

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Étude du lieu et la quantité du réactif optimal dans un réseau électrique

Présenté par: Boussafsaf Rayene

Saouli Youcef

Encadrant : Labar Houcin

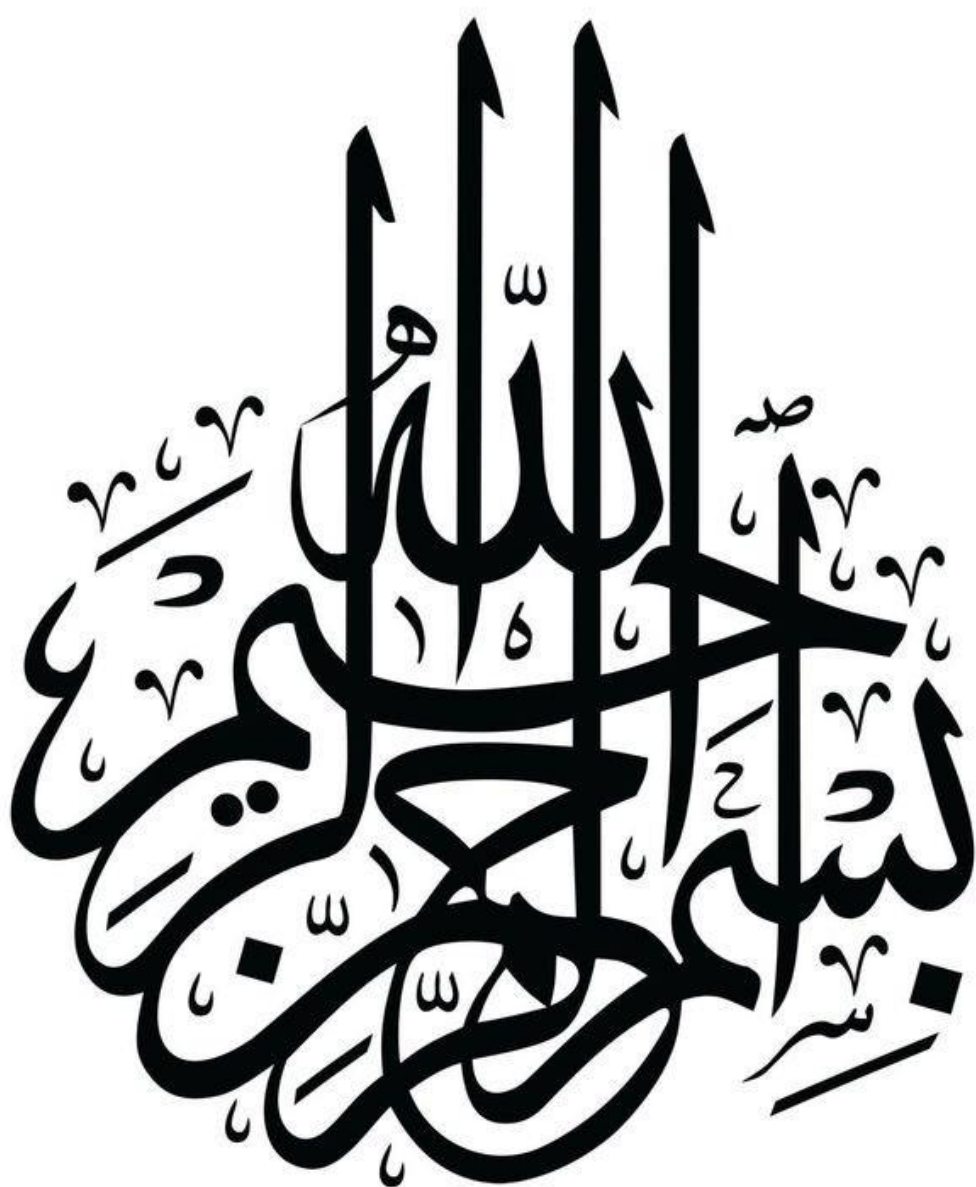
Grade: MAA

Université: UBMA

Jury de Soutenance :

Naidji morad	MCB	UBMA	Président
Labar Houcin	MAA	UBMA	Encadrant
Hamed Mostefa	MCA	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024





REMERCIEMENT

Nous remercions Dieu tout puissant pour nous donner de la force et du courage pour accomplir cela travail modéré.

Nous remercions monsieur LABAR HOUCINE

Professeur université Badji Mokhtar-Annaba pour son encadrement, ses directives et sa

Disponibilité. Aussi, nous le remercions pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail.

Nous remercierons également les jurys le professeur HAMED MOSTEFA et le professeur

NAIDJI MOURAD

Pour avoir bien voulu évaluer notre travail

En fin nous adressons notre remerciement les plus profonds et les distinguées à tous ceux qui nous aident de proche ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.



Dédicace

Moi **Rayene Boussafsaf**, Je dédie ce travail à toutes les personnes qui m'ont encouragé de près Ou de loin pour achever ce mémoire.

- ♠ A mon cher père qui mérite toute l'appréciation et ma très chère mère qui m'ont toujours encouragé.
- ♠ Ma sœur roumaissa.
- ♠ Et tous ma famille.
- ♠ A mes copines de cœur
- ♠ A tous mes collègues de la promotion de réseaux électriques 2024
- ♠ Spécialement à mon collègue Youcef saouli, grand merci.



Rayene Boussafsaf



Dédicace

Moi **Saouli Youcef**, Je dédie ce présent ouvrage à ma grande mère et ma mère et mon père, ange gardien de ma vie, qu'ils soient assurés de mon affection en reconnaissance de leur amour, leur tendresse et de leurs sacrifices.

- ❖ Mon frère, younes
- ❖ Mes sœurs, soundes et houda et rayenne.
- ❖ Mes amis,
- ❖ Tous mes collègues de la promotion de l'électrotechnique, spécialement à ma collègue rayene boussafsaf à laquelle je le dois un grand merci.



Saouli Youcef

Table des matières

REMERCIEMENT	3
Dédicace.....	4
Table des matières	6
Liste de la figure :.....	9
Résumé:	11
Introduction générale:	12
Chapitre I: Généralité sur le réseau électrique.....	13
I.1. Introduction.....	14
I.2. Définition de réseau électrique:	14
I.3. Structures topologiques des réseaux électriques :.....	14
I.4. Les parties principales d'un réseau électrique :	17
I.5 Production de l'électricité :.....	18
I.6. Centrales électriques à biomasse :	19
I.7. Les composants d'un réseau électrique :.....	19
I.8.-Lignes aériennes et câbles souterrains	20
I.9. les composants de la ligne aérienne.....	21
I.10. .types de lignes aériennes :	22
I.11.La chute de tension dans les lignes :	23
I.12. Stabilité de la tension :	24
I.13.Principe de la compensation de la puissance réactive :.....	24
I.14. Équipement de compensation de l'énergie réactive :	26
I.15.Conclusion:	27
Chapitre II : la compensation	28
II.1.Introduction	29
II.2. L'influence de la puissance réactive.....	29

II. 3.Définitions des différentes formes d'énergie	30
II.4. Composante active et réactive du courant.....	30
II.5.Composante active et réactive de la puissance	31
II.6.Facteur de puissance	32
II.7. Amélioration du facteur de puissance	33
II.8. Avantages d'un bon facteur de puissance	33
II.9.Inconvénient d'un mauvais facteur de puissance	33
II.10. Compensation de puissance réactive avec les batteries condensateurs.....	34
II.11. Principe de fonctionnement de la compensation avec batterie condensateur	36
II.12. Les différents types de compensation.....	39
II.13.Les avantages de la compensation automatique par contacteur statique.....	41
II.14.Choix de la localisation de compensation par batteries	41
II.15. Les différents modes de couplage des condensateurs	46
II.16. Conclusion.....	47
ChapitreIII : Modélisation de réseaux électrique	48
III.1. Modélisations Mathématique du Réseau Électrique :	49
III.2. Modélisation des éléments du réseau électrique.....	49
III.3 Modélisation des nœuds du réseau électrique :	56
III.4 Construction de la matrice admittance d'un réseau électrique :.....	57
III.5 Calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau électrique :	59
<i>III.6 Équation de calcul de l'écoulement de puissance :</i>	<i>59</i>
<i>III.7 Calcul de l'écoulement de puissance par la forme hybride :.....</i>	<i>63</i>
<i>III.8 Algorithme de la méthode de Newton-Raphson :.....</i>	<i>66</i>
III. 9 Conclusion :.....	67

Chapitre IV: simulation et interprétation des résultats	68
IV.1. Introduction :	69
Topologie du étudie :.....	69
Conclusion :.....	82
Conclusion générale	83
Bibliographique :.....	84

Liste de la figure :

Chapitre I: généralité sur le réseau électrique

Figure (I-1) : schéma simplifié d'un réseau radial.....	15p
Figure I-2) : Schéma simplifié d'un réseau bouclé.....	15p
Figure (I-3) : Schéma simplifié d'un réseau maillé.....	16p
Figure (I-4) : Structure générale d'un réseau électrique.....	18p
Figure (I-5) : Exemple d'une centrale électrique.....	19p
Figure (I-6) : Lignes aériennes	21p
Figure (I-7) : Câblés souterrains	21p
Figure (I-8) : cas d'une consommation alimenté de la centrale.....	23p
Figure (I-9) : cas d'une forte consommation alimenté de la centrale.....	23p
Figure (I-10) : Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales.....	24p

Chapitre II : la compensation

Figure (II-1) : circuit sans compensation, schémas unifilaire.....	30p
Figure (II-2) : circuit avec compensation réactif, schéma unifilaire.....	36p
Figure (II-3) : Diagramme vectorielle des courants.....	37p
Figure (II-4) : Influence de la puissance réactive.....	38p
Figure (II-5) : Principe de la compensation d'énergie réactive.....	38p
Figure (II-6) : Schéma d'un condensateur monté en série sur une ligne.....	40p
Figure (II-7) : Profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation.....	41p
Figure (II-8) : Schéma d'un condensateur monté en parallèle sur une ligne.....	42p
Figure (II-9) : Compensation fixe.....	43p
Figure (II-11) : Principe de la compensation automatique d'une installation.....	44p
Figure (II-12) : Compensation globale.....	45p

Chapitre III : Modélisation de réseaux électrique

Figure (III-1) : Compensation partielle.....	49p
Figure (III-2) : Compensation individuelle.....	50p
Figure (III-3) : Différentes zones d'implantation des batteries de condensateurs.....	50p
Figure (III-4) : schéma équivalent d'un générateur.....	51p
Figure (III-5) : Modèle du générateur.....	53p
Figure (III-6) : modélisation d'une charge	54p
Figure (III-7) : Modèle en π d'une ligne aérienne.....	55p

Figure (III-8) : Modèle d'un transformateur.....	57p
Figure (III-9) : Modèle approximatif du transformateur.....	60p

Chapitre IV: simulation et interprétation des résultats

Figure (IV-1) : un profil la puissance apparente 1 qui correspondent a une variation durent la journée.....	71p
Figure (IV-2) : un profil la puissance apparente 2 qui correspondent a une variation durent la journée.....	71p
Figure (IV-3) : un profil la puissance apparente 3 qui correspondent a une variation durent la journée.....	71p
Figure (IV-4) : : un profil la puissance apparente 4 qui correspondent a une variation durent la journée.....	72p
Figure (IV-5) : : un profil la puissance apparente 5 qui correspondent a une variation durent la journée.....	72p
Figure (IV-7) : : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 2.....	73p
Figure (IV-8) : : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 2.....	74p
Figure (IV-9) : : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 2.....	75p
Figure (IV-10) : : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 2.....	76p
Figure (IV-11) : : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4.....	77p
Figure (IV-12) : : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4.....	78p
Figure (IV-13) : : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4.....	79p
Figure (IV-14) : : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4.....	80p
Figure (IV-15) : courbes de tension et de courants du réseau électrique.....	81p
Figure (IV-16) : schéma du commande et du communication.....	82

Résumé:

Ce mémoire présente une étude du lieu et de la quantité du réactif optimal dans un réseau électrique.

Est essentiel pour garantir un fonctionnement efficace du système. En analysant la répartition du réactif dans le réseau, on peut améliorer la stabilité et la qualité de l'électricité fournie. En identifiant les endroits stratégiques où ajouter ou compenser le réactif, on peut réduire les pertes et améliorer les performances globales du réseau électrique.

Abstract:

This dissertation presents a study of the location and quantity of the optimal reagent in an electrical network.

Is essential to ensure efficient operation of the system. By analyzing the distribution of the reactant in the network, we can improve the stability and quality of the electricity supplied. By identifying strategic locations where to add or compensate for the reagent, we can reduce losses and improve the overall performance of the electrical network.

الملخص:

تقدم هذه الأطروحة دراسة لموقع وكمية الكاشف الأمثل في الشبكة الكهربائية .

ضروري لضمان التشغيل الفعال للنظام. ومن خلال تحليل توزيع المواد المتفاعلة في الشبكة، يمكننا تحسين استقرار وجودة

الكهرباء الموردة. ومن خلال تحديد المواقع الإستراتيجية التي يمكن إضافة الكاشف إليها أو التعويض عنها، يمكننا تقليل

الخسائر وتحسين الأداء العام للشبكة الكهربائية.

Introduction générale:

Il y a à peine un siècle, l'électricité a cessé d'être une simple science pour devenir une technologie qui occupe une telle place dans le monde qu'il est difficile d'imaginer comment nous pourrions vivre sans elle.

L'Algérie est désormais un pays industrialisé.

L'énergie électrique joue un rôle très important dans divers secteurs de l'économie nationale tels que l'industrie, l'agriculture, la vie et les transports.

Cependant, le progrès technologique et social nécessite le développement de tout ce qui touche aux processus de production, de transport, de distribution et de consommation de l'énergie électrique.

Depuis sa découverte, il n'a cessé d'évoluer et sert aujourd'hui de base à tout développement, tant d'un point de vue matériel que moderne.

La vie nécessite de plus en plus d'énergie électrique pour la consommation industrielle et domestique.

Nous souhaitons donc produire plus et le transporter plus loin, malheureusement la source de production n'est pas proche du consommateur, c'est pourquoi nous devons le transporter via le réseau.

L'énergie électrique doit être utilisée au fur et à mesure de sa production car elle ne peut pas être stockée, ce qui explique que la production et la consommation de différents types de centrales électriques se produisent simultanément, ce qui nécessite l'utilisation de plusieurs types de réseaux, tels que :

- Réseau de transport haute tension reliant les stations d'interconnexion et les sites de production.
- Le réseau de distribution alimente le réseau de distribution, mais la distance de transport est limitée à quelques kilomètres.
- Les réseaux de distribution ont pour fonction aux réseaux d'utilisation la puissance dont ils ont besoin
- Le réseau électrique est un réseau électrique qui installe une puissance élevée.
- Le réseau utilisateur doit généralement être capable d'alimenter un grand nombre de moteurs d'appareils électroménagers, avec une puissance ne dépassant pas quelques kilowatts.
- Certaines demandes des consommateurs en énergie électrique nécessitent une qualité, une fiabilité et une bonne continuité de service basées sur différentes catégories, par exemple :
 - Les consommateurs de la première catégorie ne sont pas autorisés à subir des interruptions dans la fourniture d'énergie électrique, sauf pendant une durée égale à 1,5 seconde.
 - Les consommateurs de catégorie II qui acceptent une interruption de l'alimentation électrique de moins de 2 heures.
 - Les consommateurs de catégorie 3, qui acceptent l'interruption de la fourniture d'électricité pendant une période nécessaire au remplacement des unités défectueuses.

Chapitre I: Généralité sur le réseau électrique



I.1. Introduction

Le réseau électrique est constitué de milliers de kilomètres de lignes, de milliers de sous-stations et de nombreux appareillages de commutation et régulateurs automatiques, et est dimensionné pour assurer le fonctionnement normal de l'approvisionnement en énergie électrique. Le système de contrôle hiérarchique assure la résistance en tension et en fréquence.

L'énorme croissance de la demande d'énergie électrique et les contraintes économiques implicites dans le besoin d'expansion ont conduit au développement de réseaux électriques qui approchent les limites de leur stabilité et de leur sécurité. En fait, l'instabilité du réseau constitue un problème majeur pour assurer son bon fonctionnement. Des perturbations inévitables telles que des courts-circuits, des harmoniques, des chutes de tension, une indisponibilité momentanée des lignes de transport, des générateurs, des transformateurs et des pertes de lignes peut affecter le réseau à tout moment et le mettre en mauvais état au-delà de sa zone de stabilité. La stabilité du réseau électrique fait référence aux caractéristiques de maintien d'un état d'équilibre dans des conditions de fonctionnement normales et de retour à un état d'équilibre acceptable après avoir été perturbé.

I.2. Définition de réseau électrique:

Un réseau électrique est un système interconnecté de lignes électriques, de transformateurs, de sous-stations et d'équipements associés qui permettent la transmission et la distribution de l'électricité depuis les sources de production (telles que les centrales électriques) vers les consommateurs finaux (résidences, entreprises, industries, etc.). Ce réseau permet de transporter l'électricité sur de longues distances et de la distribuer efficacement là où elle est nécessaire. Il peut être conçu selon différentes configurations, notamment en fonction des besoins régionaux, des sources d'énergie disponibles et des technologies de transmission et de distribution.

I.3. Structures topologiques des réseaux électriques :

Le concept de réseau englobe la totalité des installations, notamment les lignes aériennes, les câbles, les transformateurs et les appareils avec leurs moyens de contrôle et de sécurité, les interrupteurs, etc., nécessaires au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures.

Radial (étoile), bouclé et maillé (connecté) :

I.3.1. Réseau radial :

Il représente le réseau sous sa forme la plus simple. Les lignes partent d'un point central, par exemples une station de transformation locale, et rayonnent depuis celui-ci. Si une perturbation se produit sur ce type de réseau, l'alimentation électrique de tous les clients rattachés à ce rayon défectueux est interrompue, jusqu'à ce que la panne soit réparée. La panne d'une station de transformation peut paralyser tout un quartier.

Les réseaux radiaux peuvent être contrôlés et protégés par un appareillage simple. Ce sont les réseaux les moins onéreux.

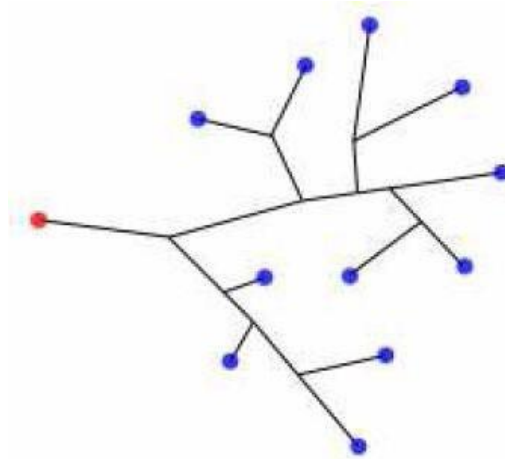


Figure I-1: Schéma simplifié d'un réseau radial.

I.3.2. Réseau bouclé :

Un réseau bouclé est un réseau maillé simplifié présentant un certain nombre de boucles fermées. Chacune de boucle contient un nombre limité de sources. Les réseaux bouclés sont alimentés à la fois par plusieurs sources ; les postes sont raccordés en coupure d'artère cette disposition permet lors d'une coupure, une continuité de service.

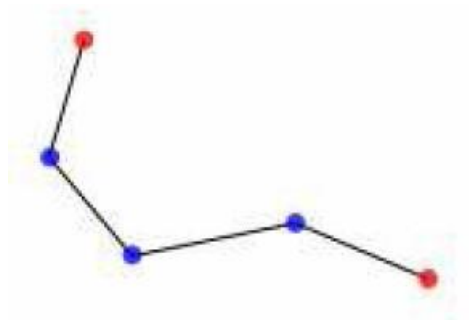


Figure I-2: Schéma simplifié d'un réseau bouclé

I.3.3. Réseau maillé :

Lorsque des lignes en boucle sont regroupées pour relier des points très éloignés les uns des autres, elles forment un réseau maillé.

Les réseaux maillés sont surtout construits et exploités là où la sécurité d'approvisionnement d'un grand nombre de clients peut être compromise par une perturbation, comme c'est particulièrement le cas pour les réseaux de transport et de distribution haute

tension. On obtient ainsi une meilleure sécurité, mais à un prix plus cher.

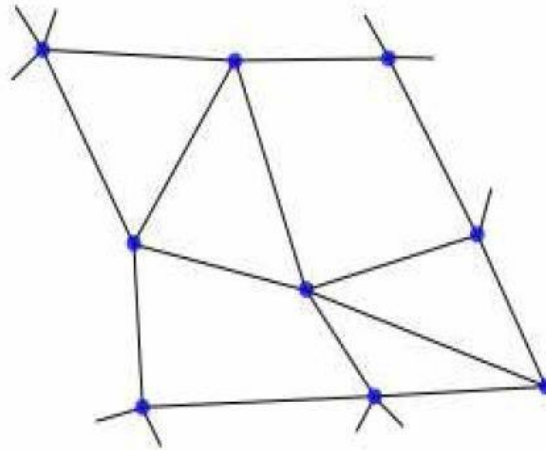
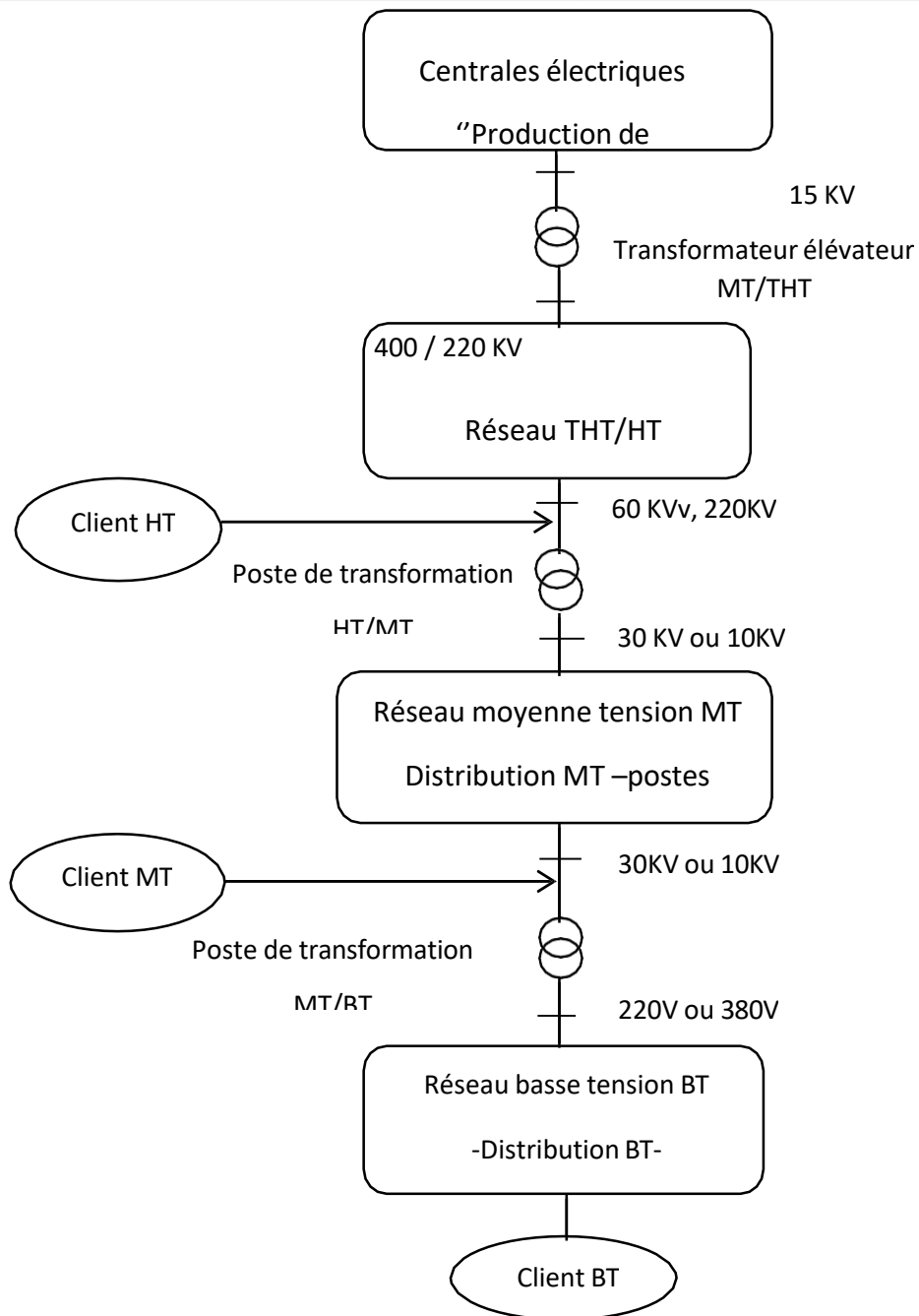


Figure I-3: Schéma simplifié d'un réseau maillé

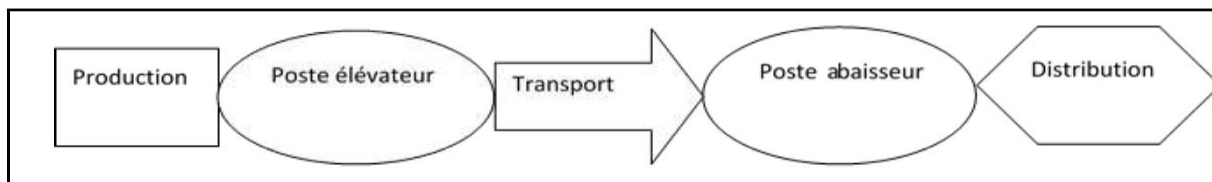


I.4. Les parties principales d'un réseau électrique :

Le réseau électrique est constitué de :

- Centrales électriques ou station de production
- Réseaux de transport et d'interconnexion
- Réseaux de repartions

Réseaux de distribution



FigureI-4 : Structure générale d'un réseau électrique.

L'organisation entre chacun de ces blocs et décrite sur la figure ci-dessus :

- Le bloc production électrique, regroupant l'ensemble des éléments des unités de production, tels que les alternateurs, les moteurs, les turbines ...etc.
- Les blocs poste élévateur abaisseur regroupant l'ensemble des éléments pouvant transformer l'énergie par changement de niveau de tension.

Les blocs transport et distribution regroupant l'ensemble des éléments d'acheminement d'énergie électrique vers les consommateurs.

I.5 Production de l'électricité :

La production d'électricité désigne le processus par lequel de l'électricité est générée à partir de diverses sources d'énergie. Voici quelques-unes des principales méthodes de production d'électricité :

I.5.1. Centrales électriques thermiques : Elles utilisent des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel pour produire de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour faire tourner des turbines connectées à des générateurs électriques.

I.5.2. Centrales électriques nucléaires : Elles exploitent l'énergie libérée lors de réactions nucléaires dans des réacteurs nucléaires pour produire de la chaleur, qui est également utilisée pour générer de l'électricité à l'aide de turbines et de générateurs.

I.5.3. Énergies renouvelables :

- **Énergie éolienne :** Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en électricité à l'aide de turbines.

- **Énergie solaire :** Les panneaux solaires utilisent la lumière du soleil pour générer de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

- **hydroélectricité :** Les barrages hydroélectriques exploitent l'énergie de l'eau en mouvement pour faire tourner des turbines et produire de l'électricité.

- **Énergie marémotrice et houlomotrice :** Elles utilisent l'énergie des marées et des vagues pour produire de l'électricité.

I.6. Centrales électriques à biomasse :

Elles brûlent des déchets organiques tels que la biomasse forestière, les déchets agricoles ou les déchets municipaux pour produire de la chaleur qui est ensuite convertie en électricité.

Chaque méthode de production a ses propres avantages et inconvénients en termes d'impact environnemental, de coûts, de disponibilité des ressources et de fiabilité. De plus, de nouvelles technologies émergent régulièrement pour améliorer l'efficacité et réduire l'empreinte environnementale de la production d'électricité.

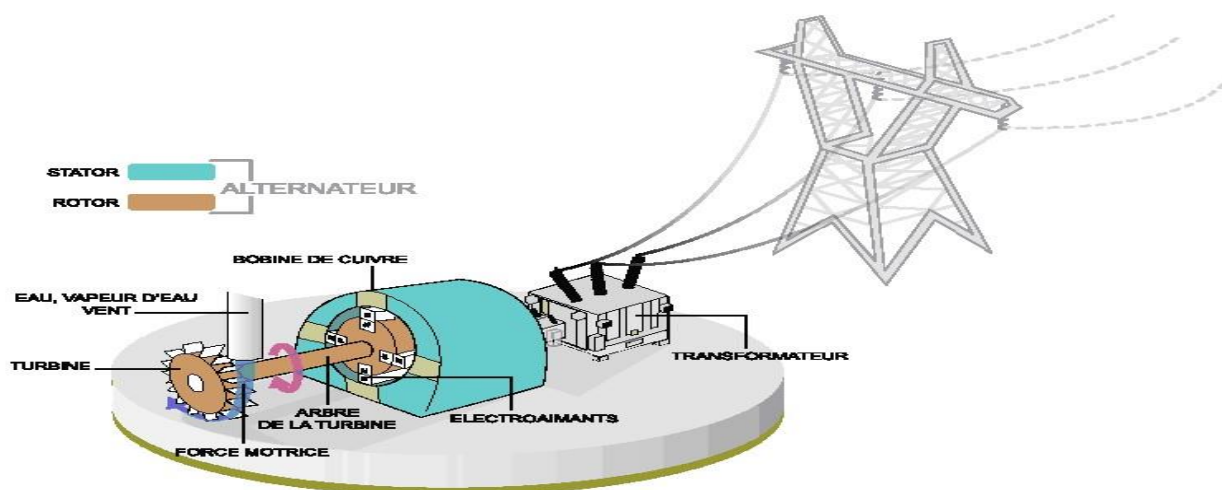


Figure I.5: Exemple d'une centrale électrique

I.7. Les composants d'un réseau électrique :

Un réseau électrique comprend plusieurs composants essentiels qui travaillent ensemble pour assurer la transmission et la distribution efficaces de l'électricité. Voici les principaux composants d'un réseau électrique :

I.7.1. Centrales électriques : Ce sont les installations où l'électricité est produite à partir de différentes sources d'énergie telles que le charbon, le gaz naturel, le nucléaire, les énergies renouvelables (éolien, solaire, hydroélectricité, etc.).

I.7.2. Transformateurs : Ils sont utilisés pour modifier la tension de l'électricité afin de faciliter la transmission et la distribution. Les transformateurs élèvent la tension pour la transmission à haute tension sur de longues distances, puis la réduisent à des niveaux plus bas pour la distribution aux utilisateurs finaux.

I.7.3. Lignes de transmission : Ces lignes à haute tension transportent l'électricité sur de longues distances depuis les centrales électriques jusqu'aux centres de distribution régionaux.

I.7.4. Sous-stations : Situées à différents points du réseau, les sous-stations sont des installations qui permettent de contrôler la tension, de commuter les circuits électriques et de redistribuer l'électricité vers différents secteurs.

I.7.5. Lignes de distribution : Ces lignes acheminent l'électricité à partir des sous-stations vers les utilisateurs finaux tels que les résidences, les entreprises et les industries.

I.7.6. Postes de distribution : Ils sont souvent situés à proximité des utilisateurs finaux et servent à réduire davantage la tension de l'électricité pour une distribution locale.

I.7.7. Compteurs électriques : Installés chez les utilisateurs finaux, les compteurs mesurent la quantité d'électricité consommée afin de facturer les clients en fonction de leur utilisation.

I.7.8. Équipements de contrôle et de protection : Ces dispositifs surveillent et protègent le réseau électrique contre les surcharges, les courts-circuits et d'autres problèmes, assurant ainsi la sécurité et la fiabilité du système

Ensemble, ces composants forment un réseau électrique interconnecté qui permet de fournir de l'électricité de manière fiable et efficace à travers une région donnée.

I.8.-Lignes aériennes et câbles souterrains

Les lignes aériennes et les câbles souterrains sont deux moyens principaux par lesquels l'électricité est transportée sur de longues distances et distribuée aux utilisateurs finaux dans un réseau électrique. Voici une explication de chacun :

I.8.1. Lignes aériennes :

- Les lignes aériennes sont des câbles conducteurs de courant qui sont suspendus à des pylônes ou des tours métalliques à travers des isolateurs.
- Elles sont utilisées pour transporter l'électricité sur de longues distances à haute tension depuis les centrales électriques vers les centres de distribution ou directement vers les consommateurs.
- Les avantages des lignes aériennes comprennent leur coût relativement bas, leur facilité d'installation et de maintenance, ainsi que leur capacité à supporter des charges élevées.
- Cependant, les inconvénients incluent leur sensibilité aux intempéries (comme la foudre, le vent et la neige), leur impact visuel sur l'environnement et les risques pour la faune aviaire.

I.8.2. Câbles souterrains :

- Les câbles souterrains sont des câbles conducteurs enterrés sous terre, souvent dans des tranchées spécialement creusées.
- Ils sont couramment utilisés dans les zones urbaines et densément peuplées où l'esthétique, l'espace disponible et la fiabilité sont des préoccupations majeures.
- Les câbles souterrains offrent une meilleure protection contre les intempéries et les dommages causés par les facteurs environnementaux, ainsi qu'une réduction des pertes d'énergie par effet Joule.
- Cependant, ils sont généralement plus coûteux à installer et à entretenir que les lignes aériennes, et le processus de réparation en cas de panne peut être plus complexe et nécessiter plus de temps.

En résumé, les lignes aériennes sont plus couramment utilisées pour le transport à longue distance de l'électricité, tandis que les câbles souterrains sont privilégiés dans les zones urbaines et pour les applications où l'esthétique, la fiabilité et la résistance aux intempéries sont des priorités.



FigureI-6.: Lignes aériennes



FigureI-7: Câblés souterrains

I.9. les composants de la ligne aérienne

Une ligne aérienne, utilisée dans les réseaux électriques pour le transport de l'électricité sur de longues distances, est composée de plusieurs éléments essentiels. Voici les principaux composants d'une ligne aérienne typique :

I.9.1. Conducteurs électriques : Ce sont des câbles métalliques conçus pour transporter le courant électrique. Ils sont généralement fabriqués en aluminium ou en cuivre et sont suspendus entre les pylônes ou les tours électriques.

I.9.2. Isolateurs : Les isolateurs sont des composants installés à intervalles réguliers le long de la ligne aérienne pour supporter les conducteurs électriques tout en les isolant de la structure de support. Ils sont souvent en porcelaine, en verre ou en polymères et empêchent le courant électrique de passer au travers des pylônes ou des tours vers la terre.

I.9.3. Pylônes ou tours électriques : Ce sont des structures métalliques ou en béton qui soutiennent les conducteurs électriques au-dessus du sol. Ils sont espacés à intervalles réguliers le long de la ligne pour maintenir les conducteurs à une hauteur spécifique et assurer la stabilité de la ligne.

I.9.4. Haubans : Les haubans sont des câbles métalliques ou des tiges de tension fixées aux pylônes ou aux tours électriques pour fournir un soutien supplémentaire et empêcher leur basculement sous l'action du vent ou d'autres forces.

I.9.5. Câbles de mise à la terre : Ces câbles en métal sont attachés aux pylônes ou aux tours électriques et enterrés dans le sol pour fournir une connexion à la terre, aidant ainsi à dissiper les charges électriques excessives et à protéger la ligne contre les surtensions.

I.9.6. Dispositifs de protection : Il s'agit de dispositifs installés le long de la ligne pour détecter et réagir aux surcharges, aux courts-circuits et à d'autres anomalies électriques afin de protéger l'intégrité du réseau électrique et d'assurer la sécurité des opérateurs et du public.

Ensemble, ces composants constituent une ligne aérienne fonctionnelle capable de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances avec efficacité et fiabilité.

I.10. types de lignes aériennes :

Il existe plusieurs types de lignes aériennes utilisées dans les réseaux électriques pour le transport de l'électricité. Voici quelques-uns des principaux types de lignes aériennes :

I.10.1. Lignes de transmission : Ces lignes sont conçues pour transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances, généralement à des tensions élevées allant de 69 kV (kilovolts) jusqu'à plusieurs centaines de kV. Elles utilisent des conducteurs de grande capacité et sont soutenues par des pylônes ou des tours élevées.

I.10.2. Lignes de distribution : Ces lignes aériennes sont utilisées pour distribuer l'électricité depuis les sous-stations aux utilisateurs finaux tels que les résidences, les entreprises et les industries. Elles fonctionnent à des tensions plus basses que les lignes de transmission, généralement inférieures à 69 kV.

I.10.3. Lignes de transport d'énergie renouvelable : Avec l'essor des énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire, des lignes spéciales sont souvent construites pour transporter l'électricité produite par ces sources d'énergie vers les centres de distribution ou les points d'interconnexion du réseau.

I.10.4. Lignes aériennes de tension très haute : Ces lignes sont utilisées pour transporter l'électricité sur de très longues distances, souvent à travers des régions éloignées ou difficiles d'accès. Elles peuvent fonctionner à des tensions de plusieurs centaines de kV, voire plus, et utilisent des technologies avancées pour minimiser les pertes d'énergie.

I.10.5. Lignes de traction électrique : Ces lignes sont utilisées pour alimenter les systèmes de transport en commun tels que les trains électriques ou les tramways. Elles fonctionnent à des tensions spécifiques pour répondre aux besoins de ces systèmes et sont souvent installées en parallèle avec les voies ferrées.

Chaque type de ligne aérienne est conçu pour répondre à des besoins spécifiques en termes de capacité, de distance de transport, de tension et d'application particulière dans le réseau électrique.

I.11. La chute de tension dans les lignes :

La chute de tension dans les lignes électriques se produit lorsque la tension électrique diminue le long d'une ligne de transmission électrique due à la résistance et à l'impédance des conducteurs. Cette chute de tension peut être causée par divers facteurs, notamment la longueur de la ligne, la charge électrique, la qualité des conducteurs et la configuration du réseau électrique.

Lorsqu'une ligne électrique transporte de l'électricité sur de longues distances, la résistance naturelle des conducteurs entraîne une perte d'énergie sous forme de chaleur, ce qui entraîne une baisse de tension. De plus, les charges électriques connectées au réseau peuvent également provoquer une chute de tension, surtout si elles sont situées loin de la source d'alimentation.

Pour minimiser la chute de tension dans les lignes électriques, des mesures telles que l'utilisation de conducteurs de plus gros calibre, la réduction de la distance entre la source d'alimentation et la charge, et l'optimisation de la conception du réseau électrique sont souvent mises en œuvre.

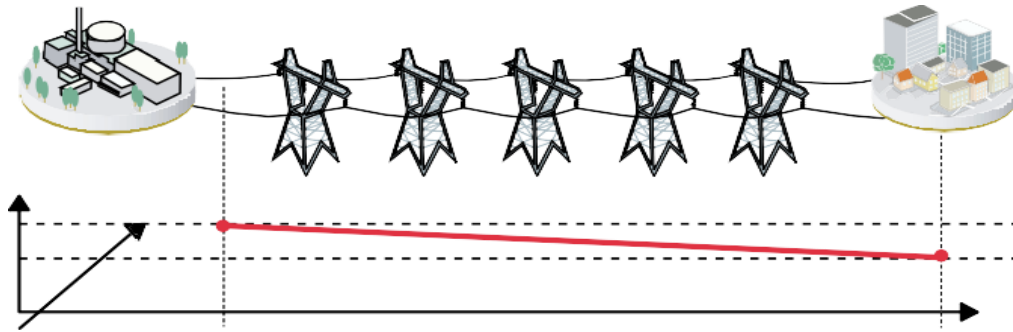


Figure I-8.: cas d'une consommation alimentée de la centrale..

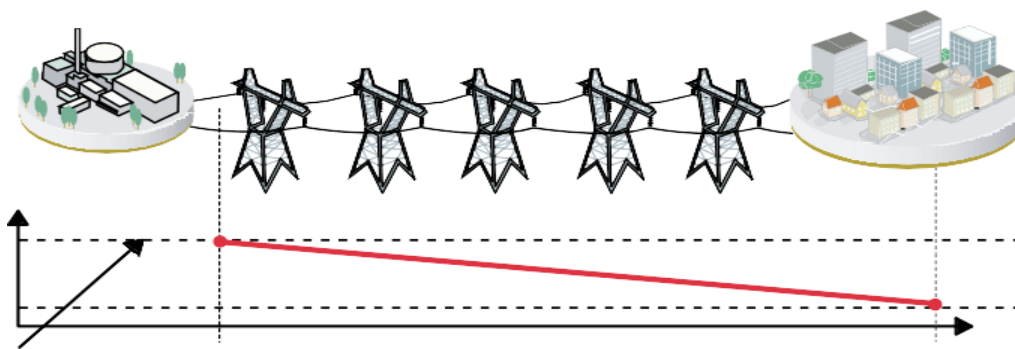


Figure I-9: cas d'une forte consommation alimentée de la centrale

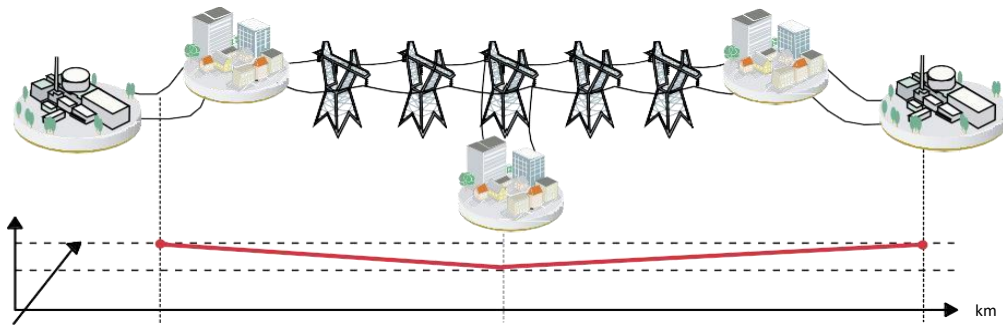


Figure I-10: Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales

I.12. Stabilité de la tension :

La stabilité de la tension fait référence à la capacité d'un système électrique à maintenir une tension constante dans ses lignes et ses équipements malgré les fluctuations de la charge et d'autres perturbations. Une tension stable est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des équipements électriques et électroniques, ainsi que pour garantir la sécurité du système électrique dans son ensemble.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la stabilité de la tension, notamment la capacité du système à répondre rapidement aux variations de charge, la régulation automatique de la tension, la gestion efficace de la production et de la distribution d'électricité, ainsi que la conception et la qualité des équipements électriques.

Les dispositifs de régulation de la tension, tels que les transformateurs de puissance, les régulateurs de tension automatiques et les systèmes de contrôle de la tension, sont souvent utilisés pour maintenir une tension stable dans les réseaux électriques. De plus, des techniques avancées de planification et de gestion de réseau sont mises en œuvre pour anticiper et gérer les fluctuations de charge et les autres perturbations pouvant affecter la stabilité de la tension.

En résumé, la stabilité de la tension est un aspect crucial de la fiabilité et de la performance des systèmes électriques, et elle est continuellement surveillée et contrôlée par les opérateurs de réseau et les ingénieurs électriques pour assurer un fonctionnement sûr et efficace du système électrique.

I.13.Principe de la compensation de la puissance réactive :

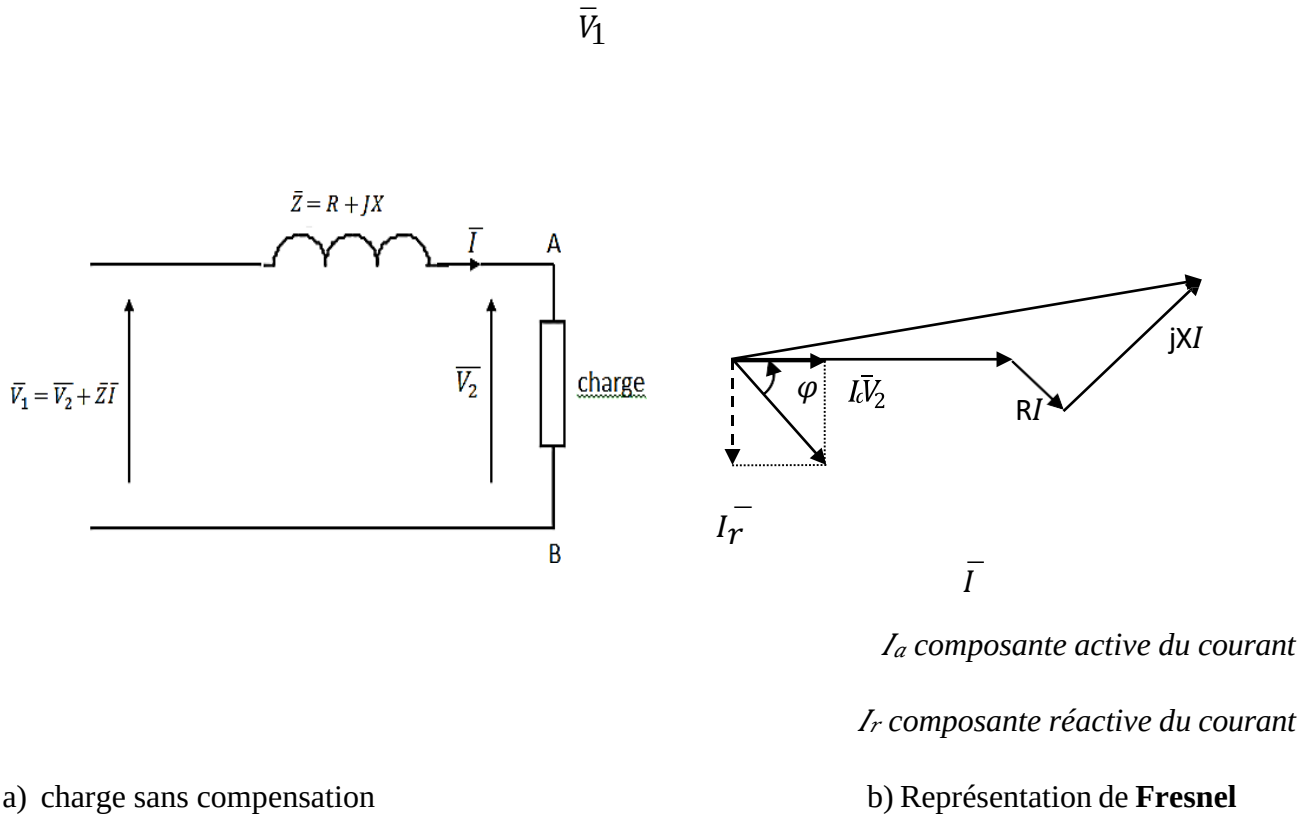
Le principe de la compensation serait donc, selon la demande du réseau, de fournir de la puissance réactive ou de l'absorber. En analysant la nature de la puissance réactive, on peut conclure que la puissance réactive est une chose très importante pour les réseaux électriques (en courant alternatif). On distingue les sources principales et les sources complémentaires (ou secondaire). Les sources principales sont destinées pour la production de la puissance active et la puissance réactive, ce sont les générateurs des centrales électriques qui produisent ces puissances. Les sources complémentaires (ou secondaire) sont des installations électriques destinées pour la compensation du surplus ou des déficits de la puissance réactive dans les réseaux électriques et pour des différents réglages dans ces régimes de fonctionnement. Leur

puissance installée et leur emplacement sont en relation directe avec des critères d'ordinaire technique et technico-économique. Les installations électriques sont installées dans des sous stations directement ou sous formes de consommateur.

Compenser une installation consiste à installer une source de l'énergie réactive de compensation qui permet d'améliorer le facteur de puissance de l'installation.

La compensation de la puissance réactive présente plusieurs avantages ; mais avant d'aborder ceux-ci, il faudrait comprendre son principe compensation.

La figure représente un réseau prépondérance inductive et sa présentation de Fresnel avec son impédance complexe et sa tension aux bornes de la charge.



FigureI-11 : circuit sans compensation, schémas unifilaire.

On propose maintenant d'améliorer le facteur de puissance par compensation local à l'aide de condensateurs de puissance de capacité C.

La figure (I.8) montre que en calculant C pour que le courant $\vec{I}$ ait la même valeur que la composante réactive $\bar{I}_r$ par la ligne tout en assurant une alimentation correcte du récepteur. Cette réduction peut atteindre 20 à 40%.

Il faut noter que la section (portion) AB de la ligne reste parcourue par la même puissance apparente S du circuit initiale, cette compensation réduit le courant transporté S.

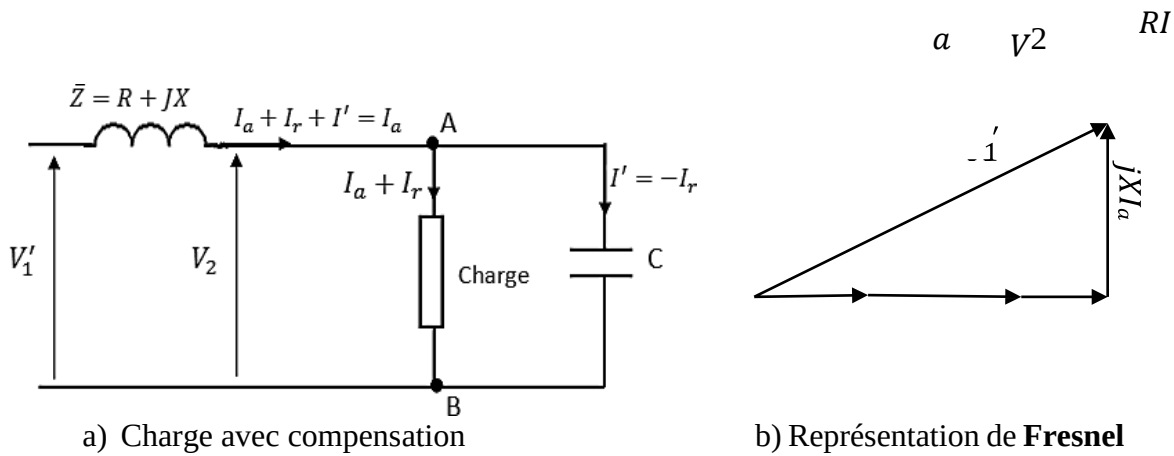


Figure I-12 : circuit avec compensation réactif, schéma unifilaire.

La compensation de l'énergie réactive par les moyens de compensation permet donc de réduire le courant transporté et bien d'autre avantage qui font d'elle une méthode très prisée.

I.14. Équipement de compensation de l'énergie réactive :

Le réseau en lui-même est une source non négligeable de puissance réactive. Ainsi, en dehors de la production de l'énergie réactive par les générateurs, le réseau doit faire appel à d'autres sources ou plutôt d'autres moyens de compensation, qui finalement sont au moins aussi souvent consommateurs que fournisseurs d'énergie réactive.

I.14.1. Les groupes de production (générateurs)

Les groupes de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances dynamiques leur permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux.

I.14.2. Les condensateurs :

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types :

- Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
- Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension.

I.14.3. Les inductances :

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau.

I.14.4. Les compensateurs synchrones :

C'est un alternateur qui produit seulement une puissance réactive. Il est modélisé par un nœud PV de puissance active nulle ($P = 0$) avec une tension constante. L'angle de la tension et la puissance réactive est calculé par le programme d'écoulement de puissance. La génération de la puissance réactive est limitée selon l'équation suivante:

$$Q^{min} < Q_g < Q^{max}_g$$

I.14.5. Les compensateurs statiques :

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. Chacun d'entre eux étant ainsi conducteur pendant une demi-période. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors.

I.15. Conclusion:

Ce chapitre expose une vision d'une manière générale sur les principes caractéristiques du réseau électrique concernant les différents aspects techniques (la production, le réseau transport et répartition, le réseau de distribution et la consommation) et leurs schéma d'exploitation. Ainsi que l'architecture et les différentes structures topologiques des réseaux électriques, puis une idée générale sur la compensation de l'énergie réactive et les moyens de compensation

Chapitre II : la compensation



II.1.Introduction

La demande de puissance active étant incompressible, la réduction des pertes de puissance peut être réalisée qu'en agissant sur la composante réactive du courant transitant dans les lignes de distribution.

La compensation de l'énergie réactive est un élément important pour améliorer la qualité du réseau électrique.

Une installation électrique, en courant alternatif, comprenant des récepteurs tels que transformateurs, moteurs, ballastes de tubes fluorescentes ou tout autres récepteurs dont l'intensité est déphasée par rapport à la tension, consomme de l'énergie réactive. Cette énergie réactive (exprimée en kilo var heure – kVAr/h) est facturée au même titre que l'énergie active par les fournisseurs d'énergie .

L'énergie réactive fait donc consommer plus de puissance et contribue ainsi à alourdir la facture d'électricité.

II.2. L'influence de la puissance réactive

La puissance réactive est un facteur influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur ce résume dans les points suivants :

- A. La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.
- B. Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.
- C. Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production.

II. 3.Définitions des différentes formes d'énergie

II.3.1. Energie active

Elle résulte de la puissance active P (kW) et elle est utilisable après sa transformation par le récepteur sous forme de chaleur. Elle s'exprime en kilo watt heure (kW/h)

II.3.2. Energie réactive

Elle sert à la magnétisation des circuits magnétiques des machines (transformateurs et moteurs). De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leur charge. Elle s'exprime en kilo var heure (kVar/h). Elle correspond à la puissance réactive Q (kVar) des récepteurs .

II.3.3. Energie apparente

L'énergie apparente (kVA/h) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente S (kVA) des récepteurs, somme vectorielle de P (kW) et Q (kVar).

II.4. Composante active et réactive du courant

A chacune des énergies active et réactive, correspond un courant.

II.4.1.Courant actif (I_a)

Le courant actif (I_a) est en phase avec la tension du réseau.il engendre la puissance active.

II.4.2. Courant réactif (I_r)

Le courant réactif (I_r) est déphasé de 90° par rapport au courant actif, soit en retard (récepteur inductif), soit en avance (récepteur capacitif). Il est nécessaire pour l'excitation magnétique des récepteurs.

II.4.3. Courant apparent (I_t)

Le courant apparent (I_t) est le courant résultant qui parcourt la ligne depuis la source jusqu'au récepteur. Si les courants sont parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation de Fresnel.

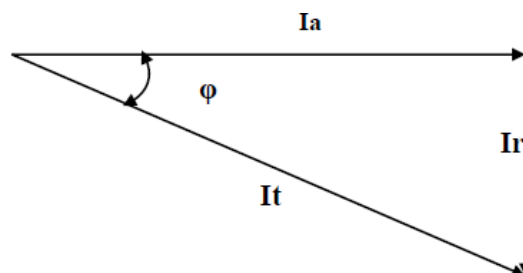


Figure II-1: Diagramme vectorielle des courants.

Les courants actifs, réactifs et apparents sont liés par les relations suivantes :

$$I_t = \sqrt{(I_a)^2 + (I_r)^2}$$

$$I_a = I_t \cos \varphi$$

$$I_r = I_t \sin \varphi$$

φ Angle de déphasage entre les composantes active et les composantes apparentes.

II.5.Composante active et réactive de la puissance

Le diagramme précédent établi pour les courants est aussi valable pour les puissances, il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau. On définit aussi :

II.5.1. La puissance active

On appelle puissance active la puissance qui se transforme intégralement en énergie mécanique, thermique et lumineuse, etc.

La puissance active est le produit de la tension par la composante du courant en phase avec elle :

$$\text{En monophasé :} \quad P = VI \cos \phi$$

$$\text{En triphasé :} \quad P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

Elle se mesure en W (watts) ou en KW à l'échelle industrielle.

II.5.2.La puissance réactive

On appelle puissance réactive la quantité Q fournie pour l'excitation magnétique des récepteurs. Elle est consommée par les circuits inductifs et fournie par les circuits capacitifs.

La puissance réactive est le produit de la tension par la composante du courant réactif, en quadrature avec elle :

$$- \text{En monophasé : } Q = VI \sin \varphi$$

$$- \text{En triphasé : } Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

Elle se mesure en VAR (Voltampères réactifs), ou en kVar à l'échelle industrielle

II.5.3. La puissance apparente

On appelle puissance apparente la quantité S fournie par le réseau au récepteur, qui est la résultante des deux puissances précédentes :

- $\underline{S} = \underline{P} + jQ$
- En monophasé : $S = VI$
- En triphasé : $S = \sqrt{3} UI$

II.6.Facteur de puissance

Le facteur de puissance est égal par définition à :

$$FP = \frac{P \text{ (puissance active)}}{S \text{ (puissance apparente)}}$$

Le facteur de puissance est le rapport de la puissance active à la puissance apparente ; c'est un nombre abstrait compris entre 0 et 1.

En l'absence d'harmoniques, le facteur de puissance est égal à **Cosφ**. Par contre, en présence d'harmoniques ces deux valeurs peuvent être très différentes :

$$FP = F_d * \cos \varphi$$

F_d : facteur de déformation

II.6.1.La valeur tan φ

Elle indique le rapport entre la puissance active et la puissance réactive circulant sur le réseau, c'est en compensant l'énergie réactive que la **tan φ** pourra être baissée et amenée le plus proche de 0.

On utilise souvent **tan φ** au lieu de **cos**.

En l'absence d'harmoniques, l'expression de **tan φ** est la suivante :

(puissance réactive)

$$\tan \varphi = \frac{\text{(puissance réactive)}}{P \text{ (puissance apparente)}}$$

II.7. Amélioration du facteur de puissance

L'installation de condensateurs permet de compenser l'énergie réactive de la composante fondamentale et d'obtenir un **$\cos \varphi$** à peu près égal à 1. Cependant, il faut noter que le distributeur d'énergie ne fait payer au client que l'énergie réactive due à la composante fondamentale. Il faudra donc calculer **$\cos \varphi_1$** (et non **F_p**) pour déterminer la puissance réactive des condensateurs qu'il faut installer pour réduire ou supprimer la facture d'énergie réactive.

II.8. Avantages d'un bon facteur de puissance

Un bon facteur de puissance permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- La suppression de la facturation de l'énergie réactive
- La diminution de la puissance souscrite en kVA.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte-tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire.

Un bon facteur de puissance c'est :

✍ **$\cos \varphi$** élevé, proche de 1.

Ou

✍ **$\tan \varphi$** faible, proche de 0.

II.9. Inconvénient d'un mauvais facteur de puissance

Un mauvais facteur de puissance dans une installation entraîne de nombreux inconvénients telque :

- Intensité de courant en ligne trop élevée ce qui engendre l'augmentation des pertes d'énergie active dans les câbles.
- La facturation de l'énergie réactive.
- Augmentation de la puissance souscrite en kVA
- Saturation des transformateurs.
- Dégradation de la qualité de l'installation électrique

II.10. Compensation de puissance réactive avec les batteries condensateurs

Généralement, la puissance réactive régule le niveau de tension du système d'alimentation. Si la tension du système n'est pas suffisante, la puissance active essentielle ne peut pas être fournie. La puissance réactive est donc utilisée pour maintenir une tension suffisante pour que la puissance active fasse un travail utile.

Ainsi, des stratégies de compensation de puissance réactive dans les systèmes de distribution d'énergie sont nécessaires pour réduire les pertes de puissance résistive, pour maintenir les niveaux de tension du système et pour améliorer les facteurs de puissance.

Dans le réseau de distribution BT, la compensation de puissance réactive se fait en utilisant les batteries de condensateurs décentralisés. Mais l'utilisation de ces batteries de condensateurs de manière décentralisée pose certains problèmes. Ces problèmes peuvent être surmontés en utilisant la méthode de compensation de puissance réactive centralisée. En centralisant les batteries de condensateurs ensemble, il peut aider à maintenir les tensions de bus et les facteurs de puissance ainsi qu'à réduire les pertes des câbles d'alimentation. Une batterie de condensateurs est un générateur de puissance réactive nécessaire pour alléger la puissance apparente des réseaux en amont des lieux de consommation. Ce composant passif du réseau est sollicité particulièrement pendant les périodes de forte consommation (période de pointe et de surcharge). Sa disponibilité sur le réseau pendant ces périodes est très souhaitable pour réduire les chutes de tensions et les pertes en réseau et donc pour optimiser le coût du kilowattheure. Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive dans ces installations industrielles aussi bien que dans le réseau public.

II.10.1. Définition d'un condensateur

C'est un récepteur constitué de deux parties conductrices (électrodes) séparées par un isolant. Il a la propriété (lorsqu'il est soumis à une tension sinusoïdale), de déphaser son intensité, donc sa puissance (réactive capacitive) de 90° en avant sur la tension. La composition vectorielle de ces intensités ou puissances réactives (inductive et capacitive) conduit à une intensité ou puissance résultante réactive inférieure à celle existant avant l'installation de condensateurs. Pour simplifier ; on dit que les récepteurs inductifs (moteur, transformateur...) consomment de l'énergie réactive alors que les condensateurs (récepteurs capacitifs) produisent de l'énergie réactive.

II.10.2. Rôle du condensateur de puissance

Le rôle de base des condensateurs de puissance est la compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques et le filtrage des harmoniques. Ils sont connectés aux bornes du réseau suivant un couplage étoile ou triangle.

Le nombre de condensateurs connectés dépend de la puissance réactive totale nécessaire et de la puissance unitaire. La puissance réactive des condensateurs à mettre en œuvre, doit être déterminée en fonction de la puissance de l'installation, du $\cos \varphi$ d'origine et du $\cos \varphi$ requis à l'arrivée.

Les avantages des batteries de condensateurs sont :

- Absence d'usures mécaniques.
- Entretien réduit.
- Pertes faibles.
- Elles occupent un faible volume.
- Installation facile.

Les désavantages sont :

- La quantité de la puissance réactive produite par les batteries ne peut être contrôlée qu'en pas discrets,
- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges, Ce qui peut provoquer leur vieillissement prématuré et parfois en claquage de l'isolant.
- Si les batteries des condensateurs sont branchées au réseau via un disjoncteur, ce disjoncteur introduit son propre bruit dans le réseau,
- Les batteries des condensateurs n'ont pas la possibilité de la réponse rapide aux phénomènes transitoires dans le réseau.

II.10.3. Constitution de la batterie de condensateurs

Chaque élément est formé de feuilles d'aluminium entre lesquelles est inséré un ensemble de trois ou quatre feuilles d'un papier spécial imprégné d'huile minérale, le tout est plié en accordéon ou enroulé. Dans le premier cas, l'élément est parallélépipédique, dans le second il est cylindrique.

Ces éléments sont disposés en séries puis en parallèle et sont placés dans une cuve métallique remplie d'huile susceptible d'assurer le refroidissement. Cela constitue une unité, ces unités peuvent aussi être associées en série, en parallèle, en triangle ou en étoile.

II.11. Principe de fonctionnement de la compensation avec batterie condensateur

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active P , la figure suivante montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente, et donc de courant, que la puissance réactive est importante.

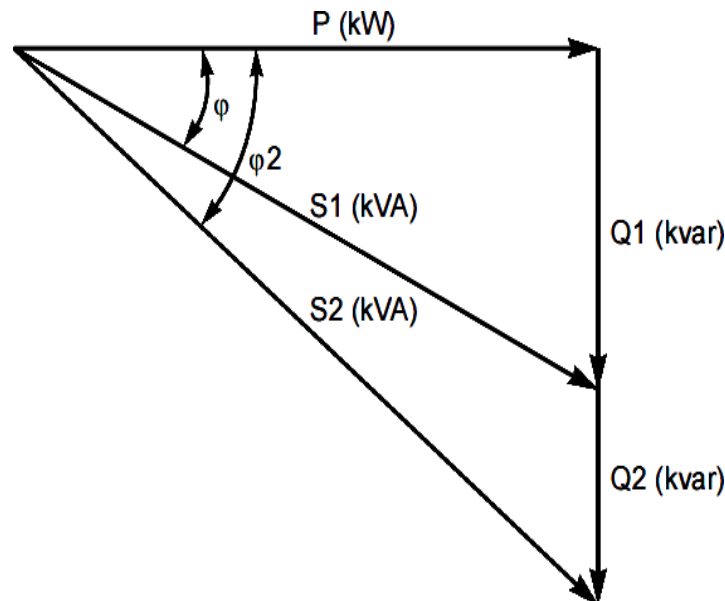


Figure II-2. Influence de la puissance réactive.

Q_1 : énergie réactive pour un angle de déphasage φ

Q_2 ; énergie réactive pour un angle de déphasage φ_2

Ainsi, la circulation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution entraîne, d'ailleurs d'un courant appelé plus important :

- Des surcharges au niveau des transformateurs,
- L'échauffement des câbles d'alimentation,
- Des pertes supplémentaires,
- Des chutes de tension importantes.

Pour ces raisons, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges, pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle "compensation de l'énergie réactive".

Pour inciter à cela et éviter de sur calibrer son réseau, le distributeur d'énergie pénalise financièrement les consommateurs d'énergie réactive au-delà d'un certain seuil.

On utilise des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs. Pour réduire la puissance apparente absorbée au réseau de la valeur S_2 à la valeur S_1 , on doit connecter une batterie de condensateurs fournissant l'énergie réactive Q_c .

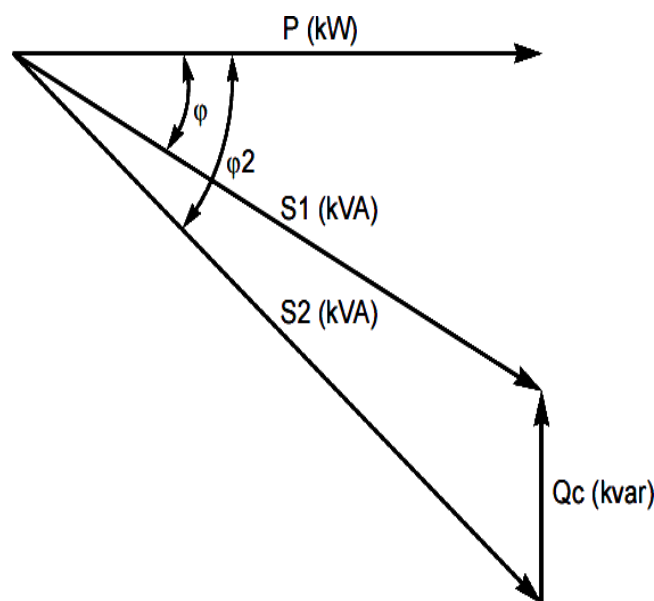


Figure II-3: Principe de la compensation d'énergie réactive

P : Puissance active

S_1 et S_2 : puissances apparentes (avant et après compensation)

Q_c : puissance réactive du condensateur

φ : Angle de déphasage après la compensation

φ_2 : Angle déphasage avant la compensation

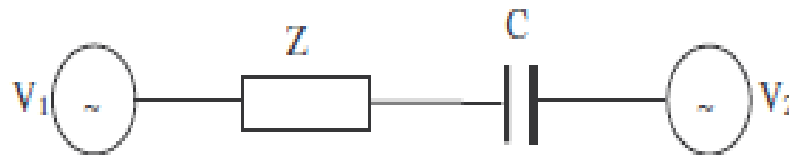
II.11.1. Type d'installation des batteries condensateurs

Les batteries de condensateurs sont introduites dans les réseaux de transport et de distribution soit par une installation série ou shunt. Dans ce qui suit, nous allons donner ces deux types d'installation.

II.11.2. Le condensateur à installation série

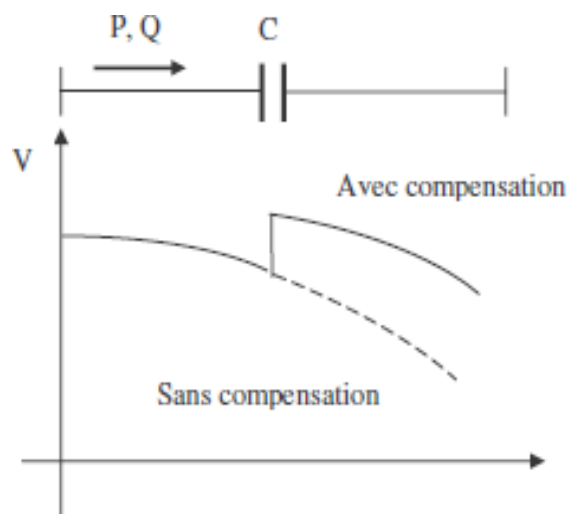
La compensation série permet d'ajouter une chute de tension capacitive qui s'oppose à la chute de tension inductive de la ligne. En aval du condensateur, la tension de la ligne est supérieure à la tension en amont.

Pour une puissance transitée donnée, le courant sera donc plus faible et les pertes par effet Joule réduites.



FigureII-4: Schéma d'un condensateur monté en série sur une ligne.

Les condensateurs série peuvent être placés à différents endroits de la ligne (milieu, tiers, postes d'extrémité, ...). La figure suivante montre par exemple le profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation en son centre. On voit que la compensation réduit la chute de tension.



FigureII.5: Profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation.

II.11.3. Le condensateur à installation shunt

Il permet de compenser les énergies réactives consommées par les clients et d'optimiser le courant en amont de la charge. Il est possible de faire transiter une puissance active plus importante sur une même installation.

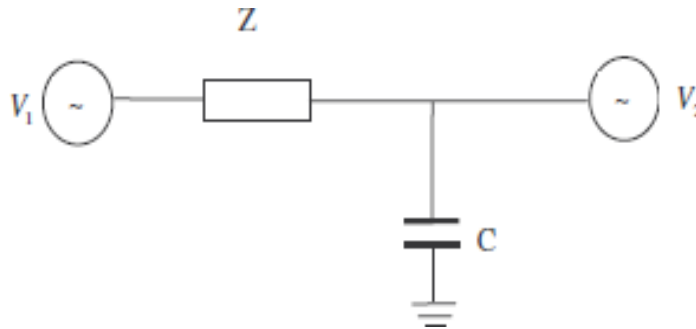


Figure II-6: Schéma d'un condensateur monté en parallèle sur une ligne.

II.12. Les différents types de compensation

La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits :

- les condensateurs de valeurs fixes ou batterie fixe
- les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batteries automatiques) qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation.

II.12.1. Compensation fixe

Les batteries de condensateurs fournissent une puissance réactive constante quelque soient les variations des charges des récepteurs.

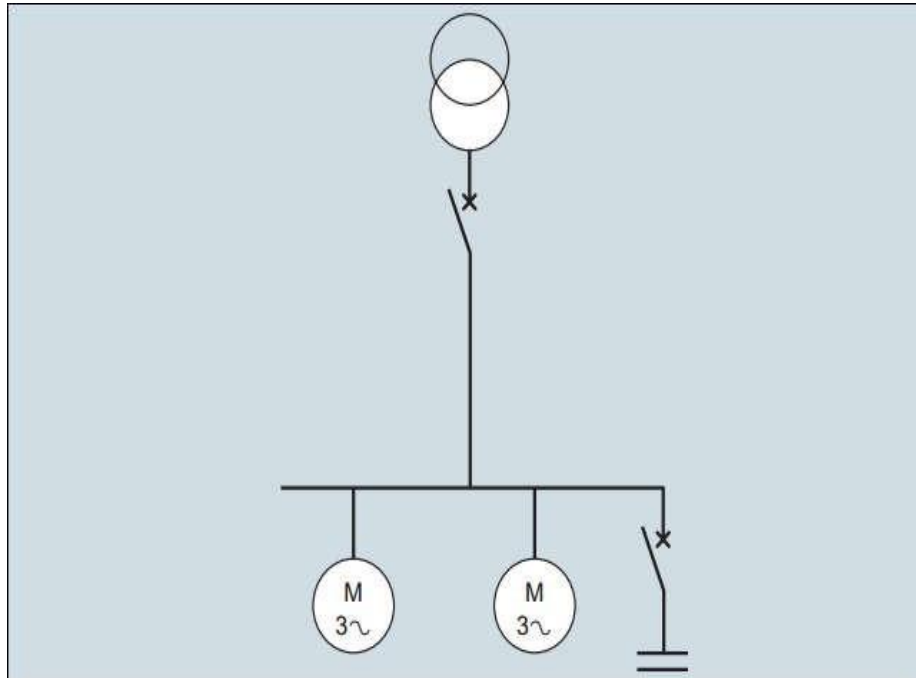
La mise en service de ces batteries peut être manuelle (par disjoncteur ou interrupteur), semi-automatique (par contacteur) commandé à distance.

Ce type de compensation est utilisé lorsque la puissance réactive est faible, (<15% de la puissance du transformateur) et la charge relativement stable.

Elles sont utilisées de préférence :

- Aux bornes des récepteurs
- Sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible Ce type de batteries est généralement utilisé dans les cas :
- D'installation électrique à charge constante fonctionnant 24/24 h.

- De compensation individuelle de moteurs.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est inférieure ou égale à 15 % de la puissance du transformateur.



FigureII-7: Compensation fixe.

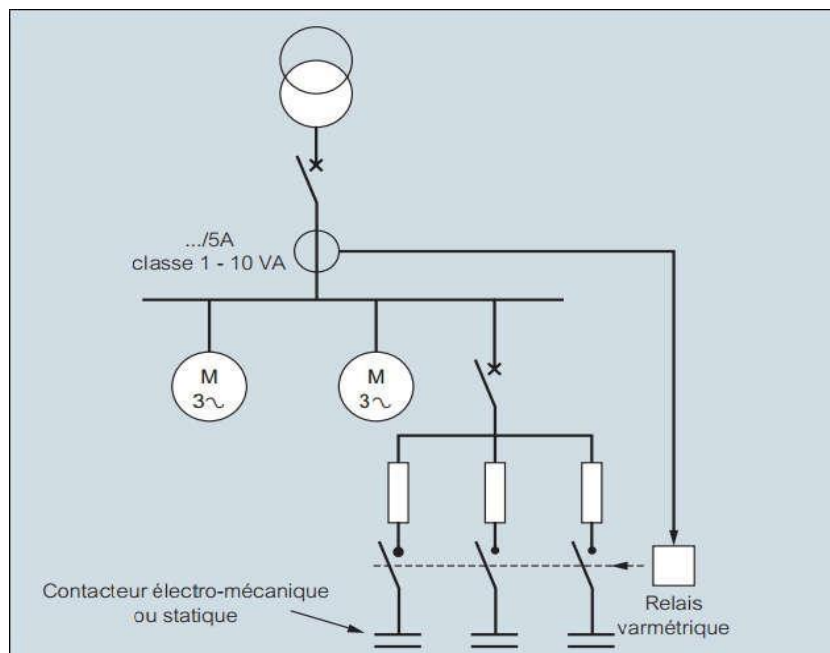
II.12.2. Compensation de type automatique (ou en gradins)

La puissance réactive fournie par la batterie est modulable en fonction des variations du facteur de puissance et de la charge des récepteurs, donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation.

Ces batteries sont composées d'une association en parallèle de gradins condensateurs (gradin = condensateur + contacteur). La mise en ou hors service de tout ou partie de la batterie étant asservie à un régulateur var métrique intégré.

Ces batteries sont également utilisées dans le cas :

- De compensation de tableaux généraux (TGBT) ou gros départ.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est supérieure à 15% de la puissance du transformateur.



FigureII-8: Principe de la compensation automatique d'une installation.

II.13. Les avantages de la compensation automatique par contacteur statique

- ❖ Réponse immédiate à toute variation du facteur de puissance (le temps de réponse est de 2 ms à 40 ms selon l'option de régulation).
- ❖ Nombre illimité d'opérations.
- ❖ Élimination des phénomènes transitoires liés à la fermeture/ouverture des contacteurs sur les condensateurs.
- ❖ Fonctionnement totalement silencieux.

En gérant la compensation au plus près des besoins de la charge, les risques de produire des surtensions durant les périodes de faible charge sont évités ainsi que, en empêchant l'établissement de surtension, les dégradations probables des appareils et des équipements.

II.14. Choix de la localisation de compensation par batteries

La compensation peut être globale, par secteur ou individuelle. En principe, la compensation idéale est-elle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Ce mode de compensation est très coûteux, on cherchera donc, dans la pratique, un optimum technico-économique.

II.14.1 Compensation globale

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure la compensation pour l'ensemble de l'installation. La batterie reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation.

Ce type de compensation :

- Supprime les facturations complémentaires pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : tarif vert).
- Diminue la puissance apparente (ou appelée) en l'ajustant au besoin réel en kW de l'installation (exemple : tarif jaune).
- Soulage le poste de transformation (puissance disponible en KW)

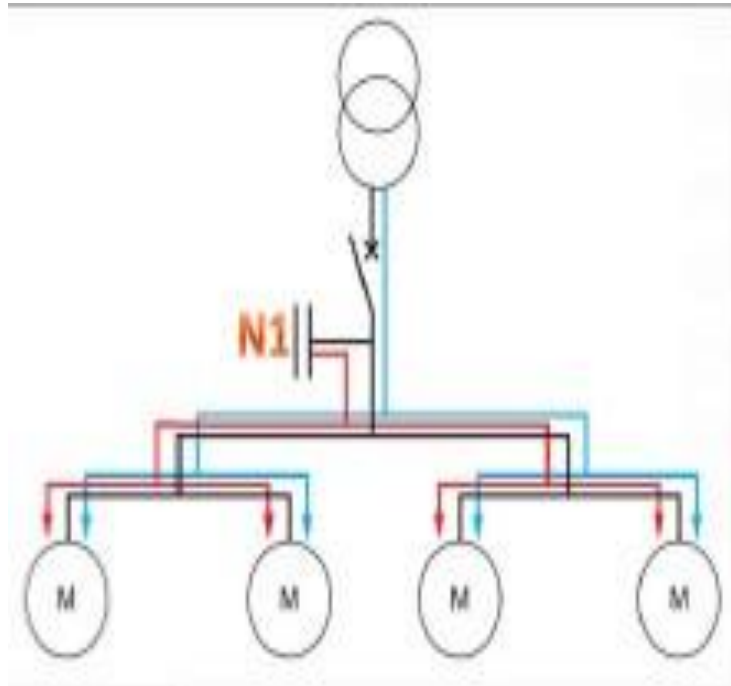


Figure II.9: Compensation globale.

Le courant réactif est présent dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs.

Les pertes par effet Joule (kWh) dans les câbles situés en aval et leur dimensionnement ne sont de ce fait pas diminuées.

II.14.2. Compensation partielle ou par secteurs

La batterie de condensateurs est connectée sur l'arrivée du tableau de distribution intermédiaire pour lequel la compensation doit être réalisée.

Une économie significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment au niveau du dimensionnement des câbles d'arrivée du ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée. [18]

Avantages : La compensation partielle de l'installation :

- + Réduit les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive.
- + Réduit la puissance apparente d'utilisation (en kVA), calculée habituellement à partir des charges installées.
- + Soulage le transformateur d'alimentation, ce qui permet d'alimenter des charges supplémentaires si nécessaire.
- + Permet de réduire la section des câbles d'arrivée du tableau de distribution

intermédiaire, ou d'ajouter des charges supplémentaires.

- + Réduit les pertes en ligne dans ces mêmes câbles.

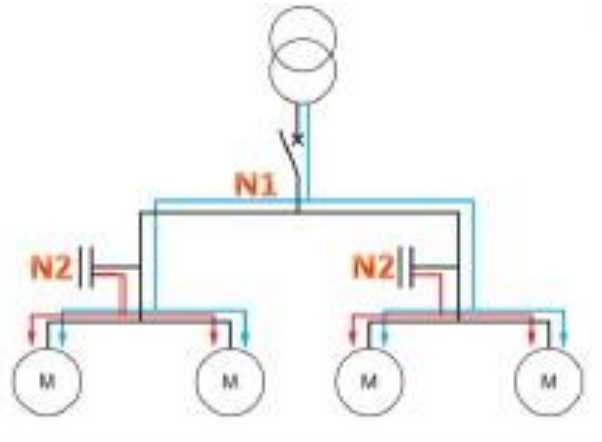


Figure II.10: Compensation partielle.

Les courants réactifs circulent toujours dans les départs du tableau jusqu'aux charges.

Pour les raisons citées ci avant, la compensation partielle n'améliore ni le dimensionnement ni les pertes en ligne de ces départs.

Si de larges variations de charges se produisent, un risque de surcompensation et, par conséquent de surtension est toujours à considérer.

II.14.3. Compensation individuelle

La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive (généralement un moteur).

La compensation individuelle est à considérer quand la puissance du moteur est significative par rapport à la puissance souscrite à l'installation.

Le dimensionnement en kVAR de la batterie de condensateurs est de l'ordre de nominale (kW) du 25% de la puissance du moteur. Une compensation complémentaire en tête de l'installation (transformateur) peut être aussi économiquement intéressante.

Avantages : La compensation individuelle réduit :

- + Les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive.
- + La puissance apparente consommée (en kVA).
- + La section des câbles et les pertes en ligne.

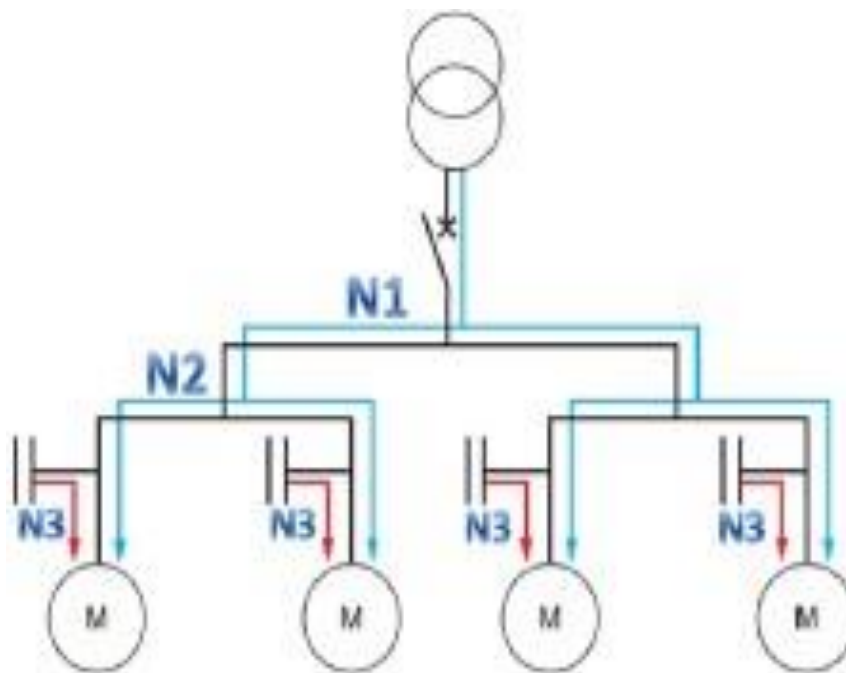


Figure II.-1: Compensation individuelle.

II.14.4. Compensation combinée

Ce mode de compensation est utilisé dans le cas où l'installation comporte de petits et de gros appareils électriques. Une compensation individuelle est réalisée pour les appareils fonctionnant pendant de longue durée et une compensation par secteur ou globale pour les autres récepteurs.

L'avantage de ce type de compensation est que chaque ensemble d'appareils électrique est compensé de la manière la plus adaptée.

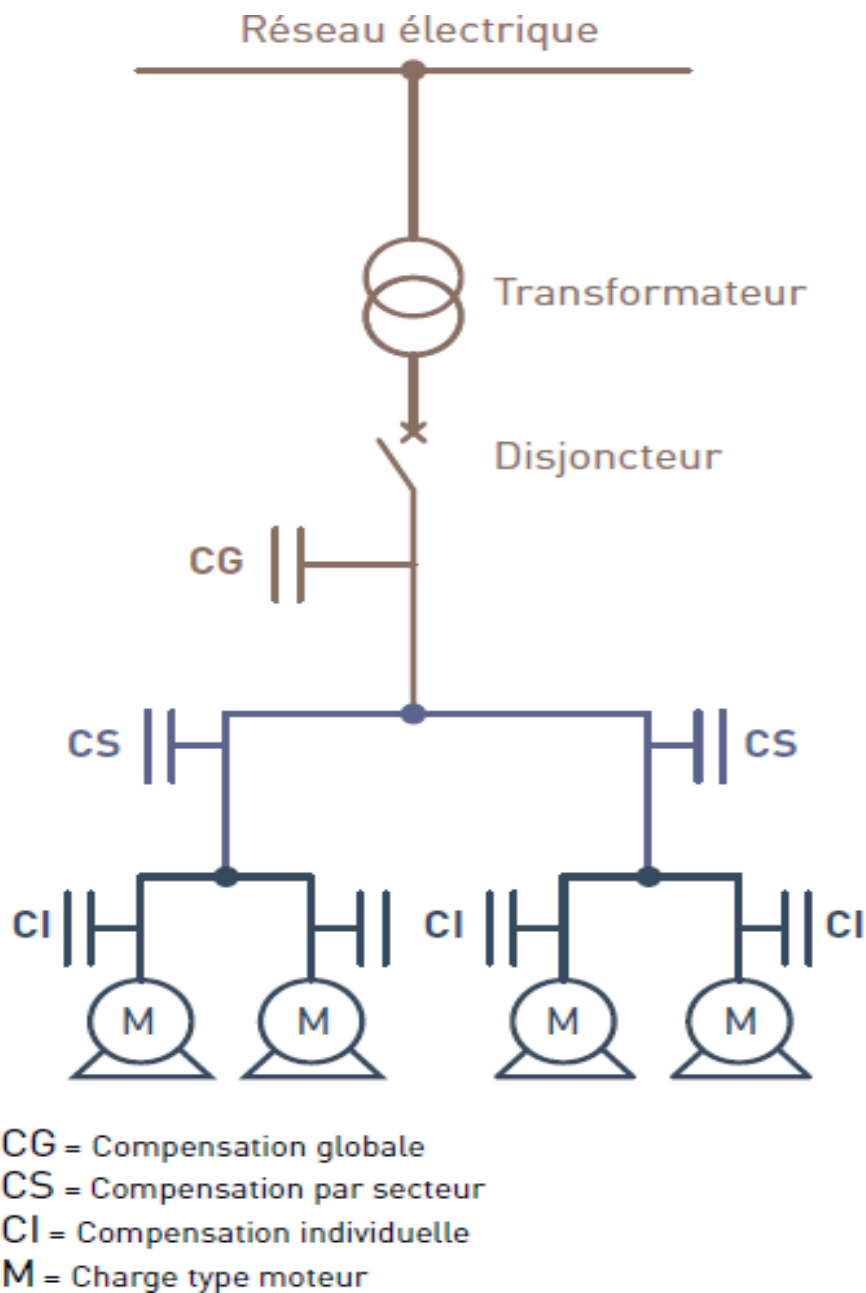


Figure II-12: Différentes zones d'implantation des batteries de condensateurs.

II.15. Les différents modes de couplage des condensateurs

Deux modes de couplages sont réalisables en basse tension :

II.15.1.Couplage en triangle

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = 3. C. \omega. U^2$$

$$\text{Avec } m = 2. \pi. f$$

La valeur de la capacité de chaque condensateur est :

$$C_{\Delta} = \frac{P(\tan\varphi - \tan\varphi^F)}{3.U^2 \omega}$$

II.15.2.Couplage en étoile

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = C. \omega. U^2$$

La valeur de la capacité de chaque condensateur est :

$$C_{\Delta} = \frac{P(\tan\varphi - \tan\varphi^F)}{U^2 \omega}$$

On remarque que :

$$C_y = 3. C_{\Delta}$$

II.15.3.Choix du couplage d'un condensateur

Pour constituer des batteries de puissance importante, il existe plusieurs possibilités de câblage ou connexion par association de condensateurs unitaires, soit :

Couplage en triangle: condensateurs triphasés (sans fusible interne). Couplés en parallèle,

Couplage en double étoile de condensateurs monophasés (avec ou sans fusible interne),

Couplage en H.

Le choix du mode de couplage dépend :

- Des caractéristiques, tension de réseau et puissance de la batterie,
- Du type de compensation, fixe ou automatique (en gradin),

Du type de protection :

- Condensateur avec ou sans fusible interne,
- Différentielle (de déséquilibre) ou avec fusibles MT,
- Des impératifs économiques

Du type de protection :

- Condensateur avec ou sans fusible interne,
- Différentielle (de déséquilibre) ou avec fusibles MT,
- Des impératifs économiques

II.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, le principe de la compensation de la puissance réactive par des batteries de condensateurs dans les installations en moyen et basse tensions.

Nous avons mis en évidence, les différents modes de compensations tout en citant pour chaque mode leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons terminé, en développant les différents choix nécessaires à apprendre pour la localisation de la compensation de la puissance réactive soit : global, partielle, individuelle et combinée.

Chapitre III : Modélisation de réseaux électrique



III.1. Modélisations Mathématique du Réseau Électrique :

III.1.1 Introduction :

Les moteurs synchrones sont des générateurs d'énergie électrique couramment utilisés par les consommateurs. Ils sont repérés par la vitesse de rotation de l'arbre de sortie correspondant à la vitesse de rotation du champ tournant. A cet effet, un couple mécanique issu d'une source d'énergie primaire (telle que l'énergie hydraulique, nucléaire ou chimique) est exercé sur l'arbre d'une machine synchrone via une liaison mécanique intermédiaire (généralement une turbine). Un circuit d'excitation alimenté en courant continu est utilisé pour générer le champ magnétique du rotor.

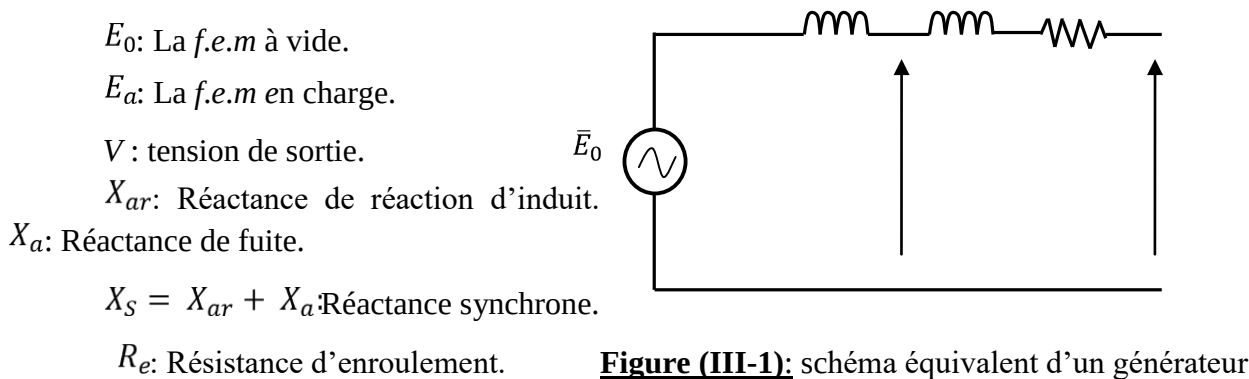
Le champ magnétique du rotor reste fixe par rapport au rotor, garantissant que les champs magnétiques tournants du rotor et du stator ont la même vitesse en fonctionnement normal. Par conséquent, l'enroulement du stator subit un champ magnétique changeant périodiquement, induisant ainsi une force électromotrice à courant alternatif, dans le stator.

$$Q_{Gmin} \leq Q \leq Q_{Gmax}$$

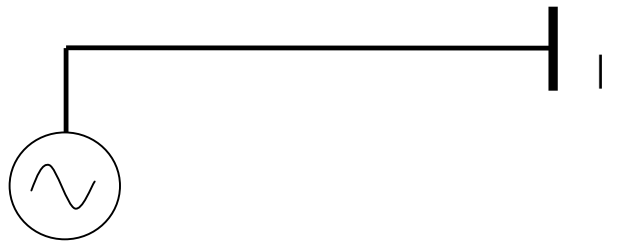
III.2. Modélisation des éléments du réseau électrique

III.2.1 Modélisation des générateurs :

La production d'énergie électrique est généralement assurée par des machines synchrones triphasées dont leur principe consiste à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique à tension et fréquence désirées (figure. I.4).



Dans le calcul d'écoulement de puissance, un générateur est représenté par une source de tension.

**Fig. (III-2) :** Modèle du générateur

Avec,

$|V_i|$: Module de la tension (à l'accès i).

δ_i : Déphasage de la tension (à l'accès i).

La puissance apparente délivrée par le générateur est :

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i$$

(I-1)

La tension est exprimée en pu, sous la forme :

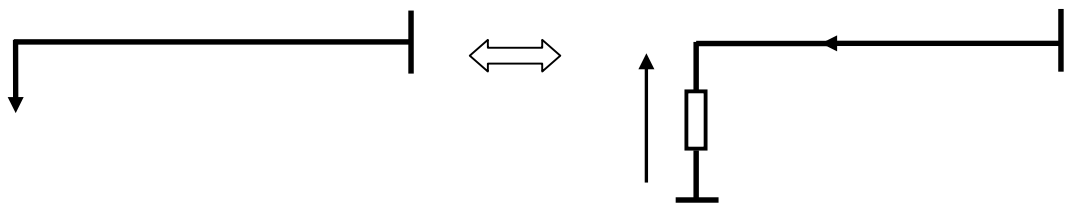
$$\bar{V}_i = |V_i|e^{j\delta_i}$$

Généralement, un générateur de tension est équipé d'un régulateur qui assure la régulation de la tension à ses bornes de telle sorte qu'elle soit constante.

III.2.2 Modélisation des charges :

Le nœud est directement lié à la charge, sans composants intermédiaires entre les deux.

La source d'alimentation est absente dans ce scénario. Les puissances active et réactive sont établies et acceptées telles quelles. Les variables à déterminer sont la phase et le module de la tension

**Figure (III-3) :** Modélisation d'une charge

La puissance apparente aux bornes de la charge est donnée par :

$$\bar{S}_{ich} = P_i + jQ_i$$

Avec:

$\bar{S}_{ich}$: Puissance apparente complexe au nœud (i). P_i :

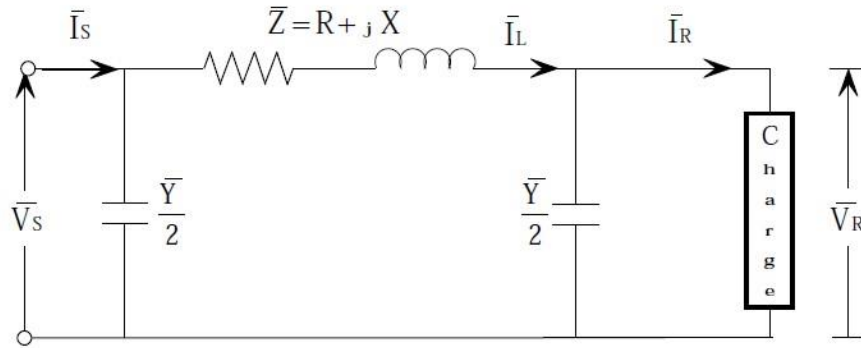
Puissance active demandée par la charge.

Q_i : Puissance réactive (elle peut être positive ou négative selon que la charge est de nature inductive, respectivement, capacitive). U_{ch} : Tension aux bornes de la charge.

III.2.3 Modélisation des lignes aériennes :

Les lignes aériennes sont conçues pour véhiculer l'énergie électrique produite par les centrales de production jusqu'aux consommateurs les plus éloignés.

Une ligne électrique peut être considérée comme une succession de circuits dont les paramètres sont uniformément répartis sur toute sa longueur. Ces circuits se composent d'une infinité d'éléments identiques tels que, résistances et inductances linéiques dans le sens longitudinal et des capacités linéiques dans le sens transversal (figure I.7) [06].



Figure(III-4) : Modèle en π d'une ligne aérienn

Appliquant la loi de Kirchhoff pour déterminer la tension $\bar{V}_S$ et le courant $\bar{I}_S$ à la source, on aura le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \bar{V}_S = A \cdot \bar{V}_R + B \cdot \bar{I}_R \\ \bar{I}_S = C \cdot \bar{V}_R + D \cdot \bar{I}_R \end{cases} \quad (I-3)$$

Sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (\text{I-4})$$

Avec:

A, B, C et D : sont les paramètres qui dépendent des constantes de la ligne de transmission, qu'on déterminera par la suite.

$\bar{V}_S, \bar{I}_S$: Tension et courant à la source respectivement.

$\bar{V}_R, \bar{I}_R$: Tension et courant à la réception respectivement.

$\bar{Z}$: Impédance de la ligne.

R, X : Résistance et réactance de la ligne respectivement.

$\bar{Y}$: Admittance shunt de la ligne.

La tension et le courant à l'extrémité source sont obtenus comme suit : De la figure I.7 on a :

$$\bar{I}_L = \bar{I}_R + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_R \quad (\text{I-5})$$

La tension à la source est :

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_L \quad (\text{I-6})$$

$$\bar{V}_S = \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_R \quad (\text{I-7})$$

Le courant à la source est:

$$\bar{I}_S = \bar{I}_L + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_S \quad (\text{I-8})$$

Remplaçant (I-5) et (I-7) dans (I-8) on obtient :

$$\bar{I}_S = \bar{Y} \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{4}\right) \bar{V}_R + \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \bar{I}_R$$

Les équations (I.7) et (I.8) peuvent être écrites sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) & \bar{Z} \\ \bar{Y} \cdot \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{4}\right) & \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}$$

Par identification des équations (I-4) et (I-10) on aura :

$$A = D = \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{2}\right) ; B = \bar{Z} ; C = \bar{Y} \cdot \left(1 + \bar{Z} \frac{\bar{Y}}{4}\right)$$

III.2.4 Modélisation du transformateur :

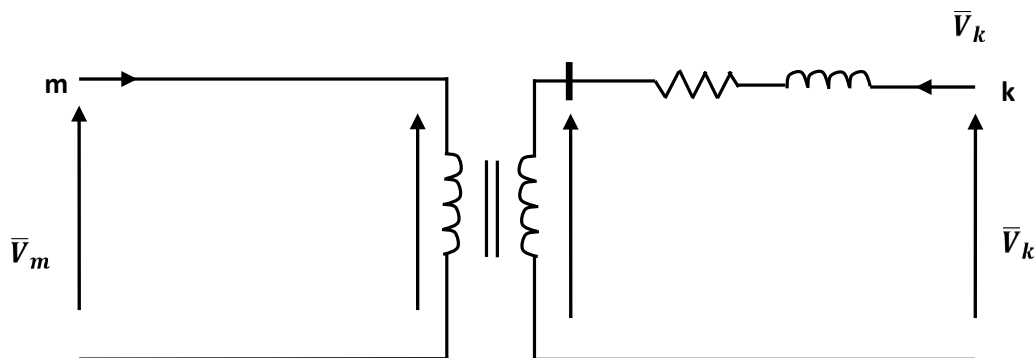
Le transformateur est l'un des éléments qu'on retrouve aux différents niveaux de tensions du réseau électrique, il est entièrement statique, il permet la modification de la présentation de l'énergie électrique alternative afin de la rendre aussi commode que possible aux différents stades de la production,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

On rencontre dans les réseaux de transport de l'énergie électrique certains transformateurs souvent utilisés, qui sont :

- Transformateurs fonctionnant en régime nominal (rapport de transformation nominal).
- Transformateurs à gradin (rapport de transformation réglable).
- Transformateurs déphaseurs (rapport de transformation peut être présenté par un nombre complexe) [07] [08].

Transformateur à gradins :

Un transformateur à gradins peut être modélisé comme suit :



Figure(III-5) : Modèle d'un transformateur

Avec:

$\bar{V}_m, \bar{I}_m$: Tension et courant respectivement au primaire du transformateur ;

$\bar{V}_k, \bar{I}_k$:Tension et courant respectivement au secondaire du transformateur ;

$\bar{E}_1, \bar{E}_2$:F.e.m primaire et secondaire respectivement ;

$\bar{Z}_1 = r_1 + jx_1$: Impédance de l'enroulement primaire ;

$\bar{Z}_2 = r_2 + jx_2$: Impédance de l'enroulement secondaire ;

r_1, r_2 : Résistance de l'enroulement primaire et secondaire respectivement ;

x_1, x_2 : Réactance de l'enroulement primaire et secondaire respectivement ;

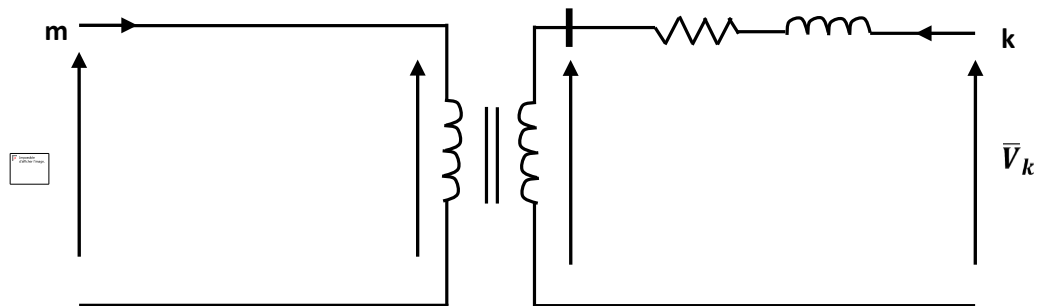
$\bar{Y}_T = g_T + jb_T$: Admittance shunt;

g_T, b_T : Conductance et susceptance shunt ; I_0 :

Courant qui traverse la branche magnétisante ;

μ : Rapport de transformation.

En négligeant l'effet de la branche magnétisante et en ramenant l'impédance de l'enroulement primaire au secondaire on aura le schéma approximatif suivant :



Figure(III-6): Modèle approximatif du transformate

Avec:

$$\bar{Z}_{tk} = r_{tk} + jx_{tk}$$

$\bar{Z}_{tk}$: Impédance du transformateur ramenée au secondaire.

r_{tk}, x_{tk} : La résistance et la réactance, respectivement, du transformateur ramenée au secondaire.

De la figure III-6 on peut écrire :

$$\mu = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = -\frac{\bar{I}_k}{\bar{I}_m}$$

$$\bar{V}_m = \bar{E}_1$$

$$\bar{V}_k = \bar{E}_2 + (r_{tk} + jx_{tk})\bar{I}_k$$

Les équations (I-11), (I-12) et (I-13) nous donnent les expressions des courants comme suit:

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{y}_{tk}}{\mu^2} \bar{V}_m + \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} \bar{V}_k$$

$$\bar{I}_k = \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} \bar{V}_m + \bar{y}_{tk} \bar{V}_k$$

Avec:

$$\bar{y}_{tk} = \frac{1}{\bar{z}_{tk}}$$

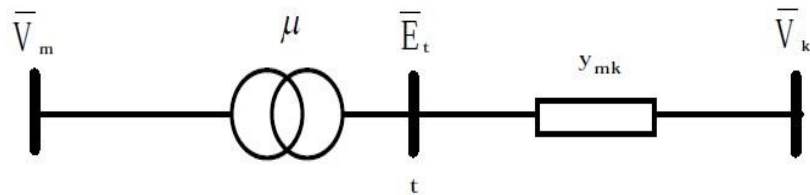
Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\bar{y}_{tk}}{\mu^2}\right) & \left(\frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu}\right) \\ \left(\frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu}\right) & \bar{y}_{tk} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \bar{V}_k \end{bmatrix} \quad (I-17)$$

D'où la matrice admittance nodale du transformateur est :

$$\bar{Y}_{TR} = \begin{pmatrix} \frac{\bar{y}_{tk}}{\mu^2} & \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} \\ \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} & \bar{y}_{tk} \end{pmatrix}$$

Transformateur déphaseur :



Figure(III-7) : Modèle d'un transformateur déphaseur

Étant donné que le transformateur est idéal, on aura :

$$\bar{S}_m = \bar{S}_t$$

(I-19)

Donc : $\bar{E}_m \bar{I}_m^* = \bar{E}_t \bar{I}_t^*$

Alors, $\bar{I}_m = \frac{\bar{E}_t^*}{\bar{E}_m^*} \bar{I}_t$

Avec $\bar{I}_t = -\bar{I}_k$, on aura : $\bar{I}_m = -\frac{\bar{E}_t^*}{\bar{E}_m^*} \bar{I}_k$

Sachant que, $\bar{\mu} = \frac{\bar{E}_m}{\bar{E}_t}$ et $\bar{E}_m = \bar{V}_m$, alors :

$$\bar{I}_k (\bar{V}_k - \bar{E}_t) \bar{y}_{mk} = \left(\bar{E}_t - \frac{\bar{V}_m}{\bar{\mu}} \right) \bar{y}_{mk} \quad (I-20)$$

$$\left(\bar{E}_t - \frac{\bar{V}_m}{\bar{\mu}} \right) \bar{y}_{mk} = -\frac{\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} \bar{V}_m + \bar{y}_{mk} \bar{V}_k \quad (I-21)$$

Finalement, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^2} \right) & \left(\frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^*} \right) \\ \left(\frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} \right) & \bar{y}_{mk} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \bar{V}_k \end{bmatrix} \quad (I-22)$$

D'où, la matrice admittance du transformateur déphaseur est :

$$\bar{Y}_{TR} = \begin{pmatrix} \frac{\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^2} & \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^*} \\ \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} & \bar{y}_{mk} \end{pmatrix} \quad (I-23)$$

III.3 Modélisation des nœuds du réseau électrique :

Chaque nœud d'un réseau est caractérisé par quatre variables, P_i , Q_i , V_i et δ_i . Si on connaît deux des quatre variables on pourra déterminer les deux autres à partir des équations principales de l'écoulement de puissance. En pratique, le problème se pose autrement. Pour cela, il faut classer les nœuds du système comme suit :

III.3.1 Nœud générateur (P, V) ou barre de régulation :

c'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. La puissance active et le module de la tension sont spécifiés et il reste à déterminer la puissance réactive Q et l'angle de phase δ . La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures, Q_g^{min} et Q_g^{max} respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud charge (P, Q).

III.3.2 Nœud consommateur (P, Q) ou barre de charge :

C'est un nœud directement connecté à un générateur ou à une source non fonctionnelle. Spécifiez la puissance active et le module de tension, puis déterminez la puissance réactive Q et l'angle de phase. La génération d'énergie réactive est limitée respectivement par des limites inférieure et supérieure. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur est fixée à cette limite et la tension est relâchée, et ce nœud devient alors le nœud de charge (P, Q).

III.3.3 Nœud bilan () ou barre d'équilibre :

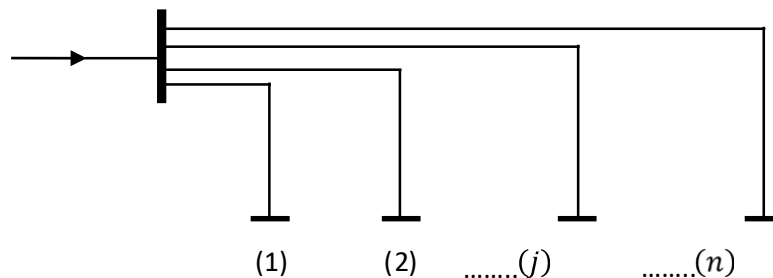
Il s'agit d'un nœud connecté à un générateur relativement puissant ; il est pris en compte dans les calculs de flux de puissance pour compenser les pertes actives et assurer un équilibre entre la demande de puissance active et la production. Dans le nœud d'équilibre, spécifiez l'amplitude de tension et l'angle de phase, puis déterminez P et Q .

Finalement, on doit mesurer les angles de phases par rapport à une référence qui est l'accès bilan dont l'angle de phase sera alors pris égal à zéro.

III.4 Construction de la matrice admittance d'un réseau électrique :

[07] Soit un réseau électrique à (n) accès indépendants, montré sur la figure I.11.

On considère un accès (i) parmi les (n) accès différent de celui de référence



Figure(III-8): Schéma d'un réseau électrique à (n) accès

En appliquant la loi des nœuds sur l'accès on aura :

$$I_i = \sum_{j=1}^n I_{ij} \quad (I.24)$$

Avec :

I_i : Courant injecté à l'accès (i)

I_{ij} : Courant circulant entre l'accès (i) et l'accès (j) à travers la branche ($i - j$)

On peut écrire :

$$I_{ij} = (V_i - V_j) \cdot y_{ij} \quad (I.25)$$

Telle que :

V_i et V_j : Tensions aux accès (i) et (j) respectivement.

y_{ij} : Admittance propre de la branche ($i - j$).

Remplaçant l'équation (I-25) dans (I-24) et en considérant l'accès de référence, on aura :

$$I_i = \sum_{j=0}^n y_{ij} \cdot (V_i - V_j) = y_{i0} \cdot (V_i - V_0) + y_{i1} \cdot (V_i - V_1) + y_{i2} \cdot (V_i - V_2) + \dots + y_{in} \cdot (V_i - V_n) \quad (I.26)$$

Telle que : $V_0 = 0$ et $i=1, n$

y_{i0} : La somme des admittances transversales des lignes reliées à l'accès (i).

$$\text{Alors, } I_i = V_i \cdot [y_{i0} + \sum_{j=1}^n y_{ij}] - y_{i1} \cdot V_1 - y_{i2} \cdot V_2 - y_{i3} \cdot V_3 - \dots - y_{in} \cdot V_n \quad \text{Pour } i=1, n \quad (I.27)$$

Sous forme matricielle pour les n accès on aura :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (I.28)$$

D'où: $[I] = [Y_{bus}] \cdot [V]$ (I.29) Avec :

$[Y_{bus}]$: **Matrice nodale des admittances d'ordre (n×n).**

Pour déterminer les éléments diagonaux (Y_{ii}) de la matrice admittance nodale $[Y_{bus}]$ à l'accès (i), on doit faire la somme de toutes les admittances des branches reliées à cet accès y compris les admittances de la connexion à l'accès de référence si elles existent.

Pour calculer les éléments hors diagonale de la matrice admittance $[Y_{bus}]$, on prend directement l'admittance propre de l'élément qui relie les accès (i) et (j) et on inverse son signe.

$$Y_{ii} = y_{i0} + \sum_{j=1}^n y_{ij}$$

$$, \quad Y_{ij} = -y_{ij} \quad (I.30)$$

III.5 Calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau électrique :

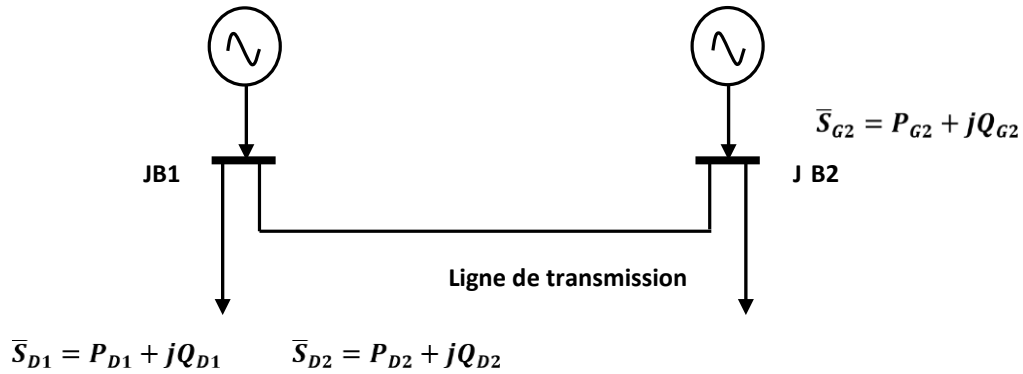
L'écoulement de puissance est d'une importance capitale, il nous permet de déterminer l'amplitude et l'angle de phase des tensions sur chaque accès ainsi que les puissances actives et réactives qui transitent d'un accès à un autre.

Le problème revient à résoudre le système de (2n) équations algébriques non linéaires à (n) accès, d'où la nécessité d'utilisation des techniques de calcul numérique

Plusieurs méthodes numériques sont utilisées pour le calcul de l'écoulement de puissance, dans notre travail on utilisera la méthode de Newton-Raphson qui sera définie par la suite.

III.6 Équation de calcul de l'écoulement de puissance :

Soit le système a deux jeux de barres "JB" représenté sur la figure. I.12 [10] [11]



Figure(III-9) : Système électrique à deux jeux de barres

On combine les puissances générées et demandées à chaque barre pour obtenir une puissance nette $\bar{S}$, définie comme la différence entre la production et la consommation de puissance du jeu de barre en question.

On note que pour le JB 1 :

$$\bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 \quad (\text{I-31})$$

Avec:

$$P_1 = P_{G1} - P_{D1} \quad (\text{I-32})$$

$$Q_1 = Q_{G1} - Q_{D1} \quad (\text{I-33})$$

D'où:

$$\bar{S}_1 = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (\text{I-34})$$

Pour le JB 2:

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad (\text{I-35})$$

Avec:

$$P_2 = P_{G2} - P_{D2} \quad (\text{I-36})$$

$$Q_2 = Q_{G2} - Q_{D2} \quad (\text{I-37})$$

D'où:

$$\bar{S}_2 = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \quad (\text{I-38})$$

D'une manière générale :

$$\bar{S}_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (\text{I-39})$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (I-40)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (I-41) \text{ Avec:}$$

P_G, Q_G : Puissances active et réactive respectivement générées.

P_D, Q_D : Puissances active et réactive respectivement demandées.

P_i, Q_i : Puissances active et réactive respectivement nettes.

La puissance apparente (S) à l'accès (i) est donnée par la relation :

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \text{ Pour } i = 1, n \quad (I-42)$$

$$\bar{S}_i^* = P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \bar{I}_i \quad (I-43)$$

Alors:

$$\bar{S}_i^* = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (I-44)$$

On coordonnées polaires :

$$\bar{V}_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (I-45)$$

$$\bar{V}_j = |V_j| e^{j\delta_j} \quad (I-46)$$

$$\bar{Y}_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\Psi_{ij}} \quad (I-47)$$

Donc:

$$\bar{S}_i^* = P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot e^{j(\Psi_{ij} - \delta_i + \delta_j)} \quad (I-48)$$

D'où:

$$P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\Psi_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (I-49)$$

$$Q_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\Psi_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (I-50)$$

Les relations (I-48), (I-49), (I-50) représentent les équations de calcul de l'écoulement de puissance.

La méthode de Newton-Raphson à plusieurs variantes selon qu'on l'exprime les éléments de la matrice nodale et tensions aux accès en coordonnées cartésiennes, polaires ou hybrides [07].

III.6.1 forme générale :

On a:

$$I = [Y_{bus}] * [V] \quad (I-51)$$

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (I-52)$$

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \quad (I-53)$$

$$\bar{S}_i = \bar{V}_i \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^* \bar{V}_j^* \quad (I-54)$$

III.6.2 forme polaire :

$$\bar{V}_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (I-55)$$

$$\bar{V}_j = |V_j| e^{j\delta_j} \quad (I-56)$$

$$\bar{Y}_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\Psi_{ij}} \quad (I-57)$$

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}^* \bar{V}_j^* = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot e^{j(\delta_i - \Psi_{ij} - \delta_j)} \quad (I-58)$$

D'où,

$$\begin{cases} P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \Psi_{ij} - \delta_j) \\ Q_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\delta_i - \Psi_{ij} - \delta_j) \end{cases} \quad \text{Pour } i = 1, n \quad (I-59)$$

III.6.3 Forme cartésienne :

On a:

$$\bar{V}_i = e_i + jf_i \quad (I-60)$$

$$\bar{V}_j = e_j + jf_j \quad (I-61)$$

$$\bar{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (\text{I-62})$$

$$P_i - Q_i = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{I-63})$$

D'où,

$$\begin{cases} P_i = e_i \cdot \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \cdot \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_i = f_i \cdot \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \cdot \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{cases} \quad (\text{I-64})$$

III.6.4 Forme hybride :

On a:

$$\bar{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (\text{I-65})$$

$$\bar{V}_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (\text{I-66})$$

$$\bar{V}_j = |V_j| e^{j\delta_j} \quad (\text{I-67})$$

$$\bar{S}_i^* = P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \cdot \bar{I}_i = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{I-68})$$

Remplaçant les expressions (I-65), (I-66), (I-67) dans (I-68), on aura:

$$\begin{cases} P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)] \\ Q_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)] \end{cases} \quad (\text{I-69})$$

III.7 Calcul de l'écoulement de puissance par la forme hybride :

D'après la forme hybride donnée par la relation (I-69), on pose:

D'après la forme hybride donnée par la relation (I-69), on pose:

$$P_i = F_{ip} = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (\text{I-70})$$

$$Q_i = F_{iq} = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (\text{I-71})$$

Avec :

F_{ip} et F_{iq} sont des fonctions de tension et de phase.

Après développement de F_{ip} et F_{iq} en série de TAYLOR autour de la première approximation et l'élimination des éléments d'ordre supérieur on aura les deux fonctions P_i et Q_i sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} P_i &= F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_1}\right)^{(0)} \Delta \delta_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_1|}\right)^{(0)} \Delta V_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta V_n^{(0)} \\ Q_i &= F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_1}\right)^{(0)} \Delta \delta_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_1|}\right)^{(0)} \Delta V_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta V_n^{(0)} \end{aligned} \quad (I-72)$$

Se rappelant que la barre de référence a son amplitude et sa phase connues, le développement doit donner 2(n-1) équations linéaires [10].

Sous forme matricielle on a :

$$\begin{bmatrix} P_2 - F_{2p}^{(0)} \\ \vdots \\ P_n - F_{np}^{(0)} \\ Q_2 - F_{2q}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_n - F_{nq}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{2p}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{2p}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{np}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{np}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-73)$$

Avec:

$$\begin{bmatrix} P_2 - F_{2p}^{(0)} \\ \vdots \\ P_n - F_{np}^{(0)} \\ Q_2 - F_{2q}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_n - F_{nq}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-74)$$

On peut écrire le système comme suit:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] * \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} \quad \square \quad \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} = [J]^{-1(0)} * \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-75)$$

On rappelle que:

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

Alors,

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta \delta^{(k)} \quad (I-76)$$

Et que : $\Delta |V|^{(k)} = |V|^{(k+1)} - |V|^{(k)}$

Alors,

$$|V|^{(k+1)} = |V|^{(k)} + \Delta|V|^{(k)} \quad (I-77)$$

Remplaçant (I-76) et (I-77) dans (I-75), on aura:

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (I-78)$$

D'une manière générale :

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (I-79)$$

Avec, $[J]$: Matrice Jacobienne exprimée comme :

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

Avec, J_1, J_2, J_3 et J_4 : Sont les sous matrices de la matrice

III.8 Algorithme de la méthode de Newton-Raphson :

- 1- Lire les données du réseau (données des lignes et accès).
- 2- Définir le critère de convergence.
- 3- Prendre les valeurs initiales des tensions aux accès :

$$V_i = (|V_{isp}|, 0) \quad \text{Avec, } i = 1 \quad \text{Pour l'accès bilan.}$$

$$V_i = (|V_{isp}|, P_{isp}) \quad \text{Avec, } i = 2, \dots, n \quad \text{Pour les accès générateur.}$$
- 4- Former la matrice admittance nodale du réseau.
- 5- Mettre le compteur d'itération à zéro ($k = 0$).
- 6- Mettre le compteur d'accès à 1 ($I = 1$).
- 7- Si I est un accès bilan, aller à l'étape 13.

- 8- Calculer P_i^k et Q_i^k d'après les équations (I-69).
- 9- Calculer $\Delta P_i^k = P_{ispé} - P_i^k$
- 10- Si I est un accès (P, Q), aller à l'étape 12.
- 11- Comparer Q_i^k avec ses limites.
Si Q_i^k viole ses limites, fixer Q_i^k à la limite violée et aller à l'étape 12.
- Sinon, calculer le résidu $\Delta |V_i^k|^2 = |V_{ispé}|^2 - |V_i^k|^2$ et aller à l'étape 13.
- 12- Calculer : $\Delta Q_i^k = Q_{ispé} - Q_i^k$
- 13- Mettre $I=I+1$.
- 14- Si $I \leq n$ aller à l'étape 7.
- 15- Déterminer le max de $|\Delta P_i^k|$ et $|\Delta Q_i^k|$.
- 16- Si $|\Delta P_i^k| \leq \varepsilon$ et $|\Delta Q_i^k| \leq \varepsilon$, aller à l'étape 21.
- 17- Calculer les éléments du Jacobien.
- 18- Résoudre le système d'équation (I-79).
- 19- calculer les nouvelles valeurs de $\delta_i^{(k+1)}$ et $|V_i|^{k+1}$ d'après les équations (I-76) et (I-77) respectivement.
- 20- Incrémenter le compteur $k=k+1$ et aller à l'étape 6.
- 21- Imprimer les résultats.

III. 9 Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre on a défini et présenté les différentes structures et architectures des réseaux électriques en modélisant les éléments le constituant. Une deuxième partie a été consacrée pour calculer la matrice admittance du réseau électrique et en prenant le cas d'un réseau à (n) accès indépendants. Le but de la dernière partie est l'étude de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson, qui nous permettra par son application, d'avoir des informations sur l'état du réseau à étudier pour des paramètres précis.

Dans le chapitre qui suit nous allons déterminer les différents moyens et techniques de compensation d'énergie réactive et de réglage de la tension.

Chapitre IV: simulation et interprétation des résultats



IV.1. Introduction :

Dans le domaine de l'étude du lieu et de la quantité du réactif optimal dans un réseau électrique est un processus complexe qui contribue à améliorer l'efficacité, la stabilité et la rentabilité des systèmes électrique. elle repose sur des analyses approfondies, des modèles mathématiques et des simulations pour trouver le juste équilibre entre puissance ainsi un fonctionnement optimal du réseau électrique.

En premier lieu, une étude d'un réseau électrique à 5 nœuds sans tenir compte du temps.

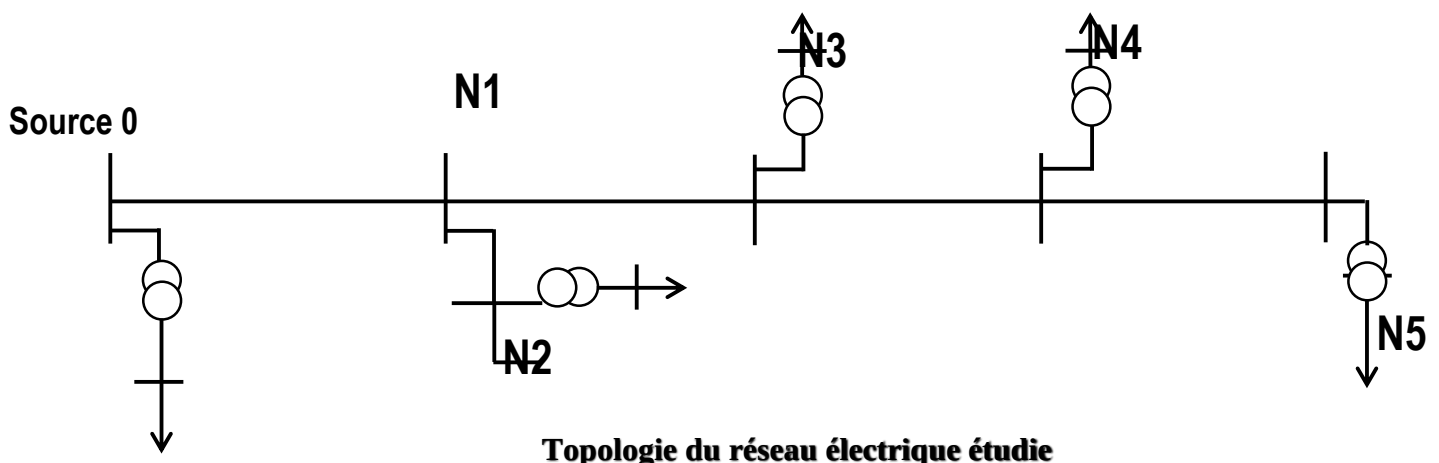
Ensuite, une étude d'un réseau électrique sera faite la compensation de l'énergie réactive en nœud 2, puis le nœud 4 avec tenant compte du temps.

Enfin, la solution proposée est un algorithme innovant qui permet d'assurer une coordination pour trouver le juste équilibre entre puissance ainsi un fonctionnement optimal du réseau électrique.

Topologie du réseau :

le réseau de figure est constitué de :

- Nœud numérotés de N°0 à N°5 dont le nœud N0 représente la source principale
- Lignes numérotés de L0 à L5
- Puissances apparentes de charges numérotés de Sch1 à Sch5



. Données du réseau étudié :

Les données des lignes et des nœuds du réseau sont regroupées dans les tableaux

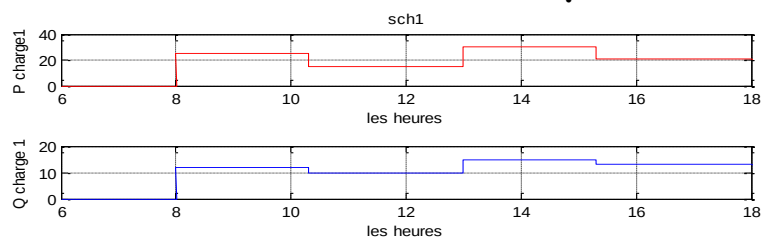
(IV.1) et (IV.2) avec une tension nominale, $U_n = 60\text{KV}$

N° de la ligne	Ligne	R (pu)	X (pu)	Longueur (km)
(1)	0-1	0.08	0.40	0.98
(2)	1-2	0.08	0.40	2.12
(3)	1-3	0.08	0.40	1.61
(4)	3-4	0.08	0.40	11.72
(5)	4-5	0.08	0.40	9.87

Tab (IV-1) : Données des lignes

N° de nœud	s. charge (puissance apparente de charge)(MVA)
N° (0)	0
N° (1)	25+j12
N° (2)	7+j3
N° (3)	8+j4
N° (4)	22+j10
N° (5)	36+j18

Tableau (IV-2) : Données des nœuds



Figure(IV-1) : un profil la puissance apparente 1 qui correspondent a une variation durent la journee

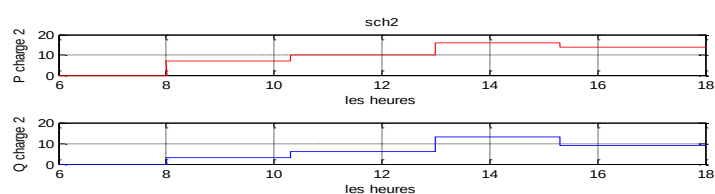
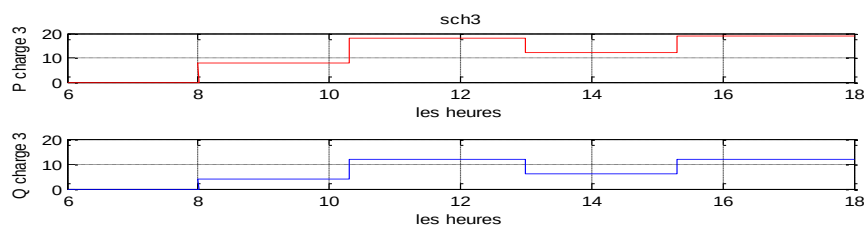
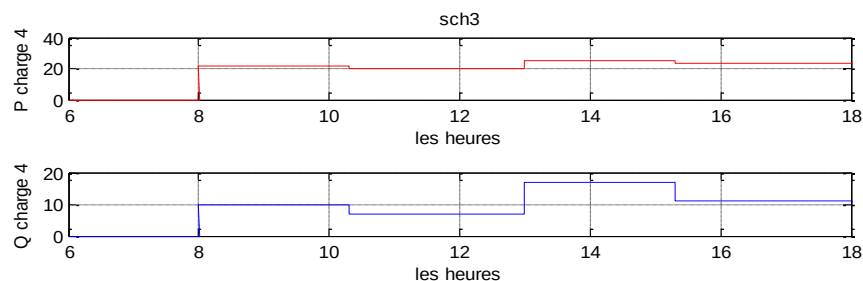


Figure (IV-2): un profil la puissance apparente 2 qui correspondent a une variation durent la journée



Figure(IV-3) : un profil la puissance apparente 3 qui correspondent a une variation durent la journée



Figure(IV-4) : un profil la puissance apparente 4 qui correspondent a une variation durent la journée

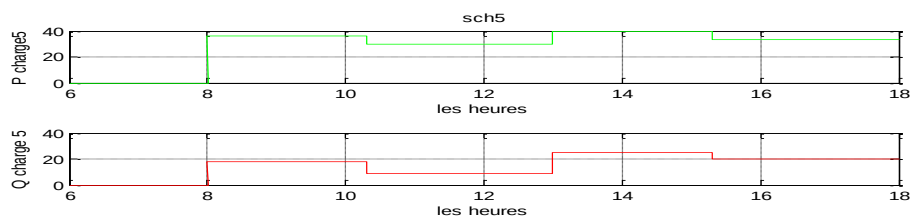


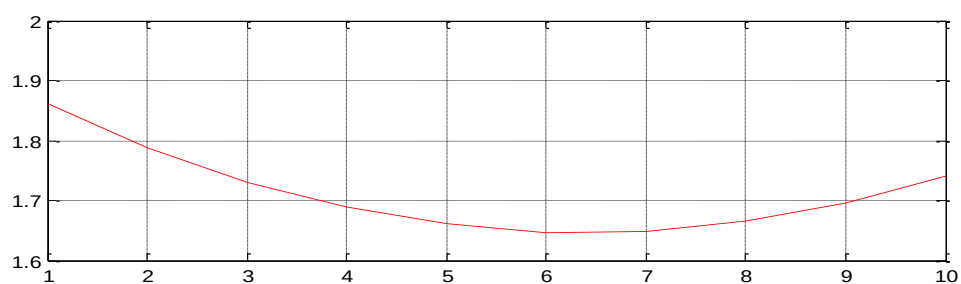
Figure (IV-5): un profil la puissance apparente 5 qui correspondent a une variation durent la journee

Compensation sur le nœud 2 :

Qc	Dpt de nœud 2
0.1	1.8603
0.2	1.7884
0.3	1.7311
0.4	1.6885
0.5	1.6606

0.6	1.6473
0.7	1.6487
0.8	1.6647
0.9	1.6953
1	1.7407

Tableau (IV-3) : les pertes globales en fonction de Q_c en nœud 2



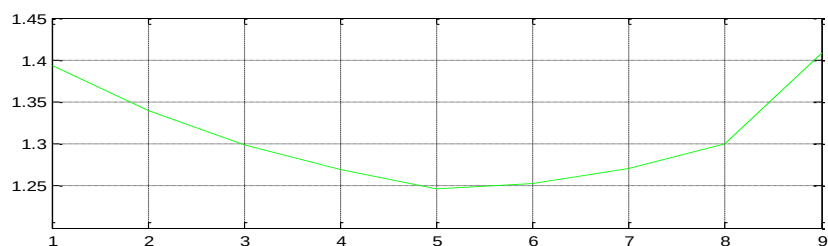
Figure(IV-6) : les pertes globales en fonction de Q_c en nœud 2

Dpt_{min} = 1.6473 pour 0.6

Q_c	Dpt de nœud 2
0.1	1.3927
0.2	1.3399
0.3	1.299
0.4	1.2696
0.5	1.2464

0.6	1.2525
0.7	1.2702
0.8	1.2996
0.9	1.355
1	1.409

Tableau (IV-4): les pertes globales en fonction de Q_c en nœud 2



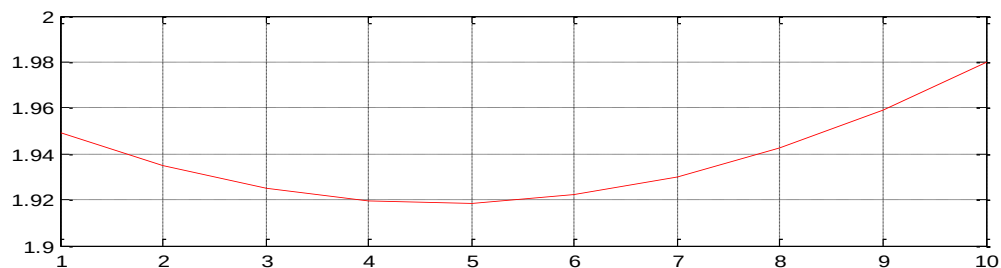
Figure(IV-7) : les pertes globales en fonction de Q_c en nœud 2

Dpt_{min} = 1.2464 pour 0.5

Q_c	Dpt de nœud 2
0.1	1.9493
0.2	1.9349
0.3	1.925
0.4	1.9195
0.5	1.9185
0.6	1.922

0.7	1.93
0.8	1.9424
0.9	1.9593
1	1.9801

Tableau (IV-5): les pertes globales en fonction de Q_c en nœud 2

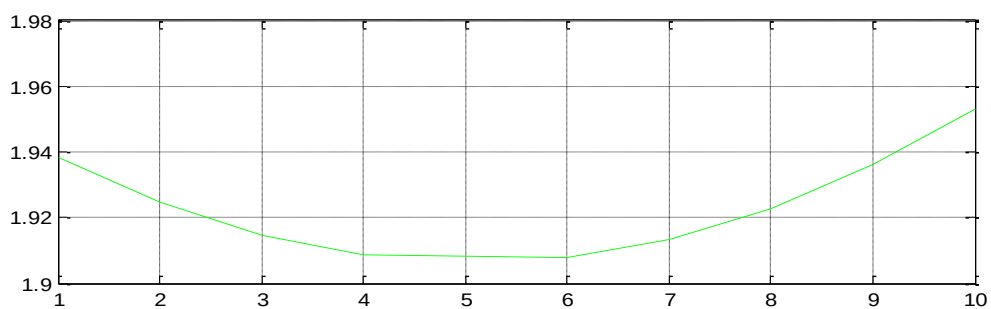


Figure(IV-8) : les pertes globales en fonction de Q_c en nœud 2

$D_{pt_{min}} = 1.9185$ pour 0.5

Qc	Dpt de nœud 2
0.1	1.9384
0.2	1.9246
0.3	1.9146
0.4	1.9085
0.5	1.9082
0.6	1.9079
0.7	1.9134
0.8	1.9228
0.9	1.9361
1	1.9531

Tableau (IV-6) : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 2



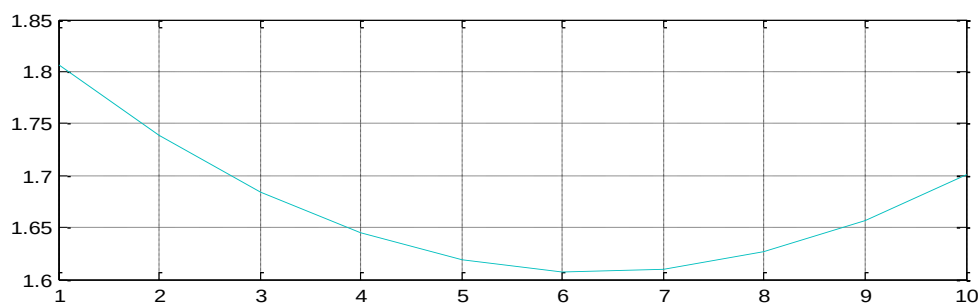
Figure(IV-9) : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 2

$Dpt_{\min} = 1.9082$ pour 0.5

Compensation dans le nœud 4 :

Qc	Dpt de nœud 2
0.1	1.8061
0.2	1.7382
0.3	1.6845
0.4	1.6448
0.5	1.619
0.6	1.6074
0.7	1.6098
0.8	1.6262
0.9	1.6566
1	1.7013

Tableau (IV-7): les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4

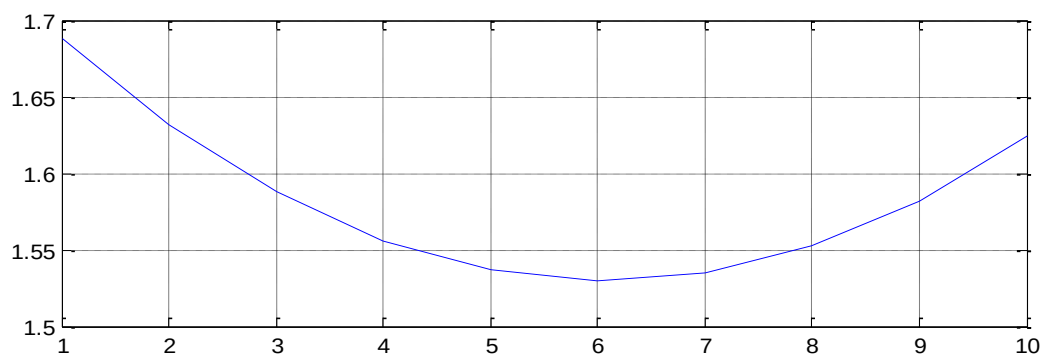


Figure(IV-10) : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4

Dpt_{min} = 1.6074 pour 0.6

Qc	Dpt de nœud 2
0.1	1.6884
0.2	1.6319
0.3	1.5879
0.4	1.5561
0.5	1.5366
0.6	1.5295
0.7	1.5347
0.8	1.5522
0.9	1.582
1	1.6241

Tableau (IV-8): les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4

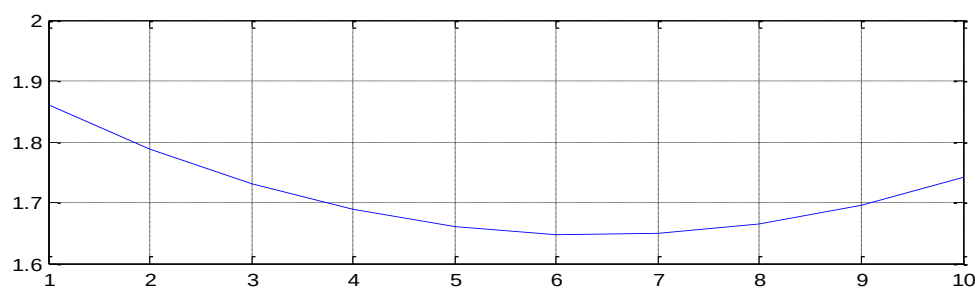


Figure(IV-11) : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4

Dpt_{min} = 1.5295 pour 0.6

Qc	Dpt de nœud 2
0.1	1.8603
0.2	1.7884
0.3	1.7311
0.4	1.6885
0.5	1.6606
0.6	1.6473
0.7	1.6487
0.8	1.6647
0.9	1.6953
	1.7407

Tableau (IV-9): les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4

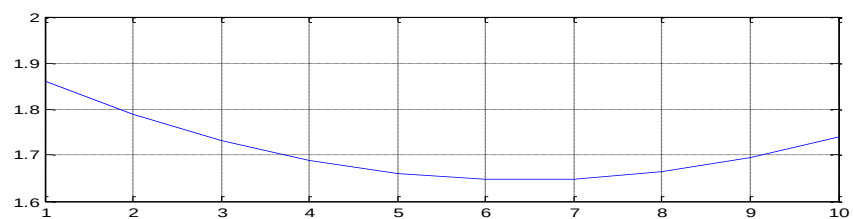


Figure(IV-12) : les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4

Dpt_{min} = 1.6473 pour 0.6

Qc	Dpt de nœud 2
0.1	1.9451
0.2	1.9101
0.3	1.8614
0.4	1.8001
0.5	1.7573
0.6	1.7331
0.7	1.7303
0.8	1.7275
0.9	1.7403
1	1.9694

Tableau (IV-10): les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4



Figure(IV-13): les pertes globales en fonction de Qc en nœud 4

Dpt_{min} = 1.7303 pour 0.6

En remarque que le dpt_{min} dépend du nœud l'installation de la compensation indique la quantité de puissance réactif injecté.

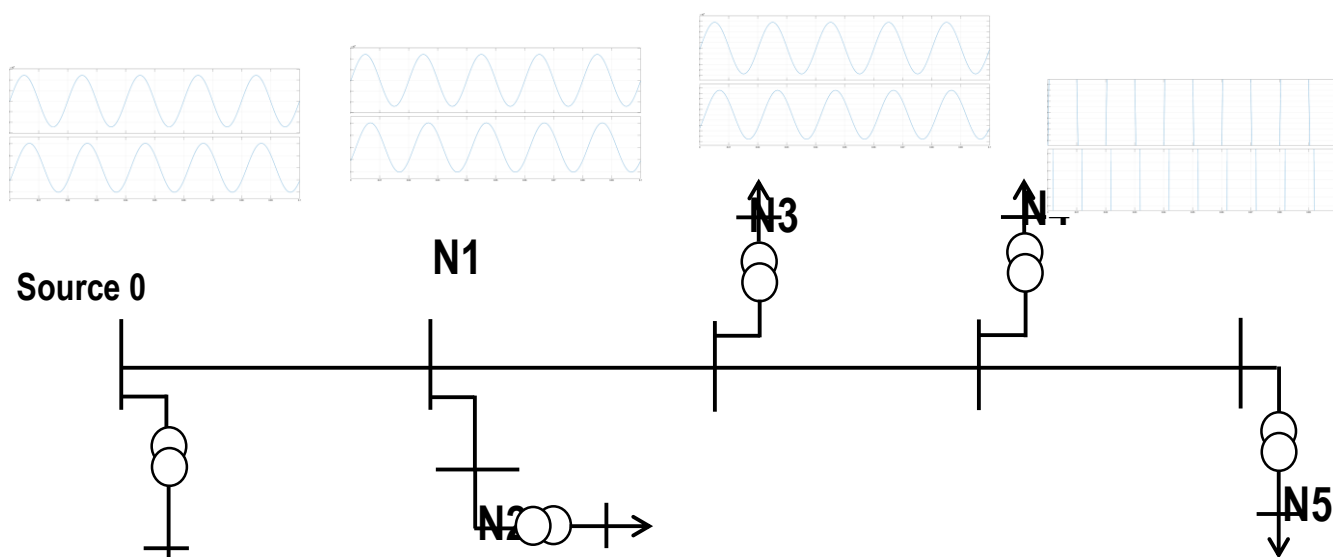
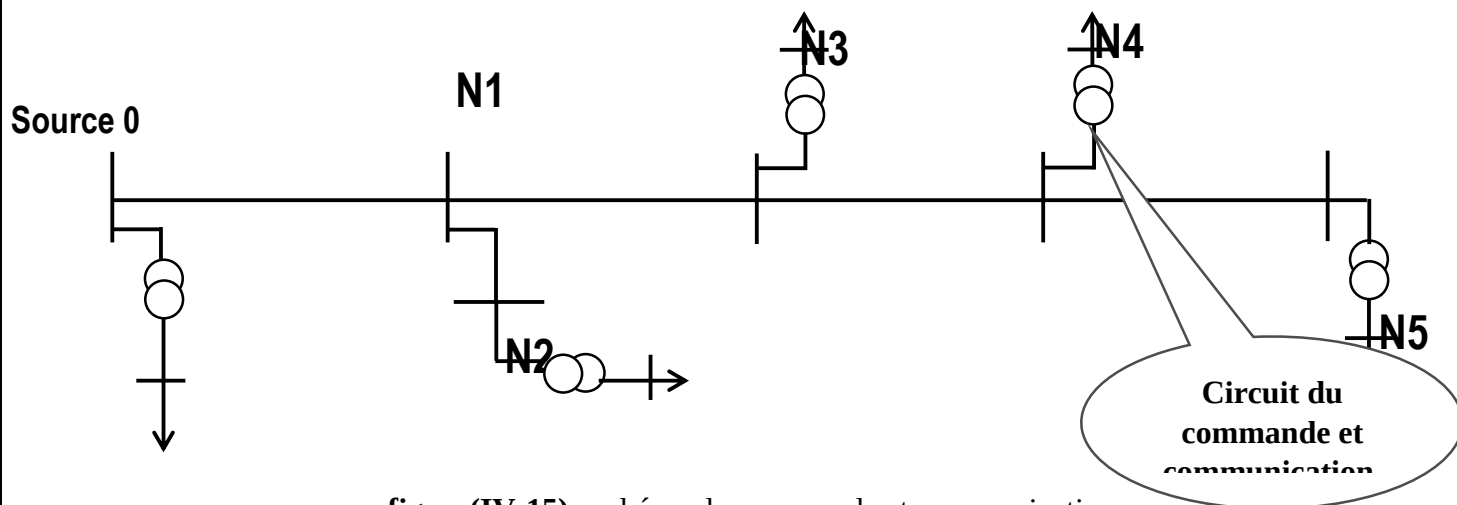
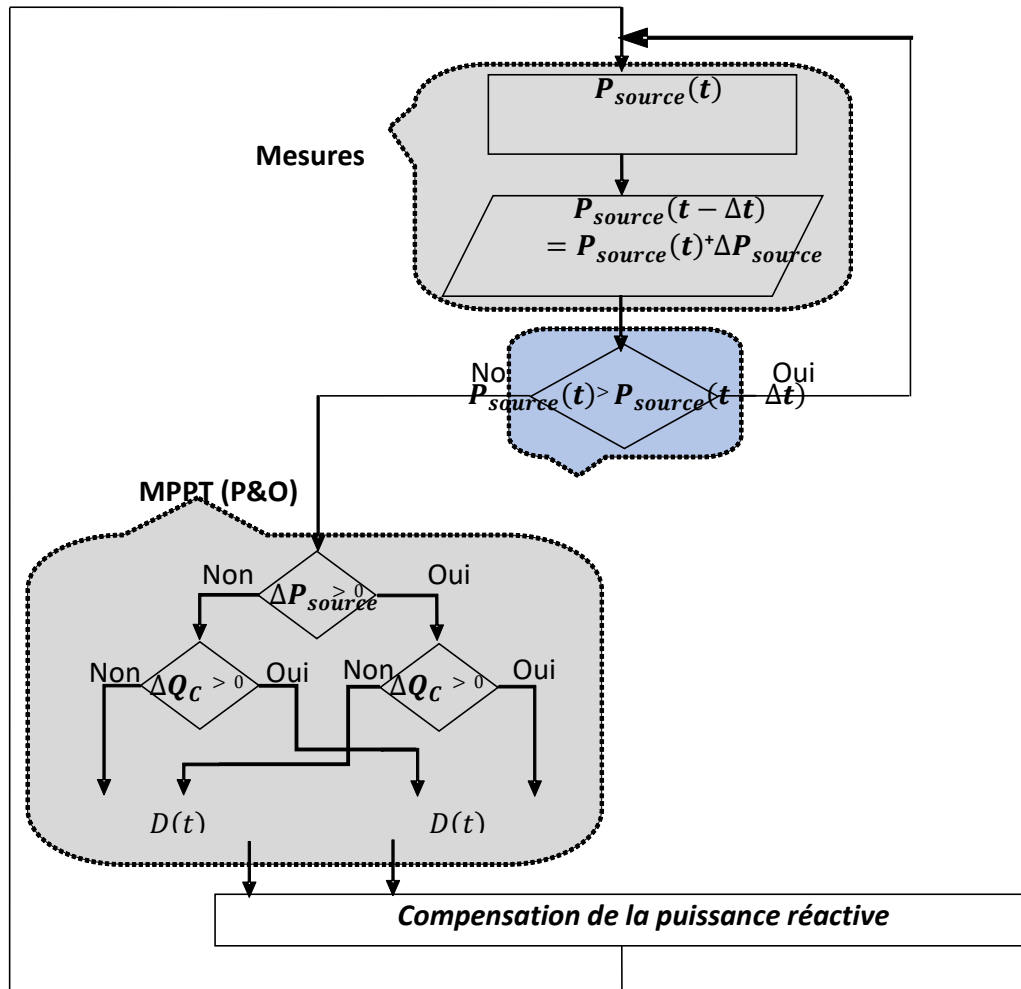


Figure (4-14) : courbes des points du réseau électrique



figure(IV-15) : schéma du commande et communication



figure(IV-16) : algorithme de perturbations et observations

Pour cette raison un algorithme D'optimisation en temps réel a été développée dont le but d'attendre a chaque instant $D_{pt_{min}}$ une manière auto et autonome.

Conclusion :

L'Energie réactive est une composante de l'électricité qui n'est directement convertie en travail utile, mais joue un rôle essentiel dans les systèmes électrique.

Dans ce chapitre nous avons essayé de compensation de l'énergie réactive avec un réseau test a 5 nœuds, il est possible de simuler des système électrique pour analyser le comportement de l'énergie

Réactive et optimiser les permettent de prévoir les variations de tension , les pertes d'énergie et d'optimiser la distribution de l'électricité.

Conclusion générale

Les réseaux d'énergie électrique ont pour mission essentielle de véhiculer et de répartir le produit que constitue l'électricité. Leur étude est donc aussi importante que celle des moyens de production ou celles des appareils d'utilisation, puisqu'ils constituent le lien entre la centrale électrique et l'utilisateur.

Une telle étude doit envisager les aspects techniques du transport, et notamment la réalisation, l'exploitation et le fonctionnement des réseaux en fonction des tensions utilisées. De plus, chacun sait que le choix d'un système de réseau a une incidence sur le coût de la fourniture de l'électricité aux usagers. C'est pourquoi l'aspect

économique du problème doit être également pris en considération.

Afin de limiter les dégâts que peuvent causer les défauts survenus sur un réseau électrique et d'éviter les répercussions que le maintien d'un défaut aurait sur le fonctionnement général du réseau (en particulier la stabilité), il est indispensable de mettre hors tension le plus rapidement possible l'élément du réseau (ligne, transformateur ou générateurs...) en défaut. Cette opération est confiée aux systèmes de protection.

Dans le premier chapitre du mémoire, nous avons caractérisé l'architecture, la topologie et l'évolution des réseaux électriques.

Le deuxième chapitre on a fait présenter, le principe de la compensation de la puissance réactive par des batteries de condensateurs dans les installations en moyen et basse tension.

Nous avons mis en évidence, les différents modes de compensations toute en citant pour chaque modes leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons terminé, en développant les différents choix nécessaires à apprendre pour la localisation de la compensation de la puissance réactive soit : global, partielle, individuelle et combinée

Dans le troisième chapitre on a défini et présenté les différentes structures et architectures des réseaux électriques en modélisant les éléments le constituant. Une deuxième partie a été consacrée pour calculer la matrice admittance du réseau électrique et en prenant le cas d'un réseau à (n) accès indépendants. Le but de la dernière partie est l'étude de l'écoulement de puissance par la méthode de Newton-Raphson, qui nous permettra par son application, d'avoir des informations sur l'état du réseau à étudier pour des paramètres précis.

Dans le chapitre qui suit nous allons déterminer les différents moyens et techniques de compensation d'énergie réactive et de réglage de la tension

Le quatrième chapitre nous avons essayé de compensation de l'énergie réactive avec un réseau test a 5 nœuds, il est possible de simuler des système électrique pour analyser le comportement de l'énergie.

Bibliographique :

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur civil en Génie Electrique et Informatique, intitulé **MODELES DES LIGNES**

**ELECTRIQUES DANS LE PROBLEME D'ECOULEMENT DE PUISSANCE
(COMPARAISON DU MODELE A PARAMETRES CONCENTRES ET DU**

MODELE A PARAMETRES DISTRIBUES) Présenté par : NDEMEYE

KAJIBWAMI en 2017

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS « U.L.P.G.L. » Département de Génie Electrique Encadré par Ass. Ir MUSONGYA BISIMWA

□ MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER Académique

Intitulé Modélisation des paramètres des lignes électriques

Présenté par : BRAHMIA Taraq et KOUADRIA Faris encadré par M.GOUAIDIA Saïd en 2020

Université 8 Mai 1945 – Guelma

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

□ Cours Du Master en électrotechnique présenté par Mr Mesbah .T en 2023 spécialité réseaux électrique

Mémoire présente en vue de l'obtention du diplôme de master en électrotechniques , intitule étude de la variation de la tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau de distribution

Depatement de genie electrique encadrees par : m^{me}n.aouzellag .

1 Jean-Claude sabonnadière, Nouredine hadjSaïd. « Lignes et réseaux électrique1 », Lavoisier, Paris, 2007.

2 Jean-Claude sabonnadière, Nouredine hadjSaïd. « Lignes et réseaux électrique 2», Lavoisier, Paris, 2007.

Dr Merah Amir. « Cours Analyse des réseaux de transport et de distribution » ESGEE, Oran, 2018/2019.

Lemdani Soufiane. «Importance et nécessité de l'étude de la compensation et de sa contribution à la gestion de l'exploitation des longues lignes de transport a extra haut tension», mémoire de magister, université d'Oran, juin 2010.

Aleksandor G.N « Cours transport de l'énergie électrique en courant alternatif. Deuxième ED », Signe, Moscou ,1998.

Chiban Samira. « Dimensionnement d'une ligne aérienne à Haute Tension », mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.

<https://sitelec.org>

<https://fr.electricalinstallation.org/frwiki/Compensation>

<https://blog.technic-achat.com>

PIERE MEYNAUD « Compensation de l'énergie réactive et tenue de la tension sur les réseaux de transport THT et HT » Technique de l'ingénieur, D4315 ,1986.