

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

**Utilisation des méthodes Itératives
pour le problèmes de l'écoulement
de puissance**

Réalisé par:

Louhidi abde elkader
Djebali abderrahmane
Nakes abderraouf
Belkacemi otmane

Encadré par:

khechkhouche ali

Soutenu en Juin 2015



Remerciements

Remerciements à Dieu -le tout puissant- qui nous a
aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur
M^{er} khechkhouche ali d'avoir accepté de nous
encadrer et de nous suivre durant toute cette période.
Nos remerciements vont aussi au président du jury et
aux membres du jury examinateurs qui nous fait
l'honneur de participer au jury de ce travail.
Et enfin nous remercions l'ensemble, enseignants et
collègues de notre promotion, qui nous ont aidés à
réaliser ce modeste travail.





Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire à :

*A toute mes amis pour les moments agréables que nous avons
passés*

ensemble

*A mon père(AMMAR) qui a toujours été là pour moi, et
qui m'a donné un magnifique modèle le labeur et de
persévérance.*

A ma mère(LATIFA).

A mes frères ,

A toute mes sœurs et leurs enfants.

❖ *A mon trinôme «abderrahmane, abderraouf , otmane ».*

ABED EL KADER





Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire à :

*Nous avons faire où offrir quelque chose à nous
parents en signe de reconnaissance pour tout ce
qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me
voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui nous 'ont donné la vie, symbole de
beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de nos inspiration et de
mon courage, à qui nous devons de l'amour
et de la reconnaissance.*

A mon parents.

A mon frères, et mes sueurs.

*A toute la famille **DJEBALI..***

A tous mon amis sans exception.

Djebali abd errahmane





Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire à :

*A toute mes amis pour les moments agréables que nous avons
passés*

ensemble

*A mon père(Ali) qui a toujours été là pour moi, et
qui m'a donné un magnifique modèle le labeur et de
persévérance.*

A ma mère.

A mes frères ,

A toute mes sœurs et leurs enfants.

A mon trinôme «abderrahmane, abderraouf , abdel kader».

otmane





Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire à :

*A toute mes amis pour les moments agréables que nous
avons passés
ensemble*

*A mon père(Mohammed) qui a toujours été là pour
moi, et*

*qui m'a donné un magnifique modèle le labeur et de
persévérance.*

A ma mère.

A mes frères ,

A toute mes sœurs et leurs enfants.

A mon trinôme Seifallah et Sadane et Ibrahim.

Abderraouf



Liste des Figures

Chapitres:

Figure(I-2) : schéma unifilaire simplifié d'un réseau.....	03
Figure (I-4) : Modèle d'un générateur.....	05
Figure(I-4-2) : Modèle d'un transformateur.....	06
Figure(I-4-3) : Modèle d'une lignes par un schéma en π équivalent	07
Figure(I-4-4) : Modèle d'une charge électrique sous forme d'une impédance constante	07
Figure(I-5-3) : système à deux J.d.B.....	09
Figure (III.1) : Schéma unifilaire du réseau électrique à 3 jeux de barres.....	30

Liste des courbes

Courbe (II-1) : Représentation graphique de la méthode de Gauss-Seide.....	17
Courbe (II-2) : Représentation graphique de la méthode de Gauss-Seidel avec un facteur d'accélération.....	18
Courbe(II-3) : Représentation graphique de la méthode de Gauss-Seidel.....	22

Liste des symboles et des abréviations

e : Nombre des éléments.

F : Facteur de puissance

J.d.B: Jeux de barres

i: Numéro du J.d.B.

n : Nombre des noeuds

nb : Nombre des branches.

NI :Nombre max d'itération.

nj : Nombre de jeu de barre.

G-S : Gauss-Seidel.

P : Puissance active.

P_D: Puissance active demandée.

P_G : Puissance active générée.

P_L : Perte active de ligne.

PU : Per unité (unité relative).

Q : Puissance réactive.

Q_D : Puissance réactive demandée.

Q_G : Puissance réactive générée.

Q_L : Perte réactive de ligne.

R : Résistance.

S : *Puissance apparente.*

S_b : Puissance de base.

S_D : Puissance apparente demandée.

S_G : Puissance apparente générée.

Ts: La tolérance.

V_{boucle} : Tension dans la boucle.

V_{bus} : Vecteur tension aux J.d.B.

V_i : Tension au J.d.B.

X : Inductance.

X^* : Valeur complexe conjuguée.

Y_{boucle} : Matrice admittance de boucle.

Y_{bus} : Matrice admittance.

Z_{boucle} : Matrice impédance de boucle.

Z_{bus} : Matrice impédance.

δ : Phase de tension.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL	01
----------------------------	----

CHAPITRE I: Ecoulement De Puissance

I-1 Introduction	02
I-2 L'écoulement de puissance	03
I-3 Définition la répartition de charge	04
I-4 Modélisation des éléments du réseau électrique	05
I-4-1 Modèle de Générateur	05
I-4-2 Modèle du transformateur	05
I-4-3 Modèle de Ligne de transport	06
I-4-4 Modèle de Charge électrique	07
I-4-5 Modèle des éléments shunt	07
I-5 Principe de fonctionnement d'un réseau électrique	08
I-5-1 Relations paramétriques du système	08
I-5-2 Les équations aux J.d.B.....	08
I-5-3 Formulation d'admittances de réseau	09
I-5-4 Calcul de la puissance au J.d.B	11
I-5-5 La puissance transmise dans la ligne.....	12
I-5-6 Les pertes dans la ligne	12
I-6 Classification des variable	13
I-6-1 Les variable de perturbation	13
I-6-2 Variables d'états.....	13
I-6-3 Variables de contrôle	13
Conclusion.....	14

CHAPITRE II: Méthodes Itératives

II-1 Introduction	15
II-2 Méthodes numériques de résolution des systèmes non-linéaires	15
II-2-1 Méthode de Gauss- Seidel	15
II-2-2 Méthode de Newton-Raphson	19
II-3 Applications sur les équations de l'écoulement de puissance.....	24
II-3-1 Méthode itérative de Gauss	24
II-3-2 Méthode itérative de Gauss-Seidel	25
II-3-3 Méthode itérative de Newton Raphson	27
Conclusion	28

CHAPITRE III: PROGRAMMATION ET SIMULATION

III-1 Introduction	29
III-2 Technique de solution	29
III-3 Exemple d'application	30
III-4-1 La Methode de Gauss-Seidel	31
III-4-2 La Methode de Newton-Raphson	33
Conclusion	35
CONCLUSION GENERAL	36

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'étude de l'écoulement de puissance (load flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent.

Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux.

Un grand nombre de mathématiciens, d'informaticiens et d'ingénieurs ont consacré des années de leur carrière à étudier les méthodes de calcul de l'écoulement de puissance. Il n'y a qu'à voir le nombre de publications dans ce domaine pour apprécier l'effort qu'ils ont développé. Avant 1929 [10], les calculs de load flow (appelé power flow) se faisaient à la main.

En 1929, des calculateurs de réseaux (de Westing House) ou des analyseurs de réseaux (de General Electric) furent employés pour les calculs d'écoulement de puissance. Ce n'est qu'en 1956 que fut développée la première méthode adéquate par Ward et Hale.

Les premières méthodes étaient basées sur la méthode itérative de Gauss-Seidel relative à la matrice admittance Y . Elle ne nécessite pas beaucoup d'espace mémoire et sa programmation est relativement simple. Mais, si les petits réseaux ne nécessitent que peu d'itérations pour converger, les grands réseaux, par contre, demandent un grand nombre d'itérations si toutefois ils convergent. Ce qui poussa les chercheurs à développer les méthodes basées sur la matrice impédance Z . Mais même si ces dernières avaient de meilleures caractéristiques de convergence, elles ont comme désavantage de nécessiter beaucoup d'espace mémoire dû au fait que la matrice Z n'est pas éparpillée ("sparse"), contrairement à son inverse Y .

Ce qui amena les chercheurs à développer la méthode de Newton-Raphson. Cette méthode nécessite plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. Cependant, elle requiert des capacités de stockage ainsi que des puissances de calcul importantes.

D'autres techniques sont apparues: celles qui exploitent l'éparpillement de la matrice Y et du Jacobien afin d'optimiser le stockage et celles qui tiennent compte du fort couplage entre P et Q et entre Q et V (Fast Decoupled Load Flow) afin d'accélérer le temps de calcul.

I-1 Introduction :

L'analyse écoulement de puissance (load flow (lf)) est une terminologie qui représente un Ensemble d'analyse numérique et de procédure effectuées à l'ordinateur permettant de Déterminer la distribution de puissance dans un système donné –encore plus important – Comment contrôler cette répartition de puissance.

Voici ci-après les objectifs les plus importants de l'écoulement de puissance:

- La détermination de la puissance réactive et active dans la ligne de transmission basée sur certaines considérations à priori associées au récepteur ou au générateur.
- Calcul des différences de potentiel à chaque nœud ou jeu de barre (bus en terminologie anglo-saxon)
- Vérifier qu'aucune ligne n'est surchargée. la surcharge peut signifier que la ligne est proche de la stabilité thermique.

Détermination de l'écoulement de puissance spécifique qui conduit à un dispatch optimum en calculant l'état réseau (P , Q , V , δ , ...) dans des hypothèses données de production et de consommation.

A 'chaque jeu de barre (nœud), sont définis les 4 paramètres:

P : puissance active injectée ou soutirée

Q : puissance réactive injectée ou soutirée

V : module de la tension

δ : déphasage de la tension.

I-2 L'écoulement de puissance :

L'analyse load Flow (LF) d'un réseau de distribution cotenant de jeu barres et ligne de transmission apparaît comme un processus complexe.

Considérons un réseau très simplifié avec seulement deux jeux de barres (figure I-2).



Figure(I-2):schéma unifilaire simplifié d'un réseau

Un ingénieur électricien identifiera le problème de circuits électriques. La procédure 'standard' Pour résoudre un tel problème est de représenter les paramètres de chaque élément du réseau Comme suit :

Pour simplifier nous avons négligé les impédances shunt du transformateur et les admittances de La ligne.

Le courant circulant de 1 vers 2 est alors :

$$I = \frac{E}{Z_G + Z_T + Z_L + Z_R} \quad (I-1)$$

Si E est connue, on pourra calculer le courant. Connaissant le courant I, on pourra donc déduire la tension au niveau des jeux de barres 1 et 2, puis les puissances mis en jeux.

Cette analyse serait linéaire, simple même si on étend l'analyse à plusieurs jeux de barres associant plusieurs générateurs, cela reviendrait à résoudre un système d'équations linéaires.

L'analyse load flow ne peut jamais être réalisée de cette manière aussi simple. Pour les raisons suivantes :

- Les charges du réseau d'énergie électriques ne se comportent pas de manière à pouvoir les représenter par une impédance constante.
- En situation réelle, la force électromotrice E du générateur n'est jamais explicitement connue.

En lieu et place d'une résolution 'circuit électriques', on écrit plutôt les équations de notre réseau avec des variables qui peuvent être facilement mesurable et qui ont des significations pratiques. Ces variables sont :

1. les puissances actives et réactives
2. les amplitudes des tensions au niveau des jeux de barres

Une analyse typique LF est donc un système d'équations en termes de tensions et puissances et non en termes de tension et courants!

LF est donc la résolution d'un système d'équations non-linéaires. Ce qui élimine la possibilité de solution analytique dans la plupart des cas.

Les solutions numériques se font à l'aide d'ordinateurs.

I-3 Définition la répartition de charge :

Les calculs de la répartition de charge prévoient les répartitions de puissance et de tension, pour avoir la capacité de réglage d'un système d'énergie spécifiée par des générateurs, condensateurs, transformateurs et des charges à tension régulière.

cette information est essentielle pour la continuité de l'évaluation des performances du courant dans le système d'énergie et pour analyser l'influence des variations à prévoir pour le développement des systèmes en cas d'augmentation de la demande de charge.

cette analyse exige le calcul nombreuses répartition de charge soit à l'état normale on dans les états critiques.

Le problème de la répartition de charge, consiste à calculer la répartition de puissance et de tension au réseau électrique pour de condition aux jeux de barres connues. On associe à chaque J.d.B quatre quantités. La puissance active, la puissance réactive, le module de la tension et l'énergie de phase, deux de ces quatre quantités sont spécifiées et les deux autres sont à calculer. Donc, on peut classer les jeux de barres comme suit [01].

Jeu de barre de référence :

C'est un jeu de barre générateur où le module et la phase de tension (V, θ) sont tous deux spécifiés. Les puissances (P, Q) sont inconnues et doivent être calculées en dernier. Le jeu de barre de référence, est choisi parmi les jeux de barres générateurs dont la puissance active est la plus importante. Ce jeu de barre est pris comme référence des angles de tension [02].

Jeu de barre contrôle :

Ce jeu de barre est connecté à un générateur délivrant une puissance active P sous une tension constante V contrôlée par un régulateur automatique de tension (AVR). Donc (P, V) sont spécifiées alors que (Q, θ) sont à calculer [02].

Jeu de barre de charge :

Ce jeu de barre alimente une charge caractérisée par sa puissance active P et réactive Q . Donc, (P, Q) sont spécifiées, alors que (V, θ) sont à calculer [02].

I-4 Modélisation des éléments du réseau électrique :**I-4-1 Modèle de Générateur :**

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de courants. Dans l'état stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de sorte que la puissance active (p_g) injectée au jeu de barre et la tension aux bornes du générateur soient maintenues constantes [02].

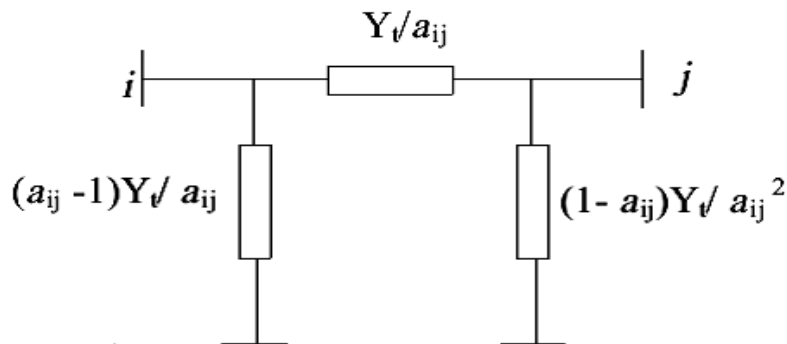
La puissance active du générateur est déterminée par le contrôle de la turbine, qui doit être dans la capacité du système turbine – générateur. La tension (V_g) est principalement déterminée par l'injection de la puissance réactive au jeu de barre de production



Figure (I-4) : Modèle d'un générateur

I-4-2 Modèle du transformateur :

Un transformateur de l'énergie électrique est représenté par un quadripôle en π non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation a et l'impédance de fuite. Les rapports a_{ij} sont inclus dans les éléments de la matrice admittance, c'est-à-dire que les susceptances de la matrice admittance B_{ij} sont vues comme des fonctions de rapports de transformation a figure (I-4-2).



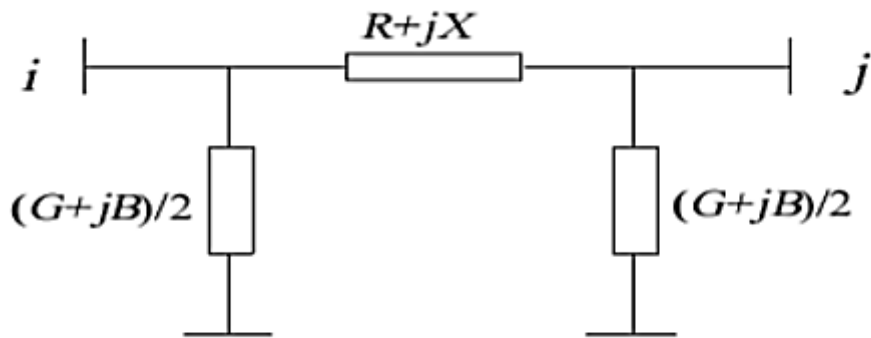
Figure(I-4-2) : Modèle d'un transformateur

Dans un réseau électrique, les transformateurs qui sont connectés directement à la charge sont des transformateurs régulateur de charge (LTC). Ils disposent des régulateurs automatiques de la tension dans des limites permises de fonctionnement, indépendamment des fluctuations de tension primaire [03].

I-4-3 Modèle de Ligne de transport :

La ligne de transport a été 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 .

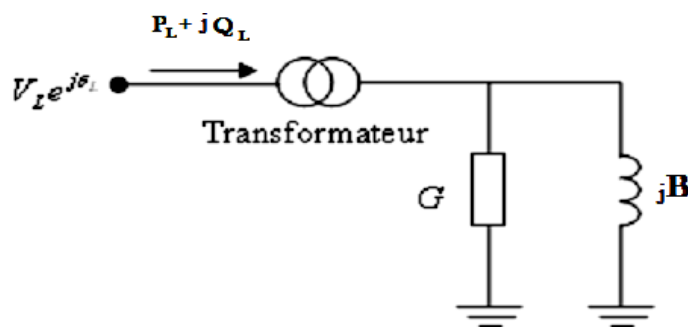
Voir figure (I-4-3) [06].



Figure(I-4-3) : Modèle d'une ligne par un schéma en π équivalent

I-4-4 Modèle de 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 [02].



Figure(I-4-4) : Modèle d'une charge électrique sous forme d'une impédance constante

I-4-5 Modèle des 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 [02].

I-5 Principe de fonctionnement d'un réseau électrique :

I-5-1 Relations paramétriques du système :

Les relations décrivant la topologie d'un système de distribution de peuvent être développées en utilisant les équations de continuité ou de courant de nœuds pour obtenir :

$$[I]_{bus} = [Y]_{bus} [V]_{bus} \quad (I-2)$$

Dans laquelle :

$[I]_{bus}$: vecteur des courants de nœuds.

$[Y]_{bus}$: matrice des admittances de nœuds.

$[V]_{bus}$: vecteur des tensions de nœud.

La relation suivante entraîne que :

$$[Z]_{bus} = [Y]_{bus}^{-1}$$

Où $[Z]_{bus}$ matrice des impédances de nœuds [04].

I-5-2 Les équations aux J.d.B :

Les puissances active et réactive à chaque J.d.B « i » sont :

$$P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad (I-3)$$

$$\text{Avec } I_i = (P_i - jQ_i) / V_i^* \quad (I-4)$$

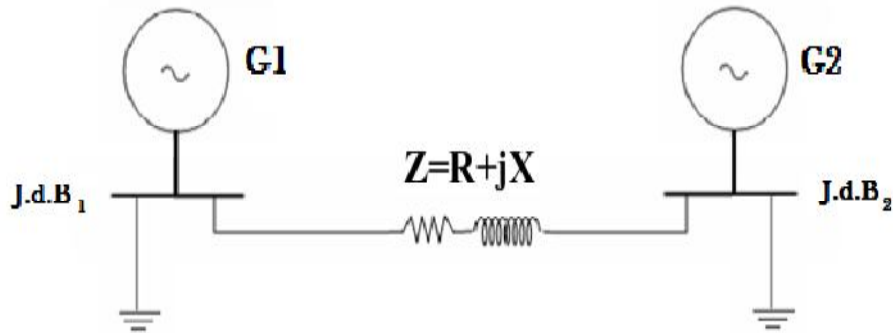
Dans la formulation de l'équation du réseau, si les éléments shunts de mise à la terre sont inclus dans la matrice des paramètres l'équation (I-2) donne le courant total au J.d.B. D'un autre côté, si les éléments shunts du réseau ne sont pas inclus. Le courant total au J.d.B « i » est :

$$I_i = ((P_i - jQ_i) / V_i^*) \cdot V_i \cdot Y_i \quad (I-5)$$

Y_i : Admittance totale shunt au J.d.B « i ».

V_i : Courant de shunt circulant du J.d.B « i » vers la terre. [05]

I-5-3 Formulation d'admittances de réseau :



Figure(I-5-3): système à deux J.d.B

On note que:

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} \quad S_2 = S_{G2} - S_{D2}$$

Et en générale :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \quad (I-6)$$

$$\begin{cases} S_i = P_i + jQ_i = (P_{Gi} + jQ_{Gi}) - (P_{Di} + jQ_{Di}) \\ S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \end{cases}$$

L'application lois des KIRCHOFFE sur le système donne :

Au niveau de J.d.B « 1 »

$$I_1 = y_p \cdot V_1 + y_s (V_1 - V_2) + (y_p - y_s) V_1 - y_s V_1 \quad (I-6-1)$$

$$\text{On sait que : } S_1 = V_1 \cdot I_1^* \Rightarrow I_1 = (S_1^* / V_1^*)$$

Au niveau de J.d.B « 2 »

$$I_2 = y_p \cdot V_2 + y_s (V_2 - V_1) + (y_p - y_s) V_2 - y_s V_2 \quad (I-6-2)$$

Avec:

$$S_2 = V_2 \cdot I_2^* \Rightarrow I_2 = (S_2^* / V_2^*)$$

Alors on peut écrire (I-6-1) (I-6-2) sous la forme :

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2 \\ I_2 = Y_{21} \cdot V_1 + Y_{22} \cdot V_2 \end{cases} \quad (\text{I-6-3})$$

Avec :

$$Y_{11} = y_p + y_s, \quad Y_{22} = y_p + y_s$$

$$Y_{12} = -y_s, \quad Y_{21} = -y_s$$

$$\mathbf{Y}_{\text{bus}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{I-7})$$

On remplace (I-5) en (I-6):

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{I-8})$$

Et ainsi de suite. On peut généraliser la méthode de formulation comme suit pour le système à « n » J.d.B connectés entre eux **[02]**.

$$\begin{aligned} I_1 &= \left(\sum_{i=1}^m \right. \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \end{aligned} \quad I_n = (-y_n)$$

La matrice admittance est donc **[02]** :

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix}$$

I-5-4 Calcul de la puissance au J.d.B [02] :

On a :

$$S_i = (P_{Gi} - jQ_{Gi}) + (P_{Di} - jQ_D) = P_i + jQ_i \quad (I-9)$$

Alors

$$\left. \begin{aligned} S_i^* &= P_i + jQ_i = V_i \cdot I_i^* \\ S_i^* &= V_i \cdot \sum_j^n y_{ij} \cdot V_j \end{aligned} \right\} \quad (I-10)$$

En coordonnées polaires [02] :

$$V_i = |V_i| \cdot e^{j\delta_i}$$

$$y_{ij} = |y_{ij}| \cdot e^{j\gamma_{ij}}$$

$$S_i^* = P_i + jQ_i = V_i \cdot I_i^* = V_i^* \sum_j |y_{ij}| |V_j| e^{j(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})} \quad (I-11)$$

Donc

$$P_i = \sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (I-12)$$

$$Q_i = - \sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (I-13)$$

I-5-5 La puissance transmise dans la ligne :

Quand la solution itérative des tensions aux J.d.B est achevée, on peut calculer

L'écoulement dans les lignes.

Le courant au J.d.B « i » dans la ligne de connexion de nœud « i » vers le nœud « k » est :

$$I_{ik} = (V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* (y_{ik} / 2) \quad (I-14)$$

y_{ik} : Admittance de la ligne entre les J.d.B « i » et « k ».

y_{ik} : Admittance totale de la ligne de charge.

$V_i^* (y_{ik} / 2)$: Contribution du courant au J.d.B « i » due à la ligne de charge.

La puissance écoule, active et réactive, est :

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* \cdot I_{ik} \quad (I-15)$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i (V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* (V_i / 2) \quad (I-16)$$

Soient P_{ik} et Q_{ik} les puissances active et réactive réparties du J.d.B « k » vers le J.d.B « i ».

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_k (V_k - V_i) y_{ik} + V_k^* (V_k / 2) \quad (I-17)$$

Les pertes de puissances dans la ligne « i-k » sont égales à la somme algébrique de la

répartition des puissances déterminée à partir des relations (I-16) et (I-17) [02].

I-5-6 Les pertes dans la ligne :

Au niveau de J.d.B la puissance apparente écoule est la différence entre la puissance générée et la puissance demandée.

Pour un J.d.B « i » :

On a :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di}$$

Avec :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = P_{iF}$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = Q_{iF}$$

$$\sum P_i = \sum P_{iF} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di}$$

$$\sum Q_i = \sum Q_{iF} = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} \quad (I-18)$$

Le système d'équations (I-13) exprime l'expression des pertes.

Ou bien on peut calculer les pertes par une autre méthode, on calcule les pertes au niveau des

Lignes puis la somme algébrique donne l'expression des pertes [02].

$$P_{Lij} = P_{ij} - P_{ji} \quad Q_{Lij} = Q_{ij} - Q_{ji} \quad (I-19)$$

I-6 Classification des variables :

I-6-1 Les variable de perturbation :

Ce sont les puissances $P_{D1}, P_{D2}, Q_{D1}, Q_{D2}$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ Q_{D2} \\ Q_{D2} \end{bmatrix}$$

I-6-2 Variables d'états

Ce sont les variables : $(V_1, V_2, \delta_1, \delta_2)$ Soit X un vecteur appelé vecteur d'état

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ |V_1| \\ |V_2| \end{bmatrix}$$

I-6-3 Variables de contrôle :

Ce sont les puissances de source $P_{g1}, P_{g2}, Q_{g1}, Q_{g2}$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix}$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait la modélisation de quelques éléments de puissance

Constituants le réseau de transport et formulation mathématique de répartition de charge qui résulte en un groupe d'équations non linéaire, ces équations sont établies en utilisant les relations de nœud ou de boucle. la solution du système d'équations décrivant le modèle est basée sur les méthodes numériques itératives à cause de leurs non linéarité. Ce dernier problème est le sujet du deuxième chapitre.

Chapitre II

MÉTHODES ITÉRATIVES

II-1 Introduction :

La modélisation mathématique des systèmes non linéaires qu'il fallait résoudre pour l'étude du phénomène de la répartition de charge, consiste à faire appel aux outils mathématiques tel que, les méthodes itératives sont approximatives par ce que pour les systèmes des équations non linéaires, c'est impossible de les résoudre par les méthodes directes (règle de CRAMER, méthode des racines carrées).

Ou par les méthodes itératives (méthode de relaxation), pour cela on utilise les méthodes itératives approximatives (méthode de GAUSS, méthode de GAUSS-SEIDEL, méthode de NEWTON-RAPHSON).

Dans ce chapitre; on présente les techniques numériques de quelques méthodes de calculs :

- ❖ Méthode de Gauss-Seidel
- ❖ Méthode de Newton-Raphson .

II -2 Méthodes numériques de résolution des systèmes non-linéaires**Rappels :**

Les méthodes les plus courantes pour la solution des équations non linéaires sont Gauss-Seidel, Newton-Raphson. Nous commençons avec une équation à une seule dimension puis on généralise pour n dimensions.

II-2-1 Méthode de Gauss-Seidel :

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une de plus simples méthodes itératives

Utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance pour résoudre un Ensemble très large d'équations algébriques non linéaires.

Considérer l'équation non linéaire $f(x) = 0$. On peut écrire cette équation sous la forme suivante $x = g(x)$.

On suppose que $x^{(0)}$ est la solution initial, ensuite on trouve la solution en utilisant les itérations suivantes :

$$\begin{cases} x^{(1)} = g(x^{(0)}) \\ x^{(2)} = g(x^{(1)}) \\ \vdots \\ x^{(k+1)} = g(x^{(k)}) \end{cases}$$

La solution est obtenu (processus est convergeant si les deux solutions successives sont très voisins. Ainsi si à l'étape $k+1$ nous avons $|x^{(k+1)} - x^{(k)}| \leq e$ (II-1) où e est l'erreur (écart) désiré, donc la solution a été trouver pour une erreur spécifique.

Exemple :

Utiliser la méthode de Gauss-Seidel pour trouver la solution de cette équation

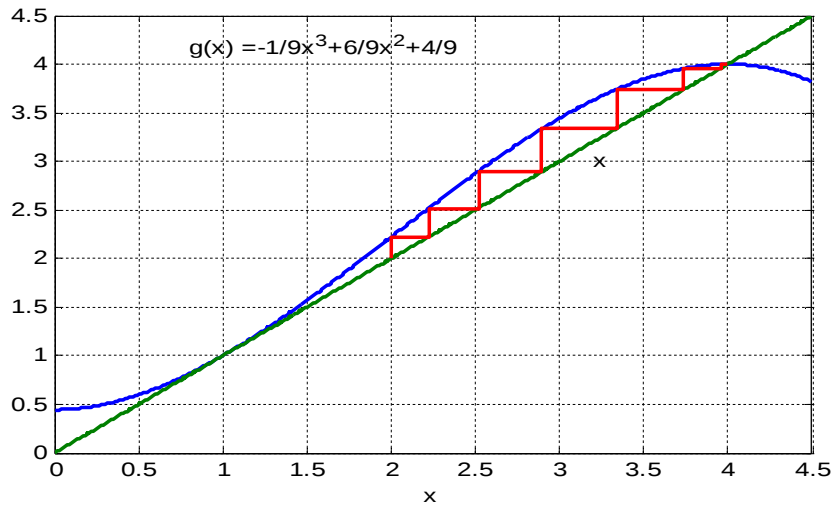
$$f(x) = x^3 - 6x^2 + 9x - 4 = 0$$

Premièrement l'équation est exprimée dans une forme différente ainsi

$$x = -\frac{1}{9}(x^3 - 6x^2 - 4) = g(x)$$

On commence par $x^{(0)}=2$, les itérations sont dans le tableau suivant :

N° d'Itération	$g(x)$	Δx	x
1	2.2222	0.2222	2.2222
2	2.5173	0.2951	2.5173
3	2.8966	0.3793	2.8966
4	3.3376	0.4410	3.3376
5	3.7398	0.4022	3.7398
6	3.9568	0.2170	3.9568
7	3.9988	0.0420	3.9988
8	4.0000	0.0012	4.0000
9	4.0000	0.0000	4.0000



Courbe (II-1) : Représentation graphique de la méthode de Gauss-Seidel

Remarque:

La solution trouvée dépend de valeur initiale ! Il y a peut-être des autres solutions... De plus, il n'y a pas de garantie que la méthode converge à moins qu'il soit contrôlé par un autre algorithme.

La méthode de Gauss-Seidel peut être exprimée avec un paramètre α connu comme un facteur d'accélération, ainsi :

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha [g(x^{(k)}) - x^{(k)}] \quad (\text{II-2})$$

Noté que si $\alpha=1$ la méthode devient une méthode sans accélération.

Résoudre pour un variable à partir de chaque équation, le système d'équations peuvent être représenté comme les suivants

[illegible]

Premièrement on suppose que la solution initiale est $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$. Maintenant il y a deux façons à de faire :

- 1- **Gausse**: utiliser les valeurs initiales $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ dans les équations pour calculer la première itération $(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ puis répéter le calcul en utilisant la 1^{ère} itération pour trouver la 2^{ème} itération $(x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$. celle-ci est répétée jusqu'à la convergence de la solution.
- 2- Itération de **Gauss-Seidel** utiliser les valeurs initiales $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ seulement dans la 1^{ère} équation pour trouver la nouvelle valeur de $x_1^{(1)}$ maintenant utiliser $(x_1^{(1)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ dans la 2^{ème} équation pour trouver la valeur $x_2^{(1)}$. Maintenant utiliser $(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ dans la 3^{ème} équation pour trouver la valeur $x_3^{(1)}$, et ainsi de suite jusqu'à ce que la série $(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ est trouvée. Celle-ci est répétée jusqu'à la convergence demandée.

On peut utiliser le facteur d'accélération comme suit :

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \alpha(x_{i_{cal}}^{(k+1)} - x_i^{(k)}) \quad (\text{II-5})$$

II-2-2 Méthode de Newton-Raphson :

La méthode la plus largement utilisée pour résoudre les équations algébriques non linéaires est la méthode de Newton-Raphson. Cette méthode est une procédure d'approximation successive basée sur une estimation initiale et utilise la décomposition en série de Taylor. Supposer que la solution de l'équation non linéaire à une seule variable donnée par : $f(x)=c$ Si $x^{(0)}$ est une estimation initiale de la solution, et $\Delta x^{(0)}$ est une petite déviation de la solution correcte, nous avons : $f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)})=c$

La décomposition de la fonction en série de Taylor au voisinage de $x^{(0)}$ donne:

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = f(x^{(0)}) + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^{(0)} (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = c \quad (\text{II-6})$$

Supposons que l'erreur $\Delta x^{(0)}$ est très petit, les termes de grands ordre peuvent être négligés, soit :

$$\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)}) \approx \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} \quad (\text{II-7})$$

$$\text{Donc } \Delta x^{(0)} = \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}}$$

Ajoutons $\Delta x^{(0)}$ à l'estimation initiale, nous trouverons la deuxième approximation

$$\left. \begin{aligned} x^{(1)} &= x^{(0)} + \Delta x^{(0)} = x^{(0)} + \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}} \\ x^{(2)} &= x^{(1)} + \Delta x^{(1)} = x^{(1)} + \frac{\Delta c^{(1)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(1)}} \\ x^{(3)} &= x^{(2)} + \Delta x^{(2)} = x^{(2)} + \frac{\Delta c^{(2)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(2)}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-8})$$

L'utilisation successive de cette procédure donne l'algorithme de Newton-Raphson :

$$\Delta c^{(k)} = c - f(x^{(k)}) \quad (\text{II-9})$$

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}} \quad (\text{II-10})$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (\text{II-11})$$

On peut les réarranger comme suit :

$$\Delta c^{(k)} = J^{(k)} \Delta x^{(k)} \quad (\text{II-12})$$

$$\text{Où } J^{(k)} = \left(\frac{df}{dx} \right)^{(k)} \quad (\text{II-13})$$

Cette relation démontre que l'équation non linéaire $f(x)-c=0$ est approximée par la droite tangente de la courbe à $x^{(k)}$. Alors, une équation linéaire est obtenue dans le terme d'un petit changement de la variable. L'intersection de la droite tangente avec l'axe des abscisses « Ox » donne $x^{(k+1)}$.

Exemple :

Utiliser la méthode de Newton-Raphson pour résoudre l'équation non linéaire

$$f(x) = x^3 - 6x^2 + 9x - 4, \text{ avec une valeur initiale } x^{(0)} = 6$$

La solution analytique par l'algorithme de newton –Raphson donne :

$$\left(\frac{df}{dx} \right) = 3x^2 - 12x + 9$$

$$\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)}) = 0 - [3(6)^2 - 12(6) + 9] = -50$$

$$\left(\frac{df}{dx} \right)^{(0)} = 3(6)^2 - 12(6) + 9 = 45$$

$$\Delta x^{(0)} = \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx} \right)^{(0)}} = \frac{-50}{45} = -1.1111$$

Alors, le résultat à la fin de la 1^{ière} itération est :

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} = 6 - 1.1111 = 4.8889$$

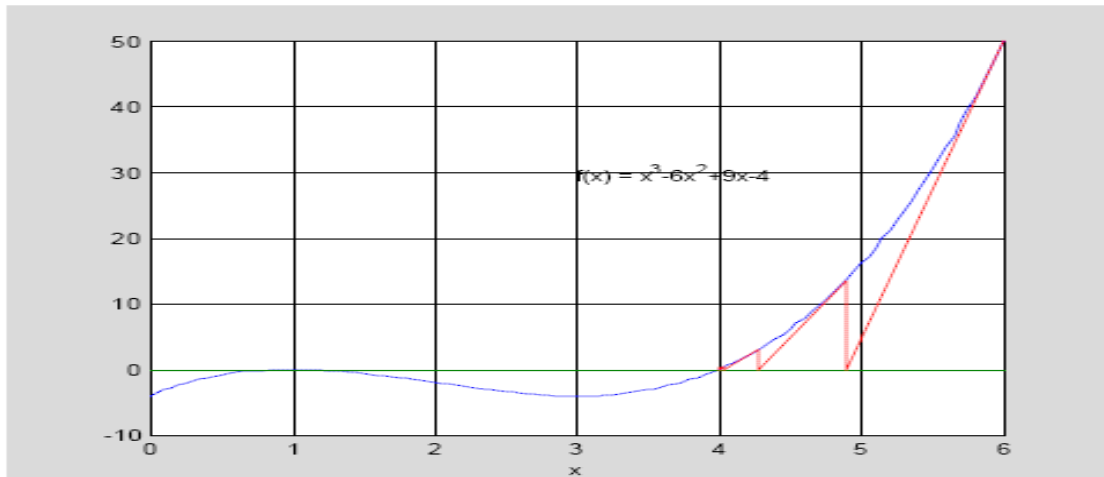
Les autres itérations sont successivement :

$$x^{(2)} = x^{(1)} + \Delta x^{(1)} = 4.8889 - \frac{13.4431}{22.037} = 4.2789$$

$$x^{(3)} = x^{(2)} + \Delta x^{(2)} = 4.2789 - \frac{2.9981}{12.5797} = 4.0405$$

$$x^{(4)} = x^{(3)} + \Delta x^{(3)} = 4.0405 - \frac{0.3748}{9.4914} = 4.0011$$

$$x^{(5)} = x^{(4)} + \Delta x^{(4)} = 4.0011 - \frac{0.0095}{9.0120} = 4.0000$$



Courbe (II-3) : Représentation graphique de la méthode de Gauss-Seidel

Nous observons que la méthode de Newton-Raphson converge rapidement par rapport à la méthode de Gauss-Seidel. Cette méthode peut converger à une autre solution ou diverger si la valeur initiale n'est pas au voisinage de la solution.

Considérons maintenant les « n » équations non linéaires de « n » variables suivantes :

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= c_1 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= c_2 \\ \vdots &\quad \ddots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= c_n \end{aligned} \tag{II-14}$$

Décomposons ces « n » équations en série de Taylor au voisinage de n valeurs initiales et négligeons tous les termes à haute ordre, on trouve :

$$\begin{aligned} &(f_1)^{(0)} + \left(\frac{df_1}{dx_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{df_1}{dx_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots \left(\frac{df_1}{dx_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_1 \\ &(f_2)^{(0)} + \left(\frac{df_2}{dx_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{df_2}{dx_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots \left(\frac{df_2}{dx_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_2 \\ &\dots\dots\dots \\ &(f_n)^{(0)} + \left(\frac{df_n}{dx_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{df_n}{dx_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots \left(\frac{df_n}{dx_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_n \end{aligned} \quad (\text{II-15})$$

Sous form matriciel :

$$\begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(0)} \\ c_2 - (f_2)^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{df_1}{dx_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{df_1}{dx_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{df_1}{dx_n}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{df_2}{dx_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{df_2}{dx_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{df_2}{dx_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{df_n}{dx_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{df_n}{dx_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{df_n}{dx_n}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

Au forme compaque, peut être écrire :

$$\left. \begin{aligned} [\Delta C^{(k)}] &= [J^{(k)}]^{-1} [\Delta X^{(k)}] \\ \text{Ou} \quad [\Delta X^{(k)}] &= [J^{(k)}]^{-1} [\Delta C^{(k)}] \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-17})$$

Et finalement les résultats de l'algorithme de newtn-raphson est :

$$\left[X^{(k+1)} \right] = \left[X^{(k)} \right] + \left[\Delta X^{(k)} \right] \quad (\text{II-18})$$

Avec :

$$[\Delta X^{(k)}] = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{II-19})$$

et

$$[\Delta C^{(k)}] = \begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(k)} \\ c_2 - (f_2)^{(k)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

$$[J^{(k)}] = \begin{bmatrix} \left(\frac{df_1}{dx_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{df_1}{dx_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{df_1}{dx_n}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{df_2}{dx_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{df_2}{dx_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{df_2}{dx_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{df_n}{dx_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{df_n}{dx_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{df_n}{dx_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

$[J^{(x)}]$: Est appelé matrice Jacobian.

Les élément de cette matrice sont les dérivés partieles de $X^{(k)}$. Il est claire que la matrice jacobiane a une inverse à chaque itération.

La méthode de Newton-Raphson, appliqué pour la résolution des équations non linéaires, déménueé la complexité du problème pour le résoudre comme une équations linéaire.

II-3 Applications sur les équations de l'écoulement de puissance :

II-3-1 Méthode itérative de Gauss :

La solution du problème d'écoulement des charges est initialisée en supposant un profil de voltage pour toutes les barres, excepté la référence S pour laquelle la valeur de la tension est spécifiée et demeure constante pendant le processus.

$$I_i = (P_i - jQ_i) / V_i^* \quad (\text{II-22})$$

Comme on est intéressé aux valeurs des tensions, le réarrangement de (3.14) donne N-1 équations de la forme:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left(I_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N Y_{ij} V_j^K \right) \quad i = 2 \dots N \quad (\text{II-23})$$

Pour calculer V_i , on procède comme suit :

V_j : est supposée à partir de l'initialisation

I_i est calculée avec la connaissance P_i et Q_i spécifiée partout dans le système sauf à la barre de référence. Donc, en combinant les deux dernières relations on obtient l'équation itérative pour chaque voltage de barre

$$V_i^{K+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^K)^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N Y_{ij} V_j^K \right) \quad \begin{matrix} i = 1, 2 \dots N \\ i \neq S \end{matrix} \quad (\text{II-24})$$

Dans laquelle k est l'indice d'itération.

Le processus itératif prend fin lorsque l'amélioration de la valeur de V_i entre deux itérations consécutives est plus petite qu'une certaine tolérance ε , soit:

$$|V_i^{K+1} - V_i^K| \leq \varepsilon$$

II-3-2 Méthode itérative de Gauss-Seidel :

L'équation de la tension de barre précédente peut être solutionnée aussi par la méthode de Gauss-Seidel. Dans cette méthode la nouvelle valeur de V_i^{k+1} calculée remplace immédiatement V_i^k et est utilisée dans les équations subséquentes.

$$V_i^{(k+1)} = [(P - jQ) / V_i^{*(k)} - \sum Y_{ij} \cdot V_j^{(k)}] / Y_{ii}$$

Et:

$$\left. \begin{aligned} P_i^{(k+1)} &= \text{Re} \{ V_i^{*(k)} [V_i^{*(k)} Y_{ii} + \sum Y_{ij} \cdot V_j^{(k)}] / \} \\ Q_i^{(k+1)} &= - \text{Im} \{ V_i^{*(k)} [V_i^{*(k)} Y_{ii} + \sum Y_{ij} \cdot V_j^{(k)}] / \} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-25})$$

Pour le système de distribution à trois barres, l'application de ce principe donne:

V_i = spécifiée (barre de référence)

$$\left. \begin{aligned} V_2^{k+1} &= \frac{1}{Y_{22}} \left(\frac{P_2 - jQ_2}{(V_2^K)^*} - Y_{21} V_1 - Y_{23} V_3^K \right) \\ V_3^{K+1} &= \frac{1}{Y_{33}} \left(\frac{P_3 - jQ_3}{(V_3^K)^*} - Y_{31} V_1 - Y_{32} V_2^{K+1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-26})$$

Si on utilise les admittances des branches « y_{ij} » les équations de l'écoulement de puissance deviennent comme suit :

$$V_i^{(k+1)} = [(P - jQ)/V_i^{*(k)} + \sum y_{ij} \cdot V_j^{(k)}] / y_{ij} \quad (\text{II-27})$$

RQ : On prend le signe « - » pour S_i , si le nœud de charge PQ et un signe « + » pour un nœud générateur PV

NB :

- ✓ Pour le nœud PV : P et V sont connues, donc on peut calculer Q avec la relation (II-25)
- ✓ On sait que $|V_i|$ est fixée, donc sauf la partie imaginaire est retenue, et la partie réelle à rechercher tout en vérifiant les relations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} (e_i^{(k+1)})^2 + (f_i^{(k+1)})^2 &= |V_i|^2 \\ e_i^{(k+1)} &= \sqrt{|V_i|^2 - (f_i^{(k+1)})^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-28})$$

Avec $e_i^{(k+1)}$ et $f_i^{(k+1)}$ sont la partie réelle et imaginaire de la tension

$$V_i^{(k+1)} = e_i^{(k+1)} + j \cdot f_i^{(k+1)} \quad (\text{II-29})$$

On peut accélérer la convergence avec l'utiliser d'un facteur d'accélération α

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha (V_{ical}^{(k)} - V_i^{(k)}) \quad (\text{II-30})$$

II-3-3 Méthode itérative de Newton Raphson :

$$I_{ij} = \sum Y_{ij} \cdot V_j \quad (\text{II-31})$$

L'utilisation des coordonnées polaires

$$I_{ij} = \sum |Y_{ij}| \cdot |V_j| \angle (\theta_{ij} + \delta_j) ;$$

$$\text{Avec } Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} \quad \text{et } V_j = |V_j| \angle \delta_j$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad \text{et} \quad P_i - jQ_i = |V_i| \angle (-\delta_i) \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \angle (\theta_{ij} + \delta_j)$$

En séparant les parties réelles et imaginaires

$$P_i = \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II-32})$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{II-33})$$

Application du développement en série Taylor

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ - \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ - & - & - & - & - & - & - \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ - \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (\text{II-34})$$

Forme compactée

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{II-35})$$

Avec

$$\delta_i^{k+1} = \delta_i^k + \Delta\delta_i^k \quad (\text{II-36})$$

$$|V_i^{k+1}| = |V_i^k| + \Delta|V_i^k| \quad (\text{II-37})$$

Conclusion :

L'importance de l'étude de l'écoulement de puissance est capitale pour l'obtention de tous les paramètres du réseau électrique, pour chaque nœud dont ils :

Puissance (Active et Réactive) Tension (Module et Angle), on a choisi la méthode de Newton-Raphson et GAUSS-SEIDEL pour résoudre les équations de l'écoulement de la puissance.

Chapitre III

PROGRAMMATION ET SIMULATION

III-1 Introduction :

La plus part des problèmes scientifiques sont exprimés en termes qu'un ordinateur ne peut accepter directement. Donc il faut trouver une méthode traduisant ces fonctions continues en fonction arithmétiques et en algorithmes, puis on traduit l'algorithme à un langage de programmation acceptable par l'ordinateur.

Dans notre projet on a choisi la méthode de Newton Raphson et Gauss-Seidel traitée par un programme en Matlab pour résoudre le problème de l'écoulement de la puissance dans les réseaux électriques. Ce programme a été appliqué à un système de différents nombres de J.d.B

III-2. Technique de solution :

Le programme de la répartition de charge consiste à intégrer une série de sous- programme dans l'ordinateur pour exécuter les calculs. Il est constitué de plusieurs parties différentes, les principales sont:

1. Lecture des données :

Dans cette partie on crée un fichier des données qui comprend tous les données dépendant du système traité (les données de lignes et de (J.d.B) et l'utilisateur remplit ce fichier à partir du clavier.

2. L'exécution :

Dans cette partie le programme permet de lire les données puis il exécute tous les instructions comme suit :

- Formation de la matrice admittance Y_{bus} .
- Calcul des puissances active et réactive aux J.d.B.
- Formulation de la matrice jacobienne.
- Détermination de l'inverse de la matrice jacobienne.
- Détermination des tensions et leurs phases pour chaque itération.
- Le test de tolérance.

3. L'affichage de résultats :

Les résultats obtenus après l'exécution du programme seront affichés dans un fichier de résultats.

4. Les sous-programmes :

Les sous programmes utilisés sont les suivants :

- DATA: pour remplir les données sous forme des matrices.
- Affichage : pour affiche les résultats dans les tableaux.

III-3 Exemple d'application :

Ce réseau est constitué de 3 lignes de transport, 2 générateurs et 1 charges au niveau des jeux de barres n° 2 Figure (III-1). La puissance et la tension de base sont respectivement, 100 MVA et 230 KV. Les données de ce réseau sont montrées dans la figure (III-1).

Les puissances actives et réactives générées en MW et MVAR respectivement [02].

Le niveau de tension de chaque jeu de barre i en p.u doit obéir à la contrainte suivante

$$0.9 \leq V_i \leq 1.1$$

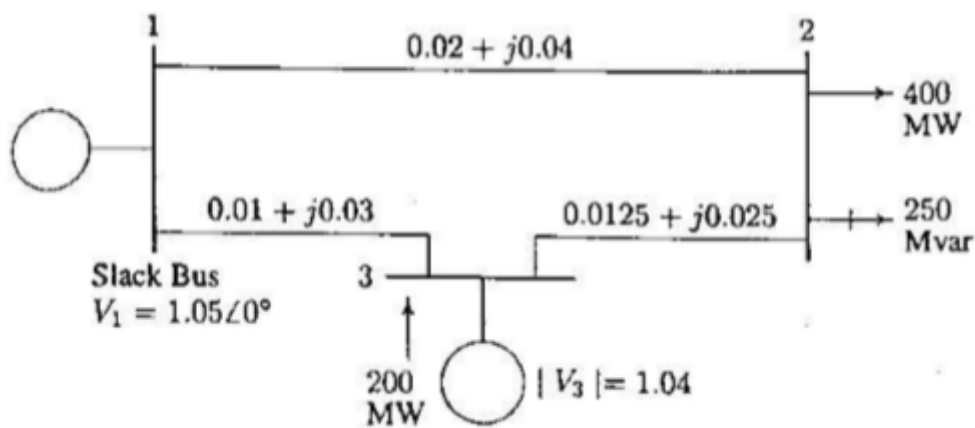


Figure (III.1): Schéma unifilaire du réseau électrique à 3 jeux de barres.

Pour former la matrice d'admittance de réseau il faut convertir les impédances de lignes au admittances

$$Y_{12} = -10+j20 ; \quad , Y_{23} = -16+j32 ; \quad Y_{13} = -10+j30$$

Donc on peut écrire la matrice d'admittance de ce réseau comme suite :

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} 20 - j50 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{pmatrix}$$

III-4 La Méthode de Gauss- Seidel :

Le programme est le suivant :

```
clear;clc
```

```
basemva = 100; accuracy = 0.001; accel = 1.8; maxiter = 100;
```

```
% 03-BUS TEST SYSTEM
```

```
% Bus Bus Voltage Angle ---Load---- ----Generator----- Injected
```

```
% No code Mag. Degree MW Mvar MW Mvar Qmin Qmax Mvar
```

```
busdata=[
```

```
1 1 1.05 0 0 0 0 0 10 0
```

```
2 0 1 0 400 250 0 0 0 0
```

```
3 2 1.04 0 0 0 200 0 0 40 0];
```

```
% -----Line code-----
```

```
% Bus bus R X B = 1 for lines
```

```
% nl nr p.u. p.u. p.u. tr. tap at bus nl
```

```
linedata=[
```

```
1 2 0.02 0.04 0 0
```

```
1 3 0.01 0.03 0 0
```

```
2 3 0.0125 0.025 0 0];
```

```
lfybus % form the bus admittance matrix
```

```
lfgauss % Load flow solution by Gauss-Seidel method
```

```
%lfnwton % Load flow solution by Newton-Raphsen method
```

```
busout % Prints the power flow solution on the screen
```

```
lineflow % Computes and displays the line flow and losses
```

Power Flow Solution by Gauss-Seidel Method

Maximum Power Mismatch = 0.000876473

No. of Iterations = 41

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load----- MW Mvar		---Generation--- MW Mvar		Injected Mvar
1	1.050	0.000	0.000	0.000	218.660	166.840	0.000
2	0.968	-2.647	400.000	250.000	0.000	0.000	0.000
3	1.035	-0.392	0.000	0.000	200.000	120.780	0.000
Total			400.000	250.000	418.660	287.620	0.000

Line Flow and Losses

--Line--		Power at bus & line flow			--Line loss--		Transformer
from	to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	tap
1		218.660	166.840	275.041			
	2	180.659	126.498	220.544	8.823	17.647	
	3	38.069	39.922	55.163	0.276	0.828	
2		-400.000	-250.000	471.699			
	1	-171.836	-108.851	203.411	8.823	17.647	
	3	-228.124	-140.666	268.007	9.573	19.147	
3		200.000	120.780	233.640			
	1	-37.793	-39.094	54.375	0.276	0.828	
	2	237.698	159.812	286.427	9.573	19.147	
Total loss					18.673	37.622	

III-5 La Méthode de Newton-Raphson :

Le programme est le suivant :

```
clear;clc
basemva = 100; accuracy = 0.001; accel = 1.8; maxiter = 100;

% 03-BUS TEST SYSTEM
% Bus Bus Voltage Angle ---Load---- ----Generator----- Injected
% No code Mag. Degree MW Mvar MW Mvar Qmin Qmax Mvar
busdata=[
1 1 1.05 0      0 0 0 0 0 10 0
2 0 1  0 400   250 0 0 0 0 0
3 2 1.04 0 0  0 200 0 0 40 0];
% -----Line code-----
% Bus bus R X B = 1 for lines
% nl nr p.u. p.u. p.u. tr. tap at bus nl
linedata=[
1 2 0.02 0.04 0 0
1 3 0.01 0.03 0 0
2 3 0.0125 0.025 0 0];

lfybus           % form the bus admittance matrix
%lfgauss         % Load flow solution by Gauss-Seidel method
lfnewton         % Load flow solution by Newton-Raphsen method
busout           % Prints the power flow solution on the screen
lineflow         % Computes and displays the line flow and losses
```

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method

Maximum Power Mismatch = 0.000216612

No. of Iterations = 3

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.050	0.000	0.000	0.000	218.403	140.848	0.000
2	0.972	-2.696	400.000	250.000	0.000	0.000	0.000
3	1.030	-0.499	0.000	0.000	200.000	146.161	0.000
Total			400.000	250.000	418.403	287.010	0.000

Line Flow and Losses

--Line--		Power at bus & line flow			--Line loss--		Transformer
from	to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	tap
1		218.403	140.848	259.881			
	2	179.362	118.734	215.101	8.393	16.787	
	3	49.286	53.708	72.895	0.482	1.446	
2		-400.000	-250.000	471.699			
	1	-170.968	-101.947	199.056	8.393	16.787	
	3	-212.304	-117.578	242.688	7.798	15.595	
3		200.000	146.161	247.716			
	1	-48.804	-52.262	71.507	0.482	1.446	
	2	220.101	133.173	257.254	7.798	15.595	
Total loss					16.673	33.828	

Conclusion :

Dans ce chapitre on a appliqué les deux méthodes de Newton-Raphson et Gauss- Seidel pour calculer l'écoulement de puissance dans un réseaux électrique, 3 JdB.

Aissi que le temps de simulation de la méthode de Newton-Raphson est plus rabide que la méthode Gauss- Seidel , mais la méthode de Gauss- Seidel est plus précis.

CONCLUSION GÉNÉRALE

A cause de la convergence quadratique de la méthode de Newton-Raphson, une solution de haute précision peut être obtenue en quelques itérations seulement. Le découplage P de V et Q de δ permet d'accroître ces performances au détriment quelques fois de la stabilité de la méthode par rapport à celle de N-R, mais des approximations (qui ont donné lieu au FDL) viennent consolider cette stabilité. De plus, ces méthodes peuvent facilement être adaptées afin d'inclure les transformateurs de réglage et la production optimale. Ajoutons à cela que le test de convergence basé sur le mismatch (N-R) est plus robuste que celui basé sur les écarts de tension (G-S). Ces caractéristiques font le succès du Fast Decoupled Load Flow et de la méthode de Newton-Raphson.

En outre, les programmes de calcul d'écoulement de puissance que nous avons élaboré tiennent compte des limites de production en puissance réactive, ce qui est plus proche de la réalité physique. Nous avons même prévu dans le programme, pour les réseaux mal conditionnés, la possibilité pour les nœuds PV devenus PQ de revenir PV par la suite s'il n'y a pas de dépassement des limites de production de puissance réactive.

L'environnement MATLAB associé à Windows apporte une grande souplesse d'utilisation dans la simulation de l'écoulement de puissance et permet de changer rapidement les paramètres et la topologie du réseau. De plus, la gestion multitâche permet de revenir à MATLAB ou à une autre application Windows pendant que le calcul d'écoulement de puissance continue à se faire.

A-1 Réseaux électrique à 3 jeux de barres :

Tableau A.1.1 :Données des lignes du réseau électrique à 3 J.d.B

DU J.d.B	Au J.d.B	R(pu)	X(pu)	N°branche
1	2	0.2	0.04	1
1	3	0.1	0.03	2
2	3	0.0125	0.025	3

Tableau A.1.2 :Données des jeux de barres du réseau électrique à 3 J.d.B.

N° J.d.B	V(pu)	θ (dégre)	P _g (MW)	Q _g (MVAR)	P _d (MW)	Q _d (MVAR)
1	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.00	0.00	0.00	0.00	400	250
3	1.04	0.00	200	0.00	0.00	0.00

Le programme principale (en matlab)

La Méthode De Gauss-Seidel

% Power flow solution by Gauss-Seidel method

% Copyright (c) 1998 by H. Saadat

Vm=0; delta=0; yload=0; deltad =0;

nbus = length(busdata(:,1));

for k=1:nbus

n=busdata(k,1);

kb(n)=busdata(k,2); Vm(n)=busdata(k,3); delta(n)=busdata(k, 4);

Pd(n)=busdata(k,5); Qd(n)=busdata(k,6); Pg(n)=busdata(k,7); Qg(n) = busdata(k,8);

Qmin(n)=busdata(k, 9); Qmax(n)=busdata(k, 10);

Qsh(n)=busdata(k, 11);

```

if Vm(n) <= 0 Vm(n) = 1.0; V(n) = 1 + j*0;
else delta(n) = pi/180*delta(n);
V(n) = Vm(n)*(cos(delta(n)) + j*sin(delta(n)));
P(n)=(Pg(n)-Pd(n))/basemva;
Q(n)=(Qg(n)-Qd(n)+ Qsh(n))/basemva;
S(n) = P(n) + j*Q(n);
end
DV(n)=0;
end
num = 0; AcurBus = 0; converge = 1;
Vc = zeros(nbus,1)+j*zeros(nbus,1); Sc = zeros(nbus,1)+j*zeros(nbus,1);
while exist('accel')~=1
    accel = 1.3;
end
while exist('accuracy')~=1
    accuracy = 0.001;
end
while exist('basemva')~=1
    basemva= 100;
end
while exist('maxiter')~=1
    maxiter = 100;
end
iter=0;
maxerror=10;
while maxerror >= accuracy & iter <= maxiter
    iter=iter+1;
    for n = 1:nbus;
        YV = 0+j*0;
        for L = 1:nbr;
            if nl(L) == n, k=nr(L);
            YV = YV + Ybus(n,k)*V(k);

```

```

elseif nr(L) == n, k=nl(L);
YV = YV + Ybus(n,k)*V(k);
end
end
Sc = conj(V(n))*(Ybus(n,n)*V(n) + YV) ;
Sc = conj(Sc);
DP(n) = P(n) - real(Sc);
DQ(n) = Q(n) - imag(Sc);
if kb(n) == 1
S(n) =Sc; P(n) = real(Sc); Q(n) = imag(Sc); DP(n) =0; DQ(n)=0;
Vc(n) = V(n);
elseif kb(n) == 2
Q(n) = imag(Sc); S(n) = P(n) + j*Q(n);

if Qmax(n) ~= 0
Qgc = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
if abs(DQ(n)) <= .005 & iter >= 10 % After 10 iterations
if DV(n) <= 0.045          % the Mvar of generator buses are
if Qgc < Qmin(n),          % tested. If not within limits Vm(n)
Vm(n) = Vm(n) + 0.005;    % is changed in steps of 0.005 pu
DV(n) = DV(n)+.005;       % up to .05 pu in order to bring
elseif Qgc > Qmax(n),      % the generator Mvar within the
Vm(n) = Vm(n) - 0.005;    % specified limits.
DV(n)=DV(n)+.005; end
else, end
else,end
else,end
end
if kb(n) ~= 1
Vc(n) = (conj(S(n))/conj(V(n)) - YV )/ Ybus(n,n);
else, end
if kb(n) == 0

```

```

V(n) = V(n) + accel*(Vc(n)-V(n));
elseif kb(n) == 2
VcI = imag(Vc(n));
VcR = sqrt(Vm(n)^2 - VcI^2);
Vc(n) = VcR + j*VcI;
V(n) = V(n) + accel*(Vc(n) -V(n));
end
end
maxerror=max( max(abs(real(DP))), max(abs(imag(DQ))) );
if iter == maxiter & maxerror > accuracy
fprintf('\nWARNING: Iterative solution did not converged after ' )
fprintf('%g', iter), fprintf(' iterations.\n\n')
fprintf('Press Enter to terminate the iterations and print the results \n')
converge = 0; pause, else, end
end
if converge ~= 1
tech= ( '          ITERATIVE SOLUTION DID NOT CONVERGE'); else,
tech=( '          Power Flow Solution by Gauss-Seidel Method');
end
k=0;
for n = 1:nbus
Vm(n) = abs(V(n)); deltad(n) = angle(V(n))*180/pi;
if kb(n) == 1
S(n)=P(n)+j*Q(n);
Pg(n) = P(n)*basemva + Pd(n);
Qg(n) = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
k=k+1;
Pgg(k)=Pg(n);
elseif kb(n) ==2
k=k+1;
Pgg(k)=Pg(n);
S(n)=P(n)+j*Q(n);

```

```

Qg(n) = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
end
yload(n) = (Pd(n)- j*Qd(n)+j*Qsh(n))/(basemva*Vm(n)^2);
end
Pgt = sum(Pg); Qgt = sum(Qg); Pdt = sum(Pd); Qdt = sum(Qd); Qsht = sum(Qsh);
busdata(:,3)=Vm'; busdata(:,4)=deltad';
%clear AcurBus DP DQ DV L Sc Vc VcI VcR YV converge delta

```

La Methode De Newton-Raphson

```

% Power flow solution by Newton-Raphson method
% Copyright (c) 1998 by H. Saadat
ns=0; ng=0; Vm=0; delta=0; yload=0; deltad=0;
nbus = length(busdata(:,1));
for k=1:nbus
n=busdata(k,1);
kb(n)=busdata(k,2); Vm(n)=busdata(k,3); delta(n)=busdata(k, 4);
Pd(n)=busdata(k,5); Qd(n)=busdata(k,6); Pg(n)=busdata(k,7); Qg(n) = busdata(k,8);
Qmin(n)=busdata(k, 9); Qmax(n)=busdata(k, 10);
Qsh(n)=busdata(k, 11);
if Vm(n) <= 0 Vm(n) = 1.0; V(n) = 1 + j*0;
else delta(n) = pi/180*delta(n);
V(n) = Vm(n)*(cos(delta(n)) + j*sin(delta(n)));
P(n)=(Pg(n)-Pd(n))/basemva;
Q(n)=(Qg(n)-Qd(n)+ Qsh(n))/basemva;
S(n) = P(n) + j*Q(n);
end
end
for k=1:nbus
if kb(k) == 1, ns = ns+1; else, end
if kb(k) == 2 ng = ng+1; else, end
ngs(k) = ng;

```

```

nss(k) = ns;
end
Ym=abs(Ybus); t = angle(Ybus);
m=2*nbus-ng-2*ns;
maxerror = 1; converge=1;
iter = 0;
% Start of iterations
clear A DC J DX
while maxerror >= accuracy & iter <= maxiter % Test for max. power mismatch
for i=1:m
for k=1:m
A(i,k)=0; %Initializing Jacobian matrix
end, end
iter = iter+1;
for n=1:nbus
nn=n-nss(n);
lm=nbus+n-ngs(n)-nss(n)-ns;
J11=0; J22=0; J33=0; J44=0;
for i=1:nbr
if nl(i) == n | nr(i) == n
if nl(i) == n, l = nr(i); end
if nr(i) == n, l = nl(i); end
J11=J11+ Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
J33=J33+ Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
if kb(n)~=1
J22=J22+ Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
J44=J44+ Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
else, end
if kb(n) ~= 1 & kb(l) ~=1
lk = nbus+l-ngs(l)-nss(l)-ns;
ll = l -nss(l);
% off diagonalelements of J1

```

```

A(nn, ll) = -Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
if kb(l) == 0 % off diagonal elements of J2
A(nn, lk) = Vm(n)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)- delta(n) + delta(l));end
if kb(n) == 0 % off diagonal elements of J3
A(lm, ll) = -Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)- delta(n)+delta(l)); end
if kb(n) == 0 & kb(l) == 0 % off diagonal elements of J4
A(lm, lk) = -Vm(n)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)- delta(n) + delta(l));end
else end
else , end
end
Pk = Vm(n)^2*Ym(n,n)*cos(t(n,n))+J33;
Qk = -Vm(n)^2*Ym(n,n)*sin(t(n,n))-J11;
if kb(n) == 1 P(n)=Pk; Q(n) = Qk; end % Swing bus P
if kb(n) == 2 Q(n)=Qk;
if Qmax(n) ~= 0
Qgc = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
if iter <= 7 % Between the 2th & 6th iterations
if iter > 2 % the Mvar of generator buses are
if Qgc < Qmin(n), % tested. If not within limits Vm(n)
Vm(n) = Vm(n) + 0.01; % is changed in steps of 0.01 pu to
elseif Qgc > Qmax(n), % bring the generator Mvar within
Vm(n) = Vm(n) - 0.01;end % the specified limits.
else, end
else,end
else,end
end
if kb(n) ~= 1
A(nn,nn) = J11; %diagonal elements of J1
DC(nn) = P(n)-Pk;
end
if kb(n) == 0
A(nn,lm) = 2*Vm(n)*Ym(n,n)*cos(t(n,n))+J22; %diagonal elements of J2

```

```

A(lm,nn)= J33;      %diagonal elements of J3
A(lm,lm) =-2*Vm(n)*Ym(n,n)*sin(t(n,n))-J44; %diagonal of elements of J4
DC(lm) = Q(n)-Qk;
end
end
DX=A\DC';
for n=1:nbus
nn=n-nss(n);
lm=nbus+n-ngs(n)-nss(n)-ns;
if kb(n) ~= 1
delta(n) = delta(n)+DX(nn); end
if kb(n) == 0
Vm(n)=Vm(n)+DX(lm); end
end
maxerror=max(abs(DC));
if iter == maxiter & maxerror > accuracy
fprintf('\nWARNING: Iterative solution did not converged after ')
fprintf('%g', iter), fprintf(' iterations.\n\n')
fprintf('Press Enter to terminate the iterations and print the results \n')
converge = 0; pause, else, end
end
if converge ~= 1
tech= ( ' ITERATIVE SOLUTION DID NOT CONVERGE'); else,
tech=(' Power Flow Solution by Newton-Raphson Method');
end
V = Vm.*cos(delta)+j*Vm.*sin(delta);
deltad=180/pi*delta;
i=sqrt(-1);
k=0;
for n = 1:nbus
if kb(n) == 1
k=k+1;

```

```

S(n)= P(n)+j*Q(n);
Pg(n) = P(n)*basemva + Pd(n);
Qg(n) = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
Pgg(k)=Pg(n);
Qgg(k)=Qg(n);    %june 97
elseif kb(n) ==2
k=k+1;
S(n)=P(n)+j*Q(n);
Qg(n) = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
Pgg(k)=Pg(n);
Qgg(k)=Qg(n);    % June 1997
end
yload(n) = (Pd(n)- j*Qd(n)+j*Qsh(n))/(basemva*Vm(n)^2);
end
busdata(:,3)=Vm'; busdata(:,4)=deltad';
Pgt = sum(Pg); Qgt = sum(Qg); Pdt = sum(Pd); Qdt = sum(Qd); Qsht = sum(Qsh);

%clear A DC DX J11 J22 J33 J44 Qk delta lk ll lm
%clear A DC DX J11 J22 J33 Qk delta lk ll lm

```

BIBLIOGRAPHIE

[01]: Z. F. Fethi et G. Abdelmalek et D. Mohammed ,«L'application de la Méthode Newton-Raphson à L'écoulement de Puissance Dans Le Système Electrique». Mémoire de fin d'étude université EL-OUDE promotion (2007) .

[02]: Gacem Abdelmalek ((Utilisation des Méthodes d'Optimisations Méta heuristiques Pour La Résolution Du Problème De Répartition Optimale De La Puissance Dans les Réseaux Electriques)) mémoire présenté pour obtenir le diplôme de magister en électrotechnique (2010).

[03]: Mémoire « la répartition optimale de la puissance réactive pour le contrôle de tension de barre d'un réseaux électrique par simplex Lp » Ahmed Diarra, université du Québec 1984.

[04] Computer methods in power system analysis (chapter 08), ALLEN W.stagg, Ahmed ELAbier, International Student Edition.

[05] Mnsouri Dris. Gummoudi Mohammed, Ferhat Abdel Hamid. «Calcule d'écoulement de puissance par la méthode GAUSS-SEIDEL» , Mémoire de fin d'étude Université de Biskra (promotion 1996).

[06] Oussama Mammeri. << différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans une noeud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie >>. Mémoire de Magister Université de Batna (promotion 2012).

[07] Hadi Saadat. << power System Analysis >>.