

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية 1
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الالية والالكتروتقني
Département d'automatique et électrotechnique



Mémoire de Master

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Machines Electriques

Présenté par :

Teffahi Omar

Musleh Abdallah

Contribution à l'écoulement de puissance optimale dans le réseau électrique avec HVDC

Proposé par : Dr.Chanane Abdallah

Année Universitaire 2023-2024

La première chose que nous devons exprimer est notre gratitude envers <**Allah**> Tout-Puissant, car nous ne serions pas ce que nous sommes aujourd'hui sans Sa volonté et Son destin. Nous remercions également nos parents, dont nous ne pouvons pas trouver les mots justes pour exprimer notre profonde gratitude. Votre présence à nos côtés a été une source de force, d'encouragement et d'optimisme, et aucun mot ne peut véritablement décrire l'amour que nous avons pour vous. Nous espérons sincèrement qu'Allah vous protégera pour nous. Nous n'oublions pas non plus de mentionner nos sœurs et frères qui ont été une source de motivation pour nous.

Nous exprimons notre gratitude envers notre promoteur Mr <**Chanane Abdallah**>, qui nous a soutenus tout au long de notre parcours académique, en particulier lors de la réalisation de notre mémoire de fin d'études. Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide.

A CELLE POUR QUI MON COEUR, DEPUIS MA NAISSANCE, N'A PU ÉPROUVER QU'AMOUR ET RECONNAISSANCE, à CELLE QUI A DONNÉ UN SENS à MON EXISTENCE EN M'OFFRANT UNE ÉDUCATION DIGNE DE CONFIANCE, A MA TRÈS CHÈRE MÈRE.

A MON CHER PÈRE, POUR SON AMOUR ET SON AFFECTION ET POUR BIEN PLUS QUE JE NE SAURAI DIRE, MERCI BEAUCOUP PÈRE. QUE DIEU VOUS PROTÈGE.

A CEUX QUI N'ONT JAMAIS CESSÉ DE ME SOUTENIR ET M'ENCOURAGER. A CEUX QUI LEUR AMOUR M'A DONNÉ LA VOLONTÉ D'ALLER TOUJOURS DE L'AVANT.

A MA GRAND-MÈRE.

A MES TRÈS CHERS FRÈRES, à MES TRÈS CHÈRES SOEURS.

A TOUS MES CHERS ONCLES, À TOUTES MES CHÈRES TANTES.

A TOUTE MA FAMILLE.

A TOUS MES AMIS.

A TOUS MES COLLÈGUES.

A TOUS MES ENSEIGNANTS.

ET à TOUTE MA PROMOTION D'ÉTUDE 2023/2024

JE DÉDIE CE TRAVAIL

ملخص

في هذا العمل، سوف نتطرق الى تبين دور أنظمة التيار المستمر عالي الجهد HVDC في الشبكات الكهربائية و مساهمتها في تقليل انحراف الجهد مع تجنب خسائر الاستطاعة ، بعدها سوف نقوم بتطبيق محاكاة حالات مختلفة للشبكات الكهربائية مع و بدون مساهمة أنظمة HVDC لتبيين تأثير محولات VSC في الشبكات الكهربائية ، خصوصا في تقليل انحراف الجهد، سنقوم أيضا بتطبيق خوارزمية الأسراب الجزيئية (PSO) لتقليل انحراف الجهد.

كلمات مفتاحية : أنظمة التيار المستمر عالي الجهد ، محولات VSC ، خوارزمية الأسراب الجزيئية PSO

Résumé : Dans ce travail, nous allons aborder le rôle des systèmes HVDC (Courant Continu Haute Tension) dans les réseaux électriques et leur contribution à la réduction de la déviation de tension tout en évitant les pertes de puissance. Ensuite, nous appliquerons des simulations de différents cas de réseaux électriques avec et sans contribution des systèmes HVDC pour montrer l'impact des convertisseurs VSC sur les réseaux électriques, en particulier dans la minimisation de la déviation de la tension. Nous appliquerons également l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour minimiser la déviation de la tension.

Mots clés : HVDC, VSC, Convertisseur, Optimisation par essaim de particules (PSO).

Abstract: In this work, we will show the role of HVDC systems to electrical grids and its contribution in maintaining stability and preventing power losses. Then we will apply simulations of different electrical grids with and without HVDC contribution to demonstrate the impact of VSC converters on electrical grid, especially in minimizing voltage deviation. We will also apply the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to minimize voltage deviation.

Keywords: HVDC, VSC converters , Particle swarm optimisation (PSO).

Liste des abréviations et acronyme

HVDC	Courant Continu à Haute Tension.
VSC	Convertisseur à base de tension.
PSO	Optimisation par essaim de particules.
PF	Écoulement de puissance.
JB	Jeu de barres.
P_i, Q_i	Puissance active et réactive triphasée injectée au nœud i .
P_{Gi}, Q_{Gi}	Puissance active et réactive de génération triphasée injectée au nœud i .
P_{Di}, Q_{Di}	Puissance active et réactive demandée au jeu de barres i .
S_{ij}	La puissance apparente complexe triphasée injectée au nœud ij .
V_i	Tension complexe au nœud i .
δ_i	Déphasage de la tension au nœud i .
\bar{V}_S, \bar{I}_S	Tension et courant à la source respectivement.
\bar{V}_R, \bar{I}_R	Tension et courant de charge respectivement.
\bar{Z}	Impédance de la ligne.
R, X	Résistance et réactance de la ligne respectivement.
\bar{Y}	Admittance shunt de la ligne.
F	Fonction objective.
ΔP_i	Différence (écarts) entre P_i calculée et P_i spécifiée.
G_{ij}	Conductance entre le JDB i et JDB j .
B_{ij}	Susceptance entre le JDB i et JDB j .
$Y_{ij} \theta_{ij}$	Module et argument de l'élément ime de la matrice admittance.
V_{max} et V_{min}	Limites max et min de la tension au nœud i .
S_{max} et S_{min}	Limites max et min de la puissance apparente injectée au nœud i .
P_{Gi}^{min} et P_{Gi}^{max}	Limites min. et max de puissance active du générateur i .
V_{Gi}^{min} et V_{Gi}^{max}	Limites minimale et maximale sur la variable tension.
T_i^{min} et T_i^{max}	Limites minimale et maximale sur la variable du rapport de transformation.
P_{G2}, \dots, P_{GN_G}	Puissances actives générées sauf celle du jeu de barres de référence.
V_{G1}, \dots, V_{GN_G}	Les tensions de tous les jeux de barres générateurs.
T_1, \dots, T_{N_T}	Les prises des transformateurs variables.

P_{best}	La meilleure position de c'est à dire la position de la meilleure solution visitée.
P_{gbest}	La meilleure position de son voisinage c'est à dire la position de la meilleure solution connue de son voisinage.
PU	Le système d'unités relatives (Per-Unit)
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systèmes
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
VAR	Volt ampère réactif
$\cos\phi$ ou $F. p$	Facteur de puissance
k	Numéro d'itération
X_{i+1}	Nouvelle position
X_i	Position actuelle
X_{gbest}	Solution globale
X_{pbest}	La meilleure solution
Rho_1	Variable aléatoire entre 0 et 1
P_{gmax} et Q_{gmax}	Puissance réelle et réactive de générateur max
Q_L et P_L	Puissance réactive et réelle de charge
Ω	Ohm
Y_{ij}	L'admittance shunt par phase de la ligne entre les jeux de barres i et j
G_{ij}	La conductance de la ligne entre les jeux de barres i et j
B_{ij}	La susceptance capacitive shunts de la ligne entre les jeux de barres i et j
PV bus	Jeux de barres générateur
PQ bus	Jeux de barres de charge
QC	Puissance réactive de Compensateur
PL	Pertes de lignes de transport d'électricité

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Type de jeu de barres
Tableau 3.1	La composition du réseau électrique de 5 bus
Tableau 3.2	Les résultats d'écoulement de puissance et les valeurs de tension dans le réseau électrique de 5bus.
Tableau 3.3	les résultats d'écoulement de puissance à travers les branches
Tableau 3.4	La composition de deux réseaux avec convertisseurs VSC chaque convertisseur est bipolaire
Tableau 3.5	Les données de flux de puissance sur les buses
Tableau 3.6	L'effet des système HVDC dans le réseau.
Tableau 3.7	Les résultats d'exécution au niveau des convertisseurs VSC
Tableau 3.8	Les résultats d'exécution au niveau des branches dc
Tableau 3.9	Les résultats au niveau de bus avec des convertisseurs VSC multipolaires
Tableau 3.10	Les résultats au niveau des branches après la contribution des convertisseurs VSC multipolaires
Tableau 3.11	La composition du réseau électrique de 12 bus.
Tableau 3.12	Les résultats d'écoulement de puissance et les valeurs tension dans le réseau de 12 bus
Tableau 3.13	les résultats d'écoulement de puissance à travers les branches
Tableau 3.14	Les résultats d'écoulement de puissance et les valeurs tension dans le réseau de 12 bus
Tableau 3.15	Résultats d'exécution de la simulation d'un réseau électrique de 12 bus avec contribution d'un système HVDC
Tableau 3.16	Les résultats au niveau des convertisseurs VSC
Tableau 3.17	Les résultats au niveau des Branches de transmission de courant continue
Tableau 3.18	Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 5 bus sans convertisseurs VSC
Tableau 3.19	Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 5 bus avec 3 convertisseurs VSC bipolaires.
Tableau 3.20	Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 5 bus avec 3 convertisseurs VSC tripolaires.
Tableau 3.21	Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 12 bus sans convertisseurs VSC.
Tableau 3.22	Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 12 bus avec convertisseurs VSC.

Liste des figures

Figure 1.1	Modèle du générateur
Figure 1.2	Modélisation d'une ligne électrique
Figure 1.3	Modèle d'un transformateur
Figure 1.4	Modèle d'une charge
Figure 1.5	Modèles des éléments shunt : a) symbole, b) élément capacitif, c) élément inductif
Figure 2.1	Organigramme de l'algorithme PSO
Figure 3.1	Schéma équivalent d'un transformateur
Figure 3.2	Schéma représentatif de l'impédance
Figure 3.3	Schéma représentative de la résistance
Figure 3.4	Schéma représentant l'inductance
Figure 3.5	Système électrique avec deux nœuds
Figure 3.6	Station de convertisseur VSC-HVDC
Figure 3.7	Modèle de flux de puissance monophasé équivalent d'une station de conversion connectée au réseau CA
Figure 3.8	Modèle de la station de conversion connectée au réseau CA (sans filtre)
Figure 3.9	Modèle de la station de conversion connectée au réseau CA (sans transformateur)
Figure 3.10	Modèle de la station de conversion connectée au réseau CA (sans filtre et transformateur)
Figure 3.11	Modélisation d'un réseau à courant continue
Figure 3.12	System de 5 bus sans contribution de courant continue
Figure 3.13	Histogramme représentant l'impact de l'algorithme PSO sur les valeurs de tension du réseau de 12 bus avec 3 convertisseurs VSC

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 – INTRODUCTION AU DOMAINE DE L’ECOULEMENT DE PUISSANCE DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES.....	3
1. INTRODUCTION.....	3
2. HISTORIQUE ET EVOLUTION DES RESEAUX ELECTRIQUES.....	3
3. MODELISATION DES COMPOSANTES DES RESEAUX ELECTRIQUES.....	3
3.1 Modélisation des générateurs.....	4
3.2 Lignes et câbles de transmission.....	4
3.3 Transformateur de puissance.....	5
3.4 Charge électrique.....	6
3.5 Élément shunt.....	7
4. TYPES DES RESEAUX ELECTRIQUES.....	8
4.1 Réseau de transport.....	8
4.2 Réseaux de distribution.....	8
4.3 Réseaux en courant continu haute tension (HVDC).....	8
4.4 Réseaux intelligents (smart Grids).....	8
4.5 Réseaux insulaires.....	8
4.6 Microgrids.....	9
5. ECOULEMENT DE PUISSANCE.....	9
6. BUT DE L’ECOULEMENT DE PUISSANCE.....	9
7. DOMAINE D’APPLICATION.....	9
7.1 Maximisation de la puissance transmissible.....	9
7.2 Minimisation du coût de combustible.....	10
7.3 Minimisation des pertes.....	10
7.4 Amélioration du profil de tension.....	10
7.5 Amélioration de la stabilité de tension.....	10
8. CLASSIFICATION DES JEUX DE BARRES.....	11
9. CONCLUSION.....	11
CHAPITRE 2 - MODELISATION DES RESEAUX ELECTRIQUES AVEC HVDC.....	12
1. INTRODUCTION.....	12
2. PRINCIPES DE BASE DES SYSTEMES HVDC.....	12
2.1 Fonctionnement d'un système HVDC.....	12
2.2 Types de systèmes HVDC.....	12
3. AVANTAGES DES SYSTEMES HVDC.....	12
4. MODELISATION DES SYSTEMES HVDC.....	13
4.1 Modèles mathématiques.....	13
4.2 Techniques de simulation.....	13
5. DIFFERENCE ENTRE HVAC ET HVDC.....	14
5.1 Caractéristiques Techniques.....	14
5.2 Transmission et Perte d'Énergie... ..	14
5.3 Coût et Infrastructure.....	15

6.	APPLICATION DE L'ALGORITHME D'OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES (PSO) POUR LA RESOLUTION DU PROBLEME HVDC.....	15
6.1	Présentation de l'algorithme d'optimisation par Essaim de Particules.....	15
6.2	Organigramme de l'algorithme PSO	17
1.1	Application du PSO à la modélisation HVDC.....	17
1.2	Étude de cas : Optimisation d'un système HVDC avec l'algorithme PSO	18
7.	AVANTAGE DE L'ALGORITHME PSO.....	20
8.	CONCLUSION	21
CHAPITRE 3 - RESULTATS ET DISCUSSION.....		22
1.	Introduction	22
2.	Modélisation des systèmes AC /AC (courant alternatif).....	22
2.1	Systèmes de Conversion AC.....	22
2.2	Impédances complexes	24
3.	Système électrique avec de deux Buses.....	26
4.	Modélisation des systèmes DC/AC (system de conversion)	27
4.1	Convertisseurs.....	28
4.2	Modélisation de coté AC.....	28
4.3	Pertes des convertisseurs	32
5.	Modélisation des systèmes à courant continue	32
6.	Application de la simulation des systèmes étudiées	33
6.1	Introduction sur le programme MATA CDC	33
6.2	Etude d'écoulement de puissance dans différents systèmes de haute tension de 5 bus.....	34
6.3	Écoulement de puissance sur un réseau de 12 bus.....	44
7.	Optimisation des résultats obtenue de la simulation.....	50
7.1	Introduction.....	50
7.2	Application	50
8.	Conclusion.....	57
Conclusion générale.....		58
Référence Bibliographiques		60

Introduction

générale

L'énergie électrique est au cœur de la société moderne, avec une contribution majeure en alimentant tous les éléments de l'infrastructure globale. Néanmoins, son exploitation optimale est devenue un défi considérable au fil du temps.

Avec l'augmentation de la consommation et la complexité croissante de la répartition de l'énergie électrique au cours des dernières décennies, l'exploitation de cette énergie requiert un développement dans la technologie utilisée pour la transmission et la distribution de l'énergie électrique.

Le système de transmission devient de plus en plus complexe. En outre, la demande d'un approvisionnement fiable en électricité augmente, ce qui accroît la nécessité d'un niveau plus élevé de fiabilité du système. Une solution pourrait consister à incorporer des composants de puissance contrôlables au sein du système. L'un de ces composants est la liaison HVDC.

La technologie HVDC (High Voltage Direct Current) est une nouvelle technologie qui sert à une transmission de l'énergie électrique à base du courant continu, offrant une efficacité transitoire maximale, quelle que soit la distance parcourue par l'électricité. Contrairement aux lignes de transmission (CA) traditionnelles, le HVDC minimise les pertes dues à la résistance et à la réactance, en particulier sur de longues distances.

Cette invention est un élément clé de la transition vers un réseau électrique plus efficace et durable. Contrairement aux réseaux AC traditionnels, qui utilisent le courant alternatif, les réseaux HVDC transmettent l'énergie sous forme de courant continu. Cette approche présente plusieurs avantages, notamment une meilleure gestion des pertes de transport, une capacité de transmission à longue distance et une intégration plus souple des sources d'énergie renouvelable.

La contribution des systèmes HVDC sur les réseaux électriques est basé spécifiquement sur les convertisseurs VSC, ce sont des diapositives de conversion de courent continue à courent alternative et vice versa. Cette fonctionnalité permet de transmettre les l'énergie électrique de haute tension à courant continu en long distances.

La transmission de courant continu à haute tension prévente les pertes de l'énergie électrique et réussir de garder la stabilité de système en réduisant la déviation des valeurs de tension.

Dans ce travail on adresse :

Dans le premier chapitre, nous citons le concept de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques, son historique et l'introduction sur des différents éléments participants dans la gestion de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques de haute tension.

Dans le deuxième chapitre, nous entrons sur le domaine de courant continue haute tension, avec la définition du l'algorithme d'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) et son principe de fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, on étudie la modélisation des système HVDC en exécutant la simulation des divers réseaux électriques avec et sans contribution des systèmes HVDC avec l'optimisation des résultats obtenue par l'algorithme d'Optimisation par Essaim de Particules.

Chapitre 1 :

Introduction au

domaine de

l'écoulement de

puissance dans les

réseaux électriques

1. Introduction

L'introduction aux réseaux électriques offre un aperçu général de ce domaine essentiel à notre société moderne. Les réseaux sont des infrastructures interconnectées permettant le transport et la distribution de l'électricité. Ils jouent un rôle vital dans notre vie quotidienne en assurant la disponibilité de l'énergie électrique. Comprendre le fonctionnement de ces réseaux est crucial pour garantir un approvisionnement continu et fiable en électricité.

2. Historique et évolution des réseaux électriques

L'histoire des réseaux électriques remonte au 19^{ème} siècle avec les travaux pionniers de scientifiques tels que Thomas Edison et Nikola Tesla. Ces premiers réseaux étaient limités en portée et en capacité, mais ont jeté les bases du système électrique moderne. L'évolution des réseaux électriques s'est accélérée au fil du temps, passant de réseaux locaux à des réseaux régionaux et nationaux interconnectés. Aujourd'hui, les réseaux électriques intègrent des technologies de pointe pour répondre aux besoins croissants en énergie.

3. Modélisation des composantes des réseaux électriques

Aujourd'hui le réseau électrique est exploité au plus près de ces limites physiques. Ce qui n'avait pas d'importance avant, lorsque l'on sur dimensionnait les ouvrages, nécessite maintenant une modélisation précise pour être sûr de ne pas faire tomber le réseau.

Un réseau d'énergie électrique comprend des génératrices, des lignes de transport et distribution, des transformateurs de puissance ainsi des charges électriques. 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 des schémas équivalents des principaux composant à savoir, les générateurs, les différents types de transformateurs, des lignes, les charges. Ceux-ci sont ensuite intégrés dans des programmes de calcul permettant de simuler leurs effets dans l'ensemble du système. [1].

3.1 Modélisation des générateurs

Les générateurs sont des éléments qui permettent la conversion de l'énergie (mécanique, photonique, chimique...) vers une énergie électrique. Ils peuvent fournir de l'énergie active ou réactive et ils peuvent maintenir un niveau de tension désirée. Un générateur peut être considéré comme une source de puissance active et réactive qui peut maintenir une tension de consigne.

A cause de certains facteurs comme la limite thermique du rotor, du stator et la limite de stabilité au régime permanent, le fonctionnement d'un générateur est limité en puissance active ainsi qu'en puissance réactive. Ainsi un générateur peut être modélisé selon le schéma de la figure 1.1. [1]

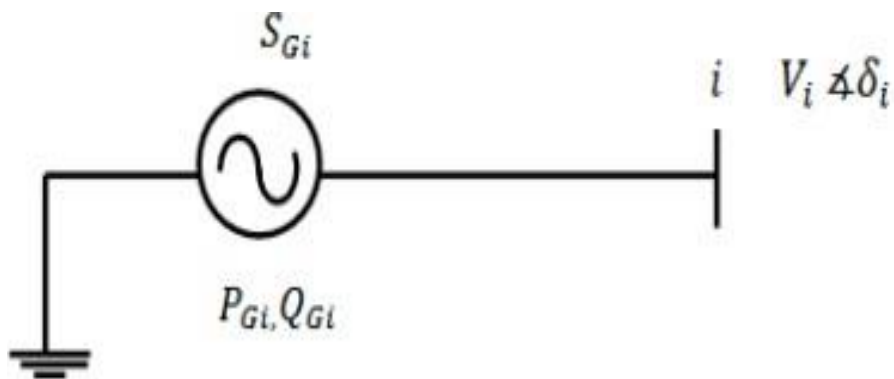


Figure 1.1 : Modèle du générateur

Avec :

S_i : Puissance apparente au nœud i

P_{Gi} : Puissance active délivrée par le générateur au nœud i

Q_{Gi} : Puissance réactive délivrée par le générateur au nœud i

V_i : Tension au nœud i

δ_i : Déphasage de la tension au nœud i

3.2 Lignes et câbles de transmission

Généralement la ligne de transport est modélisée par un schéma équivalent en π qui se compose d'une impédance série (résistance R en série avec une réactance inductive X), et une admittance

shunt qui consiste en une susceptance capacitive B (due à l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation G. Voir (Figure. 1.2) [2].

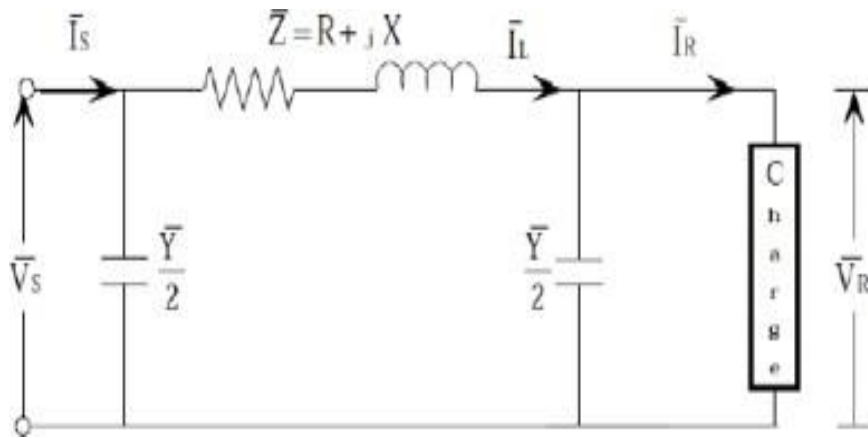


Figure 1.2 : Modélisation d'une ligne électrique

3.3 Transformateur de puissance

Un transformateur d'énergie électrique est représenté par un quadripôle en π non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation. Les rapports de transformation sont inclus dans les éléments de la matrice admittance, c'est-à-dire que les susceptances de la matrice admittance sont vues comme des fonctions de rapports de transformation (figure 1.3) [1].

Le transformateur est l'un des éléments qu'on retrouve aux différents niveaux de tensions du réseau électrique, il est entièrement statique, il permet la modification de la présentation de l'énergie électrique alternative afin de la rendre aussi commode que possible aux différents stades de la production, du transport d'énergie à HT (réduction des pertes en lignes) et de la distribution en MT et BT. [2]

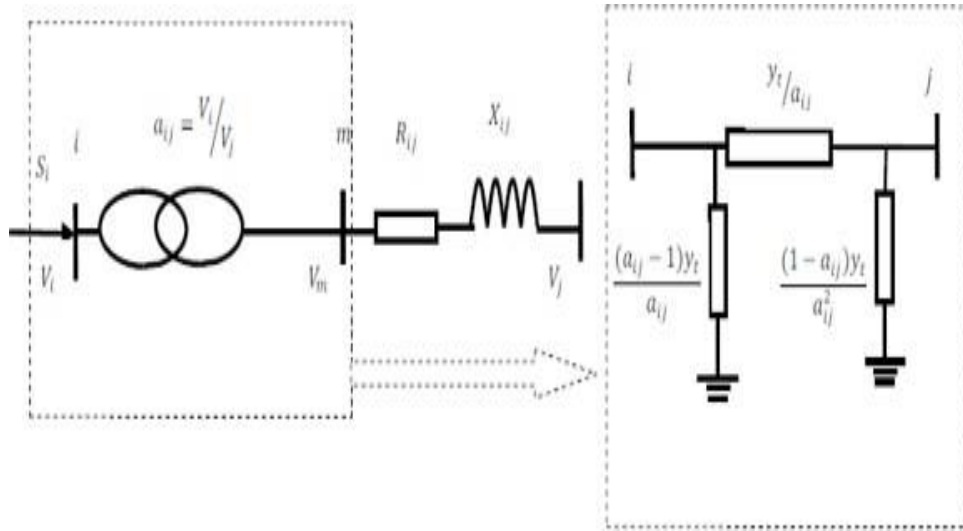


Figure 1.3 : Modèle d'un transformateur

La matrice d'admittance d'un transformateur inséré entre un nœud i et un nœud j s'écrit :

$$y_t = \begin{bmatrix} \frac{y_{ij}}{a_{ij}^2} & \frac{-y_{ij}}{a_{ij}} \\ \frac{-y_{ij}}{a_{ij}} & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

3.4 Charge électrique

La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une impédance constante. La plupart des charges représentent une sous-station (système de distribution). Ces charges sont connectées au réseau électrique à travers un transformateur à prises de charges variables, où le niveau de tension de la charge est maintenu pratiquement constant.

Dans ce cas, les puissances actives et réactives de la charge peuvent être représentées par des valeurs constantes. [3]

Les charges sont modélisées par des puissances constantes indépendantes de la tension nodale :

$$S_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di} \quad (1.2)$$

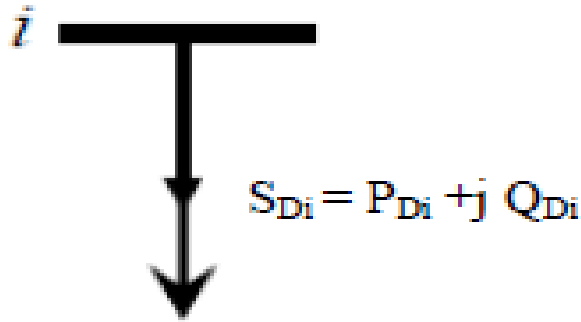


Figure 1.4 : Modèle d'une charge.

S_{Di} : puissance apparente demandée au jeu de barres i

P_{Di} : puissance active demandée au jeu de barres i

Q_{Di} : puissance réactive ; cette puissance réactive peut être positive ou négative selon que la charge est de nature inductive ou capacitive.

3.5 Éléments shunt

Dans la plupart des cas, les éléments shunt sont les batteries de condensateurs et les réactances qui sont utilisés pour fournir ou absorber la puissance réactive afin d'obtenir un meilleur profil de tension., sont modélisés par des admittances y_i de la forme :

$$y_i = g_i + jb_i \quad (1.3)$$

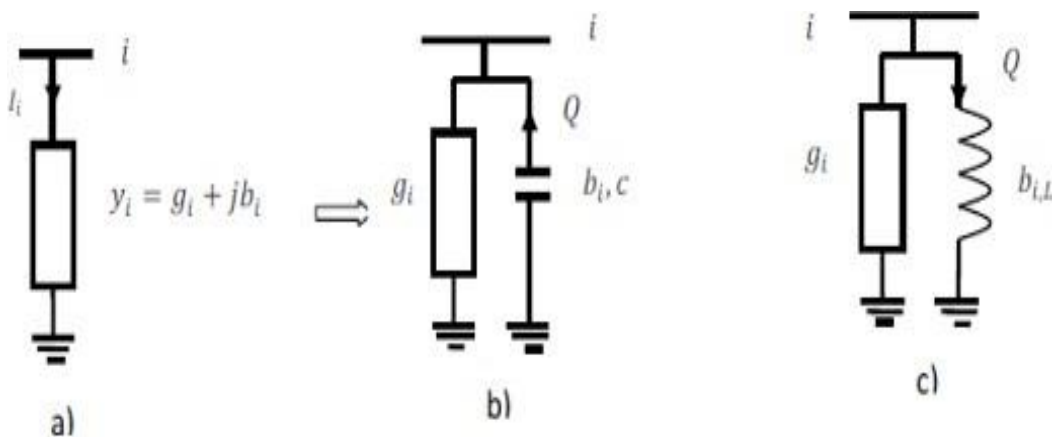


Figure 1.5 : Modèles des éléments shunt : a) symbole, b) élément capacitif, c) élément inductif

4. Types des réseaux électriques

4.1 Réseau de transport [4]

- Haute Tension (HT) : Ces réseaux transportent l'électricité sur de longues distances, généralement de 100 kV à 400 kV ou plus. Ils connectent les grandes centrales de production aux réseaux de distribution.
- Très Haute Tension (THT) : Utilisés pour les très longues distances et pour interconnecter les réseaux de différents pays, ces réseaux peuvent atteindre des tensions supérieures à 400 kV.

4.2 Réseaux de distribution [5]

- Moyenne Tension (MT) : Ces réseaux distribuent l'électricité des postes de transformation haute tension aux zones urbaines et industrielles. Les tensions typiques sont de 10 kV à 30 kV.
- Basse Tension (BT) : Ces réseaux fournissent l'électricité directement aux utilisateurs finaux, comme les ménages et les petites entreprises. Les tensions sont généralement inférieures à 1 kV.

4.3 Réseaux en courant continu haute tension (HVDC)[6]

• Ces réseaux sont utilisés pour le transport de l'électricité sur de très longues distances, notamment pour les interconnexions sous-marines et les interconnexions entre réseaux de différentes fréquences. Ils permettent de réduire les pertes d'énergie par rapport aux systèmes en courant alternatif.

4.4 Réseaux intelligents (smart Grids) [7]

• Ces réseaux utilisent des technologies de communication et d'information pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la durabilité de la production et de la distribution de l'électricité. Ils intègrent des sources d'énergie renouvelable, des dispositifs de stockage de l'énergie, et des technologies de gestion de la demande.

4.5 Réseaux insulaires

- Ces réseaux sont isolés des grands réseaux interconnectés et desservent généralement des îles ou des régions éloignées. Ils dépendent souvent de sources d'énergie locales, comme les énergies renouvelables ou les générateurs diesel.

4.6 Microgrids

- Ce sont de petits réseaux locaux qui peuvent fonctionner indépendamment ou en connexion avec le réseau principal. Ils sont souvent utilisés dans des zones éloignées ou pour des installations spécifiques comme les campus universitaires, les bases militaires, ou les communautés résidentielles.

Chacun de ces types de réseaux joue un rôle crucial dans la fourniture d'électricité fiable et efficace aux consommateurs, en s'adaptant aux spécificités géographiques et aux besoins énergétiques de différentes régions.

5. Ecoulement de puissance

L'introduction du sujet de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques met en lumière l'importance de comprendre et d'analyser la manière dont l'énergie électrique se propage à travers un réseau. En examinant les différents aspects de la transmission d'électricité, il devient évident que la maîtrise de l'écoulement de puissance est cruciale pour assurer un fonctionnement efficace et stable des réseaux. Cette introduction servira de base pour explorer plus en détail les fondements théoriques, les méthodes de calcul, l'étude de la stabilité, l'optimisation de l'écoulement de puissance, ainsi que d'autres aspects clés qui seront abordés dans ce qui suit.

6. But de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance ou de flux de puissance est une étape essentielle pour l'étude et la conception des réseaux électriques. Cette étude est nécessaire pour la planification, l'échange de puissance entre les centres de production et le dispatching économique. Elle est aussi essentielle pour l'évaluation de la stabilité transitoire, stabilité dynamique et l'estimation de l'état du réseau ainsi que la prise de mesure adéquate à d'éventuelle imprévue.

7. Domaine d'application

Les applications de la fonction « écoulement de puissance optimal » peuvent être classées en applications d'exploitation et celles de planification. Dans le domaine d'exploitation, on distingue les applications d'ordre économiques et celles d'ordre technique. Dans chaque catégorie on trouve plusieurs applications, dont les plus courantes sont :

7.1 Maximisation de la puissance transmissible

Maximiser le transfert de puissance est un objectif appréciable pour les systèmes

Interconnectés. Il peut aider à minimiser les coûts d'exploitation des systèmes électriques en plus d'autres avantages tel que l'amélioration de la fiabilité. Cet objectif est mieux géré par un ajustement optimal des sources de puissance réactives. [8]

Cependant, l'intégration des dispositifs à base de semi-conducteurs (FACTS) dans la procédure de l'OPF, peut apporter une amélioration considérable de la capacité de transfert de puissance. [9]

7.2 Minimisation du coût de combustible

Le point de départ de l'OPF est la minimisation des coûts d'exploitation des réseaux électriques. La minimisation du coût de combustible est le principal objectif dans cette catégorie. Le but est de trouver les puissances optimales à générer par les centrales avec un coût minimal du combustible. [10] [11]

7.3 Minimisation des pertes

La minimisation des pertes de transmission est considérée aussi comme l'un des objectifs qui permet une réduction des coûts. Cet objectif ainsi que la minimisation du coût de combustible est l'un des objectifs les plus couramment utilisés. [10]

7.4 Amélioration du profil de tension

En général, les tensions sont bornées entre des limites supérieures et inférieures dans les contraintes d'inégalité. Cependant, il existe d'autres formulations où le but est de déterminer les paramètres de contrôle pour minimiser la somme des déviations de tension au niveau des générateurs. [12]

7.5 Amélioration de la stabilité de tension

L'amélioration du profil de tension ne garantit pas une sécurité optimale du système. En effet, des problèmes d'instabilité de tension ont été rencontrés dans des systèmes ayant un profil de tension acceptable.

La sécurité de tension est assurée si un système est capable de maintenir constamment une tension acceptable au niveau de tous les jeux de barre du système, dans les conditions de fonctionnement normale, après une augmentation de charge, après un changement de configuration ou lorsque le système est soumis à une perturbation. Cet objectif a fait l'objet de

plusieurs travaux de recherches où il a été formulé de différentes manières. [13]

8. Classification des jeux de barres

Les jeux de barres sont classés suivant les deux variables connues parmi les quatre variables P_i, Q_i, V_i, δ_i . Généralement, on les classe sous trois types. [14]

a. Jeu de barres de charge (PQ)

Ce sont les jeux de barres de la demande de la clientèle, pour ce genre, les puissances actives et réactives sont données, mais l'amplitude et l'argument de la tension sont à déterminer

b. Jeu de barres de contrôle (PV)

Ce sont les jeux de barres où sont liés les générateurs de réseau, les grandeurs de la puissance active et du module de la tension sont connues, puisqu'elles sont contrôlables ; par contre, les grandeurs de la puissance réactive et l'argument de la tension sont inconnues.

c. Jeu de barre de référence

C'est un jeu de barre connecté à une source de tension considérée constante, et son angle de phase est pris comme référence de calcul. Ses puissances actives et réactives, doivent être calculées d'après le calcul de la puissance pour s'adapter aux exigences des jeux de barres de contrôle. Il faut noter que les variables concernées dans le tableau suivant sont celles injectées dans le réseau à partir du jeu de barre concerné.

Type de jeu de barre (JB)	Variables connues	Abondance dans le réseau (%)
Charge (P, Q)	P, Q	≥ 80
Contrôle (P, V)	P, V	≤ 20
Référence (Slack/swing bus)	V, δ_i	1

Tableau 1.1 : Type de jeu de barres.

9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le réseau électrique en globale, commençant par leurs types. Puis nous avons modéliser les différents composants à savoir les transformateurs, les charges et les lignes de transport.

Nous avons parlé à la fin de ce chapitre brièvement sur l'écoulement de puissance dans les réseaux.

Chapitre 2 :

Modélisation des
réseaux électriques
avec HVDC

1. Introduction

Les systèmes de transmission à courant continu haute tension (HVDC) jouent un rôle crucial dans la modernisation et l'optimisation des réseaux électriques. La technologie HVDC offre des avantages significatifs par rapport aux systèmes de transmission à courant alternatif (AC), notamment en termes de réduction des pertes, de contrôle de la puissance et d'intégration des sources d'énergie renouvelable. Ce chapitre se concentre sur la modélisation des réseaux électriques intégrant des systèmes HVDC, en explorant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages, et les méthodes de modélisation.

2. Principes de base des systèmes HVDC

2.1 Fonctionnement d'un système HVDC

Un système HVDC convertit l'électricité AC en DC pour la transmission, puis la reconvertit en AC au point de réception. Les composants principaux d'un système HVDC incluent :

- **Convertisseurs** : Convertissent AC en DC et vice versa. Les convertisseurs peuvent être de type VSC (Voltage Source Converter) ou LCC (Line Commutated Converter).
- **Lignes de transmission DC** : Transportent l'électricité sur de longues distances avec moins de pertes. Ces lignes peuvent être aériennes ou souterraines.
- **Filtres** : Éliminent les harmoniques générées par les convertisseurs, assurant une qualité de puissance élevée.

2.2 Types de systèmes HVDC

Les systèmes HVDC se classifient principalement en deux catégories :

- **HVDC monopolaire** : Utilise une seule ligne de transmission, souvent avec un retour via la terre ou la mer.
- **HVDC bipolaire** : Utilise deux lignes de transmission, offrant une meilleure fiabilité et redondance. En cas de défaillance d'un pôle, l'autre peut continuer à fonctionner.

3. Avantages des systèmes HVDC

Les systèmes HVDC offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes AC traditionnels :

- **Réduction des pertes** : Les pertes par effet Joule sont significativement réduites dans les systèmes HVDC, en raison de la transmission à haute tension.
- **Stabilité et contrôle** : Les systèmes HVDC permettent un contrôle précis de la puissance transmise, ce qui améliore la stabilité du réseau.
- **Intégration des énergies renouvelables** : Facilite l'intégration des parcs éoliens et solaires, souvent situés loin des centres de consommation.
- **Interconnexions longues distances** : Permet la transmission d'énergie sur de très longues distances sans perte de synchronisme, ce qui est un défi pour les systèmes AC.

4. Modélisation des systèmes HVDC

4.1 Modèles mathématiques

La modélisation des systèmes HVDC repose sur des équations mathématiques décrivant le comportement des convertisseurs et des lignes de transmission. Les principales équations incluent :

- **Équations de conversion AC/DC et DC/AC** : Ces équations décrivent la transformation de l'électricité AC en DC et inversement. Elles tiennent compte des caractéristiques des convertisseurs utilisés.
- **Équations de la ligne de transmission DC** : Ces équations modélisent les pertes et les comportements dynamiques des lignes de transmission DC, incluant la capacité et l'inductance de la ligne.

4.2 Techniques de simulation

Plusieurs techniques de simulation sont utilisées pour modéliser les systèmes HVDC :

- **Méthodes des éléments finis (FEM)** : Utilisées pour analyser les champs électromagnétiques autour des équipements HVDC, permettant une compréhension détaillée des effets locaux.
- **Simulations temporelles** : Permettent d'étudier la dynamique temporelle des systèmes HVDC, incluant les transitoires et les réponses aux perturbations. Les logiciels comme MATLAB/Simulink sont souvent utilisés pour ces simulations.

- **Modèles de circuits équivalents** : Simplifient la modélisation en représentant les composants HVDC par des éléments de circuit équivalents, facilitant l'intégration dans des simulations de réseaux plus larges.

5. Différence entre HVAC et HVDC

5.1 Caractéristiques Techniques

Nature du Courant :

- **HVAC** : Utilise un courant alternatif, où la direction du courant change périodiquement (généralement 50 ou 60 Hz).
- **HVDC** : Utilise un courant continu, où la direction du courant reste constante.

Conversion:

- **HVAC** : N'a pas besoin de conversion pour la plupart des applications domestiques et industrielles, car la production et la consommation d'électricité se font principalement en AC.
- **HVDC** : Nécessite des convertisseurs pour changer le courant de AC à DC et vice versa. Ces convertisseurs sont coûteux et complexes.

5.2 Transmission et Perte d'Énergie

Perte d'Énergie :

- **HVAC** : Les pertes d'énergie dues à l'effet de peau et aux courants de Foucault sont plus importantes sur de longues distances.
- **HVDC** : Moins de pertes d'énergie sur de longues distances car il n'y a pas d'effet de peau ni de courants de Foucault.

Distance de Transmission :

- **HVAC** : Plus adapté pour des distances courtes à moyennes. Au-delà d'une certaine distance, les pertes et les coûts augmentent considérablement.

- HVDC : Plus économique et efficace pour des transmissions sur de longues distances, typiquement au-delà de 600 km pour des lignes terrestres et 50 km pour des lignes sous-marines.

5.3 Coût et Infrastructure

Coût Initial :

HVAC : Moins coûteux à mettre en place, avec une infrastructure plus simple pour les convertisseurs.

HVDC : Plus coûteux en raison des stations de conversion nécessaires aux extrémités de la ligne.

Infrastructure :

HVAC : Nécessite des transformateurs à différents points pour ajuster les niveaux de tension.

HVDC : Nécessite des stations de conversion qui convertissent le courant AC en DC et vice versa.

6. Application de l'algorithme d'optimisation par Essaim de Particules (PSO) pour la résolution du problème HVDC

6.1 Présentation de l'algorithme d'optimisation par Essaim de Particules

L'algorithme PSO (Optimisation par Essaim de Particules) est une méthode d'optimisation inspirée du comportement collectif des oiseaux et des poissons. Il est utilisé pour trouver des solutions optimales dans un espace de recherche en utilisant une population de particules. Chaque particule ajuste sa position en fonction de sa meilleure position personnelle et de la meilleure position trouvée par le groupe.

Les étapes principales de l'algorithme PSO sont les suivantes :

1. **Initialisation** : Générer une population initiale de particules avec des positions aléatoires, où chaque position représente une configuration possible des paramètres du système HVDC. Attribuer également des vitesses initiales à ces particules.

2. **Évaluation des solutions** : Calculer la qualité de chaque solution en utilisant des critères définis, tels que la minimisation des pertes de transmission, l'amélioration de la stabilité du réseau et la réduction des coûts. Chaque particule conserve sa meilleure position personnelle P_{best} et la meilleure position globale G_{best} trouvée par l'ensemble des particules.
3. **Mise à jour des vitesses et de positions** : Ajuster la vitesse de chaque particule en tenant compte de sa meilleure position personnelle et de la meilleure position globale du groupe. Ensuite, mettre à jour la position de chaque particule en fonction de cette nouvelle vitesse. Ce processus permet d'explorer de nouvelles configurations de paramètres HVDC tout en exploitant les solutions déjà trouvées.
4. **Réévaluation et amélioration des résultats** : Réévaluer chaque particule à sa nouvelle position et mettre à jour ses meilleures positions personnelles et globales en fonction des nouvelles valeurs obtenues. Ce cycle d'amélioration continue permet de raffiner les solutions.
5. **Convergence** : Répéter les étapes d'évaluation, de mise à jour des vitesses et des positions jusqu'à ce que les solutions convergent vers une optimisation acceptable ou que le nombre maximal d'itérations soit atteint. Le processus s'arrête lorsque les particules se stabilisent autour des meilleures solutions trouvées, indiquant une convergence vers une solution optimale pour les paramètres du système HVDC.

6.2 Organigramme de l'algorithme PSO

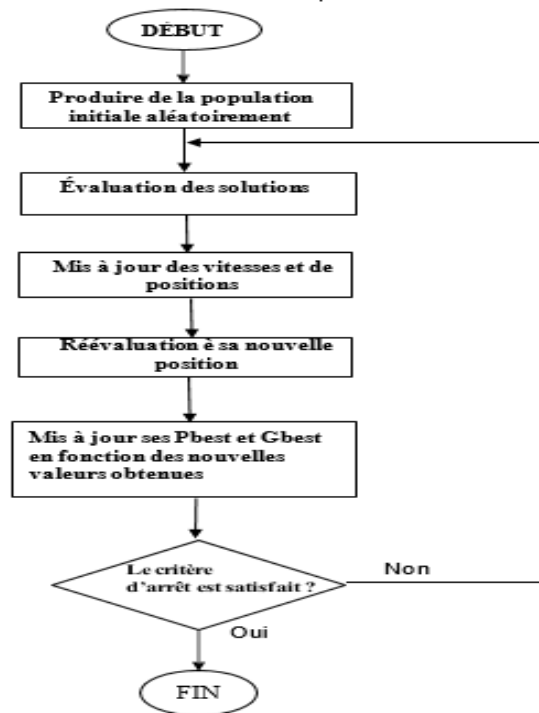


Figure 2.1 : Organigramme de l'algorithme PSO

1.1 Application du PSO à la modélisation HVDC

Le PSO peut être appliqué à la modélisation des systèmes HVDC pour optimiser divers paramètres, tels que la configuration des convertisseurs, les réglages de contrôle et les caractéristiques des lignes de transmission. Les objectifs typiques incluent la minimisation des pertes de transmission, l'amélioration de la stabilité du réseau et la réduction des coûts d'installation et d'exploitation.

Les étapes spécifiques pour appliquer Le PSO à la modélisation HVDC sont les suivantes :

1. **Définition du problème** : Formuler le problème d'optimisation en définissant les objectifs et les contraintes. Par exemple, les objectifs peuvent inclure la minimisation des pertes de transmission, la maximisation de la stabilité du réseau et la minimisation

des coûts. Les contraintes peuvent inclure les limites de tension et de courant, les capacités des convertisseurs et les exigences de stabilité du système.

2. **Initialisation des positions et vitesses** : Générer une population initiale de positions aléatoires pour les paramètres des convertisseurs HVDC. Chaque position candidat représente une configuration différente des paramètres du système.
3. **Évaluation des solutions** : Utiliser des simulations HVDC pour évaluer la qualité de chaque solution représentée par une particule. Les simulations peuvent inclure des analyses de l'écoulement de puissance, des études de stabilité transitoire et des calculs de pertes. Chaque particule conserve en mémoire sa meilleure position personnelle P_{best} et la meilleure position globale G_{best} trouvée par l'ensemble des particules.
4. **Mise à jour de la position et de la vitesse** : Pour chaque particule, la mise à jour des vitesses consiste à ajuster sa direction et son amplitude de mouvement en fonction de sa meilleure position personnelle et de la meilleure position trouvée par l'ensemble du groupe. Ensuite, la nouvelle position de chaque particule est déterminée en ajoutant cette vitesse mise à jour à sa position actuelle. Ce processus permet aux particules d'explorer l'espace de recherche de manière plus efficace, en exploitant les meilleures solutions trouvées jusqu'à présent et en explorant de nouvelles possibilités. Les ajustements continus des vitesses et des positions facilitent la convergence vers une solution optimale.
5. **Évaluation et mise à jour des meilleures solutions** : Réévaluer chaque particule avec la nouvelle position. Mettre à jour les meilleures positions personnelles P_{best} et globale G_{best} si les nouvelles positions offrent de meilleures valeurs de la fonction objectif.
6. **Convergence** : Répéter les étapes 3 à 5 jusqu'à ce que les solutions convergent vers une optimisation acceptable ou que le nombre maximal d'itérations soit atteint. La convergence est atteinte lorsque les particules se stabilisent autour des meilleures positions trouvées, indiquant une solution optimale pour les paramètres des convertisseurs HVDC.

1.2 Étude de cas : Optimisation d'un système HVDC avec l'algorithme PSO

Pour illustrer l'application de l'algorithme PSO à la modélisation HVDC, considérons une étude de cas où un système HVDC est optimisé pour minimiser les pertes de transmission et améliorer la stabilité du réseau.

Étape 1 : Définition du problème

- **Objectifs :**
 - Minimiser les pertes de transmission.
 - Maximiser la stabilité du réseau.
 - Réduire les coûts d'installation et d'exploitation.
- **Contraintes :**
 - Limites de tension et de courant.
 - Capacités des convertisseurs.
 - Exigences de stabilité du système.

Étape 2 : Initialisation

- **Population :** Le PSO commence par initialiser une population de particules, chaque particule représente une solution potentielle dans l'espace de recherche.
- **Position et vitesse :** Chaque particule a une position initiale aléatoire dans l'espace de recherche et une vitesse initiale aléatoire

Étape 3 : Évaluation des solutions

- **Fonction objective :** La qualité de chaque solution représentée par une particule est évaluée en utilisant une fonction objectif spécifique au problème.
- **Meilleure position individuelle P_{best} :** Chaque particule conserve en mémoire sa meilleure position trouvée.
- **Meilleure position globale G_{best} :** Parmi toutes les particules, on détermine la meilleure position trouvée par l'ensemble du groupe.

Étape 4 : Mise à jour des vitesses et des positions

- **Formule de mise à jour de la vitesse :**

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c1 \cdot r1 \cdot (P_{best_i} - x_i(t)) + c2 \cdot r2 \cdot (gBest - x_i(t)) \quad (2.1)$$

$v_i(t)$: la vitesse de la particule i à l'itération t .

$x_i(t)$: la position de la particule i à l'itération t .

w : facteur d'inertie.

$c1, c2$: les coefficients d'accélération.

$r1, r2$: des nombres aléatoires uniformément distribués entre 0 et 1.

$pBest_i$: la meilleure position individuelle de la particule i .

G_{best} : la meilleure position globale trouvée par le groupe.

- **Formule de mise à jour de la position :**

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (2.2)$$

Étape 5 : Boucle d'itération

- Répétition des étapes d'évaluation et de mise à jour des vitesses et des positions jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint.

Points clés

- **Inertie :** Le facteur d'inertie w contrôle l'influence de la vitesse précédente sur la nouvelle vitesse.
- **Accélération :** Les coefficients $c1$ et $c2$ contrôlent l'influence des meilleures positions individuelle et globale respectivement.
- **Convergence :** Le PSO est capable de converger vers des solutions optimales en utilisant les informations des meilleures solutions trouvées par les particules.

7. Avantage de l'algorithme PSO

Les avantages de l'optimisation par essaims de particules peuvent être résumés comme suit :

- La méthode d'optimisation par essaims de particules (OEP) est particulièrement efficace pour traiter les problèmes d'optimisation continue.
- L'OEP utilise plusieurs points de recherche, à l'instar de l'algorithme génétique, qui convergent progressivement vers le point optimal en utilisant les valeurs P_{best} et G_{best} .
- La méthode OEP combine diversification et intensification pour une recherche plus efficace.

8. Conclusion

La modélisation des systèmes HVDC est essentielle pour la conception et l'optimisation des réseaux électriques modernes. Les avantages offerts par les technologies HVDC, tels que la réduction des pertes et le contrôle amélioré de la puissance, en font une solution idéale pour les réseaux de demain. Les méthodes de modélisation et de simulation présentées dans ce chapitre fournissent un cadre robuste pour l'analyse et l'intégration des systèmes HVDC dans les réseaux existants.

Bien que l'algorithme d'**optimisation par Essaim de Particules**. (PSO) soit adaptable à différents types de systèmes HVDC, les paramètres spécifiques, les variables de contrôle et les contraintes varient en fonction du type de système (VSC-HVDC ou LCC-HVDC). Pour le VSC-HVDC, le PSO se concentrera sur les aspects de contrôle de la puissance active et réactive, la stabilité de la tension CC, et les limitations de courant et de tension des convertisseurs.

Chapitre 3 :

Résultats et discussion

1. Introduction

Au cours de l'étude des réseaux électriques, la modélisation des divers systèmes électrique est essentielle pour comprendre leur fonctionnement, analyser les flux d'énergie, améliorer les dimensions, la qualité, les dimensions et la sécurité des systèmes étudiés, et d'optimiser la gestion et les paramètres décisives des systèmes électriques. [15]

Dans ce chapitre, il est nécessaire de manifester la contribution des convertisseurs VSC-HVDC dans les réseaux AC en prenant en considération la modélisation des réseaux à courant alternative sans participation des convertisseurs VSC-HVDC, la disposition sera comme suite :

Au début, on démontre les différentes configurations des paramètres fondamentaux dans le réseaux électrique en priorisant les équations de la puissance active et réactive dans les systèmes à courant alternative.

Finalement, on modélise le system basé sur le réseau électrique en courant alternative avec la contribution du système de convertisseur VSC-HVDC en priorisant cette addition.

2. Modélisation des systèmes AC /AC (courant alternatif)

La modélisation des systèmes à courant alternative dans les réseaux électriques sert à utiliser des équation d'état, cela inclue les équations de la puissance active et réactive. Ces équations jouent un rôle crucial dans la description et l'analyse du comportement des réseaux électriques, permettant ainsi d'optimiser leur fonctionnement et assurer leur stabilité. [15]

2.1 Systèmes de Conversion AC

Les systèmes de conversion AC/AC classiques utilisent des transformateurs pour ajuster les niveaux de tension selon les besoins du réseau et des charges connectées. Ces systèmes sont essentiels pour la distribution de l'énergie électrique, assurant la compatibilité des tensions entre les générateurs, les lignes de transmission et les charges finales [16].

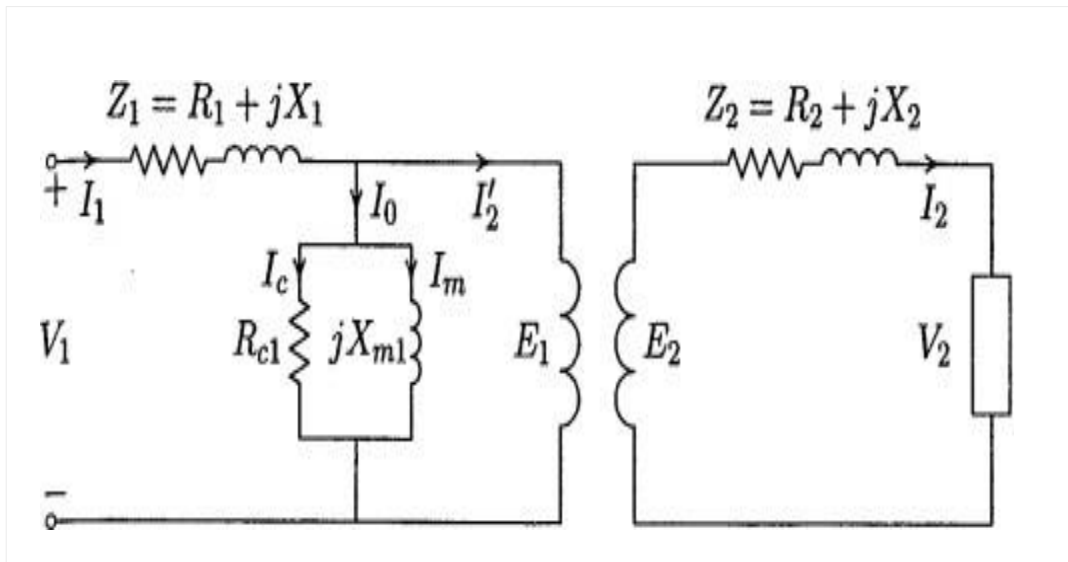


Figure 3.1 : Schéma équivalent d'un transformateur

a) Modèle Stationnaire des Transformateurs

Dans la modélisation stationnaire, les transformateurs sont représentés par des équations algébriques linéaires qui relient les tensions et courants d'entrée et de sortie. Les paramètres critiques incluent les rapports de transformation, les impédances de fuite, et les pertes dans le noyau et les enroulements [16].

b) Paramètres d'un Transformateur

Rapport de Transformation (a) : Ratio entre la tension primaire (V_p) et la tension secondaire (V_s).

$$a = \frac{V_s}{V_p} \quad (3.1)$$

Impédance de Fuite (Z_f) : Représente les pertes dues à la résistance et à l'inductance des enroulements.

$$Z_f = R_f + jX_f \quad (3.2)$$

Pertes (P) : Incluent les pertes ferromagnétiques et les pertes joules dans les enroulements.

$$P = P_{fer} + P_{joule} \quad (3.3)$$

c) Pertes dans les Transformateurs

Les pertes dans les transformateurs sont principalement dues aux pertes dans le noyau (pertes ferromagnétiques) et aux pertes dans les enroulements (pertes joules). Ces pertes doivent être minimisées pour améliorer l'efficacité du système.

Types de Pertes :

Pertes Ferromagnétiques : Pertes dues aux cycles de magnétisation du noyau en fer du transformateur.

$$P_{fer} = P_{hystéresis} + P_{courants\ de\ Foucault} \quad (3.4)$$

Pertes Joules : Pertes causées par la résistance des enroulements lorsqu'un courant les traverse.

$$P_{joule} = I^2 \cdot R \quad (3.5)$$

2.2 Impédances complexes:

En électricité, l'impédance d'un circuit est composée de trois éléments principaux : la résistance, l'inductance et la capacité. Chacun de ces composants contribue de manière unique à l'impédance totale de circuit.

Prenons un dipôle linéaire alimenté en régime permanent sous une tension sinusoïdale $V(t)$ traversé par un courant $I(t)$. Ces deux grandeurs (courant et tension) peuvent être représentées par un diagramme vectoriel ainsi qu'à des nombres complexes \bar{V} et \bar{I} . L'objectif est de trouver un nombre complexe Z tel que :

$$\bar{V} = \bar{Z}\bar{I} \quad (3.6)$$

Le schéma représentatif de l'impédance complexe avec les grandeurs électriques fondamentales est présenté comme suite

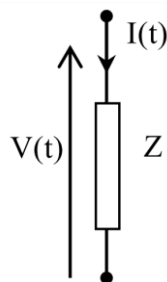


Figure 3.2 : Schéma représentatif de l'impédance

a. Résistance :

Dans un système électrique complexe, la résistance est un composant crucial qui s'oppose au passage du courant électrique, provoquant une dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Selon la loi de Joule, cette dissipation est proportionnelle au carré du courant traversant la résistance. Elle provoque également une chute de tension proportionnelle au courant, conformément à la loi d'Ohm. La résistance joue un rôle clé dans la détermination de l'impédance totale du circuit en courant alternatif et contribue à la stabilité du courant en limitant les surintensités. En somme, la résistance influence la performance, la sécurité et l'efficacité énergétique d'un système électrique.

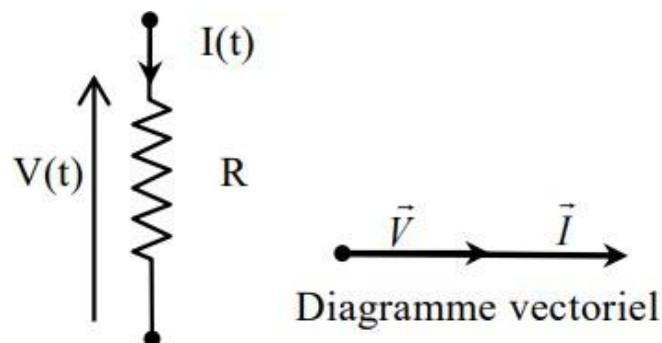


Figure 3.3 : Schéma représentative de la résistance

b. Inductance:

Dans un système électrique complexe, l'inductance est une propriété des composants, tels que les bobines, qui s'oppose aux variations du courant électrique. Cette opposition est due à la création d'un champ magnétique autour du composant lorsque le courant le traverse, selon la loi de Lenz. L'inductance est mesurée en henrys (H) et provoque une réactance inductive dans les circuits en courant alternatif, qui dépend de la fréquence du signal et de la valeur de l'inductance ($X_L = 2\pi fL$ $L = 2\pi fL$). Elle induit une tension qui s'oppose aux changements du courant, contribuant ainsi à la régulation et à la stabilisation des circuits électriques, tout en influençant leur comportement dynamique et leur impédance totale. En résumé, l'inductance est essentielle pour la gestion des transitoires et des signaux alternatifs dans les systèmes électriques complexes.

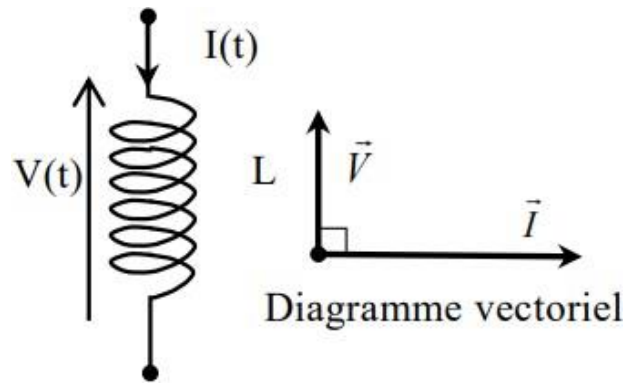


Figure 3.4 : schéma représentant l'inductance

3. Système électrique avec de deux Buses

En prends l'exemple d'un system électrique à courant alternatif à deux nœuds connectés avec eux autant qu'un système simplifié d'un réseau électrique sans partie de courant continue

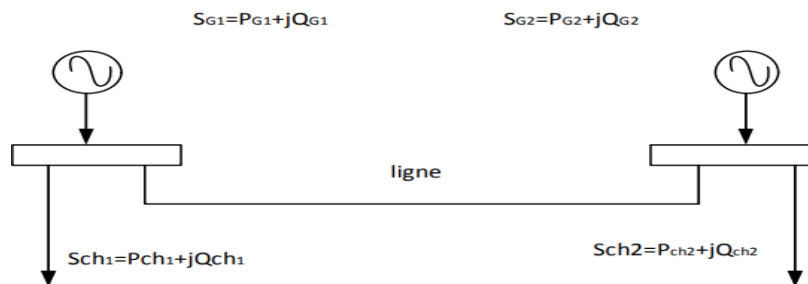


Figure 3.5 : Système électrique avec deux nœuds

La figure 3.5 est un schéma qui manifeste le rôle de la puissance active et réactive dans un système électrique a courant alternatif.

$$S_{G1} = P_{G1} + jQ_{G1} \quad (3.7)$$

S_{G1} : puissance complexe au nœud 1

P_{G1} : puissance active (partie réelle de S_{G1})

Q_{G1} : puissance réactive (partie imaginaire de S_{G1})

$$S_{G2} = P_{G2} + jQ_{G2} \quad (3.8)$$

S_{G2} : puissance complexe au nœud 2

P_{G2} : puissance active (partie réelle de S_{G2})

Q_{G2} : puissance réactive (partie imaginaire de S_{G2})

$$S_{ch1} = P_{ch1} + jQ_{ch1} \quad (3.9)$$

S_{ch1} : puissance complexe associée à la charge 1

P_{ch1} : puissance active (partie réelle de S_{ch1})

Q_{ch1} : puissance réactive (partie imaginaire de S_{ch1})

$$S_{ch2} = P_{ch2} + jQ_{ch2} \quad (3.10)$$

S_{ch2} : puissance complexe associée à la charge 2

P_{ch2} : puissance active (partie réelle de S_{ch2})

Q_{ch2} : puissance réactive (partie imaginaire de S_{ch2})

P_{ch1} , Q_{ch1} , P_{ch2} et Q_{ch2} sont liées à la consommation. Certaines composantes P_{G1} , P_{G2} , Q_{G1} , Q_{G2} doivent être fixées mais pas toutes. En effet les pertes actives P_L et réactives Q_L sont inconnues, la puissance globale produite doit satisfaire la relation suivante :

$$Production = consommation + perte. \quad (3.11)$$

$$P_{G1} + P_{G2} = P_{ch1} + P_{ch2} + P_L. \quad (3.12)$$

En conséquence nous ne pouvons pas connaître à priori, ni $P_{G1} + P_{G2}$ ni $Q_{G1} + Q_{G2}$

Aussi on fixe la production en nœud pour laisser balancer celle de l'autre.

4. Modélisation des systèmes AC/DC (system de conversion) :

Dans le cadre de la modélisation, les convertisseurs VSC sont représentés par des équations algébriques linéaires qui relient les tensions AC et DC ainsi que les courants correspondants. Les paramètres critiques incluent les pertes de conversion, les impédances de ligne et les modes de contrôle. Le mode de contrôle peut varier entre le contrôle de la tension AC, le contrôle de la puissance réactive, et le contrôle de la tension DC, selon les besoins spécifiques du réseau.

4.1 Convertisseurs:

Les convertisseurs VSC (Voltage Source Converter) sont des dispositifs de conversion de puissance essentiels dans les systèmes HVDC modernes. Ils offrent une flexibilité accrue pour contrôler les flux de puissance active et réactive, stabiliser les tensions du réseau et améliorer la qualité de l'énergie. Le modèle de convertisseur VSC utilisé repose sur une représentation mathématique précise qui capture les comportements dynamiques et stationnaires du système. [manuel matacdc]

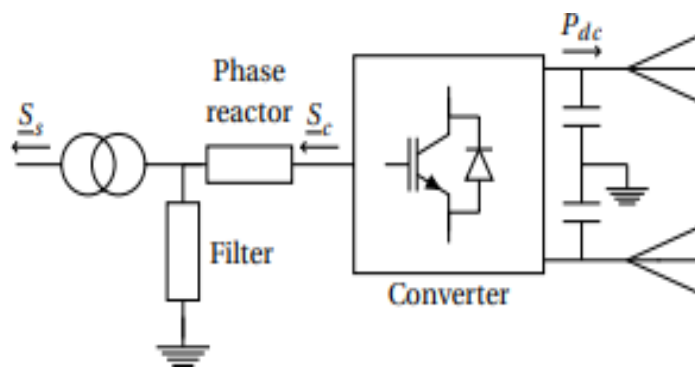


Figure 3.6 : Station de convertisseur VSC-HVDC [manuel matacdc]

La représentation générale d'une station de conversion HVDC à VSC, montrant les différents composants, est illustrée dans la figure 3.6. Comme vu depuis le point de couplage commun (PCC) AC, les différents composants sont [17] :

Le transformateur de conversion

- Les filtres AC
- Le réacteur de phase
- Le convertisseur

4.2 Modélisation de côté AC:

Le côté AC d'un VSC HVDC est particulièrement important car il est l'interface avec le réseau électrique alternatif, ce côté est composé de plusieurs composants clés qui travaillent ensemble pour convertir efficacement l'énergie AC en énergie DC et vice versa.

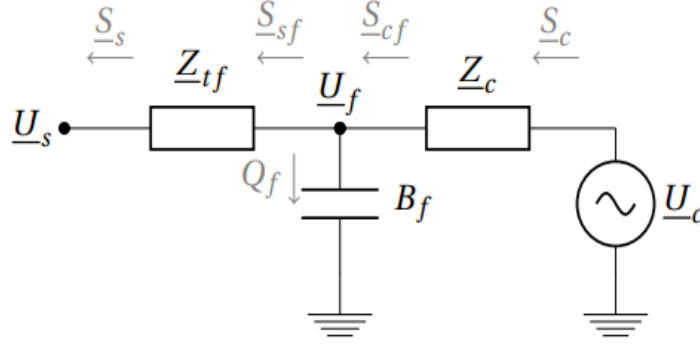


Figure 3.7 : Modèle de flux de puissance monophasé équivalent d'une station de conversion connectée au réseau CA

Le modèle consiste en une source de tension contrôlable U_c derrière le réacteur de phase :

$$\overline{U_c} = U_c \angle \delta_c \quad (3.13)$$

Représentée comme une impédance complexe $\overline{Z_c}$:

$$\overline{Z_c} = R_c + jX_c \quad (3.14)$$

Le filtre passe-bas de la Fig. 3.7 est représenté comme une susceptibilité B_f aux fréquences du système. Un transformateur connecte le bus du filtre au réseau CA et est représenté par son impédance complexe Z_{tf}

$$\overline{Z_{tf}} = R_{tf} + jX_{tf} \quad (3.15)$$

Les équations pour la puissance active et réactive du côté du réseau en termes de tensions complexes sont :

$$P_s = -U_s^2 G_{tf} + U_s U_f [G_{tf} \cos(\delta_s - \delta_f) + B_{tf} \sin(\delta_s - \delta_f)], \quad (3.16)$$

$$Q_s = U_s^2 B_{tf} + U_s U_f [G_{tf} \sin(\delta_s - \delta_f) - B_{tf} \cos(\delta_s - \delta_f)], \quad (3.17)$$

Avec $U_s = U_s \angle \delta_s$ et $U_f = U_f \angle \delta_f$, respectivement la tension complexe côté réseau et la tension au nœud du filtre. Les équations du côté convertisseur sont :

$$P_c = U_c^2 G_c - U_f U_c [G_c \cos(\delta_f - \delta_c) - B_c \sin(\delta_f - \delta_c)], \quad (3.18)$$

$$Q_c = -U_c^2 B_c + U_f U_c [G_c \sin(\delta_f - \delta_c) + B_c \cos(\delta_f - \delta_c)], \quad (3.19)$$

La puissance réactive dans le filtre est donnée par :

$$Q_f = -U_f^2 B_f \quad (3.20)$$

Tandis que les expressions de la puissance complexe du côté filtre circulant à travers le transformateur sont écrites comme :

$$P_{sf} = U_f^2 G_{tf} - U_f U_s [G_{tf} \cos(\delta_s - \delta_f) - B_{tf} \sin(\delta_s - \delta_f)], \quad (3.21)$$

$$Q_{sf} = -U_f^2 B_{tf} + U_f U_s [G_{tf} \sin(\delta_s - \delta_f) + B_{tf} \cos(\delta_s - \delta_f)], \quad (3.22)$$

et celles circulant du côté du réacteur de phase sont :

$$P_{cf} = -U_f^2 G_c + U_f U_c [G_c \cos(\delta_f - \delta_c) + B_c \sin(\delta_f - \delta_c)], \quad (3.23)$$

$$Q_{cf} = U_f^2 B_c + U_f U_c [G_c \sin(\delta_f - \delta_c) - B_c \cos(\delta_f - \delta_c)] \quad (3.24)$$

a) Sans filtre ($B_f = 0$) :

- Suppression des filtres
- Conception sans filtre : Topologies de convertisseurs multiniveaux (modulaires). Contrairement aux premières topologies de convertisseurs à 2 ou 3 niveaux utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM), les configurations de convertisseurs les plus récentes synthétisent la forme d'onde de tension AC en utilisant un convertisseur multiniveau et ne nécessitent pas de filtres passe-bas AC.

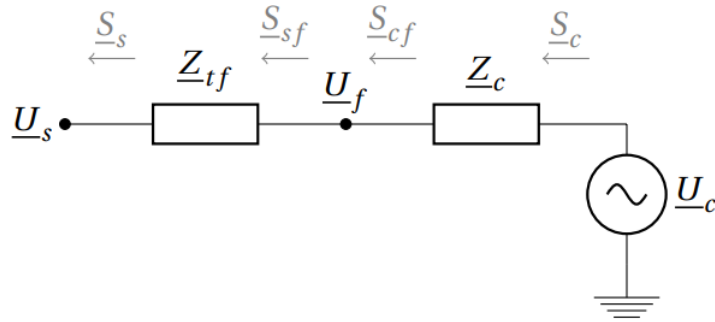


Figure 3.8 : Modèle de la station de conversion connectée au réseau CA (sans filtre)

b) Sans transformateur: ($Z_{tf} = 0$):

Conception sans transformateur

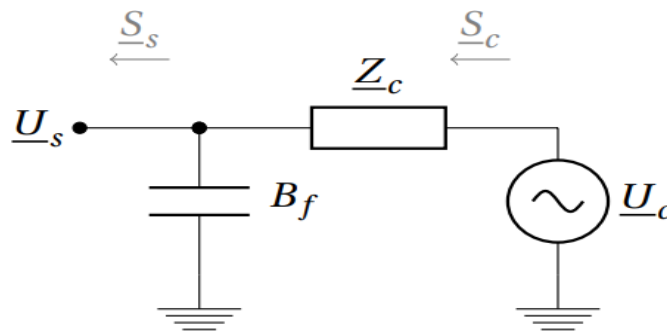


Figure3.9 : Modèle de la station de conversion connectée au réseau CA (sans transformateur)

c) Sans filtre et sans transformateur :

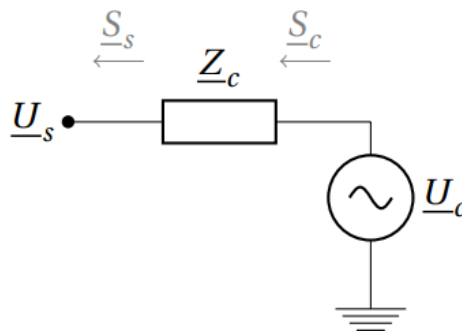


Figure 3.10 : Modèle de la station de conversion connectée au réseau CA (sans filtre et transformateur)

4.3 Pertes des convertisseurs

Les pertes des convertisseurs sont un facteur important pour l'efficacité et la performance du système. Ces pertes peuvent être décrites par une formule quadratique généralisée dépendant du courant du convertisseur I_c [17]

5. Modélisation des systèmes à courant continue:

Dans des conditions de régime permanent, les réseaux DC peuvent être représentés par un réseau résistif avec des injections de courant et des tensions DC aux différents nœuds [17].

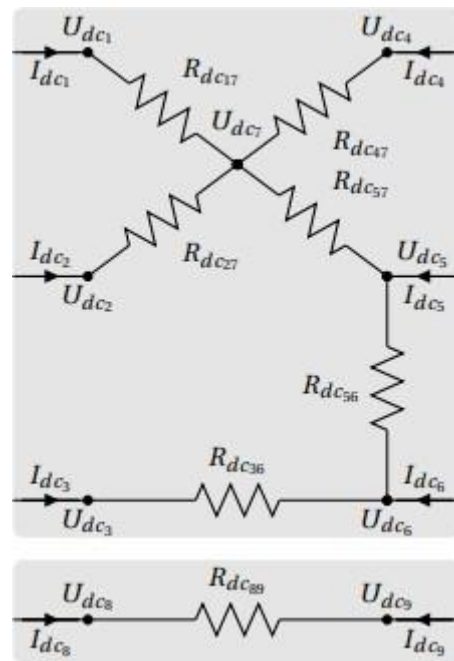


Figure 3.11 : Modélisation d'un réseau à courant continu

Le courant injecté à un nœud DC peut être écrit comme le courant circulant vers les $n-1$ autres nœuds du réseau :

$$I_{dc} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{dcij} \cdot (U_{dci} - U_{dcj}) \quad (3.25)$$

Avec $Y_{dcij} = 1/R_{dcij}$

En combinant tous les courants injectés dans un réseau DC avec n bus, on obtient :

$$\mathbf{I}_{dc} = \mathbf{Y}_{dc} \cdot \mathbf{U}_{dc} \quad (3.26)$$

Le vecteur de courant continu \mathbf{I}_{dc} est donné par :

$$\mathbf{I}_{dc} = [I_{dc1}, I_{dc2}, \dots, I_{dck}, \mathbf{0} \dots \mathbf{0}]^T$$

Avec $(n - k)$ éléments nuls en raison des pannes de convertisseur et des bus DC sans connexion au système AC. Le vecteur de tension DC est donné par

$\mathbf{U}_{dc} = [U_{dc1}, U_{dc2}, \dots, U_{dcn}]^T$ et \mathbf{Y}_{dc} est la matrice des bus DC. Les équations de flux de puissance du réseau DC peuvent être écrites comme suit :

$$P_{dci} = P U_{dci} \sum_{\substack{i=m \\ j \neq n}} Y_{dcij} (U_{dci} - U_{dcj}) \quad (3.27)$$

Avec Y_{dcij} égal à $1/R_{dcij}$ et $p = 1$ pour un système monopolaire ou $p = 2$ pour un système monopolaire symétriquement mis à la terre ou bipolaire. Ce paramètre du système est défini comme la variable (pol) dans les fichiers de données casedc[17].

Dans le cas d'un contrôle en chute de tension U_{dc} - P_{dc} la puissance DC injectée par les bus contrôlés par chute de tension peut être écrite comme suit :

$$P_{dci} = P_{dc,oi} - \frac{1}{K_{dci}} (U_{dci} - U_{dc0i}). \quad (3.28)$$

6. Application de la simulation des systèmes étudiées :

6.1 Introduction sur le programme MATA CDC

Matacdc est un programme open source gratuit basé sur MATLAB pour l'analyse de la puissance AC/DC. Le programme utilise un algorithme de flux de puissance AC/DC séquentiel et peut être utilisé pour simuler des systèmes AC interconnectés et des systèmes de courant continu haute tension à convertisseur de source de tension multi-terminaux (VSC HVDC). En ce qui concerne le flux de puissance du système AC, le programme repose entièrement sur MATPOWER, un programme de flux de puissance et de flux de puissance optimal dans MATLAB [17]

6.2 Etude d'écoulement de puissance dans différents systèmes de haute tension de 5 bus :

A. Écoulement de puissance sur un réseau de 5 bus sans HVDC :

En étudiant la simulation d'écoulement de puissance sur un réseau de 5 jeux de barre, Ce système est considéré comme modèle simplifiée des systèmes de puissance à courant alternatif. Le schéma representative de ce système est affiché comme suit :

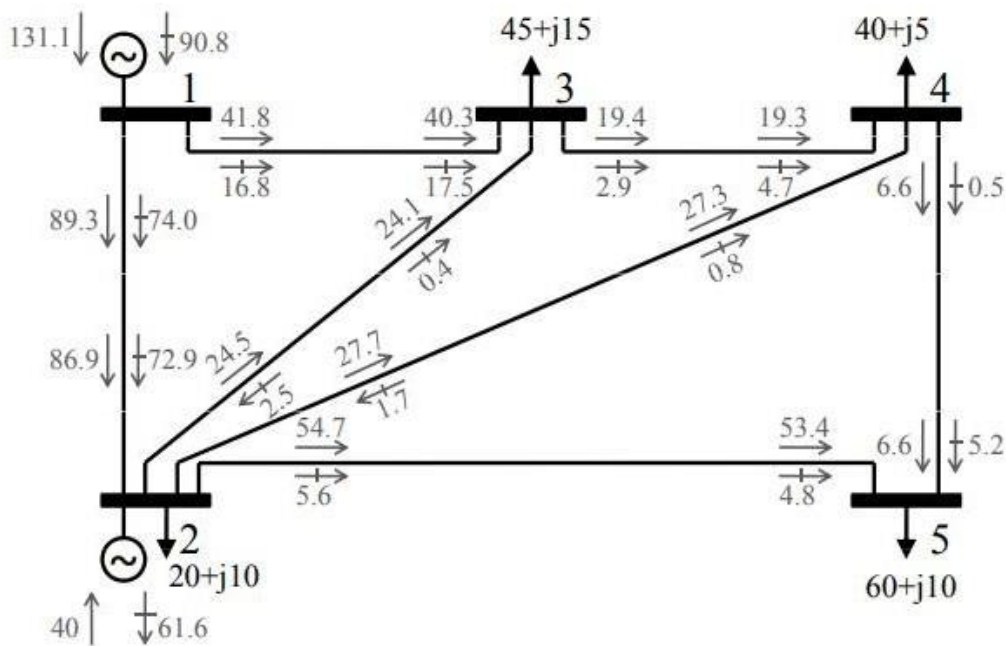


Figure3.12 : system de 5 bus sans contribution de courant continue

Nombres des buses	5
Générateurs	2
Charges	4
Branches	7

Tableau3.1 : La composition du réseau électrique de 5 bus.

la construction de ce réseau est basé sur une topologie décentralisé, avec deux générateurs, et 7 branches ou de transmission d'électricité où cinq points de connexion sont utilisés pour représenter les interconnexions entre les différents éléments du réseau, tels que les générateurs, les charges et les lignes de transmission. Ce type de réseau est souvent utilisé

dans les études de flux de puissance, d'analyse de stabilité et d'optimisation de réseau pour comprendre et améliorer la performance du système électrique.

Les deux générateurs sont les sources primaires de production d'électricité dans le réseau. Le générateur de premier bus est le générateur de référence, le premier bus et aussi le bus de référence, il est sous le nom du Slack bus le deuxième générateur est associé à un bus PV (Bus de Générateur) où la tension est maintenue constante. Cette régulation de la tension est cruciale pour maintenir la qualité de l'alimentation électrique et pour éviter les problèmes de surtension ou de sous-tension qui peuvent endommager les équipements et réduire l'efficacité du réseau.

➤ **Les données de flux de puissance dans les buses :**

Les bus sont des points de connexion où plusieurs lignes électriques et équipements se rejoignent. Ils jouent un rôle crucial dans la distribution de l'énergie électrique et la gestion des flux de puissance au sein du réseau. L'écoulement de puissance à travers ces bus est pris en considération.

Bus	Tension		Puissance générée		Charge	
	Valeur unitaire (pu)	Ang (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.060	0.000	131.12	90.82	-	-
2	1.000	-2.061	40.00	-61.59	20.00	10.00
3	0.987	-4.637	-	-	45.00	15.00
4	0.984	-4.957	-	-	40.00	5.00
5	0.972	-5.765	-	-	60.00	10.00
/	Total		171.12	29.22	165.00	40.00

Tableau3.2 : les résultats d'écoulement de puissance et les valeurs de tension dans le réseau électrique de 5 bus.

La génération totale de puissance active à partir des bus est de 171.12 MW, et la consommation dans les charge est de 165 MW. La différence entre les deux valeurs et la valeur de la puissance consommée par les différents équipements dans le système avec la puissance réactive totale générée est de 29.22 Mvar depuis le system et de 40.00 Mvar du côté de la charge. La puissance réactive est un facteur décisif dans l'étude des systèmes

électriques. La génération de puissance active et réactive est énorme dans le premier bus, ce bus est sous le nom de Slack bus, c'est le bus de référence dans le réseau.

Les valeurs de tension dans les bus sont entre 1.060 pu et 0.972 pu, ce paramètre doit être maintenu par réduire la déviation de la tension pour assurer l'opération optimal du réseau.

➤ **Évaluation d'écoulement de puissance dans les branches est exprimé dans ce tableau :**

Les branches représentent les matériels de transmission entre les différentes buses dans le réseau,

Branches	Bus de départ	Bus d'arriver	Injection depuis Buses		Injections aux buses		Pertes	
			P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(Mvar)
/	/	/	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1	2	89.33	74.00	-86.85	-72.91	2.486	7.46
2	1	3	41.79	16.82	-40.27	-17.51	1.518	4.55
3	2	3	24.47	-2.52	-27.11	-0.35	0.360	1.08
4	2	4	27.71	-1.72	-27.25	-0.83	0.461	1.38
5	2	5	54.66	5.56	-53.44	-4.83	1.215	3.65
6	3	4	19.39	2.86	-19.35	-4.69	0.40	0.12
7	4	5	6.60	0.52	-6.56	-5.17	0.043	0.13
/						Total	6.122	18.37

Tableau3.3 : les résultats d'écoulement de puissance à travers les branches.

Les premières colonnes représentent l'indice des branches, le bus émetteur de puissance et le bus récepteur Les valeurs de flux de puissance sont différentes de branche à branche. Ce qui spécifie une diversité des rôles entre les branches.

La différence entre la puissance active injectée de bus émetteur et la puissance injectée au bus récepteur définis les pertes dans la branche qui relie les deux buses. Les pertes totales dans les branches sont de 6.122 MW et 18.37 Mvar. Ce sont distribuées sur les conducteur et les différents équipements de transmission. L'écoulement de puissance dans le branches entre le bus de référence et le deuxième bus est énorme par rapport aux autres branches, et es pertes reliées à la puissance réactive sont considérables.

B. Application des système HVDC dans un réseau de 5 bus :

La contribution de système HVDC dans le réseau électrique consiste à ajouter des convertisseur VSC dans un réseau électrique à courant avec une branche de courant continue entre chaque convertisseur VSC.

En appliquant ça dans un système qui comporte d'un réseau avec une topologie approximée à celle de 5 buses à courant alternatif. Cependant, cela inclut des convertisseurs VSC présentant un système de courant continue multi-terminal pour améliorer la stabilité du system. Le but de ce procès est de manifester la contribution du système HVDC dans les réseaux électriques. En simulant deux cas, un avec deux système HVDC et l'autre avec trois système HVDC, nous comparons avec eux et avec le réseau de 5 bus sans contribution de HVDC.

/	Deuxième cas	Troisième cas
Nombres des buses	5	5
Générateurs	2	2
Charges	4	4
Convertisseurs VSC	2	3
Branches	7	7

Tableau 3.4 : La composition de deux réseau avec convertisseurs VSC, chaque convertisseur est bipolaire.

Nombre des convertisseurs VSC	Buses	Tension		Puissance à travers les générateurs		Puissance à travers la charge	
		Valeur unitaire (pu)	Ang (deg)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
2	1	1.060	0.000	133.55	84.24	-	-
	2	1.000	- 2.595	40.00	-18.53	20.00	10.00
	3	1.000	- 3.042	-	-	45.00	15.00
	4	0.994	- 3.776	-	-	40.00	5.00
	5	0.975	- 5.715	-	-	60.00	10.00
		Total			173.55	65.71	165.00
3	1	1.060	0.000	133.64	84.32	-	-
	2	1.000	- 2.383	40.00	-32.84	20.00	10.00
	3	1.000	- 3.895	-	-	45.00	15.00
	4	0.996	- 4.262	-	-	40.00	5.00
	5	0.991	- 4.149	-	-	60.00	10.00
	/	Total			173.64	51.48	165.00

Tableau 3.5 : Les données de flux de puissance sur les buses.

Les tensions à travers les bus dans un réseau de 5 bus avec 3 convertisseur sont plus proche de 1 pu que celles dans un réseau de 5 bus avec 2 convertisseurs VSC, et les deux derniers cas ont des meilleurs résultats par rapport au réseau électrique sans contribution du système HVDC. Donc, l'addition des convertisseurs VSC approche les tensions dans les bus

vers 1pu. L'intégration des convertisseurs VSC (Voltage Source Converters) a considérablement amélioré les profils de tension à travers les différents bus du réseau, en particulier aux bus de charge (Bus 3, 4 et 5). Cette amélioration de la stabilité de la tension est cruciale pour maintenir une opération fiable et efficace du système de puissance. Cependant, La génération totale de la puissance active a été augmenté de 171.12 MW à 173.55 MW avec l'ajout des deux convertisseurs VSC, et de 173.55 MW jusqu'à 173.64 avec trois convertisseurs VSC. Cela pour maintenir la fixation de la puissance active consommée par les charges considérant le partage de l'énergie avec les convertisseur VSC.

➤ **Les données de flux de puissance dans les branches :**

Nombre Des VSC	Branches	Bus de départ	Bus d'arriver	Injection depuis Buses		Injections aux buses		Pertes ($Z \cdot I^2$)	
				P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(Mvar)
2	/	/	/						
	1	1	2	104.32	69.67	-101.43	-67.38	2.887	8.66
	2	1	3	29.23	14.57	-28.41	-17.41	0.823	2.47
	3	2	3	3.91	-3.29	-3.90	-0.68	0.010	0.03
	4	2	4	11.21	-2.55	-11.13	-1.20	0.076	0.23
	5	2	5	46.32	4.69	-45.44	-4.99	0.873	2.62
	6	3	4	43.80	3.10	-43.61	-4.50	0.194	0.58
	7	4	5	14.74	-0.71	-14.56	-5.01	0.184	0.55
						Total		5.047	15.14
3	1	1	2	98.38	71.37	-95.66	-69.59	2.717	8.15
	2	1	3	35.26	12.96	-34.20	-15.08	1.062	3.19
	3	2	3	13.25	-6.22	-13.14	2.57	0.116	0.35
	4	2	4	17.08	-5.18	-16.89	1.74	0.181	0.54
	5	2	5	25.33	-1.85	-25.07	-0.35	0.257	0.77
	6	3	4	23.09	4.64	-23.04	-6.47	0.057	0.17
	7	4	5	-0.07	-0.27	0.07	-4.65	0.004	0.01
Total								4.393	13.18

Tableau 3.6: L'effet des système HVDC dans le réseau.

Les pertes totales dans les branches sont égales à 5.047 MW /15.14 Mvar dans le réseau injecté par deux convertisseurs VSC et 4.393 MW/13.18 Mvar dans le réseau injecté par trois convertisseurs VSC, ce qui informe que l'addition des convertisseurs VSC réduit les pertes des puissances actives et réactive dans les branches.

Nombre des convertisseurs VSC	Bus	Injection à Bus		Tension de convertisseur		Pertes Totales
		P(MW)	Q(MVar)	Mag(pu)	Ang(deg)	
2	/					
	1	-60.00	-40.00	0.890	-13.228	1.37
	2	56.50	0.00	0.998	5.902	1.26
					Total	2.64
3	1	-60.00	-40.00	0.890	-13.017	1.37
	2	20.76	7.14	1.007	-0.655	1.14
	3	35.00	5.00	0.995	1.442	1.19
	/	/	/	/	Total	3.70

Tableau 3.7: Les résultats d'exécution au niveau des convertisseurs VSC.

Evidemment, Les pertes totales dans les convertisseurs s'augmentent de 2.64 MW à 3.70 MW avec l'augmentation du nombre des convertisseurs VSC de deux à trois dans le réseau, ce sont des pertes par effet joules dans ces convertisseurs. Cela nécessite l'augmentation de la génération dans le système pour maintenir la stabilité dans la consommation de la puissance réactive.

Cependant, la déviation de la tension se diminue dans le système de trois convertisseurs VSC par rapport au système de deux convertisseurs VSC par l'approchement des valeurs de tensions vers 1pu.

Nombre des convertisseurs VSC	Branch	De Bus	À Bus	De Bus P(MW)	À Bus P(MW)	pertes P(MW)
2	1	1	2	58.63	-57.76	0.87
	/	/	/	/	Total	0.87
3	1	1	2	30.66	-30.42	0.24
	2	2	3	8.52	-8.50	0.02
	3	1	3	27.96	-27.68	0.28
	/	/	/	/	Total	0.54

Tableau 3.8 : Les résultats d'exécution au niveau des branches dc.

Dans un system de deux convertisseurs, il y a une seule branche de courant continue. Cela pour la transmission de flux de puissance du premier convertisseur au deuxième convertisseur VSC, et dans le système électrique avec trois convertisseurs contient trois branches qui relient les bus dc entre eux.

L'effet des système HVDC dans les branches est de minimiser les pertes de la puissance active. Dans le tableau les pertes sont diminué de 0.87 MW à 0.54 MW.

C. Application de la simulation d'un réseau électrique de 5 bus avec 3 convertisseurs VSC de différents nombres de pôles.

En appliquant dans la simulation de différents cas dans le réseau électrique avec 3 convertisseurs. Le premier cas est avec convertisseur VSC monopole, le deuxième avec VSC bipolaire et le troisième est avec VSC tripolaire.

Nombre des pôles dans convertisseur VSC	Buses	Tension		Puissance à travers les générateurs		Puissance à travers la charge	
		Valeur unitaire (pu)	Ang (deg)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	/						
	1	1.060	0.000	134.19	84.17	-	-
	2	1.000	-2.395	40.00	-32.81	20.00	10.00
	3	1.000	-3.925	-	-	45.00	15.00
	4	0.996	-4.287	-	-	40.00	5.00
	5	0.991	-4.166	-	-	60.00	10.00
		Total		174.19	51.36	165.00	40.00
2	1	1.060	0.000	133.64	84.32	-	-
	2	1.000	-2.383	40.00	-32.84	20.00	10.00
	3	1.000	-3.895	-	-	45.00	15.00
	4	0.996	-4.262	-	-	40.00	5.00
	5	0.991	-4.149	-	-	60.00	10.00
			Total		173.64	51.48	165.00
3	1	1.060	0.000	133.45	84.37	-	-
	2	1.000	-2.379	40.00	32.85	20.00	10.00
	3	1.000	-3.886	-	-	45.00	15.00
	4	0.996	-4.253	-	-	40.00	5.00
	5	0.991	-4.144	-	-	60.00	10.00
	/		Total		173.45	51.52	165.00

Tableau 3.9: les résultats au niveau de bus avec des convertisseurs VSC multipolaires.

Plus est le nombre des pole dans les convertisseurs, moins de puissance active est générée dans le réseau, ce qui manifeste le rôle des convertisseur VSC de réduire les pertes dans le réseau. Cependant, la génération de la puissance réactive générée s'augmente, les convertisseurs VSC nécessitent de la puissance réactive pour leur fonctionnement.

La contribution des convertisseurs VSC multipolaires dans le réseau électrique consiste à minimiser les pertes de puissance active. L'ajout de convertisseurs avec le même nombre de pôles contribue à maintenir la stabilité des valeurs de tension. Une exploitation adéquate des systèmes HVDC, par une désignation équilibrée du nombre de convertisseurs VSC et du nombre de pôles par convertisseur, permet d'optimiser la configuration du réseau électrique. Cette optimisation vise à minimiser les pertes de puissance active tout en stabilisant les valeurs de tension.

Nombre des pôles de convertisseurs VSC dans le réseau	Branches	Bus de départ	Bus d'arriver	Injection depuis Buses		Injections aux buses		pertes ($Z \cdot I^2$)	
				P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	/	/	/						
	1	1	2	98.72	71.27	-95.99	-69.46	2.726	8.18
	2	1	3	35.47	12.90	-34.40	-15.00	1.072	3.21
	3	2	3	13.40	-6.27	-13.29	2.63	0.119	0.36
	4	2	4	17.20	-5.22	-17.01	1.78	0.184	0.55
	5	2	5	25.39	-1.87	-25.13	-0.33	0.258	0.77
	6	3	4	22.91	4.71	-22.86	-6.53	0.056	0.17
	7	4	5	-0.13	-0.25	0.13	-4.67	0.004	0.01
						Total		4.418	13.25
2	1	1	2	98.38	71.37	-95.66	-69.59	2.717	8.15
	2	1	3	35.26	12.96	-34.20	-15.08	1.062	3.19
	3	2	3	13.25	-6.22	-13.14	2.57	0.116	0.35
	4	2	4	17.08	-5.18	-16.89	1.74	0.181	0.54
	5	2	5	25.33	-1.85	-25.07	-0.35	0.257	0.77
	6	3	4	23.09	4.64	-23.04	-6.47	0.057	0.17
	7	4	5	-0.07	-0.27	0.07	-4.65	0.004	0.01
							Total		4.393
3	1	1	2	98.26	71.40	-95.55	-69.63	2.714	8.14
	2	1	3	35.19	12.98	-34.13	-15.11	1.059	3.18
	3	2	3	13.20	-6.21	-13.09	2.55	0.115	0.35
	4	2	4	17.03	-5.17	-16.85	1.73	0.180	0.54
	5	2	5	25.31	-1.85	-25.05	-0.36	0.256	0.77
	6	3	4	23.15	4.62	-23.10	-6.45	0.057	0.17
	7	4	5	-0.05	-0.28	0.05	-4.64	0.004	0.01
						Total		4.385	13.16

Tableau 3.10 : les résultats au niveau des branches après la contribution des convertisseurs VSC multipolaires.

Ce tableau présente les résultats d'une analyse de flux de puissance dans un réseau électrique avec différents scénarios de convertisseurs VSC, où le nombre de pôles des convertisseurs VSC varie. Les données comprennent les injections de puissance active et réactive aux bus, les injections de puissance à partir des bus, ainsi que les pertes de puissance active (P) et réactive dans les branches.

L'augmentation du nombre de pôles des convertisseurs VSC dans le réseau électrique montre une légère réduction des pertes de puissance active et réactive, suggérant une amélioration de l'efficacité énergétique et de la gestion de la puissance réactive.

6.3 Ecoulement de puissance sur un réseau de 12 bus:

L'évolution des réseaux électriques vise à améliorer l'efficacité, la stabilité et la flexibilité des systèmes de distribution de l'énergie. Pour avoir un écoulement de puissance optimal dans un réseau électrique, la topologie représente un facteur fondamental. On établit un réseau électrique du 12 consiste à une répartition adéquate entre les différents nœuds par l'interconnexion étudiée entre les bus.

Nombres des buses	12
Générateurs	4
Branches	19

Tableau 3.11: La composition du réseau électrique de 12 bus.

Bus	Tension		Puissance générée		Charge	
	Valeur unitaire (pu)	Ang (deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1.060	0.000*	241.73	119.95	-	-
2	1.000	-1.493	50.00	-93.12	20.00	10.00
3	0.991	-5.121	-	-	45.00	15.00
4	0.988	-5.402	-	-	40.00	5.00
5	1.000	-3.920	40.00	8.45	40.00	5.00
6	0.991	-6.881	-	-	30.00	5.00
7	1.000	-6.656	50.00	19.48	40.00	5.00
8	0.984	-7.878	-	-	35.00	15.00
9	0.982	-8.144	-	-	30.00	5.00
10	0.981	-8.332	-	-	30.00	5.00
11	0.995	-6.406	-	-	30.00	10.00
12	1.023	-3.628	-	-	30.00	5.00
Total			381.73	54.75	370.00	85.00

Tableau 3.12 : les résultats d'écoulement de puissance et les valeurs tension dans le réseau de 12 bus.

La génération de puissance dans ce réseau est globalement bien répartie, avec une puissance active totale générée de 381.73 MW. Les principaux générateurs se trouvent aux bus 1, 2, 5, et 7. Le bus 1, en particulier, joue un rôle crucial en fournissant 241.73 MW, ce qui représente une part significative de la génération totale. Les autres générateurs contribuent à l'équilibre global, avec le bus 5 et le bus 7 générant chacun 50 MW. Les pertes totales sont de 11.73 MW. Cela représentent environ 3.07% de la puissance totale générée de 381.73 MW. Ce niveau de pertes est typique pour un réseau électrique.

Le niveau de tension à travers les bus est entre 0.982 pu et 1.060 pu, ces valeurs sont proche de 1 pu et acceptables.

Branches	Bus de départ	Bus d'arriver	Injection depuis Buses		Injections aux buses		Pertes	
			P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(Mvar)
/	/	/						
1	1	2	73.40	78.76	-71.24	-78.65	2.160	6.48
2	1	3	44.87	14.64	-43.22	-14.95	1.650	4.95
3	2	3	33.24	-6.75	-32.56	4.82	0.676	2.03
4	2	4	36.01	-6.30	-35.22	4.71	0.789	2.37
5	2	5	31.99	-11.42	-31.54	9.76	0.449	1.35
6	3	4	16.59	0.68	-16.57	-2.55	0.028	0.09
7	4	5	-10.97	-3.41	11.07	-1.23	0.099	0.30
8	5	6	20.47	-5.08	-20.13	1.15	0.341	1.02
9	6	7	-6.83	-8.45	6.86	6.56	0.031	0.09
10	7	8	33.83	11.90	-33.56	-13.93	0.265	0.93
11	8	9	9.55	1.89	-9.54	-3.77	0.010	0.05
12	9	10	2.03	-2.16	-2.03	-1.68	0.002	0.01
13	10	11	-27.97	-3.32	28.30	1.37	0.327	0.98
14	11	12	-58.30	-11.37	59.36	12.51	1.062	3.19
15	12	1	-120.62	-19.10	123.46	26.55	2.844	8.53
16	3	6	14.18	-5.55	-14.08	2.06	0.109	0.44
17	4	9	22.76	-3.75	-22.49	0.93	0.267	1.07
18	6	8	11.03	0.24	-10.98	-2.96	0.051	0.20
19	7	12	-30.69	-3.98	31.25	1.59	0.567	1.70
/					Total		11.727	35.76

Tableau 3.13 : les résultats d'écoulement de puissance à travers les branches.

Les pertes totales de la puissance active dans les branches sont égales à 11.727 MW, cette valeur est acceptable en considérant le nombre des branches dans le réseau.

a. Ecoulement de puissance sur un réseau de 12 bus avec contribution d'un réseau HVDC :

En appliquant sur un réseau électrique de 12 bus des systèmes HVDC, ces systèmes sont des trois convertisseurs VSC tétra-polaires placés sur les bus 2,8 et 10.

Buses	Tension		Puissance à travers les générateurs		Puissance à travers la charge	
	Valeur unitaire (pu)	Ang (deg)	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1.060	0.000*	242.45	106.18	-	-
2	1.000	-2.508	50.00	-39.33	20.00	10.00
3	0.995	-5.050	-	-	45.00	15.00
4	0.994	-5.294	-	-	40.00	5.00
5	1.000	-4.081	40.00	3.24	40.00	5.00
6	0.996	-5.811	-	-	30.00	5.00
7	1.000	-5.091	50.00	-13.20	40.00	5.00
8	1.000	-6.023	-	-	35.00	15.00
9	0.998	-6.273	-	-	30.00	5.00
10	1.009	-5.194	-	-	30.00	5.00
11	1.012	-4.599	-	-	30.00	10.00
12	1.030	-2.798	-	-	30.00	5.00
/	Total		382.45	56.88	370.00	85.00

Tableau 3.14 : les résultats d'écoulement de puissance et les valeurs tension dans le réseau de 12 bus.

La tension à travers les bus du système sont devenues plus stable avec la contribution des convertisseurs VSC dans le réseau électrique.

Branches	Bus de départ	Bus d'arriver	Injection depuis Buses		Injections aux buses		Pertes ($Z \cdot I^2$)	
			P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(Mvar)
/	/	/						
1	1	2	101.88	70.36	-99.06	-68.29	2.815	8.45
2	1	3	43.91	12.84	-42.36	-13.48	1.547	4.64
3	2	3	23.02	-6.52	-22.69	3.53	0.330	0.99
4	2	4	25.36	-6.45	-24.96	3.66	0.398	1.19
5	2	5	20.68	-8.08	-20.49	5.65	0.188	0.57
6	3	4	13.94	-1.19	-13.92	-0.73	0.020	0.06
7	4	5	-8.61	-2.01	8.67	-2.78	0.060	0.18
8	5	6	11.82	-4.62	-11.71	-0.01	0.115	0.35
9	6	7	-13.80	-0.64	13.85	-1.18	0.058	0.17
10	7	8	21.54	-7.47	-21.44	4.82	0.100	0.35
11	8	9	9.05	0.61	-9.04	-2.57	0.008	0.04
12	9	10	-13.50	-4.54	13.60	0.79	0.095	0.28
13	10	11	-8.60	-0.79	8.62	-2.18	0.029	0.09
14	11	12	-38.62	-7.82	39.08	7.09	0.451	1.35
15	12	1	-94.89	-18.79	96.66	22.98	1.762	5.28
16	3	6	6.11	-3.86	-6.09	-0.03	0.021	0.08
17	4	9	7.50	-5.93	-7.46	2.11	0.036	0.15
18	6	8	1.60	-4.32	-1.59	1.35	0.004	0.02
19	7	12	-25.40	-9.56	25.82	6.70	0.421	1.26
/						Total	8.459	25.50

Tableau 3.15 : Résultats d'exécution de la simulation d'un réseau électrique de 12 bus avec contribution d'un système HVDC

La contribution des systèmes HVDC sur le branches est apparent dans la réduction de pertes jusqu'à 8.459 MW

Bus	Injection de bus		Tension aux limites du convertisseur		Les pertes totales
	P(MW)	Q(MVar)	Valeur unitaire (pu)	Ang (deg)	P(MW)
1	-60.00	-40.00	0.890	-13.142	1.37
2	21.01	21.78	1.047	-2.881	1.16
3	35.00	5.00	1.013	0.200	1.18
/				Total	3.71

Tableau 3.16 : Les résultats au niveau des convertisseurs VSC

Les pertes totales dans les convertisseurs sont relativement faibles par rapport à la puissance injectée. Ceci est positif car cela indique une efficacité élevée des convertisseurs VSC dans le système.

Les branches	Bus de début	Bus de fin	Puissance depuis bus (MW)	Puissance à bus (MW)	P _{Loss} (MW)
1	1	2	30.72	-30.60	0.12
2	2	3	8.43	-8.42	0.01
3	1	3	27.91	-27.77	0.14
/	/	/	/	Total	0.27

Tableau 3.17 : Les résultats au niveau des Branches de transmission de courant continue

Les pertes dans les branches à courant continue sont faibles est acceptables par rapport aux branches de courant alternative.

7. Optimisation des résultats obtenue de la simulation :

7.1 Introduction:

L'optimisation est définie par des méthodes numériques consistent à minimiser ou à maximiser une fonction objective comportant de multiples variables de décision tout en respectant les contraintes fonctionnelles [15]. Pour optimiser les résultats obtenus nécessite des algorithmes numériques pour avoir des valeurs optimales des paramètres à optimiser.

7.2 Application :

On optimise les valeurs de la tension dans les différents réseaux électriques en utilisant l'algorithme PSO (Partical swarm optimization), il imite le comportement social des oiseaux et des poissons. Il commence par initialiser une population de particules, chacune représentant une solution potentielle. Ces particules se déplacent dans l'espace de recherche, en ajustant leur position en fonction de leur meilleure position personnelle et de la meilleure position trouvée par le groupe. La vitesse de chaque particule est mise à jour pour équilibrer l'exploration et l'exploitation de l'espace de recherche. Le processus se répète jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint, comme un nombre maximum d'itérations ou une tolérance spécifique. PSO est simple à implémenter et flexible, mais peut parfois converger prématurément vers des solutions sous-optimales.

a. Fonction objectif :

La fonction objectif est la fonction qu'on doit minimiser par l'algorithme PSO. Dans ce cas, la fonction objectif est la déviation de la tension. Cela est une mesure importante dans l'analyse et l'optimisation des réseaux électriques. Elle permet de quantifier l'écart entre les tensions mesurées aux différents points du réseau et une valeur de référence, souvent prise comme étant l'unité (1 pu), sa équation est de la forme :

$$Deviation\ de\ tension = \sum_{i=1}^n |V_i - 1| \quad (3.29)$$

V_i : la tension au bus i .

n : nombre total de bus dans le réseau.

b. Exécution de l'algorithme PSO sur les valeurs de tensions des réseaux électriques :

Dans ce cas, on exécute l'algorithme pour avoir des valeurs optimales de la tension des bus dans le réseau électrique.

Tension	Valeurs initiales (pu)	Valeurs optimisée (pu)
Données générales dans les bus		
V1	1.060	1.000
V2	1.000	1.050
V3	0.987	1.050
V4	0.984	1.062
V5	0.972	0.985
Résultat fonction objectif (pu)	0.1170	

Tableau 3.18 : Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 5 bus sans convertisseurs VSC

Ce tableau présente les valeurs initiales et optimisées des tensions dans un réseau électrique à 5 bus sans convertisseurs VSC, ainsi que le résultat de la fonction objectif.

Les résultats montrent que l'optimisation a permis de réduire les écarts de tension entre les différents bus du réseau, ce qui est crucial pour maintenir la stabilité et l'efficacité du système électrique. Les valeurs de tension optimisées sont maintenant plus proches de l'idéal (1 pu), ce qui minimise les pertes et améliore la qualité de la distribution d'énergie. La fonction objectif réduite indique que l'objectif d'optimisation a été atteint avec succès, en tenant compte des contraintes et des objectifs spécifiques du réseau électrique étudié.

Tension	Valeurs initiales (pu)	Valeurs optimisée (pu)
Données générales dans les bus		
V1	1.060	1.000
V2	1.000	0.993
V3	1.000	1.045
V4	0.996	1.013
V5	0.991	1.040
Résultat fonction objectif (pu)	0.1050	

Tableau 3.19 : Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 5 bus avec 3 convertisseurs VSC bipolaires.

En comparaison, les bus dans ce réseau ont montré des résultats plus uniformes et une meilleure fonction objective, ce qui suggère une déviation diminuée et une meilleure efficacité du réseau après optimisation.

Tension	Valeurs initiales (pu)	Valeurs optimisée (pu)
Données générales dans les bus		
V1	1.060	1.000
V2	1.000	1.049
V3	1.000	0.994
V4	0.994	1.001
V5	0.975	0.926
Résultat fonction objectif (pu)	0.1300	

Tableau 3.20 : Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 5 bus avec 3 convertisseurs VSC tripolaires.

L'optimisation a permis de réduire les écarts de tension dans l'ensemble du réseau, avec des résultats variés selon les différentes parties.

Tension	Valeurs initiales (pu)	Valeurs optimisée (pu)
Données générales dans les bus		
V1	1.060	0.999
V2	1.000	1.066
V3	0.991	1.007
V4	0.988	1.068
V5	1.000	1.040
V6	0.991	0.992
V7	1.000	1.021
V8	0.984	1.036
V9	0.982	1.043
V10	0.981	1.069
V11	0.995	1.075
V12	1.023	1.066
Résultat fonction objectif (pu)	0.5000	

Tableau 3.21 : Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 12 bus sans convertisseurs VSC

Ce tableau illustre une analyse détaillée des valeurs initiales et optimisées des tensions dans un réseau complexe de 12 bus. Malgré la diversité initiale des tensions, l'approche d'optimisation a réussi à ajuster ces valeurs vers une uniformité plus cohérente, démontrant ainsi une capacité à améliorer la stabilité du réseau électrique. Cela est particulièrement remarquable dans des environnements aussi complexes, où la gestion efficace des écarts de tension est cruciale pour assurer un fonctionnement optimal du réseau.

Tension	Valeurs initiales (pu)	Valeurs optimisée (pu)
Données générales dans les bus		
V1	1.060	1.000002
V2	1.000	1.032610
V3	0.995	1.035797
V4	0.994	1.067305
V5	1.000	1.043991
V6	0.996	0.992350
V7	1.000	0.985127
V8	1.000	1.024524
V9	0.998	1.062608
V10	1.009	1.023845
V11	1.012	1.001119
V12	1.030	1.029230
Résultat fonction objectif (pu)	0.3436	

Tableau 3.22 : Les résultats d'optimisation sur les valeurs de tension dans le réseau électrique de 12 bus avec convertisseurs VSC

Ce tableau démontre une optimisation réussie des tensions dans un réseau électrique complexe comprenant des bus généraux et des bus HVDC. Les valeurs initiales des tensions ont été ajustées avec précision vers des valeurs optimisées, réduisant significativement les écarts initiaux et améliorant ainsi la stabilité et l'efficacité globale du réseau.

Le rôle de l'algorithme PSO est d'optimiser les valeurs de tension des différents systèmes. Cela consiste à mettre à jour les valeurs initiales sous forme de population, puis appliquer les contraintes pour avoir des valeurs dans un intervalle connus avant d'optimiser les valeurs obtenues par des équations de position et de la vitesse par chaque valeur individuelle avant de sélectionner les meilleures positions de particules et les meilleures position des groupes.

Les valeurs de la tension sont devenues plus proches de 1pu après l'optimisation, avec la minimisation de la déviation de la tension.

c. Visualisation des résultats d'optimisation :

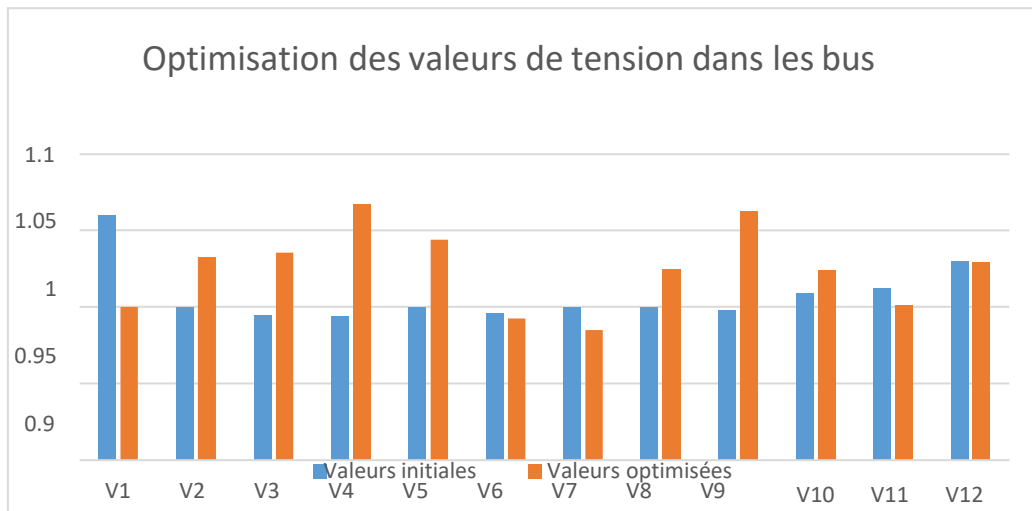


Figure 3.13 : Histogramme représentant l'impact de l'algorithme PSO sur les valeurs de tension du réseau de 12 bus avec 3 convertisseurs VSC.

Les valeurs de tension optimisées montrent une réduction des écarts par rapport aux valeurs initiales, ce qui indique une amélioration globale du profil de tension du réseau. Les valeurs optimisées restent globalement proches de 1 pu, témoignant d'une optimisation réussie pour maintenir les tensions dans une plage acceptable, renforçant ainsi la stabilité du réseau

8. Conclusion

La contribution des systèmes HVDC s'est avérée être un facteur crucial pour l'amélioration de la performance et de la fiabilité des réseaux électriques. L'optimisation des valeurs de tension grâce à l'algorithme PSO a permis d'atteindre des niveaux de performance optimaux, confirmant ainsi l'importance de l'utilisation de méthodes avancées de simulation et d'optimisation dans la gestion des réseaux électriques modernes.

Conclusion

générale

L'innovation est nécessaire dans le monde pour maintenir l'évolution et prévenir toute perte, en particulier dans le domaine de l'ingénierie électrique et plus spécifiquement dans la gestion des réseaux électriques. Une des méthodes pour améliorer les performances des réseaux électriques est d'appliquer des lignes de transmission HVDC (courant continu à haute tension).

Dans ce mémoire, nous avons démontré l'importance d'intégrer les systèmes HVDC dans nos systèmes électriques et leur efficacité pour maintenir le flux de puissance et les paramètres de puissance. Nous avons également approfondi l'explication de l'architecture des convertisseurs HVDC et du principe de fonctionnement, en montrant chaque dispositif et élément électrique contribuant au système.

Nous avons également présenté l'aspect mathématique du système HVDC en modélisant les côtés AC, AC/DC et DC du système, en montrant les différentes équations en fonction du côté du système pour aider à analyser les différents cas.

Par la suite, nous avons appliqué plusieurs cas de simulation de réseau électrique en utilisant le logiciel Matabdc, incluant la contribution des lignes de transmission HVDC dans les réseaux électriques tels que les systèmes à 5 bus et à 12 bus.

Enfin, nous avons utilisé des algorithmes d'optimisation métaheuristiques pour optimiser les valeurs de magnitude de tension afin d'améliorer les performances du flux de puissance électrique, montrant les résultats de l'efficacité de l'algorithme PSO (Optimisation par Essaim de Particules).

Comme travail d'avenir nous souhaitons d'intégrer le PSO avec d'autres méthodes d'optimisation hybride ou l'application à des réseaux plus complexes et réalistes.

Références

bibliographiques

- [1] **Yahiaoui Merzoug**, << Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS >>, Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat Es-science-d 'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, avril2014
- [2] **Mr Menad MOUZAIA, Mr Sofiane IDIRI**, << Etude de la variation de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau de distribution >>, Mémoire de Fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique, U-A. MIRABejaia, Algérie, juin2013
- [3] **N. Mancer**, << Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) >>, mémoire de magister 2012, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [4] **Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J.** (2011). Power System Analysis and Design. Cengage Learning. ISBN: 978-1-111-42579-1 .
- [5] **Grainger, J. J., & Stevenson, W. D.** (1994). Power System Analysis. McGraw-Hill. ISBN: 978-0-07-061293-8.
- [6] **1. Jovcic, D., & Ahmed, K.** (2015). High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper. Energy, 1(3), 220-231. ISBN: 978-1-84919-605-7.
- [7] **Momoh, J. A.** (2012). Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis. Wiley-IEEE Press. ISBN: 978-0-470-88939-8
- [8] **M. Eghbal, N. Yorino, Y. Zoka, E.E. El Araby**, << Application of multi objective Evolutionary optimization algorithms to reactive power planning problem >>, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 4, No. 5, August 2009, pp. 625 632.
- [9] **M. Rashidinejad, H. Farahmand, M. Fotuhi Firuzabad, A.A. Gharaveisi**, << ATC enhancement using TCSC via artificial intelligent techniques >>, Journal of Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 1, January 2008, PP. 11 20.
- [10] **Ahmed Ould Nagi**, << Optimisation de l'écoulement de puissance Par algorithmes : AG et PSO-TVAC >>, Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme : MASTER, U-Mohamed Khider Biskra, Algérie, Juin 2014.
- [11] **M.S. Osman, M.A. Abo Sinna, A.A. Mousa**, << A solution to the optimal power flow using genetic algorithm >>, International Journal of Applied Mathematics and Computation, Vol. 155, No. 2, August 2004, pp. 391 405.

[12] **M.A. Abido**, << Optimal power flow using tabu search algorithm » International Journal of Electric Power Components and Systems >>, Vol. 30, No. 5, 2002, pp. 469 483.

[13] **T.J. Overbye, C.L. Demarco**, << Voltage security enhancement using energy-based sensitivities >> IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991, pp. 1196 1202

[14] **W.D. Stevenson**, “Elements of Power System Analysis”, 4th Ed., McGraw-Hill Book 1982.

[15] **Octavian ENACHEANU** (2008). *Contribution à l'étude du couplage des réseaux AC/DC dans un contexte de robustesse et de sécurité* [Contribution to the study of AC/DC network coupling in a context of robustness and security] (Doctoral dissertation).

[16] **Saadat, H.** (2017). *Power System Analysis* (4th ed.).

[17] **KU Leuven, Dept.** <<MATA CDC 1.0 User's Manual>> Electrical Engineering (ESAT), Div. ELECTA

Annexe

HVAC

```
function [baseMVA, bus, gen, branch] = case5_stagg
%case 5 nodes      Power flow data for 5 bus, 2 generator case.
% Please see 'help caseformat' for details on the case file format.
%
% case file can be used together with dc case files "case5_stagg_....m"
%
% Network data from ...
% G.W. Stagg, A.H. El-Abiad, "Computer methods in power system analysis",
% McGraw-Hill, 1968.
%
% MATPOWER case file data provided by Jef Beerten.
```

```
%% MATPOWER Case Format : Version 1
```

```
%%----- Power Flow Data -----%%
```

```
%% system MVA base
```

```
baseMVA = 100;
```

```
%% bus data
```

```
% bus_i  type      Pd  Qd  Gs  Bs  area      Vm      Va  baseKV  zone
Vmax    Vmin
bus = [
  1      3      0  0  0  0  1      1.06    0  345     1     1.1
0.9;
  2      2     20 10  0  0  1      1        0  345     1     1.1
0.9;
  3      1     45 15  0  0  1      1        0  345     1     1.1
0.9;
  4      1     40  5  0  0  1      1        0  345     1     1.1
0.9;
  5      1     60 10  0  0  1      1        0  345     1     1.1
0.9;
];
```

```
%% generator data
```

```
% bus Pg      Qg  Qmax  Qmin  Vg  mBase      status  Pmax  Pmin
gen = [
  1  0      0  500   -500  1.06  100      1      250  10;
  2 40      0  300   -300  1     100      1      300  10;
];
```

```
%% branch data
```

```
% fbus  tbus      r  x  b  rateA  rateB  rateC  ratio  angle
status
branch = [
  1  2  0.02  0.06  0.06  100  100  100  0  0  1;
  1  3  0.08  0.24  0.05  100  100  100  0  0  1;
  2  3  0.06  0.18  0.04  100  100  100  0  0  1;
  2  4  0.06  0.18  0.04  100  100  100  0  0  1;
  2  5  0.04  0.12  0.03  100  100  100  0  0  1;
  3  4  0.01  0.03  0.02  100  100  100  0  0  1;
  4  5  0.08  0.24  0.05  100  100  100  0  0  1;
];
```

```
return;
```

HVDC

```
function [baseMVAac, baseMVAdc, pol, busdc, convdc, branchdc]=
case5_stagg_HVDCptp
```

```

%dc case 2 nodes  dc power flow data for point-to-point link
%
% 3 node system (constant voltage and power controlled) can be used
% together with ac case files 'case5_stagg.m' and 'case'3_inf.m'
%
% Network data based on ...
% J. Beerten, D. Van Hertem, R. Belmans, "VSC MTDC systems with a
% distributed DC voltage control - a power flow approach", in IEEE
% Powertech2011, Trondheim, Norway, Jun 2011.
%
% MATACDC case file data provided by Jef Beerten.

%% system MVA base
baseMVAac = 100;
baseMVAdc = 100;

%% dc grid topology
pol=2; % numbers of poles (1=monopolar grid, 2=bipolar grid)

%% bus data
% busdc_i busac_i grid Pdc Vdc basekVdc Vdcmax Vdcmin Cdc
busdc = [
    1 2 1 0 1 345 1.1 0.9 0;
    2 3 1 0 1 345 1.1 0.9 0;
];

%% converters
% % busdc_i type_dc type_ac P_g Q_g Vtar rtf xtf bf rc
% xc basekVac Vmmax Vmmin Imax status LossA LossB LossCrec
% LossCinv
convdc = [
    1 1 1 -60 -40 1 0.0015 0.1121 0.0887
    0.0001 0.16428 345 1.1 0.9 1.2 1 1.103 0.887
    2.885 4.371;
    2 2 2 0 0 1 0.0015 0.1121 0.0887
    0.0001 0.16428 345 1.1 0.9 1.2 1 1.103 0.887
    2.885 4.371;
];

%% branches
% fbusdc tbusdc r l c rateA rateB rateC status
branchdc = [
    1 2 0.052 0 0 100 100 100 1;
];

```