

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Mémoire de Fin de Cycle en vue de l'obtention
du diplôme de master en Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Thème :

**Etude de la Stabilité de tension dans les réseaux
Électriques**

Préparé par :

CHIKHOUNE THINHINANE & TIGRINE ZAKIA

Encadré par :

M. MADJDOUB Abdallah

M.YAHIA CHERIF kahina

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Avant tous, nous remercions Allah le tout-puissant de nous avoir donné la force et le courage durant toutes nos années d'études et pour accomplir ce travail.

On tient à remercier infiniment nos chers parents, qui ont sacrifié leurs vies pour notre bien.

Nous remercions de tout notre cœur notre encadreur MR MADJDOUB Abdallah et Mme YAHIA CHERIF Kahina qui nous ont aidé à élaborer notre mémoire de fin d'études et qui sont toujours présent à chacun de nos pas. On exprime notre profonde gratitude pour leurs idées et critiques constructives ainsi que leurs orientations afin de mener bien ce travail.

Nous remercions élégamment les membres de jury pour le temps consacré à la lecture de ce travail et pour leurs remarques éventuelles.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

À mon exemple éternel, mon soutien moral, source de joie et bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir que dieu te garde à la hauteur, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, maman que j'adore.

A celui que j'aime beaucoup et ma soutenu tout au long de ce travail, mon fiancé Azerou Loucif.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à toutes mes sœurs AMEL, MILIZA, SONDRA et mes frères BOUALAM, IDIR qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que dieu vous protège et vous offre la chance et le bonheur.

A mes chers ami(e)s.

Merci pour votre amour et vos encouragements.

Sans oublier mon binôme pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

THINHINANE

Dédicaces

Avec l'aide de dieu tout-puissant est enfin achevé ce travail.

Je dédie ce travail à ma mère et mon père, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Ceux qui se sont donné toutes les peines et les sacrifices, pour me voir réussir dans la vie. Que dieu leurs procures bonnes santé et longue vie.

À mes sœurs Dylia, Lina et mon petit frère Kylian pour leurs amours, leurs compréhension et tendresse, qui m'ont toujours encouragé. Merci d'être toujours à mes côtés.

À la mémoire de mes grands-parents que Dieu les accueille dans son vaste paradis.

À celui que j'aime beaucoup ZAKI, mon exemple éternel, qui m'a soutenu tout au long de ce travail.

Sans oublier mon binôme pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

ZAKIA

Table de matières

Table de matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Liste des symboles et d'abréviations.....	iii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I Généralités sur les systèmes de puissance électrique	
1. Introduction	3
2. Classification des réseaux électriques	3
2.1. Les réseaux de production	4
2.1.1. Les centrales hydrauliques	4
2.1.2. Les centrales éoliennes.....	5
2.1.3. La biomasse.....	5
2.1.4. Energie solaire.....	5
2.2. Les réseaux de transport	6
2.3. Réseaux de répartition	6
2.4. Réseaux de distribution	6
2.4.1. Les réseaux de distribution à moyenne tension HTA	6
2.4.2. Réseaux de distribution a basse tension BTA.....	7
2.4.3. Différentes structures du réseau de distribution électrique.....	7
3. Qualité de l'énergie électrique	9
3.1. Définitions	9
3.2. Continuité de l'alimentation en tension et en courant.....	10
3.3. Qualité de la tension.....	10
4. Perturbation des réseaux électriques	10
4.1. Variation de l'amplitude	10
4.2. Modification de la forme d'ondes.....	10
4.3. Variation de la fréquence.....	11

Table de matières

4.4. La dissymétrie de système triphasé ou un déséquilibre.....	11
5. Classification des perturbations électriques	11
6. Conclusion.....	12
Chapitre II Phénomènes de la stabilité de tension	
1. Introduction	13
2. Définition de la stabilité des réseaux électrique.....	13
3. Les phénomènes dynamiques se produisant sur les réseaux	13
3.1. Phénomènes de propagation	14
3.2. Phénomènes électromagnétiques	14
3.3. Phénomènes électromécaniques	14
3.4. Phénomènes thermodynamiques	14
4. Classification de la stabilité.....	15
4.1. Stabilité de l'angle de rotor.....	15
4.1.1. Stabilité angulaire aux grandes perturbations	16
4.1.2. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique).....	16
4.2. Stabilité de fréquence	16
4.3. Stabilité de tension.....	17
4.3.1. Stabilité de tension aux grandes perturbations.....	17
4.3.2. Stabilité de tension aux petites perturbations.....	17
5. Analyse de la stabilité de tension	18
5.1. Analyse dynamique	18
5.2. Analyse statique.....	18
6. L'instabilité de tension	18
6.1. Causes de l'instabilité de la tension	19
7. Écoulement de puissance.....	20
7.1. Concept général de l'écoulement de puissance	20
7.2. Objectif de l'étude de l'écoulement de puissance	20

Table de matières

7.2.1. Définir l'état du réseau.....	20
7.2.2. Calcul des flux de courant.....	20
7.2.3. Calcul des pertes en ligne.....	20
7.2.4. Etablir une stratégie d'adaptation et de contrôle	20
7.2.5. L'Optimisation de la capacité de transit de puissance	21
8. Courbe PV et QV	23
8.1. Courbe PV	23
8.1.1. Les Procédures pour obtenir la courbe PV	23
8.1.2. Analyse de la courbe PV	24
8.1.3. Inconvénients de la méthode de la courbe PV	24
8.2. Courbe QV.....	24
9. Conclusion.....	25
Chapitre III Mécanismes et analyse de la stabilité de tension	
1. Introduction	26
2. Stabilité de tension d'un circuit purement résistif.....	26
3. Stabilité de tension des circuits alternatifs	28
4. Classification de stabilité de tension	29
4.1. Stabilité de la tension à grande perturbation.....	29
4.2. Stabilité de tension de petite perturbation (petit signal)	30
5. Stabilité d'un réseau électrique	30
6. Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension.....	30
7. Analyse statique stabilité de tension	31
7.1. Capacité de transmission d'un système électrique	31
7.2. Courbe PV	31
7.3. Courbes PV avec la réactance de la ligne.....	34
7.4. Courbes QV	34
8. Conclusion.....	35

Table de matières

Chapitre IV Simulation et Résultats

1. Introduction	36
2. Description du réseau	36
2.1 Topologie du réseau.....	36
2.1.1. Paramètres des différentes lignes du réseau.....	37
2.1.2. Données du système	38
3. Formation de Matrices admittance	38
4. Application sur le réseau standard IEEE à 9 bus.....	40
4.1 Courbe PV et QV de système 9 bus.....	40
4.2 La caractéristique PV du système.....	41
4.3 La caractéristique QV d'un système de 9bus.....	41
4.4 Influence du facteur de puissance.....	42
4.4.1 Caractéristique PV	42
4.4.2 Caractéristiques QV	43
5. Conclusion.....	45
Conclusion Générale	46
Références bibliographiques	47

Listes des figures

Listes des figures

Figure 1 : structure générale d'un réseau.	3
Figure 2: Schéma résumant l'organisation des réseaux de distribution.	7
Figure 3: schéma d'une structure radiale	8
Figure 4: Schéma d'une structure en boucle	8
Figure 5: schéma d'une structure en maillé	9
Figure 6: La classification des différents types de la stabilité des systèmes de puissance.....	15
Figure 7: Marge de puissance.....	23
Figure 8 : Courbe QV	24
Figure 9: schéma de circuit de purement résistif.....	26
Figure 10: schéma d'un circuit purement résistance variable.	27
Figure 11: variation des paramètres de système en fonction de RL/RS.....	27
Figure 12: Schéma de circuit Alternatif simple.....	28
Figure 13: Phénomènes de stabilité de tension et réponses temporelles.	30
Figure 14: Système à deux bus.....	32
Figure 15: Famille de courbes avec facteur de puissance comme paramètre.....	33
Figure 16: Famille de courbes avec réactance X total de la ligne	34
Figure 17: caractéristiques QV pour des différentes valeurs de X total de la ligne.....	35
Figure 18 : La structure de système IEEE 9 bus.	37
Figure 19: Courbes PV d'un système de 9bus.	41
Figure 20: Courbes QV d'un système de 9 bus	41
Figure 21: Caractéristique P-V pour différente valeur de facteur de puissance de bus 6.	42
Figure 22:caractéristique P-V pour différente valeurs de facteur de puissance de différents bus.	43
Figure 23: caractéristique Q-V pour différente valeur de facteur de puissance de bus 6.....	44
Figure 24:caractéristique Q-V pour différente valeurs de facteur de puissance de différents bus.	44

Listes des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveaux de tension.....	4
Tableau 2: Paramètres de la ligne IEEE 9.....	37
Tableau 3 : Donnée du système de bus IEEE9	38
Tableau 4: Résultats de calcul de l'écoulement de puissance.....	40

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et d'abréviations

PV :	Puissance active et tension.
QV :	Puissance réactive et tension.
P :	Puissance active.
Q :	Puissance réactive.
S :	Puissance apparente.
I :	Courant.
P_{mas} :	Puissance active minimale.
P_{max} :	Puissance active maximale.
Q_{min} :	Puissance réactive minimale.
Q_{max} :	Puissance réactive maximale.
V_{base} :	Tension de base.
S_{base} :	Puissance de base.
$\cos \theta$:	Facteur de puissance.
ε :	L'erreur.
R_L :	Résistance de charge.
R_S :	Résistance source.
X_L :	Réactance de charge.
X_S :	Réactance source.
P_L :	Puissance de charge.
I_L :	Courant de charge.
Y_{bus} :	Matrice admittance.
U :	Tension.
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
α :	Facteur d'accélération.
F :	Fréquence.

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, la demande de l'énergie électrique à augmenter et devenue un facteur essentiel de développement et de l'évolution technologique, industriel et socio-économique des pays. Cette énergie électrique n'est pas stockable à grandes quantités.

Le système de puissance électrique doit constamment préserver un équilibre entre la production et la consommation et de maintenir la tension et la fréquence dans les limites correspondant aux besoins des consommateurs et au bon fonctionnement du réseau.

La qualité de la puissance électrique est devenue de nos jours une grande préoccupation pour les consommateurs et les fournisseurs d'énergie électrique. Aussi, sont-ils exigés de plus en plus, des critères rigoureux de développement et d'exploitation des réseaux électriques. Dans ces conditions, la stabilité du système de puissance devient un souci permanent pour les fournisseurs de l'énergie électrique [12].

En effet lors de l'augmentation de la charge ou suite à une perturbation majeure dans le réseau, le système électrique trouve des difficultés à maintenir un profil de tension acceptable.

La stabilité de tension du réseau est caractérisée par sa capacité de maintenir la tension aux bornes de la charge dans les limites spécifiées dans le fonctionnement normal [6]. Le problème d'instabilité de tension est la conséquence de différents changements qui affectent le réseau [17]. L'apparition de ce phénomène nous mène à la recherche de méthodes d'analyses permettant leur étude. Les méthodes statiques sont parmi les méthodes utilisées dans l'analyse de la stabilité en tension des réseaux électriques, elles nous renseignent sur la marge de stabilité ainsi que sur le point de l'effondrement de la tension [17][19][6].

Ce travail consiste à faire une étude sur un réseau standard d'IEEE à 9 bus, à l'aide de l'une des méthodes statiques qui sont les courbes PV et QV.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres, nous commençons notre travail par une introduction générale, le premier est consacré à la présentation des généralités sur les réseaux électriques qui va se porter sur la description de sa constitution ensuite cité quelques perturbations qui surviennent sur les réseaux électriques.

Dans le chapitre 2, on présente les phénomènes de la stabilité des réseaux électriques, plus particulièrement la stabilité en tension, Suivi par l'analyse de la stabilité de tension, et on définit les méthodes de la stabilité qui sont l'écoulement de puissance et les courbe PV et QV d'une manière générale.

Le chapitre trois est réservé pour les mécanismes et l'analyse de la stabilité de la tension d'un réseau de deux bus, on utilisant les courbes PV et QV.

Introduction générale

Dans le dernier chapitre, nous étudions un système d'alimentation d'IEEE 9bus, en calcule l'écoulement de puissance à partir d'un programme sous MATLAB, par la suite, nous présentons les résultats obtenus de l'analyse de la stabilité de tension en utilisant les courbes PV et QV.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de puissance électrique

1. Introduction

Le système électrique ou autrement dit le système de puissance électrique est construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres des consommations les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique vers l'aval représenté par les consommateurs.

L'énergie électrique est transportée en haute tension voir très haute tension pour limiter les pertes joules. Dans ce chapitre, nous allons présenter les systèmes de puissance électrique, leurs descriptions et les facteurs de la qualité de l'énergie.

2. Classification des réseaux électriques

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est classifié en quatre principales subdivisions à savoir le réseau de production, de transports, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs.

La figure 1 représente la structure d'un réseau électrique [9].

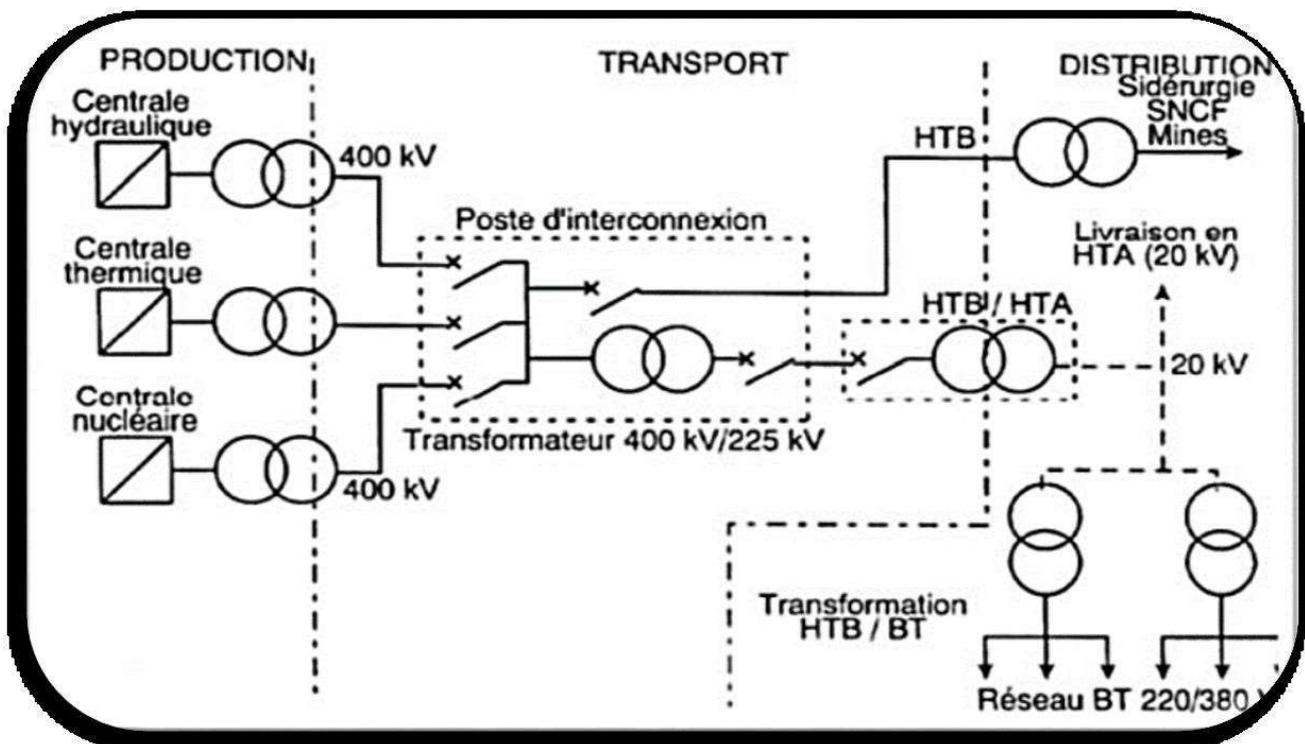


Figure 1 : structure générale d'un réseau.

Chapitre I Généralités sur les systèmes de puissance électrique

Les niveaux de tension définissent les puissances à transporter et fixent les dimensions des lignes ainsi que le matériel des Postes [1].

Le tableau ci-dessous représente les différents niveaux de tension [9].

Tableau 1 : Niveaux de tension.

Domaine de tension	Courant alternatif	Courant continu
TBT	$U \leq 50 \text{ volts}$	$U \leq 120 \text{ volts}$
BTA	$50 < U \leq 500 \text{ volts}$	$120 < U \leq 750 \text{ volts}$
BTB	$500 < U \leq 1000 \text{ volts}$	$750 < U \leq 1500 \text{ volts}$
HTA	$1000 < U \leq 50 \text{ kvolts}$	$1500 < U \leq 75 \text{ kvots}$
HTB	$U > 50 \text{ kvolts}$	$U > 75 \text{ kvolts}$

2.1. Les réseaux de production

La production d'électricité se répartit sur deux bases principales :

- Les énergies Non- renouvelables, comprenant :
Les énergies fossiles qui sont : le pétrole, le gaz Naturel et le charbon, et l'énergie nucléaire.
- Les énergies renouvelables, c'est des énergies à diverse origines (source primaire) sont :
Les énergies solaires photovoltaïques et thermiques, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et l'énergie géothermique [7].

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques sources d'énergie renouvelable.

2.1.1. Les centrales hydrauliques

Les centrales hydrauliques, c'est la source d'énergie renouvelable qui consiste à transformer l'énergie potentielle d'une masse d'eau en énergie cinétique et en énergie mécanique par une turbine hydraulique puis en énergie électrique par un alternateur. Elle présente des avantages tels que la flexibilité de la production, la durée de l'amortissement est longue, les rendements sont importants, mais elle a aussi des inconvénients comme la nécessité d'avoir un terrain propice, le risque de la sécheresse et des investissements lourds.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- ✓ Le barrage qui retient l'eau ;
- ✓ La centrale qui produit l'électricité ;
- ✓ Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique [1].

2.1.2. Les centrales éoliennes

L'énergie éolienne, c'est un autre moyen de produire de l'électricité grâce au vent, sa force actionne les pales du rotor, qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. À son tour, le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Cette électricité est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

Une éolienne est composée de 4 parties :

- le mât ;
- l'hélice ;
- La nacelle qui contient l'alternateur producteur d'électricité ;
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique (lorsqu'elle est raccordée au réseau) [1][6].

2.1.3. La biomasse

L'énergie de la biomasse, tout comme l'énergie des combustibles fossiles, provient de l'énergie solaire emmagasinée dans les plantes par la photosynthèse.

La principale différence entre les deux formes d'énergie tient au fait que les combustibles fossiles ne sont transformables en énergie utilisable qu'après des milliers d'années, donc non-renouvelables, alors que l'énergie de la biomasse bien gérée est renouvelable et peut être utilisée de façon continue [11].

2.1.4. Energie solaire

Il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord, nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- ❖ L'énergie solaire thermique ;
- ❖ L'énergie solaire photovoltaïque.

2.1.4.1. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation de l'énergie contenue dans le rayonnement Solaire en chaleur. Cette transformation en chaleur, donc en énergie thermique, permet de Chauffer de l'eau ou de l'air dans différents cas d'applications solaires.

De ce principe de fonctionnement, on peut fabriquer des chauffe-eaux solaires, des cuisinières ou alors des sècheurs solaires [11].

2.1.4.2. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque, est composé de modules photovoltaïques eux-mêmes composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles [11].

2.2. Les réseaux de transport

Il est constitué des lignes et des postes de transformation issus des centrales et son rôle est de transporter l'électricité des centrales de production vers les grands centres de consommation, d'alimenter les grandes et les petites industries et de servir pour les interconnexions avec les pays voisins [2].

2.3. Réseaux de répartition

Il comprend les lignes de transport et les postes de transformation intermédiaires entre le réseau de transport et le réseau de distribution, son principe est d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Sois du domaine public avec l'accès au réseau de distribution (MT) ;
- Sois du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grandes consommations livrées directement en (HT) [8][2].

2.4. Réseaux de distribution

Il se compose de lignes et des postes de transformation qui alimentent les habitations, l'éclairage public, les petites et moyennes entreprises. Le réseau est composé d'un réseau moyen tension et d'une basse tension [2].

2.4.1. Les réseaux de distribution à moyenne tension HTA

- ✓ 10 kV et 30 kV le plus répandu ;
- ✓ Neutre à la terre par une résistance ;
- ✓ Limitation du courant neutre à 300A pour les réseaux aériens ;
- ✓ Limitation du courant neutre à 1000A pour les réseaux souterrains ;

✓ Réseaux souterrains en boucle ouverte.

2.4.2. Réseaux de distribution a basse tension BTA

✓ 230/400 V ;

✓ Neutre directement à la terre ;

✓ Réseaux de type radial, maillé et bouclé.

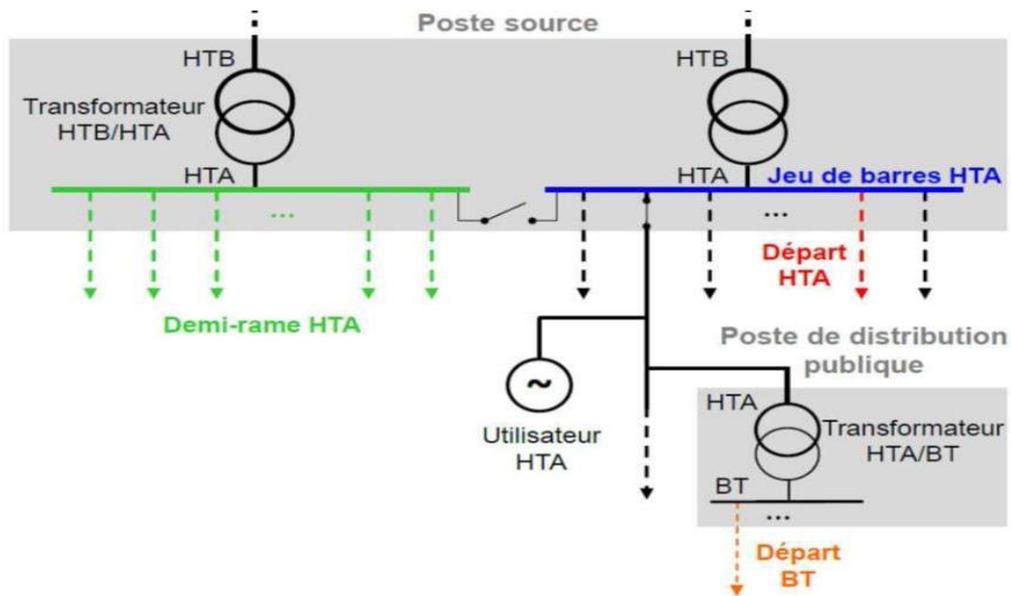


Figure 2: Schéma résumant l'organisation des réseaux de distribution.

2.4.3. Différentes structures du réseau de distribution électrique

Il existe quatre structures différentes des réseaux de distribution :

2.4.3.1. Structure radiale

Elle est recommandée automatiquement dans toutes les installations industrielles.

Son principe est d'assurer une liaison unique entre la source et le récepteur. La structure radiale possède des avantages dont on peut citer [2].

- ❖ La plus simple ;
- ❖ Elle est moins onéreuse ;
- ❖ Elle nécessite une protection par appareillage simple.

Cependant, elle présente quelques inconvénients tels que des chutes de tension importantes ainsi que la mise hors service des consommateurs sans aucune possibilité de secours en cas de coupure en tête de ligne [4][2][24].

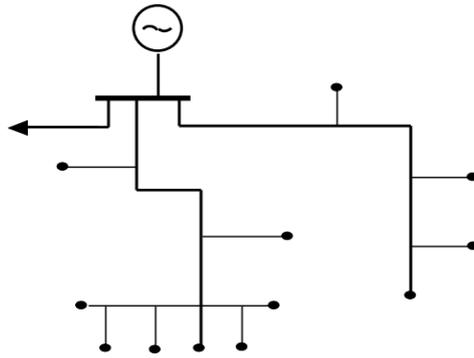


Figure 3: schéma d'une structure radiale.

2.4.3.2. Structure en boucle

Dans un réseau bouclé, une ligne est issue d'un poste d'interconnexion et y revient après avoir alimenté plusieurs postes de transformation.

Cette structure possède des avantages dont on peut citer.

- ✓ Faibles chutes de tension ;
- ✓ Un seul dispositif de protection par boucle ;
- ✓ Un bon rendement.

Cependant, elle présente différents inconvénients, tels qu'un courant de court-circuit très élevé, une réalisation coûteuse, une difficulté d'exploitation [2][4][24].

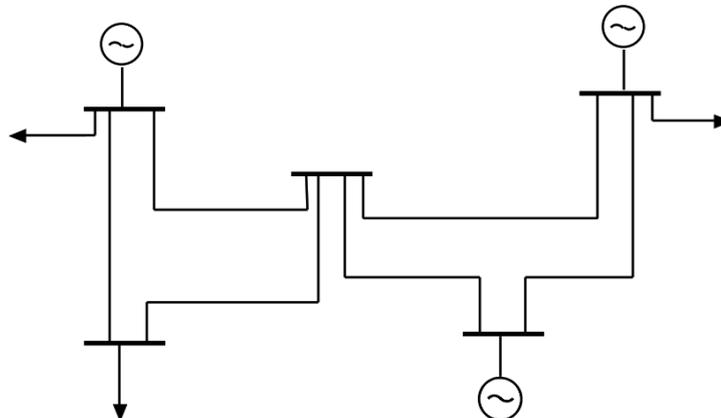


Figure 4: Schéma d'une structure en boucle

2.4.3.3. Structure en maille

Tous les postes débitent en parallèle et entièrement bouclés sur eux même. Généralement, cette structure est adoptée dans les agglomérations. Elle présente aussi des avantages se résumant.

- ✓ Bonne continuité de service ;

✓ Bon rendement et faible chute de tension ;

Cependant, elle présente quelques inconvénients tels que, la réalisation est coûteuse et procédée d'une étude très complexe, et un fort courant de court-circuit [4][2][24].

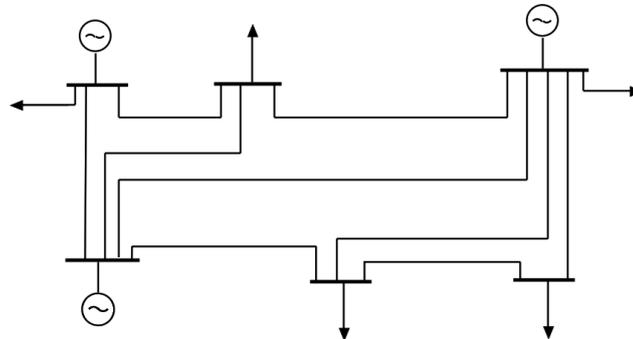


Figure 5: schéma d'une structure en maillé.

2.4.3.4. Réseau arborescent

C'est un circuit constitué d'une canalisation alimentant plusieurs charges d'un même Point, cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Cette structure présente des avantages comme des faibles chutes de tension et une bonne sécurité d'exploitation. Comme elle présente aussi des inconvénients, tels qu'un fort courant de court-circuit et réalisation coûteuse [4][2].

3. Qualité de l'énergie électrique

3.1. Définitions

La Qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les fournisseurs de l'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion des sites industriels, et les constructeurs d'équipements.

La Qualité de l'énergie est généralement censée exprimer la qualité de la tension et/ou la qualité du courant et peut être définie comme : la mesure, l'analyse et l'amélioration de la tension du bus pour maintenir une forme d'onde sinusoïdale à la tension et la fréquence nominale. Cette définition inclut tous les phénomènes momentanés et en régime permanent [3][10].

Le terme de qualité de l'énergie peut dépendre de deux facteurs :

- ✓ La continuité de l'alimentation (en tension et en courant) ;
- ✓ Qualité de la tension.

3.2. Continuité de l'alimentation en tension et en courant

Recouvre les coupures et les interruptions du réseau. Il existe des coupures longues durées égale ou supérieur à 3 min et coupure dite brève ça durée est inférieur à 3 min.

Donc la continuité de l'alimentation dépend des choix techniques et des investissements réaliser pour assurer l'alimentation d'une zone donnée.

3.3. Qualité de la tension

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50HZ ou de 60 HZ.

Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

- ✓ La fréquence ;
- ✓ L'amplitude des trois tensions ;
- ✓ La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde ;
- ✓ La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif [4].

4. Perturbation des réseaux électriques

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations.

4.1. Variation de l'amplitude

Il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais c'est des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

4.2. Modification de la forme d'ondes

L'onde n'est plus sinusoïdale et peut être considérée comme la superposition d'une onde à fréquence fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

4.3. Variation de la fréquence

Les variations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur les groupes électrogènes et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz +/-1%.

4.4. La dissymétrie de système triphasé ou un déséquilibre

Dans un système triphasé, l'alimentation de charges monophasées (trains, fours électriques de grande puissance) entraîne des dispersions sur les modules des tensions et leurs déphasages ne sont plus égaux [4].

5. Classification des perturbations électriques

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension, on distingue quatre types de perturbations électriques comme citer précédemment.

- ✓ Les variations de l'amplitude ;
- ✓ Les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale ;
- ✓ Les modifications de la forme d'onde ;
- ✓ La dissymétrie du système triphasé (déséquilibre).

Il existe un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée.

- ✓ Les perturbations transitoires ;
- ✓ Les perturbations de courte durée ;
- ✓ Les perturbations permanentes.

• Les perturbations électriques transitoires

Les perturbations électriques transitoires, ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre.

• Les perturbations de courte durée

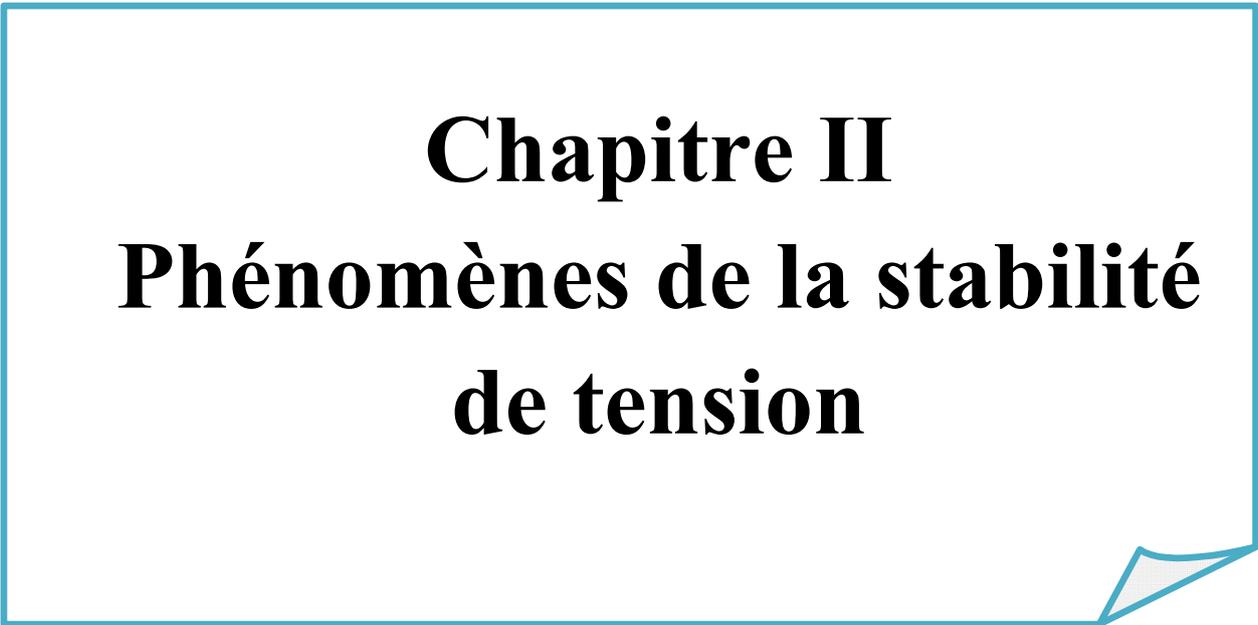
Les perturbations de courte durée, sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de court-circuit. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques.

- **Les perturbations permanentes**

On retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non- linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande [5].

6. Conclusion

Le système électrique est caractérisé par sa taille et complexité, cette complexité structurelle implique de plus en plus l'évolution des problèmes de stabilité et des phénomènes dynamiques. Dans ce chapitre, on a présenté la structure et la classification de réseau électrique, ainsi nous avons traité les différents phénomènes perturbateurs qui influencent sur la qualité de la tension.



Chapitre II
Phénomènes de la stabilité
de tension

1. Introduction

L'augmentation massive de la consommation d'électricité et les contraintes économiques obligent à construire de nouvelles infrastructures permettant l'utilisation des réseaux électriques au-delà de leurs limites de stabilité et de sécurité. En effet l'instabilité des réseaux électriques se manifeste par un écart entre la puissance mécanique (production) et la puissance électrique (consommation).

Les situations des pays à forte consommation augmentent encore les risques d'apparition du phénomène d'instabilité [6]. Pour éviter cette catastrophe, l'étude de la stabilité des réseaux électriques s'impose. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la classification des différents types et l'analyse de la stabilité des réseaux électriques.

2. Définition de la stabilité des réseaux électrique

Au fil des années, plusieurs études ont permis de comprendre le mécanisme de la stabilité dans les systèmes de puissance électrique [12].

La stabilité d'un système de puissance se rapporte à la capacité d'un système de puissance, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, retrouver l'état d'équilibre après avoir subi une perturbation de telle sorte que l'ensemble du système reste opérationnel.

On dit qu'un système de puissance électrique est stable si à la suite d'une perturbation, il peut passer d'un état ou régime stationnaire à un autre régime stationnaire en passant par le régime transitoire sans la perte du synchronisme [13].

3. Les phénomènes dynamiques se produisant sur les réseaux

Dans les réseaux électriques, plusieurs phénomènes peuvent apparaître. Ces phénomènes ont des origines physiques, qui sont souvent des perturbations. Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue deux approches différentes de phénomènes dynamiques [12].

➤ **Petites perturbations** : c'est la capacité de système de maintenir l'équilibre en présence des fluctuations normales, de faible amplitude, des grandeurs électriques ou mécaniques comme :

- Une variation continue de la charge ;
- manœuvre d'équipement.

Ces phénomènes se manifestent souvent par des oscillations peu amorties du système et prennent quelques secondes.

➤ **Grandes perturbations** : ce type de perturbation correspond à un court-circuit, au déclenchement accidentel d'un générateur [12].

Il existe quatre groupes principaux de phénomène dynamique [12] :

3.1. Phénomènes de propagation

Ils se produisent sur les lignes de transport haut tension de grande longueur, et correspondent à la propagation des ondes électromagnétiques provoquées par des coups de foudre ou des opérations de coupure et de fermeture des organes de coupure sur le réseau. La gamme de temps de la dynamique de ces phénomènes va de la microseconde à la milliseconde. Ils possèdent les dynamiques les plus rapides.

3.2. Phénomènes électromagnétiques

Sur une échelle de temps de quelques millisecondes, ces phénomènes se produisent dans l'enchevêtrement des générateurs et des moteurs (les enroulements, armatures et amortisseurs.) et dans des dispositifs d'électronique de puissance et génèrent des forts courants et des couples élevées au sein des générateurs.

Ces phénomènes dérivent d'une perturbation (tel un court-circuit), d'une opération d'un organe de protection ou d'une interaction entre les machines et le réseau.

Au-delà de ce laps de temps (quelques millisecondes), les inerties de la turbine et du générateur sont suffisantes pour empêcher toute variation importante de vitesse de rotor.

3.3. Phénomènes électromécaniques

Ce sont des phénomènes liés au rotor qui comprennent principalement les champs du rotor, l'amortissement des enchevêtrements et les inerties du rotor. Ils sont principalement dus au mouvement des masses tournantes de générateurs et des moteurs.

La durée de ces phénomènes électromécanique s'étend environ d'une fraction de seconde à plusieurs secondes. Ils surviennent à la suite d'une perturbation, d'une opération de commande sur le contrôle de tension ou sur le contrôle de la turbine.

3.4. Phénomènes thermodynamiques

C'est des phénomènes dynamiques les plus lentes, ce temps varie de quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes.

Ils se produisent dans les chaudières des centrales thermiques lors de la demande de commande automatique de génération, mise en application suite à une perturbation d'équilibre entre la production et la consommation de puissance.

4. Classification de la stabilité

L'analyse des problèmes de stabilité et l'identification des facteurs contribuant à la perte de stabilité a permis d'améliorer la stabilité des réseaux électriques et de classer la stabilité en fonction de leur nature. Pour cette classification, on se base surtout sur :

- La nature physique de l'instabilité ;
- L'amplitude de perturbations ;
- La durée des phénomènes ;
- Les méthodes de calcul et prédiction utilisée pour étudier la stabilité [14]. Alors suivant ces paramètres, on distingue trois types de stabilité [13]
- ✓ La stabilité de l'angle de rotor ;
- ✓ La stabilité de fréquence ;
- ✓ La stabilité de tension.

La figure 6 résume la classification des différents types de la stabilité des systèmes de puissance [14].

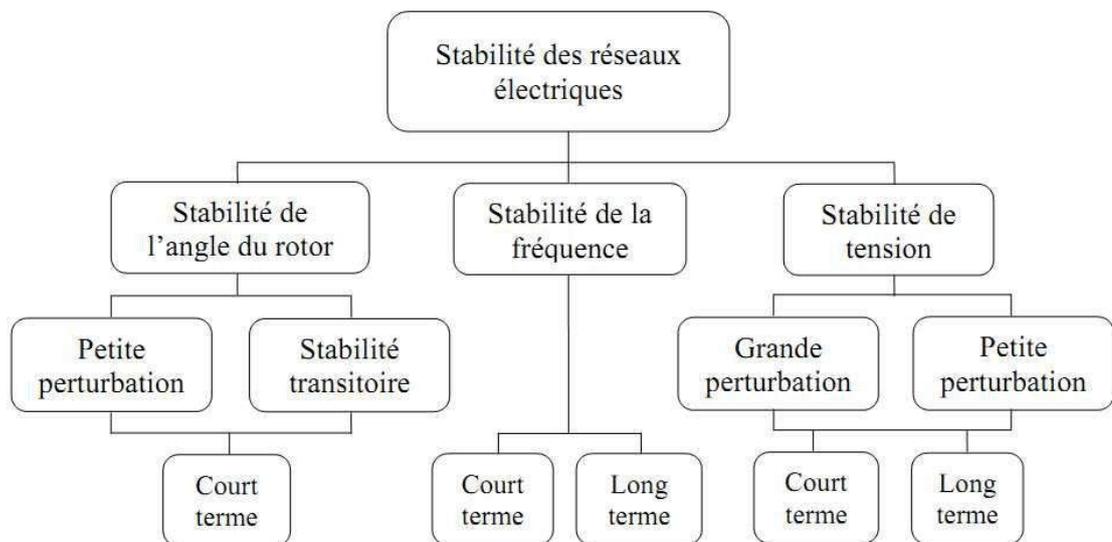


Figure 6: La classification des différents types de la stabilité des systèmes de puissance.

4.1. Stabilité de l'angle de rotor

La capacité d'un ensemble de génératrices synchrones interconnectées de conserver le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normal ou après une perturbation est définie comme stabilité de l'angle de rotor.

Si l'écart entre les angles rotoriques des génératrices croît indéfiniment, ou si l'oscillation transitoire provoquée par une perturbation n'est pas suffisamment amortie pendant toute la période d'évaluation, le système est dit instable [15].

Nous pouvons classer la stabilité de l'angle du rotor en deux sous-catégories en fonction de l'amplitude de la perturbation :

4.1.1. Stabilité angulaire aux grandes perturbations

Elle est dite, aussi stabilité transitoire d'un système, concerne la capacité du réseau à maintenir le synchronisme suite à une perturbation sévère comme un court-circuit, arrêt d'un générateur [16].

La stabilité transitoire dépend non seulement de l'amplitude des perturbations et des conditions initiales, mais aussi des caractéristiques dynamiques de système. Elle se manifeste à court terme sous forme d'un écart croissant de façon aperiodique de certains angles de rotor.

L'instabilité qui en résulte, peut entraîner une perte de synchronisme avec d'autres générateurs, l'instabilité peut se manifester sous deux formes :

☞ Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut) elle est appelée instabilité de première Oscillation (First Swing Instabilité), elle s'étend sur 3 à 5 secondes.

☞ L'instabilité transitoire peut aussi se manifester autrement, sur une échelle qui varie de 10 à 20 secondes pouvant résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents causés par la perturbation, provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation (instabilité de multi-oscillations) [14].

4.1.2. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique)

Elle est définie par la capacité du système de puissance de maintenir le synchronisme en présence des petites perturbations. L'instabilité qui en résulte est sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non entre les angles de rotor. Elle ne dépend pas du niveau de perturbations, car celles-ci sont arbitraires et infiniment petites, mais elle dépend surtout du point de fonctionnement initial du système [12][14].

4.2. Stabilité de fréquence

La stabilité de la fréquence d'un système électrique se définit comme la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de sa valeur nominale face à une perturbation sévère, entraînant un déséquilibre important entre la puissance produite et la puissance consommée.

4.3. Stabilité de tension

Par définition, la stabilité de la tension est la capacité d'un système électrique à maintenir des valeurs de tension acceptables à tous les nœuds après une perturbation pour un état de fonctionnement initial donné.

On peut la définir aussi, comme La capacité à maintenir/rétablir l'équilibre entre la demande de l'énergie électrique et la production est donc critique pour la stabilité de la tension.

L'instabilité résultante se manifeste fréquemment sous forme de décroissance progressive de tension à quelques nœuds aboutissant un effondrement généralisé de la tension.

La stabilité de la tension comprend deux sous-classes principales.

- ☞ La stabilité de la tension de perturbation étendue ;
- ☞ La stabilité de la tension de perturbation faible [6].

4.3.1. Stabilité de tension aux grandes perturbations

La stabilité de la tension de perturbation importante fait référence à la capacité du système de maintenir des tensions constantes après avoir subi une perturbation telle que les défaillances du système, une perte de production, cette capacité est déterminée par l'interaction des commandes et des charges, ainsi que par des améliorations de protection continues et discrètes.

La détermination de la stabilité de la tension de perturbation importante nécessite l'examen de la réponse non-linéaire du système d'alimentation sur une période de temps suffisante, varie de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes [6].

4.3.2. Stabilité de tension aux petites perturbations

La capacité d'un système à maintenir des tensions constantes lorsqu'il est soumis à des petites perturbations, telles que des modifications incrémentielles de la charge du système sont appelées la stabilité d'une tension de faible perturbation.

Dans ce cas, les caractéristiques de la charge et des dispositifs de commande déterminent la capacité du système à maintenir les tensions équilibrées [6].

On peut définir les éléments qui influent sur la stabilité de la tension :

- ✓ Les génératrices et le comportement de leurs dispositifs de réglages et de protection.
- ✓ Les dispositifs à compensation shunt réglable et fixe.
- ✓ Les caractéristiques de la charge [16].

5. Analyse de la stabilité de tension

En termes de stabilité de tension, il existe deux formes d'analyse :

- ☞ Dynamique ;
- ☞ Statique.

L'analyse dynamique s'appuie sur des simulations en temps réel pour résoudre des équations de systèmes différentiels/algébriques non-linéaires, en revanche l'analyse statique est basée sur la solution des équations conventionnelles ou modifiées du problème d'écoulement de puissance.

5.1. Analyse dynamique

Dans le domaine de la modélisation des réseaux électriques, l'analyse dynamique apporte des réponses temporelles précises.

La détermination précise des temps critiques pour divers événements conduisant à une instabilité de tension est essentielle pour l'analyse post-perturbation et la coordination de la protection et de la commande. Néanmoins, en termes de calculs et de traitement des résultats, l'analyse dynamique prend beaucoup de temps.

L'analyse dynamique ne fournit pas aisément l'information concernant la sensibilité ou le degré d'instabilité de la tension, ce qui la rend impraticable pour l'analyse de certaines conditions du fonctionnement du système ou pour déterminer les limites de stabilité de la tension [17].

5.2. Analyse statique

Contrairement à l'analyse dynamique, l'analyse statique de la stabilité de tension implique seulement la solution des équations algébriques du problème d'écoulement de puissance. En fait, elle est bien plus efficace que l'analyse dynamique du point de vue du calcul. L'analyse statique est idéale pour la majeure partie des études dans lesquelles des limites de stabilité de tension pour des pré-contingences et des post-contingences doivent être déterminées.

Généralement, l'analyse de la stabilité statique de tension est utilisée afin de vérifier si un point de fonctionnement est stable ou instable, évaluer la marge de stabilité d'un point de fonctionnement et identifier le point d'effondrement de tension [17].

6. L'instabilité de tension

On définit la stabilité de la tension comme la capacité de maintenir une tension de barre constamment acceptable à chaque nœud du réseau, dans des conditions normales de

fonctionnement, après avoir subi une perturbation. L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable de la tension, aboutissant à un effondrement généralisé de la tension [17].

6.1. Causes de l'instabilité de la tension

L'instabilité de la tension est due à plusieurs causes parmi lesquelles, une augmentation des charges électriques, une augmentation de la puissance réactive ainsi qu'un transport de la puissance active sur de longues lignes de transmission. L'instabilité de tension se produit généralement dans les zones/bus faibles du réseau électrique cela conduit le système à l'effondrement de tension la plupart du temps.

Alors on peut citer les principales causes de l'instabilité de tension présentées comme suit.

☞ **Manque local d'énergie réactive**

L'effondrement de la tension se produit généralement sur les systèmes d'alimentation qui sont lourdement chargés, qui présentent une insuffisance de puissance réactive. L'effondrement de la tension est associé aux demandes de puissance réactive des charges qui ne sont pas satisfaites en raison des limitations sur la production et la transmission de la puissance réactive [6].

☞ **Charge, appelée trop importante**

C'est l'une des causes de l'instabilité de tension qui peut se produire en particulier lorsque la charge élevée est plus importante que celle prévue et le risque est d'autant plus grand que la consommation réactive est également plus grande que prévue [6].

☞ **Production trop éloignée de la consommation**

En général, les groupes de production sont suffisamment répartis sur le réseau pour qu'il n'y ait pas de grandes distances de transport d'énergie électrique. Cependant, il peut arriver que les groupes proches d'un point de consommation soient tous arrêtés, soit parce qu'ils sont en panne, soit parce qu'il n'est pas économique de les faire fonctionner durant certaines périodes.

De même, la distance électrique peut être augmentée par les indisponibilités de ligne, notamment à la suite d'incidents [6].

7. Écoulement de puissance

7.1. Concept général de l'écoulement de puissance

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 [17].

7.2. Objectif de l'étude de l'écoulement de puissance

Le calcul de l'écoulement de puissance est réalisé dans le but de [17] :

7.2.1. Définir l'état du réseau

Le but du calcul du flux de puissance d'un réseau est de déterminer l'état du réseau en fonction de la charge connectée et de leur répartition sur tous les accès au réseau. Ce calcul fournit une image précise du flux de puissance active et réactive de chaque élément du réseau de transmission et du niveau de tension de chaque nœud.

Ce calcul est basé sur des hypothèses :

Le réseau est stable et le générateur fournit de l'énergie sous forme de courant alternatif sinusoïdal et de tension triphasée équilibrée [17].

7.2.2. Calcul des flux de courant

La valeur du courant traversant chaque élément du réseau (ligne, un câble ou un transformateur) ne doit pas dépasser le courant nominal de ces composants. Les calculs de flux de courant ne doivent pas dépasser ces valeurs. Si la valeur actuelle est trop élevée, le composant peut surchauffer et, même exploser [17].

7.2.3. Calcul des pertes en ligne

Les calculs de flux de puissance permettent d'évaluer les pertes de puissance, dans les lignes et les transformateurs dues au flux de courant. Des pertes excessives peuvent entraîner une reconfiguration du réseau afin de minimiser les pertes globales du réseau [17].

7.2.4. Etablir une stratégie d'adaptation et de contrôle

Définir des instructions de contrôle pour régler chaque machine connectée au réseau en déterminant la tension du nœud et la puissance active et réactive que chaque générateur doit fournir pour assurer l'alimentation en énergie de chaque charge.

Ce calcul est également utilisé dans l'analyse de stabilité [17].

7.2.5. L'Optimisation de la capacité de transit de puissance

Enfin, des algorithmes basés sur le concept de contraintes et de fonctions objectifs peuvent être utilisés pour optimiser le flux de puissance et augmenter la capacité de transmission disponible dans le réseau [17].

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode de gauss Seidel :

➤ Définitions Méthode gauss Seidel

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une des plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance. Elle fixe, d'abord, des valeurs initiales des inconnus pour un premier calcul. Puis, les valeurs trouvées seront utilisées dans le processus itératif. Les opérations s'arrêtent une fois que la différence entre les valeurs obtenues entre deux itérations est inférieure à une tolérance notée (ε).

➤ Classification des jeux de barre

On peut classer les jeux de barres en trois catégories :

- Jeu de barres de référence (SLACK ou SWING BUS) où V et θ sont défini ;
- Jeu de barres de charge (type P-Q bus) où la puissance active P et la puissance réactive Q sont définies ;
- Jeu de barres à tension contrôlée (type PV bus) où la puissance active P et le module de la tension V sont défini.

➤ Application de la méthode gauss Seidel

L'équation d'écoulement de puissance nous ramène au calcul des courants aux accès du réseau.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (1)$$

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* = V_i \left(\sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right)^* \quad (2)$$

On prend le conjugué de la puissance apparente, on aura :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = V_i^* Y_{ii} V_i + V_i^* \left(\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j \right) + V_i^* \left(\sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j \right) \quad (3)$$

Le processus d'itération de gauss Seidel, peut être alors appliqué comme suit. Pour le Jeu de barres de référence où V et θ sont définis, P et Q à déterminé.

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{S_i^*}{V_i^{*k}} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{k+1} \right) - \left(\sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^k \right) \right) \quad (4)$$

Pour le Jeu de barres à tension contrôlée (type PV bus) ou la puissance active et le module de la tension V sont définis, Q a déterminé.

En calcul la puissance réactive d'après l'équation suivante

$$Q_i^{k+1} = -\text{imag}\{V_i^* Y_{ii} V_i^k + (\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{k+1}) + (\sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^k)\} \quad (5)$$

Une fois Q_i^{k+1} est déterminée, on utilise l'équation (5), pour calculer la nouvelle valeur de nœud de génération i et en tirer la phase θ_i . Habituellement, une limite maximum et/ou minimum

$$Q_{min} \leq Q_i^{k+1} \leq Q_{max}$$

Q_i^{k+1} Doit être spécifié. Si Q_{min} excède la limite spécifiée Q_{max} , cette dernière est alors choisie à la place de la valeur calculée pour être utilisée dans l'équation (5)

Pour Jeu de barres de charge (type P-Q bus) ou P et Q , sont définies. Le module de la tension étant spécifié, on doit garder seulement l'angle de phase calculé en effectuant l'opération suivante.

$$V_i^{k+1} = \frac{V_i^{k+1}}{|V_i^{k+1}|} |V_{i,\text{spécifié}}| \quad (6)$$

Pour accélère la convergence de la méthode, les tensions durant les itérations successives, doivent être modifiée comme suit.

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \alpha(V_i^{k+1} - V_i^k) \quad (7)$$

Où : (α) Est un facteur d'accélération.

Pour la majorité des réseaux électriques, est compris entre

$$1.1 \leq \alpha \leq 2$$

8. Courbe PV et QV

8.1. Courbe PV

Les courbes PV sont utilisés pour l'analyse conceptuelle de la stabilité de la tension et l'étude des systèmes de puissance. Cette méthode est également utilisée pour les grands réseaux maillés est également une transmission sur une interface ou liaison de transmission. Permettent de tracer la tension de plusieurs bus.

8.1.1. Les Procédures pour obtenir la courbe PV

☞ Pour cette analyse P, c'est-à-dire que, la puissance dans une zone particulière est augmentée par étapes et que la tension (V) est observée à certains bus de charge critique, puis des courbes pour ces bus particuliers seront tracées.

☞ Le processus d'analyse "PV" (Power-voltage) consiste à utiliser une série de solutions de flux de puissance pour augmenter les transferts de MW et surveiller ce qui arrive aux tensions du système par conséquent.

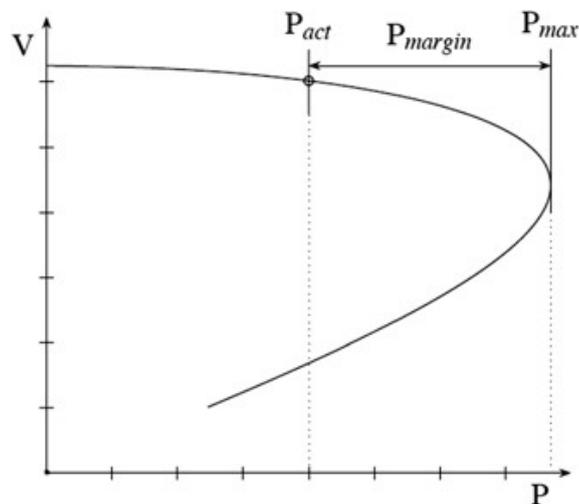


Figure 7: Marge de puissance.

8.1.2. Analyse de la courbe PV

Dans la courbe P-V illustrée à la figure 7, il y a trois régions liées à la charge de puissance réelle P.

- Dans la première région jusqu'à la limite de capacité de charge, (L'équation a deux solutions pour chaque P dont l'une est une tension stable et autre tension instable.)
- Si la charge est augmentée, deux solutions fusionneront et P est maximal.
- Si la charge est encore augmentée, l'équation du flux de puissance n'a pas de solution, la tension correspondant au "point de charge maximum est appelée «tension critique ».
- La distance entre le point de fonctionnement et le point de chargement maximal est appelé marge de chargement ou marge de puissance réelle ou marge de stabilité de tension.

8.1.3. Inconvénients de la méthode de la courbe PV

- ✓ À mesure que la charge sur le système approche du point critique, le problème de convergence se produit dans la résolution de l'équation de flux de puissance ;
- ✓ Ces méthodes ne donnent pas d'informations utiles sur les causes de l'instabilité de tension.

8.2. Courbe QV

Souvent, une caractéristique plus utile pour certains aspects de l'analyse de la stabilité de la tension est les courbes Q-V. Celles-ci peuvent être utilisées pour évaluer les exigences de compensation de puissance réactive, car ils montrent la sensibilité et la variation des tensions de bus par rapport aux injections ou absorptions de puissance réactive [19].

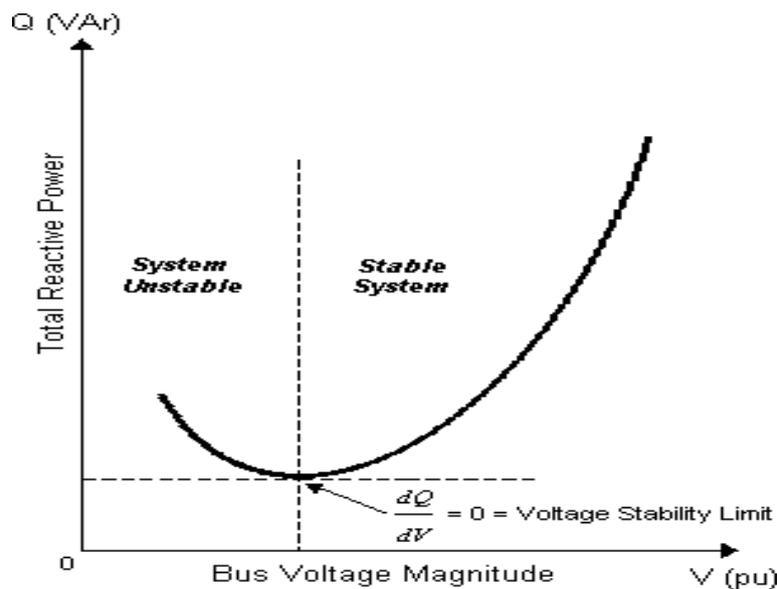


Figure 8 : Courbe QV

La Figure 8 montre une courbe Q-V. Semblables aux courbes P-V, les courbes Q-V ont une limite de stabilité de tension, qui est le bas de la courbe, où λ est égal à zéro. Le côté droit est stable puisqu'une augmentation de Q, s'accompagne d'une augmentation de V. Le côté gauche est instable puisqu'une augmentation de Q représente une diminution de V, qui est l'un des facteurs d'instabilité qui juge qu'un système est instable en tension.

On a vu que les systèmes d'alimentation complexes ont des caractéristiques PV similaires à celles des systèmes radiaux simples tels que celui de la figure 7. C'est la raison pour laquelle les courbes PV jouent un rôle majeur dans la compréhension et l'explication de la stabilité de la tension et sont largement utilisées pour son étude.

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini la stabilité des réseaux électriques en général et on a cité ses différents types, puis nous avons présenté les diverses analyses de la stabilité de tension et l'instabilité. Finalement, on a présenté deux différentes méthodes de l'analyse de stabilité de tension qui sont : les courbes P-V et Q-V, et la méthode d'écoulement de puissance.

Chapitre III
Mécanismes et analyse de la
stabilité de tension

1. Introduction

La tension a toujours été considérée comme faisant partie intégrante de la réponse du système électrique et constitue un aspect important de la stabilité et de la sécurité de système. Ainsi, l'instabilité et l'effondrement de la tension ne peuvent être séparés du problème général de la stabilité des systèmes cependant, ces dernières années l'analyse de la stabilité de la tension a pris de l'importance, principalement en raison de plusieurs incidents, l'effondrement de la tension injectées en France, au Japon, en Belgique et en Floride [22].

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse fondamentale du phénomène de la stabilité de tension. Dans un premier temps, présentons d'abord la stabilité de tension d'un circuit résistif, ensuite, on décrit la stabilité de tension d'un circuit à courant alternatif et les facteurs qui affectent la stabilité tension. Nous terminons en introduisant l'analyse statique de stabilité tension à l'aide des courbes PV et QV.

2. Stabilité de tension d'un circuit purement résistif

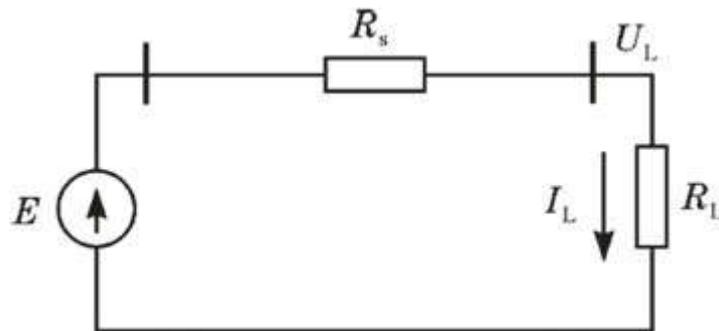


Figure 9: schéma de circuit de purement résistif.

Sois le circuit simple, purement résistif illustre dans la figure 9.

Dans le cas $R_s = R_l$ ou (circuit adapté).

Avec la loi des mailles.

On a :

$$\begin{cases} I_s = I_l = I \\ R_s = R_l = R \end{cases}$$

$$E = R_s I_s + R_l I_l \tag{8}$$

$$I = \frac{E}{2R} \tag{9}$$

$$P_{LMAX} = U * I = \frac{E^2}{4R} \tag{10}$$

Dans le cas où R est variable figure 10 :

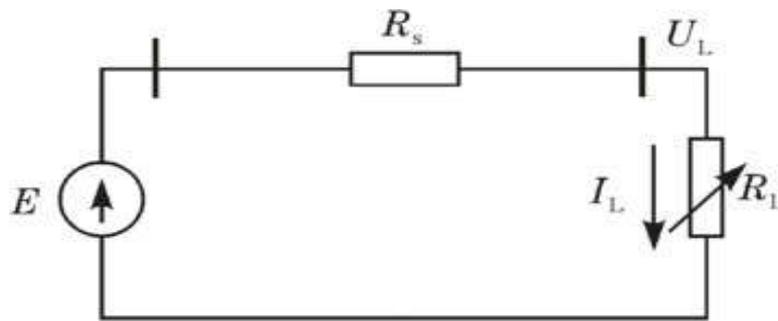


Figure 10: schéma d'un circuit purement résistance variable.

Avec la loi des mailles :

$$P_L = I_L * U_L \quad (11)$$

$$I = \frac{E}{R_L + R_S} \quad (12)$$

$$U_L = \frac{E}{R_S + R_L} * R_L \quad (13)$$

Sur la figure 11 sont représentées les variations de P , I , U , en fonction du rapport.

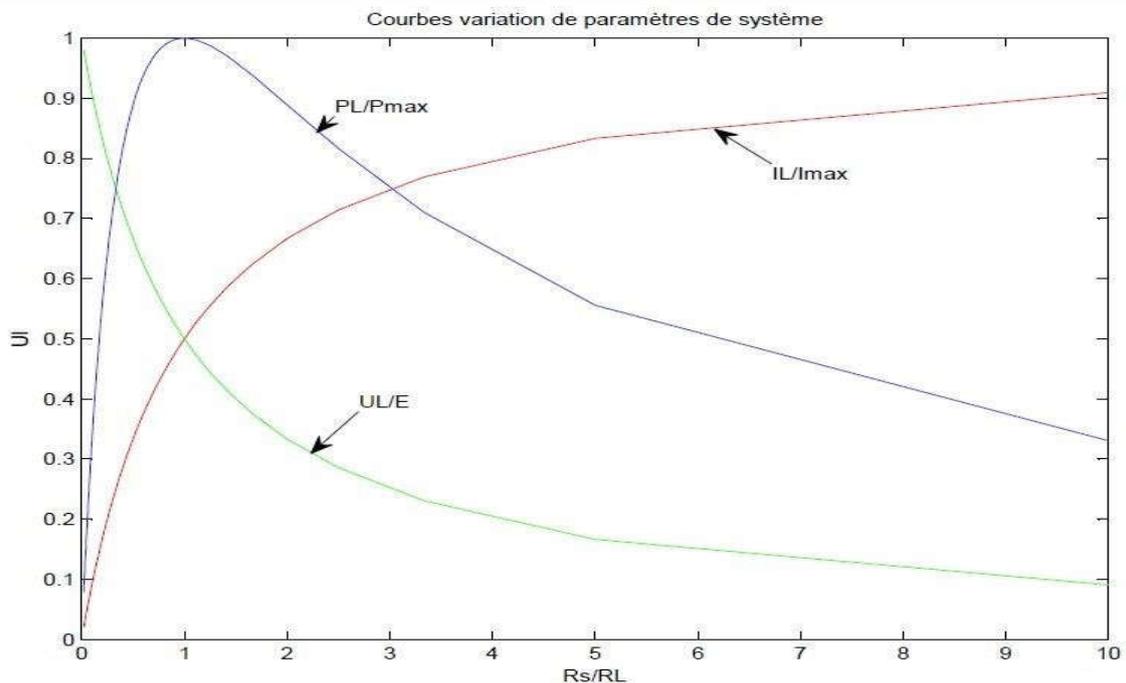


Figure 11: variation des paramètres de système en fonction de R_L/R_S .

Dans le cas où : $R_1/R_s = 1(R_s/R_1)$

- La puissance est maximale ;
- L'intersection entre le courant et la tension.

3. Stabilité de tension des circuits alternatifs

Le contrôle de la tension est étroitement lié à la puissance réactive dans le système d'alimentation en alternatif dominé par la réactance.

Un circuit alternatif simple est donné à titre d'exemple et la charge est modélisée en impédance constante, comme illustrée sur la figure 12.

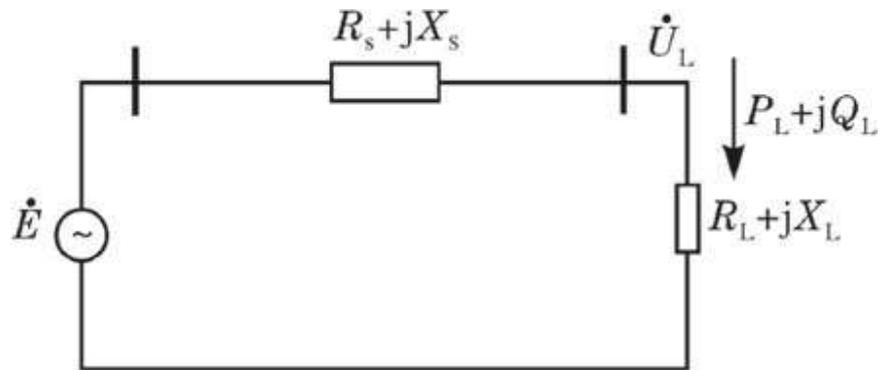


Figure 12: Schéma de circuit Alternatif simple.

Dans la figure 12 le courant est donné par.

$$I_L = \frac{E}{\sqrt{(R_L + R_S)^2 + (X_L + X_S)^2}} \quad (14)$$

En utilisant diviseur de tension on obtient la tension de la charge.

$$U_L = \frac{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}}{\sqrt{(R_L + R_S)^2 + (X_L + X_S)^2}} * E \quad (15)$$

La puissance de la charge

$$P_L = R_L * I^2 \qquad Q_L = X_L * I^2$$

On obtient :

$$P_L = R_L * \frac{E^2}{(R_S + X_S)^2 + (R_L + X_L)^2} \quad (16)$$

Et la Puissance réactive est donnée par :

$$Q_L = X_L * \frac{E^2}{(R_S + X_S)^2 + (R_L + X_L)^2} \quad (17)$$

On suppose qu'on peut faire varier arbitrairement R_L et X_L :

1^{er} cas :

$$\begin{cases} R_L = R_S \\ X_L = -X_S \end{cases}$$

Et compte tenu des équations (16), (17) :

$$\begin{cases} P_{\max} = \frac{E^2}{4R_S} \\ Q_1 = 0 \end{cases}$$

La tension sera :

$$U = E * \frac{\sqrt{R_S^2 + X_S^2}}{2R_S} \quad (18)$$

Du point de vue de la source : la charge est une charge purement résistive et cette source de l'alimentation ne génère aucune puissance réactive.

2^{ème} cas :

$$\begin{cases} R_L = -R_S \\ X_L = X_S \end{cases}$$

On trouve la puissance maximale réactive consommée par la charge.

$$\begin{cases} Q_{\max} = \frac{E^2}{4X_S} \\ U = \frac{E\sqrt{R_S^2 + X_S^2}}{2X_S} \end{cases} \quad (19)$$

Du point de vue de la source :

- La charge est une réactance pure ;
- La source d'alimentation ne génère aucune puissance active.

4. Classification de stabilité de tension

La stabilité de la tension peut être globalement classée en deux catégories [22] :

4.1. Stabilité de la tension à grande perturbation

Elle est définie comme la capacité du système électrique à maintenir des tensions stables pour des perturbations importantes telles que des défauts du système, une perte de charge ou une perte de production.

La stabilité de la tension de perturbation peut être subdivisée en deux types.

- ☞ Stabilité transitoire.
- ☞ Stabilité à long terme.

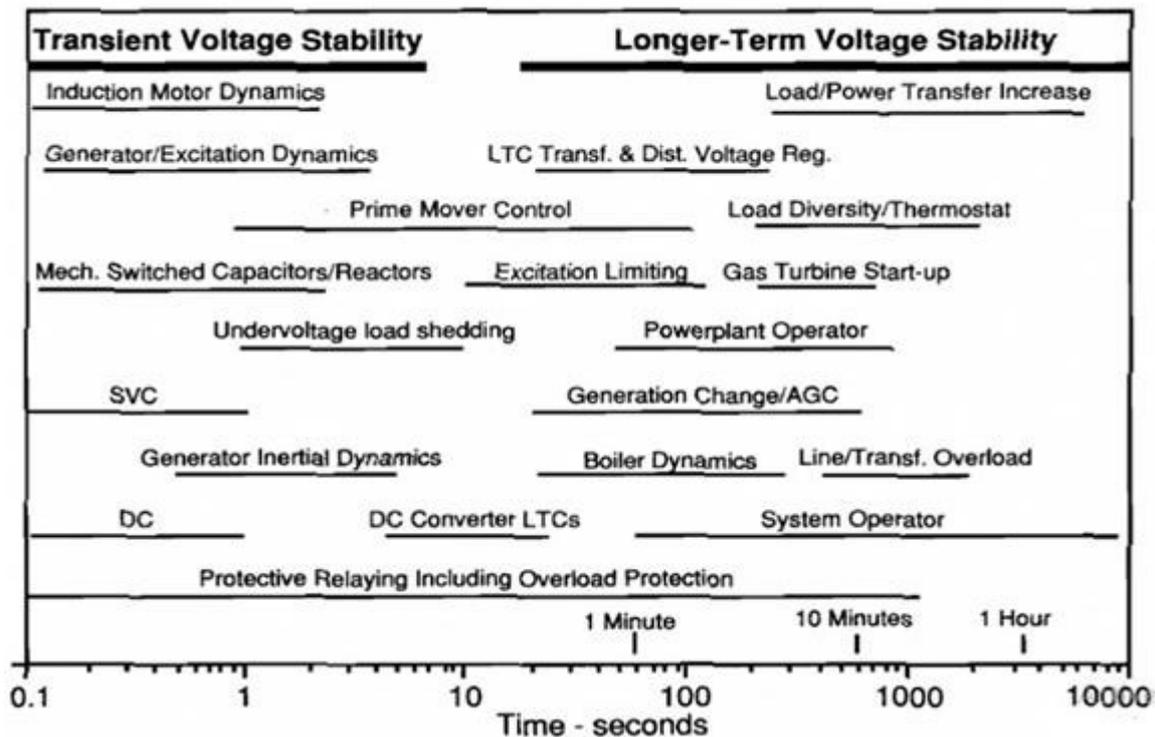


Figure 13: Phénomènes de stabilité de tension et réponses temporelles.

4.2. Stabilité de tension de petite perturbation (petit signal)

La stabilité de la tension aux petites perturbations concerne la capacité d'un système à contrôler les tensions suite à de petites perturbations, telles qu'un changement progressif de charge, ce type de stabilité peut être étudié avec des approches en régime permanent qui utilisent la linéarisation de la dynamique du système.

5. Stabilité d'un réseau électrique

La stabilité d'un réseau électrique est la propriété qui lui permet de rester dans un état d'équilibre, pour des conditions de fonctionnement normales, et de retrouver son état initial, suite à une perturbation. Selon la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude de perturbations [23].

6. Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension

L'instabilité de la tension d'un grand réseau est un problème de nature complexe. Plusieurs éléments d'un réseau contribuent à la création d'un scénario propice à une instabilité de Tension. Les éléments suivants ont un impact important sur la stabilité de la tension du réseau.

- Les génératrices et le comportement de leurs dispositifs de réglages et de protection ;
- Les dispositifs à compensation shunt réglable et fixe ;
- Les changeurs de prises en charge (OLTC) et les transformateurs fixes ;
- Les relais de protection ;
- Les caractéristiques de la charge.

Parmi ces éléments qui influent sur la stabilité de la tension, on retrouve les lignes de transport d'énergie. Les lignes de transport affectent considérablement les niveaux de tension en fonction de la charge. Si la charge est importante, la tension sur le réseau a tendance à être faible, par contre si la charge est faible, le niveau de tension peut en différents endroits sur le réseau, s'élever au-dessus de la tension nominale. Sur les lignes de transport non compensées, le taux de régulation de tension a donc tendance à être mauvais [17].

7. Analyse statique stabilité de tension

7.1. Capacité de transmission d'un système électrique

Avec le développement continu des systèmes électriques, il est urgent de maximiser la capacité de transmission des réseaux existants afin de minimiser les coûts d'exploitation et d'améliorer les avantages économiques de l'exploitation du système.

Cependant, à mesure que la puissance transmise augmente, la capacité du réseau électrique à résister aux perturbations diminue progressivement, augmentant le risque de sécurité du système. Par conséquent, dans les grands systèmes électriques interconnectés, le besoin urgent des systèmes électriques est de déterminer avec précision la capacité de transmission de système électrique et de maximiser les exigences de charge électrique sous les contraintes de sécurité et de fiabilité [20].

7.2. Courbe PV

Avant de décrire des méthodes d'analyse plus complexes, un exemple simple est donné en utilisant les courbes PV et QV, qui sont deux méthodes de flux de puissance largement utilisées pour visualiser et déterminer le phénomène de stabilité de tension [5]. Considérons le modèle simplifié à deux bus de la figure 14.

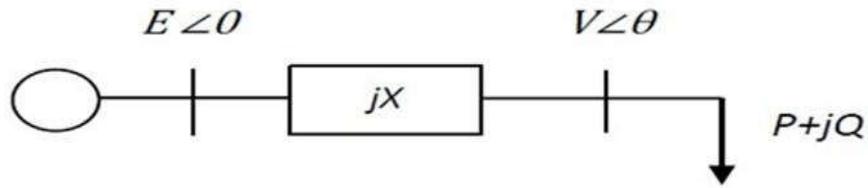


Figure 14: Système à deux bus.

On a la tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V = E - jXI \quad (20)$$

Et la puissance apparente est donnée par :

$$S = P + jQ = VI^* = V \frac{E^* - V^*}{-jX} \quad (21)$$

Ce qui nous donne :

$$S = \frac{j}{X} (EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2) \quad (22)$$

Par identification (20) (21) :

$$\begin{cases} P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \\ Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta \end{cases} \quad (23)$$

Ainsi :

$$\begin{cases} P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \\ Q + \frac{V^2}{X} = \frac{EV}{X} \cos \theta \end{cases} \quad (24)$$

En sommant les 2 équations, on aura

$$\begin{cases} P^2 + (Q + \frac{V^2}{X})^2 = \frac{E^2 V^2}{X^2} \\ P^2 + Q^2 + \frac{2V^2 Q}{X} + \frac{V^4}{X^2} = \frac{E^2 V^2}{X^2} \\ X^2(P^2 + Q^2) + 2V^2 QX + V^4 = E^2 V^2 \end{cases} \quad (25)$$

Après développement, on aura :

$$V^4 + V^2(2QX - E^2) + X^2(P^2 + Q^2) = 0$$

On pose : $V^2 = Y$

$$Y^2 + Y(2QX - E^2) + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (26)$$

On a l'équation de 2^{ème} degré.

Alors :

$$\Delta = (2QX - E^2)^2 - 4(X^2(P^2 + Q^2))$$

- $\Delta > 0$ deux solutions ;
- $\Delta = 0$ solution double ;
- $\Delta < 0$ pas de solution dans \mathcal{R} .

La solution de l'équation (21) est donnée par :

$$V^2 = Y = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2P^2 - XE^2Q} \quad (27)$$

On suppose que :

$$p = \frac{PX}{E^2}, \quad q = \frac{QX}{E^2}, \quad v = \frac{V}{E}$$

En remplaçant dans l'équation (27), on aura :

$$(vE)^2 = -q \frac{E^2}{X} * X + \frac{E^2}{2} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - \frac{QE^2}{X} * X^2 * E^2} \quad (28)$$

Après simplification :

$$v^2 = \frac{1}{2} - q \pm \sqrt{\frac{1}{4} - q - p^2} \quad (29)$$

L'équation (29) nous permettra de tracer les différentes courbes PV et QV. La figure 15 représente le tracé de la courbe PV pour des $\cos\vartheta$ variable.

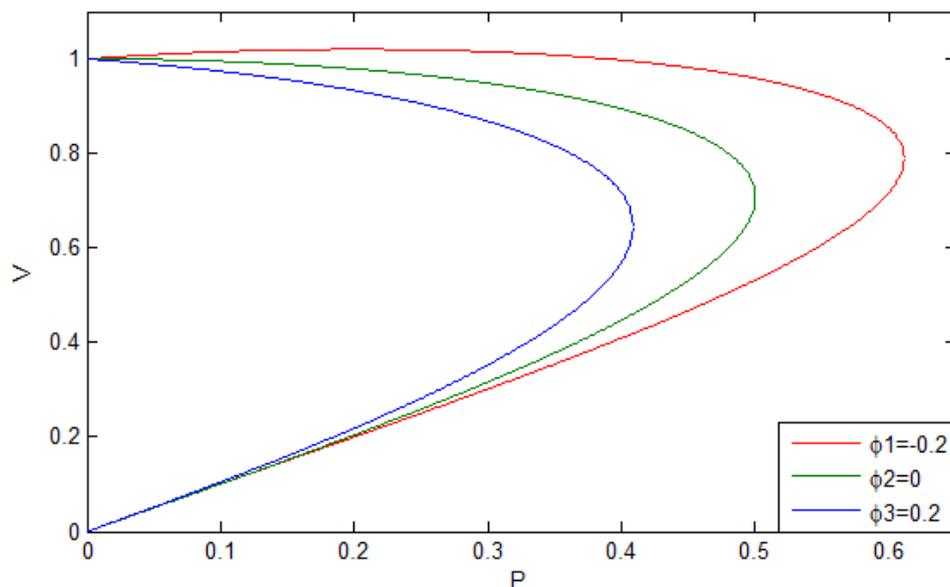


Figure 15: Famille de courbes avec facteur de puissance comme paramètre.

Commentaires

La figure 15 montre que le inductif (AR) a la puissance minimale par rapport à au Unitaire et au capacitifs, par contre le capacitif (AV) correspond a la courbe ayant la puissance maximale.

D'un autre côté, on peut remarquer que la chute de tension est compensée dans le cas de (AV) par rapport ou unitaire et inductif.

7.3. Courbes PV avec la réactance de la ligne

La figure 16 représente l'influence de la réactance de la ligne sur la caractéristique PV obtenue, pour des différentes valeurs de X , contrairement à la figure précédente, on remarque que lorsque en variant la réactance et en augmentant la puissance, la chute de tension reste la même tout au long des trois variations et elle montre que la marge de stabilité de la tension augmente quand la réactance de la ligne diminue.

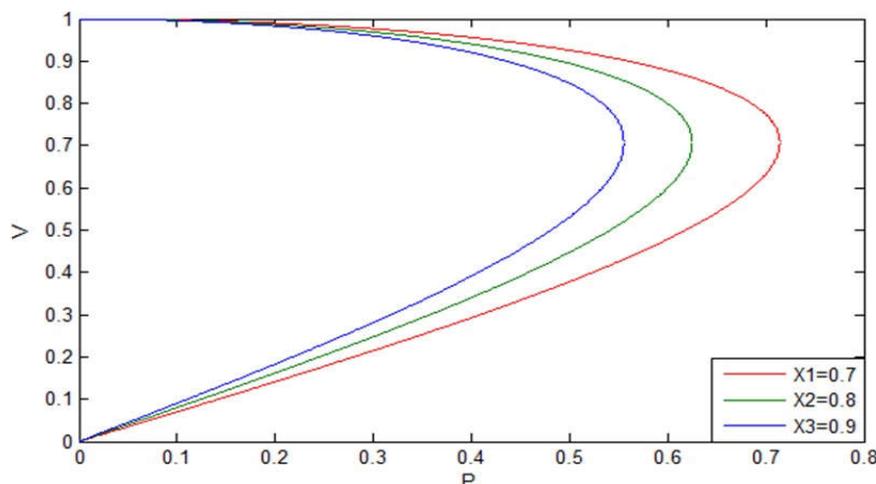


Figure 16: Famille de courbes avec réactance X total de la ligne.

7.4. Courbes QV

La figure 17 représente les caractéristiques QV en variant la réactance, mais les courbes QV ont une limite de stabilité de tension qui est en bas ou $dQ/dV=0$. En fait on peut voir sur la figure 11 illustrée que le côté droit de la courbe est stable puisqu'une augmentation de Q , s'accompagne avec une augmentation de V contrairement au côté gauche, on remarque que lorsque V augmente Q diminue, qui est l'un des facteurs d'instabilité alors on dit que ce côté est instable.

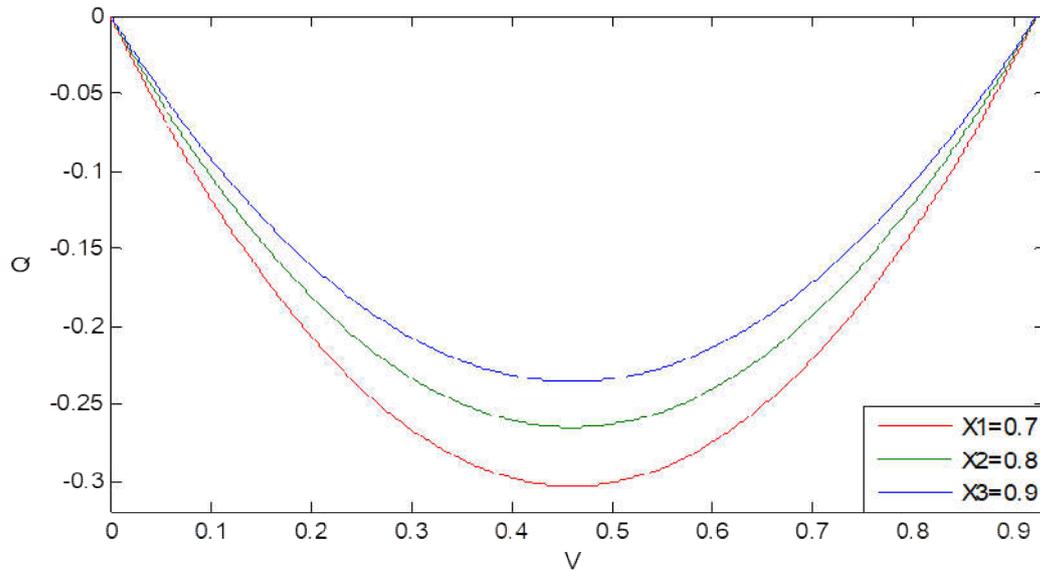


Figure 17: caractéristiques QV pour des différentes valeurs de X total de la ligne.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé des définitions et les phénomènes à l'origine de l'instabilité et nous avons modélisé et tracer les courbe PV et QV permettant une analyse statique de la stabilité de la tension.



Chapitre IV

Simulation et Résultats

1. Introduction

L'analyse de la stabilité de la tension dans les réseaux électriques est cruciale. Cette analyse a pour but le maintien de l'équilibre du système.

Dans ce chapitre, nous allons effectuer une analyse à l'aide des courbes PV et QV sur le réseau standard IEEE à 9 bus. Tout d'abord, nous allons effectuer un calcul d'écoulement de puissance à l'aide de la méthode de Gauss Seidel. Puis, nous allons implémenter le programme sous MATLAB pour visualiser, dans un premier temps, les différentes courbes PV et QV des différents bus, et dans un second, l'effet de la variation du $\cos \phi$.

2. Description du réseau

2.1 Topologie du réseau

Le réseau étudié est le réseau standard IEEE à 9 bus (Figure 18), il comprend 1 nœud balancier ou slack bus, 2 nœuds de génération ou nœuds PV, et 6 nœuds de charge ou nœuds PQ.

La puissance de base de ce réseau est 100MVA, et la fréquence de 50HZ.

Les paramètres des lignes et des charges sont donnés dans les tableaux ci-dessous avec :
Vbase : 230KV, Sbase : 100MVA.

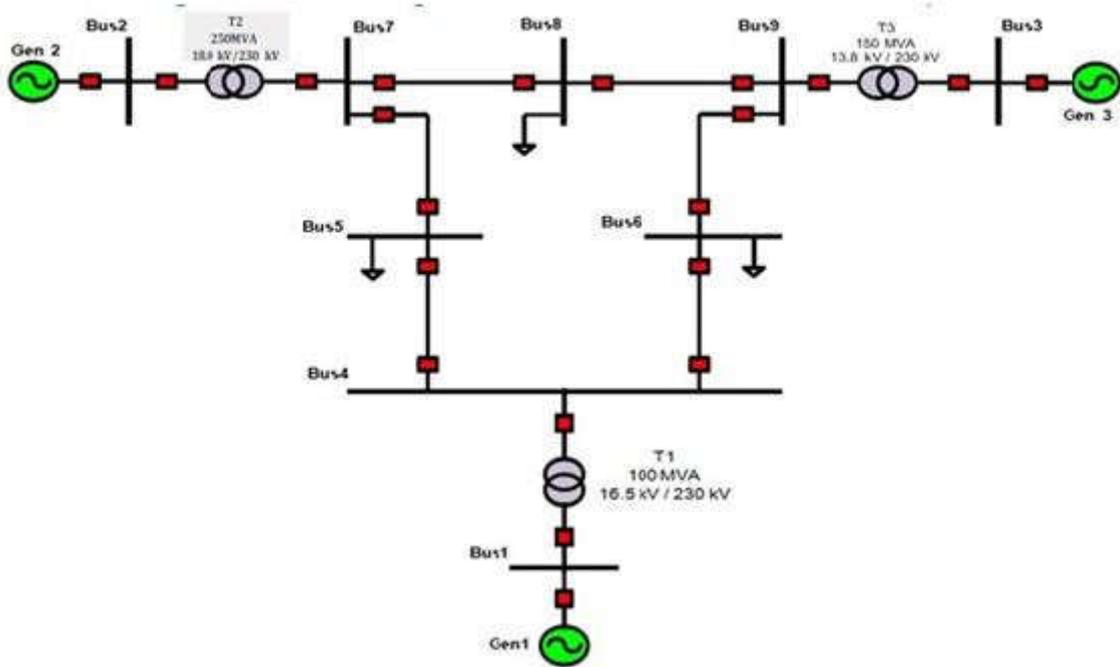


Figure 18 : La structure de système IEEE 9 bus.

2.1.1. Paramètres des différentes lignes du réseau

Tableau 2: Paramètres de la ligne IEEE 9.

Ligne du bus	Au bus	Résistance R	Réactance X	Susceptance B
1	4	0	0.0576	0
4	5	0.01	0.085	0.176
4	6	0.017	0.092	0.158
6	9	0.039	0.17	0.358
5	7	0.032	0.161	0.306
9	3	0	0.0586	0
7	2	0	0.0625	0
9	8	0.0119	0.1008	0.209
7	8	0.0085	0.072	0.149

2.1.2. Données du système

Tableau 3 : Donnée du système de bus IEEE9.

N° de bus (nœud)	Type De bus	Tension (PU)	Tension (KV)	Puissance active générée (MW)	Puissance réactive générée (MVar)	Puissance active consommée par la charge (MW)	Puissance réactive consommée par la charge (MVar)
1	slack	1.04	16.5	0	0	0	0
2	PV	1.025	18	163	6.7	0	0
3	PV	1.025	13.8	85	-10.9	0	0
4	PQ	1	230	0	0	0	0
5	PQ	1	230	0	0	125	50
6	PQ	1	230	0	0	90	30
7	PQ	1	230	0	0	0	0
8	PQ	1	230	0	0	100	35
9	PQ	1	230	0	0	0	0

3. Formation de Matrices admittance

La formulation de la matrice admittance du réseau est la première étape dans l’analyse du réseau électrique. Elle se base sur les différents paramètres des lignes du système.

La matrice admittance est donnée sous la forme :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} & Y_{17} & Y_{18} & Y_{19} \\ Y_{21} & \mathbf{Y}_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} & Y_{27} & Y_{28} & Y_{29} \\ Y_{31} & Y_{32} & \mathbf{Y}_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} & Y_{37} & Y_{38} & Y_{39} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & \mathbf{Y}_{44} & Y_{45} & Y_{46} & Y_{47} & Y_{48} & Y_{49} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & \mathbf{Y}_{55} & Y_{56} & Y_{57} & Y_{58} & Y_{59} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & \mathbf{Y}_{66} & Y_{67} & Y_{68} & Y_{69} \\ Y_{71} & Y_{72} & Y_{73} & Y_{74} & Y_{75} & Y_{76} & \mathbf{Y}_{77} & Y_{78} & Y_{79} \\ Y_{81} & Y_{82} & Y_{83} & Y_{84} & Y_{85} & Y_{86} & Y_{87} & \mathbf{Y}_{88} & Y_{89} \\ Y_{91} & Y_{92} & Y_{93} & Y_{94} & Y_{95} & Y_{96} & Y_{97} & Y_{98} & \mathbf{Y}_{99} \end{bmatrix}$$

Telle que :

$$\begin{cases} Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} = \frac{1}{R_{ij} + jX_{ij}} \\ Y_{ii} = \sum_{j=0}^n Y_{ij} \quad j \neq i \\ Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \end{cases}$$

Ce qui nous donne la matrice admittance suivant :

Ybus=

$$\begin{bmatrix}
 -17.3611j & 0 & 0 & 17.3611j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -16j & 0 & 0 & 0 & 0 & 16j & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -17.0648j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17.0648j \\
 17.3611j & 0 & 0 & 3.0374-39.4759j & -1.3652+11.6041j & -1.9422+10.5107j & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1.3652+11.6041j & 2.5528-17.5792j & 0 & -1.1876+5.9751j & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1.9422+10.5107j & 0 & 3.2242-16.0989j & 0 & 0 & 0 & -1.2820+5.5882j \\
 0 & 16j & 0 & 0 & -1.1876+5.9751j & 0 & 2.8047-35.6731j & -1.6171+13.6980j & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.6171+13.6980j & 2.7722-23.4822j & -1.1551+9.7843j & 0 \\
 0 & 0 & 17.0648j & 0 & 0 & -1.2820+5.5882j & 0 & -1.1551+9.7843j & 2.4371-32.4374j & 0
 \end{bmatrix}$$

4. Application sur le réseau standard IEEE à 9 bus

L'implémentation du programme du calcul de l'écoulement de puissance sur le logiciel MATLAB nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

Tableau 4: Résultats de calcul de l'écoulement de puissance.

N° de bus	Puissance active générée (MW)	Puissance réactive générée (MVar)	Puissance active consommée par la charge (MW)	Puissance réactive consommée par la charge (MVar)	Tension (PU)	Angle (°)
1	71.6	27	0	0	1.04	0
2	163	6.7	0	0	1.025	9.3°
3	85	-10.9	0	0	1.025	4.7°
4	0	0	0	0	1.026	-2.2°
5	0	0	125	50	0.996	-4°
6	0	0	90	30	1.013	-3.7°
7	0	0	0	0	1.026	3.7°
8	0	0	100	35	1.016	0.7°
9	0	0	0	0	1.032	2°

4.1. Courbe PV et QV de système 9 bus

La puissance apparente est donnée par

$$\overline{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \overline{V}_i * \overline{I}_{ij}^* \quad (30)$$

Et

$$\overline{I}_{ij} = (\overline{V}_i - \overline{V}_j) * \overline{y}_{ij} \quad (31)$$

$$\overline{y}_{ij} = -\overline{Y}_{bus(i,j)} \quad (32)$$

En remplaçant les équations (31) et (32) dans (30)

On aura :

$$\overline{S}_{ij}^* = \overline{V}_i^* * (\overline{V}_i - \overline{V}_j) * (-\overline{Y}_{ij}) = \overline{Y}_{ij} * \overline{V}_i - \overline{V}_i^* * \overline{Y}_{ij} * \overline{V}_j \quad (33)$$

Ce qui nous donne :

$$\overline{S}_{ij}^* = Y_{ij} * V_i^2 (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) + Y_{ij} * V_i * V_j (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) * (\cos \theta_i - j \sin \theta_i) * (\cos \theta_j + j \sin \theta_j) \quad (34)$$

$$\overline{S}_{ij}^* = -Y_{ij} * V_i^2 * (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) + Y_{ij} * V_i * V_j * (\cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) - j \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij})) \quad (35)$$

Après le développement on trouve :

$$\overline{S}_{ij}^* = [-Y_{ij} * V_i^2 * \cos \theta_{ij} + Y_{ij} * V_i * V_j * \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij})] - j[Y_{ij} * V_i^2 * \sin \theta_{ij} + Y_{ij} * V_i * V_j * \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij})] \quad (36)$$

Par identification on aura :

$$\begin{cases} P_{ij} = -Y_{ij} * V_i^2 * \cos \theta_{ij} + Y_{ij} * V_i * V_j * \cos(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) \\ Q_{ij} = Y_{ij} * V_i^2 * \sin \theta_{ij} + Y_{ij} * V_i * V_j * \sin(\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}) \end{cases} \quad (37)$$

Pour chaque bus :

$$\begin{cases} P_i = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{ij} \\ Q_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Q_{ij} \end{cases} \quad (38)$$

4.2 La caractéristique PV du système

La figure 19, illustrée ci-dessous, représente les courbes PV du réseau IEEE à 9 bus.

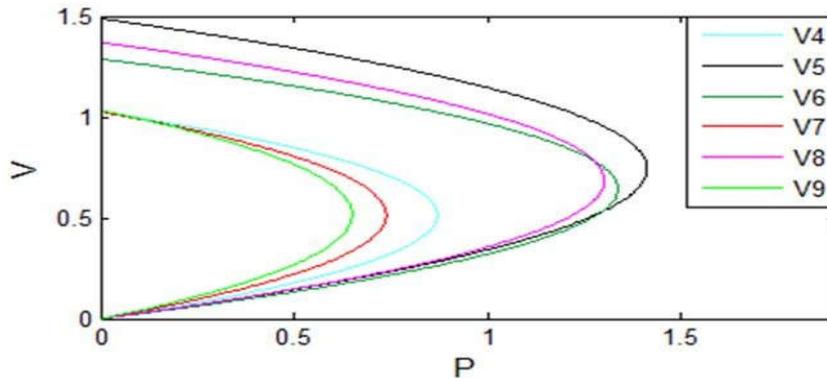


Figure 19: Courbes PV d'un système de 9bus.

Interprétation

On peut voir, sur la figure 19, que la chute de tension maximale dans les bus 4,7 et 9 est presque la même, car le point de tension critique a une valeur presque constante de 0.55 pour les 3 bus, par contre elle est moindre pour les bus 6 et elle minime pour le bus 5. D'un autre côté, la puissance maximale est inférieure pour les bus 4, 7 et 9 est plus importante pour les bus 5, 6 et 8.

4.3 La caractéristique QV d'un système de 9bus.

La figure 20, illustrée ci-dessous, représente les courbes QV du réseau IEEE à 9 bus.

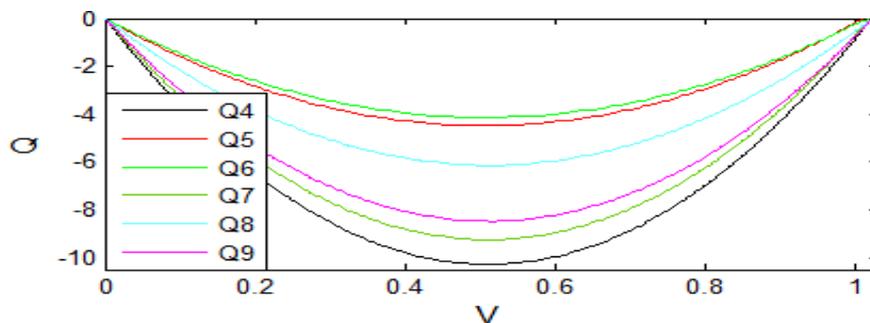


Figure 20: Courbes QV d'un système de 9 bus

Interprétations

On observe, sur la figure 20, que les différents bus sont stables, cependant, les bus 4, 7 et 9 ont une marge de stabilité plus importante que les bus 6, 5 et 8. Et le bus 6 à la plus faible marge de stabilité, donc il est plus proche de l'effondrement.

4.4. Influence du facteur de puissance

Puisque le bus 6 est le plus faible, donc cette étude va concerner ce bus.

4.4.1 Caractéristique PV

La figure 21, représente les caractéristiques PV du bus 6 pour différentes valeurs du facteur de puissance.

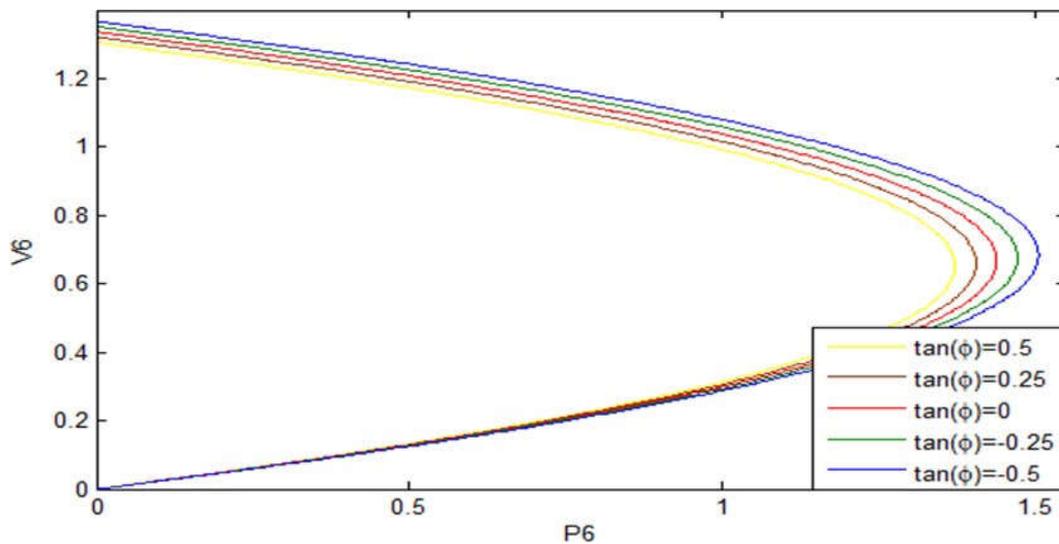


Figure 21: Caractéristique P-V pour différente valeur de facteur de puissance de bus 6.

La figure 22 représente les caractéristiques PV des différents bus pour différentes valeurs du facteur de puissance.

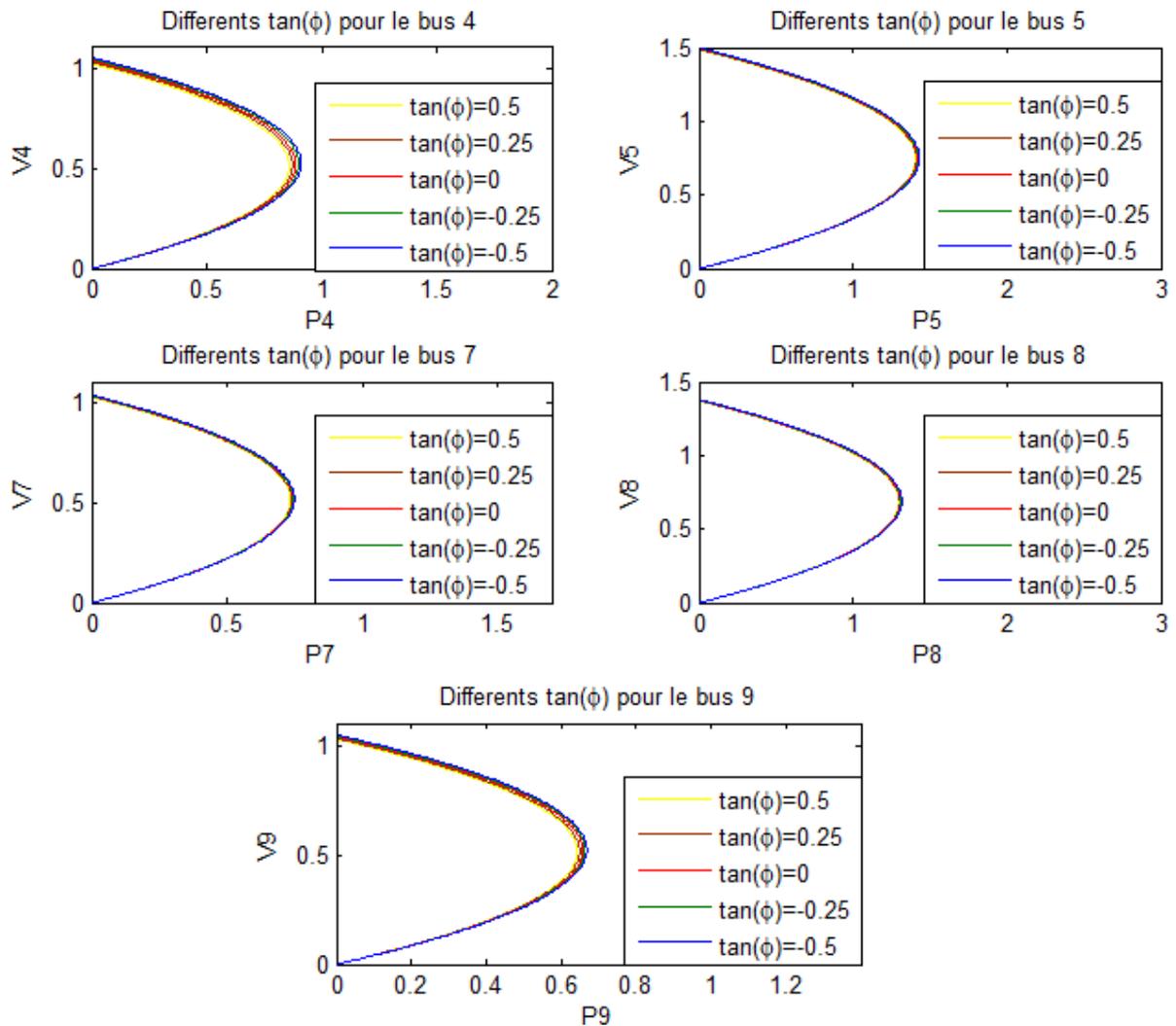


Figure 22: caractéristique P-V pour différentes valeurs de facteur de puissance de différents bus.

Interprétations

Les courbes PV du 6^{ème} bus, présentées sur la figure 21, illustrent l'influence de différents facteurs de puissance sur la stabilité de tension. On remarque que lorsque le facteur de puissance passe d'une charge inductive à une charge capacitive, la puissance transmise par la ligne augmente et la chute de tension diminue.

Les courbes PV des différents bus pour les différentes valeurs du facteur de puissance sont présentées sur la figure 22.

On peut constater que l'influence du facteur de puissance est insignifiante pour les différents bus.

4.4.2 Caractéristiques QV

La figure. 23 représente les caractéristique QV du 6^{ème} bus pour différentes valeurs du facteur de puissance.

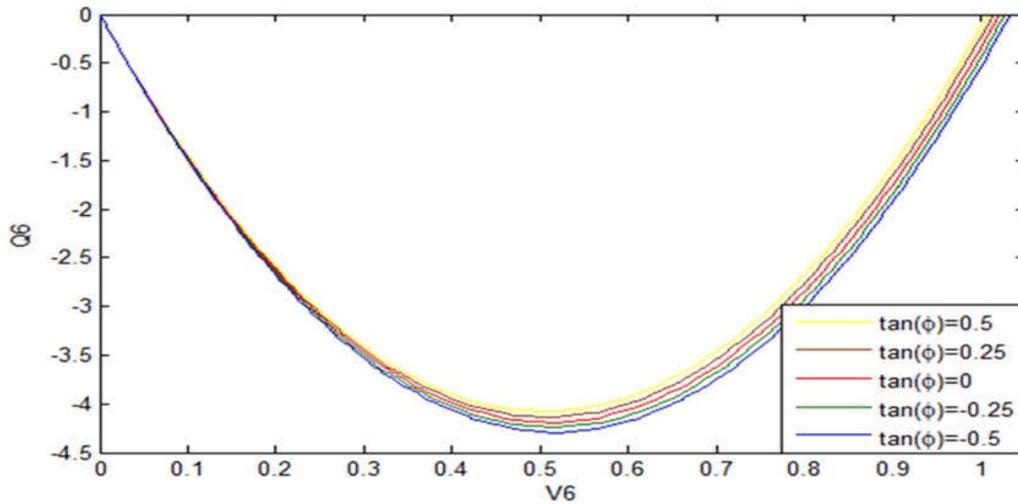


Figure 23: caractéristique Q-V pour différente valeur de facteur de puissance de bus 6.

La figure 24 représente les caractéristiques QV des différents bus pour différentes valeurs du facteur de puissance.

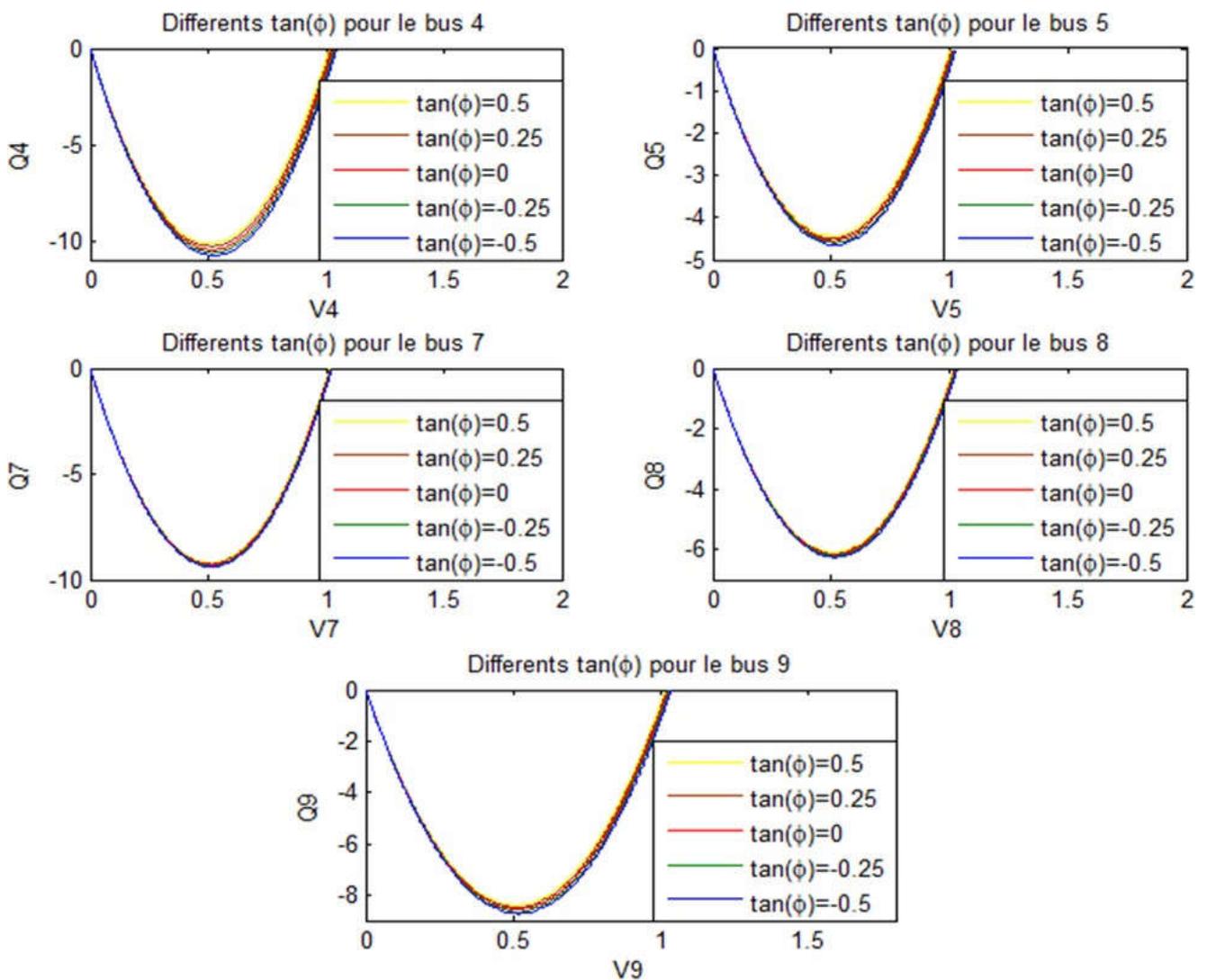


Figure 24: caractéristique Q-V pour différentes valeurs de facteur de puissance de différents bus.

Interprétations

Les courbes QV de 6^{ème} bus présentées sur la figure 23, illustrent l'influence des différents facteurs de puissance sur la stabilité de tension. On peut voir que lorsque le facteur de puissance passe d'une charge inductive vers une charge capacitive, la puissance réactive diminue, c'est-à-dire la marge de stabilité augmente.

Les courbes QV des différents bus pour différentes valeurs du facteur de puissance sont présentées sur la figure 24. On peut remarquer que l'influence du facteur de puissance sur ces bus est insignifiante.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une analyse statique de la stabilité de tension pour un réseau standard IEEE à 9 bus dans le but d'étudier la chute de tension et la marge de stabilité, dans un premier temps. Puis dans un second, l'influence du facteur de puissance sur la stabilité en tension de ce système. Nous avons utilisé la méthode de Gauss Seidel pour faire un écoulement de puissance, ainsi que pour l'obtention des courbes PV et QV pour l'analyse statique de la stabilité de tension. À l'aide de ces courbes, on a pu constater l'impact du facteur de puissance sur la stabilité de tension de ce réseau.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire avait pour finalité d'analyser la stabilité en tension d'un réseau standard d'IEEE à 9 bus, à l'aide de l'une des méthodes statiques qui sont les courbes PV et QV.

Cette étude a permis dans une première étape de définir les réseaux électriques, leurs structures, topologie et ainsi les différents phénomènes perturbateurs qui influencent sur la qualité de l'énergie électrique.

Dans une seconde étape, cette étude a permis de définir la stabilité des réseaux électriques, exposer les différents types de cette stabilité et les méthodes de l'analyse de stabilité de tension.

Dans la troisième étape, cette étude a permis de tracer les courbes PV et QV permettant une analyse statique de la stabilité de la tension.

Enfin une analyse de stabilité en tension d'un réseau standard d'IEEE à 9 bus a été réalisée à l'aide des courbes PV et QV.

L'analyse de la stabilité en tension est basée sur l'étude de la chute de tension et de déterminer la marge de stabilité en utilisant les courbes PV et QV. Cette étude nous a permis de constater que la chute de tension maximale est meilleure dans les bus 4, 7 et 9 tandis que la puissance maximale est inférieure, contrairement aux bus 5, 8 et 6 sont proches de la défaillance car le point de tension critique (point d'effondrement) a une valeur presque constante de 0.55 pu, notamment sur les courbes QV, les bus 4, 7 et 9 ont une marge de stabilité plus importante que les bus 6, 5 et, le bus 6 est proche de l'effondrement car il a une marge de stabilité la plus faible.

Grâce à ces courbes, on a pu voir aussi l'influence de facteur de puissance sur la stabilité de tension. Lorsque le facteur de puissance passe d'une charge inductive à une charge capacitive, la puissance transmise par la ligne augmente la chute de tension diminue et la puissance réactive diminue c'est-à-dire la marge de stabilité augmente.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Saoudi. M.L, « Etude de la stabilité transitoire d'un réseau électrique face à l'intégration des énergies renouvelable », mémoire de fin d'études, université A. MIRA, 2019//2020.
- [2] Amour.D, Sadour.MD, « Mise en œuvre d'un outil de calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques. », mémoire de fin d'études, université UMMTO, 2007/2008.
- [3] P. Ferracci «.la qualité de l'énergie électrique ». Cahier technique n 199, édition 2001.
- [4] M.A.E.Alali, thèse doctorat, « contribution à l'étude du compensateur actif des réseaux électrique basse tension », l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2002.
- [5] G.Boulaares, « Méthode d'analyse des perturbations électrique dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension. », Magister En Electrotechnique, université de Batna ,2012.
- [6] Oukrid.J, Mahtout.A, « impact des productions distribuées sur le réglage de la tension. », mémoire de fin d'études, université A. MIRA, 2018/2019.
- [7] HassiAmeur-El .A, « Etude Des Régimes De Fonctionnement Et De L'amélioration Des Performances Des Longues Lignes 400kV Et Plus », mémoire de fin d'études université de USTO, 2010/2011.
- [8] Mekhloufi Med.A, « Modélisation, simulation et analyse des régimes de fonctionnement et des conditions d'exploitation des longues lignes de transport d'énergie électrique extra haute tension (e.h.v) 400 kV et plus. », Magister En Electrotechnique, USTO, 2012/2013.
- [9] Kennouche.N, Degmous.N, « Contribution à la stabilité de la tension par compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques. », mémoire de fin d'études, université A. MIRA, 2019/2020.
- [10] M. A.S. Masoumwalid, « Power quality in power systems and electrical machines. »^{2nd} edition 2008.
- [11] N.Tartibu, « Les énergies renouvelables communautaires dans la perspective du développement économique de la république démocratique du congo. », thèse de doctorat, université de Moncton, 2011.
- [12] A.Oloulade , « Mémoire d'ingénieur de conception, contribution au calcul de la répartition de puissance . », université de Abomey-Calvi Benin.

Références bibliographiques

- [13] M.F Zitouni, « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par l'utilisation des Systèmes FACTS. », mémoire magistère, université de Sétif, ,2009/2010
- [14] K. Saoudi, « Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques. », Thèse doctorat, université de Sétif, 2013/2014.
- [15] Bounouira., « etude de la stabilite transitoire des reseaux electriques. », mémoire de master, universite constantine I, 2013/2014.
- [16] Aliouat.H, Gaci.A, « Coordination entre PSS et SVC pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. », mémoire de master, 2017 université de Bouira.
- [17] Idri.S, Khaldi.F, « Amélioration des performances de la tension et la stabilité d'un réseau électrique par la compensation de la puissance réactive. », mémoire de fin d'études, épatement génie électrique, université A. MIRA, 2017/2018.

Références bibliographiques

- [18] Christine E. Doig Cardet, « Analysis on Voltage Stability Indices. », Master Thesis, institue for automation of complex of power systems, electrical Power Engineering.
- [19] Taylor, Carson, « power system voltage stability international. », edition 1994.
- [20] Yong tang, «Voltage Stability Analysis of Power System», 2021.
- [21] S.Padiyar, «Power System Stability and Dynamics», Edition 2008.
- [22] R.Siva Subramanyam Reddy & Dr.T.Gowri Manohar ,Global Journal of researches in engineering Electrical and electronics engineering, «Literature Review on Voltage stability phenomenon and Importance of FACTS Controllers In power system Environment ».
- [23] Saadaoui.M, Himeur.H, « étude de la stabilité de la tension d'un réseau électrique », mémoire de master, université 8 mai Guelma, 2018.
- [24] N.Lahaçani Aouzellag, « Cours Réseaux Electriques », 3^{ème} année Licence Electrotechnique, Département de Génie Electrique, université A. Mira de Béjaia, 2018.

