REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Électrotechnique et Automatique

Réf:……………/**2024**

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Par : - SELLAOUI Billal
- LEGRINI Aida

Thème

Répartition de puissances dans un réseau électrique.

Soutenu publiquement, le 23/06/2024, devant le jury composé de :

Mr. BOUDEFEL Amar	**MCA**	**Univ. Guelma**	**Président/ Encadreur**
Mr. LADJIMI Abdelaziz	**Professeur**	**Univ. Guelma**	**Examinateur**
Mr. BELOUCIF Faissel	**MCA**	**Univ. Guelma**	**Examinateur**

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Nous remercions énormément tous ceux qui ont contribué à la réussite de notre travail. Nous mettons l'accent sur notre encadreur : Dr. BOUDEFEL Amar

En ce qui concerne la méthodologie, nous visons Pr. LADJIMI Abdelaziz. En rédaction, nous n'oublions jamais Dr. BELOUCIF Faissel. Recevez messieurs, nos remerciements les plus chaleureux ! Que dieu vous bénisse abondamment.

Dédicaces

Avant tout je remercie le bon dieu de m'avoir donnée le courage,

la volonté , la patience et la santé durant toutes ces années d'étude

et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé .

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes chers parents

Toute ma grande famille.

Mes amis intimes et mes collèges

A tout le personnel du département de Génie Électrique de

l'université de Guelma

et à tous mes professeurs.

Bilel

Dédicaces

Avant tout je remercie le bon dieu de m'avoir donnée le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé .

Je dédie ce modeste travail à :

Ma défunt mère le symbole de courage et de sacrifice,

Mon chère papa et mon chère frère "Fares" , mes sœurs "Nawel" " wafa"

Et mon marie" Houssem"

Mes amis intimes et mes collèges

A tout le personnel du département de Génie Électrique

de l'université de Guelma

et à tous mes professeurs

Aida

ملخص

يعد تحليل توزيع الطاقة في شبكة كهربائية مكونة من عدد معين من المولدات وخطوط النقل والأحمال أمرًا مهمًا جدًا لدراسات وتخطيط وتشغيل الشبكة الكهربائية. وهذا يجعل من الممكن معرفة ظروف الإنتاج والتحميل ومستويات الجهد للشبكة. تُعرف الحسابات للحصول على هذه المعلومات باسم تدفق الإستطاعات.

الهدف الرئيسي لحساب تدفق الإستطاعات هو تحديد ظروف تشغيل الحالة المستقرة لنظام الطاقة من حيث طويلة الجهد وزوايا الطور عند كل عقدة. بمجرد معرفة الجهود، يمكن حساب الكميات الأخرى، مثل تدفق الإستطاعات الفعالة والغير فعالة (الردية) عبر الفروع (خطوط النقل والمحولات)، والإستطاعات الغير فعالة (الردية) المتولدة في عقد الإنتاج، وكمية فقد الإستطاعات الفعالة والغير فعالة في الخطوط.

نقدم في هذا العمل طرق حساب وتحليل تدفق الإستطاعات في الشبكات الكهربائية وهي الطرق التكرارية لنيوتن-رافسون، غاوس-سايدل والفصل السريع. وتتميز الطرق بشكل أساسي بمعدل التقارب ومتطلبات التخزين وزمن الحساب، ولهذا وجدنا أن طريقة نيوتن-رافسون هي الطريقة الأفضل.

الكلمات المفتاحية: تدفق القدرة، طريقة نيوتن-رافسون، طريقة غاوس-سايدل، طريقة الفصل السريع، مصفوفة الممانعة.

Abstract

The analysis of power distribution in an electrical network composed of a certain number of generators, transmission lines and loads are very important for the studies, planning and operation of an electrical network. This makes it possible to know the production and load conditions and the voltage levels of the network. The calculations to obtain this information are known as power flow (PF).

The main objective of PF calculation is to determine the steady-state operating conditions of the power system in terms of voltage amplitudes and phase angles at each node. Once the voltages are known, other quantities can be calculated, such as the active and reactive power flows through the branches (transmission lines and transformers), the reactive powers generated at the production nodes, the active power losses and reactive in the lines.

In this work we present the methods of calculation and analysis of PF in electrical networks which are the iterative methods of Newton-Raphson, Gauss-Seidel and Fast Decoupled. The methods are essentially distinguished by the convergence rate, storage requirements and calculation time, for this, we found that the Newton-Raphson method is the best method.

Keywords: power flow, Newton-Raphson method, Gauss-Seidel method, Rapid Decoupled method, admittance matrix.

Résumé

L’analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique composé d’un certains nombres de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification et l’exploitation d’un réseau électrique. Cela permet de connaître les conditions de production, de charge et les niveaux de tensions du réseau. Les calculs permettant d’obtenir ces informations sont connus sous le nom de l’écoulement des puissances (EP).

L'objectif principal du calcul de l’EP est de déterminer les conditions de fonctionnement du système électrique en régime permanent en termes d’amplitudes de tension et d'angles de phase à chaque nœud. Une fois les tensions connues, d'autres quantités peuvent être calculées, telles que les flux des puissances active et réactive à travers les branches (lignes de transmission et transformateurs), les puissances réactives générées aux nœuds de production, les pertes de puissance actives et réactives dans les lignes.

Dans ce travail nous présentons les méthodes de calcul et d’analyse de l’EP dans les réseaux électriques qui sont les méthodes itératives de Newton-Raphson, Gauss-Seidel et Découplée rapide. Les méthodes se distinguent essentiellement par le taux de convergence, les besoins de stockage et le temps de calcul, pour cela, nous avons trouvé que la méthode de Newton-Raphson est la meilleure méthode.

Mots clefs : écoulement des puissances, méthode de Newton-Raphson, méthode de Gauss-Seidel, méthode de Découplée rapide, matrice d’admittance.

Sommaire

Introduction Générale

Introduction générale

La répartition des charges (puissances) est l'un des principaux problèmes qui se pose aux gestionnaires des systèmes électro-énergétiques. Les centrales de production de l'énergie électrique alimentent un ensemble de consommateurs par l'intermédiaire d'un réseau de transport maillé, on doit déterminer la répartition des puissances fournies par ces centrales à un instant donné tout en respectant un ensemble de contraintes techniques et économiques.

L'analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique composé d'un certains nombres de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique. Cela permet de connaître les conditions de production, de charge et les niveaux de tensions du réseau. Les calculs permettant d'obtenir ces informations sont connus sous le nom (écoulement des puissances ou Load Flow ou encore Power Flow).

Le problème de l'écoulement de puissance (EP) peut être formulé mathématiquement comme un ensemble d'équations algébriques non linéaires. L'objectif principal du calcul de l'EP est de déterminer les conditions de fonctionnement du système électrique en régime permanent en termes d'amplitudes de tension et d'angles de phase à chaque noeud. Une fois les tensions connues, d'autres quantités peuvent être calculées, telles que les flux des puissances active et réactive à travers les branches (lignes de transmission et transformateurs), les puissances réactives générées aux noeuds de production, les pertes de puissance actives et réactives dans les lignes, et ainsi de suite [1].

Le mode d'étude de l'écoulement des puissances est passé de la simulation analogique à la simulation numérique. Un grand nombre d'algorithmes sont développés pour les solutions numériques de répartition de puissance. Les méthodes se distinguent essentiellement par le taux de convergence, les besoins de stockage et le temps de calcul. Les charges sont généralement représentées par une puissance constante.

Habituellement, le problème de l'écoulement de puissance est résolu par les méthodes itératives de Newton-Raphson, Gauss-Seidel ou par la méthode de Découplée rapide. En général, l'état de fonctionnement d'un système est obtenu après quelques itérations, quel que soit la méthode utilisée.

Les études de l’écoulement des puissances sont essentielles pour planifier le développement futur du système : lorsque de nouvelles charges ou de nouvelles lignes de transport sont ajoutées ou installées, nous pouvons découvrir l'effet de ces ajouts sur le réseau et trouver la condition de fonctionnement appropriée.

Notre mémoire est structurée en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons les différents modèles des éléments d’un réseau électrique (générateur, transformateur, ligne et charge), la détermination de la matrice d’admittance d’un réseau électrique qui est la partie principale du calcul d’un réseau électrique, on termine ce chapitre par présentation de la forme générale de l’équation de l’écoulement de puissance dans les réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre, on va présenter les différentes méthodes itératives de calcul de l’écoulement des puissances dans les réseaux électriques.

Le dernier chapitre, est une application sur un réseau électrique de transport à 26 jeux de barres et plusieurs sources de production.

Nous clôturons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

Analyse de l’écoulement de puissance dans un réseau électrique

Chapitre I

Analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

I.1. Introduction

La formulation mathématique du problème de l'écoulement de puissance aboutit à un système d'équations non linéaires, ces équations sont écrites en termes de matrice d'admittance des jeux de barres (bus). Les études de l'écoulement de puissance sont essentielles pour planifier le développement futur du système : lorsque de nouvelles charges ou de nouvelles lignes de transport sont ajoutées ou installées, nous pouvons détecter l'effet de ces ajouts sur le réseau et trouver une condition de fonctionnement appropriée.

Le but de l'étude est de calculer les conditions de fonctionnement en régime permanent, telles que les amplitudes des tensions et les angles de phase au niveau des bus d'un système particulier. Par conséquent, avec ces valeurs, d'autres grandeurs telles que les puissances des lignes, les puissances active et réactive fourni par les générateurs peuvent être calculées. Outre ces quantités, nous pouvons également trouver les conditions de surcharge, les tensions faibles dans toutes les parties du système et des problèmes de tension qui peuvent être résolus en introduisant des dispositifs tels que des condensateurs, des réacteurs et des compensateurs statiques VAR. [1]

I.2. Modélisation des éléments du réseau

Un réseau électrique se compose de plusieurs éléments : générateurs, transformateurs, lignes, charges et les moyens de compensations, dans ce qui suit on va donner la représentation de chaque élément dans le système électrique.

I.2.1 Modélisation des générateurs

Les générateurs sont les éléments du réseau, leur rôle principal est de fournir de la puissance active au système électrique. Ils peuvent aussi produire ou consommer de la puissance réactive de manière à maintenir un certain niveau de tension. Les limites de production des générateurs sont définies par :

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad \text{(I.1)}$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \text{(I. 2)}$$

Avec :

P_{Gi}^{min} et P_{Gi}^{max} : puissances active générées maximale et minimale au nœud i.

Q_{Gi}^{min} et Q_{Gi}^{max} : puissances réactive générées maximale et minimale au nœud i.

P_{Gi} et Q_{Gi} : puissances active et réactive générées au nœud i.

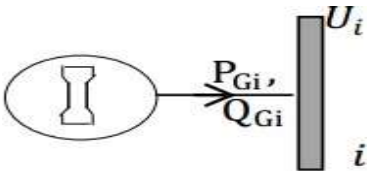


Figure I.1: Modèle d'un Générateur.

I.2.2 Modélisation des charges

Les charges sont modélisées par des puissances constantes indépendantes de la tension du nœud.

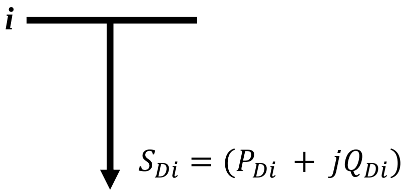


Figure I.2 : Modèle d'une charge

$$S_{Di} = (P_{Di} + jQ_{Di}) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \text{(I. 3)}$$

Avec :

S_{Di} : Puissance apparente complexe de la charge ;

P_{Di} : Puissance active ;

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

I.2.3 Modélisation des éléments shunts

Les dispositifs shunt sont généralement utilisés pour la compensation de la puissance réactive et le maintien de la tension, sont modélisés par des admittances y_i de la forme :

$$y_i = g_i + jb_i \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \text{(I.4)}$$

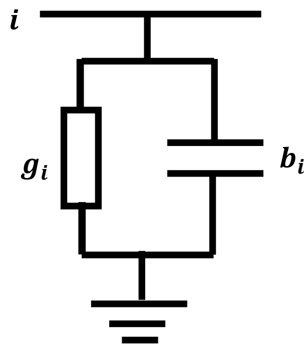


Figure I.3 : Modèle d'élément shunt

I.2.4. Modélisation des transformateurs

Un transformateur d'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.

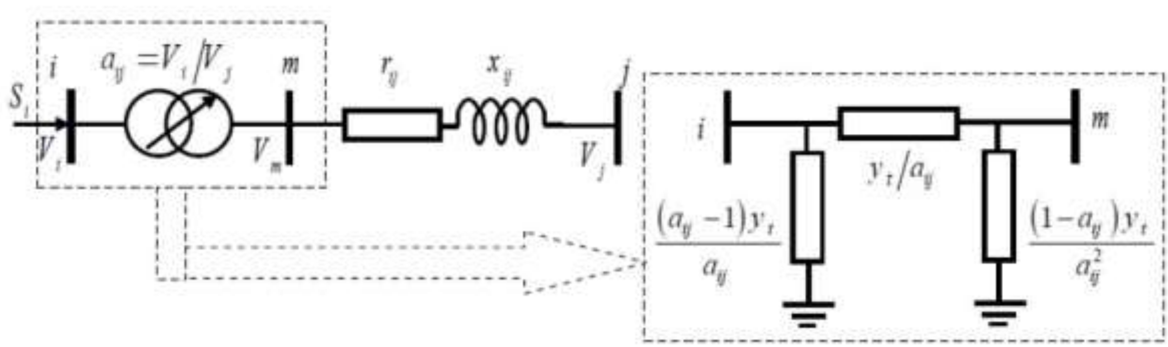


Figure I.4 : Représentation des transformateurs. [3]

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

$$Y = \begin{pmatrix} \frac{1}{a^2} y_{ij} & -\frac{1}{a} y_{ij} \\ -\frac{1}{a} y_{ij} & y_{ij} \end{pmatrix} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(I.5)}$$

Avec :

$'a'$: le rapport de transformation.

$'y_{ij}'$: l'admitance de la branche i-j.

Dans certains cas, la branche magnétisante est prise en compte dans le modèle. Elle se présente alors sous la forme d'une susceptance inductive shunt.

I.3 Classification des jeux de barres (JB)

Généralement, quatre grandeurs sont associées à un JB particulier. Il s'agit de l'amplitude de tension $|V|$, de l'angle de phase de la puissance active injectée P ; puissance réactive injectée Q.

La puissance active injectée P sur un JB particulier peut généralement être représentée par

$(P_G - P_D)$. Avec P_G est la puissance active générée par le générateur sur le JB particulier et P_D est la puissance active utilisée par les charges sur le JB.

De même, Q est représenté par $(Q_G - Q_D)$ où Q_G est la puissance réactive générée par le générateur sur le JB particulier et Q_D est la puissance réactive utilisée par la charge sur le JB.

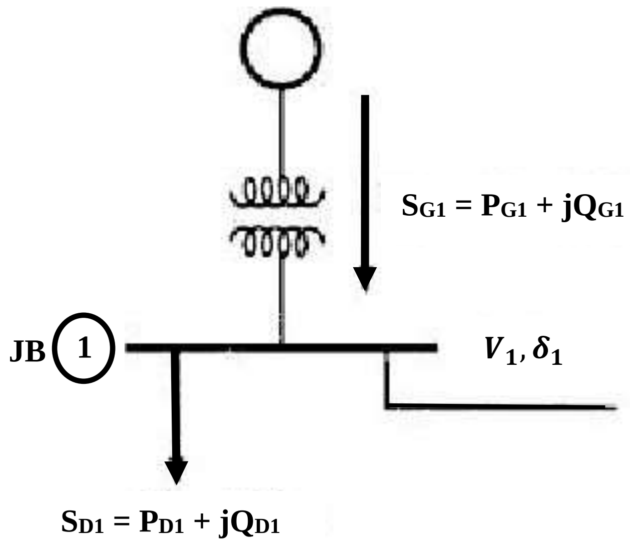


Figure I.5 : Données d'un JB [1]

Donc les puissances du JB 1 seront :

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1}$$

$$= (P_{G1} + jQ_{G1}) - (P_{D1} + jQ_{D1}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (I.6)$$

$$=(P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (I.7)$$

Ainsi, les JB peuvent être classés comme suit :

1) JB de référence (Slack bus) :

Il est également connu sous le nom de **JB balancier** ou **JB de référence**. En général, un JB est considéré comme un JB de référence pour l'ensemble du réseau sur lequel le flux des puissances est effectué. Les grandeurs habituelles spécifiées pour le JB balancier sont l'amplitude de la tension et l'angle de phase de la tension.

2) **JB P-V :** Il est également appelé **JB générateur** ou **JB P-V**.
Un JB P-V est un JB dans lequel l'injection de puissance active (P) et l'amplitude de tension (V) sont spécifiées.

3) **JB de charge ou JB P-Q :**

Un JB P-Q est un JB dans lequel la puissance totale injectée (puissance active P et réactive Q) spécifiée. Les valeurs inconnues sont le module de la tension V et l'angle de phase de la tension.

Les paramètres connus et inconnues pour chaque type de JB sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Classification des JB [1]

Type de JB	**Pch**	**Qch**	**P_G**	**Q_G**	**$\lvert V \rvert$**	**Angle de phase de la tension**
JB de référence	✓	✓	?	?	✓	✓
JB de charge	✓	✓	---	---	?	?
JB P-V	✓	✓	✓	?	✓	?

I.4 Matrice admittance des JB

On représente l'impédance de la ligne par :

$$z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots.. (\mathrm{I}.8)$$

"r" est la résistance ;

"x" est la réactance ;

"i, j" numéros des JB.

"ij" liaison entre les JB i et j.

$$y_{ij} = y_{ji} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = g_{ij} + jb_{ij} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots.. (\mathrm{I}.9)$$

Où : y_{ij} est l'admittance entre les nœuds ou les JB i et j.

$'g'$ est la conductance ;

$'b'$ est la susceptance ;

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = -\left(y_{ij}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots. (\mathrm{I}.10)$$

Les éléments $(i - j)$ de Y_{ij} sont la somme négative des admittances connectées entre les JB i et j, Y_{ij} est appelée admittance mutuelle ou de transfert.

Aussi, on a :

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} y_{ij} \dots\dots\dots\dots\dots\dots.. \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\mathrm{I}.11)$$

Avec $'n'$ est le nombre des JB.

Les éléments $(i - i)$ de Y_{ii} sont la somme de toutes les admittances connectées au JB i, Y_{ii} est appelée admittance propre.

$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ (est la représentation rectangulaire ou complexe de l'admittance).

$Y_{ij} = Y_{ij}\angle\phi_{ij}$ (est la forme polaire de l'admittance).

Exemple

Prenons l'exemple d'un système à 4 JB de la figure ci-dessous :

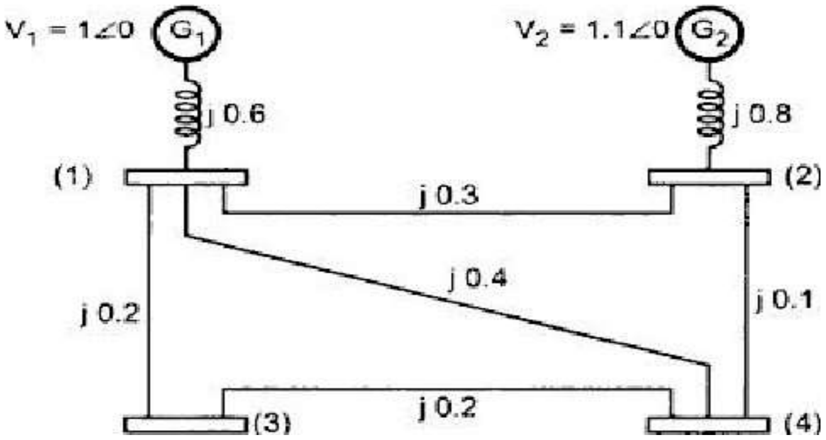


Figure I.6 : Réseau à 4 JB [1]

Le réseau peut être représenté par les admittances et les courants de sources comme le montre la figure ci-dessous :

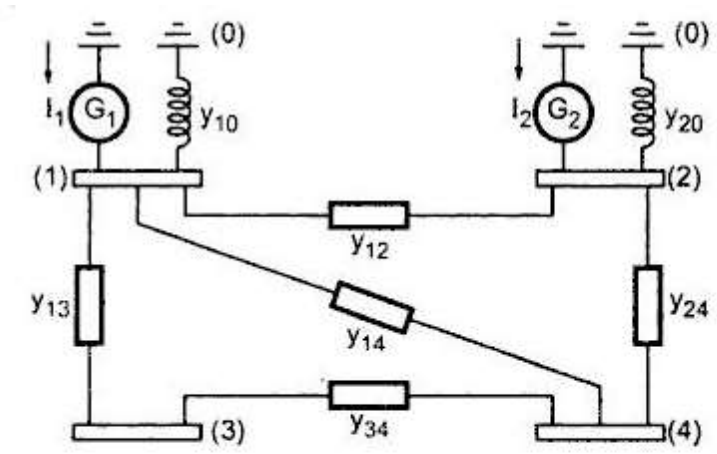


Figure I.7 : Représentation des admittances du réseau.

Le système d'équation de ce réseau sera :

Noeud 1 $\quad I_1 = y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3) + y_{14}(V_1 - V_4)$

Noeud 2 $\quad I_2 = y_{20}V_2 + y_{21}(V_2 - V_1) + y_{24}(V_2 - V_4)$

Noeud 3 $\quad 0 = y_{31}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4)$

Noeud 4 $\quad 0 = y_{41}(V_4 - V_1) + y_{42}(V_4 - V_2) + y_{43}(V_4 - V_3)$

Ce qui donne

$$\left.\begin{array}{l} I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13} + y_{14})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3 - y_{14}V_4 \\ I_2 = -y_{21}V_1 + (y_{20} + y_{21} + y_{24})V_2 - y_{24}V_4 \\ 0 = -y_{31}V_1 + (y_{31} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4 \\ 0 = -y_{41}V_1 - y_{42}V_2 - y_{43}V_3 + (y_{41} + y_{42} + y_{43})V_4 \end{array}\right\} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (\text{I}.12)$$

En général, le système d'équation sera formé comme suit :

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4$$

$$I_3 = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4$$

$$I_4 = Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4$$

La matrice d'admittance des JB est obtenue à partir des équations de tension des nœuds.

En général pour un système de n JB, on peut écrire le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\text{I}.13)$$

Ou sous la forme :

$$I_{bus} = Y_{bus}V_{bus} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\text{I}.14)$$

I.5. Forme générale de l'équation de l'écoulement de puissance

Le courant au JB $'i'$ peut être déterminé par l'expression suivante :

$$I_i = V_i \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}V_j \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\text{I}.15)$$

La puissance complexe injectée à un JB $'i'$ est donnée par l'expression suivante :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \qquad (en\, p.u.) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\text{I}.16)$$

Ce qui donne :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\text{I}.17)$$

Alors :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n} y_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} y_{ij} V_j \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots (\mathrm{I}.18)$$

Ce qui donne enfin :

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left[V_i \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n} y_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} y_{ij} V_j \right] \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots (\mathrm{I}.19)$$

C'est la forme générale de l'équation de l'écoulement de puissance.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les modèles des différents éléments d'un réseau électrique (générateur, transformateur, ligne et charge), ensuite on a vu comment on détermine la matrice d'admittance d'un réseau électrique qui est la partie principale du calcul d'un réseau électrique, on a terminé ce chapitre par la présentation de la forme générale de l'équation de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques.

CHAPITRE 2

Méthodes Itératives de calcul de l'écoulement de puissance

Chapitre II

Méthodes Itératives de calcul de l'écoulement de puissance

II.1Introduction

Le problème de l'écoulement de puissance peut-être résolut par des méthodes itératives appliquées à un système d'équation algébrique non linéaire de grande dimension.

En général il y a trois méthodes qui sont les plus utilisées dans le domaine de l'écoulement de puissance, ces méthodes sont la méthode de Gauss-Seidel, de Newton Raphson et la méthode de l'écoulement de puissance découplée.

Pour le calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques, le choix de la méthode va influencer sur :

- la convergence (risque ne pas obtenir de la solution) ;
- rapidité d'obtenir des résultats ;
- la précision des résultats ;
- la facilité d'écriture du programme.

La rapidité de convergence dans ces méthodes est la plus essentiel, l'utilisation de ces méthodes dans le contrôle automatique des systèmes d'énergie nécessitant l'obtention très rapide des solutions de la répartition des puissances.

II.2 Méthode de Gauss-Seidel

La méthode itérative de Gauss-Seidel est la plus simple des méthodes itératives utilisées dans l'écoulement de puissance.

Elle est facile à programmer notamment dans le cas du petit système électro-énergétique, ou la simplicité du programme est la plus importante que les couts de calculs. Elle est aussi utilisée dans de large système pour obtenir les points de solutions initiales, qui seront utilisés dans la méthode de Newton-Raphson par exemple.

II.2.1 Méthode de Gauss-Seidel en utilisant la matrice admittance

De l'équation (I.18), on a :

$$\frac{P_i - jQ_i}{\widehat{V_i}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}V_j = V_i \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}$$

Ce qui donne :

$$V_i = \frac{\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}V_j}{\sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\text{II}.1)$$

Puisque les équations de l'écoulement de puissance sont non linéaires, nous pouvons résoudre avec la méthode de Gauss-Seidel en utilisant la séquence itérative suivante :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}V_j^{(k)}}{\sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\text{II}.2)$$

De l'équation (I.19), on peut déterminer :

$$P_i^{(k+1)} = Real \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}V_j^{(k+1)} \right] \right\} \dots\dots\dots\dots (\text{II}.3)$$

Et :

$$Q_i^{(k+1)} = -Imaginary \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}V_j^{(k+1)} \right] \right\} \dots\dots\dots\dots (\text{II}.4)$$

II.2.2 Puissances et pertes de puissances dans les lignes

A partir du schéma équivalent en π des lignes ci-dessous :

Figure II.1 Schéma équivalent en π des lignes [1]

Le courant du JB i vers le JB j est donné par :

$$I_{ij} = y_{ij}\left(V_i - V_j\right) + y_{i0}V_i \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots. (\text{II}.5)$$

Aussi on a :

$$I_{ji} = y_{ij}\left(V_j - V_i\right) + y_{j0}V_j \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots. (\text{II}.6)$$

La puissance du JB i vers le JB j est donnée par :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^*$$

Et

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^*$$

Les pertes de puissances dans la ligne (i – j) sont exprimées par :

$$\Delta S_{ij} = S_{ij} + S_{ji} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots. (\text{II}.7)$$

Ainsi, nous pouvons trouver la solution pour l'analyse de l’écoulement de puissance en utilisant la méthode Gauss-Seidel. Mais le taux de convergence est très lent et peut être amélioré en utilisant un facteur appelé facteur d’accélération α. En utilisant ce facteur d'accélération, l'itération de la solution de tension peut être réduite de :

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha\left(V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots.. (\text{II}.8)$$

La valeur du facteur d'accélération est empirique et dépend de la taille du système et se situe généralement entre 1,4 et 1,7.

II.2.3 Algorithme de la méthode de Gauss-Seidel

Etape 1 : lire les données du système, la matrice admittance et les estimations des tensions des jeux de barres.

Etape 2 : on initialise le compteur du nombre d'itération à l'unité.

Etape 3 : on résoudre l'équation de la tension pour le JB i.

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\dfrac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij} V_j^{(k)}}{\sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}} \quad pour\ i = 1, 2, \ldots.., n; et\ i \neq nref$$

Etape 4 : calculer la variation de la tension du jeu de barre i :

$\Delta V_i^{(k)} = V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}$

Et on fait le test suivant :

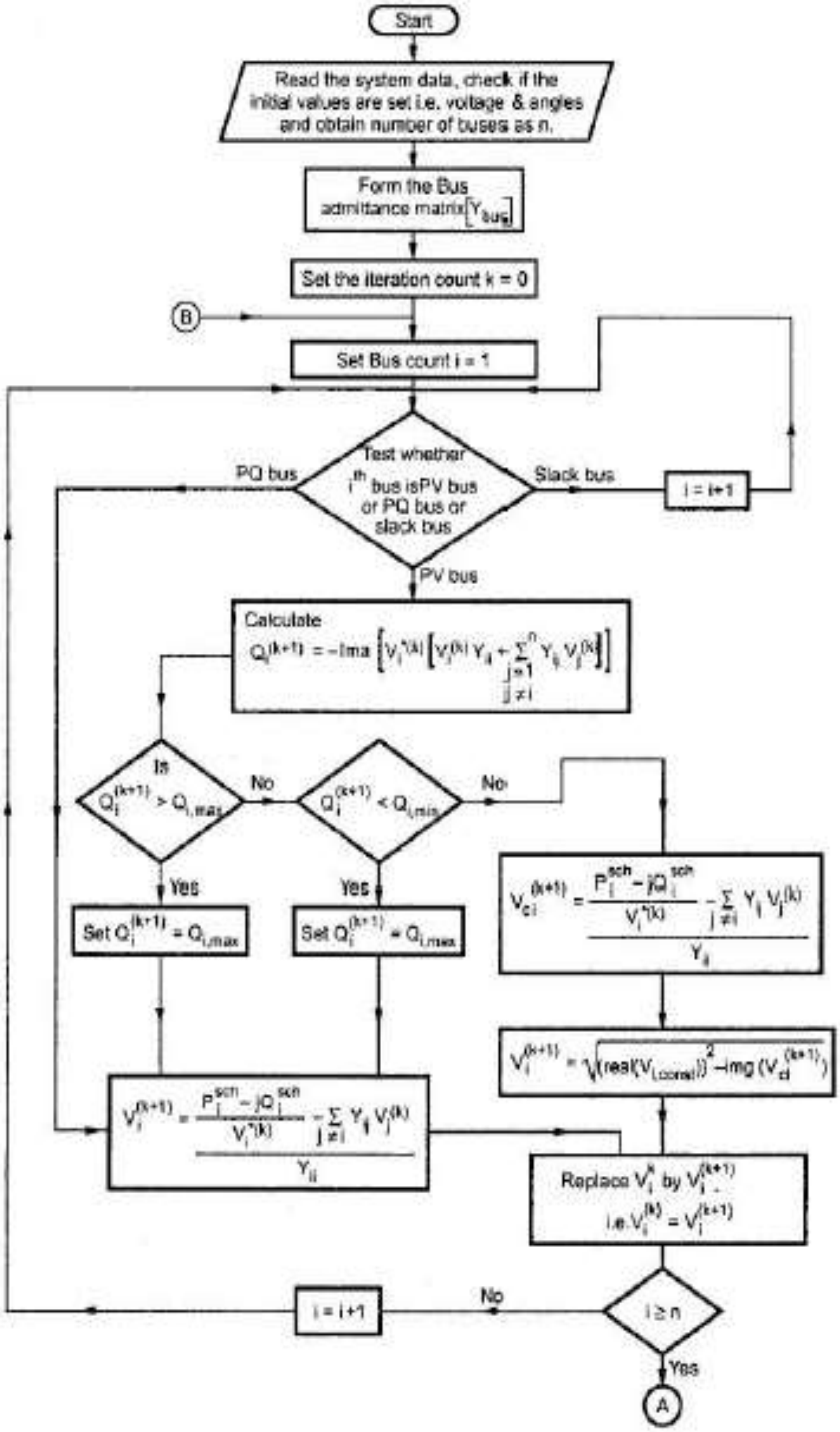
Si max ($\left|\Delta V_i^{(k)}\right|$) $\leq \varepsilon$, on va vers étape 6

Si non on va vers étape 5

Etape 5 : on remplace $V_i^{(k)}$ par $V_i^{(k+1)}$, on ajoute au compteur d'itération un 1 (k=k+1) et on va vers étape 4

Etape 6 : les valeurs des tensions sont déjà calculées, donc on calcul la puissance du JB de référence et les autres calculs nécessaires.

II.2.4. Organigramme de Gauss-Seidel utilisant la matrice admittance



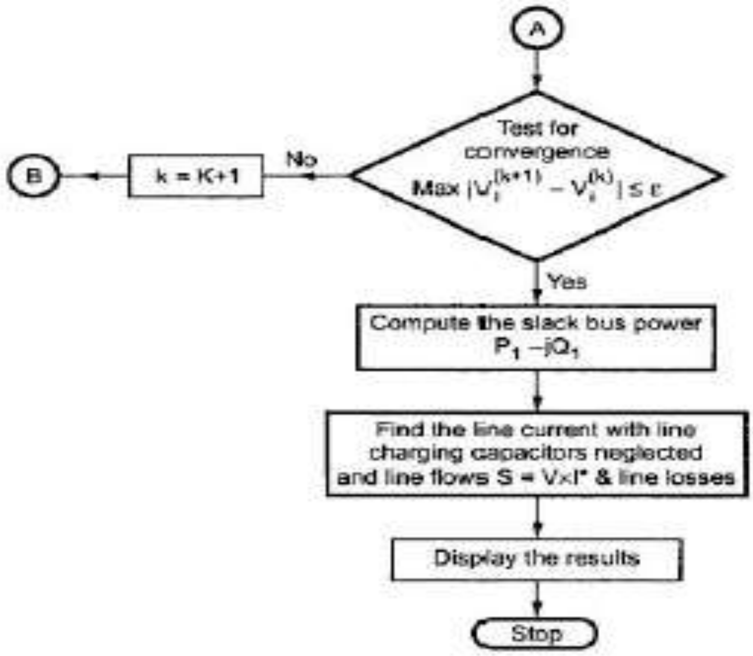


Figure II.2 Organigramme de la méthode de Gauss-Seidel [1]

II.3 Méthode de Newton-Raphson

II.3.1 Principe

a) Dans le cas d'un scalaire

Si une fonction $f(x)$ est continument dérivable aux voisinages de x alors le développement en série de Taylor ; autour d'une valeur estimée x^0 s'écrit :

$$f(x^0+\Delta x^0)=f(x^0)+f'(x^0)(\Delta x^0)+f''(x^0)\frac{(\Delta x^0)}{2!}+\cdots+f^{(n)}(x^0)\frac{(\Delta x^0)}{n!}=0 \ldots.(\mathrm{II}.9)$$

Avec :

$$f^{(n)}(x^0)=\frac{\partial^n f(x^0)}{(\partial x)^n} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.(\mathrm{II}.10)$$

Si on néglige les termes de degré supérieur, on peut écrire :

$$f(x^0+\Delta x^0)=f(x^0)+f'(x^0)(\Delta x^0)=0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(\mathrm{II}.11)$$

Ce qui donne

$$\Delta x^0=\frac{-f(x^0)}{f'(x^0)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.(\mathrm{II}.12)$$

Et

$$x^1=x^0+\Delta x^0=x^0-\frac{f(x^0)}{f'(x^0)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(\mathrm{II}.13)$$

En générale, on peut écrire :

$$x^{k+1}=x^k+\Delta x^k \qquad (\mathrm{II}.14)$$

avec $(k=0,1,\ldots.,n)$ est le nombre des itérations.

Et :

$\Delta x^k=-\frac{f(x^k)}{f'(x^k)}$ et $f'=\frac{\partial f}{\partial x}$ est le jacobien de $f(x)$.

b) Dans le cas des multi variables

La méthode peut facilement être étendue pour les équations non linéaires à multi variable, de la manière suivante :

Soit l'ensemble des équations non linéaires :

$$\begin{aligned} f_1\left(x_{1,}x_{2,} \dots \dots \dots \dots \dots \dots .. x_{n,}\right) = 0 \\ f_2\left(x_{1,}x_{2,} \dots \dots \dots \dots \dots \dots .. x_{n,}\right) = 0 \\ f_n\left(x_{1,}x_{2,} \dots \dots \dots \dots \dots \dots .. x_{n,}\right) = 0 \end{aligned} \tag{II.15}$$

Pour les valeurs initiales estimées $x_1^0, x_2^0, \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots x_n^0$, on peut déterminer l'erreur $\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \Delta x_n^0$

Le système d'équation (II.15) devient :

$$\begin{cases} f_1(x_1^0 + \Delta x_1^0 + x_2^0 + \Delta x_2^0 + \cdots \dots \dots \dots \dots .., x_n^0 + \Delta x_n^0) = 0 \\ f_2(x_1^0 + \Delta x_1^0 + x_2^0 + \Delta x_2^0 + \cdots \dots \dots \dots \dots .., x_n^0 + \Delta x_n^0) = 0 \\ f_n(x_1^0 + \Delta x_1^0 + x_2^0 + \Delta x_2^0 + \cdots \dots \dots \dots \dots .., x_n^0 + \Delta x_n^0) = 0 \end{cases} \tag{II.16}$$

De la même manière on développe et on néglige les termes d'ordres supérieurs de l'équation (II.16), on obtient

$$\begin{cases} f_1(x_1^0, x_1^0 \dots \dots .., x_n^0) + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_{x_1^0} \Delta x_1^0 + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_{x_2^0} \Delta x_2^0 + \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right|_{x_n^0} \Delta x_n^0 = 0 \\ f_2(x_1^0, x_1^0 \dots \dots .., x_n^0) + \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_{x_1^0} \Delta x_1^0 + \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_{x_2^0} \Delta x_2^0 + \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right|_{x_n^0} \Delta x_n^0 = 0 \\ f_n(x_1^0, x_1^0 \dots \dots .., x_n^0) + \left.\frac{\partial f_3}{\partial x_1}\right|_{x_1^0} \Delta x_1^0 + \left.\frac{\partial f_3}{\partial x_2}\right|_{x_2^0} \Delta x_2^0 + \left.\frac{\partial f_3}{\partial x_n}\right|_{x_n^0} \Delta x_n^0 = 0 \end{cases} \tag{II.17}$$

L'équation (II.17) sous forme matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^0, x_1^0 \dots \dots .., x_n^0) \\ f_2(x_1^0, x_1^0 \dots \dots .., x_n^0) \\ f_n(x_1^0, x_1^0 \dots \dots .., x_n^0) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_{x_1^0} & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_{x_2^0} & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right|_{x_n^0} \\ \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_{x_1^0} & \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_{x_2^0} & \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right|_{x_n^0} \\ \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right|_{x_1^0} & \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right|_{x_2^0} & \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right|_{x_n^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} \tag{II.18}$$

De l'équation (II.18), on peut déterminer Δx_1^0 , Δx_2^0 ……, Δx_n^0, le système à l'itération k peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} f_1\left(x_1^k, x_1^k \dots \dots .., x_n^k\right) \\ f_2\left(x_1^k, x_1^k \dots \dots .., x_n^k\right) \\ f_n\left(x_1^k, x_1^k \dots \dots .., x_n^k\right) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_{x_1^k} & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_{x_2^k} & \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right|_{x_n^k} \\ \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_{x_1^k} & \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_{x_2^k} & \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right|_{x_n^k} \\ \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right|_{x_1^k} & \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right|_{x_2^k} & \left.\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right|_{x_n^k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^k \\ \Delta x_2^k \\ \Delta x_n^k \end{bmatrix} \tag{II.19}$$

Alors :

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \Delta x_i^k \tag{II.20}$$

Les équations (II.19) et (II.20) peuvent être écrites sous la forme générale suivante :

$$f(x^k) = -J^k\, \Delta x^k$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$$

II.3.2 Application de la méthode de Newton-Raphson pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance

Le problème de l'écoulement de puissance conventionnelle peut être résolu par la méthode de Newton-Raphson; en utilisant un ensemble d'équations non linéaires pour exprimer les puissances actives et réactives spécifiées en fonction des tensions ; ces tensions sont exprimées sous leurs formes polaires pour faire apparaitre les différentes gradeurs caractérisant le réseau électrique.

L'application de la méthode de N-R est basée sur le développement du premier ordre en série de Taylor des équations non linéaires de l'écoulement de puissance.

Cette méthode permet la résolution d'un système d'équations non linéaires exprimant les puissances actives et réactives en fonction des tensions nœudales.

La puissance injectée au nœud i, S_i est :

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i .\, I_i^* \tag{II.21}$$

Les tensions des nœuds et les admittances des lignes sont exprimées sous la forme polaire suivante :

$$V_i = |V_i|\angle\delta_i \;\; ; \quad V_j = |V_j|\angle\delta_j$$

$$Y_{ij} = G_{ij} - B_{ij} = |Y_{ij}|\angle(-\theta_{ij})$$

Ce qui donne

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij}\, V_j = \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}|\,|V_j|\angle(-\theta_{ij} + \delta_j) \tag{II.22}$$

Et on a

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i||Y_{ij}|\,|V_j|\angle -\left(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j\right) \qquad (II.23)$$

Sachant que

$$e^{-(\theta_{ij}+\delta_i-\delta_j)} = cos\left(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j\right) - jsin\left(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j\right) \qquad (II.24)$$

Donc la puissance active et réactive peuvent être exprimées :

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i||Y_{ij}|\,|V_j| cos\left(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j\right) \qquad (II.25)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i||Y_{ij}|\,|V_j| sin\left(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j\right) \qquad (II.26)$$

On peut clairement voir que toute variation des modules des tensions et des angles de phases entraine des variations des puissances active et réactive.

Pour la détermination des éléments du jacobien, nous utiliserons les équations qui donnent les puissances. Les variations des puissances sont les différences entre les valeurs planifiées et calculées :

$$\Delta P_i = P_i^{spec} - P_i^{cal} \qquad (II.27)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{spec} - Q_i^{cal} \qquad (II.28)$$

Avec :

$$P_i^{spec} = P_G - P_D \qquad (II.29)$$

$$Q_i^{spec} = Q_G - Q_D \qquad (II.30)$$

Où ΔP_i et ΔQ_i représentent respectivement les écarts entre les puissances actives spécifiées et calculées et les écarts entre les puissances réactives spécifiées et calculées.

La méthode de Newton-Raphson exige qu'un système d'équations linéaires soit formé exprimant les relations entre les variations des puissances actives et réactives et aussi celles des composantes réelles et imaginaires des tensions noeudales. Le développement doit donner 2(n-1) équations linéaires comme l'indique ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_1} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial \delta_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial V_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial V_1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_{n-1} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1} \end{bmatrix} \tag{II.31}$$

Où les coefficients de la matrice sont les éléments de la matrice Jacobienne et le n$^{\text{ème}}$ nœud est le nœud de référence.

Sous la forme matricielle, le système précédent devient :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{II.32}$$

II.3.3 Détermination des sous matrices de la matrice Jacobienne J

La dernière équation peut être exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{II.33}$$

Les éléments du sous matrice J_1 sont déterminés comme suit :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} |V_i||Y_{ij}|\,|V_j| sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \qquad pour\ i \neq j \tag{II.34}$$

$$= |Y_{ii}||V_i|^2 sin(\theta_{ii}) \qquad pour\ j = i \tag{II.35}$$

De même pour la sous matrice J_2 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}||V_j| sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \qquad pour\ i \neq j \tag{II.36}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \sum_{j=1}^{n} |V_j||Y_{ij}|\, cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) + |V_i||Y_{ii}| cos(\theta_{ii}) \tag{II.37}$$

$$= \frac{P_i}{|V_i|} + |V_i||Y_{ii}| cos(\theta_{ii}) \qquad pour\ i = j \tag{II.38}$$

Pour la sous matrice J_3 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = |V_i||Y_{ij}||V_j|sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \qquad pour\ i \neq j \tag{II.39}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^{n}|V_j||Y_{ij}|\,cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) + |V_i||Y_{ii}|cos(\theta_{ii}) \tag{II.40}$$

$$= -|Y_{ii}||V_i|^2 sin(\theta_{ii}) + P_i \quad pour\ i = j \tag{II.41}$$

Pour la sous matrice J_4 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}|sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \qquad pour\ i \neq j \tag{II.42}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \sum_{j=1}^{n}|V_j||Y_{ij}|\,sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) + |V_i||Y_{ii}|sin(\theta_{ii}) \tag{II.43}$$

$$= \frac{Q_i}{|V_i|} + |V_i||Y_{ii}|sin(\theta_{ii}) \qquad pour\ i = j \tag{II.44}$$

II.3.4 Algorithme de la méthode de Newton-Raphson

La procédure de calcul de l'écoulement de puissance en utilisant la méthode de Newton–Raphson est résumée dans les étapes suivantes :

1- Initialiser le compteur d'itération, k=0.

2- A partir des données du système, on détermine la matrice d'admittance Y.

3- Affecter des valeurs initiales aux modules et phases des tensions V_i^0 et θ_i^0

4- On calcule P_i^{cal} et Q_i^{cal} qui nous donne les écarts de puissances ΔP_i et ΔQ_i comme suit :

$$\Delta P_i = P_i^{spec} - P_i^{cal}$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{spec} - Q_i^{cal}$$

5- Formation de la matrice Jacobienne.

6- Calcul de l'inverse de Jacobienne.

7- On calcule :

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (II.45)$$

8- Calculer les nouvelles estimations, on obtient :

$$\delta_i^{k+1} = \delta_i^k + \Delta\delta_i^k \quad (II.46)$$

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \Delta V_i^k \quad (II.47)$$

9- Vérifier la convergence. Si le vecteur des écarts de puissance est inférieur à une certaine précision max $(\Delta P_i, \Delta Q_i) \leq \varepsilon$, stop. Sinon, continuer.

10- Incrémenter k de 1 et retourner à l'étape 4.

Les valeurs des tensions de la dernière itération sont retenues, on calcule :

- Les puissances transmises entre les nœuds.
- Les puissances injectées aux nœuds.
- Pertes de puissances totales dans les lignes.

II.4 Méthode de Découplée rapide

Soit le problème de l'écoulement de puissance dans sa forme polaire déjà définie par :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (II.48)$$

Dans les réseaux électriques de faible conductance l'écoulement de puissance active et moins sensible aux variations des modules de tension (en p.u) que celle des angles des tensions, d'où l'approximation d'une sous-matrice J_2 nulle est acceptable, de même l'écoulement de la puissance réactive et moins sensible aux variations des angles de tension que celle des modules de tension, et la sous matrice J_3 peut être considérée comme nulle.

L'équation devient :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (II.49)$$

D'où :

$$[\Delta P] = [J_1][\Delta\delta] \quad (II.50)$$

$$[\Delta Q] = [J_4][\Delta V] \qquad (II.51)$$

Et sont connues comme les deux équations de l'écoulement de puissances découplée qui peuvent être résolues séparément comme suit :

$$[\Delta \delta] = [J_1]^{-1}[\Delta P] \qquad (II.52)$$

$$[\Delta V] = [J_4]^{-1}[\Delta Q] \qquad (II.53)$$

Les dimensions des sous matrices J_1 et J_4 sont presque de l'ordre d'un sur quatre des dimensions de la matrice jacobienne, par conséquent cette approche permet non seulement de réduire l'espace mémoire de stockage mais aussi une réduction importante dans le temps de calcul.

II.4.1 Algorithme de la méthode de découplée rapide

L'algorithme relatif au problème de répartition de charge appliquant la méthode de découplée rapide peut être résumée dans les étapes suivantes :

1. Le compteur du nombre d'itération est mis à zéro, iter=0 ;
2. Choisir des valeurs initiales des angles de tensions des jeux de barres PV et PQ ainsi que les modules des tensions des jeux de barres PQ ;
3. Evaluer les écarts des puissances actives des jeux de barres PV et PQ $\left(\Delta P_{pv}, \Delta P_{pq}\right)$ et les écarts des puissances réactives des jeux de barres PQ $\left(\Delta Q_{pq}\right)$.
4. Chercher la convergence : si $max\left(\left|\Delta P_k^{iter}\right|\right) \leq \varepsilon$ et $max\left(\left|\Delta Q_k^{iter}\right|\right) \leq \varepsilon$ (avec souvent $= 0.0001$), la convergence est suffisante ; sinon on passe aux autres étapes
5. Evaluer les sous matrices $[J_1]^{iter}$ et $[J_4]^{iter}$
6. Résoudre les deux équations suivantes :

$$[\Delta \delta] = [J_1]^{-1}[\Delta P]$$

$$[\Delta V] = [J_4]^{-1}[\Delta Q]$$

$pour\ evaluer$

$\Delta\delta_{pv}^{iter+1},\ \Delta\delta_{pq}^{iter}\ et\ \Delta V_{pq}^{iter}$

7. Réactualiser les tensions des jeux de barres :

$$\Delta\delta_{pv}^{iter+1} = \delta_{pv}^{iter} + \Delta\delta_{pv}^{iter}$$

$$\Delta\delta_{pq}^{iter+1} = \delta_{pq}^{iter} + \Delta\delta_{pq}^{iter}$$

$$V_{pq}^{iter+1} = V_{pq}^{iter} + \Delta V_{pq}^{iter}$$

8. On augmente le compteur d'itération, iter=iter+1, on retourne à l'étape 2 pour avoir une méthode plus rapide que celle déjà traitée, on utilise d'autres approximations.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les méthodes itératives les plus utilisées dans l'étude et l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques à savoir :

1- Méthode de Causs-Siedel ;
2- Méthode de Newton-Raphson ;
3- Méthode de découplée rapide.

CHAPITRE 3

Application sur un réseau électrique

Chapitre III
Application sur un réseau électrique

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va faire une application sur un réseau de transport haute tension, le réseau (et ses données) proposé à l'étude est pris de la référence [2] et se compose de :

- Le jeu de barre de référence est (1)
- Nombre de JB est (26)
- Nombre de lignes est (46)
- Nombre de générateurs est (6)

L'objectif est d'étudier l'écoulement de puissance de ce réseau par les méthodes itératives :

- Méthode de Gauss-Seidel ;
- Méthode de Newton-Raphson ;
- Méthode de Découplée rapide.

III.2. Données du réseau à calculer

Le réseau proposé à l'étude est représenté par la (Figure I**II.**1).

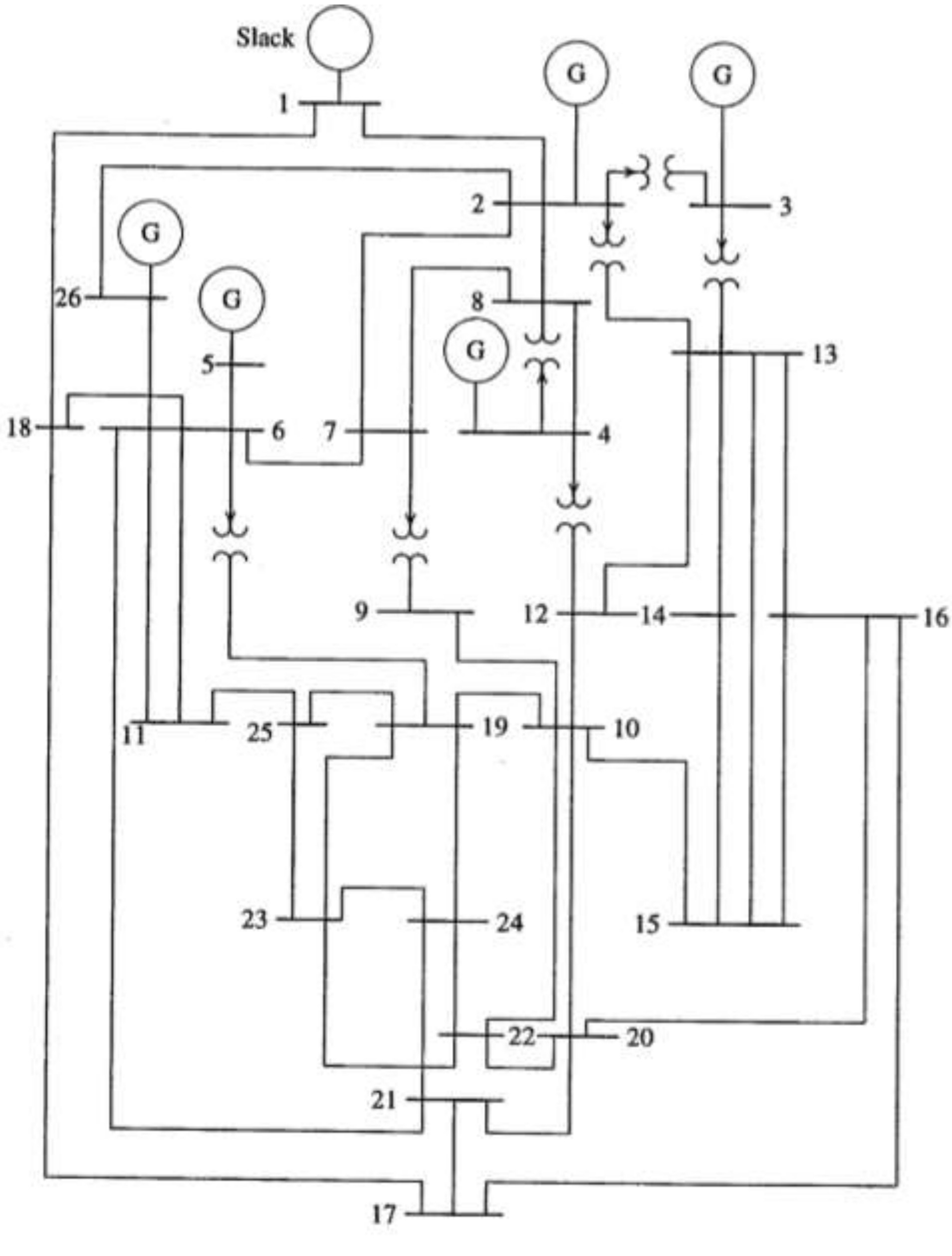


Figure III.1 : schéma du réseau de calcul [2]

a- Données des JB

Tableau III.l : Données des JB

N°	Code	Tension en (p.u)	Angle (deg)	Pch (MW)	Qch (MVar)	P_G (MW)	Q_G (MVar)	Qmin	Qmax	Qshunt
1	1	1.025	0	51	41	0	0	0	0	4
2	2	1.020	0	22	15	79	0	40	250	0
3	2	1.025	0	64	50	20	0	40	150	0
4	2	1.050	0	25	10	100	0	25	80	2
5	2	1.045	0	50	30	300	0	40	160	5
6	0	1	0	76	29	0	0	0	0	2
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	89	50	0	0	0	0	3
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	1	0	25	15	0	0	0	0	1.5
12	0	1	0	89	48	0	0	0	0	2
13	0	1	0	31	15	0	0	0	0	0
14	0	1	0	24	12	0	0	0	0	0
15	0	1	0	70	31	0	0	0	0	0.5
16	0	1	0	55	27	0	0	0	0	0
17	0	1	0	78	38	0	0	0	0	0
18	0	1	0	153	67	0	0	0	0	0
19	0	1	0	75	15	0	0	0	0	0
20	0	1	0	48	27	0	0	0	0	0
21	0	1	0	46	23	0	0	0	0	0
22	0	1	0	45	22	0	0	0	0	0
23	0	1	0	25	12	0	0	0	0	0
24	0	1	0	54	27	0	0	0	0	0
25	0	1	0	28	13	0	0	0	0	0
26	2	1.015	0	40	20	60	0	15	50	0

Remarque

Dans la 2ème colonne du tableau III.1 on a le code du JB, on affecte 1 pour le JB de référence, 2 pour les JB P-V et 0 pour les JB de charge (P-Q).

b- Données des lignes

Tableau III.2 : Données des lignes

Départ	**Arrivée**	**R en (p.u)**	**X en (p.u)**	**B/2 Ysh/2 en (u.r)**	**Type ligne**
1	2	0.00055	0.00480	0.03000	1
1	18	0.00130	0.01150	0.06000	1
2	3	0.001460	0.05130	0.05000	0.96
2	7	0.01030	0.05860	0.01800	1
2	8	0.00740	0.03210	0.03900	1
2	13	0.00357	0.09670	0.02500	0.96
2	26	0.03230	0.19670	0	1
3	13	0.00070	0.00548	0.00050	1.017
4	8	0.00080	0.02400	0.00010	1.050
4	12	0.00160	0.02010	0.01500	1.050
5	6	0.00690	0.03000	0.09900	1
6	7	0.00535	0.03060	0.00105	1
6	11	0.00970	0.05700	0.00010	1
6	18	0.00374	0.02220	0.00120	1
6	19	0.00350	0.06600	0.04500	0.950
6	21	0.00500	0.09000	0.02260	1
7	8	0.00120	0.00693	0.00010	1
7	9	0.00095	0.04290	0.02500	0.950
8	12	0.00200	0.01800	0.02000	1
9	10	0.00104	0.04930	0.00100	1
10	12	0.00247	0.01320	0.01000	1
10	19	0.05470	0.23600	0	1
10	20	0.00660	0.01600	0.00100	1
10	22	0.00690	0.02980	0.00500	1
11	25	0.09600	0.27000	0.01000	1
11	26	0.01650	0.09700	0.00400	1
12	14	0.03210	0.08020	0	1
12	15	0.01800	0.05980	0	1
13	14	0.00460	0.02710	0.00100	1
13	15	0.01160	0.06100	0	1
13	16	0.01793	0.08880	0.00100	1
14	15	0.00690	0.03820	0	1
15	16	0.02090	0.05120	0	1
16	17	0.09900	0.06000	0	1
16	20	0.02390	0.05850	0	1
17	18	0.00320	0.06000	0.03800	1
17	21	0.22900	0.44500	0	1
19	23	0.03000	0.13100	0	1
19	24	0.03000	0.12500	0.00200	1
19	25	0.11900	0.22490	0.00400	1
20	21	0.06570	0.15100	0	1
20	22	0.01500	0.03660	0	1
21	24	0.04760	0.15100	0	1

22	23	0.02900	0.09900	0	1
22	24	0.03100	0.08800	0	1
23	25	0.09870	0.11680	0	1

III.3 Résultat de calcul de l'écoulement de puissance

Dans ce qui suit on va utiliser des programmes de calcul écrit en Matlab par l'auteur Hadi Saadat [2],

III.3.1 Méthode de Gauss-Seidel

L'exécution du programme de Gauss-Seidel écrit en Matlab est nommé 'lfgauss' nécessite les fichiers de données suivants :

basemva = 100 ; accuracy= 0.0001 ; accel=1.6 ; maxiter =60 ;

```
busdata=[1  1  1.025  0  51   41  0    0  0   0    4
         2  2  1.020  0  22   15  79   0  40  250  0
         3  2  1.025  0  64   50  20   0  40  150  0
         4  2  1.050  0  25   10  100  0  40  80   2
         5  2  1.045  0  50   30  300  0  40  160  5
         6  0  1.00   0  76   29  0    0  0   0    2
         7  0  1.00   0  0    0   0    0  0   0    0
         8  0  1.00   0  0    0   0    0  0   0    0
         9  0  1.00   0  89   50  0    0  0   0    3
        10  0  1.00   0  0    0   0    0  0   0    0
        11  0  1.00   0  25   15  0    0  0   0    1.5
        12  0  1.00   0  89   48  0    0  0   0    2
        13  0  1.00   0  31   15  0    0  0   0    0
        14  0  1.00   0  24   12  0    0  0   0    0
        15  0  1.00   0  70   31  0    0  0   0    0.5
        16  0  1.00   0  55   27  0    0  0   0    0
        17  0  1.00   0  78   38  0    0  0   0    0
        18  0  1.00   0  153  67  0    0  0   0    0
        19  0  1.00   0  75   15  0    0  0   0    5
        20  0  1.00   0  48   27  0    0  0   0    0
```

```
        21  0   1.00   0   46  23  0   0   0   0   0
        22  0   1.00   0   45  22  0   0   0   0   0
        23  0   1.00   0   25  12  0   0   0   0   0
        24  0   1.00   0   54  27  0   0   0   0   0
        25  0   1.00   0   28  13  0   0   0   0   0
        26  2   1.015  0   40  20  60  0   15  50  0] ;


linedata= [1   2   0.00055   0.00480   0.03000   1
        1   18  0.00130   0.01150   0.06000   1
        2   3   0.00146   0.05130   0.05000   0.96
        2   7   0.01030   0.05860   0.01800   1
        2   8   0.00740   0.03210   0.03900   1
        2   13  0.00357   0.09670   0.02500   0.96
        2   26  0.03230   0.19670   0.00000   1
        3   13  0.00070   0.00548   0.00050   1.017
        4   8   0.00080   0.02400   0.00010   1.050
        4   12  0.00160   0.02070   0.01500   1.050
        5   6   0.00690   0.03000   0.09900   1
        6   7   0.00535   0.0360    0.00105   1
        6   11  0.00970   0.05700   0.00010   1
        6   18  0.00374   0.0220    0.00120   1
        6   19  0.00350   0.06600   0.04500   0.95
        6   21  0.00500   0.09000   0.02260   1
        7   8   0.00120   0.00693   0.00010   1
        7   9   0.00095   0.04290   0.02500   0.95
        8   12  0.00200   0.01800   0.02000   1
        9   10  0.00104   0.04930   0.00100   1
        10  12  0.00247   0.01320   0.01000   1
        10  19  0.05470   0.23600   0.00000   1
        10  20  0.00660   0.01600   0.00100   1
        10  22  0.00690   0.02980   0.00500   1
        11  25  0.09600   0.27000   0.01000   1
        11  26  0.01650   0.09700   0.00400   1
        12  14  0.03270   0.08020   0.00000   1
        12  15  0.01800   0.05980   0.00000   1
        13  14  0.00460   0.02710   0.00100   1
        13  15  0.01160   0.06100   0.00000   1
        13  16  0.01793   0.08880   0.00100   1
        14  15  0.00690   0.03820   0.00000   1
        15  16  0.02090   0.05120   0.00000   1
```

16	17	0.09900	0.06000	0.00000	1
16	20	0.02390	0.05850	0.00000	1
17	18	0.00320	0.06000	0.03800	1
17	21	0.22900	0.44500	0.00000	1
19	23	0.03000	0.13100	0.00000	1
19	24	0.03000	0.12500	0.00200	1
19	25	0.11900	0.22490	0.00400	1
20	21	0.06570	0.15700	0.00000	1
20	22	0.01500	0.03660	0.00000	1
21	24	0.04760	0.15100	0.00000	1
22	23	0.02900	0.09900	0.00000	1
22	24	0.03100	0.08800	0.00000	1
23	25	0.09870	0.11680	0.00000	1] ;

Après exécution du programme nous avons obtenus les résultats suivants :

a- Pour les JB

Power Flow Solution by Gauss-Seidel Method

Maximum Power Mismatch = 6.7916e-005

No. of Iterations = 38

Tableau III.3 : Résultats de calcul de l'écoulement de puissance par G-S

N°de nœud	Tension V(p.u)	Angle δ(deg)	Pch (MW)	Qch (MVAR)	P_G (MW)	Q_G (MVAR)	Pce injectée (MVAR)
1	1.025	0.000	51.000	41.000	719.527	223.734	4.000
2	1.020	-0.935	22.000	15.000	79.000	125.717	0.000
3	1.035	-4.219	64.000	50.000	20.000	63.118	0.000
4	1.050	-3.598	25.000	10.000	100.000	49.658	2.000
5	1.045	1.167	50.000	30.000	300.000	124.019	5.000
6	0.999	-2.536	76.000	29.000	0.000	0.000	2.000
7	0.994	-3.230	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.997	-3.318	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.008	-5.411	89.000	50.000	0.000	0.000	3.000
10	0.989	-5.570	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.997	-3.190	25.000	15.000	0.000	0.000	1.500
12	0.993	-4.705	89.000	48.000	0.000	0.000	2.000
13	1.014	-4.437	31.000	15.000	0.000	0.000	0.000
14	1.000	-5.048	24.000	12.000	0.000	0.000	0.000
15	0.991	-5.546	70.000	31.000	0.000	0.000	0.500
16	0.983	-5.887	55.000	27.000	0.000	0.000	0.000
17	0.987	-4979	78.000	38.000	0.000	0.000	0.000
18	1.007	-1.856	153.000	67.000	0.000	0.000	0.000
19	1.004	-6.378	75.000	15.000	0.000	0.000	5.000
20	0.980	-6.030	48.000	27.000	0.000	0.000	0.000
21	0.977	-5.760	46.000	23.000	0.000	0.000	0.000
22	0.978	-6.441	45.000	22.000	0.000	0.000	0.000
23	0.977	-7.078	25.000	12.000	0.000	0.000	0.000
24	0.968	-7.338	54.000	27.000	0.000	0.000	0.000

25	0.974	-6.757	28.000	13.000	0.000	0.000	0.000
26	1.015	-1.785	40.000	20.000	60.000	32.611	0.000
Total			1263.000	637.000	1278.527	618.857	25.000

b- Pour les lignes

Line Flow and Losses

--Line--		Power at bus & line flow			--Line loss--		Transformer
from	to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	tap
1		668.527	186.734	694.117			
	2	363.195	64.903	368.948	0.715	-0.035	
	18	305.333	121.822	328.739	1.357	-0.390	
2		57.000	110.717	124.528			
	1	-362.480	-64.937	368.250	0.715	-0.035	
	3	124.411	51.291	134.570	0.242	-2.494	0.960
	7	75.244	32.132	81.818	0.675	0.190	
	8	141.808	39.781	147.282	1.567	-1.135	
	13	69.989	50.455	86.280	0.245	1.237	0.960
	26	8.026	1.333	8.136	0.021	0.125	
3		-44.000	13.118	45.914			
	2	-124.169	-53.785	135.318	0.242	-2.494	
	13	80.171	66.860	104.392	0.074	0.474	1.017
4		75.000	41.658	85.793			
	8	-19.858	14.127	24.371	0.005	0.123	1.050
	12	94.859	27.691	98.818	0.158	-0.939	1.050
5		250.000	99.019	268.896			
	6	250.002	99.020	268.898	4.711	-0.208	
6		-76.000	-27.000	80.654			
	5	-245.291	-99.228	264.601	4.711	-0.208	
	7	34.876	9.859	36.242	0.071	0.266	
	11	19.946	0.040	19.946	0.039	0.207	
	18	-58.868	-27.179	64.840	0.157	0.684	
	19	111.078	68.957	130.742	0.563	1.115	0.950
	21	62.254	20.064	65.408	0.219	-0.471	
7		0.000	0.000	0.000			
	2	-74.569	-31.942	81.123	0.675	0.190	
	6	-34.805	-9.593	36.103	0.071	0.266	

	8	13.779	-47.047	49.023	0.029	0.149	
	9	95.597	88.314	130.147	0.151	1.557	0.950
8		0.000	0.000	0.000			
	2	-140.241	-40.916	146.087	1.567	-1.135	
	4	19.863	-14.004	24.304	0.005	0.123	
	7	-13.750	47.196	49.158	0.029	0.149	
	12	134.128	7.718	134.350	0.364	-0.681	
9		-89.000	-47.000	100.648			
	7	-95.446	-86.757	128.984	0.151	1.557	
	10	6.445	39.765	40.284	0.017	0.591	
10		0.000	0.000	0.000			
	9	-6.429	-39.174	39.698	0.017	0.591	
	12	-113.329	-6.623	113.522	0.325	-0.225	
	19	4.267	-7.174	8.347	0.039	0.168	
	20	60.372	28.254	66.656	0.300	0.534	
	22	55.121	24.711	60.406	0.259	0.152	
11		-25.000	-13.500	28.412			
	6	-19.908	0.167	19.908	0.039	0.207	
	25	22.755	0.030	22.755	0.501	-0.535	
	26	-27.847	-13.699	31.035	0.158	0.119	
12		-89.000	-46.000	100.185			
	4	-94.701	-28.630	98.934	0.158	-0.939	
	8	-133.764	-8.400	134.027	0.364	-0.681	
	10	113.654	6.397	113.834	0.325	-0.225	
	14	3.072	-10.638	11.073	0.041	0.100	
	15	22.736	-4.730	23.223	0.099	0.327	
13		-31.000	-15.000	34.438			
	2	-69.744	-49.219	85.362	0.245	1.237	
	3	-80.097	-66.386	104.032	0.074	0.474	
	14	47.046	41.963	63.041	0.178	0.848	
	15	37.577	29.872	48.004	0.260	1.368	
	16	34.219	28.787	44.717	0.350	1.534	
14		-24.000	-12.000	26.833			
	12	-3.031	10.738	11.158	0.041	0.100	
	13	-46.867	-41.115	62.346	0.178	0.848	
	15	25.894	18.378	31.753	0.070	0.385	
15		-70.000	-30.500	76.356			
	12	-22.638	5.058	23.196	0.099	0.327	

	13	-37.317	-28.504	46.958	0.260	1.368
	14	-25.824	-17.993	31.475	0.070	0.385
	16	15.786	10.933	19.202	0.078	0.192
16		-55.000	-27.000	61.270		
	13	-33.869	-27.252	43.472	0.350	1.534
	15	-15.708	-10.741	19.029	0.078	0.192
	17	-10.226	9.326	13.840	0.196	0.119
	20	4.797	1.672	5.080	0.006	0.016
17		-78.000	-38.000	86.764		
	16	10.423	-9.207	13.907	0.196	0.119
	18	-91.655	-29.338	96.236	0.297	-1.983
	21	3.235	0.544	3.280	0.025	0.049
18		-153.000	-67.000	167.027		
	1	-303.977	-122.212	327.624	1.357	-0.390
	6	59.026	27.863	65.271	0.157	0.684
	17	91.953	27.355	95.935	0.297	-1.983
19		-75.000	-10.000	75.664		
	6	-110.515	-67.842	129.677	0.563	1.115
	10	-4.228	7.342	8.473	0.039	0.168
	23	13.242	17.918	22.280	0.148	0.645
	24	18.815	23.906	30.422	0.278	0.771
	25	7.685	8.677	11.591	0.167	-0.467
20		-48.000	-27.000	55.073		
	10	-60.072	-27.720	66.159	0.300	0.534
	16	-4.790	-1.656	5.069	0.006	0.016
	21	-1.786	2.610	3.162	0.007	0.016
	22	18.651	-0.232	18.652	0.054	0.132
21		-46.000	-23.000	51.430		
	6	-62.035	-20.535	65.346	0.219	-0.471
	17	-3.209	-0.495	3.247	0.025	0.049
	20	1.793	-2.593	3.153	0.007	0.016
	24	17.453	0.621	17.464	0.152	0.482
22		-45.000	-22.000	50.090		
	10	-54.861	-24.558	60.107	0.259	0.152
	20	-18.597	0.364	18.600	0.054	0.132
	23	10.180	-1.854	10.347	0.032	0.111
	24	18.275	4.049	18.719	0.114	0.323
23		-25.000	-12.000	27.731		

	19	-13.094	-17.272	21.675	0.148	0.645
	22	-10.147	1.964	10.336	0.032	0.111
	25	-1.758	3.308	3.746	0.015	0.017
24		-54.000	-27.000	60.374		
	19	-18.537	-23.134	29.645	0.278	0.771
	21	-17.301	-0.139	17.302	0.152	0.482
	22	-18.162	-3.727	18.540	0.114	0.323
25		-28.000	-13.000	30.871		
	11	-22.254	-0.565	22.262	0.501	-0.535
	19	-7.518	-9.144	11.838	0.167	-0.467
	23	1.772	-3.291	3.738	0.015	0.017
26		20.000	12.611	23.644		
	2	-8.006	-1.208	8.096	0.021	0.125
	11	28.006	13.818	31.229	0.158	0.119

Total loss 15.529 5.565

III.3.2 Méthode de Newton-Raphson

a- Pour les JB

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method
Maximum Power Mismatch = 3.18403e-010
No. of Iterations = 6

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	------Load------ MW	Mvar	---Generation--- MW	Mvar	Injected Mvar
1	1.025	0.000	51.000	41.000	719.529	223.728	4.000
2	1.020	-0.935	22.000	15.000	79.000	125.718	0.000
3	1.035	-4.219	64.000	50.000	20.000	63.087	0.000
4	1.050	-3.598	25.000	10.000	100.000	49.661	2.000
5	1.045	1.166	50.000	30.000	300.000	124.020	5.000
6	0.999	-2.536	76.000	29.000	0.000	0.000	2.000
7	0.994	-3.230	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.997	-3.318	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.008	-5.411	89.000	50.000	0.000	0.000	3.000
10	0.989	-5.570	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.997	-3.190	25.000	15.000	0.000	0.000	1.500
12	0.993	-4.705	89.000	48.000	0.000	0.000	2.000
13	1.014	-4.437	31.000	15.000	0.000	0.000	0.000
14	1.000	-5.048	24.000	12.000	0.000	0.000	0.000
15	0.991	-5.546	70.000	31.000	0.000	0.000	0.500

16	0.983	-5.887	55.000	27.000	0.000	0.000	0.000
17	0.987	-4.979	78.000	38.000	0.000	0.000	0.000
18	1.007	-1.856	153.000	67.000	0.000	0.000	0.000
19	1.004	-6.378	75.000	15.000	0.000	0.000	5.000
20	0.980	-6.030	48.000	27.000	0.000	0.000	0.000
21	0.977	-5.760	46.000	23.000	0.000	0.000	0.000
22	0.978	-6.440	45.000	22.000	0.000	0.000	0.000
23	0.977	-7.078	25.000	12.000	0.000	0.000	0.000
24	0.968	-7.338	54.000	27.000	0.000	0.000	0.000
25	0.974	-6.757	28.000	13.000	0.000	0.000	0.000
26	1.015	-1.785	40.000	20.000	60.000	32.610	0.000
Total			1263.000	637.000	1278.529	618.824	25.000

b- <u>Pour les lignes</u>

Line Flow and Losses

--Line--		Power at bus & line flow			--Line loss--		Transformer
from	to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	tap
1		668.529	186.728	694.117			
	2	363.194	64.903	368.948	0.715	-0.035	
	18	305.335	121.825	328.741	1.357	-0.390	
2		57.000	110.718	124.529			
	1	-362.480	-64.937	368.250	0.715	-0.035	
	3	124.412	51.291	134.570	0.242	-2.494	0.960
	7	75.245	32.132	81.818	0.675	0.190	
	8	141.808	39.780	147.282	1.567	-1.135	
	13	69.989	50.456	86.280	0.245	1.237	0.960
	26	8.026	1.333	8.136	0.021	0.125	
3		-44.000	13.087	45.905			
	2	-124.170	-53.785	135.318	0.242	-2.494	
	13	80.170	66.874	104.400	0.074	0.474	1.017
4		75.000	41.661	85.794			
	8	-19.858	14.126	24.370	0.005	0.123	1.050
	12	94.858	27.690	98.817	0.158	-0.939	1.050
5		250.000	99.020	268.896			
	6	250.000	99.020	268.896	4.711	-0.208	
6		-76.000	-27.000	80.654			
	5	-245.289	-99.228	264.599	4.711	-0.208	

	7	34.876	9.859	36.243	0.071	0.266	
	11	19.946	0.039	19.946	0.039	0.207	
	18	-58.867	-27.176	64.838	0.157	0.684	
	19	111.078	68.957	130.742	0.563	1.115	0.950
	21	62.255	20.064	65.408	0.219	-0.471	
7		0.000	0.000	0.000			
	2	-74.570	-31.942	81.123	0.675	0.190	
	6	-34.806	-9.593	36.103	0.071	0.266	
	8	13.778	-47.050	49.026	0.029	0.149	
	9	95.597	88.318	130.149	0.151	1.557	0.950
8		0.000	0.000	0.000			
	2	-140.241	-40.915	146.088	1.567	-1.135	
	4	19.863	-14.003	24.303	0.005	0.123	
	7	-13.749	47.199	49.161	0.029	0.149	
	12	134.127	7.719	134.349	0.364	-0.681	
9		-89.000	-47.000	100.648			
	7	-95.445	-86.761	128.986	0.151	1.557	
	10	6.445	39.761	40.280	0.017	0.591	
10		0.000	0.000	0.000			
	9	-6.429	-39.170	39.694	0.017	0.591	
	12	-113.330	-6.623	113.523	0.325	-0.225	
	19	4.267	-7.174	8.347	0.039	0.168	
	20	60.372	28.256	66.657	0.300	0.534	
	22	55.119	24.712	60.405	0.259	0.152	
11		-25.000	-13.500	28.412			
	6	-19.908	0.168	19.908	0.039	0.207	
	25	22.755	0.031	22.755	0.501	-0.535	
	26	-27.848	-13.699	31.034	0.158	0.119	
12		-89.000	-46.000	100.185			
	4	-94.701	-28.629	98.933	0.158	-0.939	
	8	-133.763	-8.400	134.027	0.364	-0.681	
	10	113.655	6.398	113.835	0.325	-0.225	
	14	3.072	-10.638	11.072	0.041	0.100	
	15	22.737	-4.731	23.224	0.099	0.327	
13		-31.000	-15.000	34.438			
	2	-69.744	-49.219	85.362	0.245	1.237	
	3	-80.096	-66.400	104.040	0.074	0.474	
	14	47.044	41.962	63.039	0.178	0.848	
	15	37.578	29.871	48.004	0.260	1.368	

	16	34.218	28.787	44.716	0.350	1.534
14		-24.000	-12.000	26.833		
	12	-3.031	10.738	11.157	0.041	0.100
	13	-46.866	-41.114	62.344	0.178	0.848
	15	25.897	18.376	31.754	0.070	0.385
15		-70.000	-30.500	76.356		
	12	-22.639	5.058	23.197	0.099	0.327
	13	-37.318	-28.502	46.958	0.260	1.368
	14	-25.827	-17.991	31.476	0.070	0.385
	16	15.784	10.935	19.202	0.078	0.192
16		-55.000	-27.000	61.270		
	13	-33.868	-27.253	43.471	0.350	1.534
	15	-15.705	-10.743	19.028	0.078	0.192
	17	-10.225	9.325	13.839	0.196	0.119
	20	4.798	1.671	5.081	0.006	0.016
17		-78.000	-38.000	86.764		
	16	10.422	-9.206	13.905	0.196	0.119
	18	-91.656	-29.338	96.237	0.297	-1.983
	21	3.235	0.544	3.280	0.025	0.049
18		-153.000	-67.000	167.027		
	1	-303.978	-122.215	327.627	1.357	-0.390
	6	59.025	27.860	65.269	0.157	0.684
	17	91.954	27.355	95.936	0.297	-1.983
19		-75.000	-10.000	75.664		
	6	-110.515	-67.843	129.677	0.563	1.115
	10	-4.228	7.342	8.473	0.039	0.168
	23	13.242	17.918	22.280	0.148	0.645
	24	18.816	23.906	30.422	0.278	0.771
	25	7.685	8.677	11.591	0.167	-0.467
20		-48.000	-27.000	55.073		
	10	-60.072	-27.722	66.160	0.300	0.534
	16	-4.792	-1.655	5.070	0.006	0.016
	21	-1.786	2.609	3.162	0.007	0.016
	22	18.650	-0.232	18.651	0.054	0.132
21		-46.000	-23.000	51.430		
	6	-62.036	-20.534	65.346	0.219	-0.471
	17	-3.209	-0.494	3.247	0.025	0.049
	20	1.793	-2.593	3.152	0.007	0.016

	24	17.453	0.621	17.464	0.152	0.482
22		-45.000	-22.000	50.090		
	10	-54.860	-24.560	60.107	0.259	0.152
	20	-18.596	0.364	18.599	0.054	0.132
	23	10.180	-1.854	10.347	0.032	0.111
	24	18.276	4.049	18.719	0.114	0.323
23		-25.000	-12.000	27.731		
	19	-13.094	-17.273	21.675	0.148	0.645
	22	-10.148	1.964	10.336	0.032	0.111
	25	-1.758	3.308	3.746	0.015	0.017
24		-54.000	-27.000	60.374		
	19	-18.537	-23.134	29.645	0.278	0.771
	21	-17.301	-0.139	17.301	0.152	0.482
	22	-18.162	-3.726	18.540	0.114	0.323
25		-28.000	-13.000	30.871		
	11	-22.254	-0.565	22.262	0.501	-0.535
	19	-7.518	-9.144	11.838	0.167	-0.467
	23	1.772	-3.291	3.738	0.015	0.017
26		20.000	12.610	23.644		
	2	-8.006	-1.208	8.096	0.021	0.125
	11	28.006	13.818	31.229	0.158	0.119
Total loss					15.529	5.565

III.3.2 Méthode de Découplée rapide

a- Pour les JB

Power Flow Solution by Fast Decoupled Method

Maximum Power Mismatch = 8.44152e-005

No. of Iterations = 26

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	------Load------ MW	Mvar	---Generation--- MW	Mvar	Injected Mvar
1	1.025	0.000	51.000	41.000	719.529	223.726	4.000
2	1.020	-0.935	22.000	15.000	79.000	125.718	0.000
3	1.035	-4.219	64.000	50.000	20.000	63.088	0.000
4	1.050	-3.598	25.000	10.000	100.000	49.661	2.000
5	1.045	1.166	50.000	30.000	300.000	124.019	5.000
6	0.999	-2.536	76.000	29.000	0.000	0.000	2.000

7	0.994	-3.230	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.997	-3.318	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.008	-5.411	89.000	50.000	0.000	0.000	3.000
10	0.989	-5.570	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.997	-3.190	25.000	15.000	0.000	0.000	1.500
12	0.993	-4.705	89.000	48.000	0.000	0.000	2.000
13	1.014	-4.437	31.000	15.000	0.000	0.000	0.000
14	1.000	-5.048	24.000	12.000	0.000	0.000	0.000
15	0.991	-5.546	70.000	31.000	0.000	0.000	0.500
16	0.983	-5.887	55.000	27.000	0.000	0.000	0.000
17	0.987	-4.979	78.000	38.000	0.000	0.000	0.000
18	1.007	-1.856	153.000	67.000	0.000	0.000	0.000
19	1.004	-6.378	75.000	15.000	0.000	0.000	5.000
20	0.980	-6.030	48.000	27.000	0.000	0.000	0.000
21	0.977	-5.760	46.000	23.000	0.000	0.000	0.000
22	0.978	-6.440	45.000	22.000	0.000	0.000	0.000
23	0.977	-7.078	25.000	12.000	0.000	0.000	0.000
24	0.968	-7.338	54.000	27.000	0.000	0.000	0.000
25	0.974	-6.757	28.000	13.000	0.000	0.000	0.000
26	1.015	-1.785	40.000	20.000	60.000	32.610	0.000
Total			1263.000	637.000	1278.529	618.824	25.000

a- <u>Pour les lignes</u>

Line Flow and Losses

--Line-- from	to	Power at bus & line flow MW	Mvar	MVA	--Line loss-- MW	Mvar	Transformer tap
1		668.529	186.726	694.117			
	2	363.194	64.903	368.947	0.715	-0.035	
	18	305.336	121.824	328.742	1.357	-0.390	
2		57.000	110.718	124.529			
	1	-362.479	-64.938	368.250	0.715	-0.035	
	3	124.411	51.291	134.570	0.242	-2.494	0.960
	7	75.245	32.132	81.818	0.675	0.190	
	8	141.808	39.780	147.282	1.567	-1.135	
	13	69.988	50.456	86.280	0.245	1.237	0.960
	26	8.026	1.333	8.136	0.021	0.125	
3		-44.000	13.088	45.905			
	2	-124.169	-53.785	135.318	0.242	-2.494	

	13	80.170	66.875	104.400	0.074	0.474	1.017
4		75.000	41.661	85.794			
	8	-19.858	14.126	24.370	0.005	0.123	1.050
	12	94.858	27.690	98.817	0.158	-0.939	1.050
5		250.000	99.019	268.896			
	6	250.000	99.019	268.896	4.711	-0.208	
6		-76.000	-27.000	80.654			
	5	-245.289	-99.228	264.599	4.711	-0.208	
	7	34.876	9.859	36.243	0.071	0.266	
	11	19.946	0.039	19.946	0.039	0.207	
	18	-58.867	-27.177	64.838	0.157	0.684	
	19	111.078	68.957	130.742	0.563	1.115	0.950
	21	62.255	20.064	65.408	0.219	-0.471	
7		0.000	0.000	0.000			
	2	-74.570	-31.942	81.123	0.675	0.190	
	6	-34.805	-9.593	36.103	0.071	0.266	
	8	13.778	-47.050	49.026	0.029	0.149	
	9	95.597	88.318	130.149	0.151	1.557	0.950
8		0.000	0.000	0.000			
	2	-140.241	-40.915	146.088	1.567	-1.135	
	4	19.863	-14.003	24.303	0.005	0.123	
	7	-13.749	47.199	49.161	0.029	0.149	
	12	134.127	7.719	134.349	0.364	-0.681	
9		-89.000	-47.000	100.648			
	7	-95.445	-86.761	128.986	0.151	1.557	
	10	6.445	39.761	40.280	0.017	0.591	
10		0.000	0.000	0.000			
	9	-6.429	-39.170	39.695	0.017	0.591	
	12	-113.330	-6.624	113.523	0.325	-0.225	
	19	4.267	-7.174	8.347	0.039	0.168	
	20	60.372	28.257	66.658	0.300	0.534	
	22	55.119	24.712	60.405	0.259	0.152	
11		-25.000	-13.500	28.412			
	6	-19.908	0.168	19.908	0.039	0.207	
	25	22.755	0.030	22.755	0.501	-0.535	
	26	-27.848	-13.699	31.034	0.158	0.119	
12		-89.000	-46.000	100.185			

	4	-94.701	-28.629	98.933	0.158	-0.939
	8	-133.763	-8.401	134.027	0.364	-0.681
	10	113.655	6.398	113.835	0.325	-0.225
	14	3.071	-10.638	11.072	0.041	0.100
	15	22.737	-4.731	23.224	0.099	0.327
13		-31.000	-15.000	34.438		
	2	-69.744	-49.219	85.362	0.245	1.237
	3	-80.096	-66.401	104.041	0.074	0.474
	14	47.044	41.962	63.039	0.178	0.848
	15	37.578	29.871	48.004	0.260	1.368
	16	34.217	28.788	44.717	0.350	1.534
14		-24.000	-12.000	26.833		
	12	-3.031	10.737	11.157	0.041	0.100
	13	-46.866	-41.114	62.344	0.178	0.848
	15	25.897	18.377	31.754	0.070	0.385
15		-70.000	-30.500	76.356		
	12	-22.639	5.058	23.197	0.099	0.327
	13	-37.318	-28.503	46.958	0.260	1.368
	14	-25.827	-17.992	31.476	0.070	0.385
	16	15.784	10.937	19.202	0.078	0.192
16		-55.000	-27.000	61.270		
	13	-33.867	-27.253	43.471	0.350	1.534
	15	-15.705	-10.745	19.029	0.078	0.192
	17	-10.226	9.323	13.838	0.196	0.119
	20	4.799	1.670	5.081	0.006	0.016
17		-78.000	-38.000	86.764		
	16	10.423	-9.204	13.905	0.196	0.119
	18	-91.657	-29.336	96.238	0.297	-1.983
	21	3.235	0.544	3.280	0.025	0.049
18		-153.000	-67.000	167.027		
	1	-303.979	-122.213	327.627	1.357	-0.390
	6	59.024	27.861	65.269	0.157	0.684
	17	91.955	27.353	95.937	0.297	-1.983
19		-75.000	-10.000	75.664		
	6	-110.515	-67.843	129.677	0.563	1.115
	10	-4.228	7.342	8.473	0.039	0.168
	23	13.242	17.918	22.280	0.148	0.645
	24	18.816	23.906	30.422	0.278	0.771
	25	7.685	8.677	11.591	0.167	-0.467

20		-48.000	-27.000	55.073		
	10	-60.072	-27.723	66.160	0.300	0.534
	16	-4.792	-1.654	5.070	0.006	0.016
	21	-1.786	2.609	3.161	0.007	0.016
	22	18.650	-0.232	18.651	0.054	0.132
21		-46.000	-23.000	51.430		
	6	-62.036	-20.534	65.346	0.219	-0.471
	17	-3.209	-0.495	3.247	0.025	0.049
	20	1.793	-2.592	3.152	0.007	0.016
	24	17.453	0.621	17.464	0.152	0.482
22		-45.000	-22.000	50.090		
	10	-54.860	-24.560	60.107	0.259	0.152
	20	-18.596	0.364	18.599	0.054	0.132
	23	10.180	-1.854	10.347	0.032	0.111
	24	18.276	4.049	18.719	0.114	0.323
23		-25.000	-12.000	27.731		
	19	-13.094	-17.273	21.675	0.148	0.645
	22	-10.148	1.965	10.336	0.032	0.111
	25	-1.758	3.308	3.746	0.015	0.017
24		-54.000	-27.000	60.374		
	19	-18.537	-23.134	29.645	0.278	0.771
	21	-17.301	-0.139	17.301	0.152	0.482
	22	-18.162	-3.726	18.540	0.114	0.323
25		-28.000	-13.000	30.871		
	11	-22.254	-0.565	22.262	0.501	-0.535
	19	-7.518	-9.144	11.838	0.167	-0.467
	23	1.772	-3.291	3.738	0.015	0.017
26		20.000	12.610	23.644		
	2	-8.006	-1.208	8.096	0.021	0.125
	11	28.006	13.818	31.229	0.158	0.119

Total loss 15.529 5.565

III.4 Interprétations des résultats

Tableau III.4 : Comparaison des tensions des JB par les trois méthodes

N°	Tensions des nœuds		
Du JB	**G-S**	**N-R**	**D-R**
1	1.025	1.025	1.025
2	1.020	1.020	1.020

3	1.035	1.035	1.035
4	1.050	1.050	1.050
5	1.045	1.045	1.045
6	0.999	0.999	0.999
7	0.994	0.994	0.994
8	0.997	0.997	0.997
9	1.008	1.008	1.008
10	0.989	0.989	0.989
11	0.997	0.997	0.997
12	0.993	0.993	0.993
13	1.014	1.014	1.014
14	1.000	1.000	1.000
15	0.991	0.991	0.991
16	0.983	0.983	0.983
17	0.987	0.987	0.987
18	1.007	1.007	1.007
19	1.004	1.004	1.004
20	0.980	0.980	0.980
21	0.977	0.977	0.977
22	0.978	0.978	0.978
23	0.977	0.977	0.977
24	0.968	0.968	0.968
25	0.974	0.974	0.974
26	1.015	1.015	1.015

Tableau III.5 : Comparaison des trois méthodes selon le nombre d'itérations et précision.

	G-S		**N-R**		**D-R**	
Nbre des itérations	**38**		**6**		**26**	
Précision	**6.7916e-005**		**3.18403e-010**		**8.44152e-005**	
Les pertes de puissances totales	**MW**	**Mvar**	**MW**	**Mvar**	**MW**	**Mvar**
	15.529	**5.565**	**15.529**	**5.565**	**15.529**	**5.565**

D'après les deux derniers tableaux, on voit que les trois méthodes nous donne les mêmes résultats de calcul pour les tensions des nœuds, les puissances et les pertes de puissances des lignes.

La différence est vu dans le nombre des itérations et la précision de calcul, avec ces deux paramètres la méthode de Newton-Raphson est la meilleure avec un nombre minimal des itérations (=6) et une précision très faible, vient en 2ème position la méthode de découplée rapide avec un nombre d'itération égale à 26, la méthode de Gauss-Seidel vient en 3ème position avec un nombre d'itération de 38.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une application sur un réseau électrique à 26 jeux de barres, le calcul de l'écoulement de puissance de ce réseau par les méthodes itératives de Gauss-Seidel, de Newton-Raphson et de découplée rapide nous a conduit à des résultats similaires du point de vue tensions des JB ou des puissances et pertes de puissances des lignes.

La différence entre les trois méthodes est observée dans le nombre des itérations et la précision de calcul, pour cela la méthode de Newton-Raphson est la meilleure.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Notre travail a porté sur l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques. Pour aborder ce problème, nous avons exploré et utilisé plusieurs méthodes telles que Gauss-Seidel, Newton-Raphson et Découplée rapide.

La méthode de Gauss-Seidel est très simple, mais sa convergence devient de plus en plus lente à mesure que la taille du système grandit.

Grâce à la convergence quadratique de la méthode de Newton-Raphson, il est possible d'obtenir une solution de haute précision en seulement quelques itérations.

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 viennent consolider cette stabilité.

En outre, le test de convergence basé sur le mismatch de Newton-Raphson est plus robuste que celui basé sur les écarts de tension de Gauss-Seidel. Ces caractéristiques contribuent au succès de la méthode de Newton-Raphson dans l'étude et l'analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques.

Bibliographie

Bibliographie

Ouvrages :

[1] G. SHRINIVASAN, “Power system analysis”, second revised edition, technical publications pune, India, 2009.

[2] Hadi SAADAT, “Power system analysis”, Editions: McGraw Hill, New Delhi, 2002.

Mémoires et thèses :

[3] ZEROUAL Mokhtaria, “ Optimisation et contrôle de l’écoulement des puissances actives par système FACT’’, Mémoire de Magister en réseaux électriques, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, 2015.

[4] BALASKA Amira, « Répartition de la puissance active dans un réseau électrique » Mémoire de Master en réseaux électriques, Université 8 mai 1945 Guelma, 2013.