



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



Faculté de Technologie

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

Domaine : Technologie
Filière : Génie
Électrique
Spécialité : Réseaux Électriques

Thème

Etude De L'influence Des Différents Types De
Compensation Sur Le Rendement Des Lignes
Longues

Réalisé par :

LEMMAOUI Ayyoub

LAABED Blal

Présent	GUIA Talal	M.C.A	Université d'El-Oued
Examineur	MIDA Dris	M.C.B	Université d'El-Oued
Encadreur	KHECHEKHOUCHE Ali	M.C.A	Université d'El-Oued

Année Universitaire : 2021/2022

Résumé :

Le grand nombre de connexions entre les lignes longues et les systèmes d'alimentation électrique à haute tension (EHT) est associé à une demande accrue d'énergie électrique.

Ainsi, cela impose une étude d'importance primordiale et objective pour le fonctionnement sûr et fiable de ces systèmes complexes. Les principales préoccupations de ces systèmes THT sont de maintenir le niveau de tension et de maximiser la transmission de puissance sur de longues distances de transmission sans affecter la stabilité et la synchronisation de l'ensemble du système d'alimentation électrique. Une technique valable utilisée à ce jour dans ce domaine est l'utilisation de la compensation séquentielle et parallèle pour les lignes longues qui permet de réduire artificiellement la longueur de la ligne. Il en résulte une transmission de puissance maximale et une meilleure efficacité. L'effet de la compensation séquentielle et parallèle sur les longues lignes THT fait l'objet d'étude dans ce projet passionnant.

Les calculs de nature généralement lourde à effectuer dans ce type d'étude seront facilités selon un symbole. L'influence de divers facteurs tels que la longueur de la ligne, le facteur de puissance, le type de montage du compensateur (série et/ou parallèle) ainsi que les degrés de compensation sur la transmission de puissance est investie. L'objet de l'activité est d'aider les concepteurs et les exploitants de longues lignes THT à gérer et à améliorer leurs performances.

Les mots clés : Le rendement ; compensation ; les réseaux électriques ; transport ; lignes longues.

Abstract :

The large number of connections between long lines and high voltage (EHV) electrical power systems is associated with increased demand for electrical power.

Thus, this imposes a study of primary and objective importance for the safe and reliable operation of these complex systems. The main concerns of these EHV systems are to maintain the voltage level and maximize power transmission over long transmission distances without affecting the stability and synchronization of the entire electrical power system. A valid technique used to date in this field is the use of sequential and parallel compensation for long lines which makes it possible to reduce the length of the line artificially. This results in maximum power transmission and better efficiency. The effect of sequential and parallel compensation on long EHV lines is the subject of study in this fascinating project.

Calculations of a generally heavy nature to be performed in this type of study will be

facilitated according to a symbol. The influence of various factors such as line length, power factor, type of compensator assembly (series and/or parallel) as well as degrees of compensation on power transmission is investigated. The purpose of the business is to facilitate designers and operators of EHV long lines in managing and improving performance.

The key words: The yield; compensation; the electrical networks; Transport; long lines.

الملخص :

يرتبط العدد الكبير من الوصلات بين الخطوط الطويلة وأنظمة الطاقة الكهربائية عالية الجهد (EHV) بزيادة الطلب على الطاقة الكهربائية.

وبالتالي، فإن هذا يفرض دراسة ذات أهمية أولية وموضوعية للتشغيل الآمن والموثوق لهذه الأنظمة المعقدة. تتمثل الاهتمامات الرئيسية لأنظمة EHV هذه في الحفاظ على مستوى الجهد وزيادة نقل الطاقة عبر مسافات نقل طويلة دون التأثير على استقرار وتزامن نظام الطاقة الكهربائية بالكامل. التقنية الصالحة المستخدمة حتى الوقت الحاضر في هذا المجال هو استخدام التعويض المتسلسل والمتوازي للخطوط الطويلة مما يجعل من الممكن تقليل طول الخط بشكل مصطنع. ينتج عن هذا أقصى قدر من نقل الطاقة وكفاءة أفضل. إن تأثير التعويض المتسلسل والمتوازي على خطوط EHV الطويلة هو موضوع الدراسة في هذا المشروع الرائع.

سيتم تسهيل العمليات الحسابية ذات الطبيعة الثقيلة عمومًا التي يجب إجراؤها في هذا النوع من الدراسة وفقًا لرمز تأثير العوامل المختلفة مثل طول الخط وعامل القدرة ونوع تجميع المعوضات (سلسلة و / أو متوازية) وكذلك درجات التعويض على نقل الطاقة يتم استثمارها. الغرض من العمل هو تسهيل المصممين والمشغلين لخطوط EHV الطويلة في إدارة وتحسين الأداء.

الكلمات المفتاحية: المردود؛ تعويضات؛ الشبكات الكهربائية؛ شبكة نقل الكهرباء؛ الخطوط الطويلة.

Remerciement

Premièrement, nous tenons à remercier sincèrement notre Dieu « Allah » source de toute connaissance, qui nous donne la force, la volonté et le courage pour achever ce travail.

Nous tenons également à remercier très sincèrement Monsieur **KHECHEKHOUCHE Ali** pour leur soutien, son patience, son confiance et ses conseils tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nous voudrions vivement remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

Un grand Merci à nos familles pour leurs soutiens aussi bien moraux que financiers et pour leurs sacrifices.

Finalement, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous

Dédicace

C'est avec fierté et respect que nous dédions ce travail aux personnes qui nous sont les plus chères en ce monde

A nos très chers parents, uniques et indéniables symboles du sacrifice, d'amour, d'encouragement et de tendresse, qu'ils trouvent dans ce travail tous nos reconnaissances et l'expression de nos profondes gratitude et admirations. Que dieu vous garde en bonne santé.

A nos Frères, nos sœurs, nos familles pour leur aide et la patience qu'ils ont consentis devant le changement d'humeur occasionnés par ce travail, on ne vous sera jamais redevable.

A nos chers amis :

« Que ce humble travail témoigne à nos affections et nos éternels attachements

Table des matières :

Résumé.....	I
Abstract.....	I
الملخص.....	II
Remerciement.....	III
Dédicace.....	IV
Table des matières.....	V
Légende des figures.....	VIII
Légende des tableaux.....	X
Liste des symboles et acronymes.....	XI
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Description d'un réseau électrique THT et notions dans les lignes

1-1 Introduction.....	4
1-2 Définition.....	4
1-3 Centrales de production.....	5
1-4 Postes de transformation.....	5
1-5 Les lignes aériennes.....	5
1-6 Les isolateurs.....	6
1-7 Les réseaux de terre.....	6
1-7-1 Définition.....	6
1-7-2 Rôle.....	6
1-7-3 Composition d'un circuit de terre.....	7
1-7-3-1 Mise à la terre des pylônes.....	7
1-7-3-2 Mise à la terre des postes.....	7
1-7-3-3 Le câble de garde.....	7
1-8 Les lignes de transports.....	8
1-9 Transposition des phases.....	8
1-10 Les principaux défauts de court-circuit.....	9
1-11 Caractéristiques des courts-circuits.....	9
1-12 Conséquence des courts-circuits.....	10
1-13 Les surtensions.....	11
1-13-1 Les surtensions internes.....	11
1-13-2 les surtensions externes.....	11
1-14 La protection contre les surtensions.....	12
1-14-1 Parafoudres.....	12
1-15 Conclusion.....	13

Chapitre 2 : La forme de la tension dans les réseaux de transport d'énergie électrique

2-1 Introduction.....	15
2-2 Qualité de la tension.....	15
2-3 Dégradation de la qualité de la tension : les phénomènes perturbations.....	15
2-3-1 Variation ou fluctuation de la fréquence.....	16
2-3-2 Composante lente des variations de tension.....	16
2-3-3 Fluctuation de tension (flicker).....	16
2-3-4 Creux de tension.....	17
2-3-5 Interruption courte ou coupure brève.....	18
2-3-6 Brosses se tension.....	18
2-3-7 Chutes de tension.....	18
2-3-8 Tension et/ou courant transitoire.....	20
2-3-9 Déséquilibre de tension.....	20
2-3-10 Perturbation harmonique et inter harmoniques.....	21
2-4 Lignes de transport électrique en régime permanent.....	22
2-4-1 Généralités sur les réseaux d'énergie électrique.....	22
2-4-2 Stabilité des réseaux électrique.....	23
2-4-2-1 Limite de stabilité en régime permanent.....	23
2-4-2-2 Stabilité dynamique.....	24
2-4-2-3 Stabilité transitoire.....	24
2-4-3 Instabilité de la tension.....	24
2-4-3-1 Causes de l'instabilité de la tension.....	24
2-4-3-2 Importance et incidents	25
2-4-3-3 Caractéristiques et analyse de stabilité de la tension.....	25
2-4-3-4 Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension.....	25
2-5 Etude en régime permanent d'une ligne de transport non compensée.....	26
2-6 Conclusion.....	27

Chapitre 3 : Etude des compensations sur le rendement en MATLAB

3-1 Introduction.....	29
3-2 Compensation série.....	29
3-3 Problème de résonance.....	31
3-4 Phénomènes d'interaction sous synchrones.....	31
3-4-1 Le phénomènes de résonance.....	31
3-4-2 Le phénomènes d'oscillation sous synchrone.....	31

3-4-3 Le phénomènes de résonance sous synchrone.....	31
3-4-4 Compensation série et résonance sous synchrone.....	32
3-5 Compensation parallèle (shunt).....	32
3-6 Description de la méthode de détermination du rendement maximale.....	33
3-7 Modélisation des différents schémas se compensation.....	33
3-8 Le modèle de la ligne de transport.....	35
3-9 Détermination du rendement maximal.....	35
3-10 Tension de réception et puissance de charge constante.....	36
3-11 programmation da la méthode sous environnement MATLAB.....	41
3-12 Calcul du rendement maximal et le facteur de puissance correspondant.....	41
3-13 Le rendement maximal en fonction de la ligne ($k_s=k_d=0.5$).....	42
3-14 Variation du degré de compensation série.....	42
3-15 Variation du degré de compensation shunt.....	42
3-16 Variation de facteur de puissance.....	43
3-17 Résultats et courbes.....	43
3.18 Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	48
Bibliothèque.....	49

Légende des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 description d'un réseau électrique THT.

Figure 1.2 ligne triphasée transposée.

Figure 1.3 différents défauts de court circuit.

Chapitre 2

Figure 2.1 exemple de fluctuation de la fréquence.

Figure 2.2 variations rapide de la tension.

Figure 2.3 exemple d'un creux de tension.

Figure 2.4 Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.

Figure 2.5 Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.

Figure 2.6 Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales.

Figure 2.7 Exemple de cas de surtensions transitoires.

Figure 2.8 Déséquilibre de tension.

Figure 2.9 Distorsion provoquée par une seule harmonique ($h=5$).

Figure 2.10 Exemple d'un réseau radial.

Figure 2.11 Schéma équivalent à constantes réparties d'une ligne longue.

Chapitre 3

Figure 3.1 Réseau simplifié à deux machines compensé série fixe.

Figure 3.2 Caractéristique $P(\delta)$ d'un réseau compensé série fixe.

Figure 3.3 Profil de la tension d'une longue ligne de 1000km.

Figure 3.4 Les différents schémas de compensation.

Figure 3.5 un quadripôle.

Figure 3.6 Le rendement maximal en fonction de la longueur de la ligne de transport.

Figure 3.7 Le rendement maximal en fonction du degré de compensation série.

Figure 3.8 Le rendement maximal en fonction de la puissance de réception P_r .

Figure 3.9 Le rendement maximal en fonction du degré de compensation shunt.

Légende des tableaux

Tableau 3.1 Le rendement maximal et le facteur de puissance correspondant.

Tableau 3.2 Le rendement maximal en fonction de la longueur de la ligne.

Tableau 3.3 Le rendement maximal en fonction du degré de compensation série.

Tableau 3.4 Le rendement maximal en fonction du degré de compensation Shunt.

Tableau 3.5 Le rendement maximal en fonction du facteur de puissance.

Liste des symboles et acronymes

DMG : La distance moyenne géométrique.

rc : Rayon de conducteur élémentaire.

req : Rayon équivalent du faisceau de conducteur.

$I(x)$: Courant à la position x .

$I(x+\Delta x)$: Courant à la position $x+\Delta x$.

IS : Courant de départ à la position $x = 0$.

Ir : Courant au bout de la ligne à la position $x = L$.

Imax : Courant maximal côté capacitif.

Imin : Courant minimal côté inductif.

Ks : Le degré de compensation série d'une ligne.

Kd : Le degré de compensation shunt d'une ligne.

L : La longueur de la ligne.

PL : Puissance active de la charge.

P0 : Puissance naturelle de la ligne.

Pik : La puissance active transmise entre deux nœuds i et k .

Pcc : Puissance de court-circuit du réseau.

r_{eq} : Le rayon équivalent d'un faisceau de conducteur.

VS : Tension de départ.

VR : Tension au nœud de la réception.

$V(x)$: Tension à la position x .

$V(x+\Delta x)$: Tension à la position $x+\Delta x$.

VS : Tension de départ à la position $x = 0$.

Vr : Tension en bout de ligne à la position $x = L$.

y : Admittance shunt par unité de longueur.

Z : Impédance série de la ligne par unité de longueur.

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne.

γ : Constante de propagation.

δ : L'angle de transport.

Introduction Générale

Les bouleversements récents apparus dans le domaine de la fourniture d'électricité ont placé les exploitants des réseaux de transport face à de nouvelles opportunités mais également de nouveaux défis. Ils proviennent principalement de la forte augmentation des transferts d'énergie entre régions et /ou entre pays, des effets de la dérégulation, de considérations politiques, économiques et écologiques en ce qui concerne la construction de nouvelles lignes.

Techniquement, il est possible de remédier au manque de capacité de transport en créant de nouvelles lignes et/ou de nouveaux générateurs. Dans la pratique, pour diverses raisons, cela n'est pas toujours réalisable, ni souhaitable. La création de nouvelles lignes et/ou l'extension de postes existants peuvent se révéler trop coûteuses et demander des délais trop longs. L'obtention de nouveaux droits de passage peut être difficile voire impossible à obtenir. Enfin, l'impact sur l'environnement prend de plus en plus d'importance et doit être sérieusement pris en compte dans les procédures de développement du transport d'électricité.

L'utilisation des compensations série et parallèle, peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes, dans tous les cas où il est nécessaire de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances ou lors de la mise en place de liaisons entre pays ou entre régions. C'est une alternative très favorable du point de vue technique, économique et environnemental. Les principaux avantages de l'insertion des compensations dans un réseau électrique sont:

Réduire les pertes dans les lignes et améliorer le facteur de puissance. Ceci a pour résultat un maximum de transfert de puissance et un meilleur rendement. L'influence de la compensation série et parallèle sur les longues lignes à Extra Haute Tension sera l'objet d'étude du présent projet de magister. Les calculs qui généralement sont de nature lourde à effectuer dans ce type de calcul seront facilités et compactés suivant un code de calcul sous environnement MATLAB. L'influence de divers facteurs tel que la longueur de la ligne, le facteur de puissance, le mode de montage des compensateurs (série et/ou parallèle) ainsi que les degrés de compensation sur le transit de puissance seront investis. La finalité du travail a pour but de faciliter aux concepteurs et aux exploitants de ces longues lignes Extra Haute Tension la gestion et l'amélioration des performances techniques.

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, l'étude de la compensation et de sa contribution à la gestion de l'exploitation des longues lignes de transports Extra Haute Tension. Pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en trois chapitres

Le premier chapitre présente la tenue en tension sur les réseaux électriques. Dans ce chapitre on retrouve la définition d'un réseau électrique à très haute tension et quelques notions sur les lignes ainsi que diverses perturbations électromagnétiques (légères et grosses) dues aux courts-circuits qui perturbent leur fonctionnement.

Nous présentons clairement les différents types de défauts de court-circuit qui peuvent survenir dans un réseau électrique et démontrons l'importance des perturbations électromagnétiques pour montrer l'importance d'étudier la CEM dans le fonctionnement des réseaux de transmission.

Le deuxième chapitre présente la tenue en tension sur les réseaux électriques. Dans ce chapitre, nous retrouvons la définition du réseau et sa stabilité dans différents systèmes d'exploitation, ainsi que diverses perturbations légères et importantes, et nous avons expliqué l'intérêt de compenser les longues lignes.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la compensation des cordes et au problème de la résonance asynchrone, compensation parallèle. Dans ce chapitre, nous présentons les différentes compensations, et une méthode de détermination des performances des lignes de transmission avec et sans compensation est investie.

Chapitre 1 : Description d'un réseau électrique THT et notions dans les lignes

1-1 Introduction :

Les besoins en électricité augmentent dans les pays industrialisés, ce qui signifie qu'un producteur d'électricité doit être en mesure de répondre à tout moment aux besoins de ses clients au prix le plus bas possible du kilowattheure.

Le rôle de ce produit :

- Cette énergie est transmise par des lignes à haute tension.
- Distribuer cette énergie aux utilisateurs.
- Production d'énergie électrique dans les centrales électriques.

Ainsi, l'exploitation du réseau électrique est plus difficile que l'exploitation du réseau de distribution de gaz ou d'eau, car il ne peut stocker l'énergie électrique ; Mais si l'énergie électrique ne peut pas être stockée, elle a l'avantage d'être facilement transmise sur de grandes distances par de simples fils de connexion.

1-2 Définition :

Un réseau électrique a pour rôle de produire de l'énergie électrique et de l'acheminer jusqu'au consommateur, tout en gardant la tension et la fréquence constante, une bonne qualité de la tension, la continuité d'alimentation...ect.

Un système électro-énergétique est généralement constitué :

A- D'un circuit de puissance comportant :

- Groupes de production.
- Postes de transformation.
- Des Lignes de transport et distribution.

B- D'un circuit de terre comportant :

- Les prises de terres des groupes de production.
- Les prises de terre des postes de transformation.
- Les prises de terres des pylônes.

Ce premier chapitre sera consacré à la description des différents éléments qui constituent un réseau THT, et qu'on peut déjà diviser en deux parties distinctes qui sont le circuit de puissance et le circuit de terre. Comme il est représenté dans la figure 1.1 deux types des réseaux THT sont respectivement : réseau en arbre et réseau bouclé [1].

La figure 1.1 représente deux types des réseaux THT :

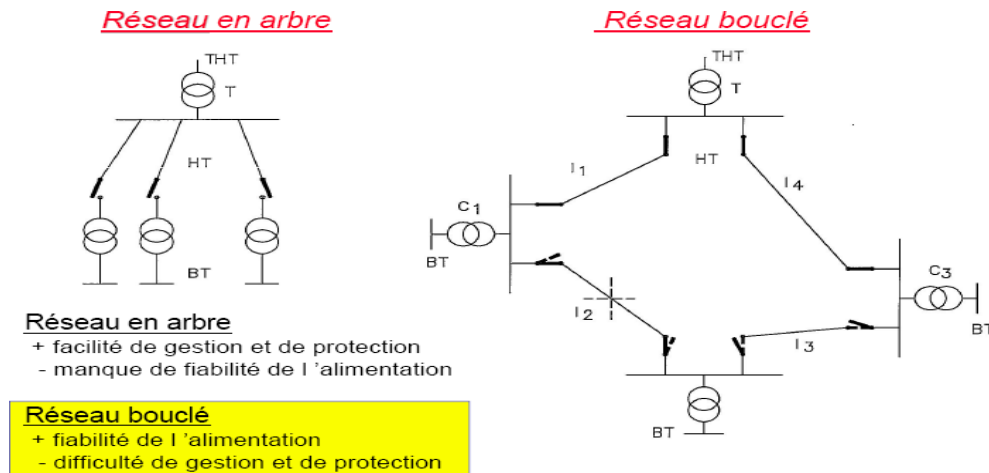


Fig. 1.1 : description d'un réseau électrique THT

1-3 Centrales de production :

Les centrales de production se composent de puissants alternateurs mis en mouvement grâce à des turbines qui peuvent être à vapeur ou hydraulique, ou bien des moteurs à gaz, ou nucléaires.

Pour assurer la continuité, il est préférable que la centrale possède plusieurs alternateurs, ainsi en cas de panne d'un d'eux les autres assurent la relève. Ils peuvent aussi être mis en service suivant la forte demande en énergie électrique.

1-4 Centrale de transformation :

L'énergie électrique produite dans une centrale est utilisée sur place ou transportée sur parfois de longues distances avant d'être utilisée. Pour compenser les chutes de tensions dans les conducteurs, on élève la tension à 220 kV ou 400 kV suivant le besoin, ceci se fait grâce aux transformateurs élévateurs qui se trouvent au voisinage des alternateurs.

Une fois l'énergie électrique transportée à l'endroit d'utilisation, il est nécessaire d'abaisser la tension pour des raisons de sécurité ou encore parce qu'on doit faire passer le courant dans des câbles souterrains qui ne supportent pas des grandes tensions. On utilise à cet effet des transformateurs abaisseurs [1].

1-5 Les lignes aériennes :

L'énergie électrique transite par les lignes aériennes de transport, de la production à la consommation, elles sont constituées d'un élément principal qui est le conducteur, il doit assurer une bonne continuité électrique. Les conducteurs sont fixes à des supports de formes

et d'importances très variées, la fixation se fait par l'intermédiaire d'isolateurs suspendus. Ces derniers ont un rôle très important.

Les lignes électriques aériennes sont soumises à différentes contraintes électriques, mécaniques et météorologiques qui influencent leur conception. Elles doivent donc satisfaire certaines conditions de sécurité déterminées suivant le lieu de leur implantation.

1-6 Les isolateurs :

Généralités :

Le rôle d'un isolateur de ligne aérienne est de relier mécaniquement les conducteurs sous tensions aux structures qui les supportent, et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties consécutives de la ligne pour une durée d'une dizaine d'années.

Un isolateur est constitué en générale de deux parties principales :

- Une partie isolante en verre trempé ou en céramique.
- Des pièces métalliques scellées sur la partie isolante.

Le choix des isolateurs est effectué en fonction de :

- De la tension de la ligne.
- Des effets mécaniques auxquels ils sont soumis.
- De la pollution du site.
- De la catégorie de la ligne.
- Du prix de revient de la ligne et son importance.

1-7 Les réseaux de Terre :

1-7-1 Définition :

Par mise à la terre on entend une liaison entre la partie conductrice d'une installation électrique qui pourrait être mise accidentellement sous tension à la terre. Par réseaux de terre on entend un ensemble de conducteurs enterrés en contact direct avec le sol reliés électriquement entre eux [1].

1-7-2 Rôle :

Le rôle d'une prise de terre ou d'un réseau de terre est d'écouler à l'intérieur du sol des courants de tout origine, qu'il s'agisse de courant de choc transitoire ou bien de courant de défaut à fréquence industrielle.

Les prises et le réseau de terre doivent assurer :

- La protection des personnes et des animaux.
- La protection des installations de puissance.
- La protection des installations sensibles.

1-7-3 Composition d'un circuit de terre :

Généralement Le circuit de terre se compose de trois éléments essentiels :

1-7-3-1 Mise à la terre des pylônes :

Ils doivent être mise à la terre à l'aide d'un conducteur de 48 mm^2 de section en cuivre, ceci se fait grâce à l'utilisation de sabot de terre qui présente néanmoins un inconvénient, celui de mettre le millage en discontinuité hors des terrains naturels. Pour parer à des problèmes en pratique une dérivation en T est assurée par brassage.

1-7-3-2 Mise à la terre des postes :

Elle est réalisée en connectant tous les éléments susceptibles d'être mis au contact d'un courant de défaut (appareils, clôture, pylônes intérieurs ou se trouvant dans le voisinage de l'enceinte, structure métallique, bâtiment) avec un réseau maillé enfoui dans le sol et s'étendant bien au delà du périmètre du poste. Celui-ci se compose de câbles parallèles et entrecroisés, espacés entre eux d'une distance constante de façon à améliorer la répartition en surface, la connexion entre eux et les masses métalliques se fait par procédé métallurgique.

1-7-3-3 Le câble de garde :

Le câble de garde est constitué d'un ou plusieurs conducteurs de sections différentes ou équivalentes au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé parallèlement aux conducteurs de phase à un niveau supérieur d'eux et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône. Son rôle se résume en ces quelques points :

- Protéger les conducteurs contre les chocs de foudre ;
- Réduire les tensions induites dans les circuits de télécommunication parallèles à la ligne ;
- Protéger la ligne en cas de rupture accidentelle d'un conducteur (torsion, flexion) ;
- Diminuer l'élévation de potentiel du support au moment du défaut en drainant une

partie du courant de court –circuit.

1-8 Les lignes de transports :

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique du producteur (centrale électrique) au consommateur (ville, quartier, maison, ensemble industriel). Les conducteurs sont en général en aluminium, en cuivre, ou en bronze, les isolants ont une partie solide (porcelaine, verre, papier, matière plastique) combinée avec un gaz (air, SF₆) ou un liquide (huile),

Les lignes électriques peuvent être classées suivant plusieurs critères :

- Situation dans l'espace : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles)
- Classe de tension : lignes à basse tension (inférieure à 1KV) et lignes à haute tension (supérieure à 1KV)
- Nature de la tension : continue, alternative monophasée ou triphasée. L'air assure l'isolement entre conducteurs et par rapport à la terre, les isolateurs fixent les distances entre les conducteurs. Ils sont en porcelaine, en verre ou en matière synthétique.

Le conducteur de garde relié à la terre en chaque pylône, sert essentiellement à protéger les conducteurs de phases contre les coups de foudre.

Le métal des conducteurs des lignes aériennes est écroui (dur). Ces conducteurs sont généralement constitués de brins toronnés, ce qui assure la souplesse nécessaire aux conducteurs appelés à être enroulé et déroulé pendant la fabrication. Les conducteurs en aluminium, cuivre ont souvent une âme d'acier qui assure la résistance mécanique.

1-9 Transposition des phases :

Lorsqu'une ligne triphasée dépasse une certaine distance, il est souhaitable de symétriser la disposition des conducteurs. Cette opération porte le nom de transposition des phases. Elle consiste à permuter cycliquement la position des conducteurs de phase. On en trouve un exemple dans la figure 1.2. Une ligne non transposée introduit des asymétries d'autant plus gênantes que la ligne est longue.

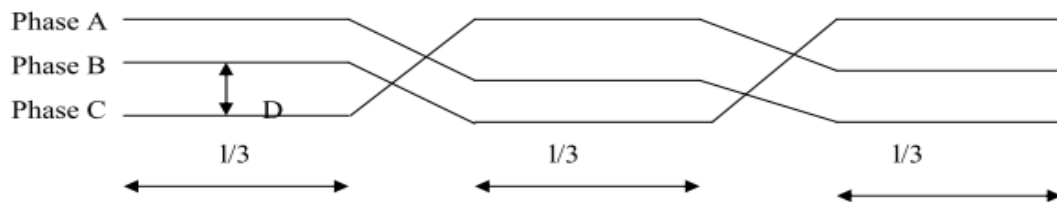


fig.1.2 ligne triphasé transposée.

1-10 Les principaux défauts de court-circuit :

Dans les installations électriques différents courts-circuits peuvent se produire. Dans cette étude on va voir généralement les perturbations dues aux ces défauts.

1-11 Caractéristiques des courts-circuits :

Ils sont principalement caractérisés par :

- Leurs durées : auto extincteur, fugitif ou permanent.
- Leurs origines :
 - Mécaniques (rupture de conducteurs, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger conducteur tel que outils Ou animaux),
 - Surtensions électriques d'origine interne ou atmosphérique, ou à la suite d'une dégradation de l'isolement, consécutive à la chaleur, l'humidité ou une ambiance corrosive.
 - Leurs localisations : interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique.

Autre ces caractéristiques, les courts-circuits peuvent être :

- Monophasés : 80 % des cas.
- Biphasés : 15 % des cas. Ces défauts Dégénèrent souvent en défauts triphasés.
- Triphasés : 5 % seulement dès l'origine.

Ces différents courants de court-circuit sont présentés sur la figure .1.4

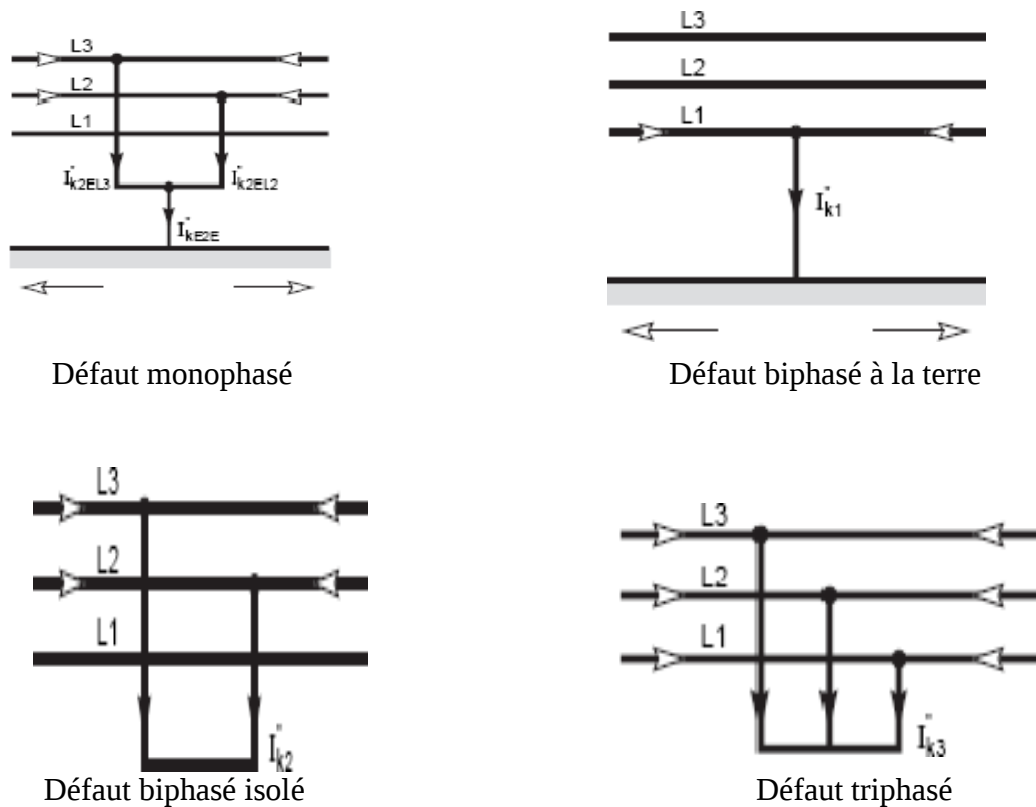


Fig.1.4 différents défauts de court circuit.

1-12 Conséquences des défauts de court-circuit :

Elles sont variables selon la nature et la durée des défauts, le point concerné de l'installation et l'intensité du courant :

Au point de défaut, la présence d'arcs de défaut, avec :

- détérioration des isolants.
- fusion des conducteurs.
- incendie et danger sur les personnes.

Et Pour le circuit défectueux :

Les efforts électrodynamiques, avec :

- déformation des jeux de barres.
- arrachement des câbles.

* sur échauffement par augmentation des pertes joules, avec risque de détérioration des isolants.

- * pour les autres circuits électriques du réseau concerné ou de réseaux situés à proximité :
- * les creux de tension pendant la durée d'élimination du défaut, de quelques

millisecondes à quelques centaines de millisecondes.

- * la mise hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau suivant son schéma de sélectivité de ses protections.
- * l'instabilité dynamique et/ou la perte de synchronisme des machines,
- * les perturbations dans les circuits de contrôle commande.

1-13 Les surtensions :

Les surtensions qui peuvent se produire dans les réseaux électriques sont :

1-13-1 : Les surtensions internes :

Elles sont liées au fonctionnement du réseau, les plus fortes et les plus fréquentes résultant de l'ouverture brutale des disjoncteurs en cas de court circuit. En effet, comme la rupture de ce courant très élevée dans un temps très court, la tension. $L \frac{di}{dt}$ Peut être considérable [1] [2].

1-13-2 Les surtensions externes :

Ces tensions sont liées aux effets de la foudre, en effet deux parties de deux nuages voisins porteuses de charges opposées sont analogues aux deux armatures d'un condensateur et si la tension est suffisante, une décharge se produit à travers l'air qui n'est pas un isolant parfait ; c'est l'éclair entre deux nuages et le bruit de tonnerre par déplacement des couches d'air voisines.

De même si l'un de ces nuages est suffisamment proche d'une ligne, celle-ci se charge par l'influence et le même phénomène de décharge peut se produire entre le nuage et la ligne.

Cette perturbation quelle que soit sa cause a pour effet la propagation à partir du point touché (et dans les deux sens) d'une onde très haute fréquence (plusieurs centaines de milliers d'hertz) d'une onde de tension très élevée (plusieurs millions de volts).

Ce signal qui se propage à la vitesse de l'onde électromagnétique (300 000 Km/s) peut avoir une durée très brève, mais suffisante pour provoquer de graves dommages.

Dans le cas des lignes de transport, ces dommages concernent essentiellement le matériel (claquage de transformateurs, de chaînes d'isolateurs ...) car la personne est toujours éloignée de ces lignes de transport. En revanche, sur les lignes de distribution, il peut provoquer l'électrocution d'une personne en contact avec la partie métallique d'un appareil touché par la perturbation.

Dans ce chapitre on intéressera les surtensions internes dues aux courts circuits.

1-14 La protection contre les surtensions :

Pour protéger le matériel de notre réseau contre les surtensions causées par les défauts de court circuit il faut installer les appareils de protection suivants :

1-14-1 Parafoudres :

Les coups de foudre qui frappent une installation se traduisent par des tensions d'autant plus élevées que l'isolement de l'installation est plus grand. C'est pourquoi les seuls moyens de réduire, puis à prévoir des points d'écoulement à la terre pour les surtensions éventuelles [4] [5].

En ce qui concerne les lignes HT, on prend les dispositions suivantes :

- On place un fil de garde au sommet des pylônes (au dessus des conducteurs), fil qui est relié à la terre au moins tous les kilomètres.
- On met toutes les masses métalliques à la terre.
- On branche à l'entrée des postes de transformation ou de distribution des appareils appelés les parafoudres. Ces appareils assurent une protection non seulement contre les effets de la foudre, mais aussi contre les surtensions d'origine interne.

Le parafoudre le plus simple est le parafoudre à cornes. C'est un éclateur formé de deux cornes, l'une liée à la ligne, l'autre à la terre à travers une résistance importante. La plus petite distance des cornes à leur base, est réglée de façon qu'à la tension normale, il ne s'établisse pas d'arc. Si la tension atteint une valeur suffisante, un arc éclate entre les points les plus rapprochés puis, soufflé vers le haut par le courant d'air chaud qu'il provoque, il s'élève, s'allonge et s'éteint [19].

On ajoute sur chaque fil de ligne, à l'entrée du poste, une bobine d'inductance faite de quelques spires d'un fil de même diamètre que la ligne. Sa réactance est négligeable pour la fréquence du secteur tandis qu'elle est très grande pour la fréquence de la surtension oscillante provoquée par la foudre. L'énergie transportée par l'onde de foudre prend donc le chemin plus facile du parafoudre.

Les parafoudres modernes utilisent les propriétés des résistances non linéaires à base de semi-conducteurs. Ces résistances sont constituées de cristaux de carbure de silicium que l'on agglomère avec un liant céramique. L'ensemble est comprimé puis mis au four, il se présente sous la forme de disques minces dont on métallise les deux faces.

En basse tension, le parafoudre comporte deux disques faiblement écartés qui forment éclateur et un cylindre constitué par la résistance non linéaire. Lors de l'apparition de la

surtension, le courant très intense qu'elle engendre fait décroître fortement la résistance du circuit, ce qui provoque son écoulement à la terre. La diminution du courant s'accompagne d'une augmentation de la résistance du circuit ce qui provoque l'extinction de l'arc.

Le circuit éclateur-résistance convient pour des tensions d'environ 10 kV. On le considère comme un échelon unitaire car il est toujours possible, en branchant ces éléments en cascade de réaliser un parafoudre de tension donnée. Ces parafoudres qui, aux tensions élevées, sont de grandes dimensions (5,5m de hauteur pour un réseau de 400KV), sont soumis aux essais du laboratoire de L'E.D.F. qui grâce à des tensions de plusieurs dizaines de millions de volts, est capable de simuler les effets de la foudre [19].

1-15 Conclusion :

Ce chapitre avait essentiellement pour but une description d'un réseau électrique THT et quelques notions sur les lignes et une partie d'étude des perturbations électromagnétiques dues aux courts circuits transitoires dans les réseaux électriques THT et leurs influences sur les éléments constituant le réseau (poste de transformation, isolateur, la charge, les groupes de productions) et aussi sur les réseaux de télécommunications parallèles, après avoir présentés les différents éléments constituant un réseau électrique de transport.

D'après les résultats trouvés dans les essais de la simulation des différents types des courts circuits qui peuvent se produire dans un réseau électrique, les perturbations électromagnétiques dues aux ces dernières sont considérables. Par conséquent on propose les solutions suivantes :

- Installation des équipements de protection contre les surtensions (parafoudre, câble de garde..) et appareilles contre les surintensités (disjoncteurs..).
- De point de vue de l'exploitation il faut éloigner les réseaux de télécommunication. Et celui de transport d'énergie électrique.

Chapitre 2 : La forme de la tension dans les réseaux de transport d'énergie électrique

2-1 Introduction :

L'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leur taille, de la présence de lignes d'interconnexion très longues, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques. Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité. Les situations des pays à forte consommation augmentent encore les risques d'apparition du phénomène d'instabilité. Pour éviter ce phénomène, l'étude de stabilité de tension est proposée dans ce chapitre. Cette étude est un outil très important pour déterminer la possibilité de transfert de puissance électrique le long de ligne sans problème.

La tension doit rester dans la plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévues. En effet, la tension peut se détériorer localement, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, le franchissement des lignes du réseau est important, ce qui entraîne des chutes de tension sur ces lignes.

Comme tout groupe électrogène, le réseau électrique alimente les appareils de l'utilisateur via les tensions qu'ils maintiennent à leurs bornes. Force est de constater que la qualité et la continuité de la tension sont devenues un sujet stratégique pour plusieurs raisons liées à l'exploitation des réseaux électriques.

2-2 Qualité de la tension :

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement. Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales : fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie. [2]

Pour le réseau synchrone algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale, mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$.

Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence. Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de $\pm 10 \%$ autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- les creux de tension et coupures brèves.
- les variations rapides de tension (flicker).
- les surtensions temporaires ou transitoires.

Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents (plus grande difficulté de s'en protéger) [2] [3].

2-3 Dégradation de la qualité de la tension: les Phénomènes perturbateurs :

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de : [2]

* Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un

poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain, etc., ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillessement d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...) [4];

* Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc.... Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension - lorsque celle-ci est présente - sont brièvement décrits ci-après.

2-3-1 Variation ou fluctuation de la fréquence :

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ comme illustré sur la figure (2.1).

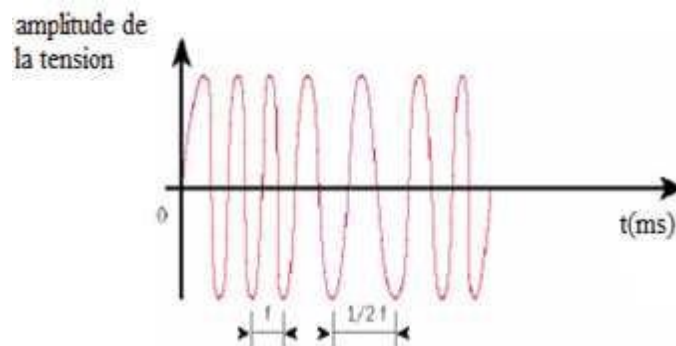


Fig. 2.1 exemple de fluctuation de fréquence

2-3-2 Composante lente des variations de tension :

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison de modifications des charges alimentées par le réseau. Les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste confinée dans les limites contractuelles. On parle de "variations lentes" bien qu'il s'agisse en réalité d'une succession de variations rapides dont les amplitudes sont très petites.

Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénient des variations lentes de tension dans une plage d'au moins $\pm 10\%$ de la tension nominale.

2-3-3 Fluctuation de tension (flicker) :

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure 2.2), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les

soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc. [2] [5].

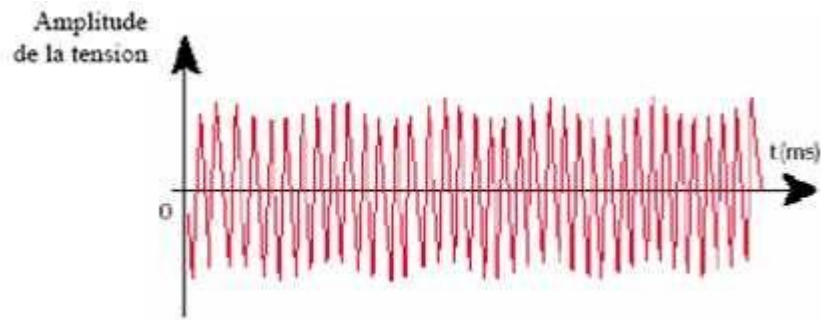


Fig.2.2.variations rapide de la tension.

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (Flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10 %.

2-3-4 Creux de tension:

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle (figure 2.3). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des "fluctuations de tension"). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1-0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT). [5]

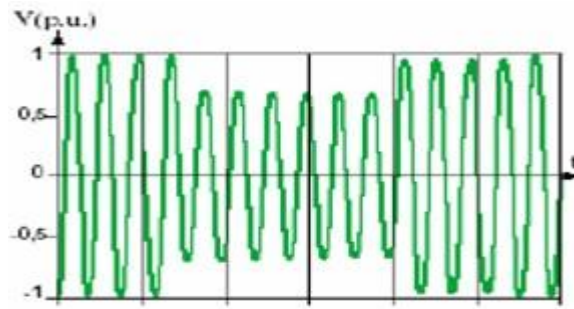


Fig.2.3.exemple d'un creux de tension.

Ils sont caractérisés par leurs: amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

2-3-5 Interruption courte ou coupure brève :

L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2 cycles jusqu'à 3 s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 pu [3].

Le dégagement du défaut de tension et les coupures brèves sont principalement produits par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont également la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau.

2-3-6 Bosses de tension :

La bosse de tension est une augmentation de la tension au dessus de la tension nominale 1.1 p.u pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants.

2-3-7 Chutes de tension :

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension (figure 2.4). La tension est alors plus basse en

bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

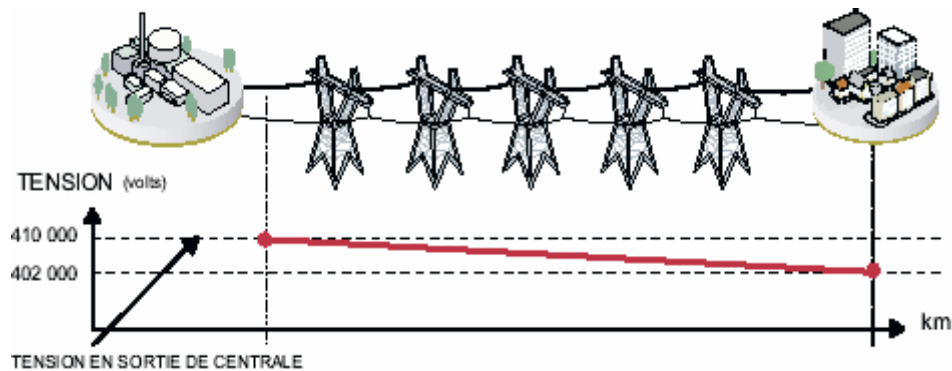


Fig. 2.4 Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.

Si la consommation double, la chute de tension double.

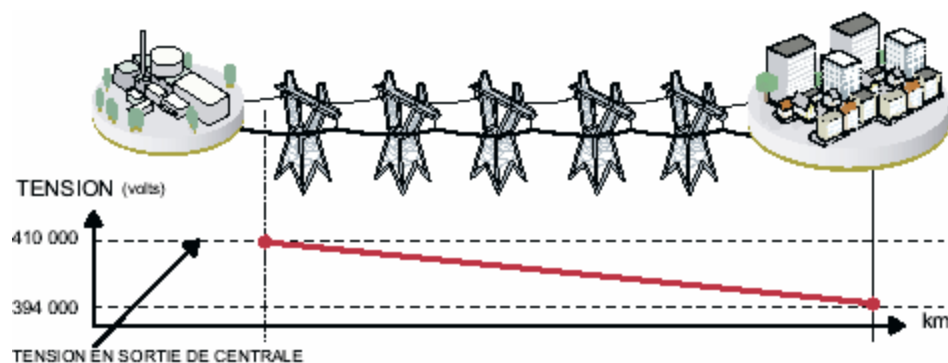


Fig. 2.5: Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties (figure 2.6). Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.

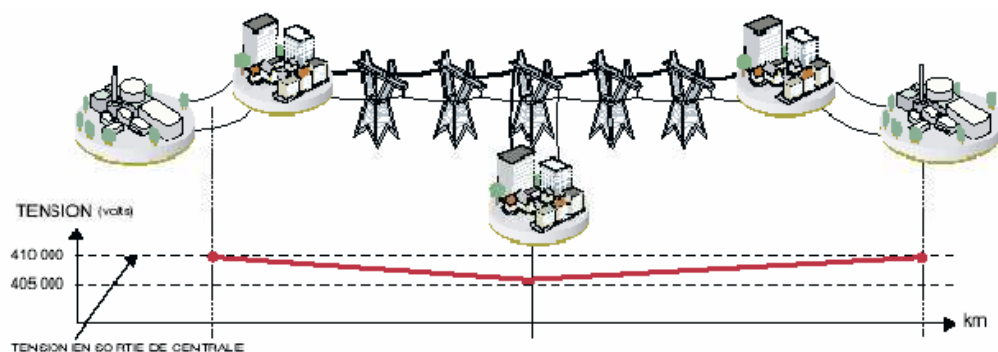


Fig. 2.6: Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales.

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit

où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.

Figures (2.4) (2.5) (2.6) sont valables pour un instant donné, à un niveau de consommation donné. Lorsque la consommation varie au cours du temps, la tension évolue, baissant lorsque la consommation augmente, remontant lorsque la consommation diminue.

Le fait que la tension ne soit pas identique en tout point du réseau est normal. Cette différence est compensée par des réglages de tension réalisés dans les postes de transformation. Cela permet de garantir que la tension reste dans la plage admissible en tout point de livraison.

2-3-8 Tension et/ou courant transitoire :

Les surtensions transitoires illustrées sur la figure (2.7) sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde [2] [15].

Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux courants et tensions transitoires.

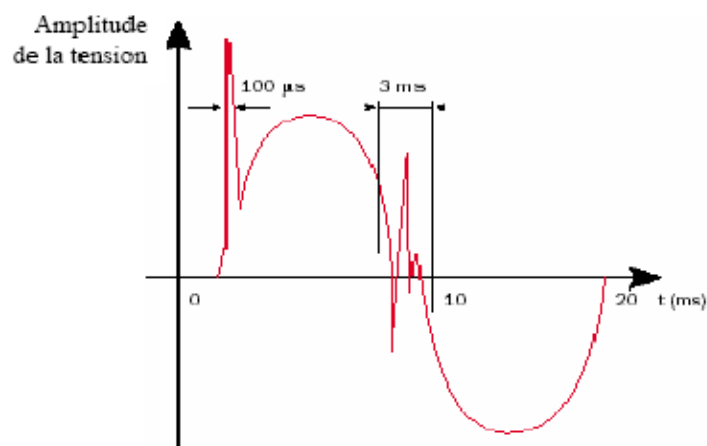


Fig. 2.7: Exemple de cas de surtensions transitoires [15].

2-3-9 Déséquilibre de tension :

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un Réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau (figure 2.8). Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus

élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [15].

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° .

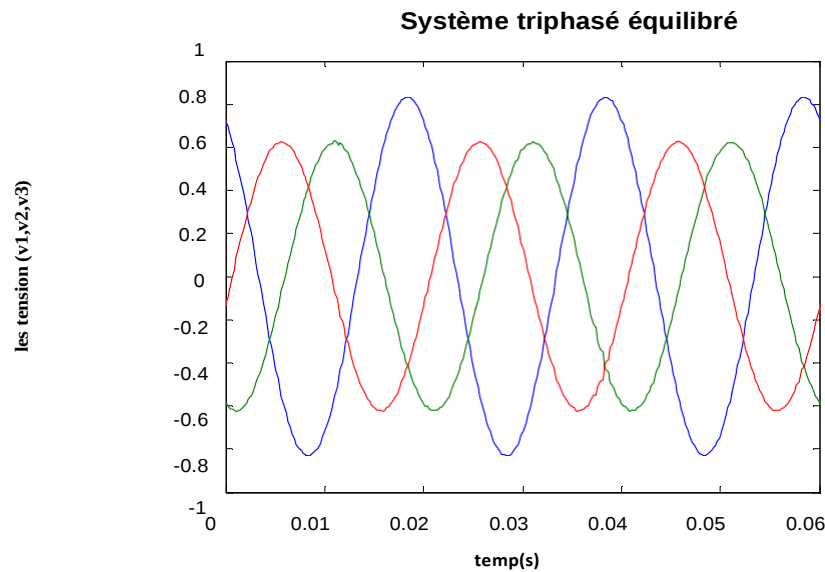


Fig. 2.8: Déséquilibre de tension.

2-3-10 Perturbations harmonique et inter harmoniques :

On entend par harmonique, toute perturbation non transitoire affectant la forme d'onde de tension du réseau électrique [2].

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale (figure 2.9), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale [6]. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les gradateurs électroniques, les fours à arc, etc.

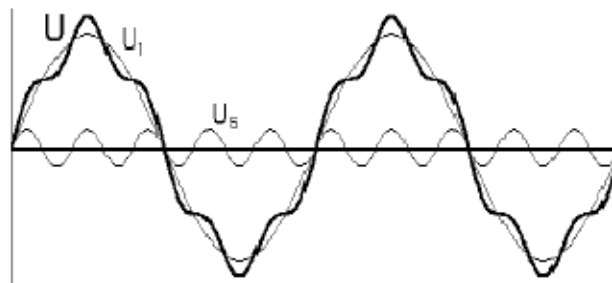


Fig. 2.9 Distorsion provoquée par un seul harmonique ($h=5$).

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements, par ex. de condensateurs ou de machines tournantes, et peuvent perturber le fonctionnement de systèmes électroniques [6] [7].

2-4 Lignes de transport électrique en régime permanent :

2-4-1 Généralités sur les réseaux d'énergie électrique :

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés qui est conçu:[1]

1. pour convertir d'une façon continue de l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique (production).
2. pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.
3. pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.

Pour un consommateur, le réseau devrait idéalement vu, de l'endroit où il prend son énergie électrique, comme une source de tension alternative parfaite: c'est-à-dire une source dont l'amplitude et la fréquence sont constantes quelle que soit la charge qu'il connecte. Pour satisfaire leur clientèle, les compagnies d'électricité doivent donc s'efforcer de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension le plus près possible de leur valeur nominale sur tout le réseau d'énergie électrique. [8]

Il est important de maintenir le niveau de tension près de la valeur nominale aux différents nœuds du réseau [8] [9]. Dans les réseaux triphasés on parle souvent de barres plutôt que de nœuds. Une barre est l'équivalent d'un nœud sur les trois phases du système. Des niveaux de tension largement inférieurs à la tension nominale provoquent une dégradation considérable de la performance des charges et provoquent aussi des surintensités de courant dans les moteurs d'induction utilisés dans de nombreuses usines; alors que des surtensions occasionnent des bris d'équipements et des surintensités de courant dans les dispositifs constitués de matériaux ferromagnétiques saturables, en particuliers les transformateurs, et provoquent aussi une dégradation de la performance des charges.

Pour la majorité des réseaux et pour le réseau Algérien en particulier, la génération de l'énergie électrique est assurée par plusieurs alternateurs synchrones situés dans différentes centrales de production. En régime permanent, ces machines tournent à vitesse constante définie comme la vitesse synchrone. Cette vitesse impose la fréquence de la tension sur le réseau.

Pour maintenir constante en régime permanent la fréquence de la tension, il est donc essentiel que les alternateurs tournent tous à cette même vitesse. Le synchronisme des alternateurs est associé au concept de la stabilité du réseau.

2-4-2 Stabilité des réseaux électrique :

Un système est stable s'il a tendance à continuer à fonctionner dans son mode normal (celui pour lequel il a été conçu) en régime permanent et s'il a tendance à revenir à son mode de fonctionnement à la suite d'une perturbation [10]. Une perturbation sur un réseau peut être une manœuvre prévue, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou non prévue comme un court-circuit causé par la foudre entre une phase et la terre par exemple. Lors de la perturbation, l'amplitude de la tension aux différentes barres du réseau peut varier ainsi que la fréquence. La variation de la fréquence est due aux variations de la vitesse des rotors des alternateurs. Un réseau d'énergie électrique est stable s'il est capable, en régime permanent à la suite d'une perturbation, de fournir la puissance qu'exigent les consommateurs tout en maintenant constantes et près des valeurs nominales la fréquence, donc la vitesse de rotation des alternateurs, et l'amplitude de la tension aux différents barres du réseau.

On définit trois types de stabilité: [10] [11]

1. la limite de stabilité en régime permanent.
2. la stabilité dynamique.
3. la stabilité transitoire.

2-4-2-1 Limite de stabilité en régime permanent [12] :

Soit un alternateur connecté sur un réseau qui alimente une charge par l'intermédiaire des lignes de transport. Si la charge augmente graduellement, suffisamment lentement pour maintenir le système en régime permanent, l'alternateur fournit la puissance requise par charge tout en maintenant sa vitesse de rotation constante. Toutefois, il existe une limite de puissance active qui peut être fournie à la charge de façon stable, c'est-à-dire en maintenant constante la vitesse de rotation de l'alternateur. Si, à partir de cette limite, on veut fournir encore plus de puissance à la charge, en ouvrant les vannes d'amenée d'eau d'une turbine par exemple, l'impédance de la machine et celle des lignes limitent le transfert de puissance à la charge. L'excès de puissance est absorbée par l'alternateur ce qui provoque l'accélération de son rotor. Il y a donc rupture de la stabilité en régime permanent. Dans le cas où plusieurs alternateurs sont en service sur le réseau, il y a une perte de synchronisme entre eux. La puissance maximale que le groupe d'alternateurs peut fournir à la charge tout en maintenant le synchronisme est appelée la limite de stabilité en régime permanent. Dans le but d'avoir une bonne marge de manœuvre en cas de perturbations, les alternateurs et les lignes sont conçus de façon à opérer, en régime permanent nominal, à un niveau de puissance inférieur à cette limite de stabilité en régime permanent.

2-4-2-2 Stabilité dynamique :

Si une perturbation mineure est effectuée sur le réseau, à partir d'un régime permanent stable, et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal en régime permanent, le réseau est dit dynamiquement stable [10]. Pour un réseau d'énergie électrique, on entend par perturbation mineure des manœuvres ou des opérations normales sur le réseau, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou des variations mineures de la charge.

2-4-2-3 Stabilité transitoire :

Lorsqu'il y a une perturbation majeure sur le réseau et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal après la perturbation, alors le réseau est dit transitoirement stable. Les perturbations majeures sont les courts-circuits, les pertes de lignes, les bris d'équipements majeurs comme les transformateurs de puissance et les alternateurs [10] [11].

Si on prend en compte ces diverses définitions et les différentes perturbations sur le réseau, on comprend que la stabilité dynamique et la stabilité transitoire sont intimement reliées au niveau de stabilité en régime permanent. En effet, le niveau de stabilité en régime permanent doit être le plus élevée possible; lors d'une perturbation sur le réseau, un court-circuit de quelques cycles par exemple, l'appel de puissance durant la perturbation et lors des instants qui suivent l'élimination du défaut ne doit pas atteindre la limite de stabilité en régime permanent sinon le synchronisme risque d'être perdu. Dans ce cas, le réseau sera transitoirement instable. Plus la limite de stabilité en régime permanent est élevée, plus la stabilité dynamique et la stabilité transitoire est accrue. Une limite de stabilité en régime permanent la plus élevée possible permet également de continuer à alimenter la charge lorsqu'un équipement majeur, comme alternateur [12], devient hors service.

2-4-3 Instabilité de la tension :

On définit la stabilité de la tension comme la capacité de maintenir une tension de barre constamment acceptable à chaque nœud du réseau, dans des conditions normales de fonctionnement, après avoir subi une perturbation [13] [14]. L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable de la tension, aboutissent en un effondrement généralisé de la tension.

2-4-3-1 Causes de l'instabilité de la tension:

Le phénomène de l'instabilité de la tension est attribuable à l'exploitation du réseau à sa limite de puissance transmissible maximale, à l'insuffisance de dispositifs de compensation de la puissance réactive. Les principaux facteurs qui contribuent à un effondrement de la tension

sont la limite de puissance réactive des génératrices, les limites de réglage de la tension, les caractéristiques de la charge ainsi que les caractéristiques et les actions des dispositifs de compensation de la puissance réactive [9] [13] [14].

2-4-3-2 Importance et incidents :

Bien que les problèmes associés à la stabilité de la tension ne soient pas nouveaux pour le fournisseur d'électricité, ils suscitent actuellement beaucoup d'intérêt et une attention spéciale dans plusieurs grands réseaux. Au début, le problème de la stabilité de la tension était associé à un réseau faible et isolé, mais cette question est actuellement devenue source de problèmes dans les réseaux bien développés en raison de l'accroissement de la charge. Des instabilités et effondrements de la tension sont survenus à plusieurs reprises dans des réseaux importants à travers le monde au cours des dernières années.

2-4-3-3 Caractéristiques et analyse de la stabilité de la tension :

L'une des caractéristiques importantes d'un réseau est la relation entre la puissance Reçue P_R et la tension à l'extrémité réceptrice V_R [9] [13] [14]. Le texte qui suit présente Une discussion de cette caractéristique associée à un réseau radial simple, soit celui de la Figure (2.10).

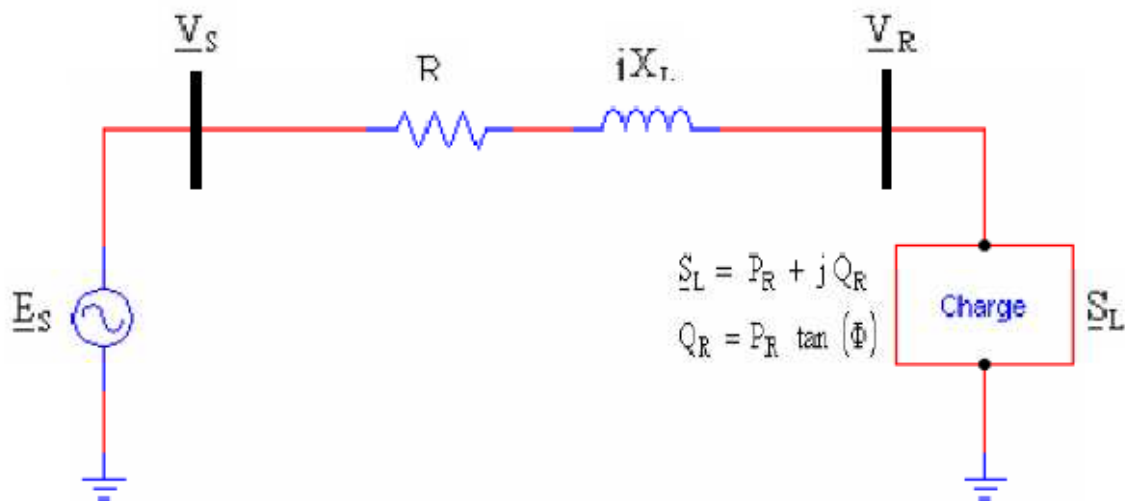


Fig. 2.10: Exemple d'un réseau radial.

2-4-3-4 Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension :

L'instabilité de la tension d'un grand réseau est un problème de nature complexe. Plusieurs éléments d'un réseau contribuent à la création d'un scénario propice à une instabilité de Tension. Les éléments suivants ont un impact important sur la stabilité de la tension du réseau [14]:

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

Parmi ces éléments qui influent sur la stabilité de la tension, on retrouve les lignes de transport d'énergie [12]. Les lignes de transport affectent considérablement les niveaux de tension en fonction de la charge. Si la charge est importante, la tension sur le réseau a tendance à être faible, par contre si la charge est faible, le niveau de tension peut en différents endroits sur le réseau, s'élever au-dessus de la tension nominale. Sur les lignes de transport non compensées, le taux de régulation de tension a donc tendance à être mauvais.

La stabilité en régime permanent est aussi influencée par la longueur des lignes de transport: plus la ligne est longue plus la limite de stabilité en régime permanent est faible. Ces deux effets néfastes des longues lignes de transport, sur le taux de régulation de la tension et sur la stabilité du réseau, peuvent être diminués ou même théoriquement éliminés en utilisant des techniques de réglage de la tension incluent des mesures comme la commutation par compensation shunt et le réglage de la tension des génératrices.

2-5 Étude en régime permanent d'une ligne de transport non compensée :

L'étude en régime permanent des lignes de transport est largement traitée dans la littérature. La majorité des auteurs subdivise l'étude des lignes de transport en trois catégories [12] [16]:

- les lignes courtes: longueur inférieure à 80 km.
- les lignes de longueur moyenne: longueur inférieure à 240 km
- les lignes longues: plus de 240 km de long.

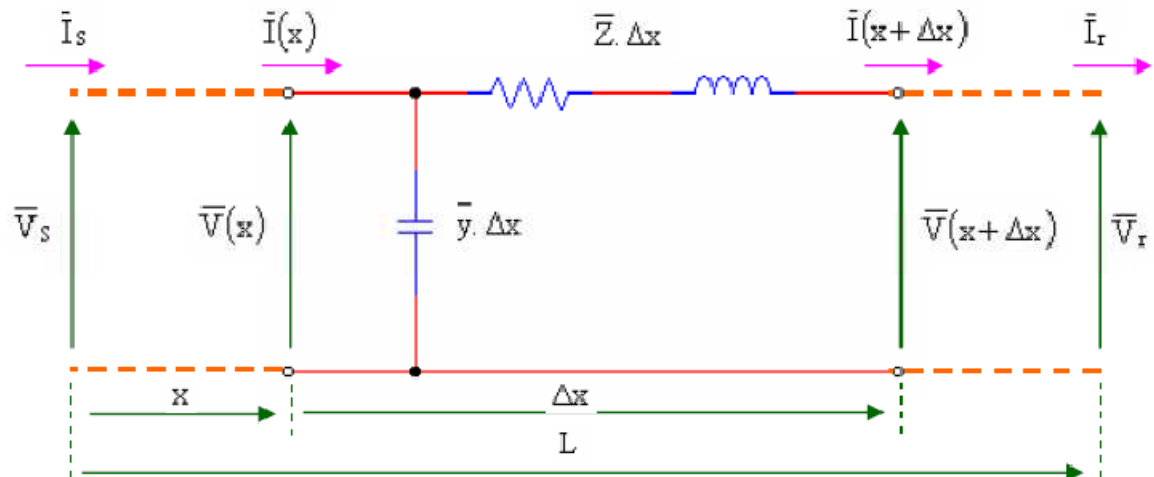


Fig. 2.11 Circuit distribué équivalent d'une ligne longue.

2-6 Conclusion :

Ce chapitre a traité des différents phénomènes perturbateurs qui affectent la qualité de la tension, ainsi une étude détaillée liée aux caractéristiques de la tension, du courant et du flux d'énergie active et réactive sur les lignes de transport d'énergie a été présentée condition.

Les longues lignes ont un impact significatif sur la régulation de la tension et la stabilité du réseau. De plus, il a été démontré qu'il est nécessaire de déporter ces lignes pour respecter les deux principaux freins au transport de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre, les critères qui justifient la compensation de ligne sont essentiellement les critères de régime permanent : maintien de la tension en régime permanent à une valeur acceptable et augmentation de la puissance transmise de manière stable. Cependant, l'utilisation simultanée de la compensation de chaîne et de la compensation de shunt inductive est très importante pour obtenir la qualité de la puissance transmise le long de la ligne.

La compensation traditionnelle (chaines et transferts) sera traitée en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Etude des compensations sur le rendement en MATLAB

3-1 Introduction :

Au cours des dernières années, l'augmentation croissante de la demande d'énergie, les contraintes également croissantes de la préservation de l'environnement, les difficultés d'obtention des droits de bâtir ainsi que les coûts relatifs à la construction de nouvelles lignes et centrales posent de nouveaux défis aux exploitants des réseaux.

Cette situation a entraîné des recherches intensives. Pour optimiser l'exploitation des réseaux électriques, et tenter d'atteindre les limites thermiques des lignes.

La technique valable utilisée jusqu'à l'heure actuelle dans ce domaine est l'emploi des compensations série et parallèle des longues lignes permettant de réduire artificiellement la distance de transport. Ceci a pour résultat un maximum de transfert de puissance et un meilleur rendement. L'influence de différents schémas de compensation série et parallèle sur les longues lignes à Extra Haute Tension sera l'objet d'étude du de ce chapitre, l'influence de divers facteurs tel que la longueur de la ligne, le facteur de puissance, le mode de montage des compensateurs (série et/ou parallèle) ainsi que les degrés de compensation sur le transit de puissance seront investis.

3-2 Compensation série :

La compensation série des longues lignes de Transport a été proposée pour la première fois, il y a Une trentaine d'années pour augmenter les transits de Puissance sur une ligne. En 1966, Kimbark [20] montre L'effet bénéfique de la compensation série sur la stabilité dynamique du réseau. Dans les années 70, on découvre que la compensation série fixe présente un problème de risque de résonance sous synchrone [21].

L'importance de la compensation série, dans le but d'améliorer la capacité de transport des lignes, a été Reconnue et n'a fait que croître au cours des dernières Années. Hydro Québec [22] a récemment procédé à l'installation des bancs de condensateurs séries sur son Réseau de transport pour ainsi augmenter la capacité de Transport et la fiabilité de son réseau.

La figure 3.1 montre un réseau simple à deux machines compensé série.

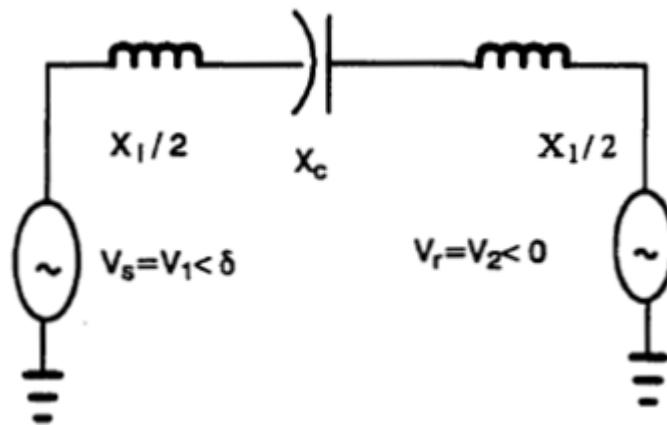


Fig.3.1 réseau simplifié à deux machines compensé série fixe

L'impédance totale de la ligne, tenant compte de la compensation série, diminue avec le degré de compensation k . A un angle δ donné, la puissance transmissible le long de la ligne augmente avec k . En plus, la puissance synchronisante des machines, définie comme étant la capacité des machines de retrouver leur point d'équilibre après une perturbation, augmente.

Cet effet est dû à l'augmentation de la pente au point de fonctionnement.

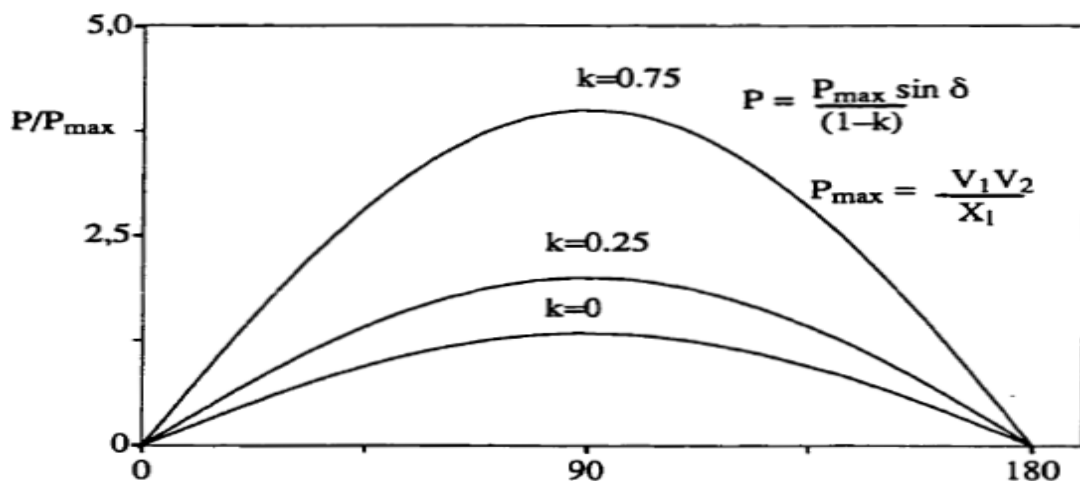


Fig.3.2 Caractéristique $P(\delta)$ d'un réseau compensé série fixe.

La figure 3.2 montre la courbe de la puissance active le long de la ligne en fonction de l'angle δ pour 3 valeurs différentes du degré de compensation k . Plus la valeur de k augmente, plus p/P_{max} augmente, permettant ainsi un transit de puissance de plus en plus grand. Même si théoriquement, on peut réaliser une compensation de 100%, la pratique limite la compensation fixe aux alentours de 40 à 60 % pour se mettre à l'abri des risques de résonance sous synchrone.

Le phénomène de résonance est défini comme étant une réponse particulièrement élevée d'un système suite à une excitation, périodique dont la fréquence correspond à la fréquence propre du système excité.

3-3 Problème de résonance :

Le problème de résonance survenant dans les réseaux compensés série a été abordé depuis 1966 [38]. Il a connu un intérêt particulier vers les années 1970, suite aux bris d'arbres de turbine survenus en 1970 et 1971 dans une centrale à la station Mohave aux USA. Depuis lors, plusieurs études ont été réalisées et des mesures appropriées ont été prises. C'est ainsi que plusieurs solutions ont été proposées: contrôle sur l'excitation des machines [23], [22], filtres amortisseurs D'oscillations etc.

Plus tard, N.G. Hingorani a breveté un amortisseur d'oscillations qui porte d'ailleurs son nom [24], [25] et qui est basé sur une résistance commandée par thyristors, en parallèle sur les machines. Par la suite, A.A Edris a proposé en 1990, une façon de se mettre à l'abri des résonances sous synchrones en utilisant une combinaison déséquilibrée de condensateurs en série sur la ligne. Aujourd'hui, le TCSC vient s'ajouter à ces équipements pour réduire les risques de résonances sous synchrones.

3-4 Phénomènes d'interaction sous synchrones :

3-4-1 Le phénomène de résonance :

Il est défini comme étant une réponse particulièrement élevée d'un système suite à une excitation périodique dont la fréquence correspond à la fréquence propre du système excité.

3-4-2 Le phénomène d'oscillation sous synchrone :

Il est défini comme étant une condition de réseau au cours de laquelle il y a échange significative d'énergie entre le groupe alternateur turbine et le réseau à une ou plusieurs fréquences inférieures à la fréquence fondamentale du réseau, (communément appelé fréquence industrielle (50 ou 60 Hz) suite à une perturbation et ce à partir d'un état de régime permanent. Les fréquences en question doivent différer des modes mécaniques du groupe turbine alternateur.

3-4-3 Le phénomène de résonance sous Synchrone :

Ce phénomène (sub-synchronous resonance (SSR)) est un cas particulier du phénomène général d'oscillations sous synchrones relatives à l'interaction électromécanique entre le groupe alternateur-turbine et des éléments passifs comme les condensateurs en série dans les

lignes de transport ou avec des éléments actifs tels que les équipements de contrôle dans les lignes à courant continu, dans les compensateurs statiques, et en particulier les compensateurs série variable.

3-4-4 Compensation série et résonance sous synchrone :

Le phénomène de résonance sous synchrone résulte d'une interaction entre un réseau compensé série et le système turbo-alternateur dans lequel l'échange d'énergie est faiblement ou pas du tout amortie. La fréquence naturelle d'un réseau radial compensé série est donnée par les équations suivantes:

$$L = \frac{XL}{wS}$$

$$C = \frac{1}{m_s \cdot x_c}$$

$$w_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = w_s \cdot \sqrt{\frac{X_c}{X_L}}$$

$$\frac{w_n}{w_s} = \frac{f_n}{f_s} = \sqrt{K}$$

$$K = \frac{X_c}{X_L} , K \in [0 ; 1] \rightarrow f_n < f_s$$

k : le degré de compensation du réseau:

fs : la fréquence industrielle (60 Hz) ;

fn : la fréquence naturelle du système compensé.

Pour supprimer ou réduire les risques de résonances sous synchrones, des moyens existent. Entre autres, limiter la compensation série à un niveau pas trop élevé. En général, cette compensation est limitée entre 40 et 70%. Une autre façon consiste à utiliser un amortisseur NGH [24] [25]. Le principe du NGH est basé sur le branchement d'une résistance commandée par thyristors en parallèle avec la capacité série. Une installation est en service aux USA.

3-5 Compensation parallèle (shunt) :

Généralement le transport de l'énergie électrique se fait sur certaines conditions tel que la

tension admissible (si on dépasse cette valeur de tension on aura l'ionisation de l'air qui se traduit par des pertes (effet de couronne), pour cette raison on utilise des compensations shunts pour réduire la tension à ça valeur admissible , comme il est montré dans la figure 3.3.une inductance shunt placée à la distance de 500km avec trois valeurs de y différentes pour voir le profil de la tension dans cette localisation.

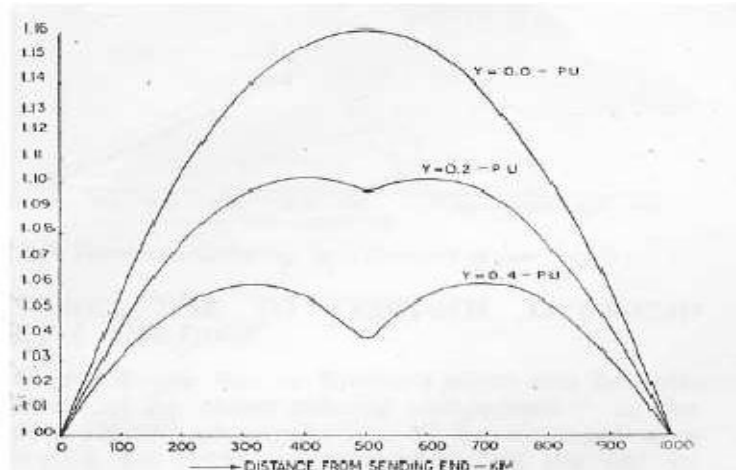


Fig.3.3 profil de la tension d'une longue ligne de 1000km

3-6- Description de la méthode de détermination du rendement maximal :

Cette méthode basée sur des expressions analytiques simples utilisée pour déterminer le rendement maximal d'une longue ligne de transport quelle que soit sa nature, compensée ou non compensée, par conséquent elle est applicable sur les compensations symétriques et non symétriques. Dans notre travail on va voir l'influence des différents facteurs telle que la longueur de la ligne de transport, le facteur de puissance, le degré de compensation série et shunt respectivement K_s K_d [18].

3-7 Modélisation des différents schémas de compensation :

Dans notre modélisation on va faire un produit matricielle des différents compensations (c'est à dire la compensation série et shunt et la matrice de la ligne de transport) [17][18].

La figure 3.4 présente les différents schémas de compensation utilisés dans l'exploitation des longues lignes de transport EHT



Schéma A

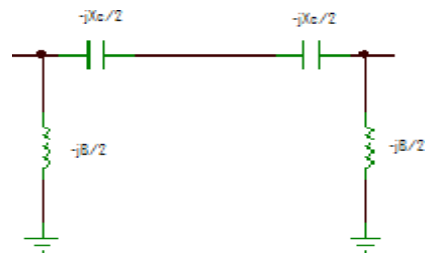


Schéma B

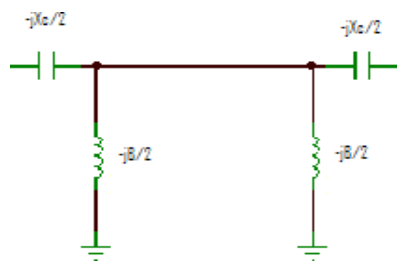


Schéma C

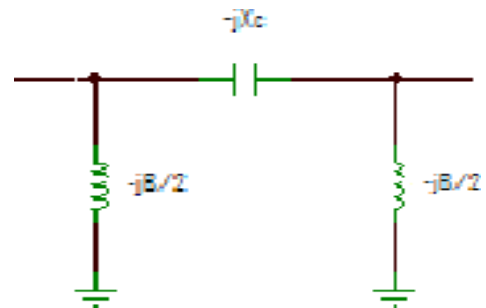


Schéma D

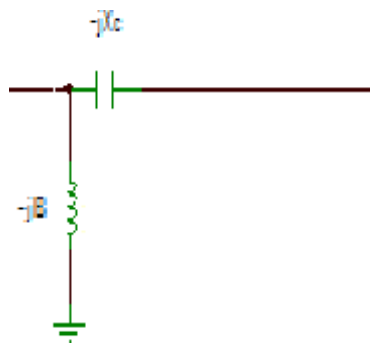


Schéma E

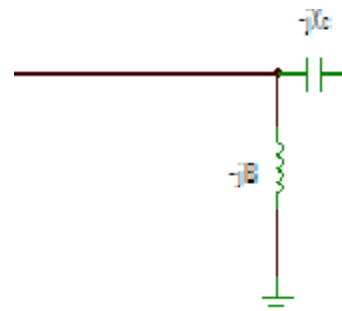


Schéma F

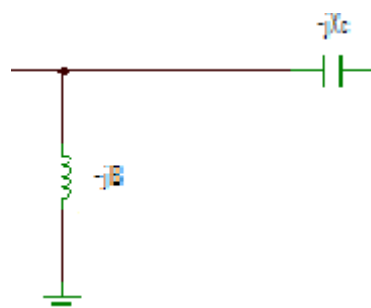


Schéma H

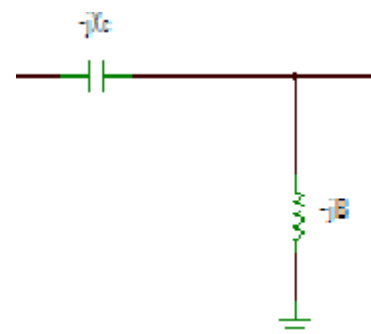


Schéma G

Fig. 3.4 : les différents schémas de compensation.

3-8 Le modèle de la ligne de transport :

Le modèle utilisé dans cette étude est un quadripôle, les grandeurs du courant et de la tension de source (V_s , I_s) en fonction des grandeurs de la réception (V_r , I_r) sont donner par la relation suivant [17][18].

$$V_s = AV_r + BI_r \quad (3.1)$$

$$I_s = CV_r + DI_r \quad (3.2)$$

Les constantes de la ligne de transport ABCD sont en générale complexes, on donne ces constantes pour une ligne non compensée.

$$\begin{aligned} A &= D \cosh \gamma l, & B &= Z_c \sinh \gamma l \\ C &= \sinh \gamma l / Z_c, & D &= \cosh \gamma l, \end{aligned} \quad (3.3)$$

D'où $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$ et $Z_c = \frac{\sqrt{Z}}{\sqrt{Y}}$

l : C'est la longueur de la ligne de transport.

Z et Y sont respectivement l'impédance et l'admittance de la ligne de transport.

La figure 3.5 : Représente un modèle d'une longue ligne de transport.

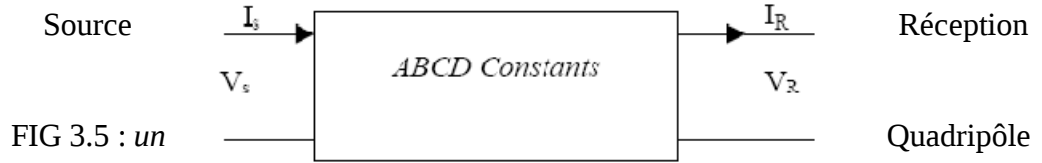


Fig. 3.5 : un quadripôle

On va définir les degrés de la compensation série et parallèle respectivement par les relationssuivantes :

$$K_s = \frac{X_c}{I_m(z)L} = \frac{\text{la réactance capacitive totale de la compensation serie}}{\text{la réactance totale de la ligne}} \quad (3.4)$$

$$K_d = \frac{B}{I_m(y)L} = \frac{\text{la susceptance inductive totale de la compensation shunt}}{\text{la susceptance totale de la ligne}} \quad (3.5)$$

3-9 Détermination du rendement maximal :

Le rendement d'une longue ligne de transport (η) est le rapport de la puissance de réception (P_r) à la puissance de source (P_s).

$$\eta = \frac{\text{Re}[V_r I_r^*]}{\text{Re}[V_s I_s^*]} \quad (3.6)$$

Par l'utilisation des expressions (1) et (2), on peut donner la relation de la puissance de source(P_s) suivante :

$$P_s = \text{Re}[(AV_r + BI_r)(CV_r + DI_r)^*]$$

$$= c_1 V_r^2 + c_2 V_r I_r + c_3 I_r^2 \quad (3.7)$$

On peut exprimer respectivement les expressions de c_1, c_2, c_3 par:

$$\begin{aligned} c_1 &= |A| \cdot |C| \cos(\alpha - \zeta) \\ c_2 &= |A| \cdot |D| \cos(\alpha - \phi - \theta) + |B| \cdot |C| \cos(\beta + \theta - \zeta) \\ c_3 &= |B| \cdot |D| \cos(\beta - \phi) \end{aligned} \quad (3.8)$$

D'où $\alpha, \beta, \zeta, \Phi$ sont les arguments de A, B, C et D respectivement, et θ c'est l'angle de flux de puissance de charge ou l'argument de (I_r) . (On concéder que V_r est la référence), donc la relation (6) devienne :

$$\eta = \frac{P_r}{P_s} = \frac{V_r I_r \cos \theta}{c_1 V_r^2 + c_2 V_r I_r + c_3 I_r^2} \quad (3.9)$$

Dans cette étude la valeur du rendement maximal est obtenue dans les deux cas [23] :

1. une ligne de transport fournit la puissance au flux de puissance de réception et de tension et de charge constantes. La tension d'envoi est ajustée avec la charge pour maintenir une tension de réception constante.
2. une ligne de transport fournit la puissance au flux de puissance d'envoi et de tension constantes. La tension de réception est déterminée par la charge.

3-10 Tension de réception et puissance de charge constante :

Les conditions du rendement maximal pour une tension et puissance de charge constante peuvent obtenir par la dérivée partielle de l'expression de (η) par rapport au courant I_r .

$$\frac{\partial \eta}{\partial I_r} = 0 \quad (3.10)$$

La solution de l'équation (10) donne :

$$I_r = V_r \sqrt{c_1 / c_3}$$

On peut exprimer l'impédance de la ligne de transport par la relation suivante :

$$Z_l = \left(\frac{V_r}{I_r} \right) = \sqrt{\frac{c_3}{c_1}} \quad (3.11)$$

La valeur correspondante du rendement maximal (η_{max}) est donnée par l'expression suivante :

$$\eta_{max} = \frac{\cos \theta}{c_2 + 2\sqrt{c_1 c_3}} \quad (3.12)$$

La relation (13) présente la valeur maximale de la puissance de réception

$$P_{rmax} = V_r^2 \sqrt{c_1/c_3} \cos \theta \quad (3.13)$$

La Tension de source constante : dans ce cas la tension de réception n'est pas constante mais elle est déterminée par le courant de réception .on peut écrire la relation de rendement (9) comme suivant :

$$\eta = \frac{P_r}{P_s} = \frac{\cos \theta}{c_1 x + c_2 + \frac{c_3}{x}} \quad (3.14)$$

D'où $x = \left(\frac{V_r}{I_r}\right)$

a. Modèle de schéma A :

Schéma A

Le schéma A représente une longue ligne de transport sans compensation qui est pour les constantes suivantes :

$$A_{eq} = D_{eq} = \cosh \gamma l,$$

$$B_{eq} = Z_c \sinh \gamma l$$

$$C_{eq} = \sinh \gamma l \cdot Z_c$$

b. Modèle de schéma B :

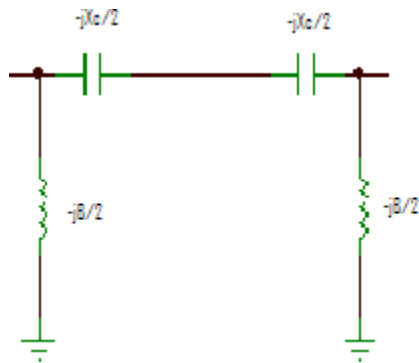


Schéma B

Le schéma B représente une longue ligne de transport avec transport avec des compensations série et shunt en tête et en bout de ligne, nous allons calculer les constante équivalents A_{eqb} , B_{eqb} , C_{eqb} , D_{eqb} , on considère les différents types de compensation avec la ligne sont en cascade. On fera le produit matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} A_{eqb} & B_{eqb} \\ C_{eqb} & D_{eqb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb/2 & 1 \end{bmatrix}$$

Après le produit matriciel on aura les constantes équivalentes suivantes :

$$A_{eqb} = A - j((X_c/2) C - Ab(X_c/4) + jbX_c^2/8 - jbB/2 - bD(X_c/4))$$

$$B_{eqb} = -j((X_c/2)A - X_c^2C/4 + B - J(X_c/2)D)$$

$$C_{eqb} = -jAb/2 - bC(X_c/4) + C - J(b/2)[-bA(X_c/4) + jbCX_c^2/8 - JC(X_c/2) - jbB/2 - bD(X_c/4) + D]$$

$$D_{eqb} = -bA(X_c/4) + jbCX_c^2/8 - jC(X_c/2) - jb(B/2) - bD(X_c/4) + D$$

c. Modèle Schéma C :

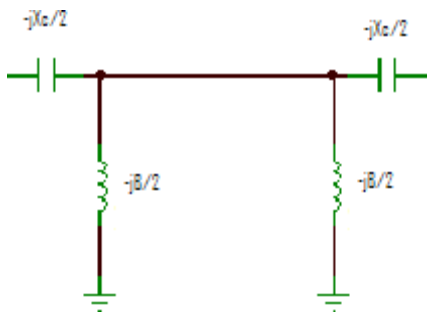


Schéma C

$$\begin{bmatrix} A_{eqc} & B_{eqc} \\ C_{eqc} & D_{eqc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le produit matriciel nous permet d'obtenir les constantes équivalentes suivantes :

$$A_{eqc} = A - bX_cA/4 - j(X_c/2)C - jbB/2 + jb^2X_cB/8 - bD(X_c/4)$$

$$B_{eqc} = -j(X_c/2)[A - bA(X_c/4) - jC(X_c/2) - jbB/2 + jb^2B(X_c/8) - bD(X_c/4)] + B - bB(X_c/4) - jD(X_c/2)$$

$$C_{eqc} = -jbA/2 + C - b^2B/4 - jbD/2$$

$$D_{eqc} = -j(X_c/2)[-jbA/2 + C - b^2B/4 - jbD/2] + D - jbB/2$$

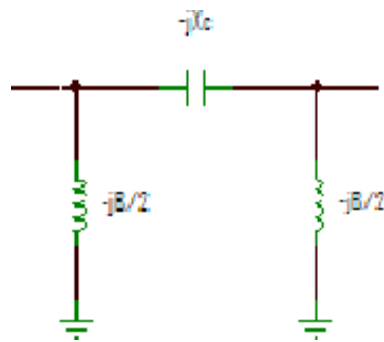
d. Modèle de schéma D :

Schéma D

$$\begin{vmatrix} Ae_{qd} & Be_{qd} \\ Ce_{qd} & De_{qd} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{jB}{2} & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -jXc \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{jB}{2} & 1 \end{vmatrix}$$

La matrice A,B,C,D pour un demi ligne.

$$Ae_{qd} = A^2 - jXcAC + BC - jB/2[AB - jXcAD + BD] \quad Be_{qd} = AB - jXcAD + BD$$

$$Ce_{qd} = -jBA^2/2 + CA - bXcAC/2 - jXcC^2 - JBCb/2 + DC - ABb^2/4 - jB/2CB + jXcADb^2/4 - bXcCD/2 - BDb^2/4 - JBD^2/2$$

$$De_{qd} = -jBAB/2 + CB - bXcAD/2 - jXcCD - jBBD/2 + D^2$$

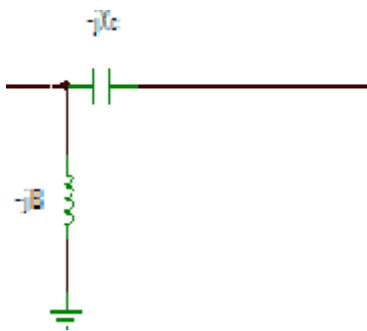
e. Modèle de schéma E :

Schéma E

$$\begin{vmatrix} Ae_{qe} & Be_{qe} \\ Ce_{qe} & De_{qe} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -jB & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -jXc \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}$$

$$Ae_{qe} = A - jXcC$$

$$Be_{qe} = B - jXcD$$

$$Ce_{qe} = -jBA - bXcC + C$$

$$De_{qe} = -JBb - bXcD + D$$

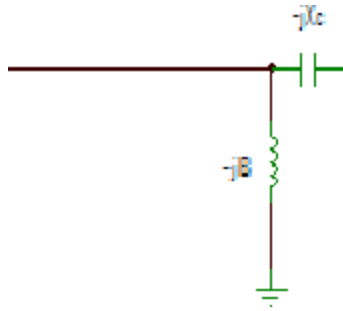
f. Modèle de schéma F :

Schéma F

$$\begin{vmatrix} A_{eqf} & B_{eqf} \\ C_{eqf} & D_{eqf} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -jB & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -jXc \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_{eqf} = A - jB$$

$$B_{eqf} = -jXcA - bXcB + B$$

$$C_{eqf} = C - jB$$

$$D_{eqf} = -jXcC - bXcD + D$$

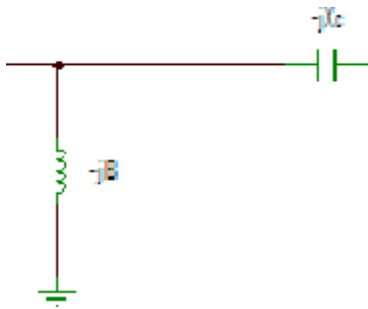
g. Modèle de schéma G :

Schéma G

$$\begin{vmatrix} A_{eqg} & B_{eqg} \\ C_{eqg} & D_{eqg} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -jB & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -jXc \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$A_{eqg} = A$$

$$B_{eqg} = -jXcA + B$$

$$C_{eqg} = -jB + C$$

$$D_{eqg} = -bXcA - jXcC - jB + D$$

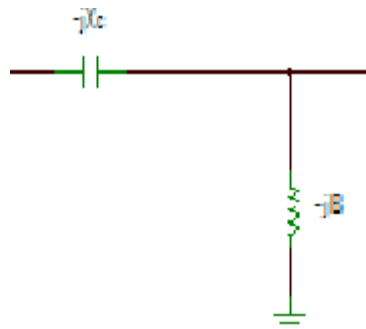
h. Modèle de schéma H :

Schéma H

$$\begin{bmatrix} A_{eqh} & B_{eqh} \\ C_{eqh} & D_{eqh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jb & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{eqh} = A - jX_c C - jb B - b X_c D$$

$$B_{eqh} = B - jX_c D$$

$$C_{eqh} = C - jb D$$

$$D_{eqh} = D$$

3-11 Programmation de la méthode sous environnement MATLAB :

Nous avons programmé cette méthode analytique pour déterminer le rendement maximal d'une longue ligne de transport sans compensation et avec différents types de compensation (série et shunt), ce programme nous a permis de faciliter les calculs qui sont de nature lourds d'une part et d'autre part de modifier les paramètres de calcul tel que la longueur de la ligne, le degré de compensation série, le degré de compensation shunt, le facteur de puissance.

3-12 Calcul du rendement maximal et le facteur de puissance correspondant :

$$l=300\text{km}, k_s=0.5, k_d=0.5$$

Tableau 3.1 rendement maximal et le facteur de puissance correspondant

Les schémas	rendement max(%)	L'angle de puissance
A	98.06	-57.40
B	98.65	-38.88
C	98.64	-39.60
D	98.61	-39.52
E	98.06	-57.40
F	98.94	-3.13
G	97.88	-60.54
H	98.94	0.303

3-13 Le rendement maximal en fonction de la longueur de la ligne ($K_s=K_d=0.5$) :

Nous avons fixé le degré de compensation série K_s et le degré de compensation shunt K_d pour une valeur de 0.5 et on a changé progressivement la longueur de la ligne de transport de 50 à 600 Km, on a obtenu pour un facteur de puissance =1 les résultats suivants :

Tableau 3.2 le rendement maximal en fonction de la longueur de la ligne.

L(km) type	50	100	200	300	400	500	600
A	99.94	99.76	99.08	98.06	96.84	95.56	94.33
B	99.96	99.84	99.38	98.65	97.71	96.63	95.47
C	99.96	99.84	99.38	98.64	97.67	96.54	95.29
D	99.96	99.84	99.34	98.61	97.58	96.34	94.95
E	99.94	99.76	99.08	98.06	96.84	95.56	94.33
F	99.97	99.88	99.52	98.94	98.17	97.22	96.14
G	99.94	99.76	99.04	97.88	96.32	94.44	92.32
H	99.97	99.88	99.52	98.94	98.17	97.22	96.13

3-14 Variation du degré de compensation série :

Maintenant on va fixer la longueur de la ligne pour une longueur $l=300\text{Km}$, et $K_d=0.5$, pour facteur de puissance =1, on change le degré de compensation série de 0 à 0.8 , donc on aura le tableau 3.3.

Tableau 3.3 le rendement maximal en fonction de degré de compensation série

Ks Type	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
A	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06
B	98.67	98.66	98.66	98.66	98.65	98.65	98.65	98.64	98.64
C	98.67	98.66	98.65	98.65	98.64	98.64	98.63	98.62	98.62
D	98.67	98.65	98.64	98.63	98.62	98.61	98.59	98.58	98.57
E	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06
F	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94
G	98.06	98.03	97.99	97.95	97.92	97.88	97.85	97.81	97.77
H	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94	98.94

3-15 Variation du degré de compensation shunt :

On a changé le degré de compensation shunt pour $l=300\text{Km}$, $K_s=0.5$, $fp=1$ et on a obtenu le tableau suivant :

Tableau 3.4 le rendement maximal en fonction du degré de compensation shunt

Kd Type	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1
A	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06
B	97.97	98.12	98.26	98.40	98.53	98.65	98.84	98.92	98.94
C	97.97	98.12	98.26	98.40	95.52	98.64	98.82	98.89	98.91
D	97.96	98.10	98.24	98.35	98.49	98.61	98.79	98.86	98.92
E	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06	98.06
F	97.88	98.20	98.48	98.71	98.87	98.84	98.80	98.63	98.23
G	97.88	97.88	97.88	97.88	97.88	97.88	97.88	97.88	97.88
H	98.06	98.32	98.56	98.76	98.90	98.94	98.75	98.55	98.05

3-16 Variation de facteur de puissance :

Maintenant On va varier le facteur de puissance pour une longueur $l=300\text{km}$, et degrés de compensation série et parallèle respectivement $K_s=K_d=0.5$.

Tableau 3.5 le rendement maximal en fonction de facteur de puissance.

l'angle ϕ type	-60	-30	0	30	60
A	98.94	98.70	98.06	96.86	93.62
B	98.77	98.93	98.65	97.97	95.96
C	98.78	98.92	98.64	97.94	95.89
D	98.75	98.90	98.61	97.90	95.81
E	98.94	98.70	98.06	96.86	93.62
F	98.01	98.81	98.94	98.75	97.82
G	98.94	98.61	97.88	96.54	92.96
H	97.91	98.78	98.94	98.79	97.93

3-17 Résultats et courbes :

La figure 3.6 représente le rendement maximal en fonction de la longueur de la ligne des différents schémas de compensation.

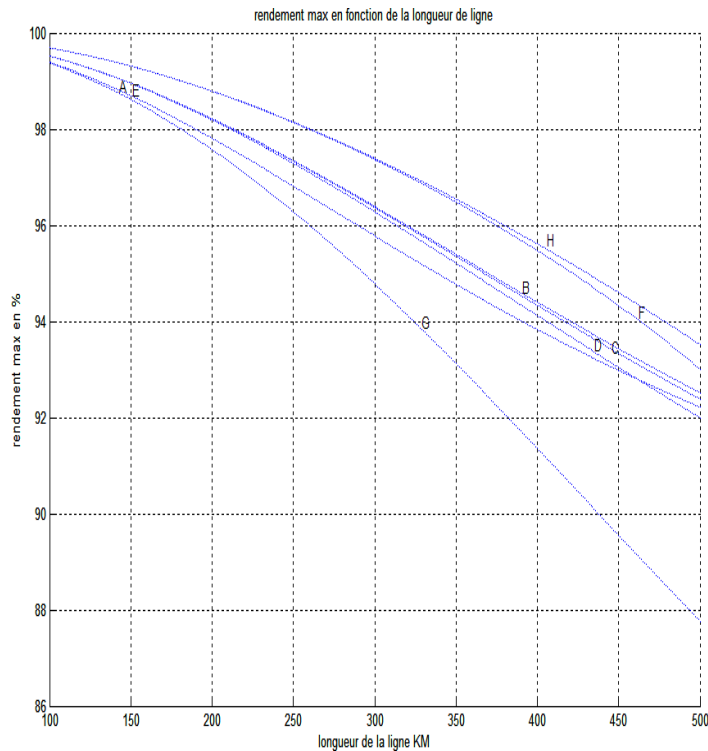


Fig. 3.6 le rendement maximal en fonction de la longueur de la ligne de transport

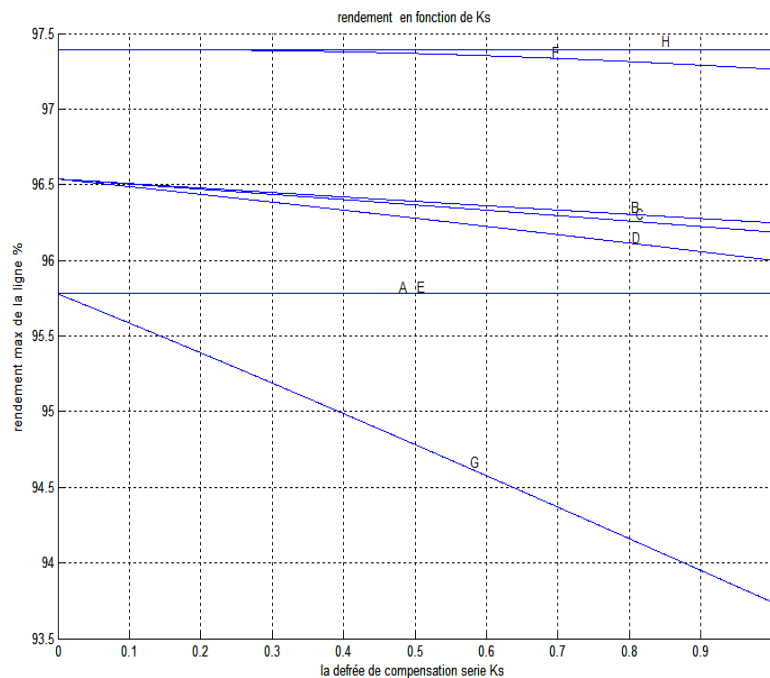


Fig. 3.7 le rendement maximal en fonction du degré de compensation série

Commentaire :

Les schémas de compensation F, H présentent un meilleur rendement suivis par les schémas B, C, D et finalement E et G.

La figure 3.8 représente le rendement de la ligne de transport en fonction de la puissance de charge pour une longueur de 300km et un degré de compensation série $K_s=0.5$ et schunt $K_d=0.5$ et un facteur de puissance =1.

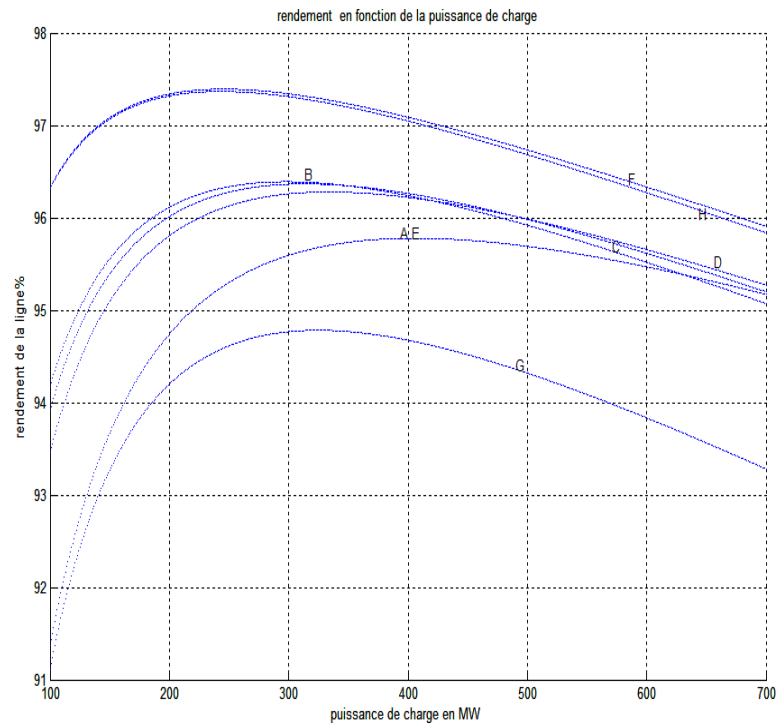


Fig. 3.8 rendement maximal en fonction de la puissance de réception P_r

La figure 3.9 représente le rendement maximal en fonction du degré de compensation shunt pour une longueur choisie de 300KM et $K_s=0.5$, et un facteur de puissance égal à l'unité.

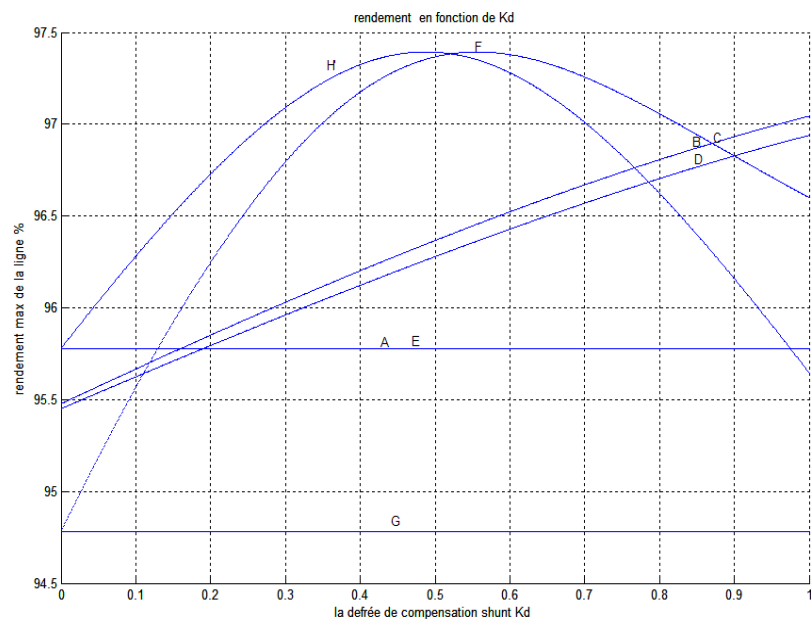


Fig. 3.9 rendement maximal en fonction du degré de compensation shunt

Remarque : toujours les schémas de compensation F, H présentent le meilleur rendement maximal par rapport aux autres schémas de compensation.

3-18 Conclusion :

Ce chapitre avait essentiellement pour but l'étude des différents schémas de compensation présentés dans plusieurs articles et l'influence de ces derniers sur le transfert de l'énergie entre deux points, donc sur le rendement de la ligne de transport de l'énergie électrique.

Les différents facteurs tel que la longueur de la ligne de transport, le degré de compensation série, le degré de compensation shunt sont investis, dans le prochain chapitre on va illustrer ce travail par une interface graphique en MATLAB afin de permettre aux techniciens et ingénieurs la facilité d'utilisation de cet outil graphique.

Le rendement de la ligne de transport diminuer quand la longueur de la ligne augmente et la même question si la puissance de charge augmente, mais en fonction de degré de compensation c'est une question de réglage, c'est-à-dire la valeur de K_s et K_d .

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution originale au problème de la compensation des longues lignes de transport d'énergie électrique EHT.

L'approche proposée s'est concentrée en particulier sur la programmation d'une méthode analytique de détermination du rendement d'une longue ligne de transport avec et sans compensation d'une part et l'étude de la stabilité transitoire d'autre part, pour découvrir les performances techniques de chaque type de compensation.

Ce travail a commencé par une modélisation de différents types de compensation basée sur un produit matriciel fait à la main.

Dans ce contexte, plusieurs types de compensation ont été présentés et modélisés afin de calculer les constantes équivalentes de chaque type et les utilisées dans un code de calcul sous environnement MATLAB.

D'après les calculs lourds effectués dans ce domaine le type H et F présentent un meilleur rendement et par conséquent un maximum de puissance transportée ainsi un temps critique large concernant l'étude de la stabilité transitoire, ce qui nous a permis de sélectionner deux types de compensation (H F), et les proposer aux exploitants de réseaux pour les utiliser.

L'importance de l'étude de la compatibilité électromagnétique a été apparue dans la simulation de différents types de court circuit en premier chapitre, une étude reste nécessaire dans l'exploitation de réseaux de transport EHT.

Une interface graphique sous environnement MATLAB est devenue un outil peut être utilisé pour consulter le rendement maximal de différents types de compensation de A à H, sa stabilité transitoire, simulation des différents types de courts circuits, calcul de pas optimal de faisceau de conducteur ...

Avant de terminer cette conclusion, il serait intéressant de signaler la possibilité de développer cette interface au futur.

Bibliothèque :

- [1] Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « La planification Des réseaux électriques » Editions EYROLLES 1984.
- [2] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques » Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [3] Hanene Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de batna 28/02/2006.
- [4] De Vre R, Jacquet B « Perturbations dans les installations électriques et électroniques Problèmes et solutions» Note d'information.
- [5] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet « Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) » Techniques de l'ingénieur D 4315.
- [6] Nelson David Epp « A Self-Tuning Filter for the Mitigation of Power System Harmonics » mémoire de master en science, université de Alberta, Edmonton 2000.
- [7] Derek A. Paice « Power Electronic Converter Harmonic » IEEE Press New York 1996.
- [8] T. Gönen « Electric Power System Engineering: Analysis and Design » John Wiley & Sons, Edition 1988.
- [9] Modeling, Design and Applications » Chap.1" The voltage control problem in power systems" Université degli Studi di Cassino Septembre 2006, Italie.
- [10] B.De Metz-Noblat, G .Jeanjean « Stabilité dynamiques des réseaux électriques industriels» Cahier Technique n° 185.
- [11] P. Kundur « Power System Stability and Control » IEEE Transactions on Power System 1994.
- [12] Richard Gagnon « Étude de la Ferrorésonance dans les réseaux compensées séries et shunt » thèse doctorat université de LAVAL, QUEBEC. Canada, Mai 1997.
- [13] Sami. Repo « On-line Voltage Stability Assessment of Power system – An approach of Back-box modelling » thèse de doctorat université de Tampere 2001.
- [14] CHOKRI Ben Salah Belhadj Ahmed « Contribution à l'analyse de la stabilité statique de la tension » thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de MONTRÉAL Juin 1996.

- [15] F. Cherif « Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique » thèse de doctorat, université de Batna, 27 Mai 2006.
- [16] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-lara, T.J.E. Miller « Power Electronic Control in Electrical Systems » Chap.3 "Transmission system compensation" edition 2002.
- [17] M.H.haque , department of electrical engineering king fahd university of petroleum and mineral dahrhan 31261 s arabia« transient stability of serie and shunt compensation schemesfor AC transmission systems» .
- [18] M.H.haque , department of electrical engineering king fahd university of petroleum and mineral dahrhan 31261 s Arabia «maximum efficiency of serie and shunt compensated AC transmission systems»
- [19] François Milssan machine électrique et réseaux électriques.
- [20] KIMBARK E. W., improvements of system stability by switched series capacitors. OnPower Amaratus and Sv stems, Vol. PAS-85, no 2, pp. 180-190, February 1966.
- [21] ANDERSON P.M, AGRAWAL B.K. AND VAN NESS J .E .a Subsynchro nous resonance in Power Sys tems ", p&Epress, New York 1990.
- [22] VALETTE A. et al. "Programme de stabilité: ST 600H, Manuel d'usager, IREQ, Janvier 1987
- [23] SERAFI E. S., SHALTOUT A. M. "Damping of SSR Oscillations by excitation Control aSummer Meeting, Vancouver 1979.
- [24] HINGORANI N. G . et Al .Prototype NGH Subsynchro nous Resonance Damping Scheme Part 1- Field Installation and Operating Experiencen -, Winter Meeting, New Orleans 1987,
- [25] HLNGORANI N. G. "A new Scheme for Subsynchro nous Resonance Damping of Tensional Oscillations and Transient Torque Part Ia JWR PES, Smer Meeting, Minneapolis 1980.
- [26] CD ROM Electric power.