ \\ \frac{\partial Q}{\partial e} & \frac{\partial Q}{\partial f} \\ \\ \frac{\partial |V|^2}{\partial e} & \frac{\partial |V|^2}{\partial f} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.16)}$$

- ***Formulation par coordonnées polaires*** *:*

Pour les coordonnées polaires on a deux formulations :

$$\left.\begin{matrix} V_i = |V_i| \angle \delta_i \\ y_{ij} = |y_{ij}| \angle - \theta_{ij} \end{matrix}\right\} \quad \textbf{(II.17)}$$

$$\left.\begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^{n} |V_i|\,|y_{ij}||V_j|\cos(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \\ Q_i &= \sum_{j=1}^{n} |V_i|\,|y_{ij}||V_j|\sin(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \end{aligned}\right\} \quad \textbf{(II.18)}$$

1. **Première formulation :**

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 J_2 \\ J_3 J_4 \\ J_5 J_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\partial \\ \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.19)}$$

2. **Deuxième formulation :**

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 J_2 \\ J_3 J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\partial \\ \frac{\Delta|v|}{|v|} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.20)}$$

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{P_{slackbus}} &= \sum_{i=1}^{n-1} \mathrm{P_i} - \mathrm{P_{perts}} \\ \mathrm{Q_{slackbus}} &= \sum_{i=1}^{n-1} \mathrm{Q_i} - \mathrm{Q_{perts}} \end{aligned}\right\} \quad \textbf{(II.21)}$$

II.3.3.3.Calcul de l'E.P par la méthode découlée rapide (*Fast Decoupled Load Flow)*

L'article de Stott - Alsac démontre la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} HN \\ JL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\partial \\ \frac{\Delta|V|}{|V|} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.22)}$$

Qui se réécrit après découplage, comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H0 \\ 0L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\partial \\ \frac{\Delta|V|}{|V|} \end{bmatrix} \quad \textbf{(II.23)}$$

$$\left.\begin{aligned}[\Delta P] = [H][\Delta\delta] \Rightarrow [\Delta\delta] = [H]^{-1}[\Delta P] \\ [\Delta Q] = [L]\left[\frac{\Delta|V|}{V}\right] \Rightarrow \left[\frac{\Delta|V|}{V}\right] = [L]^{-1}[\Delta Q]\end{aligned}\right\} \quad \textbf{(II.24)}$$

ou:

$$\left.\begin{aligned}H_{ij} = L_{ij} = |V_i|\left|V_j\right|\left(G_{ij}\, sin\, \delta_{ij} - B_{ij}\, cos\, \delta_{ij}\right) \\ H_{ii} = -B_{ii}|V_i|^2 - Q_i \\ L_{ii} = -B_{ii}|V_i|^2 + Q_i\end{aligned}\right\} \quad \textbf{(II.25)}$$

- On admet généralement pour les grandes lignes les hypothèses suivantes :

$G_{ij} \sin\delta_{ij} \ll B_{ij}$

$\sin\delta_{ij} \approx \delta_{ij}\, et\ \cos\delta_{ij} \approx 1$

$Q_i \ll B_{ii}|V|^2$

Donc:

$$\left.\begin{aligned}[\Delta P] = \left[|V_i|B'_{ij}\left|V_j\right|\right][\Delta\delta] \\ [\Delta Q] = \left[|V_i|B''_{ii}|V_i|\right]\left[\frac{\Delta|V|}{|V|}\right]\end{aligned}\right\} \quad \textbf{(II.26)}$$

Les éléments B′ et B″ sont des sous matrices négatives déduites de la matrice *Bbus* tirée de la matrice admittance du réseau, telle que [21]:

$$\left.\begin{aligned}B'_{ij} = -\frac{1}{X_{ij}} \quad i \neq j \\ B'_{ii} = B''_{ii} = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{X_{ij}} \quad i \neq j \\ B''_{ij} = -B_{ij}\end{aligned}\right\} \quad \textbf{(II.27)}$$

On peut avoir un découplage plus rapide par les relations suivantes :

$$\left.\begin{aligned}\left[\frac{\Delta P}{|V|}\right] = [B'][\Delta\delta] \Rightarrow [\Delta\delta] = [B']^{-1}\left[\frac{\Delta P}{|V|}\right] \\ \left[\frac{\Delta Q}{|V|}\right] = [B'']\left[\Delta|V|\right] \Rightarrow [\Delta|V|] = [B'']^{-1}\left[\frac{\Delta Q}{|V|}\right]\end{aligned}\right\} \quad \textbf{(II.28)}$$

II.4. Problème de l'écoulement de puissance optimal [9]

Comme tout secteur productif, la production et le transport d'énergie électrique sont sujet aux lois du marché. En plus de la dérégulation du développement des interconnexions et des fluctuations des prix des combustibles, l'aspect économique force les opérateurs à la gestion des différentes sources de production et acheminer le plus d'énergie possible à travers leurs réseaux de la manière la plus rentable possible

Gestion de la puissance produite et transmise à travers le réseau n'est pas le seul souci des opérateurs. L'amélioration de la qualité et la réduction des coûts de fonctionnement tout en respectant les contraintes du réseau, sont considérées comme des problèmes majeurs de l'écoulement de puissance optimal.

A court terme, le problème de l'écoulement de puissance optimal(OPF) est un problème d'optimisation dont l'objectif consiste à déterminer la contribution de chaque centrale électrique en service pour satisfaire la demande des consommateurs de l'énergie électrique de sorte que le coût de production de l'énergie totale soit le plus faible possible et satisferaient les différentes contraintes imposées au réseau. Ce problème est mathématiquement large, vu le nombre de variables et de contraintes qu'il fait intervenir. Les domaines d'application de l'écoulement de puissance optimal peuvent être classés comme suit : Minimisation du coût de combustible; Minimisation des pertes; Amélioration du profil et la stabilité de la tension; Maximisation de la puissance transmissible.

II.4.1. Formulation de problème de l'écoulement de puissance optimal (OPF)

Le problème d'OPF est considéré comme problème de minimisation non-linéaire avec contraintes. [9] Il peut être écrit sous la forme suivante:

Minimiser $f\ (x,)$

Sujet à : $g\ (x,) = 0$

$h(x,u) \leq 0$

Tels que

f(x,u) : fonction objective

g (x,) : contraintes d'égalités

h(x,u) :contraintes d'inégalités

x : vecteur des variables d'état

u : vecteur des variables à contrôler

Variables de contrôle: Les variables de contrôle sont en général les modules des tensions ou les puissances réactives générées aux jeux de barres générateurs, les rapports de transformation des régleurs en charge, les phases des transformateurs déphaseurs, et les puissances réactives générées par les différents compensateurs d'énergie réactive.

Variables d'état: Sont les modules des tensions des jeux de barres charges et les angles de toutes les tensions sauf le jeu de barres de référence.

II.4.2. Contraintes d'égalités [9]

Les contraintes d'égalité de l'OPF reflètent à des lois physiques gouvernant le système électrique. Elles sont représentées par les équations non-linéaires de l'écoulement de puissance qui exigent que la somme de l'injection nette des puissances actives et réactives dans chaque jeu de barres soit nulle

$$\Delta \boldsymbol{P_i = 0 = V_i \sum_{k=1}^{n} [V_k [G_{ik} cos(\theta_i - \theta_k) + B_{iK}\, sin(\theta_i - \theta_k)]] - P_{Gi} + P_{Gi}} \quad \textbf{(II.29)}$$

$$\Delta \boldsymbol{Q_i = 0 = V_i \sum_{k=1}^{n} [V_k [G_{ik} sin(\theta_i - \theta_k) - B_{iK}\, cos(\theta_i - \theta_k)]] - Q_{Gi} + Q_{Gi}} \quad \textbf{(II.30)}$$

II.4.3. Contraintes d'inégalités [9]

Les contraintes d'inégalités habituelles peuvent inclure les limites sur les dispositifs physiques dans le système électrique tels que, les générateurs, les transformateurs à prises de charge, et les transformateurs déphaseurs, ainsi que les limites créées pour assurer la sécurité de système, en plus d'autres contraintes d'inégalités comme les limites des puissances réactives de compensations. Les limites sur les générateurs concernent les limites des puissances actives et réactives qui doivent être maintenues dans les limites admissibles:

$$\boldsymbol{P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}} \quad \textbf{(II.31)}$$

$$\boldsymbol{Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}} \quad \textbf{(II.32)}$$

Les transformateurs à prises de charge ont des commutateurs max et min, du niveau de tension par rapport à la tension nominale pour le réglage des modules de tensions et la régulation des flux de puissances réactives. De même, les transformateurs à angles de phase ont des décalages max. et min.pour le réglage des phases de tensions et la régulation des flux de puissances actives. Les deux types de transformateurs forment les contraintes d'inégalités suivantes:

$$T_{ik}^{min} \leq T_{ik} \leq T_{ik}^{max} \quad \textbf{(II.33)}$$

$$\alpha_{Gi}^{min} \leq \alpha_{ik} \leq \alpha_{ki}^{max} \quad \textbf{(II.34)}$$

Les batteries, les bobines et les compensateurs statiques de la puissance réactive sont cernés par des valeurs minimales et maximales comme suit

$$Q_{ci}^{min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{max} \quad \textbf{(II.35)}$$

Les limites sur le transit de puissance apparente au niveau des lignes de transport et des transformateurs de puissance sont créées pour assurer la sécurité de système contre les pertes thermiques dans les conducteurs, et/ou la stabilité du réseau :

$$|S_{ik}|^2 \leq |S_{ik}^{max}|^2 \quad \textbf{(II.36)}$$

Pour garder la qualité de service électrique et la sécurité du système, il faut limiter les violations sur les contraintes de tension qui doivent être dans leurs limites admissibles:

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad \textbf{(II.37)}$$

Dans toutes les discussions jusqu'ici, on a assumé que toutes les variables sont continues, par Exemple la contrainte sur les tensions, mais certaines variables de contrôle sont de nature discrètes telles que les prises de réglage de transformateur, les phases de transformateur de réglage en phase et les tailles des batteries des condensateurs.

Généralement la plupart des approches de résolution de l'OPF prennent toutes les variables de nature continues, et une fois que la solution optimale est obtenue chaque variable continue est arrondie à une valeur discrète, mais cela ne garantie pas que la solution arrondie soit une solution optimale car quelques contraintes peuvent être violées [9]. Une solution possible pour remédier à ce problème reflète l'arrondissement des valeurs continues avant l'intégration dans le calcul de l'écoulement de puissance, cela veut dire que la solution trouvée est une valeur discrète.

II.4.4. Fonction objective

Généralement l'objectif le plus utilisé dans la formulation de problème d'OPF est minimisation du coût total de puissance active générée par des unités de productions, dont les caractéristiques sont complexes et fortement non-linéaire en satisfaisant les contraintes d'égalités et d'inégalités . La fonction objective totale du système électrique peut alors être écrite comme la somme du modèle quadratique de coût de chaque générateur

$$\text{minimiser} \qquad F = \sum_{i=1}^{NG} f_i = \sum_{i=1}^{NG} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \qquad (\$/h) \qquad \textbf{(II.38)}$$

$$\boldsymbol{P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}} \qquad i=1+nP \qquad \textbf{(II.39)}$$

$$\boldsymbol{P_{Gi}^{sp} - P_{Di}^{sp} = réel(V_i^* \sum_{k=1}^{nBus} Y_{i,k}\, V_K)} \qquad i=2: nBus \qquad \textbf{(II.40)}$$

$$\boldsymbol{Q_{Gi}^{sp} - Q_{Di}^{sp} = -imag(V_i^* \sum_{k=1}^{nBus} Y_{i,k}\, V_K)} \qquad i=1+nPV+1: nBus \qquad \textbf{(II.41)}$$

Tels que a_i, b_i, c_i représentent les coefficients de coût de la $i^{ème}$ unité de production

$\boldsymbol{P_{Gi}, P_{Di}, Q_{Gi}, Q_{Di}}$ Sont respectivement la puissance active de générateur et la puissance demandée et les puissances réactives de générateur et demandée.

II.4.5. Méthodes classiques appliquées au problème de l'écoulement de puissance optimal

Six méthodes de techniques d'optimisations classiques pour résoudre le problème d'OPF sont Classifiées par ordre d'introduction :

-La méthode de newton

-La programmation linéaire:

-La programmation quadratique

-La programmation non linéaire

-La méthode hybride de programmation linéaire et programmation intégrale

-La méthode de point intérieur

II.4.6.Résumé sur la formulation de l'OPF

Le résumé de l'écoulement de puissance optimal s'écrit sous la forme suivante [28].

$$\text{Minimiser} \quad F(x) = \sum_{générateur} a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i + \sum_{Pénalite} \mu_i \qquad \textbf{(II.42)}$$

II.4.6.1. Méthode de point intérieur

Soit le problème d'optimisation quadratique suivant

$$\min_X f(x)$$

$$\text{St} \qquad g_i(x)=0 \qquad i=\overline{1,m} \qquad \textbf{(II.43)}$$

$$h_j(x) \geq 0 \qquad j=\overline{1,n} \qquad \textbf{(II.44)}$$

Nous utilisons la fonction de barrier logarithmique pour les contraintes d'inégalité

$$\min_X f(x) - \sum_{j=1}^{n} \log(h_j(x))$$

$$\text{St} \qquad g_i(x)=0$$

La fonction de Lagrange devient

$$\mathcal{L}_\mu(x,\lambda) = f(x) - \lambda^T [f_i(x)] - \mu \sum_{j=1}^{n} \log h_j(x) \qquad \textbf{(II.45)}$$

Les équations KT devient

$$\frac{\partial \mathcal{L}_\mu}{\partial x} = f'(x) - \lambda^T f_i'(x) - \mu \sum_j^n \frac{1}{h_j(x)} h_j'(x) = 0 \qquad \textbf{(II.46)}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}_\mu}{\partial \lambda} = -f_i(x)=0 \qquad \textbf{(II.47)}$$

On pose s= $\mu \sum_j^n \frac{1}{h_j(x)} h_j'(x)\, e$

Et $e = (1, \dots, 1)$

Et $f'(x) - \lambda^T f_i'(x) - \mu \sum_j^n \frac{1}{h_j(x)} h_j'(x) e = -q$

Et $-f_i(x) = b$

Et $x_i s_i = \mu, \qquad i = 1, \dots n$

Alors nous avez obtient

$$F_\mu(x,\lambda,s) = \begin{bmatrix} f'(x) - \lambda^T f_i'(x) - \mu \sum_j^n \frac{1}{h_j(x)} h_j'(x) e - q \\ -f_i(x) - b \\ XS - \mu e \end{bmatrix}$$

On donne :

X=diag(x)$\epsilon\, \mathcal{R}^{n*n}$ et S=diag(s)$\epsilon \mathcal{R}^{n*n}$

On a fixes $\mu > 0$, l'équation

$$F_\mu(x,\lambda,s) = 0$$

La solution est obtenue par la méthode de Newton :

les étape de la méthode de Newton

1 / poser α_{min} ;

2 / donnés (x^0, λ^0, s^0) avec $x^0, s^0 > 0$.

3 / on suppose k=0

4 / tanque $(((x^k)^t\, s^k/n) > \varepsilon)$ fait

5 / choisir $\alpha_k \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}]$;

6 / résoudre le system

$$\mathrm{J}F_\mu(x^k,\lambda^k,s^k)d = \begin{bmatrix} f'(x) - \lambda^T f_i'(x) - \mu \sum_j^n \frac{1}{h_j(x)} h_j'(x) e - q \\ -f_i(x) - b \\ XS - \mu e \end{bmatrix}$$

Jusqu'à $d^k = (\Delta x^k, \Delta\lambda^k, \Delta s^k)$

7 / choisir α_k tell que :

$$(x^k, s^k) + \alpha(\Delta x^k, \Delta s^k) > 0$$

8 / supposé $\alpha_k = \min\{1, \eta_k \alpha_{max}\}$ avec $\eta_k \in (0,1)$ et $\mu_k = \frac{(x^k)^T s^k}{n}$;

9 / k ← k+1.

Fin tanque.

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons modélisés les différents composants du réseau électrique à savoir : des générateurs, des transformateurs, des charges électriques des compensations shunt, des lignes des transports.

Nous avons aussi présenté en détail les méthodes de calcule de puissance et des déférentes méthodes d'optimisation, En suite, on a résolu le problème de l'écoulement de puissance optimal l'OPF. Ainsi que, Un résumé sur la formulation l'OPF avec la méthode de point intérieur. Chaque méthode d'optimisation classique possède un inconvénient à savoir : le risque de convergence vers un optimum local, la singularité de la matrice …etc. l'utilisation des méthodes classiques pour résoudre le problème d'OPF est complexe au niveau de la modélisation et du calcul et elles ne donnent pas de solutions exactes surtout si la fonction de cout et/ou les contraintes sont vraiment non linéaires. Les avantages de la méthode de point intérieur est des garantir la faisabilité des solutions et rapidité de convergence et la structure de la matrice de Jacobiane ne change pas beaucoup ,

CHAPITER III

CALCULE D'OPFAVEC INTEGRATION D'UN HVDC

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'implantation de dispositif VSC de type Beck to Beck dans un réseau électrique et voir son influence sur l'écoulement de puissance.

L'optimisation de l'écoulement de puissance consiste à répartir les puissances actives et réactives demandées entre les différentes centrales interconnectées dans un réseau électrique avec un coût minimal. On va modéliser le problème d'OPF et on lui donne une forme mathématique

III.2. Etude du système VSC-HVDC

Le système de VSC-HVDC se compose de deux convertisseurs de VSC avec valves bipolaires isolées connectées en série de transistor (IGBT) de porte commandées avec PWM. Selon l'application, les convertisseurs sont reliés de nouveau au dos (BtB) dans une sous-station ou lié par un lien commun de C.C, suivant les indications de figure **(III.**1). [10]

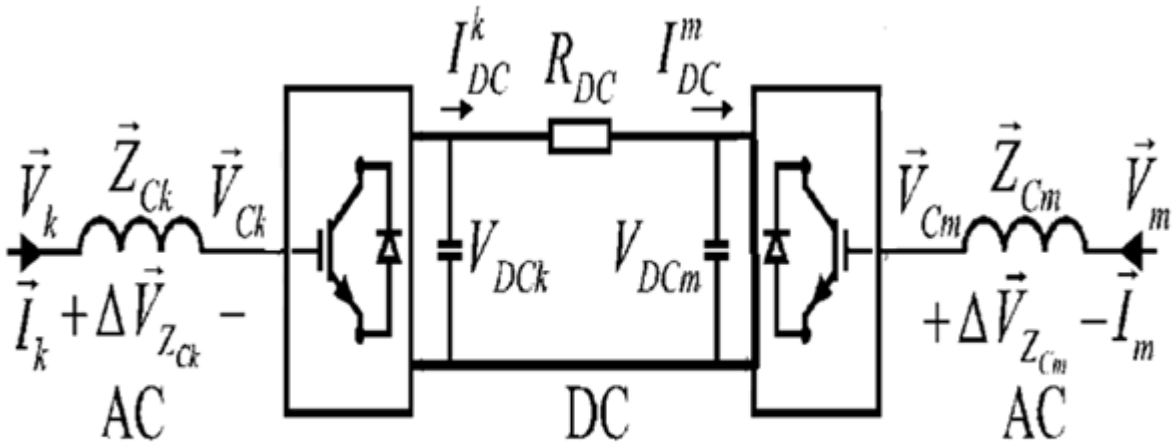


Figure III.1 Lien de transmission de VSC-HVDC

III.3 Les 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 est requise entre les stations interconnectées [29, 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

III.4 Domaine d'application de I 'écoulement de puissance optimal

Les application de la fonction écoulement de puissance optimal 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

III.5. les équations d'écoulement de puissance [10]

Le flux de puissance a travers un système VSC-HVDC peut être obtenu sur la base du schéma équivalent illustré dans la figure (III.2) .

Les puissances dans les nœuds, i a j ($telque\ i = k, m; j = k, m; avec\ j \neq i$) (m et k sont les extrémités AC de schéma équivalent figure (III.2) sont données par les équations suivant :

$$P_{ij}^{inj} = V_i^2 G_{ci} - V_i V_{ci}[G_{ci} cos\ (\theta_i - \theta_{ci}) + B_{ci} sin(\theta_i + \theta_{ci})] \quad \textbf{(III.1)}$$

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

Ou $G_{ci} + jB_{ci} = {}^{1}\!/_{\overrightarrow{Z_{ci}}}$

Le f lux de puissance dans le convertisseur relié au nœuds i = k, m sont donnés par:

$$P_{ci} = V_{ci}^2 G_{ci} - V_{ci}V_i[G_{ci}cos\,(\theta_{ci} - \theta_i) + B_{ci}sin(\theta_{ci} - \theta_i)] \quad \textbf{(III.3)}$$

$$Q_{ci} = -V_{ci}^2 B_{ci} - V_{ci}V_i[G_{ci}sin\,(\theta_{ci} - \theta_i) - B_{ci}cos(\theta_{ci} - \theta_i)] \quad \textbf{(III.4)}$$

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

$$\mathrm{V_{ci}} = \frac{\mathrm{M_{ci}V_{dci}}}{2\sqrt{2}} \quad \textbf{(III.5)}$$

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

V_{dci} est la tension moyenne aux bornes du condensateur

Les contraintes opérationnelles considérées dans le modèle sont:

$$\begin{cases} \mathrm{V_{ci}^{min}} \leq \mathrm{V_{ci}} \leq \mathrm{V_{ci}^{max}} & \text{(a)} \\ \mathrm{M_{ci}^{min}} \leq \mathrm{M_{ci}} \leq \mathrm{M_{ci}^{max}} & \text{(b)} \\ \mathrm{V_{dci}^{min}} \leq \mathrm{V_{dci}} \leq \mathrm{V_{dci}^{max}} & \text{(c)} \end{cases}$$

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

La contrainte de l'équation relative a puissance active transitant entre les convertisseurs est obtenue en négligeant les pertes dans les convertisseurs. Pour le schéma (BtB), la puissance est donnée par $Re = \{\vec{V}_{ck}\vec{I}_{ck}^{*} + \vec{V}_{cm}\vec{I}_{cm}^{*}\} = 0$.

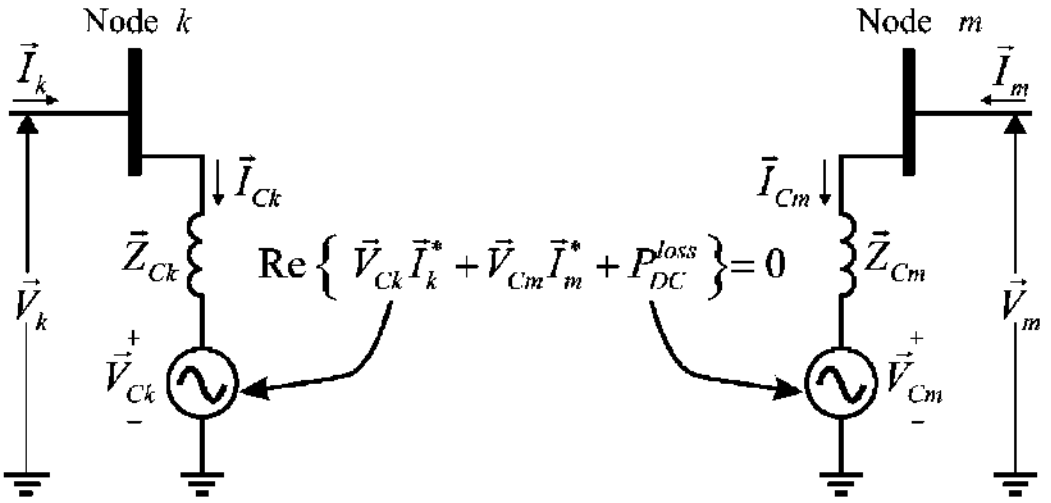


Figure. III 2. Circuit équivalent du lien de transmission de VSC-HVDC.

III.6 Fonctionnement des convertisseurs VSC [16]

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 (Fig. 6). Le convertisseur VSC fournit, à partir de la tension continue UDC, une tension alternative réglable U_v de la forme

$$\mathrm{U_v} = \frac{1}{2}\mathrm{U_{DC}M.\sin(wt + \delta)} + \mathrm{harmonique} \qquad (\mathbf{III.6})$$

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.

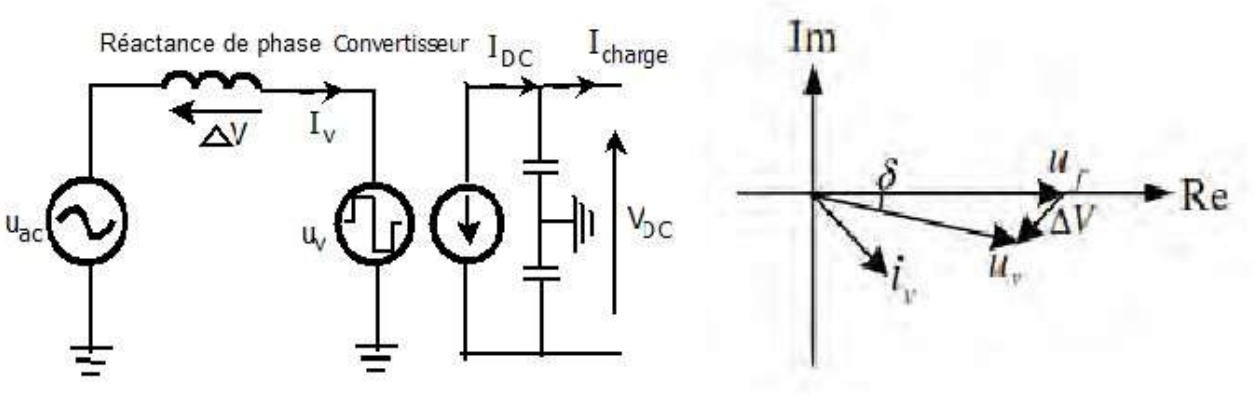


Figure III.3.Circuit équivalent d'un convertisseur VSC connecté à un système AC

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:

$$P = \frac{U_f U_v \sin\delta}{X}$$

Où X est la réactance de phase

La puissance réactive est déterminée par:

$$Q = \frac{U_f(U_f - U_v \sin\delta)}{X}$$

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.

III.7 Application d'un HVDC VSC de type beck to beck:

III.7.1 Application (1)

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 13 nœuds

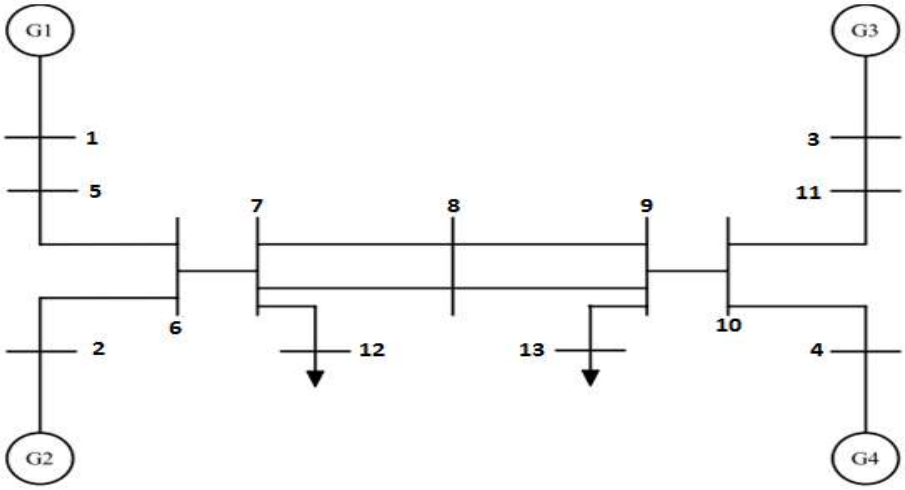


Figure III.4. Schéma d'un réseau test a13 jeux de barres

II.7.1.1 Les résultats de programmation

Le programme d'écoulement de puissance optimal a été écrit dans MATLAB en utilisent la fonction d'optimisation Fmincon a base méthode intérieur point .

Tableau III-1. Données de programmation

	MAX	MIN	Coefficient de cout		
Indice de modulation Mc	0.900	0.7500	C ($/h)	B ($/MW.hr)	a ($/MW^2.hr)
puissance active MW	1200	30			
Puissance réactive MVar	500	-500	60	3.14	0.004
Tension Pu	1.0500	0.9500			
Angle (°)	90	-90			

Tableau (III-2) : Résultat de la tension et l'angle avec la méthode d'optimisation avec intérieur point sans HVDC

Bus	V (pu)	Theta (°)
1	1.0300	18.5000
2	1.0100	9.9527
3	1.0300	0.5744
4	1.0100	-8.9781
5	1.0152	12.5633
6	0.9975	3.4471
7	0.9937	-4.2143
8	1.0000	-14.6996
9	0.9859	-24.9568
10	0.9909	-16.3019
11	1.0112	-6.0571
12	0.9874	-7.0653
13	0.9766	-30.2161

Tableau (III-3) : Résultat de puissance actif et réactif, avec la méthode d'optimisation avec intérieur point

Bus	P(Mw)	Q(MVar)
1	647.65	124.62
2	683.53	114.39
3	720.25	157.55
4	763.93	164.64
5	-0.0000	0.0000
6	00.000	0.0000
7	0.0000	0.0000
8	0.0000	57.53

9	-0.0000	-0.0000
10	0.0000	0.0000
11	-0.0000	0.0000
12	-976.00	-100.00
13	-1765.00	-100.00

On inséré un VSC de type beck to beck dans les nœuds (7,9) figure (III,4)

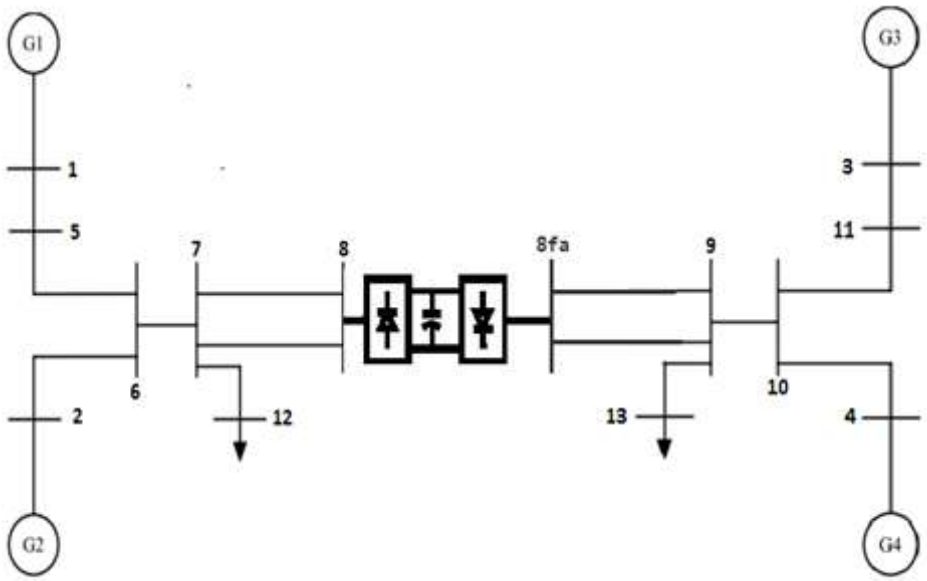


Figure III.5. Schéma d'un réseau test a13 jeux de barres avec un VSC-HVDC

Tableau III.4: Ecoulement de puissance optimal avec un VSC dans les nœuds (8,9) avec une puissance transmise de 450MW

Bus	V(Pu)	Theta(°)	P(MW)	Q (MVar)
1	1.0300	18.5000	715.52	164.89
2	1.0100	8.9985	759.57	184.43
3	1.0300	10.0069	659.44	113.18
4	1.0100	1.3331	696.52	82.32
5	1.0100	11.9040	-0.0000	0.0000

6	0.9875	1.6918	0.0000	0.0000
7	0.9796	-6.9774	0.0000	-0.0000
8	1.0000	-22.1609	0.0000	125.21
9	1.0042	-12.9680	-0.0000	0.0000
10	1.0030	-5.2602	0.0000	0.0000
11	1.0173	3.9739	-0.0000	0.0000
12	0.9732	-9.9116	-976.00	-100.00
13	0.9953	-18.0335	-1765.00	-100.00
14	1.0397	0.4556	-0.0000	-0.0000
15	0.9965	-24.7609	**-450.00**	020.44
16	1.0500	2.7802	**450.00**	72.13

Tableau III.5: Ecoulement de puissance optimal avec un VSC dans les nœuds (5,6) avec une puissance transmise de 600 MW

Bus	V(Pu)	Angle (°)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.0300	0.00	603.43	2.32
2	1.0100	15.56	705.65	61.31
3	1.0300	8.58	732.30	162.69
4	1.0100	-1.14	777.400	171.72
5	1.0343	-5.43	0.0000	0.0000
6	1.0066	8.91	0.0000	0.0000
7	1.0029	1.54	0.0000	0.0000
8	.1.0000	-7.97	0.0000	32.82
9	0.9850	-17.42	0.0000	0.0000
10	0.9900	-8.6	0.0000	0.0000
11	1.0106	1.83	0.0000	0.0000
12	0.9967	-1.26	-976.000	-100.000
13	0.9758	-22.69	-1765	-100.000
14	1.0340	17.01	-0.0000	0.0000
15	1.0356	-8.69	-600.000	91.69
16	1.0500	20.12	600.000	124.30

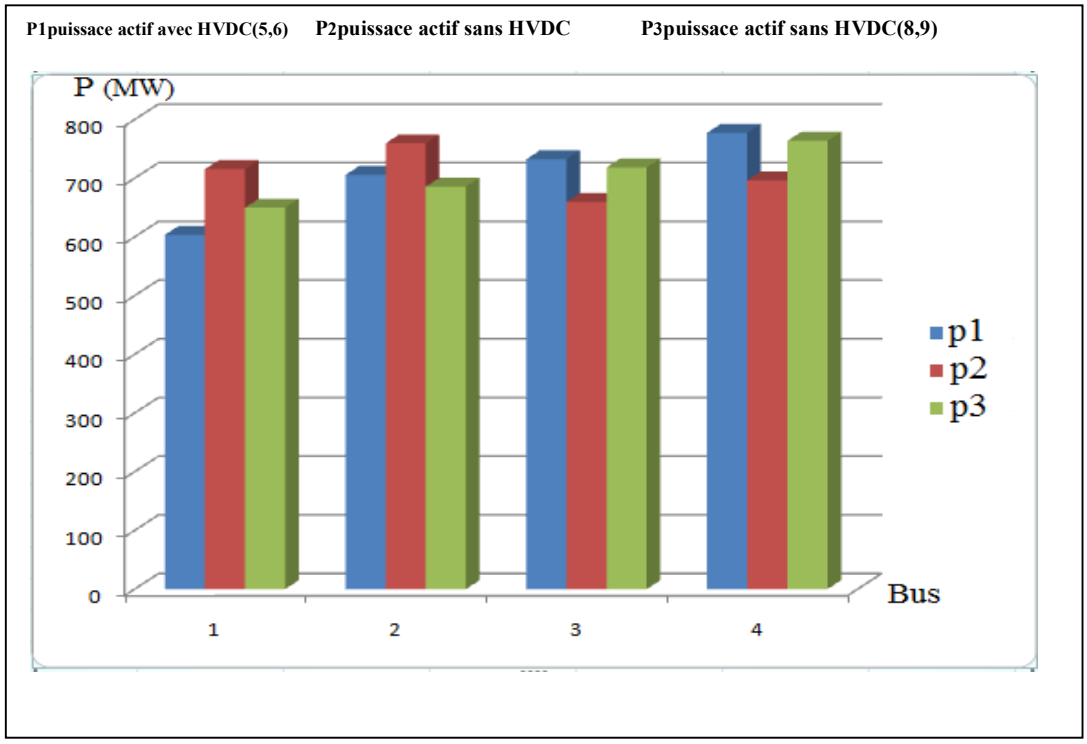


Figure III.6. Les puissances actives générées

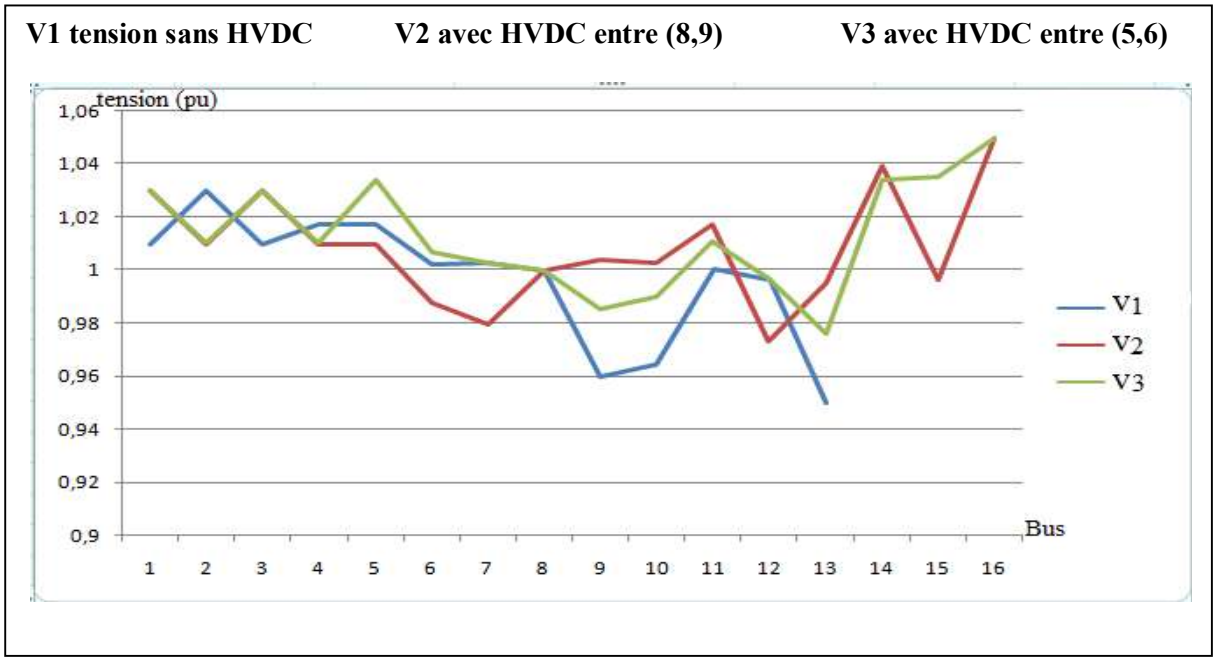


Figure III.7. La variation de tension en fonction de noeuds

Tableau III.6: Comparaison entre les puissances actives transites dans le réseau

Ligne	Puissance actif (MW) Sans VSC	Puissance actif (MW) Avec VSC(8.9)	Puissance actif (MW) Avec VSC(5.6)
3-11	718.20	659.44	732.3
1-5	649.85	715.52	603.43
2-6	685.66	759.37	705.69
6-7	1325.25	1462.38	1293.75
7-8	331.75	464.43	301.23
7-12	976.60	976.00	976.00
9-13	1765.00	1765.00	1765.00
9-10	1445.37	1327.38	1473.58
10-11	704.85	648.88	719.03
10-4	763.69	696.52	777.40

Tableau III.7: Comparaison entre les résultats obtenus

Etat	Génération total		Perte total		Cout total ($/hr)
	P(MW)	**Q(MVar)**	**P(MW)**	**Q(MVar)**	
Sans HVDC	**2817.3959**	**744.2909**	**90.0493**	**544.8228**	**17665.600**
Avec HVDC(8,9)	**2831.0493**	**544.8228**	**76.3939**	**433.5658**	**17052.4746**
Avec HVDC(6,7)	**2818.8283**	**398.0436**	**77. 8283**	**315.8525**	**17102.1236**

III.7.2 Application (2)

Le réseau IEEE-30 noeuds

Le réseau de transport qui va servir de base à notre étude dans un premier test, est issu d'un réseau réel simplifié qui est le réseau IEEE-30 noeuds. Ce réseau électrique est constitué de 30 noeuds et 2 générateurs (aux noeuds n=1 et 2) injectant leurs puissances à un système alimentant 24 charges à travers 41 lignes de transport. ce réseau est illustré dans la figure (III.5).

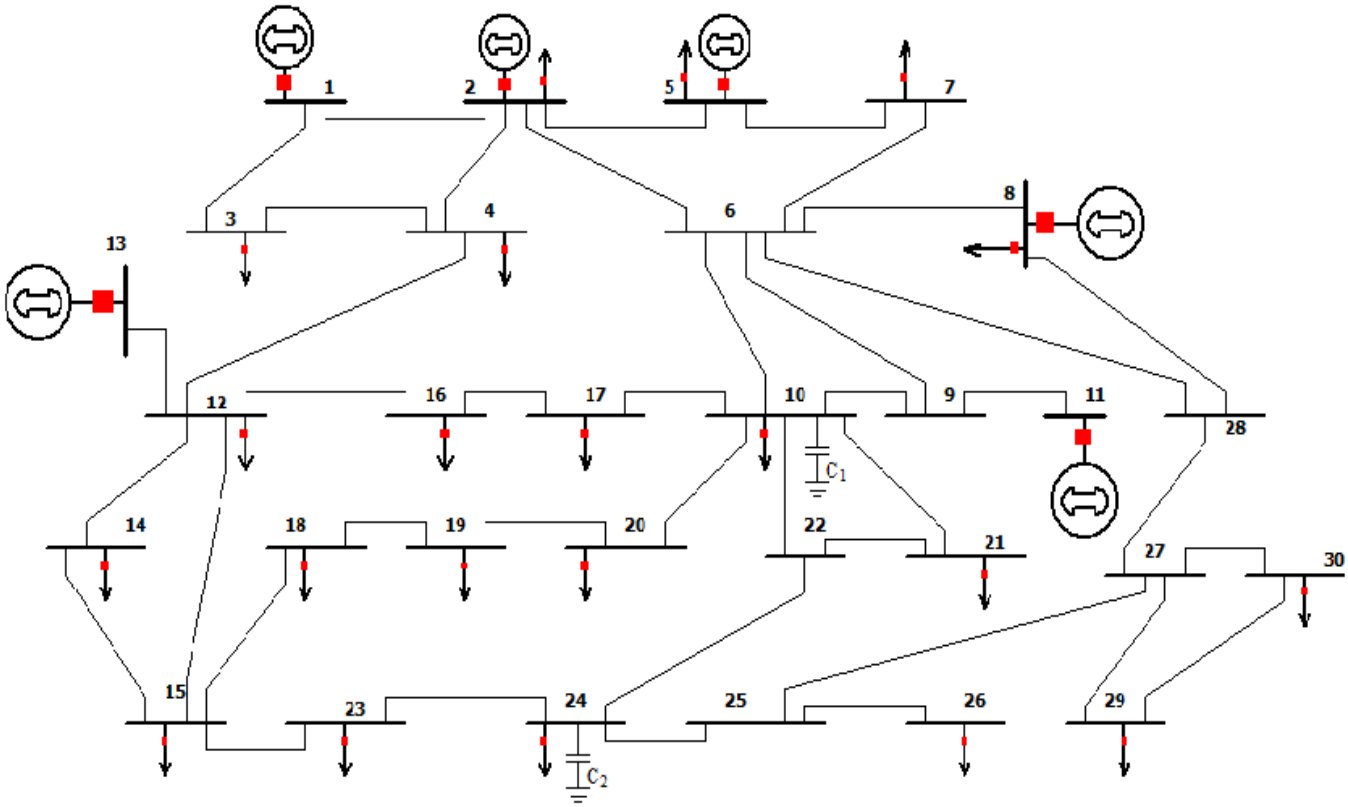


Figure III.8. Le réseau IEEE-30 nœuds

III.7.4 Les résultats de programmation

Tableau III.8: Ecoulement de puissance optimal sans HVDC

Bus	V(Pu)	Angle(°)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.0600	0	2.9630	-23.95
2	1.0430	-3.4626	6.9800	62.70
3	1.0230	-6.0894	-2.4000	0.0000
4	1.0143	-7.3251	-7.6000	-0.0000
5	1.0100	-8.9849	-45.8458	36.0100
6	1.0127	-8.5709	0.0000	0.0000
7	1.0035	-9.2743	-22.8000	-0.0000
8	1.0100	-9.1226	30.96	30.96
9	1.0515	-11.6814	0.0000	0.0000
10	1.0452	-13.3105	0.1900	19.000
11	1.0820	-11.6814	0.1615	16.1500
12	1.0577	-12.7734	0.0000	-0.000
13	1.0710	-12.7734	0.1046	10.4600
14	1.0428	-13.6377	0.0000	0.0000
15	1.0383	-13.7007	0.0000	-0.0000
16	1.0452	-13.2741	0.0000	0.0000

17	1.0399	-13.5069	0.0000	-0.0000
18	1.0286	-14.2574	0.0000	-0.0000
19	1.0259	-14.3968	0.0000	0.0000
20	1.0300	-14.1824	0.0000	-0.0000
21	1.0329	-13.7572	0.0000	0.0000
22	1.0335	-13.7443	0.0000	0.0000
23	1.0278	-14.0333	0.0000	-1.6000
24	1.0223	-14.1318	0.0000	0.0430
25	1.0197	-13.6617	0.0000	0.0000
26	1.0021	-14.0794	0.0000	-2.3000
27	1.0266	-13.1112	0.0000	-0.0000
28	1.0112	-9.2003	0.0000	0.0000
29	1.0069	-14.3329	0.0000	-0.9000
30	0.9954	-15.2096	0.0000	-1.9000

Tableau III.9: Ecoulement de puissance optimal avec HVDC entre les nœuds (15.18)

Bus	V(Pu)	Angle(°)	P(MW)	Q (MVar)
1	1.0600	0	189.3560	0.0000
2	1.0430	-3.6707	43.2254	21.6641
3	1.0191	-6.4422	-2.4000	-1.2000
4	1.0096	-7.7570	-7.6000	-1.6000
5	1.0100	-9.2886	-39.7681	-0.6396
6	1.0062	-9.6069	0.0000	0.0000
7	0.9994	-10.0096	-22.8000	-10.9000
8	1.0100	-10.0901	-14.2591	13.0794
9	1.0359	-16.0822	0.0000	0.0000
10	1.0205	-19.5292	-5.8000	17.0000
11	1.0820	-16.0822	0.0001	24.0000
12	1.0396	-10.9024	-11.2000	-7.5000
13	1.0710	-10.9024	0.0000	24.0000
14	1.0175	-10.1717	-6.2000	-1.6000
15	1.0185	-8.4677	-8.2000	-2.5000
16	1.0195	-14.7865	-3.5000	-1.8000
17	1.0133	-18.3183	-9.0000	-5.8000
18	0.9939	-45.1272	-3.2000	-0.9000
19	0.9749	-37.3204	-9.5000	-3.4000
20	0.9788	-32.8275	-2.2000	-0.7000
21	1.0072	-19.2714	-17.5000	-11.2000
22	1.0076	-19.0232	0.0000	-0.0000
23	1.0051	-11.9360	-3.2000	-1.6000
24	1.0015	-16.2732	-8.7000	-2.4000
25	1.0053	-15.4736	-0.0000	-0.0000
26	0.9874	-15.9035	-3.5000	-2.3000
27	1.0163	-14.7095	0.0000	0.0000

28	1.0053	-10.2707	0.0000	0.0000
29	0.9963	-15.9567	-2.4000	-0.9000
30	0.9848	-16.8522	-10.6000	-1.9000
31	1.0216	0.0265	0.0000	0.0000
32	0.9992	-0.7953	-70.0000	59.5592
33	1.0198	0.0334	70.0000	-25.1680

Tableau III.10: Ecoulement de puissance optimal avec HVDC entre les nœuds (24,25)

Bus	V(Pu)	Angle(°)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.0600	0	204.0779	0.0000
2	1.0430	-3.7949	40.0000	25.4432
3	1.0150	-7.5268	-2.4000	-1.2000
4	1.0049	-9.0838	-7.6000	-1.6000
5	1.0100	-7.3382	0.0000	-12.6226
6	1.0044	-10.3910	0.0000	0.0000
7	0.9972	-9.6736	-22.8000	-10.9000
8	1.0100	-10.7079	0.0000	14.9901
9	1.0408	-16.4633	0.0000	-0.0000
10	1.0310	-19.6578	-5.8000	-2.0000
11	1.0820	-16.4633	0.0000	21.4185
12	1.0540	-18.1295	-11.2000	-7.5000
13	1.0710	-18.1295	0.0000	13.0330
14	1.0375	-19.6995	-6.2000	-1.6000
15	1.0267	-20.4322	-8.2000	-2.5000
16	1.0367	-19.0399	-3.5000	-1.8000
17	1.0273	-19.6804	-9.0000	-5.8000
18	1.0160	-20.8713	-3.2000	-0.9000
19	1.0128	-20.9356	-9.5000	-3.4000
20	1.0165	-20.6740	-2.2000	-0.7000
21	1.0172	-21.3962	-17.5000	-11.2000
22	1.0173	-21.7950	0.0000	0.0000
23	1.0075	-23.6808	-3.2000	-1.6000
24	0.9954	-27.7836	-8.7000	-6.7000
25	1.0102	-24.9482	-0.0000	0.0000
26	0.9924	-25.3739	-3.5000	-2.3000
27	1.0292	-21.0710	0.0000	0.0000
28	1.0013	-11.6450	0.0000	0.0000
29	1.0095	-22.2865	-2.4000	-0.9000
30	0.9981	-23.1585	-10.6000	-1.9000
31	0.9990	-0.6095	-122.6036	-12.1658
32	0.9983	-0.4913	-60.0000	35.2428
33	0.9998	-0.6035	60.0000	1.7756

Tableau III.11: Ecoulement de puissance optimal avec HVDC entre les nœuds (9.10)

Bus	V(Pu)	Angle(°)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.0600	0	203.8935	0.0000
2	1.0430	-3.8962	40.0000	31.2180
3	1.0142	-7.1841	-2.4000	-1.2000
4	1.0038	-8.6656	-7.6000	-1.6000
5	1.0100	-7.7298	0.0000	-8.8048
6	0.9969	-10.9593	-0.0000	0.0000
7	0.9927	-10.1618	-22.8000	-10.9000
8	1.0100	-11.2244	0.0000	34.7951
9	1.0439	-31.5967	0.0000	0.0000
10	1.0239	-7.6726	-5.8000	-2.0000
11	1.0820	-31.5967	-0.0000	19.8248
12	1.0417	-11.2271	-11.2000	-7.5000
13	1.0710	-11.2271	-0.0000	22.3789
14	1.0240	-11.7423	-6.2000	-1.6000
15	1.0197	-11.3740	-8.2000	-2.5000
16	1.0274	-10.0238	-3.5000	-1.8000
17	1.0197	-8.5982	-9.0000	-5.8000
18	1.0086	-10.7976	-3.2000	-0.9000
19	1.0054	-10.2492	-9.5000	-3.4000
20	1.0093	-9.6602	-2.2000	-0.7000
21	1.0102	-8.4998	-17.5000	-11.2000
22	1.0105	-8.6024	-0.0000	0.0000
23	1.0040	-11.1842	-3.2000	-1.6000
24	0.9917	-10.5541	-8.7000	-6.7000
25	0.9871	-12.4048	0.0000	0.0000
26	0.9689	-12.8510	-3.5000	-2.3000
27	0.9944	-13.2744	-0.0000	-0.0000
28	0.9982	-11.2496	-0.0000	-0.0000
29	0.9739	-14.5784	-2.4000	-0.9000
30	0.9621	-15.5161	-10.6000	-1.9000
31	1.0392	-0.0416	-88.8266	446.4890
32	1.0448	-0.5682	-180.0000	29.0739
33	0.9999	-0.0203	180.0000	-408.0470

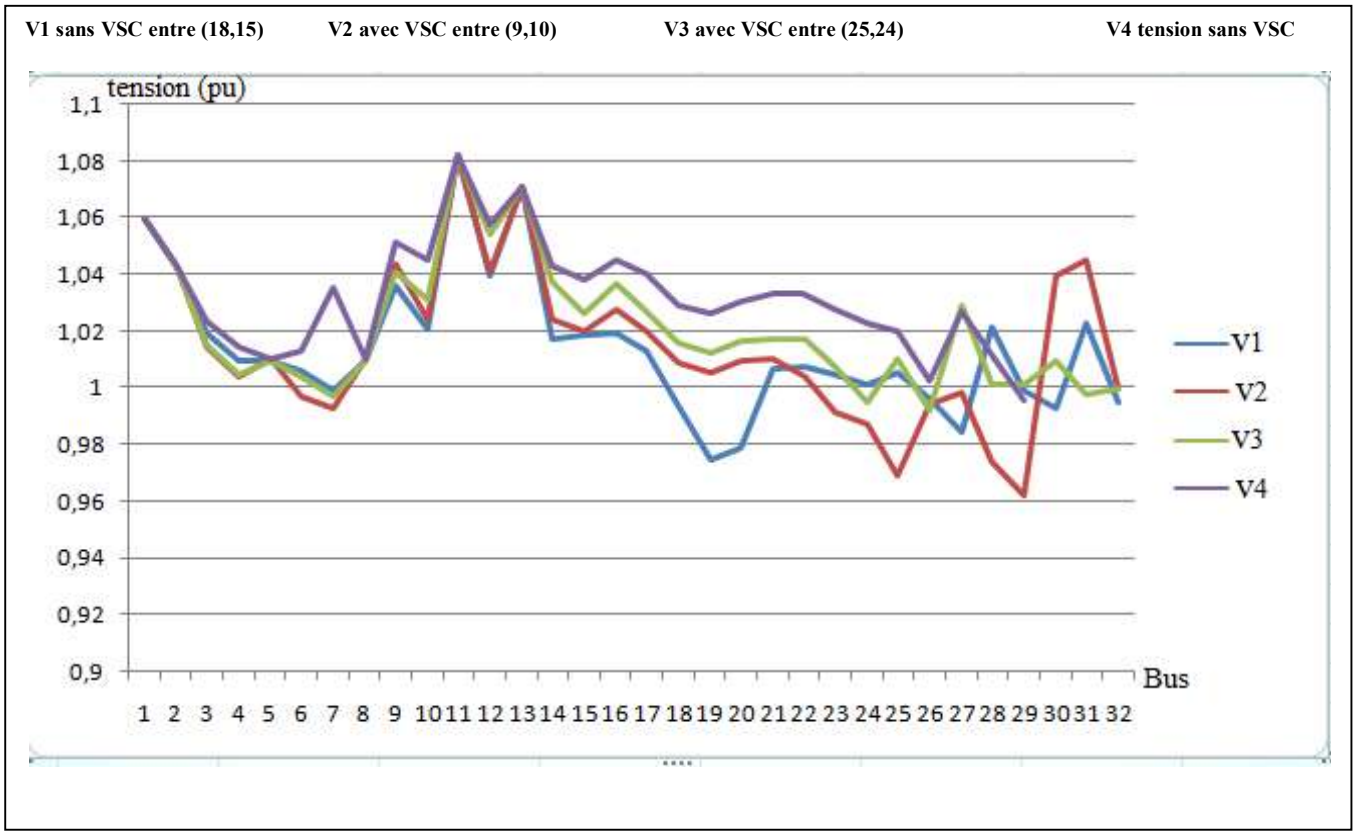


Figure III.9. la variation de la tension dans les différents emplacement

Tableau III.12: Comparaison des résultats obtenus avec un réseau a30 noeuds

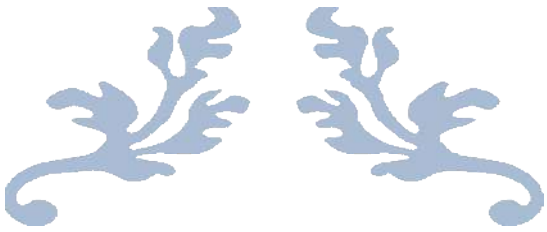
Cas	Perte active MW	Perte réactive MVar	Cout total $/hr
Sons HVDC	98.148	46.215	741.2589
Avec HVDC (15,18)	41.0543	75.2951	813.9132
Avec HVDC (9,10)	17.5669	102.4280	360.00
Avec HVDC (24,25)	16.02457	22.2951	360.00

III.8 Commentaire

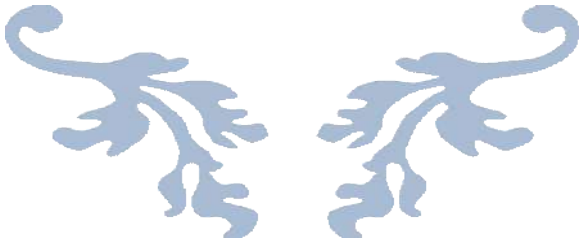
Les résultats de programmation montrent que les systèmes HVDC non seulement peuvent commander les puissances traversent les lignes de transmissions mais peuvent également diminuer les pertes et maintenir la tension à une valeur constante.

III.9 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, on a testé la méthode de point intérieur sur les deux réseaux, 13 et 30 jeux de barres pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance optimal en présence de dispositif VSC-HVDC. Les résultats de simulation obtenus permettent d'espérez une application pratique de cette méthode pour le calcule de l'OPF avec plusieurs remplacements dans ces réseaux électriques.



CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

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.

Ce mémoire présente et explique l'écoulement de puissance optimal qui est un outil important pour la planification, de l'opération de la commande du système d'alimentation. La flexibilité s de VSC-HVDC permet de commander les puissances actives, les puissances réactives et les grandeurs nodales de tension ce qui donne une solution pour plusieurs problèmes opérationnel se posant dans l'industrie électrique.

La méthode de points intérieure OPF donne une réponse à la façon d'exploiter les possibilités de contrôle les paramètres des réseaux électrique afin de fournir la demande la plus économiquement.

BIBLIOGRAPHE

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

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

[3] M. RAMADAN «*Commande Non Linéaire et Stabilisation des Systèmes de Transmission VSC-HVDC*» thèse de Doctorat Génie Electrique -Automatique, universite de Paris sud

[4] F. D'EUSTACHIO « Les enjeux des systèmes HVDC dans les réseaux de transport d'électricité» Mémoire UE département « Information et communication pour l'ingénieur » 2014

[5] Hans Glavitsch, Rainer Bacher «OPTIMAL POWER FLOW ALGORITHMS» Swiss Federal Institute of Technology 2010

[6] D. BEN ATTOUSS « Transport d'énergie en courant contenu (HVDC)» Université d'El Oued Département Génie Electrique 2008

[7] Z.SEDDIKI« Optimisation de l'écoulement de puissances dans un système d'énergie électrique par la méthode de point intérieur» université de HSSIBA BEN BOUALI Chlef mémoire de magister spécialité électrotechnique option de réseau électrique 2009

[8] S. RAMDANE «Programmation en MATLAB de la Stabilité Transitoire d'une Modélisation Interactive d'un Réseau Electrique par Intégration Numérique» Mémoire de magister en électrotechnique option : analyse, commande et conduite des réseaux électriques promotion 2008

[9] S.MAOUSSA «Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS». Université Ferhat Abbas Setif mimoire De Magister En Electrotechnique Option : Réseaux électriques 2012

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

[11] MOHAPATRA BIKASH KUMAR SAHOO «Dynamic Stability Improvement of Power System with VSC-HVDC Transmission» Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela thèse de Master 2014

[12] High voltage direct courant transmission proven Tecgnology of power exchange 201 by Siemens AG

[13] PHILIPPE JUNIOR OSSOUCAH «Analyse Paramétrique Des Réseaux Électriques Sur Matlab » Département de génie électrique école polytechnique de Montréal diplôme de maîtrise ès sciences appliquées Décembre 2010

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

[15] S.BENHALIMA «La conception, la modélisation et la simulation du système VSC-HVDC offshore » l'école de technologie supérieure Montréal 2012

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

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

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

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

[20] D Bruno, "Simulation En Temps Réel D'un Convertisseur HTCC ", Diplôme De Maîtrise Es Sciences Appliquées, Février 1998.

[21] L Baghli, " Réalisation d'un Environnement Graphique avec Base de Données pour l'Analyse et la Simulation de Réseaux Electriques ", PFE, ENP Alger, Algérie 1994.

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

[23] N. Flourentzou, V.G. Agelidis, G.D. Demetriades, «*VSC-based HVDC power transmission systems: An overview*» IEEE Transactions on Power Electronics, vol.24, no.3, March 2009.

[24] M.REZIG Etude d'un dispatching des puissance économique des puissance acticves par les algorithemes de fourmis

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

[26] Y. Himri, Arif S. Malik , A. Boudghene Stambouli , S. Himri , B. Draoui, "Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development," *elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 1584–1591, Sep. 2009

[27] A Hellal, "Cours de modélisation et optimisation des réseaux électriques ", Département

de Génie Electrique, UAT Laghouat, Algérie 2006

[28] A. Geletu Quadratic programming problems - a review on algorithms and applications (Active-set and interior point methods) Ilmenau University of Technology Department of Simulation and Optimal Processes (SOP) 2012

[29] S.Y. Ruan, G.J. Li, L. Peng, Y.Z. Sun, and T.T. Lie. «A nonlinear control for enhancing HVDC light transmission system stability». International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2007

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

ANNEXE

Annexe B

Bus	V(pu)	Angle (°)	PG (pu)	QG (pu)	Pch (pu)	Qch (pu)	G (pu)	B (pu)	Type De Bus	PG Max (pu)	PG Min (pu)	V (KV)	V Max (pu)	V Min (pu)
1	0.92	18.5	7.0	-2	0.0	0.0	0.0	0.0	1	5	-2.0	22.0	1.1	0.5
2	1.01	8.80	7.0	3.76	0.0	0.0	0.0	0.0	2	8.0	-1.0	22.0	1.1	0.9
3	1.03	-6.8	7.16	1.49	0.0	0.0	0.0	0.0	2	5.0	-1.0	22.0	1.1	0.9
4	1.01	-16.9	7.0	1.39	0.0	0.0	0.0	0.0	2	5.0	-1.0	22.0	1.1	0.9
5	1.10	12.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	230	1.5	0.5
6	0.98	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	230	1.5	0.5
7	0.97	-6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0	0.0	0.0	230	1.5	0.5
8	1.00	-19.3	0.0	1.09	0.0	0.0	0.0	0.0	2	5.0	0.0	500	1.5	0.5
9	0.98	-31.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0	0.0	0.0	230	1.5	0.5
10	0.99	-23.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	230	1.5	0.5
11	1.01	-13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	230	1.5	0.5
12	0.95	-10	0.0	0.0	9.76	1.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	115	1.5	0.5
13	0.95	-35	0.0	0.0	17.65	1.0	0.00	0.00	0	0.0	0.0	115	1.5	0.5

- 1, swing bus
- 2, generator bus (PV bus)
- 3, load bus (PQ bus)

depart	arête	Resistance	Reactance	tap ratio	tap phase	Tap max	Tap min	Tap size
1	5	0.0	0.0167	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
2	6	0.0	0.0167	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
7	12	0.0	0.005	0.0	1.0	1.2	0.8	0.02
7	6	0.001	0.0100	0.0175	1.0	0.0	0.0	0.0
7	8	0.011	0.110	0.1925	1.0	0.0	0.0	0.0
7	8	0.011	0.110	0.1925	1.0	0.0	0.0	0.0
5	6	0.0025	0.025	0.0437	1.0	0.0	0.0	0.0
3	11	0.0	0.0167	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
4	10	0.0	0.0167	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
9	8	0.011	0.11	0.1925	1.0	0.0	0.0	0.0
9	8	0.011	0.11	0.1925	1.0	0.0	0.0	0.0
9	13	0.0	0.005	0.00	1.0	1.2	0.8	0.2
9	10	0.001	0.01	0.0175	1.0	0.0	0.0	0.0
11	10	0.0025	0.025	0.0437	1.0	0.0	0.0	0.0

Examples of Using *fmincon* in MATLAB

fmincon finds a minimum of a constrained nonlinear multivariable function, and by default is based on the SQP (Sequential Quadratic Programming) algorithm.

fmincon solves problems of the form:

$$\min_x f(x) \text{ subject to:}$$

$$\left.\begin{array}{l} A*x \le B \\ Aeq*x = Beq \end{array}\right\} \text{ linear constraints}$$

$$\left.\begin{array}{l} C(x) \le 0 \\ Ceq(x) = 0 \end{array}\right\} \text{ (nonlinear constraints)}$$

$$LB \le x \le UB \rightarrow \text{ bounding of variables}$$

Common Syntax:

x = fmincon(fun, x0, A, b)

x = fmincon(fun, x0, A, b, Aeq, Beq)

x = fmincon(fun, x0, A, b, Aeq, Beq, lb, ub)

x = fmincon(fun, x0, A, b, Aeq, Beq, lb, ub, nonlcon)

[x, fval, exitflag, output, lambda] = fmincon(fun, x0, A, b, Aeq, Beq, lb, ub, nonlcon)

where **x0** is the initial guess for the minimum, **nonlcon** is an M-file function call for the nonlinear constraints and defines **C(x)** and **Ceq(x)** . Note that if any argument is not present, it should be set to a null set []. If **lb** and **ub** are not known, they should be set to null sets as well. **Lambda** is the Lagrange multipliers.

Example 1: **Minimize** $\mathbf{f(x) = -x_1x_2x_3}$

s.t. $\mathbf{0 \le x_1 + 2x_2 + 2x_3 \le 72}$

$\mathbf{x_0} = [10 \;\; 10 \;\; 10]^T$

Rewrite the linear inequality constraints as:

$\mathbf{-x_1 - 2x_2 - 2x_3 \le 0}$ **and** $\mathbf{x_1 + 2x_2 + 2x_3 \le 72}$

Write an M-file for **f(x)**:

```
function f = myfun(x)
f = –x(1)*x(2)*x(3);
```

The MATLAB input is:

```
>> A = [–1 –2 –2; 1 2 2];
>> b = [0; 72];
>> x0 = [10; 10; 10];
>> [x, fval] = fmincon(@myfun, x0, A, b)

x =

   24.0000    12.0000    12.0000

fval =

  –3.456e+03
```

Example 2: **Minimize** $\mathbf{f(x) = e^{x_1}[4x_1^2 + 2x_2^2 + 4x_1x_2 + 2x_2 + 1]}$

s.t. $\mathbf{1.5 + x_1x_2 - x_1 - x_2 \leq 0}$

$\mathbf{-x_1x_2 \leq 10}$

$\mathbf{x_0} = [-1\ -1]^T$

Write an M-file for the objective function:

```
function f = objfun(x)
f = exp(x(1))*(4*x(1)^2+2*x(2)^2+4*x(1)*x(2)+2*x(2)+1);
```

Write an M-file for the nonlinear constraints:

```
function [c, ceq] = confun(x)
c = [1.5+x(1)*x(2) –x(1) –x(2); –x(1)*x(2) –10];
ceq = [];
```

The MATLAB input is:

```
>> x0 = [–1; –1];
>> [x, fval] = fmincon(@objfun, x0, [], [], [], [], [], [], @confun)

x =
```

```
    −9.5474    1.0474

fval =

    0.0236
```