

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'Electrotechnique

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par
Abderrahmane TOUATI
Yacine SLIMANI

Thème

ETUDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES PERTURBES DESEQUILIBRES ET COURTS-CIRCUITS

Mémoire soutenu publiquement le 28/09/2014 devant le jury composé de :

M Ahmed CHALLAL

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Président

M Karim HADJ SAID

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Rapporteur

M Slimane RABAHALLAH

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

M Hamza BESSAI

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous tenons à remercier, avant tout :

- *Allah, le tout puissant d'avoir guidé nos pas sur le droit chemin ; et de nous avoir inspiré volonté, courage et patience, afin de réaliser ce modeste travail.*
- *Ensuite tous ceux qui ont contribué et prêté assistance à l'achèvement de notre travail, trouve en ces quelques lignes l'expression de notre gratitude, et de notre reconnaissance.*
- *L'Encadreur de ce travail Mr HADJ SAID Karim.*
- *Que le président et les membres de jury trouvent ici l'expression de notre respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et juger notre travail.*
- *Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*
- *Tous ceux qui vont feuilleter, lire ce mémoire et prendront soin.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes chers parents pour leur soutien et leur encouragement durant tout mon cycle d'étude.*
- *Mon frère et mes deux sœurs.*
- *Toute la famille, homme et femme, garçon et fille, grand et petit.*
- *Toute la section ETH professionnelle.*
- *Mes chères amis Sans exception un par un qu'ils trouvent leur place dans mon cœur.*

SLIMANI YACINE

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma très chère mère et mon cher père : En leurs exprimant mon amour, mon respect et vive gratitude pour leurs patiences, leurs amour et leurs prières qui toujours m'encouragent à la réussite tout le long de mes études que dieu les protèges.

Mes frères Ma sœur: Je les souhaite la belle vie avec mes sincères gratitudes, je les remercie pour leurs sacrifices.

A toute ma famille et à tous mes chers amis qui m'ont toujours soutenue, tous ceux que j'aime et me sont très chers.

TOUATI ABDERRAHMANE

Sommaire

Liste des figures

Introduction générale.....1

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux électriques

1.1)	Introduction.....	4
1.2)	Description des systèmes électriques.....	5
1.2.1)	Le réseau de transport THT.....	6
1.2.2)	Le réseau de répartition HTB.....	7
1.2.3)	Le réseau de distribution HTA.....	7
1.2.4)	le réseau de livraison BT.....	8
1.3)	Constitution des réseaux électriques.....	8
1.3.1)	les centrales électriques.....	8
1.3.1.1)	Les centrales thermiques.....	8
1.3.1.2)	Les centrales nucléaires.....	9
1.3.1.3)	Les centrales hydroélectriques	10
1.3.1.4)	Les centrales solaires.....	11
1.3.1.5)	Les centrales éoliennes.....	12
1.3.2)	Le transformateur.....	14
1.3.3)	Les pylônes.....	14
1.3.4)	Les câbles conducteurs.....	15
1.3.5)	Les lignes souterraines.....	16
1.3.6)	Câbles de garde.....	16
1.3.7)	Les isolateurs.....	16
1.3.8)	Les Parafoudres.....	17
1.3.9)	Eclateurs à cornes.....	17
1.3.10)	Disjoncteurs.....	18
1.3.11)	Les fusibles.....	18
1.3.12)	Interrupteurs.....	19
1.3.13)	Centres de contrôles ou dispatching.....	19
1.3.14)	Catégories des charges.....	20
1.4)	Architecture des réseaux électriques.....	20
1.5)	Conclusion.....	24

Chapitre 2 : Les systèmes électriques triphasés en régime sinusoïdale

2.1) Système équilibrés.....	25
2.1.1) Généralités.....	25
2.1.2) Notes sur les sources d'alimentation.....	27
2.2) Notes sur les charges.....	28
2.2.1) Méthode de calcul.....	29
2.2.1.1) Cas où la structure de la charge est connue.....	29
2.2.1.2) Cas où on définit la charge par ses paramètres extérieurs.....	30
2.3) Puissance mises en jeu.....	30
2.3.1) Définition.....	30
2.3.2) Mesure des différentes puissances.....	30
2.3.2.1) Neutre accessible.....	31
2.3.2.2) Neutre non accessible.....	31
2.9) Conclusion.....	33

Chapitre 3 : Les systèmes électriques triphasés en régime perturbé

3.1) Introduction.....	34
3.2) Qualité de l'énergie électrique.....	34
3.2.1) Qualité de la tension.....	34
3.2.1.1) Amplitude.....	34
3.2.1.2) Fréquence.....	35
3.2.1.3) Forme d'onde.....	35
3.2.1.4) Symétrie.....	36
3.2.2) Qualité du courant.....	36
3.3) Classification des perturbations électriques.....	36
3.3.1) Creux de tension et coupure brève.....	39
3.3.2) Surtensions et surintensités.....	40
3.3.3) Variations de tension.....	41
3.3.4) Perturbations harmoniques.....	42
3.3.4.1) Harmoniques.....	43
3.3.4.2) Inter harmoniques.....	45
3.3.5) Les déséquilibres.....	45
3.3.5.1) Définition.....	45
3.3.5.2) Déséquilibre dû à la source.....	46
3.3.5.3) Déséquilibre dû à la charge.....	48

3.3.5.4)	Déséquilibre simultané.....	50
3.3.5.5)	Composantes symétriques.....	50
3.3.5.6)	La cause du déséquilibre.....	53
3.3.5.7)	Puissance mise en jeu.....	54
3.3.6)	Le court-circuit.....	57
3.3.6.1)	Définition.....	58
3.3.6.2)	Effets des courants de court-circuit.....	58
3.3.6.3)	Caractérisation des courts-circuits.....	59
3.4)	Etude d'un système triphasé équilibré.....	60
3.5)	Système triphasé déséquilibré au niveau de la charge.....	65
3.6)	Système triphasé déséquilibré par la source.....	68
3.7)	Etude de l'Influence de la puissance de court-circuit sur les chutes de Tension dans les lignes électriques.....	71
3.7.1)	Définition de la puissance de court-circuit.....	72
3.7.2)	Utilité du calcul de la puissance de court-circuit.....	73
3.7.3)	Evolution des puissances de court-circuit.....	73
3.7.3.1)	Exemples d'application.....	74
3.7.3.2)	Schéma équivalent.....	74
3.7.4)	Influence des puissances consommées sur les chutes de tension.....	78
3.8)	Conclusion.....	87

Chapitre 4 : Simulation des systèmes électriques triphasés en régimes perturbés

4.1)	Introduction.....	88
4.2)	Développement du modèle SIMULINK général du réseau électrique à L'état normal (équilibré).....	88
4.2.1)	Résultats de la simulation	90
4.2.2)	Interprétation des résultats.....	91
4.3)	Model virtuel dont les condensateurs sont en triangle.....	91
4.3.1)	Résultats de la simulation.....	92
4.3.2)	Interprétation des résultats.....	93
4.4)	Model virtuel dont les condensateurs sont en étoile.....	93
4.4.1)	Résultats de la simulation.....	94
4.4.2)	Interprétation des résultats.....	95
4.5)	Model d'un Système triphasé déséquilibré au niveau de la charge.....	95
4.5.1)	Résultats de la simulation.....	96

4.5.2)	Interprétation des résultats.....	97
4.6)	Model d'un Système triphasé déséquilibré par la source.....	97
4.6.1)	Résultats de la simulation.....	98
4.6.2)	Interprétation des résultats.....	99
4.7)	Model virtuel d'un système déséquilibré par la source contenant un filtre à Composante inverse.....	99
4.7.1)	Résultats de la simulation.....	100
4.7.2)	Interprétation des résultats.....	101
4.8)	Conclusion.....	101

Chapitre 5 : Moyens de protection contre les perturbations

5.1)	Introduction.....	102
5.2)	Définition.....	102
5.3)	Protection contre les surcharges.....	102
5.3.1)	Conséquences.....	103
5.3.2)	Moyens de protection.....	103
5.4)	Filtrage d'harmoniques.....	103
5.4.1)	Moyens de protection.....	104
5.4.1.1)	Le surdimensionnement du transformateur.....	104
5.4.1.2)	Le filtrage des harmoniques.....	104
5.4.1.3)	Critères et guide de choix de filtre.....	107
5.5)	Compensation et relèvement du $\cos \emptyset$	108
5.5.1)	Pourquoi compenser l'énergie réactive.....	108
5.5.2)	Bilan de puissances.....	109
5.6)	Régulation de la tension.....	110
5.6.1)	Les différents réglages de la tension.....	111
5.6.1.1)	Le réglage primaire de tension.....	111
5.6.1.2)	Le réglage secondaire de tension.....	111
5.6.1.2)	Le réglage tertiaire de tension.....	111
5.6.2)	Matériaux utilisés.....	112
5.6.2.1)	Bancs de condensateurs.....	112
5.6.2.2)	Transformateurs régulateurs en charge.....	112
5.7)	Conclusion.....	112

Conclusion générale.....	113
--------------------------	-----

Bibliographie

Liste des figures

Figure (1.1)	Le système électrique.....	4
Figure (1.2)	Schéma de principe d'un réseau d'énergie électrique.....	6
Figure (1.3)	Schéma de principe d'une centrale thermique a flamme.....	9
Figure (1.4)	Schéma de principe d'une centrale nucléaire.....	10
Figure (1.5)	Schéma de principe d'une centrale hydroélectrique.....	10
Figure (1.6)	Schéma de principe d'une centrale photovoltaïque.....	11
Figure (1.7)	Schéma de principe d'une centrale solaire thermodynamique...	12
Figure (1.8)	Schéma de principe d'une centrale éolienne.....	12
Figure (1.9)	Groupe turbo-alternateur.....	13
Figure (1.10)	Aspect des pylônes.....	15
Figure (1.11)	Photo d'un isolateur.....	17
Figure (1.12)	Photo d'un parafoudre.....	17
Figure (1.13)	Isolateur de ligne à courant alternatif muni d'un éclateur de protection.....	18
Figure (1.14)	centre de dispatching.....	20
Figure (2.1)	Représentation vectorielle d'un système triphasé équilibré direct.....	25
Figure (2.2)	Représentation vectorielle d'un système triphasé équilibré Inverse.....	26
Figure (2.3)	Source de tension triphasée montée en étoile.....	27
Figure (2.4)	Source de tension triphasée montée en triangle.....	27
Figure (2.5)	Couplage des charges.....	28
Figure (2.6)	Système électrique équilibré, source et charges.....	29
Figure (2.7)	Montage des wattmètres pour relèvement des puissances actives et réactives.....	31
Figure (2.8)	Montage de deux wattmètres pour relèvement des puissances actives et réactives.....	32
Figure (3.1)	Amplitude d'un creux de tension provoqué par :	

a) un court-circuit, b) le démarrage d'un moteur de forte puissance.....	40
Figure (3.2) Exemple de surtension.....	41
Figure (3.3) Exemple de variation de tension.....	42
Figure (3.4) Représentation temporelle d'une distorsion harmonique (harmonique de rang 5).....	43
Figure (3.5) Ensemble de source de tension et de charges impédentes.....	47
Figure (3.6) Déphasage des tensions de source.....	47
Figure (3.7) Exemple d'un réseau déséquilibré par la charge.....	48
Figure (3.8) Configuration de type étoile-étoile.....	50
Figure (3.9) Schémas de décomposition en composantes symétriques.....	52
Figure (3.10) Montage pour prélèvement des de puissance apparente complexe.....	55
Figure (3.11) Montage de 3 wattmètres pour mesurer les puissances actives.....	56
Figure (3.12) Montage de 3 wattmètres pour mesurer les puissances réactives.....	56
Figure (3.13) Caractérisation d'un courant de court-circuit.....	59
Figure (3.14) Courbe type d'un courant de court-circuit.....	59
Figure (3.15) Court-circuit triphasé (5% des cas).....	60
Figure (3.16) Court-circuit monophasé (80% des cas).....	60
Figure (3.17) Court-circuit biphasé isolé.....	60
Figure (3.18) Court-circuit biphasé terre.....	60
Figure (3.19) Schéma d'un système électrique équilibré.....	61
Figure (3.20) Montage avec condensateurs montées en triangle.....	62
Figure (3.21) Configuration des courants dans une phase.....	63
Figure (3.22) Montage avec condensateurs montées en étoile.....	64
Figure (3.23) Configuration des courants dans une phase.....	64
Figure (3.24) Système de charge déséquilibré.....	65
Figure (3.25) Représentation de la tension entre N et N'.....	66

Figure (3.26)	Représentations du lieu de N' dans le plan de Fresnel : cercle de centre D et de rayon $V/2$	67
Figure (3.27)	Erreur de câblage d'une source triphasée.....	68
Figure (3.28)	Schéma d'un réseau perturbé par la source.....	69
Figure (3.29)	Schéma avec filtre à composante inverse.....	70
Figure (3.30)	Schéma équivalent par phase.....	75
Figure (3.31)	Diagramme de Fresnel.....	75
Figure (3.32)	Diagramme de Fresnel avec f.e.m fixe.....	78
Figure (3.33)	Graphe de la tension en fonction de la puissance.....	80
Figure (3.34)	Variation des pertes Joules avec P, puissance transmise.....	82
Figure (3.35)	Détermination des pertes Joules dans le cas où la puissance réactive est nulle.....	83
Figure (3.36)	Loi de variation de Δ en fonction de E.....	84
Figure (3.37)	Loi de variation de $\cos \phi$ en fonction de Q.....	85
Figure (3.38)	Loi de variation de U en fonction de Q.....	86
Figure (4.1)	Model virtuel général du réseau électrique.....	89
Figure (4.2)	Model virtuel avec relèvement du facteur de puissance en triangle.....	91
Figure (4.3)	Model virtuel avec relèvement du facteur de puissance en étoile.....	93
Figure (4.4)	Model virtuel d'un système déséquilibré par la charge.....	95
Figure (4.5)	Model virtuel d'un système déséquilibré par la source.....	97
Figure (4.6)	Model virtuel d'un système déséquilibré par la source contenant un filtre à composante inverse.....	99
Figure (5.1)	Bilan de puissances.....	109

Liste des tableaux

Tableau (1.1)	Différents exemples d'architectures.....	22
Tableau (1.2)	Schémas d'architectures des réseaux.....	23
Tableau (3.1)	Vue d'ensemble des principales perturbations électriques.....	39

Avec les évolutions des systèmes électriques et les besoins en énergie électrique, les réseaux électriques sont exploités de plus en plus près de leurs limites de sécurité et de stabilité.

L'existence d'une multitude d'infrastructures constituant les systèmes n'empêche pas les différents phénomènes électriques et autres agressions de perturber leur fonctionnement normal.

Les réseaux électriques peuvent ainsi être sujets à diverses perturbations dont les conséquences sont souvent néfastes.

On peut classer ces perturbations en différentes catégories. Les principales sont :

- Les variations de la consommation qui peuvent être lentes ou rapides et qui se traduisent par une augmentation ou une baisse.
- Les perturbations climatiques suite à des phénomènes atmosphériques tels que les coups de foudre, les variations importantes de températures qui entraînent des pics anormaux de consommation d'énergie électrique, les tempêtes, les tornades, la neige, la glace et le givre, et si tous ces facteurs sont conjugués, ils causent des phénomènes d'oscillations des lignes, des ruptures de pylônes et des courts-circuits.
- Les défaillances des protections, d'automates et des régulations difficilement réparables puisqu'ils ne sont sollicités qu'en régimes d'incidents.
- Les défaillances humaines dans la maintenance et les circonstances d'exploitation comme fausses manœuvres dans la maintenance, le vieillissement de certains éléments du réseau conjugué à des lacunes dans l'entretien ainsi que les mauvaises prévisions des niveaux de consommation ou carrément de prévisions erronées.

Toutes ces perturbations peuvent engendrer :

- Des pertes d'éléments du réseau, ligne ou groupe de production.
- Des grandes oscillations interrégionales ou interzonales qui causent des pertes de synchronisme définitif dans un réseau interconnecté.

- Des courts-circuits menant à un fonctionnement anormal du système et de ces équipements.
- Des déséquilibres entre les couples électriques et mécaniques de la turbine qui se traduisent par la rupture de l'équilibre entre la production et la consommation.
- Des chutes de tension sur le réseau causées généralement par l'appel de charge.
- Des surtensions dont les valeurs de crête sortent de certaines limites d'exploitations prédéfinies.
- Des creux de tension dus principalement à des phénomènes menant à l'apparition de courants élevés dans un réseau.

Notre travail consiste à étudier les déséquilibres qui peuvent survenir dans un réseau et qui sont causés par les éléments propres au réseau.

Ces déséquilibres peuvent avoir pour origine les charges, les sources ou un court-circuit entre deux points aux potentiels différents.

Nous avons entamé notre étude par des généralités sur les réseaux électriques, suivie par la présentation des systèmes triphasés symétriques et équilibrés, ensuite les systèmes électriques triphasés en régimes perturbés.

Un exemple de calcul des systèmes perturbés dans le chapitre 3 et simulé par le logiciel MATLAB/Simulink dans le chapitre 4.

Une étude suivante sur les protections des réseaux contre les perturbations a fait l'objet du chapitre 5.

Nous avons achevé notre travail par une conclusion générale en mettant en évidence la diversité des perturbations auxquelles est exposé un réseau électrique, d'où l'intérêt de nombreuses études qui s'imposent pour palier aux défauts, et autres perturbations qui portent atteinte au bon fonctionnement des réseaux électriques.

1.1) Introduction :

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus largement répandue car elle est facilement transportable à un rendement élevé et un coût raisonnable. A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires, vers l'aval représenté par les consommateurs (charges) (*figure 1.1*). Le système électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de lignes, des postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique, ainsi que des contrôles hiérarchisés assurant la tenue en tension et en fréquence ; ceux-ci, couplés aux divers automates, ont la charge de garantir la continuité de service du système.

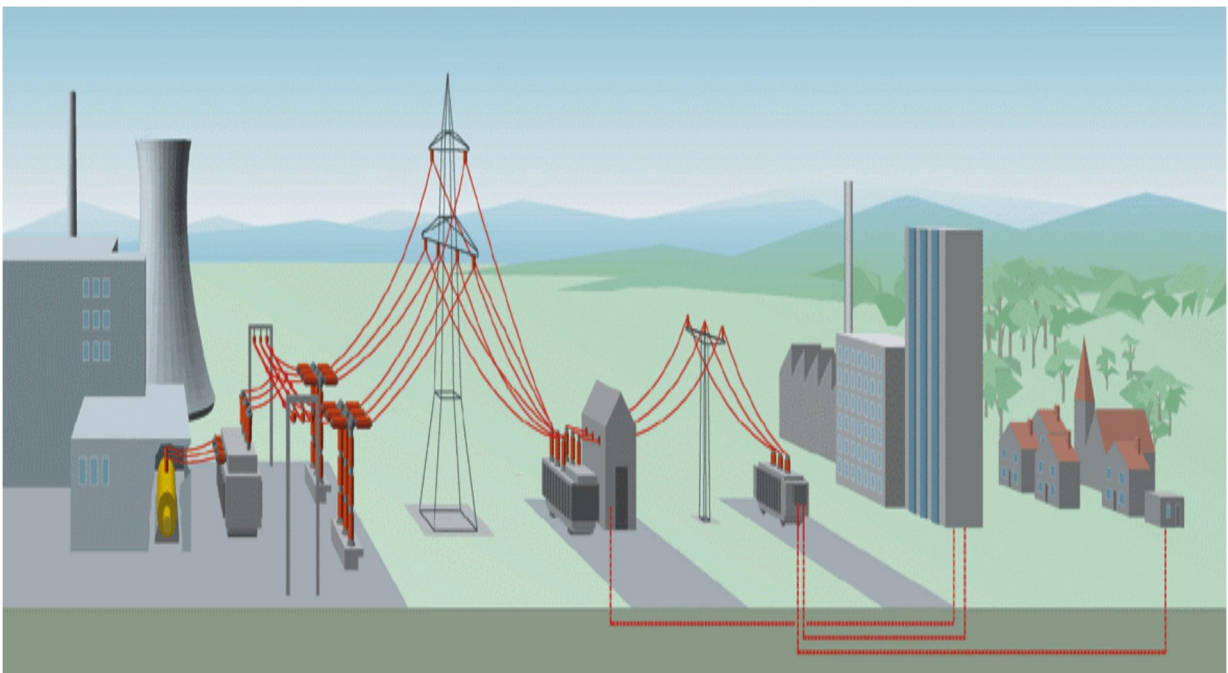


Figure (1.1) : Le système électrique.

Le réseau électrique est exploité de manière à assurer trois principaux objectifs :

- La distribution d'électricité doit pouvoir être garantie et ce malgré les aléas du réseau. En effet, celle-ci est un enjeu à la fois financier et de sécurité pour les biens matériels et des personnes. Ainsi l'opérateur du réseau doit être capable de faire face à ces aléas et d'éviter les dégâts potentiels ainsi que leurs propagations. Cet enjeu de sûreté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est un des premiers objectifs.
- L'onde de tension fait l'objet d'engagement contractuel que l'opérateur doit tenir en respectant une règle d'égalité c'est-à-dire une impartialité entre clients en conservant une continuité de service maximale.
- Le dernier objectif d'exploitation est un objectif économique, l'exploitation doit être menée de manière optimale dans le but de réduire les pertes ainsi que les coûts de maintenance et d'investissement. D'autre part l'exploitation doit favoriser l'ouverture du marché de l'électricité.

1.2) Description des systèmes électriques :

Un réseau d'énergie électrique est aujourd'hui un ensemble de circuits complexes interconnectés comme le montre le schéma de principe de la (*Figure 1.2*).

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en quatre principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition, de distribution et de livraison. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs. [1]

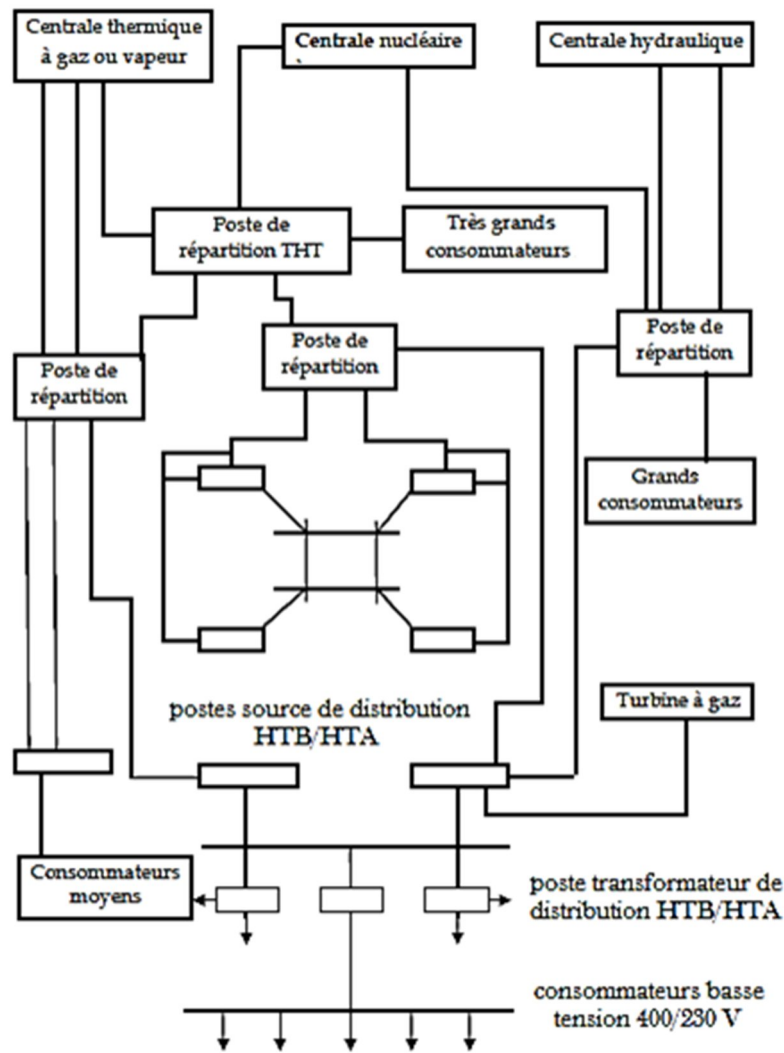


Figure (1.2) : Schéma de principe d'un réseau d'énergie électrique.

1.2.1) Le réseau de transport THT :

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances (> 300 MW).

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs).

Ces réseaux sont pour la plupart aériens et souterrains dans les villes ou à leurs approches. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant en général à la limite thermique de la ligne. Une attention particulière doit être portée à l'effet couronne qui peut donner lieu en THT, à des pertes très significatives suivant le

climat et l'altitude. Les pylônes de lignes sont équipés en général de deux ternes (2 fois 3 phases) voir quatre et même six ternes. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence.

1.2.2) Le réseau de répartition HTB :

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution HTA.
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HTB. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire,...

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux.

1.2.3) Le réseau de distribution HTA :

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport.

Des lignes de distribution à moyenne tension (HTA) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements.

1.2.4) Le réseau de livraison BT :

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230V (380/220 en Algérie). Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs).

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HTA aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement. Le réseau BT permet de distribuer au consommateur ; le 230 V (1 phase + neutre) - 2 fils, ou le 400 V (3 phases + neutre) - 4 fils.

1.3) Constitution des réseaux électriques :

Le réseau électrique est constitué non seulement de matériel de puissance, mais aussi de nombreuses fonctions périphériques telles que les systèmes de protection.

[1]

1.3.1) les centrales électriques :

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

1.3.1.1) Les centrales thermiques :

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel.

On la trouve souvent près d'une rivière ou d'un lac, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui

entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière (*Figure 1.3*).

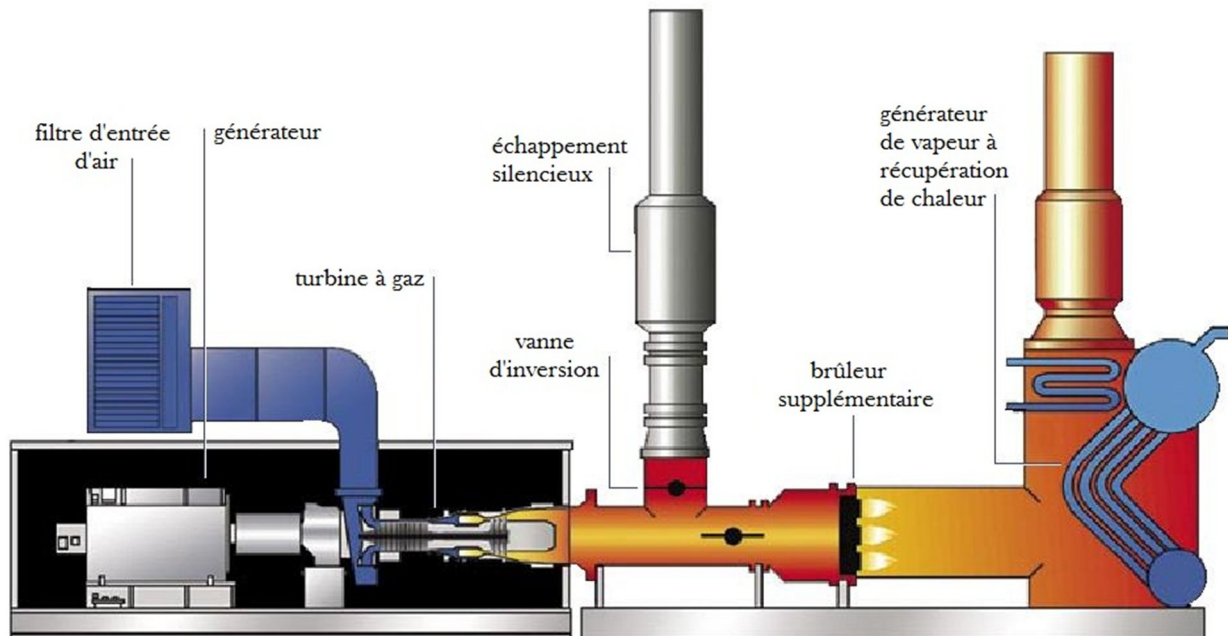


Figure (1.3) : Schéma de principe d'une centrale thermique à flamme.

1.3.1.2) Les centrales nucléaires :

Ces centrales utilisent également des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire.

L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Elles produisent environ 15% de l'électricité mondiale. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accidents. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission (*figure 1.4*).

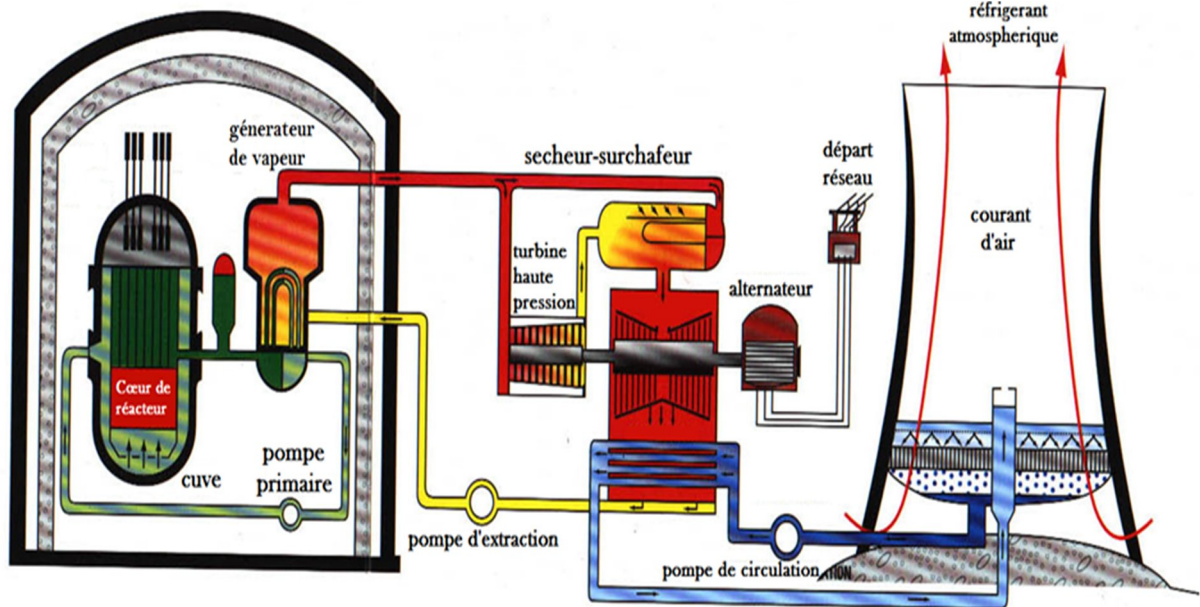


Figure (1.4) : Schéma de principe d'une centrale nucléaire.

1.3.1.3) Les centrales hydroélectriques :

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique.

Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (figure 1.5).

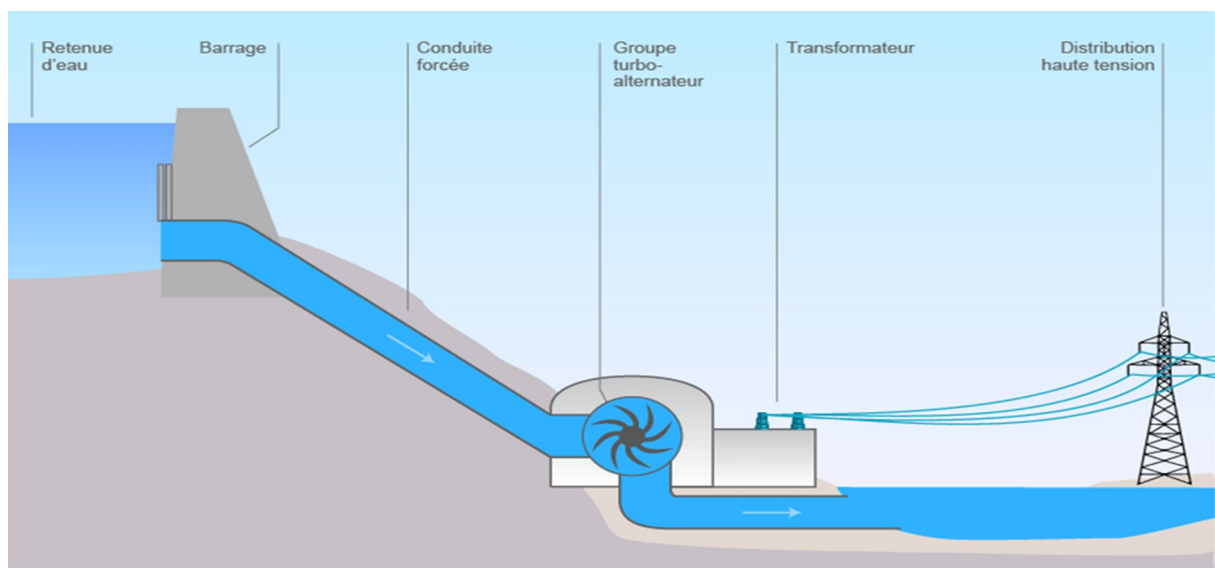


Figure (1.5) : Schéma de principe d'une centrale hydroélectrique.

1.3.1.4) Les centrales solaires:

- **Les centrales photovoltaïques :**

Cet autre moyen de fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire utilise les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux (*figure 1.6*).

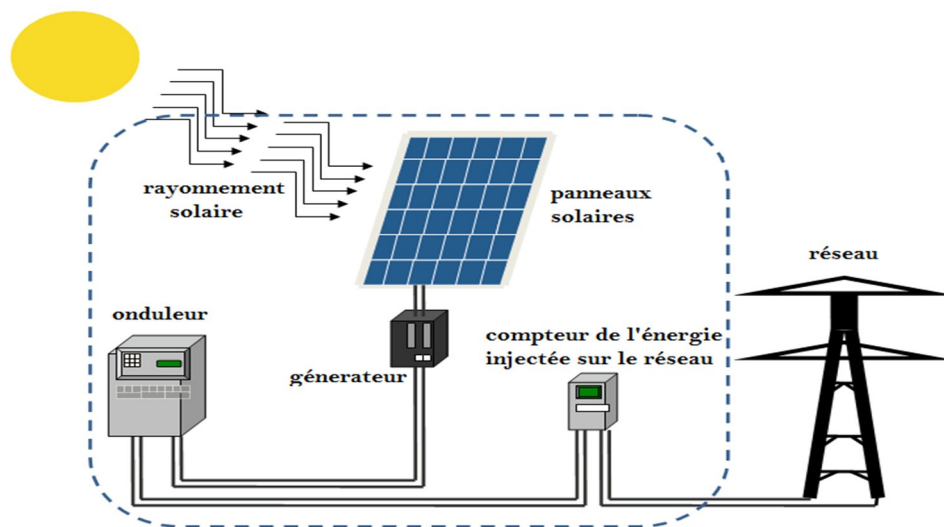


Figure (1.6) : Schéma de principe d'une centrale photovoltaïque.

- **Les centrales solaires thermodynamiques :**

Également appelé solaire à concentration ou CSP (concentrated solar power), cette technologie permet de convertir le rayonnement solaire direct en électricité via des processus thermodynamiques à l'aide des réflecteurs ou concentrateurs, le miroir est le système qui permet de collecter et de concentrer le rayonnement solaire. Ce dernier qui permet d'échauffer un fluide qui permet d'actionner et d'entraîner les turbines (*figure 1.7*).

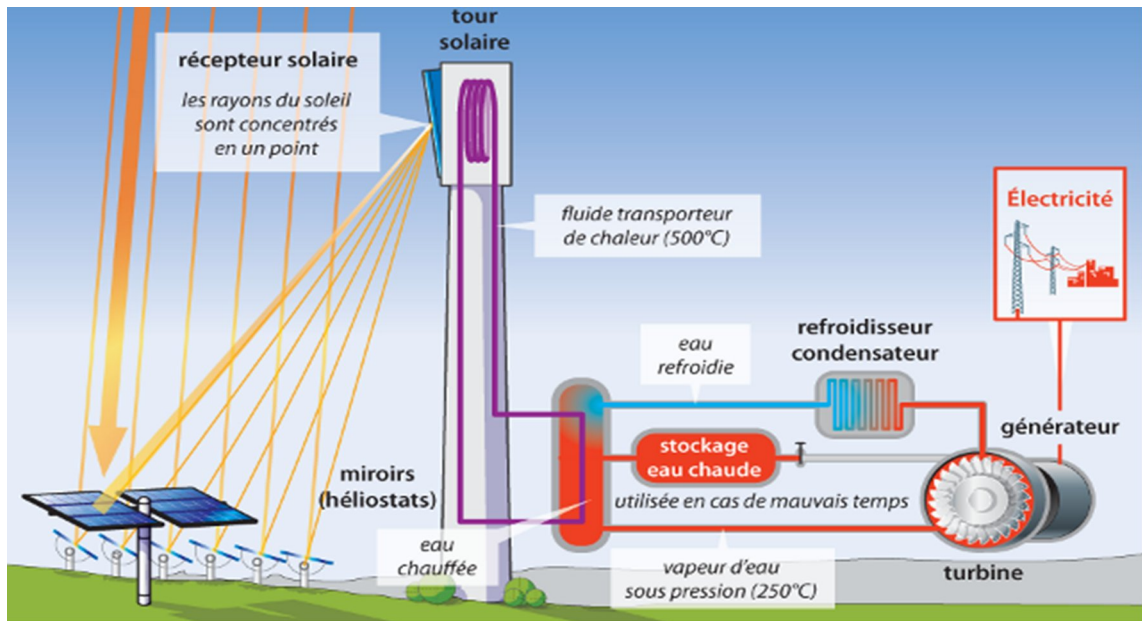


Figure (1.7) : Schéma de principe d'une centrale solaire thermodynamique.

1.3.1.5) Les centrales éoliennes :

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple: le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne. Elles sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées (figure 1.8).

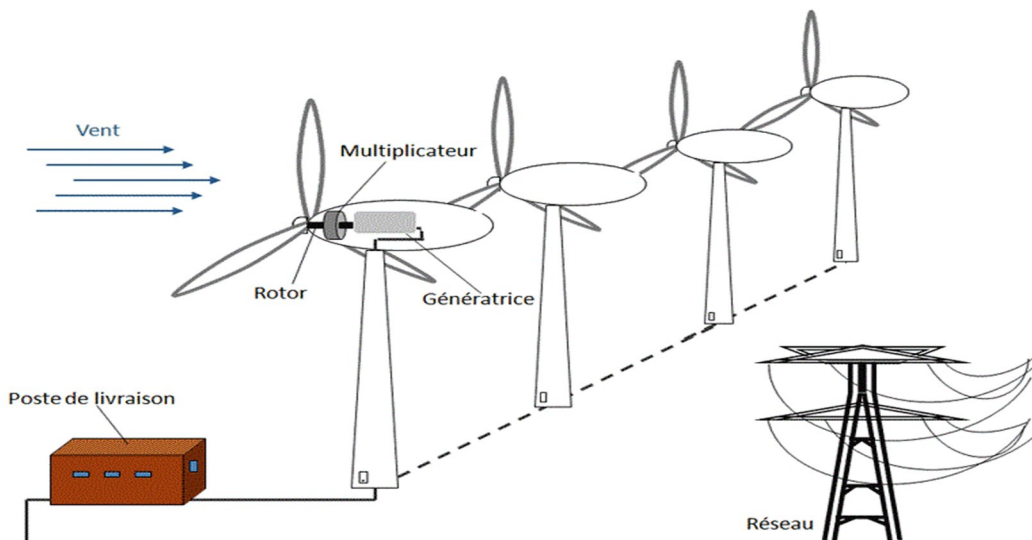


Figure (1.8) : Schéma de principe d'une centrale éolienne

Nota : Les centrales sont équipées de turbines qui transforment l'énergie d'un fluide en une rotation mécanique de façon à actionner des alternateurs. Le fluide exploité peut être liquide, comme l'eau d'une rivière, ou gazeux (*figure 1.9*).



Figure (1.9) : Groupe turbo-alternateur.

- **La turbine :**

Elle est composée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Le rotor de la turbine possède une ou plusieurs "roues", Ces roues portent des "ailettes" qui vont être traversées par le fluide. En traversant les ailettes le fluide va les pousser et leur imprimer un mouvement de rotation et le rotor aura récupéré l'énergie mécanique nécessaire à faire tourner l'alternateur auquel il est couplé.

- **L'alternateur :**

En ce qui concerne l'alternateur il faut savoir que l'on peut générer un courant par la variation d'un champ magnétique à l'intérieur d'un matériau conducteur et inversement (le passage d'un courant dans un conducteur engendre un champ magnétique).

Dans un alternateur le courant électrique sera généré dans le stator (partie fixe), le champ magnétique sera généré par le rotor (partie mobile), les variations du champ magnétique par la rotation du rotor. Le rotor peut être un simple aimant, mais dans le cas de l'alternateur, il est composé de bobines traversées par un courant électrique continu. Ce courant est généré par l'excitatrice. Selon l'intensité du courant électrique générée par l'excitatrice on pourra faire varier les caractéristiques du courant produit par l'alternateur (puissance réactive, tension).

1.3.2) Le transformateur :

Le second composant essentiel des réseaux électriques est le transformateur.

Il permet le transfert de puissance avec un rendement élevé d'un niveau de tension vers un autre. La puissance transmise au secondaire est à peu près celle du primaire et en conséquence le produit VI au secondaire est approximativement égal à celui du primaire. Ainsi, dans un transformateur élévateur, toute élévation de tension au secondaire, s'accompagne d'une diminution dans le même rapport, du courant du secondaire, ce qui entraîne la diminution des pertes dans les lignes et rend possible l'acheminement de l'énergie électrique sur de longues distances. [1]

Des contraintes d'isolation, ainsi que d'autres liées à des problèmes techniques de conception ne permettent pas pour l'heure de générer au niveau des alternateurs, des tensions supérieures à 30 kV. Ainsi, un transformateur élévateur est nécessaire pour pouvoir transporter l'énergie électrique. Aux extrémités réceptrices des lignes, un transformateur abaisseur est utilisé pour ramener la tension à un niveau acceptable pour la distribution et l'utilisation.

1.3.3) Les pylônes :

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques

liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs (*figure 1.10*).

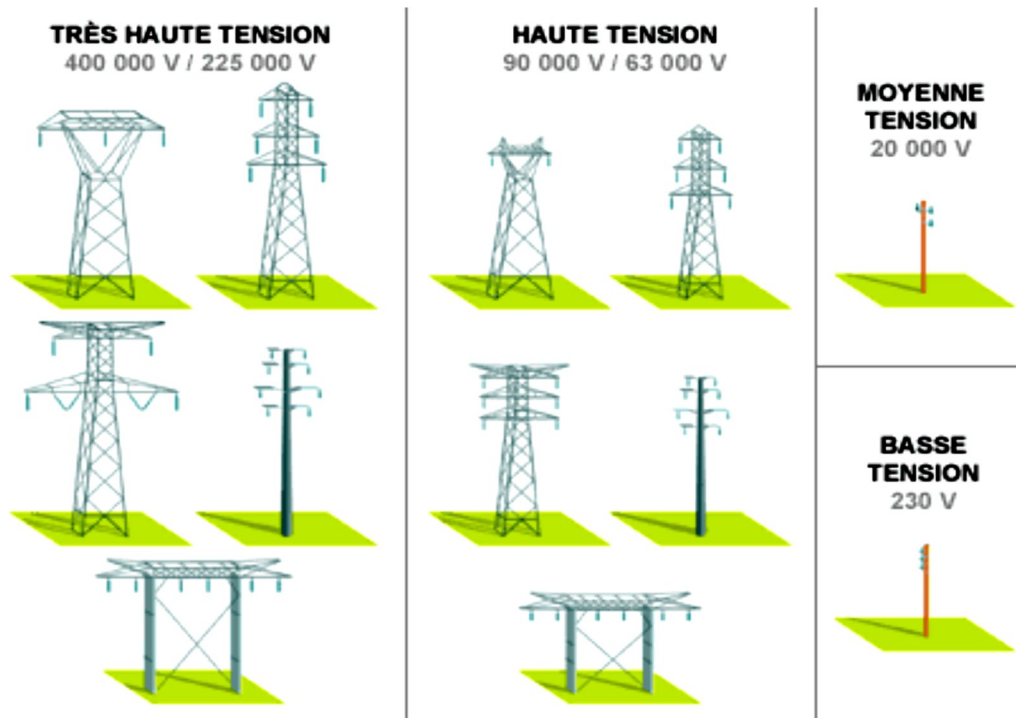


Figure (1.10) : Aspect des pylônes.

1.3.4) Les câbles conducteurs :

Pour transporter le courant, on utilise des câbles conducteurs qui sont portés par les pylônes. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois câbles (ou faisceaux de câbles) conducteurs par circuit. Les lignes sont soit simples (un circuit), soit doubles (deux circuits par file de pylônes).

Chacune des phases peut utiliser 1, 2, 3 ou 4 câbles conducteurs, appelés « faisceaux ». Les câbles conducteurs sont « nus » c'est-à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension.

1.3.5) Les lignes souterraines :

Alors que les conducteurs électriques sont « nus » en aérien, ils ont besoin d'un isolant spécifique en souterrain.

Il s'agit de matériaux synthétiques (polyéthylène ou polyéthylène réticulé) dont l'épaisseur augmente avec la tension. Les câbles à isolant synthétique constituent la technologie la plus couramment utilisée aujourd'hui. Ces câbles présentent des variations au niveau de leurs écrans (Plomb ou Aluminium), du diamètre et de la composition (Cuivre ou Aluminium) de leur âme. Cela conditionne leur poids et leur capacité à supporter des intensités plus ou moins élevées. En 400 000 Volts, la technique souterraine est difficile à mettre en œuvre (emprise au sol, refroidissement du câble) et elle est mal adaptée aux contraintes d'exploitation du réseau interconnecté. Enfin, son coût, très élevé, reste un écueil majeur.

1.3.6) Câbles de garde :

Les câbles de garde ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant.

1.3.7) Les isolateurs :

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs (chaînes d'isolateurs). Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette.

On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important.



Figure (1.11) : Photo d'un isolateur.

1.3.8) Les Parafoudres :

Les parafoudres sont des appareils destinés à limiter les surtensions imposées aux transformateurs, instruments et machines électriques par la foudre et par les manœuvres de commutation. La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des fils de la ligne à protéger et la partie inférieure est connectée au sol par une mise à la terre de faible résistance, généralement de moins d'un ohm.



Figure (1.12) : Photo d'un parafoudre.

1.3.9) Eclateurs à cornes :

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre. A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protège ainsi le matériel.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur.

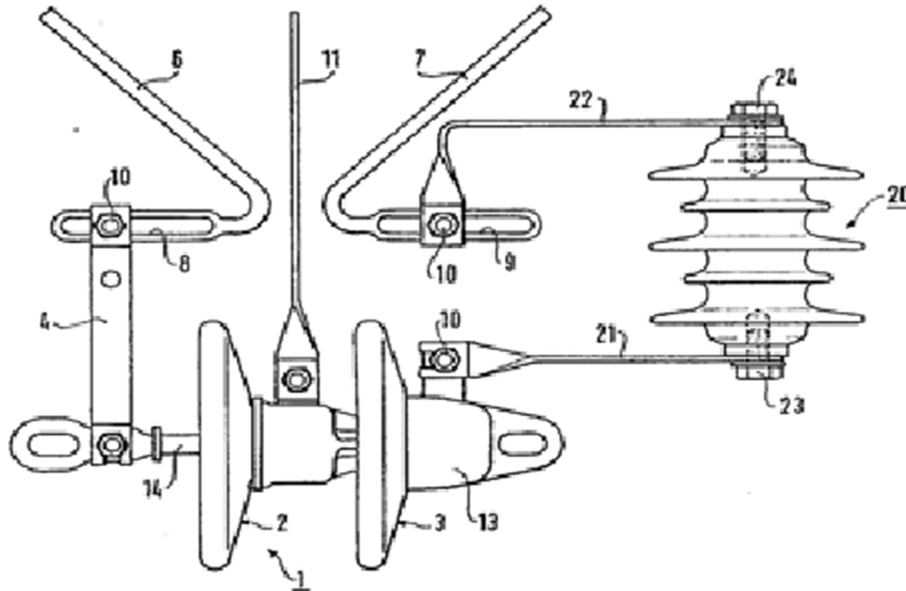


Figure (1.13) : Isolateur de ligne à courant alternatif muni d'un éclateur de protection.

1.3.10) Disjoncteurs :

Un disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants, sous sa tension assignée (tension maximale du réseau), dans les conditions normales de service et dans les conditions anormales spécifiées (court-circuit).

C'est l'appareil de protection par excellence, capable d'une totale capacité d'intervention sans provoquer de surtension excessive sur le réseau.

1.3.11) Les fusibles :

Il est utilisé soit directement comme un dispositif de coupure soit indirectement, connecté au circuit secondaire d'un transformateur de courant, avec un contact de fusion donnant un ordre de déclenchement au disjoncteur.

L'inconvénient majeur de ces dispositifs réside dans le fait qu'ils sont endommagés par les défauts et qu'ils ont une faible sensibilité. L'exploitant doit disposer d'un

grand nombre de fusibles de rechange pour les différents calibres. La grande variété de réseaux électriques impose des modèles de fusibles de différentes natures selon l'application.

Il s'agit :

- Des fusibles de type intérieur installés dans des tableaux HT en amont des transformateurs.
- Des fusibles de type extérieur servant de protection aux transformateurs aériens.
- Des fusibles immergés dans la cuve du transformateur.

1.3.12) Interrupteurs :

Pour isoler un élément de réseau MT, on dispose d'interrupteurs à commande mécanique(IACM) ; ils sont de deux types :

- Type I : Intensité nominale 200 (A), de pouvoir de coupure 31,5 ou 50 (A) de charge principalement active, et 200 (A) de charge de boucle, et de pouvoir de fermeture 10 (kA)efficace sous 24 (kV).
- Type II : Intensité nominale 400(A), de pouvoir de coupure 100 (A) de charge principalement active, et 400 (A) de charge de boucle, et de pouvoir de fermeture 10 (kA)efficace sous 24 (kV). Cet appareil peut être transformé en appareil télécommandé (IAT) ou en interrupteur automatique à ouverture dans le creux de tension (IACT). Les appareils de coupure type (IACM) sont de conception simple et robuste. Leur montage se fait en horizontal sur poteaux : Béton, Métallique ou Bois. [1]

1.3.13) Centres de contrôles ou Dispatching :

Pour un fonctionnement fiable et économique d'un réseau d'énergie électrique, il est indispensable de surveiller, contrôler le réseau, dans sa globalité à partir d'un centre de contrôle ou centre de conduite ou encore dispatching (*Figures 1.14*).



Figure (1.14) : centre de Dispatching.

1.3.14) Catégories des charges :

Selon la nature des récepteurs on peut classifier les charges en trois grandes catégories :

- **La première catégorie :**

Dans cette classe les récepteurs ne permettent que moins de deux secondes d'arrêt d'alimentation comme les hôpitaux et les zones militaires.

- **La deuxième catégorie :**

Pour cette classe, les récepteurs acceptent un arrêt de moins de deux heures, comme les usines.

- **La troisième catégorie :**

Dans cette dernière catégorie, l'arrêt peut être de plus de 24 heures. Comme l'éclairage public et les domiciles.

1.4) Architecture des réseaux électriques :

L'ensemble des constituants d'un réseau électrique peut être agencé selon différentes structures, dont la complexité détermine la disponibilité de l'énergie électrique et le coût d'investissement.

Le choix de l'architecture sera donc fait pour chaque application sur le critère de l'optimum technico-économique. On distingue essentiellement les types suivants :

- **Les réseaux à architecture radiale :**
 - en simple antenne.
 - en double antenne.
 - en double dérivation.
 - en double alimentation avec double jeu de barres.

- **les réseaux bouclés :**
 - en boucle ouverte.
 - en boucle fermée.

- **les réseaux incluant une production interne d'énergie :**
 - avec groupes de production locale.
 - avec groupes de remplacement.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques principales de ces structures et leur comparaison.

Différents exemples d'architectures sont illustrés page suivante.

Architecture	Utilisation	Avantages	Inconvénients
Radiale			
Simple antenne	Processus non exigeants en continuité d'alimentation Ex. : cimenterie	Structure la plus simple Facile à protéger Coût minimal	Faible disponibilité d'alimentation Temps de coupure sur défaut éventuellement long Un seul défaut entraîne la coupure de l'alimentation d'antenne
Double antenne	Process continu : sidérurgie, pétrochimie	Bonne continuité d'alimentation Maintenance possible du jeu de barres du tableau principal	Solution coûteuse Fonctionnement partiel du jeu de barres en cas de maintenance
Double dérivation	Réseaux étendus Extensions futures limitées	Bonne continuité d'alimentation Simplicité des protections	Nécessité de fonctions d'automatisme
Double jeu de barres	Processus à grande continuité de service Processus avec forte variation des charges	Bonne continuité d'alimentation Souplesse d'utilisation : transferts sans coupure Souplesse de maintenance	Solution coûteuse Nécessité de fonctions d'automatisme
En boucle			
Boucle ouverte	Réseaux très étendus Extensions futures importantes Charges concentrées sur différentes zones d'un site	Moins coûteux que la boucle fermée Simplicité des protections	Coupure d'alimentation d'un tronçon sur défaut pendant reconfiguration de boucle Nécessité de fonctions d'automatisme

Boucle fermée	Réseaux à grande continuité de service Réseaux très étendus Charges concentrées sur différentes zones d'un site	Bonne continuité d'alimentation Pas de nécessité de fonctions d'automatisme	Solution coûteuse Complexité du système de protection
Production interne d'énergie			
Production locale	Sites industriels à processus auto producteur d'énergie Ex. : papeterie, sidérurgie	Bonne continuité d'alimentation Coût de l'énergie (énergie fatale)	Solution coûteuse
Remplacement (normal/secours)	Sites industriels et tertiaires Ex. : hôpitaux	Bonne continuité d'alimentation des départs prioritaires	Nécessité de fonctions d'automatisme

Tableau (1.1) : Différents exemples d'architectures.

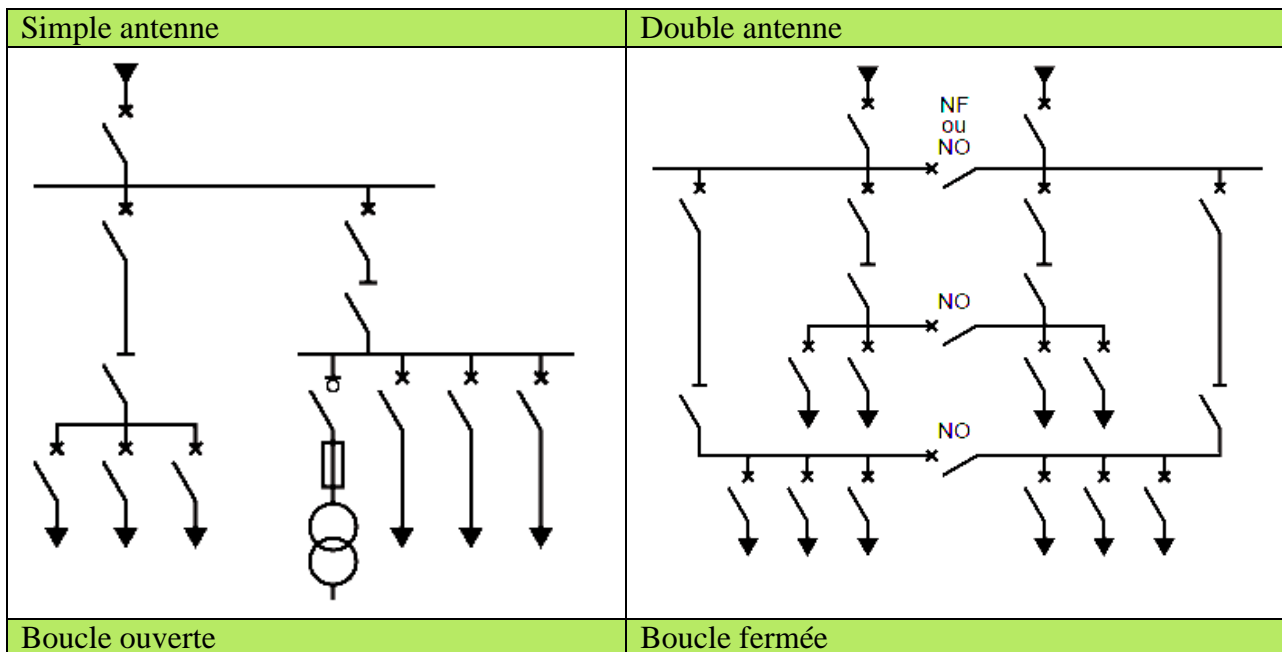
➤ Exemples d'architectures :

Légende :

NF : normalement fermé

NO : normalement ouvert

Tous les appareils de coupure sans légende sont normalement fermés



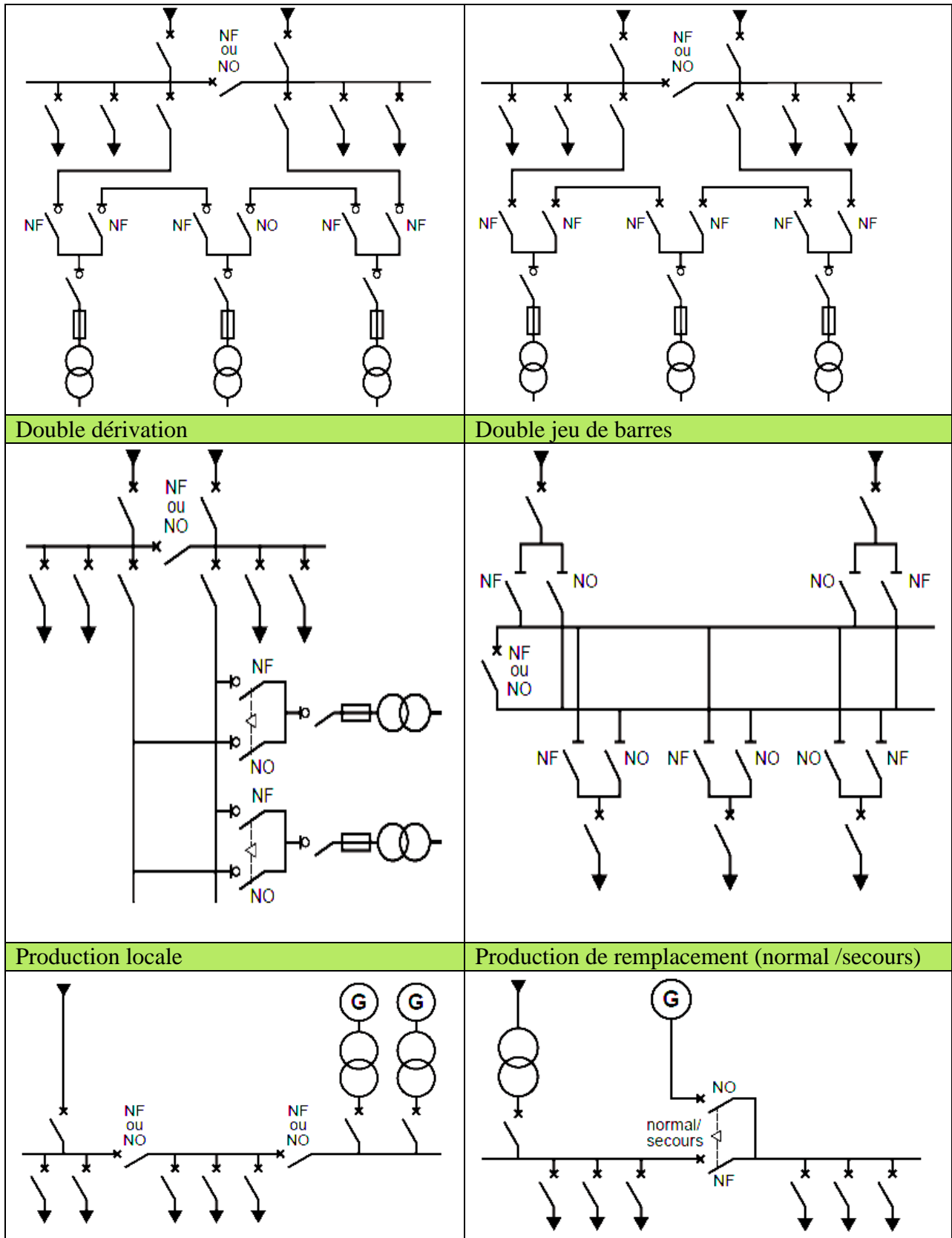


Tableau (1.2) : Schémas d'architectures des réseaux.

1.5) conclusion:

On a présenté dans ce chapitre une étude générale du réseau électrique, avec ses différents composants nécessaires à la production, au transport, à la distribution et à la livraison de l'énergie électrique. Le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir satisfaire la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité :

$$\text{Production} = \text{Consommation} + \text{pertes}$$

Le réseau électrique doit permettre de livrer aux utilisateurs un bien de consommation adaptée à leurs besoins, caractérisé par :

- Une puissance disponible, fonction des besoins quantitatifs du client.
- Une tension fixée, fonction de cette puissance et du type de clientèle.
- Une qualité traduisant la capacité à respecter les valeurs et la forme prévues de ces deux paramètres et à les maintenir dans le temps.

2.1) Système équilibrés :

2.1.1) Généralités :

Dans un circuit triphasé équilibré, les grandeurs pour chaque phase ont même pulsation (ou fréquence), même amplitude et sont déphasés entre elles d'un angle de $2\pi/3$, ce qui entraîne en particulier que leur somme est égale à zéro. Dans le cas usuel alimentant une charge, ceci impose, évidemment, que le réseau soit équilibré, mais, également, qu'il en soit de même pour la charge, pour laquelle on suppose de surcroît qu'elle est linéaire.

En notant de façon générique x_1 , x_2 et x_3 les tensions ou courants (rappel : $x_1+x_2+x_3=0$), on distingue trois cas :

a) Système direct : x_1 , x_2 et x_3 se mettent sous la forme

$$X_1 = X\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta)$$

$$X_2 = X\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta - 2\pi/3)$$

$$X_3 = X\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta - 4\pi/3)$$

Où θ est un angle arbitraire qui dépend du choix de l'origine des temps.

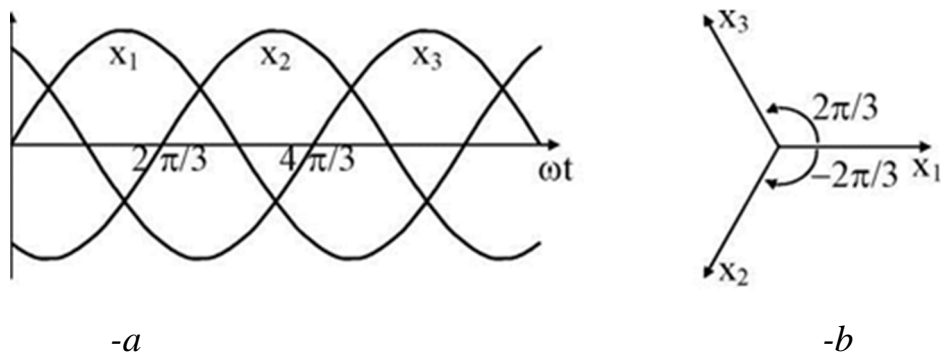


Figure (2.1) : Représentation vectorielle d'un système triphasé équilibré direct.

En valeur instantanée, les grandeurs se succèdent comme indiqué sur la (Figure 2.1.a) 1, le diagramme de Fresnel correspondant étant représenté sur la (Figure 2.1.b) ($-4\pi/3$ étant égal à $2\pi/3$ modulo 2π).

b) Système inverse : x_1 , x_2 , et x_3 se mettent sous la forme

$$X_1 = X\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta)$$

$$X_2 = X\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta + 2\pi/3)$$

$$X_3 = X\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta + 4\pi/3)$$

Où, comme précédemment, θ est un angle arbitraire qui dépend du choix de l'origine des temps.

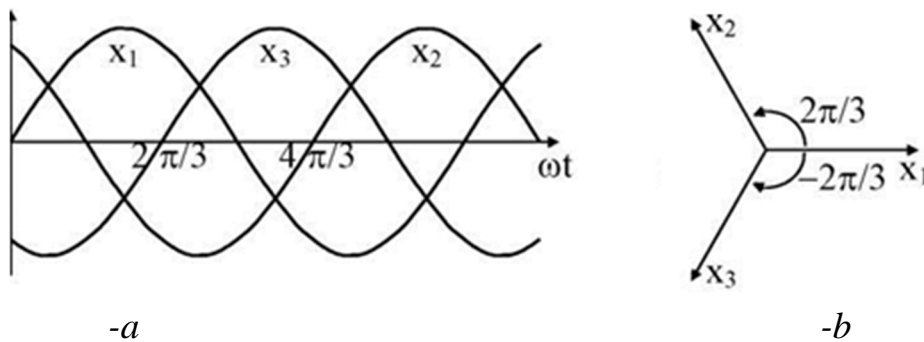


Figure (2.2) : Représentation vectorielle d'un système triphasé équilibré inverse.

De même, en valeur instantanée, les grandeurs se succèdent comme indiqué sur la (Figure 2.2.a), le diagramme de Fresnel correspondant étant représenté sur la (Figure 2.2.b) ($4\pi/3 = -2\pi/3$ modulo 2π).

Comme en monophasé, on peut associer à x_1 , x_2 et x_3 des nombres complexes \underline{X}_1 , \underline{X}_2 et \underline{X}_3 .

Vu que les grandeurs temporelles ne diffèrent que par leur phase à l'origine, les complexes ne diffèrent que par leur argument et on aura, en prenant par exemple \underline{X}_1 .

Pour un système direct : $\underline{X}_2 = \underline{X}_1 \quad \overset{\curvearrowright}{}$ $\underline{X}_3 = \underline{X}_1 \quad \overset{\curvearrowright}{}$ (ou $\underline{X}_3 = \underline{X}_1 \quad \overset{\curvearrowleft}{}$)

Pour un système inverse : $\underline{X}_2 = \underline{X}_1 \quad \overset{\curvearrowleft}{}$ $\underline{X}_3 = \underline{X}_1 \quad \overset{\curvearrowleft}{}$ (ou $\underline{X}_3 = \underline{X}_1 \quad \overset{\curvearrowright}{}$).

Dans la pratique, on introduit l'«opérateur» a , égal à $e^{j2\pi/3}$, qui possède les propriétés suivantes :

- a est une des racines cubique de l'unité, on a donc $a^3 = 1$, soit $a = 1/a^2$ ou $a^2 = 1/a$. Ceci entraîne en particulier que a^{-1} , égal à $1/a$, peut se remplacer par a^2 . De même, $a^{-2} = 1/a^2 = a$.
- $1 + a + a^2 = 0$ (c'est une autre propriété des racines de l'unité).

Avec cet opérateur, et toujours en partant de X_1 .

- Les grandeurs d'un système direct pourront se mettre sous la forme : \underline{X}_1 $a \underline{X}_1$ $a^2 \underline{X}_1$.
- Celles d'un système inverse sous la forme : \underline{X}_1 $a^2 \underline{X}_1$ $a \underline{X}_1$.

Dans les deux cas on retrouve que la somme des trois est nulle vu que : $1 + a + a^2 = 0$.

2.1.2) Notes sur les sources d'alimentation :

Celles-ci peuvent être couplées, soit en étoile avec ou sans point commun sorti (*Figure 2.3*), soit en triangle (*Figure 2.4*). Dans le contexte des régimes équilibrés, leurs déphasages sont, en principe, tels que l'ordre des phases 1, 2 et 3 est direct. Il s'en suit qu'on a :

- Pour le montage étoile $\underline{V}_2 = a \underline{V}_1$ $\underline{V}_3 = a^2 \underline{V}_1$
- Pour le montage triangle $\underline{U}_{23} = a \underline{U}_{12}$ $\underline{U}_{31} = a^2 \underline{U}_{12}$

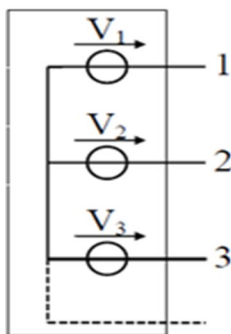


Figure (2.3) : Source de tension triphasée montée en étoile.

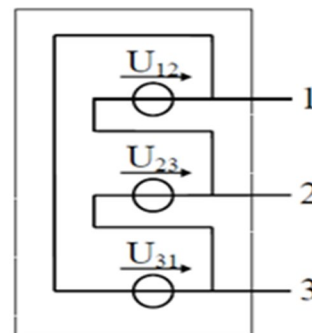


Figure (2.4) : Source de tension triphasée montée en triangle.

Remarque 1: Les tensions entre phases correspondant au couplage en étoile s'écrivent \underline{U}_{12} , \underline{U}_{23} et \underline{U}_{31} avec $\underline{U}_{12} = \underline{V}_1 - \underline{V}_2 = \underline{V}_1 (1 - \underline{1}) = \underline{V}_1 \sqrt{3} \underline{e}^{-j\pi/6}$.

Ces tensions sont donc en avance de $\pi/6$ sur les tensions simples respectives.

Remarque 2: Lorsque la structure de la source n'est pas définie, ce qui peut être le cas pour une distribution où on ne donne que la tension composée U et la fréquence, on peut la représenter par l'un ou l'autre des deux schémas précédents. En principe, pour une distribution 4 fils, on choisit celui en étoile, avec, par exemple, $\underline{V}_1 = U/\sqrt{3}$ pris comme origine. Pour une distribution 3 fils, a priori, le choix est indifférent, dans la pratique, il est souvent conditionné par le contexte (structure de la charge, par exemple).

2.2) Notes sur les charges :

Elles peuvent être définies, soit par leur couplage et leurs impédances (*Figures 2.5*), soit par le courant en ligne qu'elles absorbent (ou la puissance) et leur $\cos \varphi$. Nous verrons comment gérer cela au paragraphe suivant, signalons simplement deux points ici:

- On peut toujours remplacer un couplage étoile par un couplage triangle à condition de donner à \underline{Z}_Δ la valeur $3\underline{Z}_Y$. La réciproque est évidemment vraie, avec $\underline{Z}_Y = \underline{Z}_\Delta/3$.
- Dans le deuxième cas, il faut toujours se rappeler que l'angle φ correspondant reste le déphasage entre la d.d.p. phase-neutre (réel ou fictif) et le courant, et ce, même si on part d'un réseau de tensions composées.

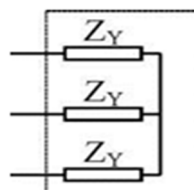


Figure (2.5) : Couplage des charges.

2.2.1) Méthode de calcul :

2.2.1.1) Cas où la structure de la charge est connue :

Comme le système est équilibré, les grandeurs correspondant à chaque phase sont identiques au déphasage de $2\pi/3$ près. Il suffit donc d'effectuer le calcul pour une phase. Celui-ci est facilité si on adapte la structure de la charge à celle de la source.

A titre d'exemple, considérons le cas de la (Figure 2.6.a) d'une source en étoile avec $\underline{V}_1 = V$ pris comme origine, donc $\underline{V}_2 = a^2V$ et $\underline{V}_3 = aV$, alimentant une charge en triangle.

On commence par remplacer la charge en triangle par son schéma en étoile équivalent (Figure 2.6.b).

Comme le système est équilibré, le point commun de la charge est au même potentiel que celui de la source, on a donc immédiatement.

$$I = \frac{V}{Z} \sqrt{3}, \text{ soit } I = \frac{V}{Z} \sqrt{3}.$$

On en déduit, si nécessaire, la valeur des courants circulant dans le triangle initial en utilisant la loi des nœuds:

$$\underline{I}_1 = \underline{J}_1 - \underline{J}_3 \text{ avec } \underline{J}_3 = a\underline{J}_1 \text{ donne } \underline{I}_1 = \underline{J}_1(1 - a) = \frac{V}{Z} \sqrt{3} \angle -30^\circ, \text{ Soit, compte tenu de la valeur de } \underline{I}_1, \underline{J}_1 = \frac{V}{Z} \angle -30^\circ.$$

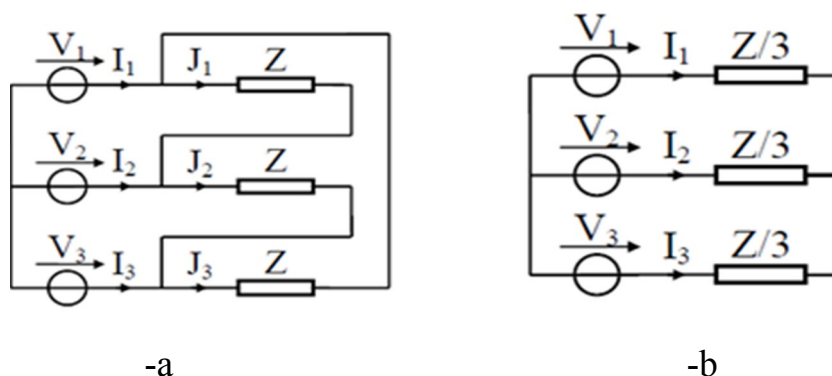


Figure (2.6) : Système électrique équilibré, source et charges.

2.2.1.2) Cas où on définit la charge par ses paramètres extérieurs :

Le facteur de puissance est toujours fourni. Si on précise la valeur du courant, on calculera les puissances comme indiqué plus loin, si c'est une des puissances, on calculera le courant et, éventuellement les autres puissances. Rappelons que, si on est dans le cas de plusieurs charges placées en parallèle, le moyen le plus commode pour traiter le circuit est l'utilisation du théorème de Boucherot, par exemple sous la forme:

$$\begin{aligned} P &= \Sigma P \\ Q &= \Sigma Q \end{aligned}$$

2.3) Puissance mises en jeu :

2.3.1) Définition :

Pour chaque phase, on définit les puissances comme en monophasé, soit, par exemple, $VI \cos \varphi$ pour la puissance active. Vu que le circuit est triphasé et équilibré, les puissances totales sont donc simplement le triple des puissances pour chaque phase:

- Puissance active $P = 3VI \cos \varphi$.
- Puissance réactive $Q = 3VI \sin \varphi = P \tan \varphi$.
- Puissance apparente $S = 3VI = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Comme, souvent, la source d'alimentation est définie par sa tension composée, on a coutume de remplacer V par $U/\sqrt{3}$, ce qui conduit à $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$, $Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$ et $S = \sqrt{3}UI$.

On peut, là aussi, définir une puissance apparente complexe, mais uniquement sous la forme $\underline{S} = 3\underline{VI}^*$ (ou $3\underline{U}.\underline{I}^*$) à cause du problème de déphasage entre \underline{U} et \underline{I} .

2.3.2) Mesure des différentes puissances :

Comme c'est souvent le cas, on part du principe que la charge ne comporte que trois bornes accessibles. Il faut cependant distinguer deux situations, suivant que l'on ait accès ou non au neutre de la source.

2.3.2.1) Neutre accessible :

Pour la puissance active, on branche le wattmètre comme indiqué sur la (*Figure 2.7.a*), si on choisit de faire la mesure sur la phase 1 et en multiplie par 3 son indication pour obtenir P.

Pour la puissance réactive, si on choisit de prendre le courant sur la phase 1, on réalise le montage de la (*Figure 2.7.b*). Comme le wattmètre affiche $UI\sin\varphi$, il suffit de multiplier cette indication par $\sqrt{3}$ pour obtenir Q (en théorie, le problème du signe ne se pose pas ici puisque, pour nous, 1,2 et 3 forment un système direct, par contre, dans la pratique, il convient toujours de vérifier que c'est bien le cas).

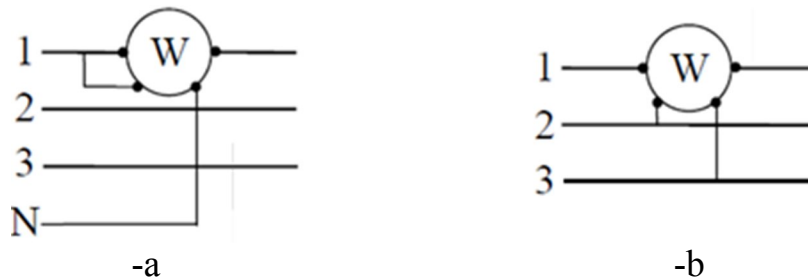


Figure (2.7) : Montage des wattmètres pour relèvement des puissances actives et réactives.

2.3.2.2) Neutre non accessible :

Le problème ne se pose que pour la puissance active, puisque la mesure de Q ne l'utilise pas. Une première possibilité consiste à créer un neutre artificiel à l'aide de résistances identiques couplées en étoile et d'y relier la deuxième borne du circuit tension du wattmètre (*Figure 2.8.a*). Ceci est réalisé de façon interne dans les wattmètres "triphasés".

La deuxième possibilité consiste à employer la méthode du double wattmètre dont le schéma est représenté sur la (*Figure 2.8.b*). Avec les notations du a) du paragraphe 2.2.1.1, et en passant par la puissance apparente complexe, l'indication W_1 du premier wattmètre est égale à $Re[\underline{U}_{13}\underline{I}_1^*]$,

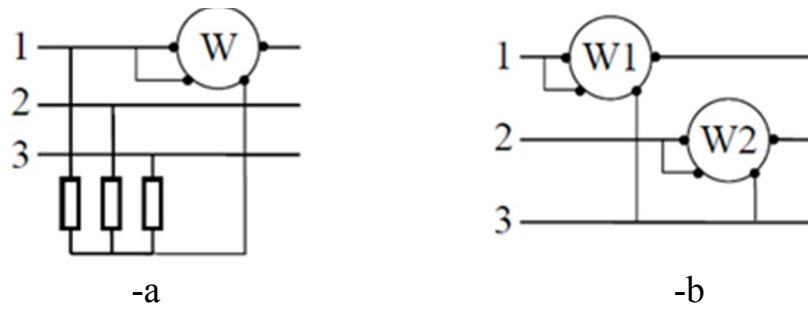


Figure (2.8) : Montage de deux wattmètres pour relèvement des puissances actives et réactives.

soit $W_1 = \text{Re}[V(1 - a)I] = \text{Re}[V\sqrt{3} \quad I] = \text{Re}[\sqrt{3}VI \quad]$, soit, en remplaçant $\sqrt{3}V$ par U , $W_1 = UI \cos \varphi - -$.

De même, l'indication W_2 du deuxième wattmètre vaut $\text{Re}[U_{23}.I_2^*] = \text{Re}[V(\quad -) (I \quad)^*]$,

Soit $W_2 = \text{Re}[V\sqrt{3} \quad - \quad I \quad]$, soit tous calculs faits, $W_2 = UI \cos \varphi + -$

En développant le cosinus dans chacun des deux termes, il vient

$$\begin{cases} W_1 = UI \cos\varphi \cos \frac{\pi}{6} + \sin\varphi \sin \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos\varphi + \frac{1}{2} UI \sin\varphi \\ W_2 = UI \cos\varphi \cos \frac{\pi}{6} - \sin\varphi \sin \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos\varphi - \frac{1}{2} UI \sin\varphi \end{cases}$$

On voit donc apparaître des termes proportionnels à $UI \cos\varphi$, donc à la puissance active. En fait, il suffit de faire la somme pour obtenir cette dernière: $P = W_1 + W_2$. Par ailleurs, on constate que $W_1 - W_2 = UI \sin\varphi$, soit $Q/\sqrt{3}$. L'emploi de la méthode du double wattmètre permet donc de se passer du montage de mesure de Q décrit au paragraphe précédent. En résumé:

$$P = W_1 + W_2 \quad Q = \sqrt{3} (W_1 - W_2)$$

Conclusion :

L'intérêt de la méthode exposée dans ce chapitre est immédiat en électricité dans le cas de réseaux triphasés.

Notons que ces manipulations mathématiques correspondent bien, en fait, à une réalité physique des phénomènes, ainsi nous démontrons que les systèmes triphasés appliqués aux réseaux électriques peuvent être déséquilibrés par des dissymétries de charges ou de défauts.

3.1) Introduction

Ce chapitre définit le terme « qualité de l'énergie électrique », et présente les principales perturbations électriques ainsi que leurs origines, caractéristiques et conséquences. Volontairement, nous prenons systématiquement comme base le système triphasé, le monophasé étant considéré comme un cas particulier.

3.2) Qualité de l'énergie électrique :

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe. [3]

3.2.1) Qualité de la tension :

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

3.2.1.1) Amplitude :

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

3.2.1.2) Fréquence :

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge.

Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.

3.2.1.3) Forme d'onde :

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

3.2.1.4) Symétrie :

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

3.2.2) Qualité du courant :

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquences constantes, déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension.

3.3) Classification des perturbations électriques :

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques :

- les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker),
- les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- les modifications de la forme d'onde (harmoniques, inter harmoniques, bruits),
- la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée :

- les perturbations transitoires,

- les perturbations de courte durée,
- les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale.

Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre.

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

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

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories :

- les défauts au sein des réseaux électriques,
- la présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles :

- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...),
- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

Le tableau (2.1) récapitule les remarques précédentes en présentant les principales perturbations, leurs origines ainsi que leurs conséquences. L'amplitude de la

tension est également indiquée en pu (per unit) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude. [3]

Durée	Type de perturbations	Amplitude	Origine	Conséquences
<10ms	Transitoires (impulsions et oscillations)	-	Déclenchement des appareils, enclenchement des condensateurs, commutations	Dysfonctionnements gênants
10ms – 1min	Creux de tension	0.1 – 0.9 pu	Courts-circuits, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Coupures brèves d'équipements,	<0.1 pu	Courts-circuits	Arrêts, pertes de production
	Surtensions	1.1 – 1.8 pu	Courts-circuits, débranchement des charges importantes	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour les matériels
Régime établi	Déséquilibre	-	Charges asymétriques ou monophasées	Echauffements des machines tournantes, vibrations
	Variations rapides de tension (Flicker)	0.1 – 7 %	Charges fluctuantes (fours à arc, moteur à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0 – 20%	Charges non linéaires (structures d'électronique de puissance, arcs électriques)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels
	Inter harmoniques	0 – 2%	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Bruit Fours à arc,	0 – 1%	Charges non linéaires	Echauffements, pertes, vieillissements

	Variations de la fréquence	-	Déséquilibre entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques
--	----------------------------	---	---	--

Tableau (3.1) : Vue d'ensemble des principales perturbations électriques.

3.3.1) Creux de tension et coupures brèves :

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min.

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps (*voir figure 3.1a*). Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles.

Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale.

Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (*voir figure 3.1b*). Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de secondes et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases.

Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes. [3]

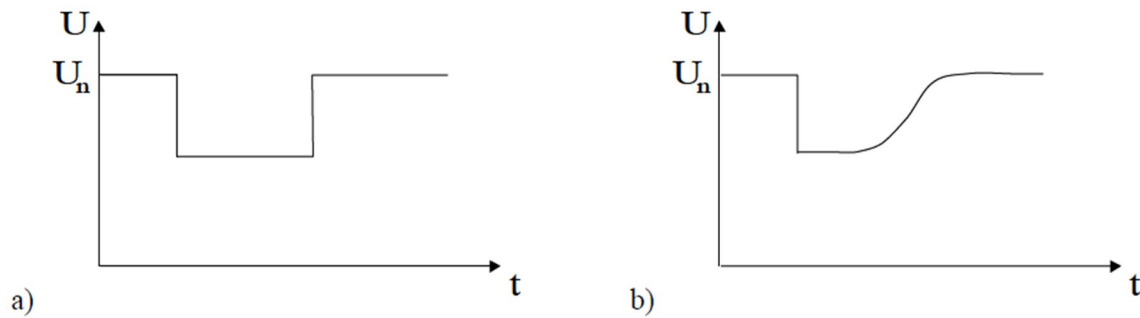


Figure (3.1) : Amplitude d'un creux de tension provoqué par :

a) Un court-circuit,

b) Un démarrage d'un moteur de forte puissance

Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes.

3.3.2) Surtensions et surintensités :

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1,1 pu à 1,8 pu. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts-circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1,73 pu, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1,5 pu.

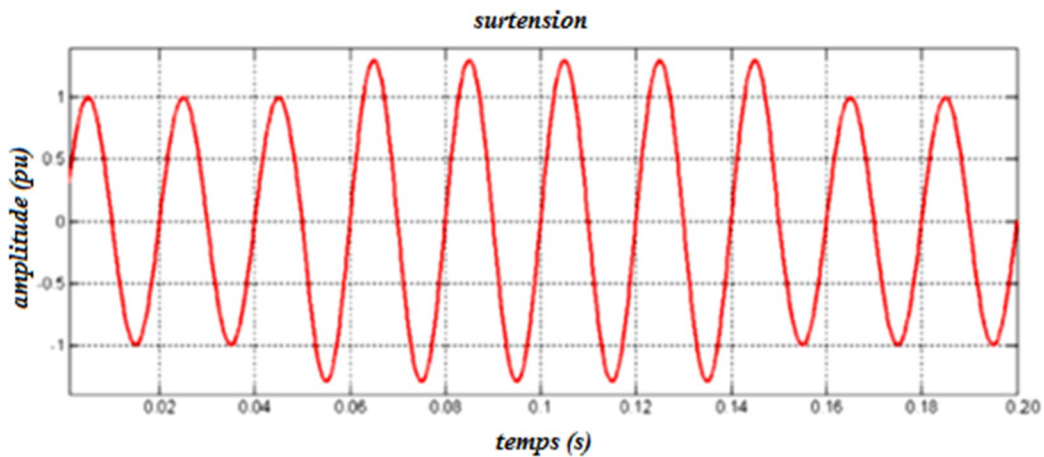


Figure (3.2) : Exemple de surtension.

Des surtensions peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions, par ferro-résonance ou par des manœuvres sur le réseau. Ce type de surtensions se caractérise généralement par une durée très brève et s'assimile le plus souvent à des transitoires.

3.3.3) Variations de tension :

La mise en service ou hors service des appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des variations de tension qui se manifestent sous deux formes principales :

- Des variations lentes de tension se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les $\pm 10\%$ de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques.
- Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25 Hz. Ces variations sont dues aux charges dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines

à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs.

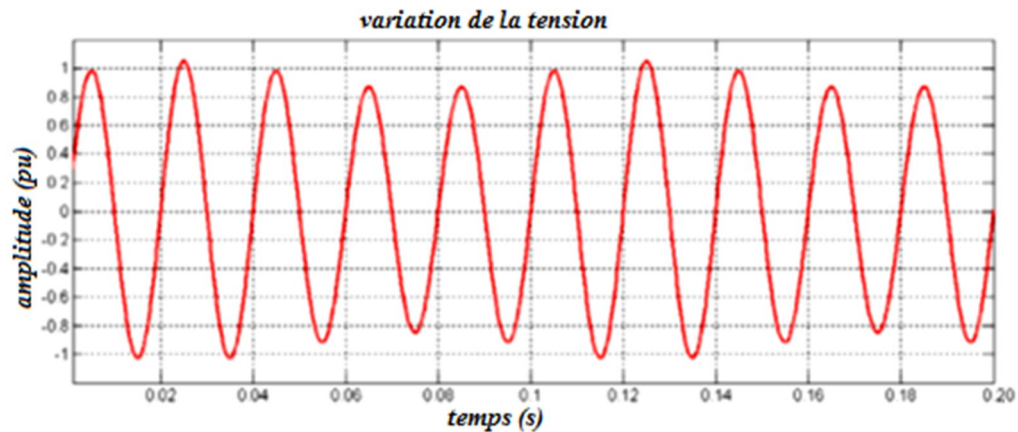


Figure (3.3) : Exemple de variation de tension.

3.3.4) Perturbations harmoniques :

Les composantes sinusoïdales d'un signal de fréquences multiples de sa fréquence fondamentale s'appellent harmoniques. L'harmonique de fréquence kf_0 , où f_0 est la fréquence fondamentale et k est un nombre réel positif est dit de rang k .

Les composantes sinusoïdales dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence fondamentale du signal sont nommées les inter-harmoniques. Les composantes sinusoïdales, dont la fréquence est inférieure à la fréquence fondamentale sont appelées infra harmoniques.

Les perturbations harmoniques sont dues à l'insertion au réseau des charges non linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, etc.). Les harmoniques provoquent des échauffements qui, à terme, diminuent la durée de vie

des équipements. Ils peuvent également être à l'origine de troubles fonctionnels (synchronisation, commutation) et d'erreurs de mesure. [3]

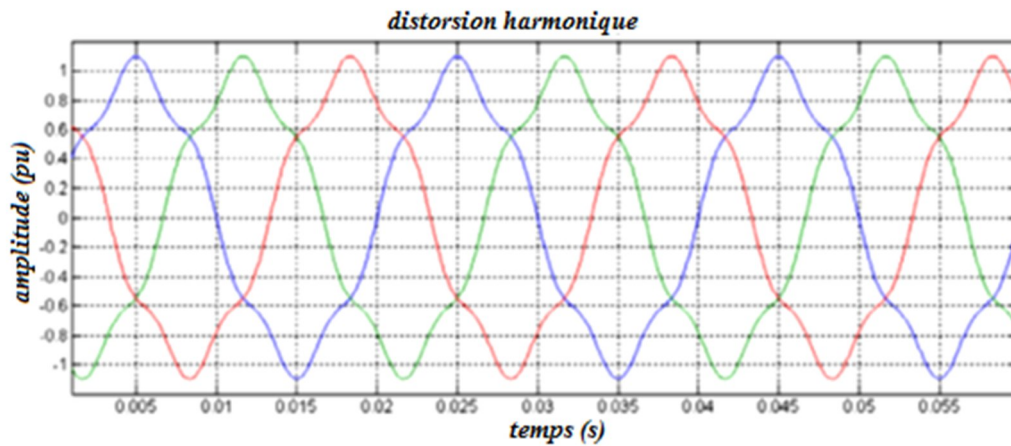


Figure (3.4) : Représentation temporelle d'une distorsion harmonique.

3.3.4.1) Harmoniques :

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc, inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.).

3.3.4.1.1) Convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée. Un redresseur commandé en pleine onde de p pulsations engendre, du côté continu, des harmoniques de rang pn , ($n=1, 2, 3, \dots$) et du côté alternatif, des harmoniques de rang $pn \pm 1$. Un redresseur commandé en MLI synchrone engendre des harmoniques de rang pair du côté continu et de rang impair du côté alternatif, si

l'indice de modulation $m = \frac{U}{U_m}$ est impair et des harmoniques pairs et impairs de deux côtés si m est pair.

- Les cyclo convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif génèrent des spectres complexes, généralement riches en fréquences et dépendant de leur structure et de leur commande.
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux. Les gradateurs génèrent des harmoniques dont l'amplitude et la phase dépendent de l'angle d'allumage des thyristors.

3.3.4.1.2) Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire :

Parmi les dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire on distingue :

- Les fours à arc. Les fours à arc sont connectés directement au réseau de transmission, généralement sans recours à un filtrage adéquat. Leur impédance varie de manière aléatoire et de surcroît, elle est particulièrement asymétrique. Par ailleurs les fours à arc génèrent des harmoniques de toutes les fréquences, ainsi que des inters harmoniques dont les amplitudes dépassent nettement le bruit de fond.
- Les inductances saturées. De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de ce fait provoquent par contre-réaction des déformations notables de ce courant.
- Les transformateurs. A cause de leur caractéristique tension-courant non linéaire, les transformateurs génèrent des harmoniques qui dépendent sensiblement de l'amplitude et de la forme de la tension d'alimentation.
- Les machines tournantes. Elles engendrent des harmoniques d'amplitudes souvent négligeables.

Les petites machines synchrones sont toutefois génératrices de tensions harmoniques de rang 3.

3.3.4.2) Inter-harmoniques :

L'analyse harmonique des courants et des tensions nous indique qu'en plus des harmoniques de rang entier, il existe des inters harmoniques. Ceux-ci ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande. [3]

Les inter-harmoniques ont principalement pour origine:

- les imperfections du convertisseur et de sa commande (chutes de tension dans les thyristors, variation ou inégalité des angles de commutation, variation de l'impédance vue du côté continu du redresseur),
- l'association de plusieurs convertisseurs fonctionnant à des fréquences différentes : variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif,
- les convertisseurs statiques de commande non périodique,
- les fours à arc et les cyclos convertisseurs.

3.3.5) Les déséquilibres :

Ce paragraphe traite du déséquilibre en tension et en courant. Etant donné que les courants déséquilibrés sont une cause importante de l'asymétrie des tensions et que le déséquilibre en tension est un des paramètres de la qualité en matière d'énergie électrique, il aborde principalement le déséquilibre en tension sur les réseaux triphasés sinusoïdaux. [4]

3.3.5.1) Définition :

Un système triphasé est dit équilibré ou symétrique si les tensions et les courants triphasés ont la même amplitude et représentent un déphasage de 120° les uns par rapport aux autres. Si l'une au moins de ces conditions n'est pas remplie, le système est dit déséquilibré ou asymétrique.

Pour quantifier le déséquilibre en tension ou en courant d'un système triphasé, on utilise les composantes de Fortescue ou composantes symétriques.

3.3.5.2) Déséquilibre dû à la source :

Celui-ci se produit dès que les trois tensions n'ont plus la même valeur efficace ou que leur déphasage n'est plus de $2\pi/3$ (et, bien sûr, si les deux conditions sont réunies). Ici, nous sommes dans un cas où on peut employer la théorie des composantes symétriques. On procède alors comme suit:

On remplace la source par ses composantes symétriques, en conservant la structure initiale (composantes en étoile si la source est en étoile et composantes en triangle sinon). On obtient donc trois systèmes symétriques auxquels on applique le théorème de superposition en calculant les courants correspondant à chaque composante (comme pour les circuits symétriques, le calcul est facilité en adaptant la structure de la charge à celle de la source). Il ne reste plus, ensuite, qu'à reconstituer les courants par phase à l'aide des formules de transformation inverse.

Avant de décrire succinctement un exemple, signalons les points suivants:

- A priori, les impédances de la charge vis à vis des trois composantes ne sont pas forcément identiques. Elles le sont pour les charges passives, mais pas, par exemple, pour un moteur asynchrone. Ici, cependant, on se limitera au cas où les impédances restent les mêmes.
- Lorsque la source est en étoile sans neutre, la somme des courants en ligne est forcément nulle, donc, même si cette source contient une composante homopolaire de tension, il ne peut pas y avoir de composante homopolaire de courant (rappel:

$v_0 = v_1 + v_2 + v_3$. Physiquement, si la charge est couplée en étoile, cela implique que le point commun de la charge est porté au potentiel homopolaire V_0 par rapport au point commun de la source. Lorsque la source est en triangle, c'est la composante homopolaire de tension qui est nulle. En effet, on a obligatoirement : $v_1 + v_2 + v_3 = 0$, donc : $v_0 = 0$.

Si on ne connaît que les valeurs des tensions entre phases, on utilise a priori une représentation en triangle de la source. Il est cependant possible d'utiliser une représentation en étoile, à condition de s'imposer que la composante homopolaire des tensions simples soit nulle. En effet, dans ce cas, on obtient le

système de relations suivant $\begin{cases} v_1 - v_2 = E \\ v_2 - v_3 = E \\ v_3 - v_1 = E \end{cases}$, dont la résolution, en éliminant à

chaque fois une des trois premières relations, conduit à :

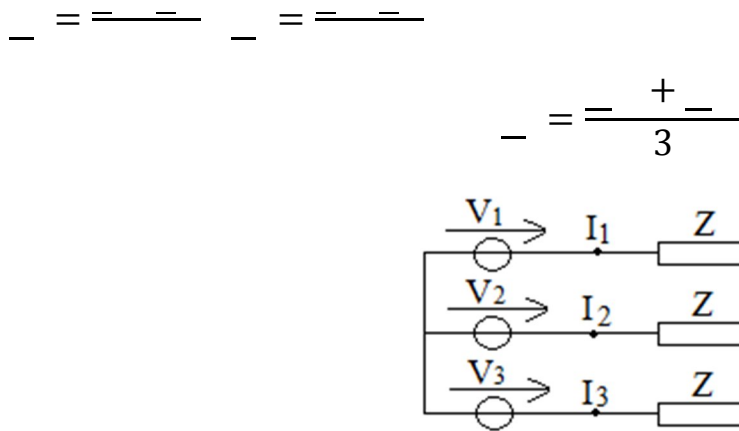


Figure (3.5) : Ensemble de source de tension et de charges impédentes.

A titre d'exemple, nous allons considérer le cas représenté sur la (Figure 3.5), où les tensions : v_1 , v_2 et v_3 ont même module V mais sont déphasées entre-elles comme indiqué sur la (Figure 3.6) (physiquement, ceci peut se produire au secondaire d'un transformateur, si, lors du câblage, on a inversé les deux bornes d'un enroulement).

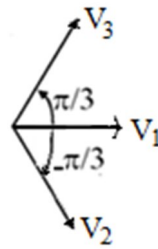


Figure (3.6) : Déphasage des tensions de source.

On commence donc par calculer les composantes symétriques des tensions :

En choisissant V_1 comme origine des phases, il vient $V_1 = V_m e^{j0}$, $V_2 = V_m e^{-j\pi/3}$ et

$V_3 = V_m e^{j\pi/3}$, ce qui reporté dans les relations de transformation donne tout calculs faits, $V_0 = \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3) = 0$, $V_1 = \frac{2}{3}V_m \cos(\pi/3) = \frac{2}{3}V_m$ et $V_2 = -\frac{1}{3}V_m$.

N.B.: Vu le type de liaison entre la source et la charge, le calcul de V_0 n'est pas utile pour la détermination des courants, puisqu'on a forcément $V_0 = 0$. Par contre, ceci montre que le point commun de la charge est porté au potentiel $2V/3$ par rapport à celui de la source.

Vis à vis des composantes directes et inverses, la d.d.p. entre les points communs de la source et de la charge est égale à zéro. Il vient donc $V_0 = 0$, $V_1 = \frac{2}{3}V_m$ et $V_2 = -\frac{1}{3}V_m$. Ceci, reporté dans les relations de transformation inverse avec $V_0 = 0$, donne, là encore tous calculs faits,

$$V_{d1} = \frac{2}{3}V_m \cong 0,882 V_m \quad , \quad V_{d2} = -\frac{1}{3}V_m \cong -0,333 V_m \quad .$$

3.3.5.3) Déséquilibre dû à la charge :

Ici, l'utilisation des composantes symétriques n'apporte rien a priori, le problème se traite à l'aide des lois des mailles et des nœuds. Eventuellement, on peut, pour terminer, calculer les composantes des courants, par exemple pour caractériser le taux de déséquilibre.

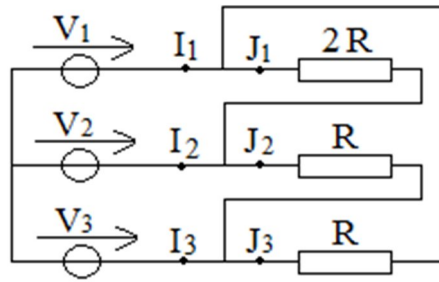


Figure (3.7) : Exemple d'un réseau déséquilibré par la charge.

A titre d'exemple, on peut étudier le cas représenté ci-contre, où les tensions, V_1 , V_2 et V_3 forment un système direct de valeur efficace V , soit, en prenant V_1 comme origine des phases, $V_1 = V \cos(\omega t)$, $V_2 = V \cos(\omega t - 120^\circ)$ et $V_3 = V \cos(\omega t + 120^\circ)$. Partant de là, on calcule les courants dans les résistances:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \frac{V_1}{2R} = \frac{V}{2R} (1 - j) = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle -30^\circ \\
 J_2 &= \frac{V_2}{R} = \frac{V}{R} \cos(\omega t - 120^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle -90^\circ \\
 J_3 &= \frac{V_3}{R} = \frac{V}{R} \cos(\omega t + 120^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle 30^\circ
 \end{aligned}$$

On en déduit les courants en ligne:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= J_1 - J_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle -30^\circ - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle -90^\circ \cong 2,29 \frac{V}{R} \angle -60^\circ \\
 I_2 &= J_2 - J_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle -90^\circ - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle 30^\circ = 3 \frac{V}{R} \angle -120^\circ \\
 I_3 &= J_3 - J_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle 30^\circ - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R} \angle -30^\circ \cong 2,29 \frac{V}{R} \angle 60^\circ
 \end{aligned}$$

La somme $I_1 + I_2 + I_3$ est évidemment nulle (on pourrait le vérifier numériquement ici). Par contre, celle des courants dans les résistances vaut $\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{R}$. Contrairement aux courants en ligne, ceux-ci contiennent donc une composante homopolaire, égale au tiers de ce terme, mais qui n'est pas transmise à la source.

Remarque: Dans une configuration de type étoile-étoile (Figure ci-contre), le déséquilibre entraîne que les points N et N' ne sont pas au même potentiel (en d'autres termes, les tensions aux bornes de la charge comportent une composante homopolaire). Il faut donc commencer par calculer la valeur de $V_{NN'}$, par exemple en utilisant le théorème de Millmann.

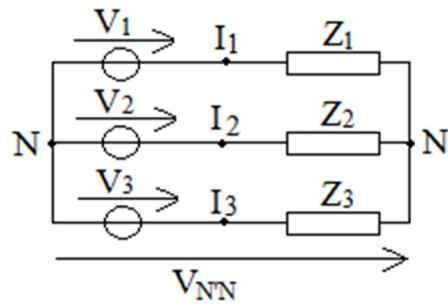


Figure (3.8) : Configuration de type étoile-étoile.

$$V_{NN'} = \frac{V_1 Z_2 Z_3 + V_2 Z_1 Z_3 + V_3 Z_1 Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}$$

3.3.5.4) Déséquilibre simultané :

De même, à cause du déséquilibre de la charge, l'utilisation des composantes symétriques n'apporte pas de simplification notable. Sauf cas particulier, on conservera donc les tensions telles quelles et on procédera comme au paragraphe précédent, quitte, là encore, à calculer ensuite les différentes composantes. Compte tenu de ceci, il est inutile de décrire un exemple car les démarches ne changent pas par rapport à ce qui a déjà été vu.

3.3.5.5) Composantes symétriques :

Soit un ensemble de trois vecteurs triphasés sinusoïdaux tournant à la même vitesse. Ils sont donc fixes les uns par rapport aux autres. [6]

Le système triphasé est décomposé en une composante directe, une composante inverse, et une composante homopolaire indiquée par les indices d , i , et h . Elles sont déterminées par l'équation matricielle ci-dessous. Les expressions sont présentées pour les tensions U , mais cette variable peut être remplacée de façon équivalente par le courant I :

$$= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix}$$

Nota :

a , b , c indiquent les différentes phases, où l'opérateur de rotation « a » est un opérateur vectoriel qui consiste à faire tourner de $+ 2\pi/3$ le vecteur auquel l'opération est appliquée il est donné par :

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & a \end{pmatrix}$$

Ces transformations laissent l'énergie invariante et donc les puissances calculées à partir des valeurs originales ou des valeurs transformées seront les mêmes.

La transformation inverse est :

$$= \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}$$

Le système direct associé à un champ tournant dans le sens positif, tandis que le système inverse induit un champ tournant dans le sens négatif. Dans le cas des machines électriques à courant alternatif, cette interprétation est physiquement correcte pour le champ magnétique tournant (*Figure 3.9*).

Les composantes homopolaires sont en phase et ne font qu'osciller. Sur les installations sans les conducteurs de neutre, les courants homopolaires ne peuvent évidemment pas circuler, mais des différences de potentiels significatives peuvent apparaître entre les tensions zéro des points des sources et des charges câblées en étoile.

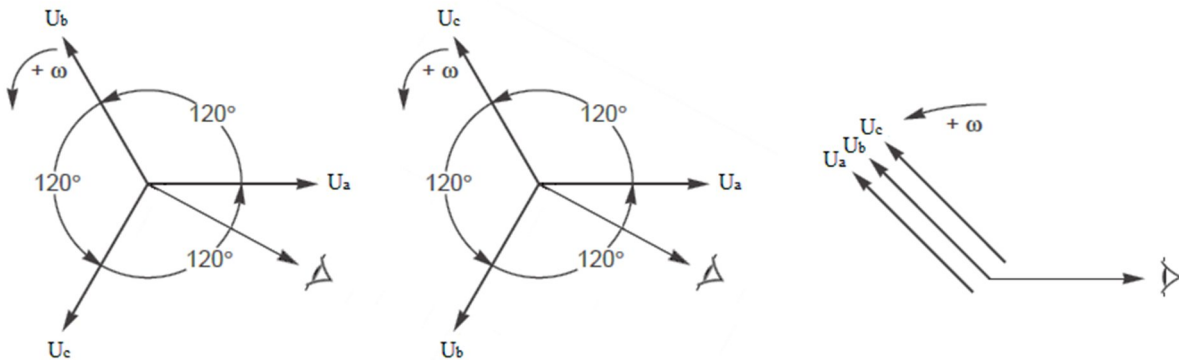


Figure (3.9) : schémas de décomposition en composantes symétriques.

- Décomposition d'un système triphasé en ses composantes symétriques :

Soit un système triphasé quelconque formé de trois vecteurs $\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$, on montre que ce système est la somme de trois systèmes triphasés équilibrés :

- Direct : $\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$
- Inverse : $\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$
- Homopolaire : $\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$

On aura :

- $\vec{U}_a = \vec{U}_a + \vec{U}_a + \vec{U}_a$
- $\vec{U}_b = \vec{U}_b + \vec{U}_b + \vec{U}_b$

$$\bullet \quad \vec{v} = \vec{v}_a + \vec{v}_b + \vec{v}_c$$

Si on choisit les vecteurs indicés a comme vecteurs d'origine, et que l'on fait intervenir l'opérateur « a » on trouve les équations suivantes :

$$\bullet \quad \vec{v}_a = \vec{v}_a + \vec{v}_b + \vec{v}_c$$

$$\bullet \quad \vec{v}_b = \vec{v}_a + \vec{v}_b + \vec{v}_c$$

$$\bullet \quad \vec{v}_c = \vec{v}_a + \vec{v}_b + \vec{v}_c$$

On peut calculer les composantes symétriques maintenant :

$$\bullet \quad \vec{v}_0 = -\vec{v}_a + \vec{v}_b + \vec{v}_c$$

$$\bullet \quad \vec{v}_1 = -\vec{v}_a + \vec{v}_b + \vec{v}_c$$

$$\bullet \quad \vec{v}_2 = -\vec{v}_a + \vec{v}_b + \vec{v}_c$$

3.3.5.6) La cause du déséquilibre :

L'exploitation du système s'efforce de fournir des tensions du système déséquilibré entre le réseau de distribution et le réseau interne du client.

Dans les conditions normales, ces tensions sont déterminées par :

- Des tensions aux bornes des alternateurs de production.
- Les impédances du système de distribution.
- Les courants absorbés par les charges à travers tout le réseau de transmission et de distribution.

3.3.5.6.1) Au niveau de centre de production :

Sur un site de production, les tensions du système sont normalement très symétriques du fait de la conception et de l'exploitation de machines synchrones,

utilisées dans les grandes centrales électriques. Toutefois, là où la production est distribuée ou intégrée à petite échelle, installée dans les locaux du client, un grand nombre de ces unités est connecté au réseau basse ou moyenne tension au moyen de système de transfert de source monophasée. Le point de raccordement possède une impédance relativement élevée (puissance de court-circuit relativement faible), ce qui peut entraîner un déséquilibre de tension encore plus grand qu'au raccordement à un niveau de tension supérieur.

3.3.5.6.2) Au niveau de système de distribution :

L'impédance des constituants d'un réseau électrique n'est pas exactement la même pour chaque phase.

La configuration géométrique des lignes asymétriques par rapport au sol par exemple, est à l'origine de différence entre les paramètres de la ligne. En général, ces différences sont très faibles et leur effet peut être négligé si certaines précautions sont prises, comme par exemple la transposition des lignes.

3.3.5.6.3) Au niveau des charges :

Pour les hautes tensions, les charges sont habituellement triphasées et équilibrées.

Les charges basses tension sont généralement monophasées, comme dans le cas de l'alimentation des ordinateurs personnels ou des systèmes d'éclairage, et l'équilibre entre les phases est donc difficile à garantir.

3.3.5.7) Puissances mises en jeu :

3.3.5.7.1) Définitions :

Vu le déséquilibre, elles ne peuvent plus être définies et calculées qu'au niveau de chaque élément, donc en termes de puissances en monophasé. Après, si nécessaire, on pourra utiliser le théorème de Boucherot pour calculer les puissances totales mises en jeu. Ainsi, pour le montage ci-dessous, en raisonnant par exemple en termes de puissance apparente complexe, on définira.

Les puissances fournies par la source:

$$\begin{aligned} P_1 &= V_1 I_1^* = P_1 + jQ_1 \\ P_2 &= V_2 I_2^* = P_2 + jQ_2 \\ P_3 &= V_3 I_3^* = P_3 + jQ_3 \end{aligned}$$

Les puissances absorbées par la charge :

$$\begin{aligned} P'_1 &= V'_1 I_1 = P'_1 + jQ'_1 \\ P'_2 &= V'_2 I_2 = P'_2 + jQ'_2 \\ P'_3 &= V'_3 I_3 = P'_3 + jQ'_3 \end{aligned}$$

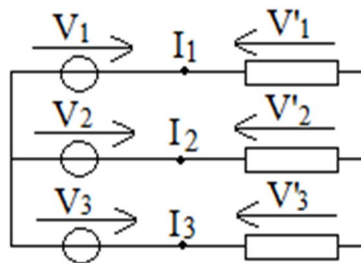


Figure (3.10) : Montage pour prélèvement des de puissance apparente complexe.

Du fait que les tensions V_i ne sont pas égales aux tensions, V'_i , les différentes puissances ne sont pas égales entre-elles, il n'y a de relation qu'entre leurs sommes : $\sum P_i = \sum P'_i$ $\sum Q_i = \sum Q'_i$.

3.3.5.7.2) Mesures des différentes puissances :

Vu ce qui a été dit au paragraphe précédent, les mesures se font a priori au niveau de chaque élément à l'aide de montages monophasés, et il faudrait donc envisager un grand nombre de cas. Cependant, comme, pour les charges couplées en triangle, les courants par élément ne sont généralement pas accessibles, et que, pour les distributions 4 fils, la source est forcément couplée en étoile, ceci limite déjà les possibilités. De plus, si on se restreint aux puissances fournies par la source, et si on tient compte du fait qu'on peut toujours schématiser une source par une représentation en étoile (paragraphe 3.3.5.2), on aboutit finalement à deux cas, en fonction du nombre de fils de la distribution. En fait, on en revient aux cas

envisagés pour les systèmes équilibrés, sauf que pour ces derniers, le neutre n'étant parcouru par aucun courant, il n'était pas utile de le distribuer.

3.3.5.7.2.1) Distribution 4 fils :

a) mesure des puissances actives : On utilise 3 wattmètres, comme indiqué ci-contre (en fait, c'est le même montage qu'en équilibré, mais effectué sur chacune des trois phases).

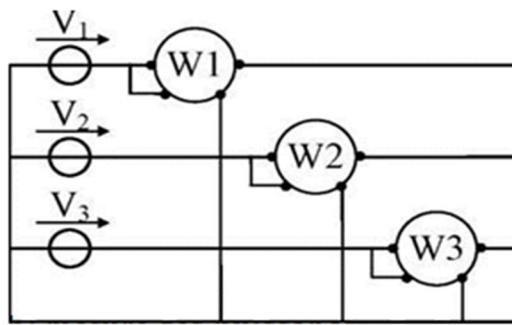


Figure (3.11) : Montage de 3 wattmètres pour mesurer les puissances actives.

b) mesure des puissances réactives : A moins de disposer d'appareils équipés de façon interne d'un déphaseur de $\pi/2$, la mesure n'est possible que si le réseau de tension est équilibré (de façon à ce que les tensions composées soient bien en quadrature avec les tensions simples). De même, on utilise alors trois fois le montage en équilibré (schéma ci-contre), en rappelant que la puissance réactive est égale à l'indication du wattmètre divisée par $\sqrt{3}$.

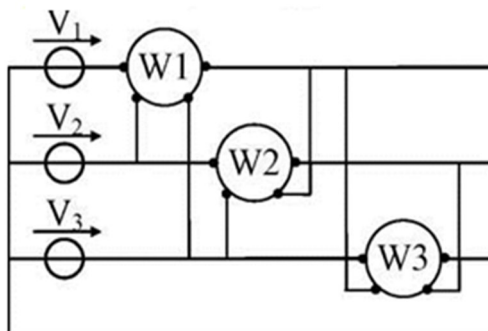


Figure (3.12) : Montage de 3 wattmètres pour mesurer les puissances réactives.

3.3.5.7.2.2) Distribution 3 fils :

a) mesure des puissances actives : Si la source est équilibrée, on peut utiliser trois fois le montage de la (Figure 2.8.a), sinon, on emploie la méthode du double wattmètre (Figure 2.8.b), pour laquelle on peut montrer qu'elle mesure la puissance active dans tous les cas de réseaux trois fils. En effet:

$$\begin{aligned}
 &= \underline{u}_1 \underline{i}_1^* = (\underline{u}_1 - \underline{u}_2) \underline{i}_1^* \Rightarrow \underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \\
 &= \underline{u}_2 \underline{i}_2^* = (\underline{u}_2 - \underline{u}_3) \underline{i}_2^* \\
 &= \underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_2^* + (\underline{u}_1 - \underline{u}_2) \underline{i}_1^*
 \end{aligned}$$

Soit $\underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_2^* = \underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_2^* - \underline{u}_2 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_1^*$

Soit, encore $\underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_2^* + \underline{u}_3 \underline{i}_3^* = \underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_2^* + \underline{u}_3 \underline{i}_3^* + \underline{u}_2 \underline{i}_1^* - \underline{u}_2 \underline{i}_1^*$

le réseau 3 fils imposant que, $\underline{i}_1 + \underline{i}_2 + \underline{i}_3 = 0$, c'est-à-dire $\underline{i}_3 = -\underline{i}_1 - \underline{i}_2$.

Il suffit ensuite de développer le deuxième membre,

$$\underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_2^* + \underline{u}_3 \underline{i}_3^* = \underline{u}_1 \underline{i}_1^* + [\underline{u}_2 \underline{i}_2^*] + [\underline{u}_3 \underline{i}_3^*] + [\underline{u}_2 \underline{i}_1^*]$$

Et de se rappeler que chacune des parties réelles correspond à la puissance active pour retrouver le fait que $\underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_2^* + \underline{u}_3 \underline{i}_3^*$ est égal à $\underline{u}_1 \underline{i}_1^* + \underline{u}_2 \underline{i}_2^* + \underline{u}_3 \underline{i}_3^*$, donc à la puissance totale, et ce, quelles que soient les tensions, \underline{u}_1 , \underline{u}_2 et \underline{u}_3 .

b) mesure des puissances réactives : La méthode du double wattmètre n'est plus valable ici. Par contre, comme le montage décrit au 2.8.2.1 ne fait pas intervenir le quatrième fil, on pourra l'employer sans problème, mais toujours avec les mêmes restrictions, c'est à dire qu'il faut que la source soit équilibrée.

3.3.6) Le court-circuit:

Le court-circuit est l'un des incidents majeurs qui peuvent affecter les réseaux électriques.

3.3.6.1) Définition :

Un court-circuit est une liaison accidentelle entre conducteurs à impédance nulle (court-circuit franc) ou non (court-circuit impédant). Un court-circuit peut être interne s'il est localisé au niveau d'un équipement, ou externe s'il se produit dans les liaisons, La durée d'un court-circuit est variable : auto extincteur si le défaut est trop court pour déclencher la protection, fugitif lorsque éliminé après déclenchement et réenclenchement de la protection, permanent s'il ne disparaît pas après déclenchement de la protection.

Les causes de court-circuit sont d'origines mécanique (coup de pelle, branche, animal), électrique (dégradation d'isolant, surtension), humaine (erreur de l'exploitant).

3.3.6.2) Effets des courants de court-circuit :

Les conséquences des courts-circuits sont souvent graves sinon dramatiques :

- le court-circuit perturbe l'environnement du réseau autour du point de défaut par le creux de tension brutal qu'il entraîne,
- il contraint à mettre hors service, par le jeu des protections appropriées, une partie souvent importante du réseau,
- tous les matériels et liaisons (câbles, lignes) traversés par le court-circuit subissent une forte contrainte mécanique (efforts électrodynamiques) qui peut entraîner des ruptures, une contrainte thermique pouvant entraîner la fusion des conducteurs et la destruction des isolants,
- au point de défaut se manifeste le plus souvent un arc électrique de forte énergie, dont les effets destructeurs sont très importants, et qui peut se propager très rapidement. Malgré la probabilité de plus en plus faible d'apparition d'un court-circuit dans les installations modernes, bien conçues et bien exploitées, les conséquences graves qui peuvent en résulter incitent à

tout mettre en œuvre pour détecter et éliminer très rapidement tout court-circuit.

La connaissance de la valeur du courant de court-circuit en différents points du réseau est une donnée indispensable pour définir les câbles, jeux de barres et tous matériels d'interruption et de protection ainsi que leurs réglages.

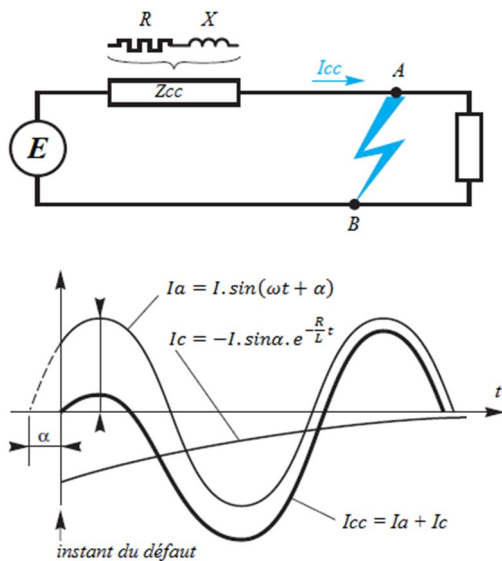


Figure (3.13) : caractérisation d'un courant de court-circuit

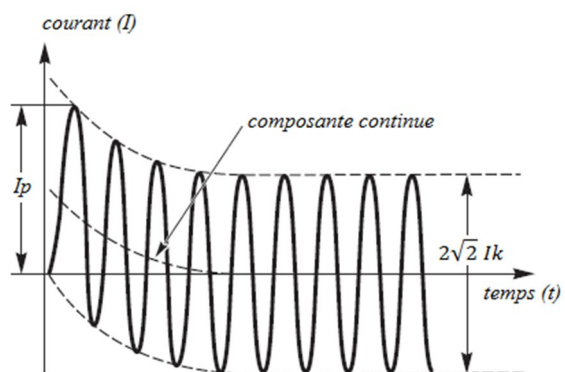


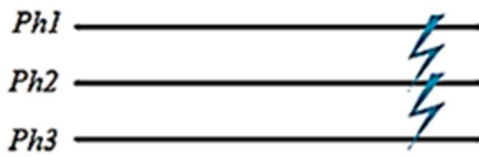
Figure (3.14) : courbe type d'un courant de court-circuit

3.3.6.3) Caractérisation des courts-circuits :

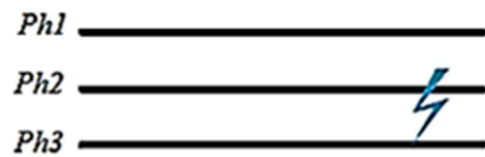
Plusieurs types de courts-circuits peuvent se produire dans un réseau électrique :

- court-circuit triphasé : il correspond à la réunion des trois phases ; il est celui provoquant généralement les courants les plus élevés (figure 3.15).
- court-circuit monophasé terre : il correspond à un défaut entre une phase et la terre ; il est le plus fréquent (figure 3.16).
- court-circuit biphasé isolé : il correspond à un défaut entre deux phases sous tension composée. Le courant résultant est plus faible que dans le cas du défaut triphasé, sauf lorsqu'il se situe à proximité immédiate d'un générateur (figure 3.17).

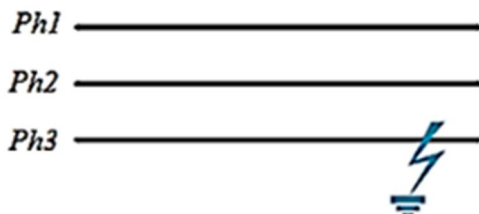
- court-circuit biphasé terre : il correspond à un défaut entre deux phases et la terre (*figure 3.18*).



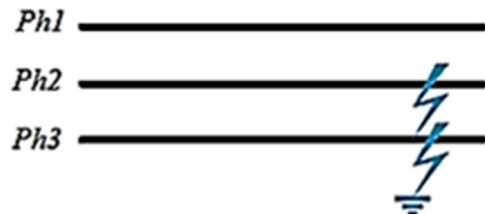
Figure(3.15): court- circuit triphasé (5% des cas)



Figure(3.16): court-circuit biphasé isolé



Figure(3.17): court-circuit monophasé (80% des cas)



Figure(3.18): court-circuit biphasé terre

Le courant de court-circuit en un point d'un réseau s'exprime par la valeur efficace (en kA) de sa composante alternative (*figure 3.14*).

La valeur instantanée maximale que peut atteindre le courant de court-circuit est la valeur de crête I_p de la première demi-alternance. Cette valeur de crête peut être beaucoup plus élevée que $\sqrt{2}$. en raison de la composante continue amortie qui peut se superposer à la composante alternative.

Cette composante continue dépend de la valeur instantanée de la tension à l'instant initial du court-circuit, et des caractéristiques du réseau. Ce dernier est défini par la puissance de court-circuit, selon l'expression :

$$S_{cc} = 3 \cdot U_n \cdot I_{cc} \quad (\text{en MVA}).$$

Cette valeur fictive n'a aucune réalité physique ; c'est une grandeur conventionnelle pratique assimilable à une puissance apparente.

3.4) Etude d'un système triphasé équilibré :

On considère un réseau triphasé de tensions U_1, U_2, U_3 sinusoïdales de fréquence 50 alimentant un récepteur (R) constitué d'un ensemble de résistance R montée en étoile en parallèle avec des inductances L. Ces inductances sont dépourvues de mutuelles entre elles.

Le système de tension est donné par :

$$\begin{cases} = \sqrt{2} \cos \\ = \sqrt{2} \sin\left[-\frac{2}{3}\right] \\ = \sqrt{2} \sin\left[-\frac{4}{3}\right] \end{cases}$$

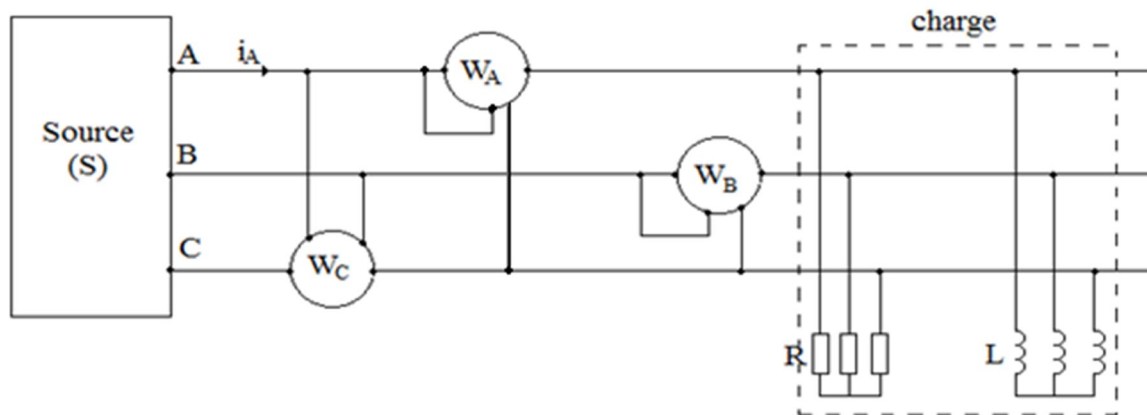


Figure (3.19) : schéma d'un système électrique équilibré.

La valeur efficace des tensions est :

$V=220$ V et les tensions entre fils de lignes valent $U=381$ V, la fréquence est de 50 Hz.

D'après le schéma on a relevé $P_A = 4400$ W et $P_B = 2200$ W

- Puissances et déphasage :

- La puissance active absorbée est :

$$P = P_A + P_B = 4400 + 2200 = 6600 \text{ W}$$

- Puissance réactive :

$$Q = \sqrt{3}(P_B - P_A) = 3810 \text{ var}$$

- Puissance apparente :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 7621 \text{ VA}$$

- Déphasage :

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{6600}{7621} = \frac{1}{6}$$

- Courant I de la ligne :

Le courant I est donné par :

$$= \frac{20}{\sqrt{3}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot \cos} = \frac{20}{\sqrt{3}} = 11,55$$

- Puissance qu'indiquera le wattmètre () :

Le système est triphasé et équilibré, le wattmètre indique :

$$= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot 2200 \cdot 11,55 \cdot \cos \phi = 2200 \cdot 11,55 \cdot \sin \phi$$

Soit une quantité égale à $\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \phi = 2200$ homogène à une puissance.

- On insère entre la source et le récepteur une batterie de condensateur de capacité C montée en triangle. Si le courant de ligne ne change pas (un ampère mètre indique la même valeur de I).

Calculant la valeur de C qui assurera cette condition.

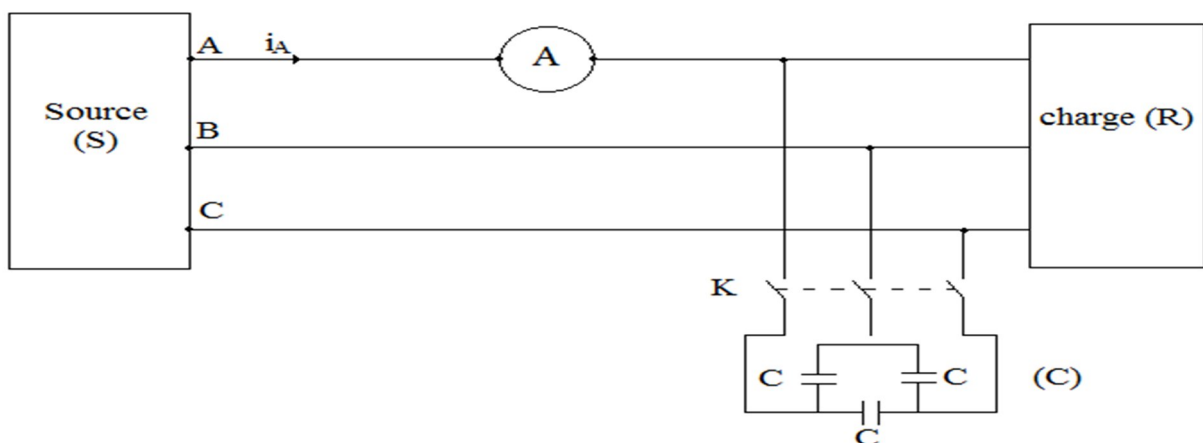


Figure (3.20) : Montage avec condensateurs montées en triangle.

Désignons par I_c le courant absorbé par la batterie de condensateur dans la phase A (courant de fils de connexion au triangle des condensateurs et non le courant dans une branche du triangle).

Si I' désigne le courant dans la phase A et I le courant dans la même phase lorsque l'interrupteur est fermé, la configuration des courants est alors celle de la figure suivante :

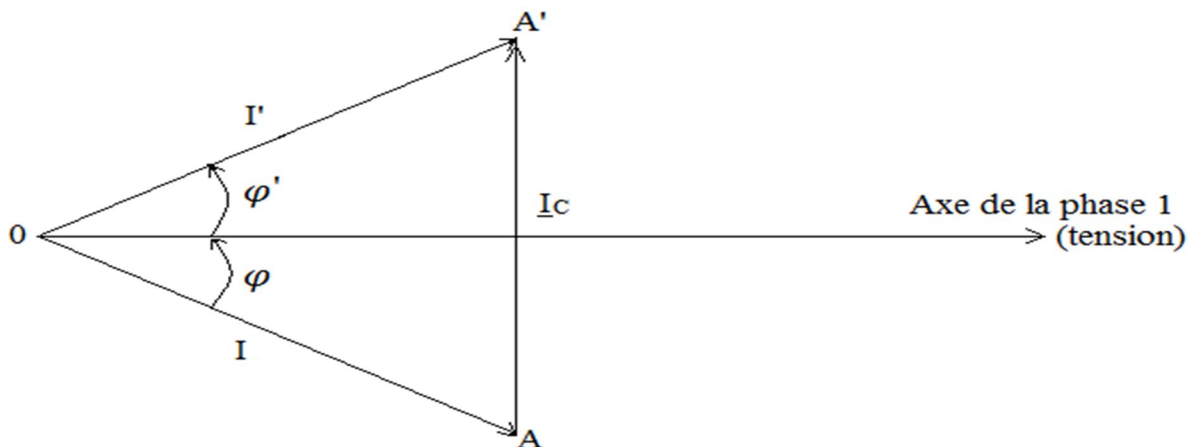


Figure (3.21) : Configuration des courants dans une phase.

Le triangle est isocèle puisque par hypothèse $I_c = I$ (il est en outre équilatéral puisque $\phi = \phi' = 60^\circ$, mais ceci est une coïncidence due aux valeurs numériques particulières de ωC).

Le courant dans une branche du triangle vaut donc :

$$I_c = I \sqrt{3} ; \quad I = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad \text{Puisque le triangle est équilatéral. Donc il vaut :}$$

$$I = 6,67 \text{ A} \quad , \text{ Ce qui donne } C = 55,7 \text{ } \mu\text{F}.$$

Les indications des deux wattmètres sont alors :

$$W_1 = U I \cos(\phi - \phi') = 2200$$

$$W_2 = U I \cos(\phi + \phi') = 4400$$

Les indications des wattmètres sont échangées.

- Les mêmes condensateurs sont maintenant montés en étoile. Voyons que devient le courant de ligne et quelle est la puissance réactive totale absorbée.

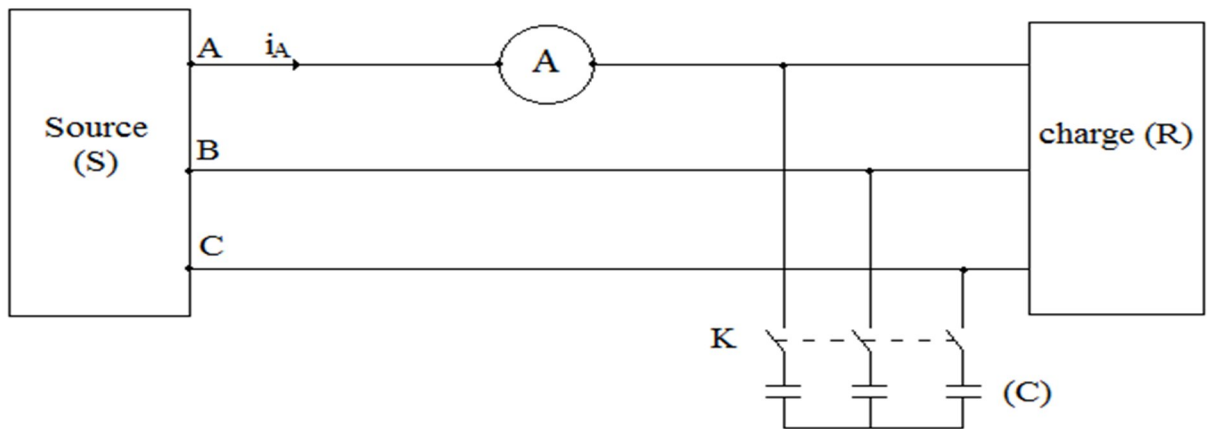


Figure (3.22) : Montage avec condensateurs montés en étoile.

Si les condensateurs sont en étoile le courant est divisé par 3.

Le diagramme précédent devient :

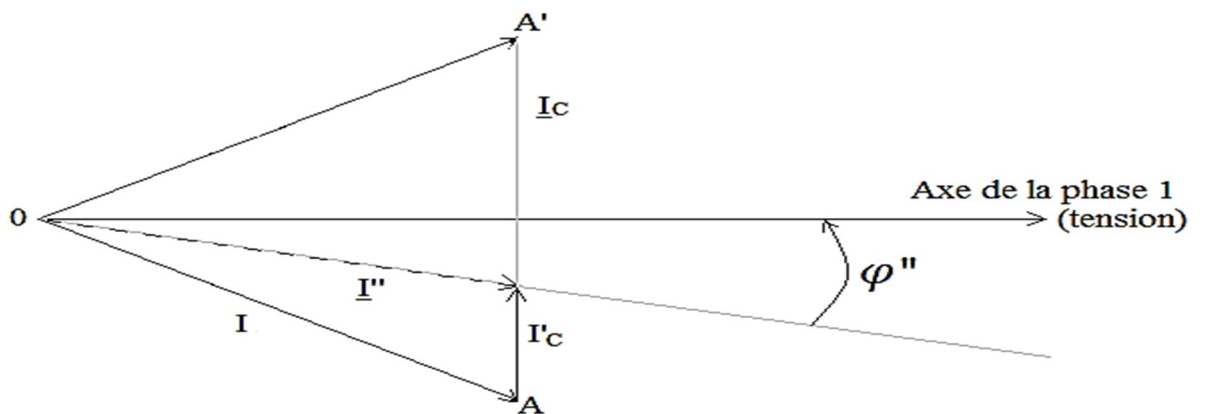


Figure (3.23) : Configuration des courants dans une phase.

On peut alors écrire :

$$\begin{aligned} \cos \varphi'' &= \cos \varphi = 10 \\ \sin \varphi'' &= \sin \varphi = 1,925 \end{aligned}$$

On en déduit $I = 10,2$ et $I'' = \sqrt{3} I_c \cos \varphi'' = 1270$.

3.5) Système triphasé déséquilibré au niveau de la charge :

On remplace les charges précédentes par un système de trois impédances montées en étoile dont les valeurs sont :

$$\begin{aligned} &= + \\ &= + \\ &= \end{aligned}$$

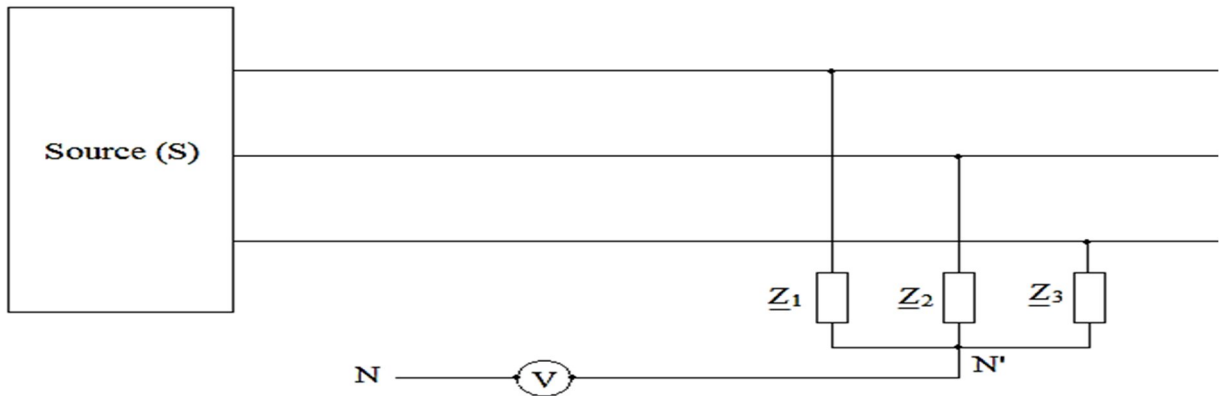


Figure (3.24) : Système de charge déséquilibré.

- , entre le point commun des impedances de charge et le point neutre de la source supposée toujours triphasé, directe et équilibré.

On prend : $= 16,5 \Omega$

$= 9,53 \Omega$

L'application du théorème de Millman au circuit permet le calcul direct de la

$$- = \frac{- + - + -}{2 + 1} = \frac{- + - + -}{2 + -}$$

Après simplification et en remarquant que $- = -(- + -)$

Conduit à : $- = -$ soit numériquement :

$$= 110$$

- Supposons que est fixe et variable, voyons comment varie la valeur efficace :

Le module de l'expression complexe précédente permet d'avoir l'expression analytique de en fonction de : paramètre variable.

$$= \frac{220}{\sqrt{9 + 817,4}} = 220 \frac{1}{\sqrt{826,4}}$$

$$= () = 220 \frac{1}{\sqrt{826,4}}$$

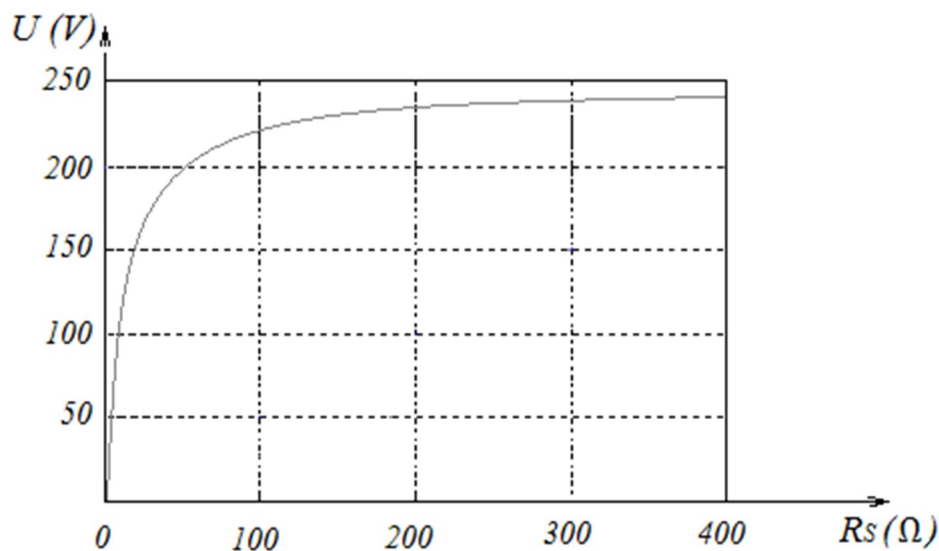


Figure (3.25) : représentation de la tension entre et .

Il existe une asymptote horizontale pour $U = 220 \text{ V}$; ainsi $U(400) = 219,4 \text{ V}$, valeur très proche de 220 V .

- Prenons maintenant fixe et variable de $-\infty$ à $+\infty$ voyons le lieu de l'extrémité du vecteur associé à l'affixe z .

L'expression complexe de z peut se mettre sous la forme $x+jy$:

$$- = - \frac{+}{+}$$

On pose $m = -$ paramètre sans dimension.

devient : $U_{NN'} = - \frac{U_{NN}}{m}$

Avec $U_{NN'} = - \frac{\sqrt{3}}{2} V$
 $U_{NN} = - \frac{\sqrt{3}}{2} V$

L'élimination de m entre ces deux expressions conduit à :

$2(x + \frac{\sqrt{3}}{2}) + y - \sqrt{3} = 0$ qui est l'équation d'un cercle centré en $(-\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2})$, ce point est le milieu du vecteur AB dans le plan de Fresnel des tensions.

Le rayon du cercle est $V/2$ d'où la figure :

D'où la figure :

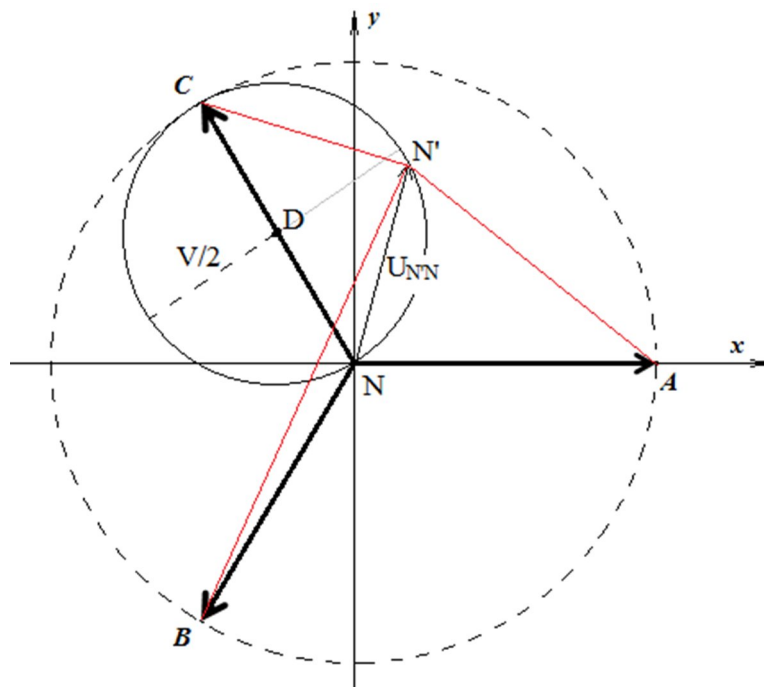


Figure (3.26) : Représentation du lieu de N' dans le plan de Fresnel : cercle de centre D et de rayon $V/2$.

Les tensions simples équilibrées sont représentées par les vecteurs dont l'origine est N. Pour une valeur quelconque de m (donc de ωt) le potentiel du point commun est en N' et les tensions simples sont alors les valeurs $N'A$, $N'B$, $N'C$.

3.6) Système triphasé déséquilibré par la source :

Supposons que par suite d'une erreur de câblage la source triphasée est montée suivant ce schéma de la figure suivante :

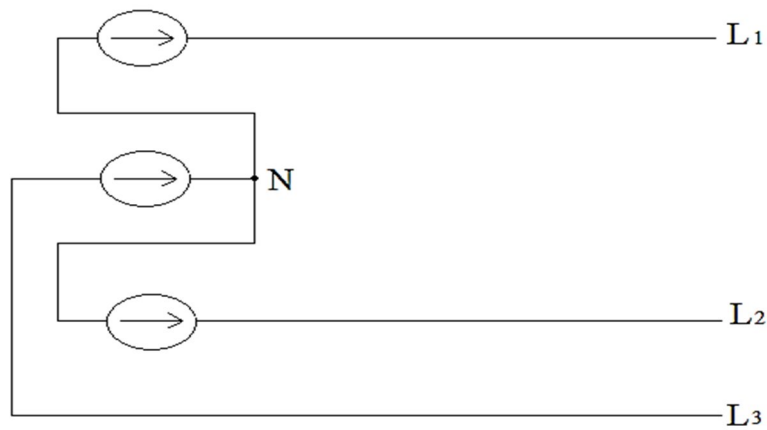


Figure (3.27) : Erreur de câblage d'une source triphasée.

Dans cette configuration le réseau de l'alimentation est distribué via les phases 1,2 et 3, dans ce cas les tensions du réseau sont définies à partir des tensions précédentes (partie A) par :

=

=

= -

On note « a » la racine cubique de l'unité.

$$a = \left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j\right)$$

- Calculons les composantes symétriques des tensions \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_3 .

On remarque que $\underline{v}_N =$

$$\underline{v}_N =$$

$$\underline{v}_N = -$$

Alors on aura :

$$\underline{v}_N = \frac{1}{3} \underline{v}_A + \underline{v}_B + \underline{v}_C = -\frac{2}{3}$$

$$\underline{v}_N = \frac{1}{3} \underline{v}_A + \underline{v}_B + \underline{v}_C = \frac{1}{3}$$

$$\underline{v}_N = - \underline{v}_A + \underline{v}_B + \underline{v}_C = -$$

(Entre N et N' il n'y a pas d'impédance, le calcul de \underline{v}_N ne présente aucun intérêt).

- On branche le même récepteur (R) sur le réseau ainsi constitué, calculons les courants de phases :

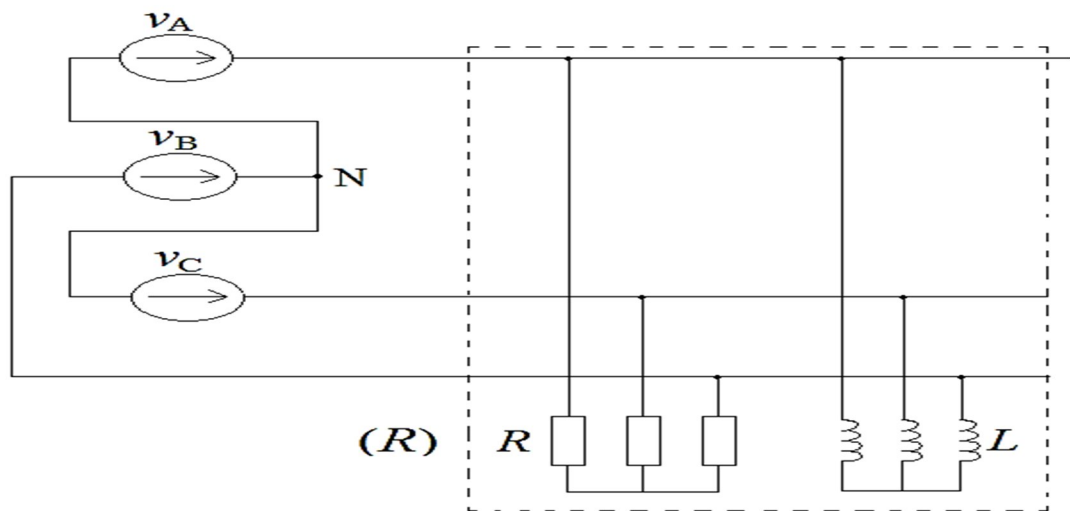


Figure (3.28) : Schéma d'un réseau perturbée par la source.

Le réseau de réception étant équilibré et symétrique, en outre purement passif, l'impédance directe et l'impédance inverse sont égales à \underline{Z} .

Les composantes directes et inverses du courant sont donc :

$$\underline{i}_d = \frac{\underline{v}_d}{\underline{Z}}, \quad \underline{i}_i = \frac{\underline{v}_i}{\underline{Z}}$$

$$\underline{v}_A = \underline{v}_B = \underline{v}_C (1 - 2 \dots)$$

$$\underline{v}_B = \underline{v}_A + \underline{v}_C = \underline{v}_C (1 - 2)$$

$$\underline{v}_C = \underline{v}_A + \underline{v}_B = \underline{v}_C$$

Remarque : Un calcul direct peut être fait, en effet on peut voir d'après la seconde partie que :

$$\underline{v}_C = \frac{\underline{v}_A + \underline{v}_B + \underline{v}_C}{3} = \frac{2}{3} \underline{v}_A$$

Et

$$\underline{v}_{AB} = \underline{v}_A - \underline{v}_B = \frac{2}{3}(3 + 2 \dots) = \frac{2}{3}(1 - 2 \dots)$$

$$\underline{v}_C = \frac{2}{3}(1 - 2 \dots)$$

Ce qui conduit au même résultat.

On réalise sur le circuit un filtre à composante inverse :

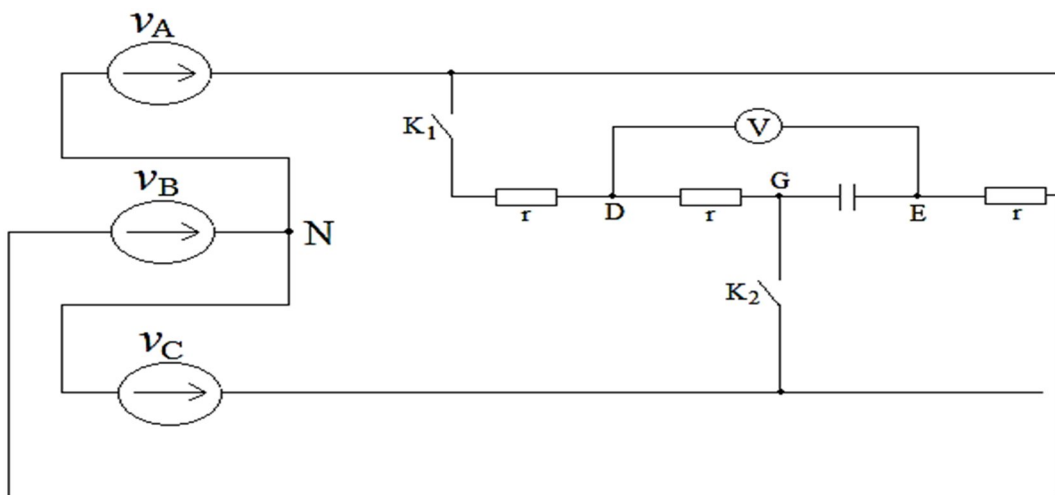


Figure (3.29) : Schéma avec filtre à composante inverse.

On veut réaliser l'égalité : $r \cdot C \cdot \omega \cdot \sqrt{3} = 1$ avec $\omega = 2007 \Omega$

La tension entre D et G est donnée par :

$$= \frac{1}{2}$$

La tension entre G et E est donnée par :

$$= \frac{1}{1 + \omega} = \frac{1}{1 + \sqrt{3}} = -\frac{1}{2}$$

La somme de ces tensions donne :

$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2} + - + - = \frac{3}{2}$$

Donc : $= 110$.

3.7) Etude de l'Influence de la puissance de court-circuit sur les chutes de tensions dans les lignes électriques :

La connaissance de la puissance de court-circuit en tout point d'un réseau donné est nécessaire pour déterminer le matériel de protection dans le cas de la planification, ainsi que pour assurer une meilleure exploitation du réseau, il est indispensable de contrôler continuellement la valeur de cette puissance qui varie en fonction de:

- La nature des éléments qui constituent le réseau: alternateurs, transformateurs, lignes, câbles...
- La structure du réseau: réseau comportant des lignes simples ou des lignes multiples.
- Le mode d'exploitation du réseau: neutre isolé ou neutre relié à la terre.
- L'impédance de défaut.
- Le type de court-circuit.
- La configuration du réseau qui change continuellement avec le temps.

3.7.1) Définition de la puissance de court-circuit :

La puissance de court-circuit d'un réseau est une valeur dont l'ordre de grandeur est connue des électriciens, elle permet de connaître le niveau de l'intensité de courant de court-circuit (triphase symétrique) d'un réseau, elle donne une image de la sensibilité d'un réseau à une perturbation (plus elle sera élevée, plus le réseau sera insensible). De plus sa valeur, convertie dans le système p.u. est équivalente au courant de court-circuit dans la base choisie, elle vaut encore l'inverse de la réactance par laquelle le réseau peut être remplacé pour une étude de court-circuit. Elle était utilisée comme base de dimensionnement des disjoncteurs, mais en fait c'était une erreur car pour ces derniers les contraintes de courant (pouvoir de coupure) et de tension doivent être considérées séparément.

Sa définition est la suivante :

$$= \sqrt{3} \quad = \sqrt{3}$$

C'est une définition faisant intervenir la tension nominale et le courant de court-circuit, qui ne peuvent simultanément exister, bien entendu. Il n'y a pas de facteur de puissance, puisqu'en régime de court-circuit, le courant est déphasé de pratiquement 90° par rapport à la tension.

Cette puissance est fictive, car elle ne circule pas dans le défaut, mais elle permet de:

- Connaître les contraintes auxquelles est soumis le disjoncteur qui, lors de la coupure du courant I_{cc} , doit faire face à une tension de rétablissement liée a .
- Simplifier certaines expressions pratiques, et en particulier celle qui nous intéresse ici et qui conduit à limiter la puissance appelée par un usager en fonction des chutes de tension admissibles.

- Les valeurs des courants de défaut mono et biphasés correspondantes sont en général plus faibles sauf pour le défaut monophasé quand l'impédance homopolaire devient inférieure à l'impédance directe.
- La valeur maximale du courant de défaut n'est pas localisée aux bornes des machines les plus importantes (groupe nucléaire par exemple) mais plutôt au jeu de barres en certains postes regroupant les contributions de plusieurs machines.

3.7.2) Utilité du calcul de la puissance de court-circuit :

Le calcul de la puissance de court-circuit est très important et nous permet essentiellement de bien choisir :

- Les schémas de connections des centrales, des sous stations et des réseaux électriques.
- Le dimensionnement des disjoncteurs, des appareils électriques, des jeux de Barres, des isolations et des câbles ainsi que le dimensionnement convenable des prises de terre.
- Le réglage des différentes protections pour obtenir la sélectivité optimale et ne pas perturber la stabilité du réseau.

Cette puissance de court-circuit calculée sert comme une carte à laquelle les entreprises s'y reportent chaque fois qu'elles ont besoin de connaître la valeur de la puissance de court-circuit en un point donné du réseau.

3.7.3) Evolution des puissances de court-circuit :

Tout renforcement d'un réseau que ce soit par adjonction de générateurs supplémentaires ou de lignes ou transformateurs d'alimentation, augmente l'admittance du réseau et sa puissance de court-circuit en tous les points placés « à l'aval » du renforcement. Les disjoncteurs doivent donc être périodiquement ajusté

à ces augmentations de puissance de court-circuit. Cela n'est qu'un faible inconvénient pour les disjoncteurs du réseau qui peuvent être récupérés et réinstallés dans des postes ou la puissance de court-circuit ne dépasse pas leur pouvoir de coupure. Cependant dans les zones très denses, l'augmentation des pouvoirs de coupure des disjoncteurs devient très onéreuse, et l'on cherche à la freiner par un découpage du réseau en tranches conçues pour garder toutefois un nombre d'alimentations indépendantes suffisant pour garantir la sécurité souhaitée.

3.7.3.1) Exemples d'application :

On étudie le cas d'une ligne triphasée unique reliant une source de tension fixe à un récepteur unique. Consommateur de puissance active et réactive.

La source triphasée étoilé a une f.e.m sinusoïdale de valeur efficace $E=12,09$ KV par phase et le récepteur (usine) absorbe une puissance active $P=24,30$ MW et une puissance réactive $Q=14,03$ MVAR.

La ligne tri filaire a une résistance $R=180$ m Ω par phase et une réactance cyclique (inductive) $X=1,026$ Ω par phase.

Cherchons l'expression de la puissance de court-circuit et de la chute de tension dans la ligne.

3.7.3.2) Schéma équivalent :

Le schéma équivalent représentatif de l'ensemble est le suivant où P et Q sont les puissances active et réactive par phase.

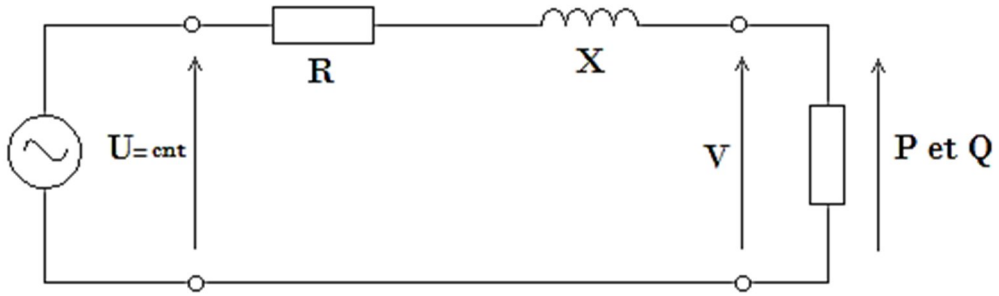


Figure (3.30) : Schéma équivalent par phase.

- Cherchons le déphasage $\phi = \arg(V) - \arg(I)$ entre le courant et la tension aux bornes de la charge et le facteur de puissance correspondant :

Le déphasage est lié à la charge, et en régime sinusoïdale on a :

$$\text{AN : } \cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} = \frac{1}{\sec \theta} = \cos \theta$$

- Diagramme de FRESNEL tension-courant représentatif du fonctionnement en prenant la tension v comme référence de phase.

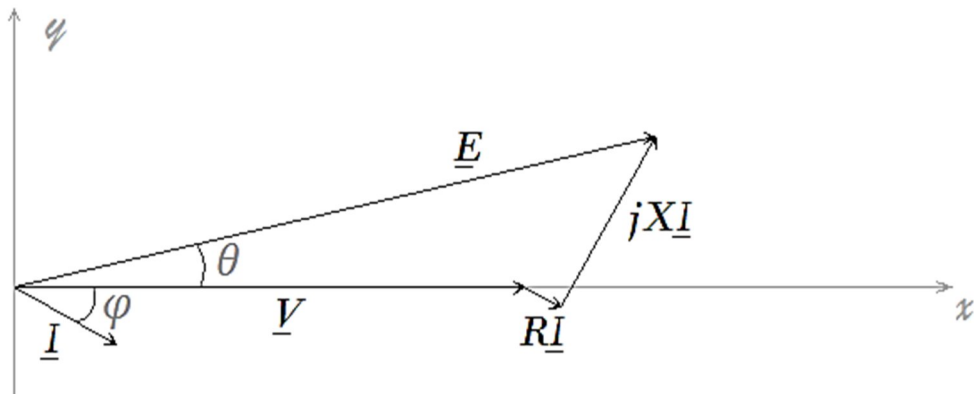


Figure (3.31) : Diagramme de Fresnel.

- valeur efficace V de la tension V(t) :

la projection des vecteurs sur les axes donne :

$$\begin{aligned} \cos \phi &= \cos \theta + \sin \theta \sin \alpha \\ \sin \phi &= \sin \theta - \cos \theta \sin \alpha \end{aligned}$$

Ce qui nous donne :

$$= (\cos \theta + \sin \theta \sin \alpha) + (\sin \theta - \cos \theta \sin \alpha)$$

$$D'où : V = \frac{E - (\cos \theta - \sin \theta \sin \alpha)}{\sin \theta - \cos \theta \sin \alpha}$$

AN : V = 11,531 Volts et U = 19,972 Volts.

La relation usuelle approchée donne :

$$E - V = \cos \theta + \sin \theta \sin \alpha = 11,548$$

Soit une tension composée U = 20 KV.

La variation relative correspondante est de : $\frac{U - V}{U} = \frac{19,972 - 20}{20} \cong -0,0014$

$$\frac{U - V}{U} = 0,0485 = 5\%$$

On pourra donc admettre que :

$$\frac{U - V}{U} \text{ est petite devant } E \text{ et } V.$$

- Expression de la puissance de court-circuit au niveau de la charge en fonction de E, R, et X.

Par définition : $\tan \phi = -\frac{X}{R}$

$$\phi = 80^\circ$$

Le courant de court-circuit est :

$$I_{cc} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}} = 11,61$$

La puissance de court-circuit est donner par :

$$= 3 \quad = 421$$

$$= 3 \quad = 3 \quad \frac{3}{\sqrt{1 +}}$$

$$= 3 \quad \frac{1}{+ -}$$

$$= \frac{3}{1 +} \frac{1}{+}$$

$$= \frac{3}{1 +} \cos$$

- Expression de la chute de tension relative :

$$= \cos + \sin$$

On a: $= \cos = \sqrt{3}$

$$= \sin = -$$

$$= \cos = -$$

$$= \sin$$

$$= \frac{\cos}{\cos} \cos + \frac{\sin}{\sin} \sin$$

$$= - + -$$

$$= \cos - + \sin -$$

$$= - (\cos + \sin)$$

$$= \frac{3}{1 +} (\cos + \sin)$$

On peut approcher cette formule par: (\cong).

La projection vectorielle sur les axes Ox et Oy donne :

$$\begin{aligned} &= + \\ &= + \end{aligned}$$

- Expression de P et Q et de $\cos \phi$ et $\sin \phi$ en fonction de ϕ et ϕ .

$$\begin{aligned} &= \\ &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 3 \cos \phi = 3 \sin \phi \\ &= 3 \sin \phi = 3 \cos \phi \end{aligned}$$

Cherchons maintenant une relation liant la valeur efficace V en fonction de

$P, Q, R, X, et E$.

Nous avons : $V^2 = (R^2 + X^2) I^2 + (P^2 + Q^2) / I^2$

En développant on aura :

$$V^2 = R^2 I^2 + 2 R X I^2 \cos \phi + (P^2 + Q^2) / I^2$$

En faisant apparaitre les puissances :

$$V^2 = R^2 I^2 + 2 R X I^2 \cos \phi + (P^2 + Q^2) / I^2$$

Où : $\cos \phi = \frac{P}{S}$

D'où la relation :

$$V^2 = R^2 I^2 + 2 R X I^2 \frac{P}{S} + (P^2 + Q^2) / I^2 = 0$$

Cette relation est de la forme :

$$V^2 + 2 R X I^2 \frac{P}{S} + (P^2 + Q^2) / I^2 = 0$$

Avec : $\frac{P}{S} = \cos \phi$
 $V^2 = (R^2 + X^2) I^2 + (P^2 + Q^2) / I^2$

Application :

Prenons $E = 12,09 \text{ KV}$; $X = 14,03 \text{ MVAR}$; P variable.

- Traçons le graphe de V en fonction de P .

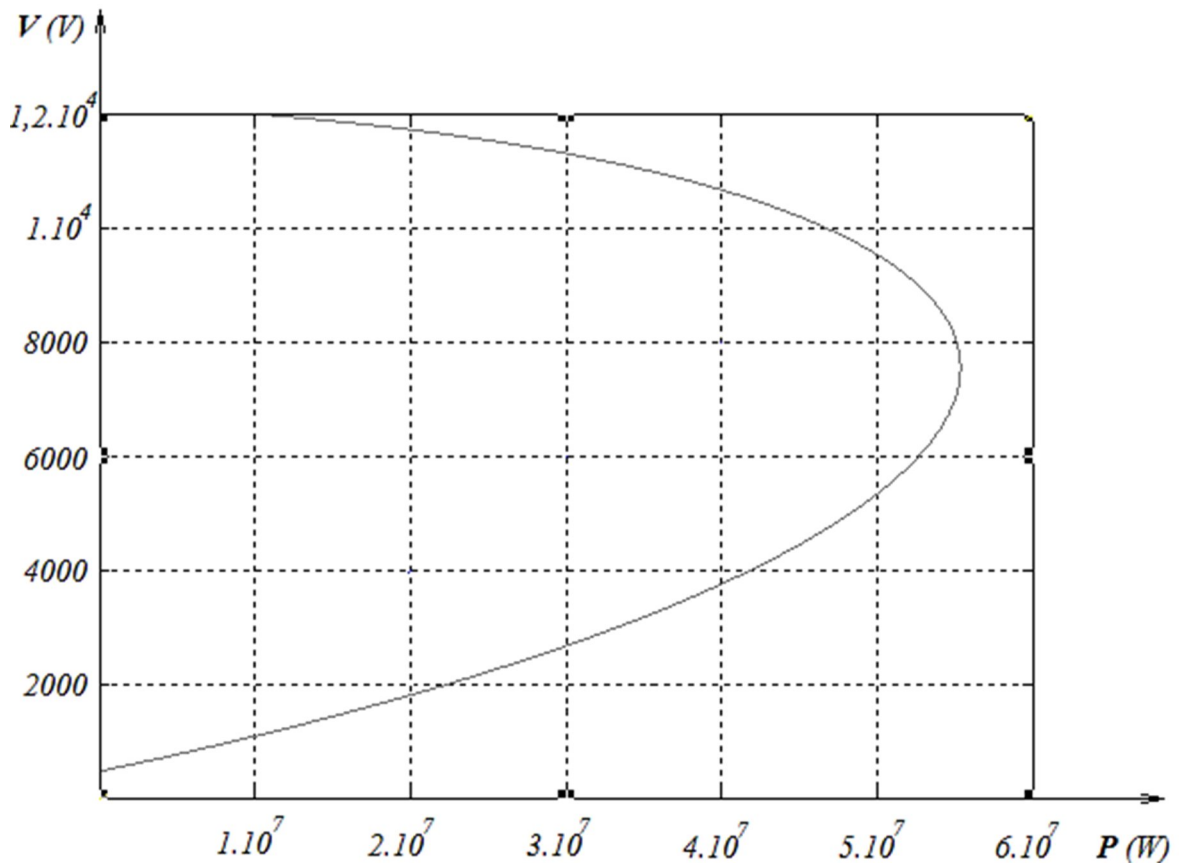


Figure (3.33) : Graphe de la tension en fonction de la puissance.

Sur le graphe on note quelques points remarquables :

- L'ordonnée à l'origine :

Pour $P = 0$ (aucune puissance active absorbée mais attention la puissance réactive n'est pas nulle !)

On a une tension $V = 11,68 \text{ KV}$ valeur inférieure aux $12,09 \text{ KV}$ de la source.

Il y a un point à tangente verticale correspondant à $P = 5,6.10^7$ environ et à une tension de $7,8 \text{ KV}$: C'est le point critique. On ne peut espérer transférer une puissance supérieure à cette valeur de la source vers la charge.

La partie supérieure de la courbe correspond à une racine de l'équation bicarrée précédente et la partie inférieure à l'autre racine (notons que la partie inférieure doit correspondre à un point de fonctionnement probablement instable, cela doit dépendre de la façon dont il est atteint et de la nature des fluctuations de la charge).

En posant Δ et Δ les racines intéressantes, la première racine donne pour la

valeur positive (seule intéressante) $= \frac{-\dots - \dots + \sqrt{\Delta}}{2}$ et pour l'autre

$$= \frac{-\dots - \dots - \sqrt{\Delta}}{2}.$$

La puissance critique est obtenue en écrivant que l'équation bicarrée comporte une racine double $\Delta = 0$ d'où :

$$-2 \dots - \frac{\dots}{2} - \dots - \frac{\dots}{2} + (\dots + \dots) = 0$$

Numériquement il vient : 56 MW

Prenons $P = 90 \text{ MW}$, déterminons la tension entre les fils de la ligne au niveau de la charge, le courant absorbé I , la chute de tension en ligne et la chute relative de tension.

Si $P = 90 \text{ MW}$, les racines de l'équation sont telles que $\Delta = -62,88 \cdot 10^3$;

$$= 1000,3 \cdot 10^3, \text{ d'où } \Delta = 10,827 \cdot 10^3.$$

On déduit par ailleurs :

$$(\dots + \dots)^{-1} = 30,36 \quad \text{D'où } \Delta = 2804 \quad \text{et } \Delta = - \dots = 1263 \quad \text{donc}$$

$\Delta = 11,7 \%$ La chute de tension est très importante.

Les pertes Joules étant importantes, nous voulons que cette chute de tension en ligne ne dépasse 3% de la puissance active P .

Voyons la puissance maximale transmissible avec ce nouveau critère.

Le calcul des pertes Joules est immédiat à partir de la valeur numérique de I .

$$= 0,18 \cdot 2804 = 1,42 \text{ MW.}$$

Le rapport $\frac{P_j}{P} = 4,72\%$: les pertes sont supérieures à 3% donc trop importantes.

Pour déterminer la puissance maximale suivant ce critère, il faut reprendre la démarche précédente.

Pour une valeur P il y a une valeur de la tension U déterminé par :

$$U = \sqrt{\frac{P}{3} + \sqrt{\Delta}}$$

Ayant U on détermine le courant par : $I = \frac{P}{\sqrt{3}U}$, d'où l'expression des pertes

Joules : $P_j = 3RI^2 = \frac{P^2}{U^2}$, dont le tracé en fonction de P peut être effectué

conjointement à celui de $U = 0,03$.

L'intersection nous fournit la puissance P maximale :

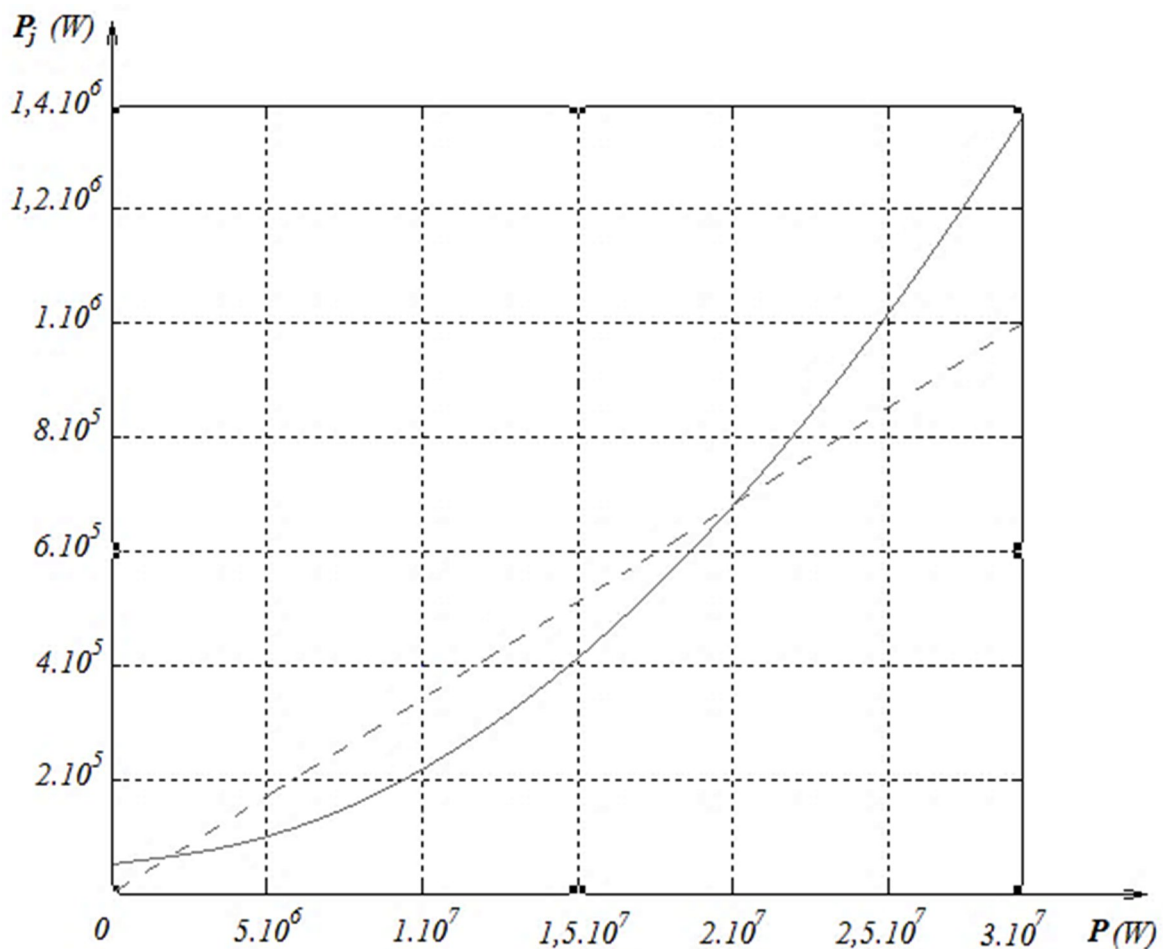


Figure (3.34) : Variation des pertes Joules avec P , puissance transmise.

La puissance maximale correspond à la seconde intersection : $P = 20$.

➤ Si la puissance réactive consommée tombe à zéro on aura :

$$= -\frac{1}{2} = -67,684.10$$

$$= (\quad + \quad) = 9,77.10$$

La tension devient $V = 11301$ volt et $\Delta V = 4\%$ valeur plus faible mais reste encore inacceptable.

Le diagramme de la figure précédente devient celui de la figure suivante et il est possible de constater que la valeur de P maxi correspondante à 3% de pertes Joules est de 22,5 MW, ce qui est supérieur aux 20 MW précédentes mais ça reste insuffisant.

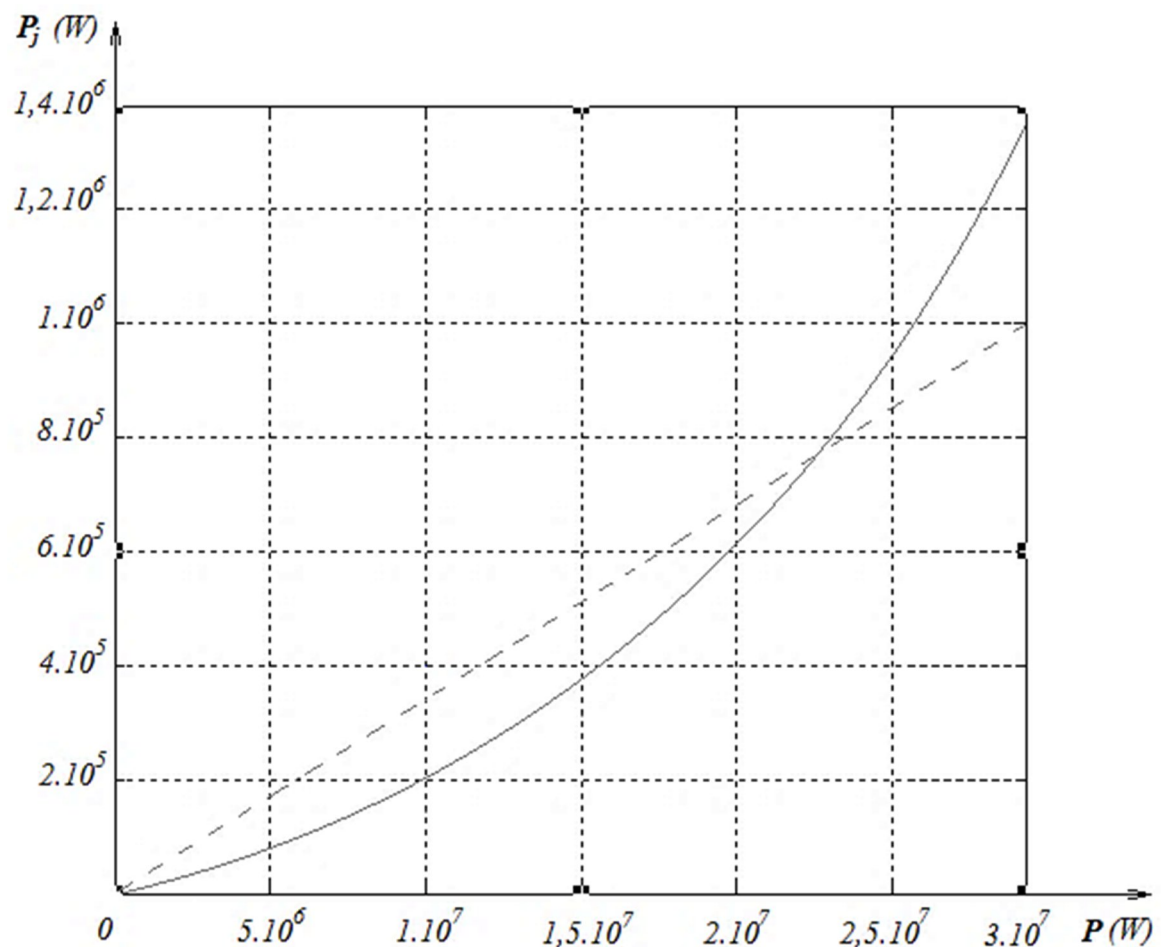


Figure (3.35) : Détermination des pertes Joules dans le cas où la puissance réactive est nulle.

L'intersection permet de déterminer la plage où la puissance perdue par l'effet Joule reste inférieure à 3% de la puissance transmise.

Application :

On suppose que $\alpha = 24,30$, $\beta = 14,03$ et prenons E variable.

- Montrons qu'il est nécessaire d'avoir une $f-e-m$ E supérieur à une valeur pour assurer le transfert de puissance à travers la ligne.

Il y a une puissance effectivement transmise pour un couple P, Q déterminer si Δ est positif pour que l'équation bicarrée ait des racines positives.

La condition s'écrit : $\Delta(\alpha, \beta, E) > 0$.

Le tracé de $\Delta(\alpha, \beta, E)$ renseigne sur l'existence d'une valeur de E qui rend nul ce discriminant :

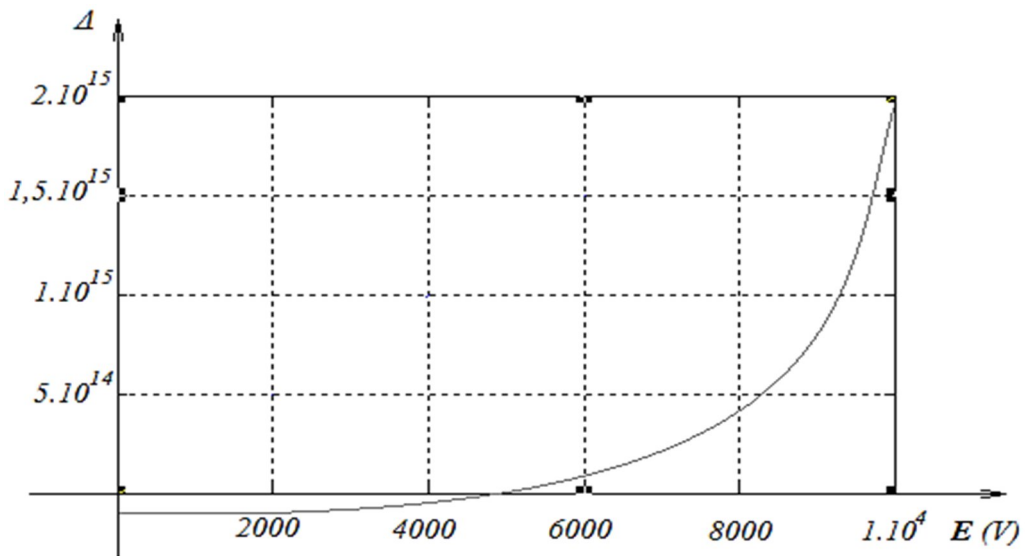


Figure (3.36) : Loi de variation de Δ en fonction de E .

Loi de variation de Δ en fonction de E :

Il existe une valeur de E entre 5 KV et 6 KV qui est critique.

La condition d'existence des racines réelles peut se mettre sous la forme :

$$\Delta > \overline{(\alpha + \beta)(\alpha - \beta)}$$

D'où la courbe limite correspond à la valeur de E minimum :

$$> 2 + + \overline{(\quad + \quad)}(\quad + \quad)$$

- Evolution de $\dots = (\dots)$: $\dots =$

Le tracé de l'évolution de \dots en fonction de la puissance réactive montre que pour des valeurs positives de Q , la courbe est fortement croissante : l'importance est la nécessité de la compensation est ainsi mise en évidence.

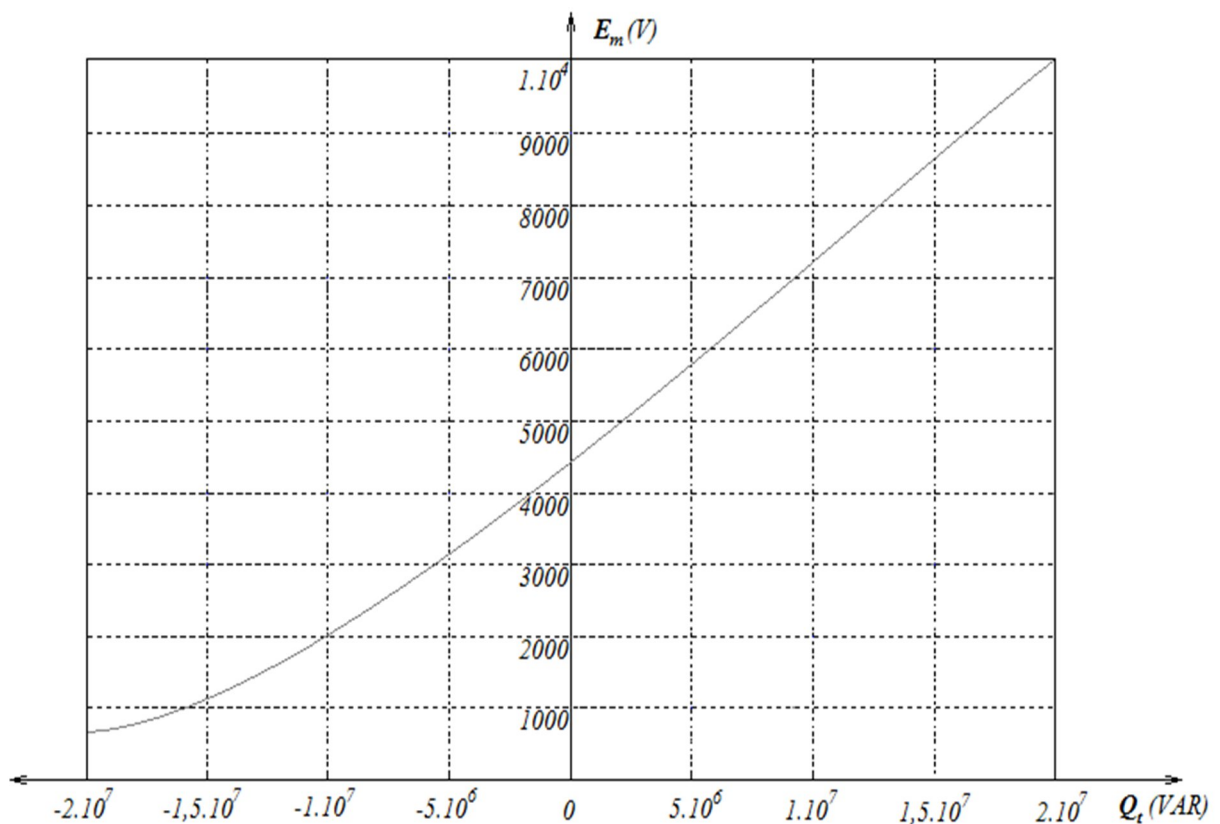


Figure (3.37) : Loi de variation de E_m en fonction de Q_r .

On notera la croissance très forte de la fonction dès lors qu'il y a consommation de la puissance réactive au niveau de la charge.

Dans le cas où la puissance réactive est fournie par le dipôle récepteur ($\cos \phi < 0$) on voit bien l'effet « stabilisateur », il n'est pas nécessaire de surexciter la source pour assurer le transfert d'énergie.

Application :

Supposons maintenant que $\cos \phi = 24,30$, et la f-e-m $E = 12,09$ et que la puissance réactive évolue. Voyons la variation de, $U = ()$, U désigne la tension à la borne du récepteur.

Le tracé de U en fonction de Q est obtenue à partir de celui de,

$$U = \sqrt{E^2 - \Delta} + \sqrt{\Delta}$$

Avec : $\Delta = \sqrt{3}$.

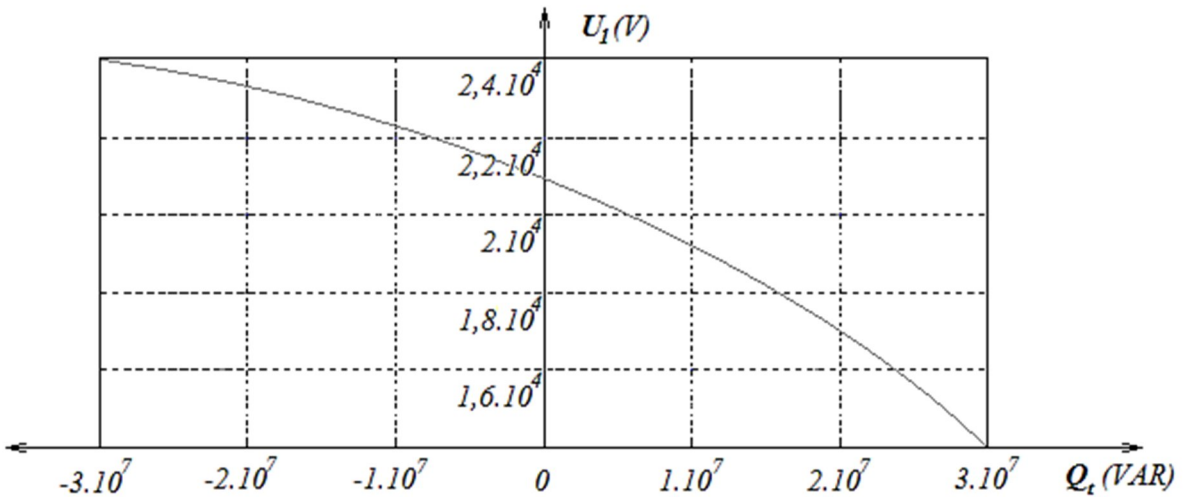


Figure (3.38) : Loi de variation de U en fonction de Q.

Le tracé de U en fonction de Q fait apparaitre des propriétés assez semblable à celles de $()$.

La chute de tension évolue assez fortement dès lors que la puissance réactive est « consommée ».

Pour $\cos \phi = -2,1$ on a $\Delta \cong 21$

Pour $\cos \phi = 15,7$ on a $\Delta = 18$

3.8) Conclusion :

Les réseaux électriques sont très pollués car ils sont soumis à de multiples agressions d'origines diverses dans le même temps, les exigences de qualité du produit « électricité » ainsi que de sûreté de fonctionnement des matériels électriques et électroniques, que ce soit pour la production, la gestion ou le commerce, sont de plus en plus fortes.

4.1) Introduction :

L'étude des réseaux électriques a toujours fait l'objet d'un grand intérêt de la part des chercheurs. C'est parfaitement compréhensible si on constate son importance dans la gestion économique de la production électrique et du rôle traditionnel de transport et de distribution visant à assurer une alimentation électrique convenable et sécurisée à la clientèle. La planification du réseau de grand transport doit être à même de réaliser le compromis optimal entre le coût de l'optimisation du réseau et les gains qu'ils permettent, tant en matière de dépenses de combustibles qu'en amélioration de la qualité du service. Malheureusement, les problèmes à résoudre sont trop complexes ; il faut donc procéder par approximations et itérations successives en manipulant des sous problèmes plus simples.

Ce chapitre consiste à la simulation par SIMULINK du fonctionnement du réseau de distribution HT. Ceci s'est fait par l'établissement d'un modèle pouvant tenir compte de la distribution de l'énergie entre les différents éléments du réseau HT dans des conditions anormales et aléatoires de fonctionnement.

Pour cela il faut envisager les principaux scénarios critiques (tels que court-circuit, perte d'énergie mécanique, perte de source électrique, variation de charge) et de prédire le comportement du réseau face à ces perturbations.

4.2) Développement du modèle SIMULINK général du réseau électrique à l'état normal (équilibré):

Le modèle du réseau électrique est représenté sur la (*Figure 4.1*).

Il comprend :

- Une source de tension pour chaque phase.
- Deux blocs de mesure de courant et tension triphasée.
- Un bloc de mesure de la puissance active et réactive.
- Une charge RL

- Des blocs *Scope* pour l'observation des courants des tensions et de la puissance active et réactive.
- Et un bloc *display*.

➤ Les paramètres mis en jeu sont :

- Tension des sources : $220\sqrt{2}$ [V]
- Fréquence de ligne : 50 [Hz]
- Puissance active : 6600 [W]
- Puissance réactive : 3810 [VAR]

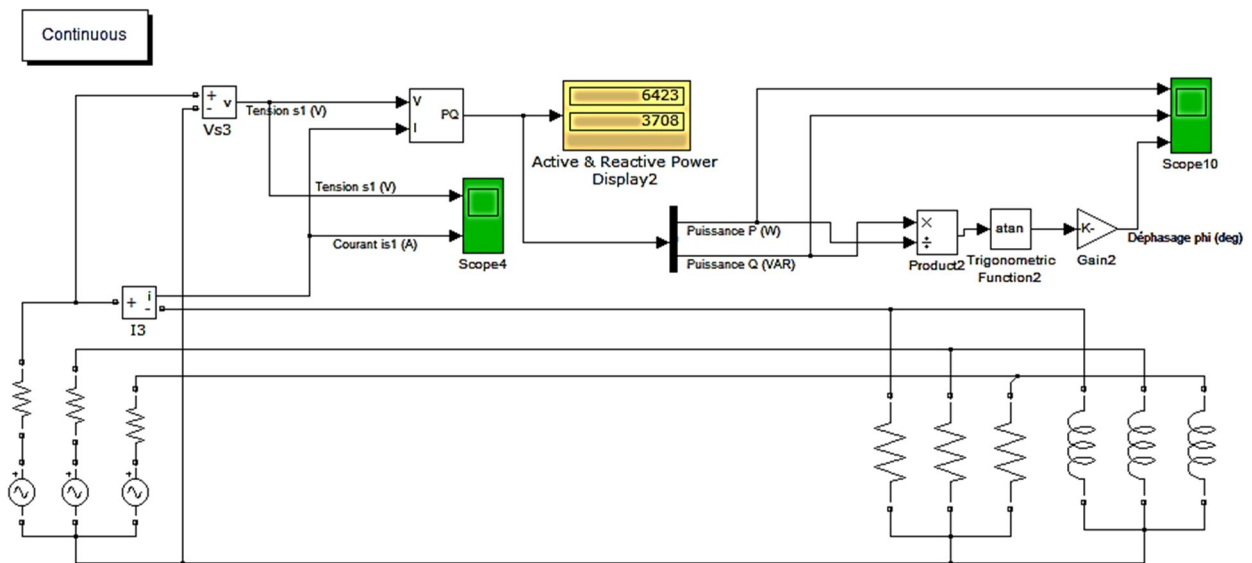
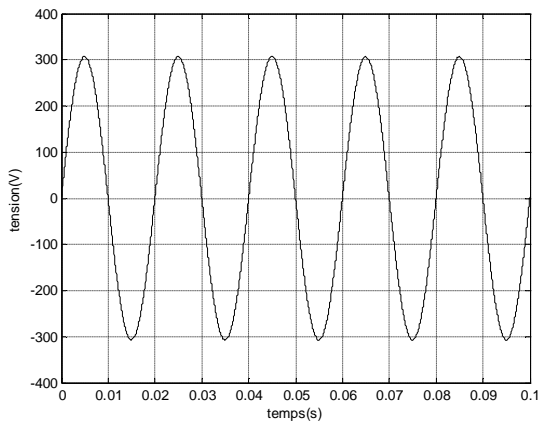
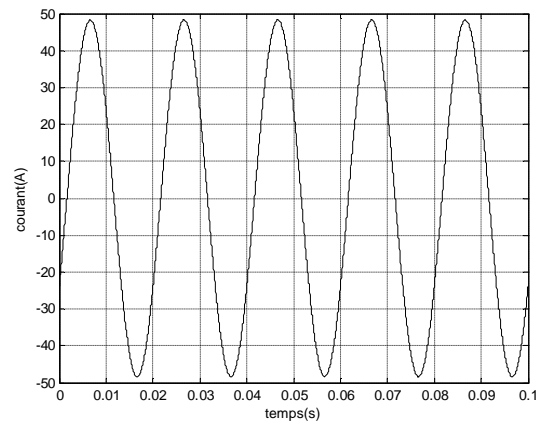


Figure (4.1) : Model virtuel général du réseau électrique.

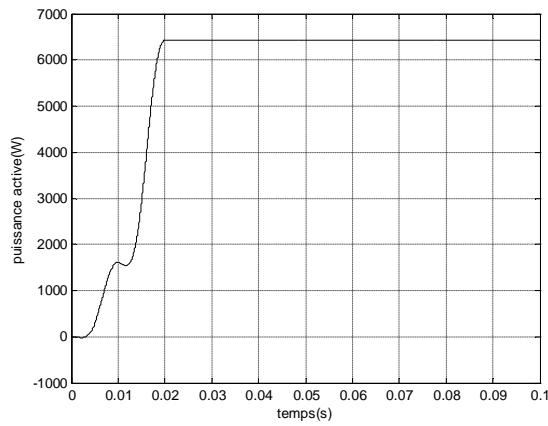
4.2.1) Résultats de la simulation :



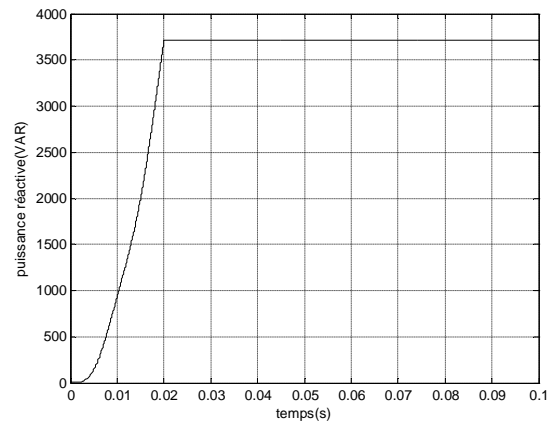
Tension (V)



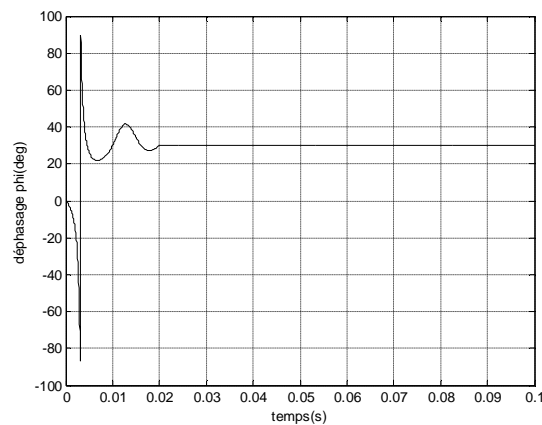
Courant (A)



Puissance active (W)



Puissance réactive (VAR)



Déphasage phi (deg)

4.2.2) Interprétation des résultats :

- On remarque que la tension et le courant sont purement sinusoïdaux.
- Pour le modèle général équilibré, nous constatons que les grandeurs du réseau suivent parfaitement leurs grandeurs théoriques en régime permanent avec des petites perturbations en régime transitoire. Nous remarquons aussi que les valeurs des puissances sont légèrement diminuées après la simulation qu'avec les calculs.

4.3) Model dont les condensateurs sont en triangle :

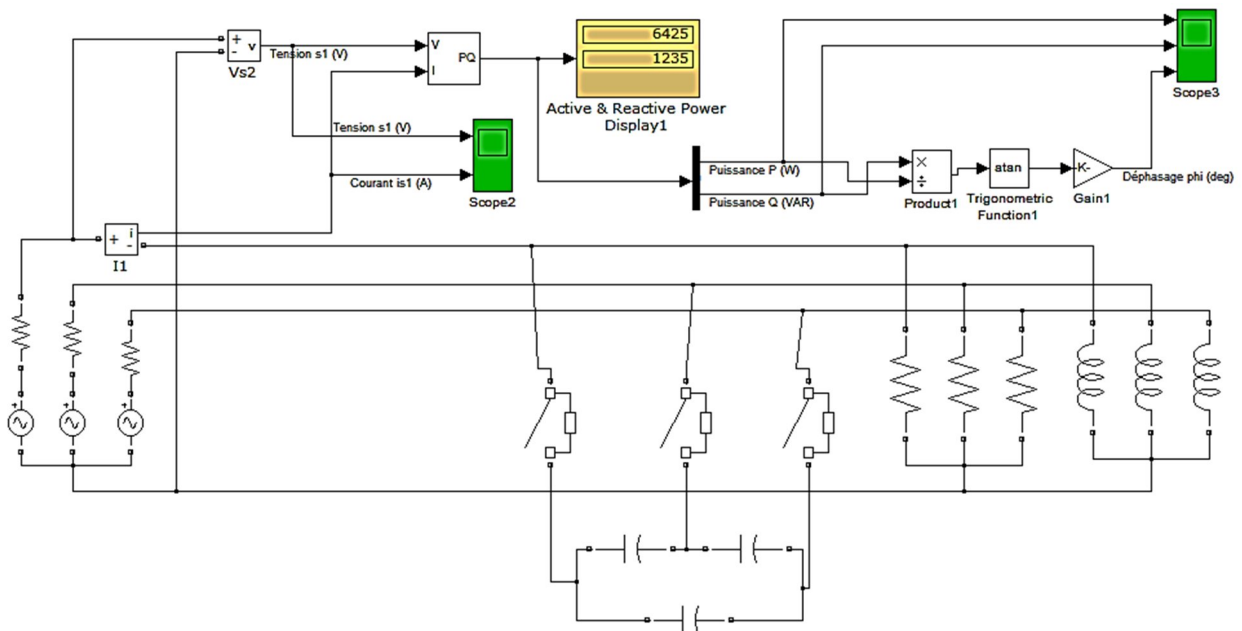
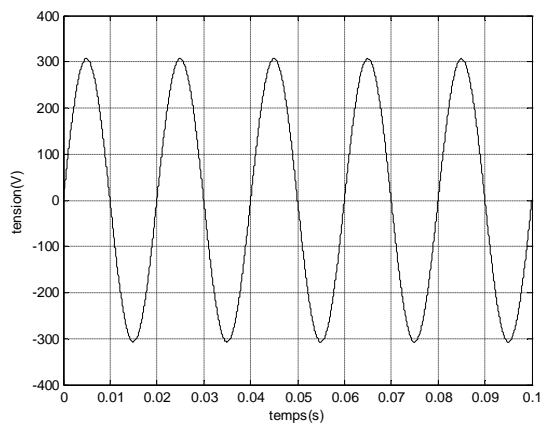
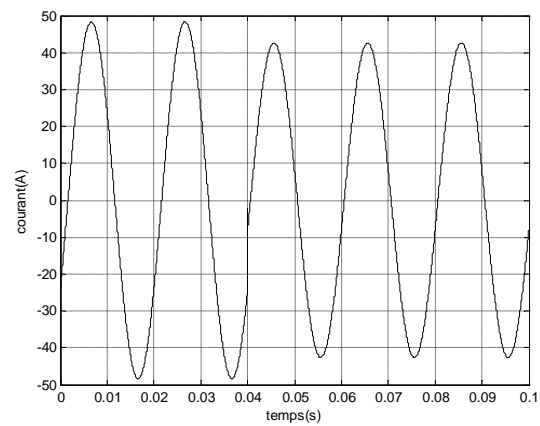


Figure (4.2) : Model avec relèvement du facteur de puissance en triangle.

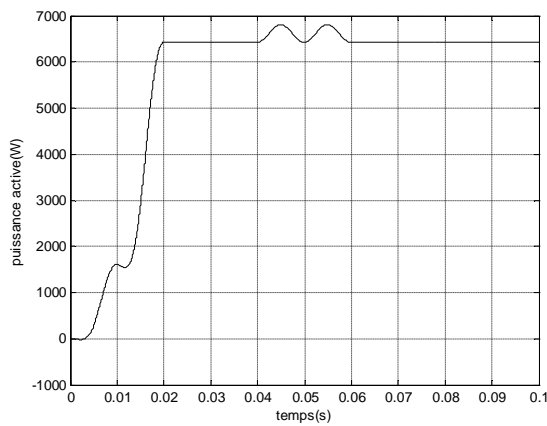
4.3.1) Résultats de la simulation :



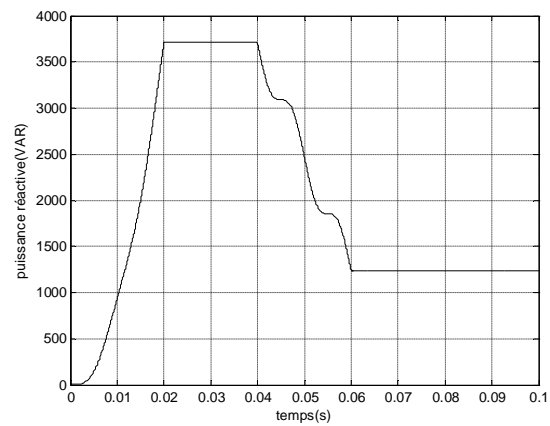
Tension (V)



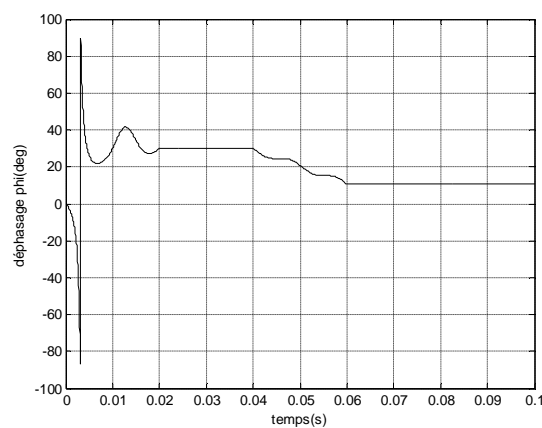
Courant (A)



Puissance active (W)



Puissance réactive (VAR)



Déphasage phi (deg)

4.3.2) Interprétation des résultats :

- On remarque que la tension et le courant sont purement sinusoïdaux.
- En insérant une batterie de condensateurs (en triangle), nous observons les changements attendus dans les grandeurs, lorsque l'interrupteur est fermé le courant diminue légèrement, le filtrage avec les condensateurs provoque une diminution de la puissance réactive et le déphasage.

4.4) Model dont les condensateurs sont en étoile :

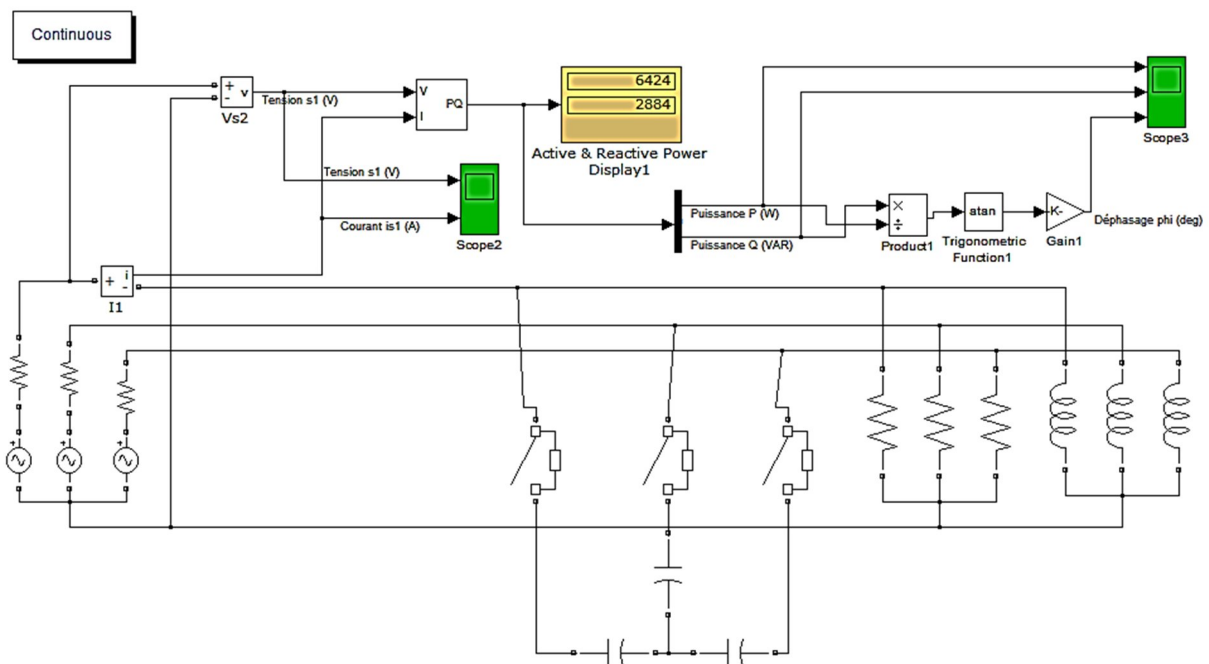
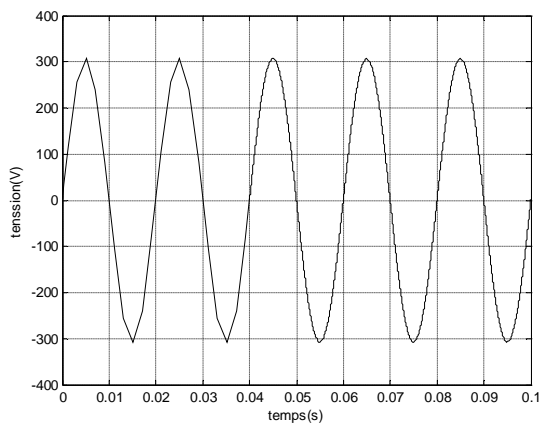
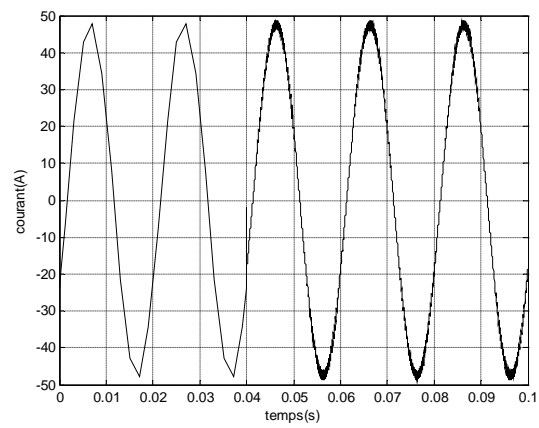


Figure (4.3) : Model avec relèvement du facteur de puissance en étoile.

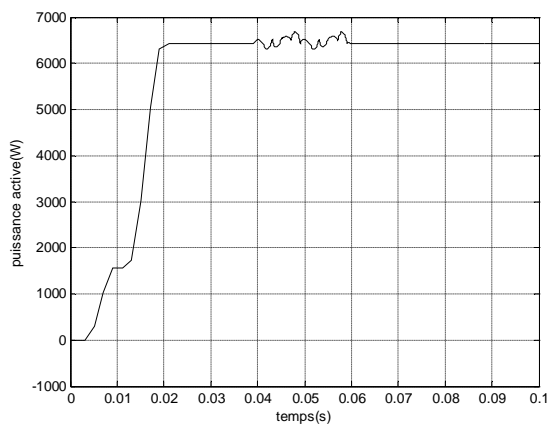
4.4.1) Résultats de la simulation :



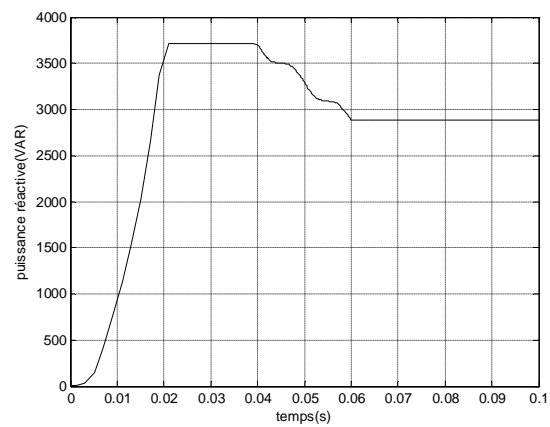
Tension (V)



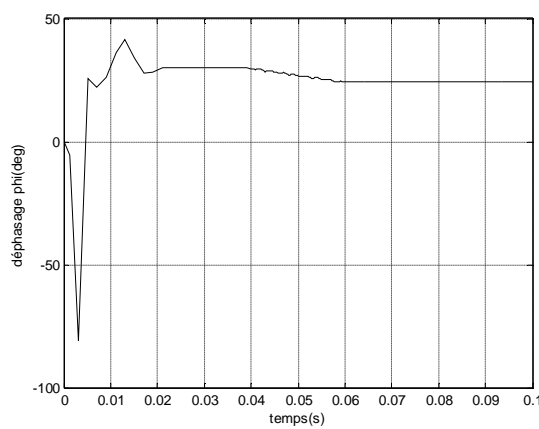
Courant (A)



Puissance active (W)



Puissance réactive (VAR)



Déphasage phi (deg)

4.4.2) Interprétation des résultats :

- On remarque que la tension et le courant sont purement sinusoïdaux.

En insérant une batterie de condensateurs (en étoile), nous observons une l'évolution de la puissance réactive par rapport au montage précédent (en triangle), sauf que cette fois ci elle est évoluée de presque de 35%.

4.5) Model d'un Système triphasé déséquilibré au niveau de la charge :

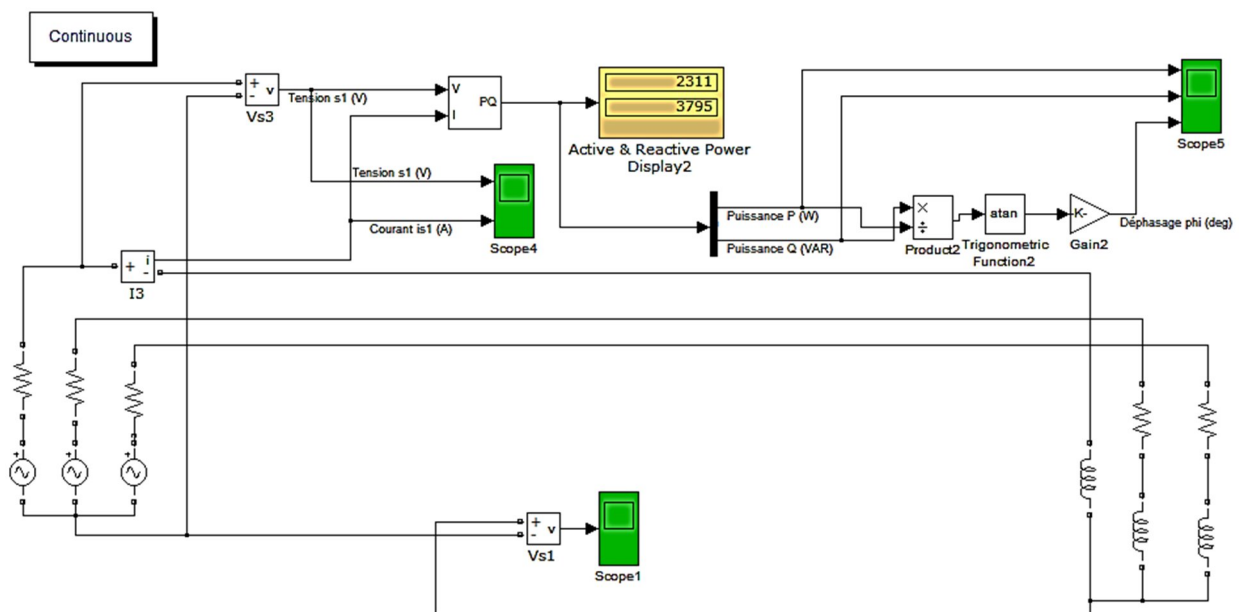
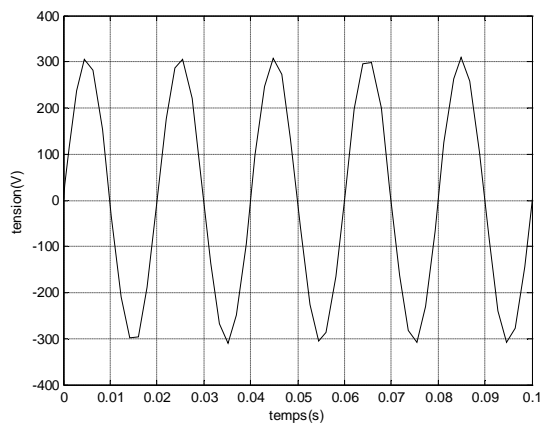
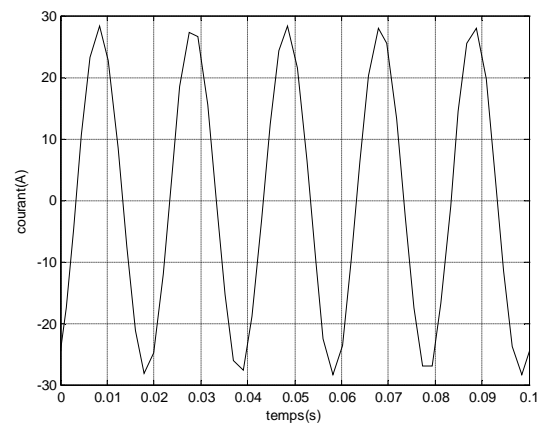


Figure (4.4) : Model virtuel d'un système déséquilibré par la charge.

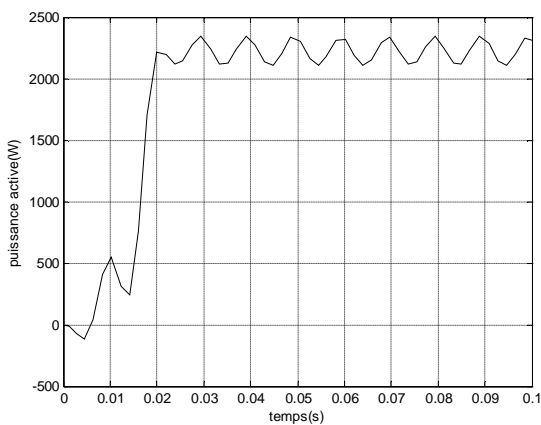
4.5.1) Résultats de la simulation :



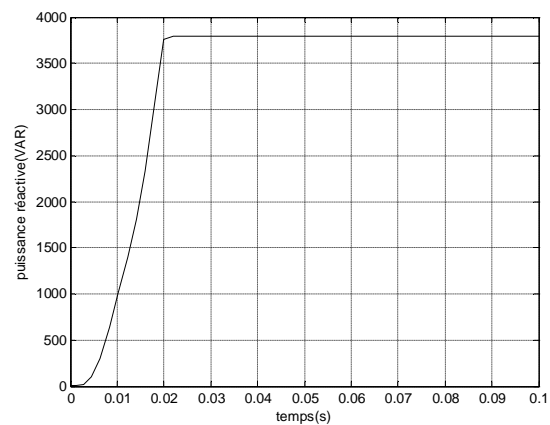
Tension (V)



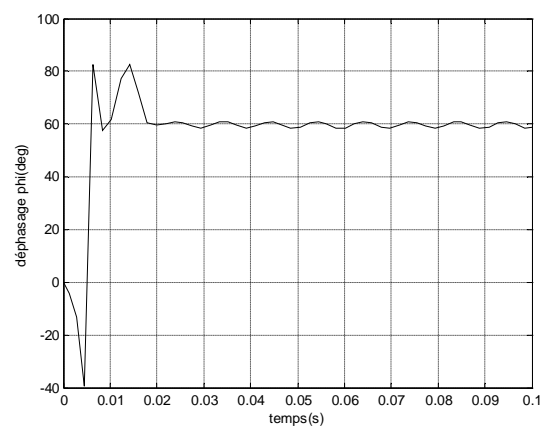
Courant (A)



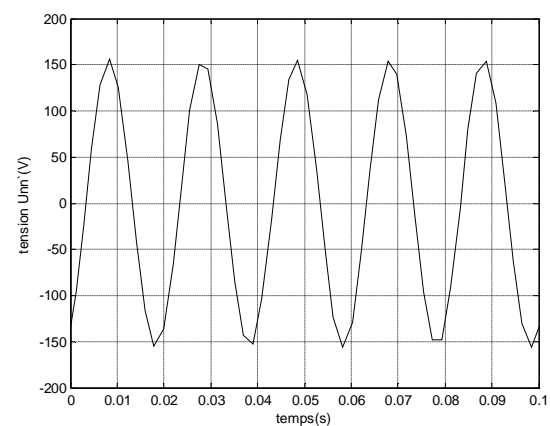
Puissance active (W)



Puissance réactive (VAR)



Déphasage phi (deg)



Tension Unn' (V)

4.5.2) Interprétation des résultats :

- On remarque que la tension et le courant sont purement sinusoïdaux.
- On voit clairement que dans cette simulation la réduction du courant demandé de l'ordre de 40%, et la puissance active a une forme oscillatoire en régime permanent, par rapport au fonctionnement normal à cause de l'influence d'une manière notable sur la stabilité du système au niveau de la charge.

4.6) Model d'un Système triphasé déséquilibré par la source :

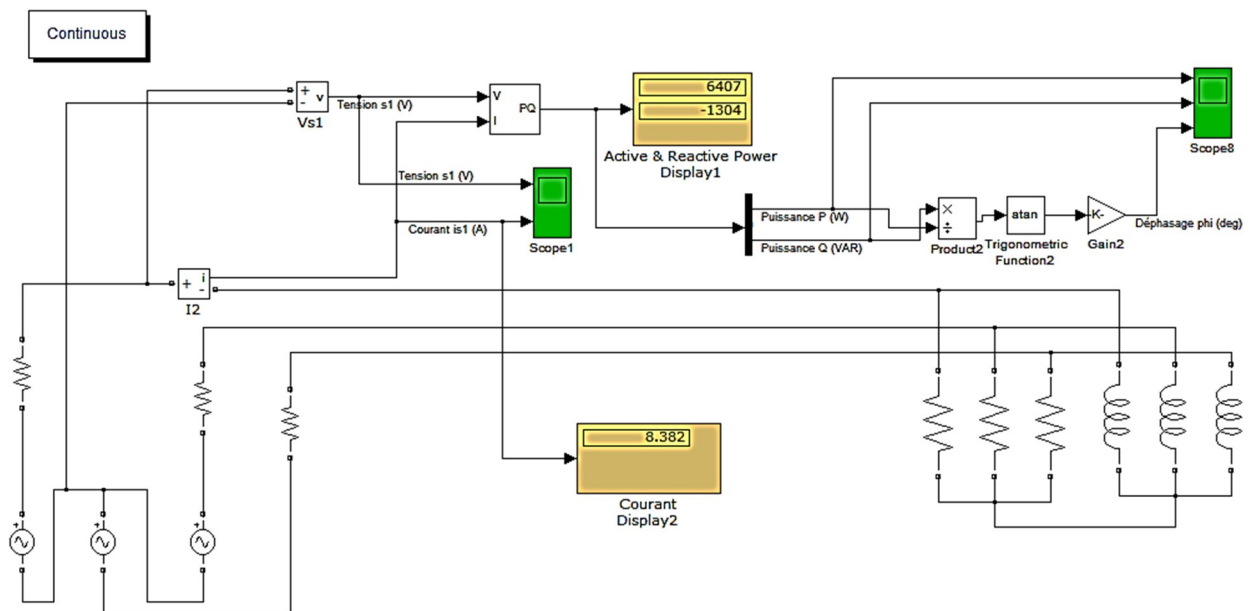
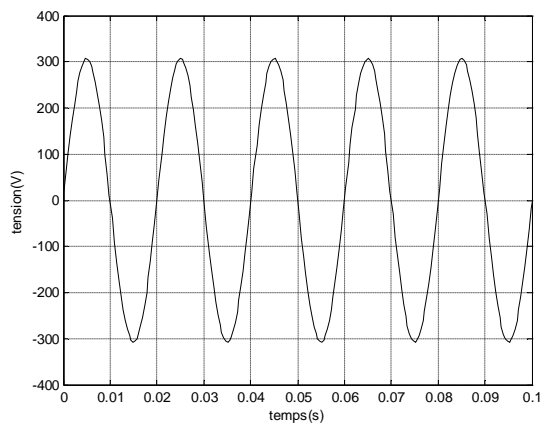
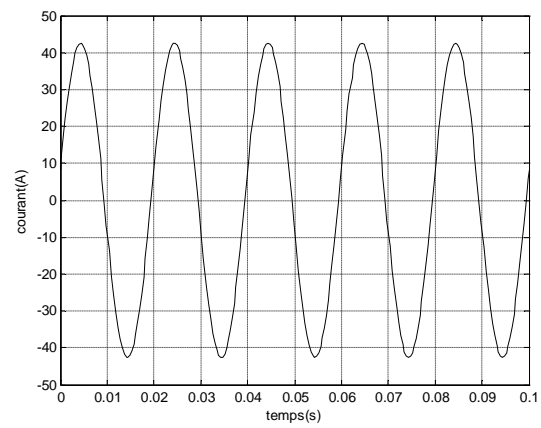


Figure (4.5) : Model virtuel d'un système déséquilibré par la source.

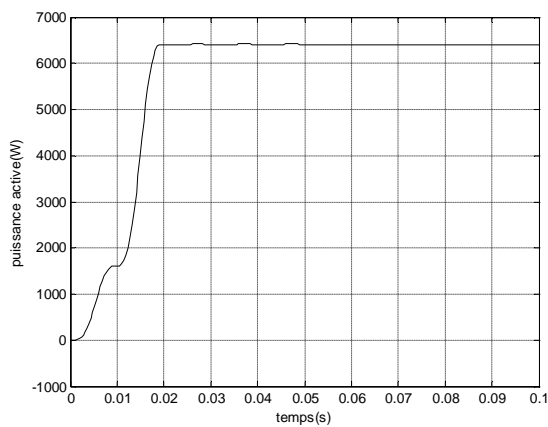
4.6.1) Résultats de la simulation :



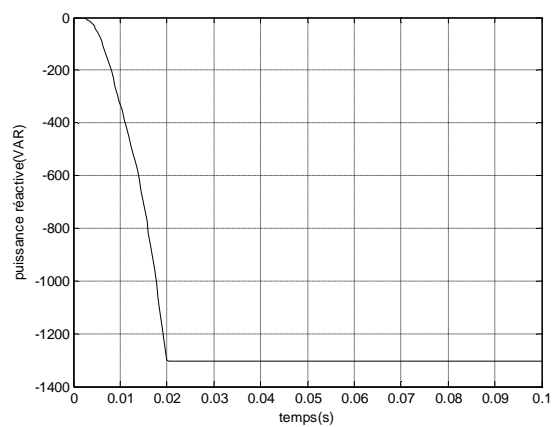
Tension (V)



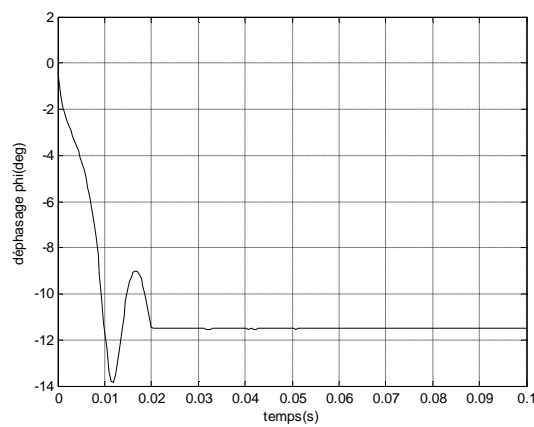
Courant (A)



Puissance active (W)



Puissance réactive (VAR)



Déphasage phi (deg)

4.6.2) Interprétation des résultats :

- On remarque que la tension et le courant sont purement sinusoïdaux.
- Contrairement aux simulations précédentes, on remarque un comportement inverse de la puissance réactive dû à l'inversement du sens d'une tension de ligne au niveau de la source.

4.7) Model virtuel d'un système déséquilibré par la source contenant un filtre à composante inverse.

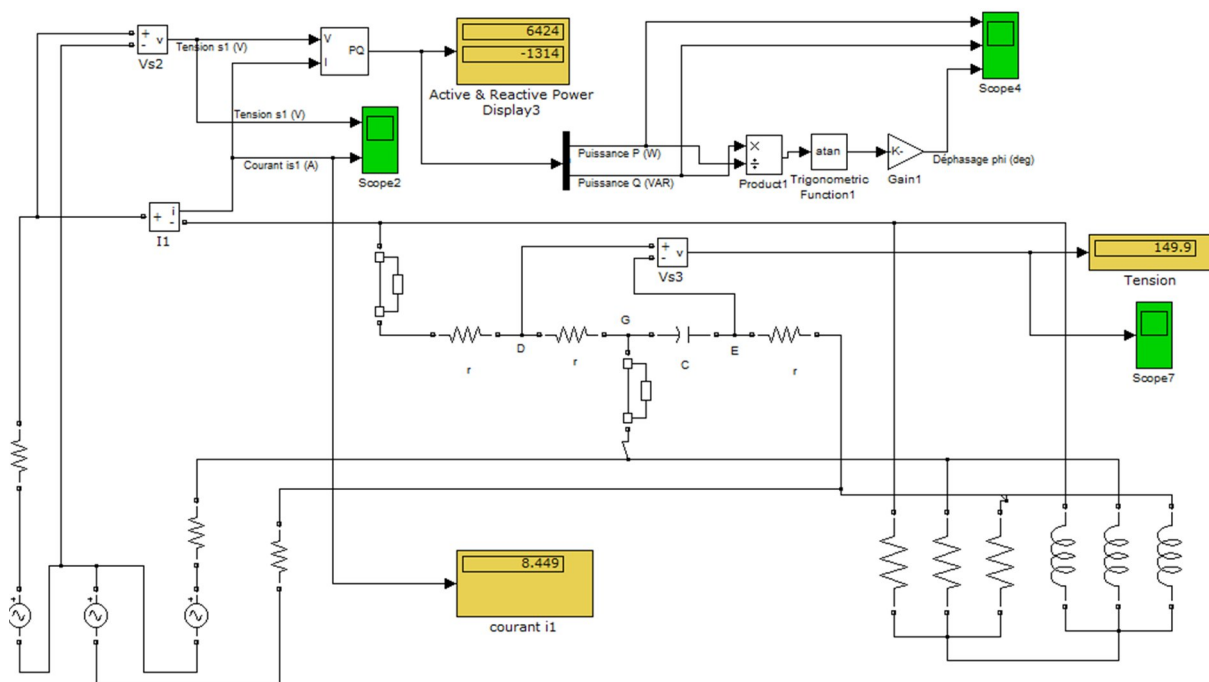
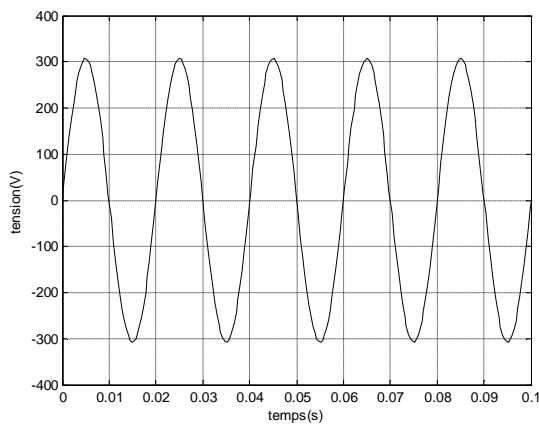
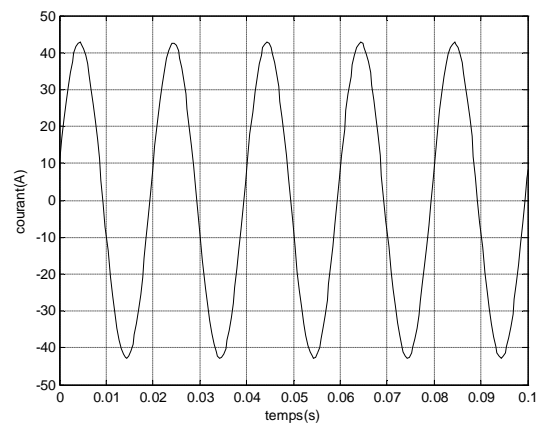


Figure (4.6) : Model virtuel d'un système déséquilibré par la source contenant un filtre à composante inverse.

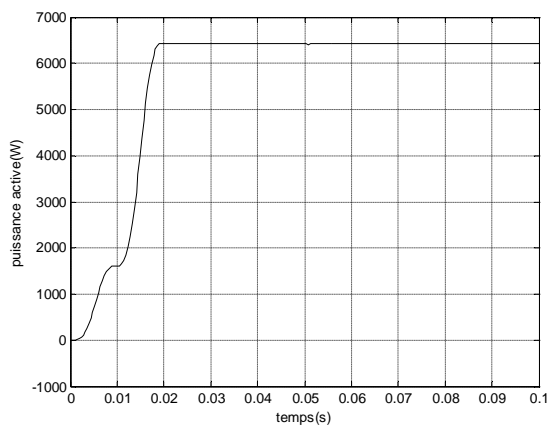
4.7.1) Résultats de la simulation :



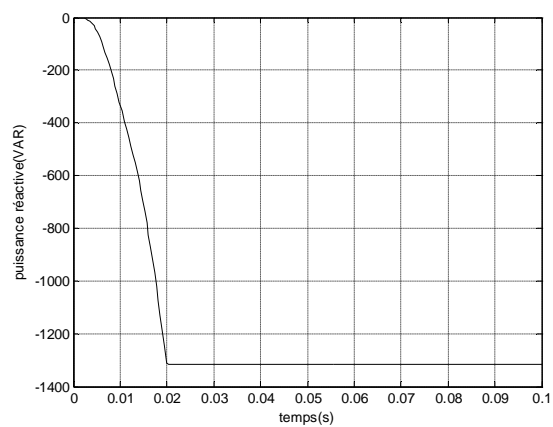
Tension (V)



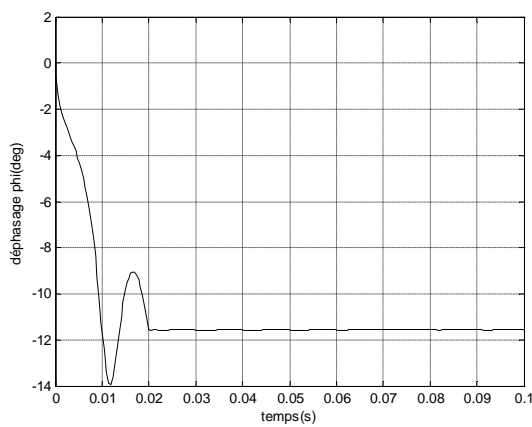
Courant (A)



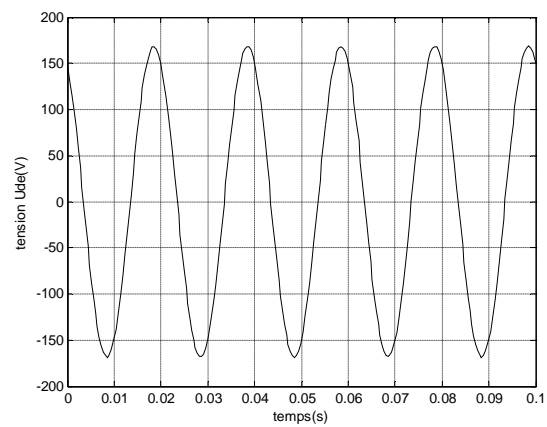
Puissance active (W)



Puissance réactive (VAR)



Déphasage phi (deg)



Tension (V)

4.7.2) Interprétation des résultats :

- On remarque que la tension et le courant sont purement sinusoïdaux.
- Pas de changement en ce qui concerne la puissance active et réactive.
- la tension est aussi sinusoïdale à cause de la charge résistive.

4.8) Conclusion :

Le système choisi pour la simulation est un réseau électrique triphasé modifié à chaque étape et subit différents changements (perturbations) pour améliorer notre expérience.

Les simulations présentés illustrent à chaque instant le comportement des réseaux, avant et après les perturbations, par exemple le comportement du réseau en régime permanent du fonctionnement normal est différent du régime permanent perturbé.

5.1) Introduction :

Les réseaux électriques représentent des investissements considérables consentis par les compagnies d'électricité pour alimenter leurs clients aux meilleures conditions de coût et de qualité de service.

Pour des raisons techniques et économiques évidentes, il n'est pas possible de construire des réseaux exempts de défauts de fonctionnement; ils sont, en particulier, exposés aux agressions naturelles comme la foudre. Les réseaux sont donc affectés de perturbations qui peuvent mettre en cause la pérennité du matériel et la qualité du service rendu et dont il faut chercher à minimiser les conséquences.

Tout défaut doit donc être identifié immédiatement et l'ouvrage affecté séparé du réseau sans délai; c'est l'objet de la protection des réseaux.

5.2) Définition :

La protection des réseaux est l'ensemble des dispositions destinées à permettre la détection des défauts et des situations anormales dans un réseau afin de commander le déclenchement d'un ou plusieurs disjoncteurs et, si nécessaire, d'élaborer d'autres ordres ou signalisations.

5.3) Protection contre les surcharges :

Elles sont essentiellement dues à une augmentation de la demande d'énergie. Elles ont une origine :

- mécanique : augmentation du couple demandé (concasseurs).
- électrique : augmentation anormale du nombre des consommateurs.

Les surcharges sont également dues à une diminution du facteur de puissance, à une diminution ou à une augmentation de la tension du réseau. [8]

5.3.1) Conséquences :

- Les surcharges sont synonymes de surintensités.
- Les surcharges provoquent les échauffements exagérés des câbles, des transformateurs, des moteurs. Elles diminuent la durée de vie des isolants.

5.3.2) Moyens de protection :

Contrôle de l'intensité par un relais à image thermique, ou par un relais à maximum de courant à temps constant afin de limiter dans le temps des surcharges constantes et connues.

Il s'agit par exemple d'une surcharge dont la durée et la fréquence de répétition sont bien déterminées (serrage des vis de laminoir).

5.4) Filtrage d'harmoniques :

Les réseaux BT et MT sont soumis de plus en plus à des harmoniques de courants et de tensions qui les polluent.

Ces harmoniques sont générés par des charges non linéaires, de plus en plus présentes dans les réseaux actuels, charges intégrant des variateurs de fréquence, des régulateurs à courant continu, des fours à induction, des alimentations de secours, de l'éclairage économique et des lampes à décharges ...

Les solutions préventives de base possibles pour atténuer les effets de ces harmoniques consistent à :

- Positionner les charges polluantes en amont du réseau,
- Regrouper les charges polluantes,
- Séparer les sources,
- Utiliser des transformateurs à couplages particuliers,

- Placer des inductances dans l'installation,
- Choisir un schéma de liaison à la terre adapté.

Ces harmoniques de courant et tension peuvent fortement contraindre les transformateurs, jusqu'à les endommager.

5.4.1) Moyens de protection :

Face à ce phénomène, en fonction du type d'harmoniques et de leur importance, deux types de solutions, parfois complémentaires, sont proposées:

- le surdimensionnement du transformateur dès sa conception,
- la mise en place de systèmes de filtrage pour protéger l'installation.

5.4.1.1) Le surdimensionnement du transformateur :

D'un point de vue thermique, les transformateurs doivent être surdimensionnés pour tenir compte des courants harmoniques qui génèrent des pertes spéciales supplémentaires.

Dans le cas d'un réseau pollué par les harmoniques de courant, les documents d'harmonisation HD 428 et HD538 définissent respectivement pour les transformateurs immergés de distribution et les transformateurs secs déjà installés en réseau des coefficients de réduction de puissance déterminés à partir des taux et rangs des harmoniques de courant.

Cette solution de surdimensionnement ne peut être envisagée que si la pollution en harmoniques est connue et transmise au fabricant avant l'étude du transformateur.

5.4.1.2) Le filtrage des harmoniques :

D'un point de vue diélectrique, pour les applications avec présence d'électronique de puissance, alimentations d'onduleurs, deux phases du réseau alternatif sont court-circuitées pendant un temps très bref lors de chaque commutation.

Les formes d'ondes de tension coté MT et BT sont donc détériorées, avec apparition d'harmoniques et valeurs de (dv/dt) très élevées aux encoches de commutation.

La présence de ces harmoniques de tension aux encoches de commutation va donc fortement contraindre diélectriquement le transformateur.

Ces encoches de commutations répétitives (de fréquence d'oscillation 10 kHz en ordre de grandeur) peuvent conduire à un vieillissement prématuré du transformateur ou à une résonance interne avec les enroulements du transformateur, si leurs fréquences propres sont alignées avec les oscillations des encoches de commutation.

Dans le cas où les actions préventives citées en introduction sont insuffisantes, il est nécessaire d'équiper l'installation polluée de dispositif de filtrage.

Trois types de filtres sont utilisables en fonction de l'application source d'harmoniques :

- le filtre passif,
- le filtre actif,
- le filtre hybride.

5.4.1.2.1) Le filtre passif :

Applications typiques :

- installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruption, redresseurs)
- installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive,
- nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles,

- nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

- **Principe de fonctionnement :**

Un circuit LC est accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, en parallèle sur le générateur d'harmonique.

Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'alimentation.

En général, le filtre passif est accordé sur un rang d'harmonique p proche de l'harmonique à éliminer. Plusieurs branches de filtres en parallèle peuvent être utilisées lorsque l'on souhaite une réduction forte du taux de distorsion sur plusieurs rangs

5.4.1.2.2) Le filtre actif :

Applications typiques :

- installations tertiaires avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200 kVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, bureautique,...),

- nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

- **Principe de fonctionnement :**

Ce sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge.

Le filtre actif réinjecte en opposition de phase les harmoniques présents sur l'alimentation de la charge, de telle sorte que le courant de ligne soit sinusoïdal.

5.4.1.2.3) Le filtre hybride :

Applications typiques :

- installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs,...),
- installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive,
- nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles,
- nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges,
- recherche de conformité à des limites strictes d'émission harmonique.

Principe de fonctionnement :

Les deux types de dispositifs précédents peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride.

Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages des solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performances.

5.4.1.3) Critères et guide de choix de filtre :

- Le filtre **passif** permet à la fois :
 - La compensation d'énergie réactive,
 - Une grande capacité de filtrage en courant. L'installation où est placé le filtre doit présenter une stabilité suffisante, avec peu de fluctuation de charge.

Si la puissance réactive fournie est importante, il est conseillé de mettre hors tension le filtre passif pendant les périodes de faible charge.

L'étude de raccordement d'un filtre doit tenir compte de la présence éventuelle d'une batterie de compensation et peut conduire à sa suppression.

- Le filtre **actif** permet le filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence. Il s'adapte à n'importe quelle charge.

Cependant, sa puissance harmonique est limitée.

- Le filtre **hybride** réunit l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs.

5.5) Compensation et relèvement du \varnothing :

5.5.1) Pourquoi compenser l'énergie réactive :

De nombreux récepteurs consomment de l'énergie réactive pour créer les champs électromagnétiques (moteurs, transformateurs, ballasts de tubes fluorescents, etc.).

Compenser l'énergie réactive, c'est fournir cette énergie à la place du réseau de distribution par l'installation d'une batterie de condensateurs, source d'énergie réactive de puissance Q_c .

Les avantages sont multiples :

- Economie sur le dimensionnement des équipements électriques car la puissance appelée diminue.
- Augmentation de la puissance active disponible au secondaire des transformateurs.
- Diminution des chutes de tension et des pertes en lignes.
- Economie sur la facture d'électricité, en supprimant la consommation excessive d'énergie réactive.
- Retour sur investissement moyen de 18 mois.

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

utilisons des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs et pour relever le facteur de déplacement ($\cos \phi$).

5.5.2) Bilan de puissances :

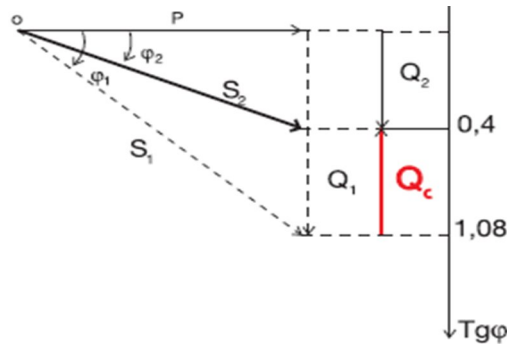


Figure (5.1) : Bilan de puissances.

P = Puissance active

- = Puissance réactive sans compensation d'énergie réactive
- = Puissance apparente avant compensation d'énergie réactive
- = Déphasage sans compensation
- = Puissance réactive avec compensation d'énergie réactive
- = Puissance apparente après compensation d'énergie réactive
- = Déphasage avec compensation

= -

$$= (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) = *$$

Exemple :

- Avant :

Une installation avec :

- Un transformateur de 630 kVA,
- Une puissance active de 500 kW,
- Un $\cos \phi$ de 0,75,

- Après :
 - Un raccordement d'une batterie de 275 kVAr.
- On obtient :
 - Une diminution de la puissance apparente auprès du distributeur d'énergie de 21 %,
 - Une augmentation de la puissance disponible du transformateur de 16 % sur la puissance assignée,
 - Une réduction des pertes Joules de 38 % dans les câbles,
 - Une réduction des chutes de tension de 2,6 %.

5.6) Régulation de la tension :

La tension et la fréquence sont des paramètres très importants pour l'exploitation d'un système électrique. En effet, ces grandeurs sont les garants du bon fonctionnement de l'exploitation du réseau tant du point de vue du consommateur, dont certaines machines tournantes ou autres appareils (transformateurs, convertisseurs, etc.) sont dimensionnés pour des valeurs de fréquences ou de tensions fixes, que du point de vue de l'exploitant puisqu'un contrôle efficace de tension et de fréquence garanti une bonne qualité et une bonne continuité de service. [9]

Ceux-ci fixent la plage de variation limites en tension devant être respectées en chaque point de livraison ainsi que les limites de fonctionnement au-delà desquelles des systèmes de coupure telle que les protections de découplage doivent intervenir. Pour le cas des réseaux de distribution.

5.6.1) Les différents réglages de la tension :

5.6.1.1) Le réglage primaire de tension :

Le réglage primaire de tension est assuré par les groupes de production équipés. En effet, si l'alternateur est surexcité celui-ci va produire de la puissance est d'agir sur

l'excitation d'alternateur pour garder le niveau de tension désiré. La tension à une valeur de consigne sur leur point de raccordement. Le principe d'un régulateur primaire de tension. Grâce à ce régulateur les alternateurs fixent Inversement, dans le cas d'une sous excitation de l'alternateur celui-ci va réactive ce qui aura pour effet d'accroître la tension à son point de connexion. Absorber de la puissance réactive et donc faire diminuer la tension à ses bornes.

Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur.

5.6.1.2) Le réglage secondaire de tension :

Comme pour la fréquence les réglages primaires sont réalisés de manière locale par chacun des groupes de production concernés. Ils agissent rapidement mais doivent être coordonnés pour éviter toute dérive ou encore pour optimiser le fonctionnement de groupes proches et éviter que certains fournissent trop de puissance réactive pendant que d'autres n'en fournissent pas ou pire en absorbent, c'est le rôle du réglage secondaire de tension (RST). Localement à l'aide de systèmes gérant l'apport en puissance réactive nécessaire afin de limiter le transit de cette puissance sur les réseaux amont via les postes HTB\HTA qui occasionnent des pertes supplémentaires.

5.6.2.3) Le réglage tertiaire de tension :

Le réglage tertiaire est nécessaire pour coordonner les actions entre deux zones régies par des RST différents. Ce réglage est effectué par les opérateurs de dispatching régional et comprend le calcul des tensions aux points pilotes.

Ces réglages hiérarchisés permettent de réguler la tension sur les réseaux HTB (transport et répartition).

5.6.2) Matériaux utilisés :

5.6.2.1) Bancs de condensateurs :

Pour diminuer les transits de puissance réactive dans les postes sources HTB/HTA, des bancs de condensateurs sont connectés au jeu de barres côté HTA. Ils corrigent le facteur de puissance $\cos \phi$ du poste source. Ce facteur de puissance est donné par la formule suivante :

$$= \frac{P}{P + Q \tan \phi}$$

5.6.2.2) Transformateurs régulateurs en charge :

Sur les réseaux de distribution, les principaux actionneurs du réglage de tension sont les transformateurs régleurs en charge. Il s'agit de transformateurs à rapport de transformation variable piloté par un automate. En France, ces transformateurs sont situés dans les postes sources HTB/HTA.

5.7) Conclusion :

La continuité d'exploitation et la limitation au strict minimum des conséquences des défauts de tous types sont obtenues par le bon choix des dispositifs de protection et de leur réglage.

Quelle que soit la solution retenue, un dialogue étroit entre le client et le fournisseur est nécessaire avant toute commande de matériel, pour éviter les déconvenues sur site, aux conséquences parfois désastreuses.

Les réseaux électriques sont sujets à diverses perturbations pouvant causer des disfonctionnements de celui-ci et conduire à une dégradation de la qualité de service rendue à la clientèle, à des coupures de courant ainsi qu'à la détérioration des équipements.

Les variations de la tension sont en général causées par l'évolution naturelle de la charge ou liées à des incidents sur le réseau provoquant des chutes de tension.

Beaucoup de perturbations internes au réseau électrique peuvent causer des disfonctionnements dans ce réseau, des dégradations ainsi que de grands incidents. Par conséquent, il faut veiller à éviter des fausses manœuvres dans les maintenances et l'exploitation du réseau, s'assurer une bonne isolation et le non vieillissement de certains éléments du réseau, et faire de bonnes prévisions des niveaux de consommation pour éviter les surcharges.

Ce travail gagne à être perfectionné par d'autres études plus précises et plus approfondies pour pouvoir prétendre à améliorer les conditions de fonctionnement des réseaux et ainsi leur offrir une plus grande stabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : ABDELHAFID HELLAL et MOHAMED BOUDOUR : « Réseaux électriques, fondamentaux et concepts de base ».
Copyright Eurl Pages Bleus International 2010.
- [2]: T. WILDY et G.SYBILE ; « Electrotechnique »
Quatrième Edition « DE BOECK » - 2005
- [3] : VANYA INGNATOVA : « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique ».
Ingénieur Université Technique de Sofia, le 20 Octobre 2006.
- [4]: Dr JOHAN DRIESEN & Dr THIERRY VAN CRAENENBROECK;
« perturbation de la tension »
Université Leuven - Mai 2002.
- [5]: P.KANDOUR ; « Power System Stability and control »
Edit by: Electric power research institute California.
- [6]: BENOIT de METZ-NOBLAT : « Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques»
Ingénieur ESE, CT 18 édition juin 2005.
- [7]: OUERK Nouara; « Détermination des indicateurs permettant d'évaluer la stabilité en tension des réseaux électriques »
Mémoire de Magister, Spécialité : Machines Electriques.
- [8] : PIERRE ROCCIA : « protection des machines et des réseaux industriels haute tension »
CT113 édition juin 1985.
- [9]: BORIS BERSENEFF : « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur ».
Ingénieur ENSEEG le 13 Décembre 2010.