

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

□□□□

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
CENTRE DE THIES

NUM.



GM 0504

DEPARTEMENT GENIE ELECTROMECHANIQUE

**LES PERTURBATIONS DANS LES RESEAUX
ELECTRIQUES DUES AUX CHARGES NON
LINEAIRES : APPLICATION A LA STATION DE
POMPAGE DE LA SONES A NGAYE MEKHE.**

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur de Conception

Auteur :	M. Charles Willam	TAVAREZ
Directeurs Internes :	M. Mamadou	WADE
	M. Gaskel	GNING
Directeur Externe :	M. Ibra	DIAGNE

Année Académique : 2006 - 2007

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

Ma mère Henriette NDIONE,

Cette brave femme qui s'est toujours dévouée à ses enfants. Toute ta vie durant, tu n'as ménagé aucun effort pour le bonheur et la réussite de tes enfants. Ce travail est avant tout le fruit de tes sacrifices consentis, de ta grande compréhension et de l'amour que tu nous as donné qui comme par miracle efface toutes nos peines.

Pour cela, chère mère, je te dis un grand merci et prie Dieu pour qu'il t'accorde une longue vie afin que tu puisses profiter pleinement des fruits que tu as semés.

Ma tante Suzanne NDIONE,

Puisse Dieu te laisser encore longtemps parmi nous.

Maman Juliette Tavares SOW

Très affectueusement.

Je t'aime sincèrement. Que Dieu te protège.

Mon frère, mon ami Charles NDIONE,

Tu es l'exemple d'un bon aîné et tu me serviras toujours de modèle. Comme un père, tu as guidé mes pas, tu as contribué à mon éducation et à ma réussite. Merci beaucoup à toi et saches que je t'en suis très reconnaissant.

Mon père Albert TAVARES,

Longue vie à toi papa.

Tonton Mansour SOW,

Merci pour tout.

Toute ma famille, frères et sœurs, cousins et cousines, neveux et nièces.

Affectueusement. Soyons toujours unis dans l'amour, la compréhension et l'entente.

Tous mes camarades du CDPGM, spécialement à mon frère Cheikh THIAM.

Tous mes camarades de la 8^{ème} promotion de l'ESP.

Tous mes amis.

Maman Elisa De BARROS et Constance Ngoné DIALLO

Toi VITADI

Puisse Dieu exhausser nos vœux.

REMERCIEMENTS

DIEU SOIT LOUE, L'ETERNEL SOIT REMERCIE !

J'exprime ma reconnaissance à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail.

**A Monsieur Mamadou WADE
Professeur à l'Ecole Polytechnique de Thiès**

La simplicité, la disponibilité, l'humilité et la générosité qui émane de vous m'ont profondément marqué.

Soyez assuré de mon profond respect.

**A Monsieur Gaskel GNING
Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar**

Votre modestie, vos qualités humaines et votre rigueur scientifique m'ont séduit.

Soyez assuré de ma profonde admiration.

**A Monsieur Sény TAMBA
Professeur à l'Ecole Polytechnique de Thiès**

Vous êtes pour moi une référence par votre simplicité, vos qualités didactiques, votre investissement total dans le travail et votre rigueur.

Merci pour tout le mal que vous vous êtes donné pour la réalisation de ce travail.

Profonde gratitude.

**A Monsieur DIAGNE
SONES – Dakar**

Grâce à votre disponibilité, j'ai pu réaliser ce travail. J'ai été impressionné par votre rigueur, votre grande intelligence et votre infatigabilité.

Soyez assuré de ma profonde gratitude.

**A tous les professeurs de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar
et de l'Ecole Polytechnique de Thiès**

Vous m'avez guidé tout au long de ma formation. J'ai pu découvrir en vous des scientifiques rigoureux, généreux de votre savoir et compréhensifs à l'égard des étudiants.

Merci pour l'encadrement et l'enseignement précieux que vous ne cessez de me dispenser.

Ce travail est aussi le vôtre.

Soyez assuré de ma profonde reconnaissance.

**A Monsieur Jeylani DIOP, Monsieur Habib NIANG, Monsieur Moustapha DIENG,
De MATFORCE**

Merci pour l'aide précieuse que vous m'avez apporté tout au long de mes stages professionnels.

Table des matières

Liste des figures.....	a
Liste des abréviations.....	c
Liste des tableaux.....	c
Sommaire	01
Introduction	02
Chapitre I: Généralités sur les perturbations	
induites dans le réseau	03
Introduction	
Première partie : Les harmoniques	
I. Les courants harmoniques.....	03
I.1 Eléments linéaires et non linéaires.....	03
I.1.1 Eléments linéaires.....	03
I.1.2 Eléments non linéaires.....	04
I.2 Bases mathématiques.....	05
I.2.1 Application aux signaux électriques.....	05
II. Causes, Propagation et effets des courants harmoniques.....	07
II.1 Causes des courants harmoniques.....	07
II.1.1 Propagation des harmoniques.....	07
II.1.1.1. Les impédances à considérer.....	10
II.1.1.1.a. inductance de fuite	
des transformateurs.....	11

Chapitre II: Application à la station de

Ngaye Mékhé.....	21
I. Description et schéma de l'installation.....	21
I.1 Description de l'installation.....	21
I.2 Schéma global de l'installation.....	22
I.2.1 Schéma d'asservissement.....	23
I.3 Principe de fonctionnement de la station.....	23
I.3.1 Principe d'un analyseur de réseau.....	24
I.3.1.1 Rappel sur les paramètres S.....	24
I.3.1.2 Schéma de principe d'un analyseur de réseaux vectoriel.....	25
II. Etude du variateur de vitesse.....	28
II.1 Circuit d'entrée.....	28
II.2 Circuit de sortie.....	28
II.3 Schéma de principe avec onduleur.....	30
II.4 Caractéristiques du variateur de fréquence.....	31
II.5 Caractéristiques du transformateur convertisseur.....	31
III. Etude du fonctionnement	32
III.1 Schéma de montage simplifié du variateur.....	32
A. Partie redresseur	
III.A.1 Objectifs de la mise en série des deux ponts.....	32
III .A.2 Etude du phénomène de commutation.....	33
III.A.3 Phénomène d'empiétement.....	35
III.A.3.1 temps d'empiétement.....	36

Deuxième partie : La commutation

I. Phénomène de la commutation.....	11
I.1. Nécessité de la commutation.....	11
I.2 Causes de la commutation.....	12
I.2.1 Principe de fonctionnement des diodes.....	12
I.2.1.1 Mode de fonctionnement.....	13
I.2.1.2. Caractéristiques statiques simplifié.....	13
I.2.2 Principe de fonctionnement des thyristors.....	14
I.2.2.1 Modes de fonctionnement.....	14
I.2.2.2 Caractéristique statique simplifié.....	15
I.2.2.3 Caractéristique dynamique.....	15
I.3. Commutation des redresseurs.....	16
I.3.1 Indice de commutation q du montage.....	17
I.3.2 Phénomène d'empiètement.....	17
I.3.3 la chute de tension moyenne.....	18
I.3.4 la durée μ de l'empiètement	
en fonction de I , w et U	19
I.3.5 Cas général : redresseur quelconque.....	19
I.4 Effets des commutations.....	20

Conclusion partielle

III.A.4 Les conséquences de la commutation.....	36
III.A.4.1 chute de tension due à la commutation.....	36
III.A.4.2 Court-circuit.....	37
B. Partie onduleur :	
III.B.1 Principe.....	38
III.B.2 Schéma simplifié de l' onduleur.....	39
III.B.2.1 Principe de fonctionnement.....	39
III.B.3 La commutation au niveau des onduleurs.....	40
IV. Les harmoniques.....	41
IV.1 Qualité du signal de sortie.....	41
IV.2 Equation du circuit.....	42
IV.3 Les courants harmoniques.....	42
IV.3.1 Effets des courants harmoniques.....	43

Conclusion partielle

Chapitre III: Les précautions à prendre

I. Les solutions proposées.....	44
I.1 Transformateur à couplage spécial.....	44
I.2 Les inductances en série.....	45
I.3 Filtre passif accordé.....	46
I.3.1 Exemple d'installation	
Filtres d'harmoniques.....	46
I.4 Notion de compensateur	
actif d'harmoniques (filtre actif).....	47
I.4.1 Compensateur série.....	48

I.4.2 Compensateur parallèle.....	48
I.4.3 Compensateur hybride.....	48

Chapitre IV: Solution retenue

I. Installation d'une inductance anti-harmonique.....	49
I.1 Modélisation du circuit.....	49
I.2 Détermination de la fréquence de résonance série	50
I.3 Détermination des éléments du filtre	51
I.3.1 Détermination de la capacité C du condensateur.....	.51
I.3.2 Détermination de l'inductance L.....	51
I. 3.3 Cout estimatif de l'installation du filtre	52

Conclusion partielle

Chapitre V: Calcul des économies financières

I. Importance de l'installation d'un variateur de vitesse.....	53
--	----

Conclusion partielle

Conclusion générale	55
Recommandations.....	56
Références.....	
Annexes.....	
Annexe 1 : Calcul de la chute de tension.....	i
Annexe 2 : Calcul de l'angle de commutation.....	ii
Annexe 3 : Technologie DTC.....	iii
Annexe 4 : Cycloconvertisseur.....	iv
Annexe 5 : diviseur Wilkinson.....	vi
Annexe 6 : Exemple de compensateurs.....	vii

Liste des figures

Figure 1 : linéarité du courant en fonction de la tension	03
Figure 2 : courant sinusoïdal et tension sinusoïdale	04
Figure 3 : caractéristiques des éléments non linéaires.....	04
Figure 4 : caractère non sinusoïdal du courant pour un élément non linéaire....	04
Figure 5 : signal carré	05
Figure 6 : représentation des composants harmoniques.....	06
Figure 7 : schéma simplifié de la propagation des harmoniques	08
Figure 8 : montage électrique.....	08
Figure 9 : mise en évidence de l'inductance de fuite d'un transformateur.....	11
Figure 10 : représentation d'une diode.....	13
Figure 11 : caractéristique statique d'une diode.....	13
Figure 12 : représentation d'un thyristor.....	14
Figure 13 : caractère statique d'un thyristor.....	15
Figure 14. Commutation instantanée des interrupteurs redresseurs.....	16
Figure 15: Montage d'un redresseur et mise en évidence du phénomène d'empiètement.....	18
Figure 16 : schéma de l'installation.....	22
Figure 17 : schéma d'asservissement.....	23
Figure 18: Accès d'un quadripôle.....	24
Figure 19 : schéma de base de mesure des différents signaux.....	25
Figure 20 : schéma de fonctionnement d'un analyseur de réseau	26
Figure 21: représentation des six(6) erreurs pour une mesure entrée sortie.....	27
Figure 22: Le schéma de fonctionnement d'un variateur de vitesse.....	30

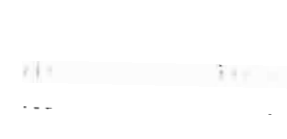


Figure 23 : schéma de principe d'un variateur de vitesse.....30

Figure 24 : Schéma de montage simplifié du variateur ACS 1000.....32

Figure 25 : schéma de mise en série des deux ponts.....33

Figure 26 : représentation des différentes tensions.....34

Figure 27 : représentation de la tension de sortie.....35

Figure 28 : Schéma équivalent au secondaire du transformateur.....37

Figure 29: Schéma de modélisation en court circuit.....37

Figure 30 : Schéma d'illustration de la surintensité.....38

Figure 31 : Schéma simplifié de l'onduleur.....39

Figure 31 : représentation de l'interrupteur.....39

Figure 33 : résultat de la séquence coté moteur (1,2',3).....40

Figure 34 : Représentation de V_{AN}41

Figure 35 : Représentation de la séquence (1,2',3).....41

Figure 36 : représentation des tensions déphasées.....45

Figure 37 : Exemple d'installation Filtres d'harmoniques.....47

Figure 38: Schéma de principe de l'installation.....49

Figure 39 : Schéma de principe de l'installation.....49

Figure 40 : couplage triangle des filtres.....52

Liste des Abréviations

DUT : Diplôme Université de Technologie

DIC : Diplôme d'Ingénieur de Conception

DST : Diplôme Supérieur de Technologie

DTC : Contrôle Direct de Couple

MT : Moyen Tension

IGBT: Insolar Gate Bipolar Transistor

MW: Méga Watt

Liste des tableaux

Tableau 1 : Estimation du cout total de l'installation des filtres

Tableau 2 : Economie financière annuelle

Sommaire

Pour faire face à d'éventuelles perturbations pouvant survenir sur le réseau de distribution électrique suite à l'installation de variateurs de vitesse au supprimeur de Mékhé, la SENELEC suggère à la SONES la pose en amont de la station un dispositif de protection contre les charges non linéaires. En fait des mesures préventives n'ont pas été tenues en compte par les études de cette station de pompage car ces perturbations dépendent particulièrement de la configuration des chaînes de pompages et du type de matériels proposés par le réalisateur du projet. Pour répondre à la requête de la SENELEC la SONES a posé un analyseur de réseau électrique. L'analyseur de réseau assure la protection du réseau en isolant la station en cas de perturbations éventuelles mais n'a aucun effet sur celles –ci.

Le sujet de notre mémoire fait suite à la préoccupation de la SONES de disposer d'un dispositif permettant d'assurer le fonctionnement en continu de station à moindre coût d'investissement et de maintenance.

Par conséquent nous avons mené une étude approfondie de ces perturbations et proposer des solutions préventives dans ce cadre. Notre étude est menée suivant une chronologie ainsi définie :

- ✓ Etude des généralités sur les perturbations des réseaux électriques provoqués par la présence de charges non linéaires.
- ✓ Etude de cas de la station de pompage de Mékhé.

Solutions préconisées :

- ✓ Mise en place des filtres anti-harmoniques en amont du variateur de fréquence dans le but de piéger les courants harmoniques de rang 5, 7, 9 etc et de relever en même temps le facteur de puissance.
- ✓ Estimation du coût de l'investissement.

Introduction

Avec la pose récente des équipements informatiques et des convertisseurs électroniques de puissance élevée sur les réseaux, on observe une dégradation notoire de la qualité des tensions d'alimentation sur lesquelles ils sont raccordés. L'augmentation de ces charges dites non linéaires nuit considérablement au bon fonctionnement de l'ensemble des équipements connectés.

Le cas de la station de pompage de Mékhé est relatif à l'installation de variateurs de vitesse (équipements électroniques) à puissance élevée alimentées en moyenne tension (3,3KV). Cette station assurant dans le cadre de l'approvisionnement en eau potable des populations de DAKAR le transit de la production d'eau des deux principales usines que sont NGNITH et Keur Momar SARR doit fonctionner d'une manière continue afin d'éviter les cas de pénurie.

Dés lors, il convient de disposer d'un dispositif permettant d'éviter toute interruption de fonctionnement de la station.

Pour se faire nous avons choisi la pose filtres électriques en amont afin d'atténuer les effets de ces perturbations.

Le présent projet porte sur l'étude de l'existence de perturbations électriques éventuelles causées par l'utilisation des variateurs de vitesse à la station de pompage.

Chapitre I : Généralités sur les perturbations induites dans le réseau

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous attacherons à présenter les principales perturbations rencontrées, leurs causes, les mesures à effectuer et certaines limites définies.

Parmi les perturbations on peut avoir :

- Les courants primaires créés par les harmoniques ;
- Les conséquences de l'imperfection dues à la durée non nulle des commutations

Première partie: Les harmoniques

I. Les courants harmoniques

I.1. Elément linéaire et non linéaire

I.1.1 Eléments linéaires

- La relation courant-tension linéaire (une droite) est linéaire quelle que soit la tension ou le courant (à l'intérieur d'une certaine limite).

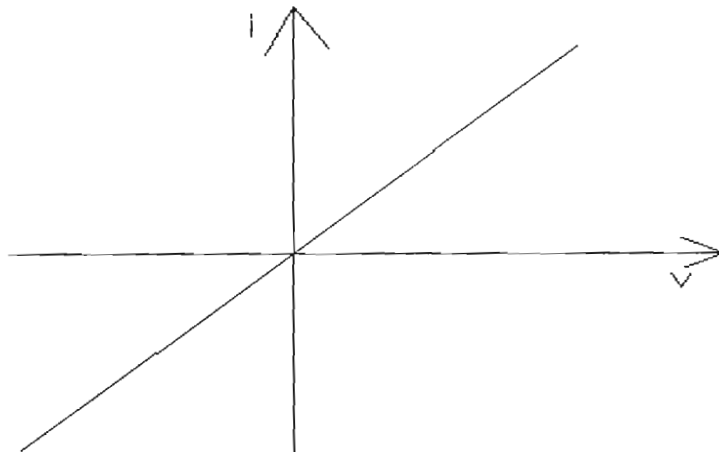


Figure 1: linéarité du courant en fonction de la tension

- ✓ Lorsqu'on applique une tension sinusoïdale à un élément linéaire, le courant résultant est également sinusoïdal.

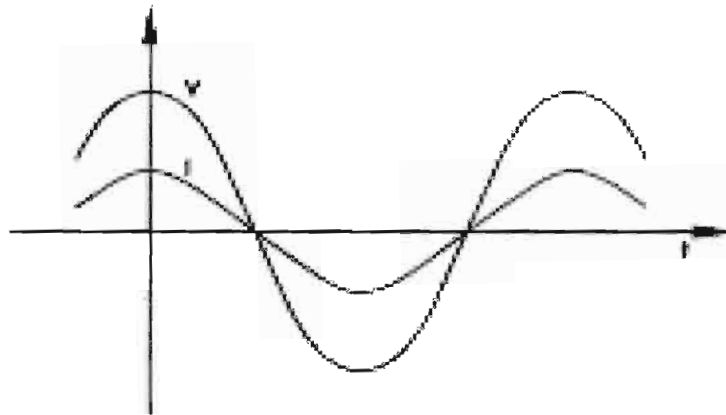


Figure 2 : courant sinusoïdal et tension sinusoïdale

1.1.2. Éléments non linéaires

Ce sont les diodes, thyristors, arc électrique ;

- ✓ Relation courant tension qui varie selon la tension ou le courant appliqué.



Figure 3 : caractéristiques des éléments non linéaires

- ✓ Lorsqu'on applique une tension sinusoïdale à un élément non-linéaire, il en résulte un courant déformé et non sinusoïdal.

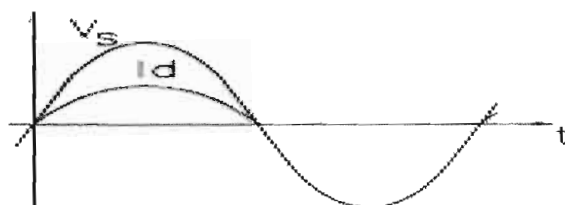


Figure 4 : caractère non sinusoïdal du courant pour un élément non linéaire

I.2 Bases mathématiques

La base mathématique de l'existence des harmoniques provient de la **décomposition des signaux périodiques en série de Fourier**. Ceci revient à dire que : « tout signal s , périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f . Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (1.1)$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$.

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int s(t) \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int s(t) \sin(n\omega t) dt \quad (1.2)$$

De plus, il existe quelques hypothèses qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls
- si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

I.2.1 Application aux signaux électriques

En électronique, les signaux alternatifs sont périodiques, et donc particulièrement adaptés au développement en série de Fourier. Nous allons montrer **sur un exemple** assez classique, un signal carré, à quoi correspondent physiquement les harmoniques et quelles sont les méthodes de représentation et de travail en électrotechnique.

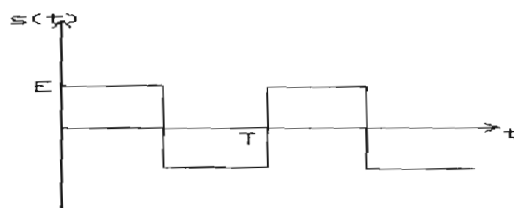


Figure 5 : signal carré

Projet de fin d'études

Considérons un signal $s(t)$ carré de période T .

- La valeur moyenne de s est nulle

Donc : $a_0 = \langle s \rangle = 0$

- s est impaire, donc les coefficients a_n sont nuls
- s possède une symétrie par rapport à $T/2$, donc les b_n d'indice n pairs sont nuls.

Il reste à calculer : $b_{2k+1} = \frac{2}{T} \int s(t) \sin((2k+1)\omega t) dt$ (1.3)

$$b_{2k+1} = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} E \sin(2k+1)\omega t dt = \frac{4E}{(2k+1)\pi}$$
 (1.4)

Ainsi, on peut dire que :

$$s(t) = \frac{4E}{\pi} \sin \omega t + \frac{4E}{3\pi} \sin(3\omega t) + \frac{4E}{5\pi} \sin(5\omega t) \dots \dots \dots (1.5)$$



Il en résulte donc un fondamental et des harmoniques.

Une représentation agréable de cette somme infinie consiste à représenter les amplitudes de composantes sinusoïdales en fonction des fréquences (**spectre de s**).

Pour le signal carré cela donne :

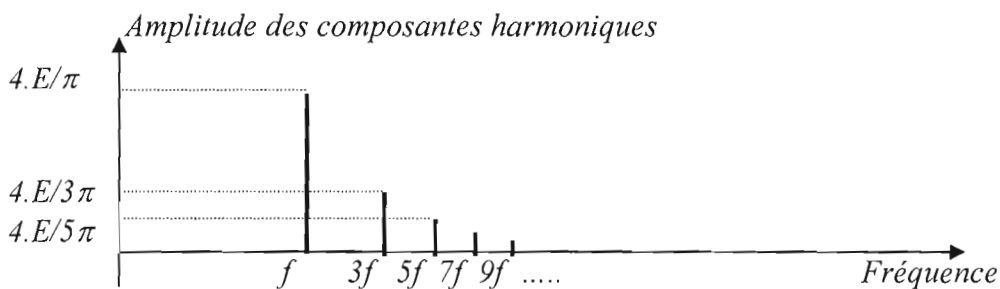


Figure 6 : représentation des composants harmoniques

En somme, un signal carré, tout comme tout autre signal périodique est la somme d'un fondamental à la même fréquence et de sinusoïdes de fréquences multiples. Voilà pourquoi les outils d'études des signaux sinusoïdaux permettent l'étude de tous les signaux périodiques.

Pour étudier un circuit sous des tensions ou des courants non sinusoïdaux, il suffit d'étudier l'influence du circuit sur chaque harmonique. Pour ce faire, on représente souvent l'effet d'un circuit en fonction de la fréquence du signal (diagramme de Bode), ainsi on visualise directement l'influence du circuit sur le spectre des tensions et courants

II. Causes, propagation et effets des courants harmoniques

Un redresseur alimenté par des tensions sinusoïdales et qui absorbe des courants non sinusoïdaux, peut être considéré comme des générateurs de courants harmoniques.

II.1 Causes des courants harmoniques

Les sources principales d'harmoniques sont :

- Sources de tensions non sinusoïdales : alternateurs, machines tournantes, etc....
- Sources de courants non sinusoïdaux : récepteurs non linéaires, systèmes à courants "hachés", gradateurs, tous les convertisseurs de l'électronique de puissance...

Sur les réseaux électriques, il est nécessaire de minimiser globalement la présence d'harmoniques, malheureusement chaque appareil générateur d'harmoniques appelle des courants qui se répartissent sur tout le réseau suivant le principe représenté au paragraphe suivant :

II.1.1 Propagation des harmoniques

Supposons un réseau alimentant un redresseur et d'autres récepteurs voisins (qui ne sont pas des redresseurs). Chaque courant harmonique qui se propage dans le réseau, arrivant à un nœud, se répartit entre les branches suivant les lois communes à tous les courants alternatifs. En tout point le produit du courant par l'impédance du réseau à la fréquence correspondante donne la tension harmonique. Le courant harmonique va plutôt vers les impédances les plus faibles. A courant harmonique

Projet de fin d'études

donné, la tension harmonique en un point est d'autant plus faible que l'impédance est plus petite.

Si on considère un réseau modélisé comme suit :

-Un redresseur alimenté par un transformateur triphasé. Sur la même arrivée que le transformateur sont branchés d'autres récepteurs différents des redresseurs. Cette arrivée est alimentée par une ligne L provenant d'un grand poste de distribution. Celui-ci alimente outre la ligne L, une autre ligne alimentant des récepteurs aussi.

On modélise le montage en monophasé comme suit :

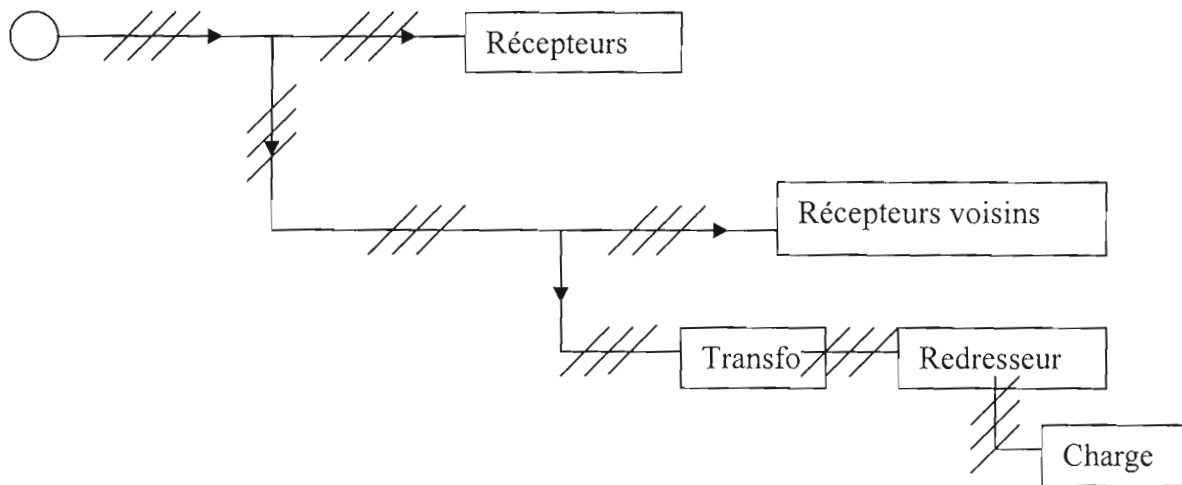


Figure 7 : schéma simplifié de la propagation des harmoniques

Ce schéma se traduit en montage électrique pour la modélisation mathématique.

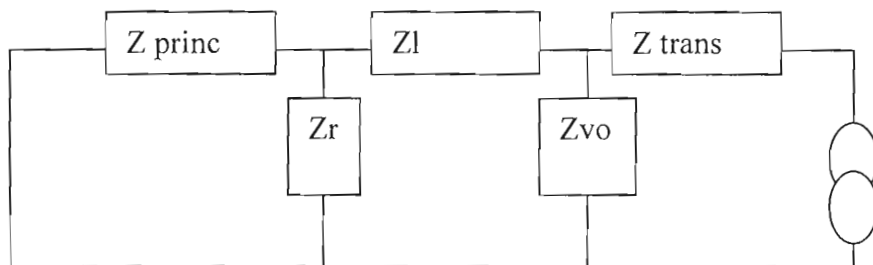


Figure 8 : montage électrique

Z_{trans} = impédance du transformateur

Z_L = impédance de la ligne L

Z_{princ} = impédance de la ligne principale

Z_r = impédance du récepteur

Z_{vo} = impédance des récepteurs voisins

Le courant I_h après avoir traversé le transformateur triphasé se répartit entre les récepteurs les impédances Z_L de la ligne L et l'impédance Z_{voiz} . le courant I_{hL} à son tour se répartit entre les impédances Z_r et Z_{princ} qui l'impédance de la ligne principale.

Soit $X_L, X_r, X_{\text{voiz}}, X_p, X_r$, les réactances respectives du transformateur, des récepteurs voisins, de la ligne principale et des autres récepteurs.

En appliquant la théorie du pont diviseur de courant on aura :

$$I_h = I_{hT} \quad (1.6)$$

$$I_{hr} = I_{hL} \frac{X_p}{X_p + X_r} \quad (1.7)$$

$$I_{hp} = I_{hL} \frac{X_r}{X_p + X_r} \quad (1.8)$$

$$I_{hL} = I_h \frac{X_{\text{voiz}}}{X_{\text{voiz}} + X_L + \frac{X_p X_r}{X_p + X_r}} \quad (1.9)$$

$$I_{\text{voiz}} = I_h \frac{X_L + \frac{X_p X_r}{X_p + X_r}}{X_{\text{voiz}} + X_L + \frac{X_p X_r}{X_p + X_r}} \quad (1.10)$$

Posons $D' = X_p + X_r$ et $D = (X_p + X_r)(X_{\text{voiz}} + X_r) + X_r X_p$

Donc on aura :

$$I_{hr} = \frac{I_{hL} X_p}{D} \quad (1.11)$$

$$I_{hp} = \frac{I_{hL} X_r}{D} \quad (1.12)$$

$$I_{hL} = \frac{I_h X_{\text{voiz}} (X_p + X_r)}{D} \quad (1.13)$$

$$I_{\text{voiz}} = \frac{I_{hL}}{D} [X_L (X_p + X_r) + X_p X_r] \quad (1.14)$$

Donc voila les relations déduites du montage. Ces relations permettront d'avoir dans chaque branche le courant harmonique. De ces relations on déduit les tensions :

$$V_A = I_h X_T + I_{h\text{voiz}} X_{\text{voiz}} \quad (1.15)$$

$$V_B = I_{h\text{voiz}} X_{\text{voiz}} \quad (1.16)$$

$$V_C = I_{hr} X_T \quad (1.17)$$

$$V_{BC} = I_{h\text{voiz}} X_{\text{voiz}} - I_{hr} X_T \quad (1.18)$$

II.1.1.1. Les impédances à considérer

Les impédances à considérer pour le calcul de la propagation de ces systèmes équilibrés de courant harmoniques ne se déduisent pas toutes directement des éléments cycliques utilisés pour les courants fondamentaux.

- L'inductance des lignes et l'inductance des fuites des transformateurs vont en première approximation être considérées comme constantes. On peut donc supposer que les réactances correspondantes sont proportionnelles au rang des harmoniques.
- Il faut noter l'importance du rôle des capacités. Alors que l'impédance série ligne augmente avec h , l'impédance des capacités est inversement proportionnelle à h . Notons que les capacités constituent des chemins de moindre impédance réduisant la propagation des courants harmoniques des redresseurs vers le réseau. Les capacités intervenant sont les capacités entre enroulement de diverses phases et entre les enroulements et masse des transformateurs. Les capacités des câbles et des lignes hautes tensions jouent aussi un rôle très important.

NB : Les batteries de condensateurs destinées à améliorer le facteur de puissance, qui si elles sont de fortes capacités jouent un rôle de court-circuit pour les harmoniques surtout lorsqu'ils sont de rang élevés.

Il faut toutefois signaler le risque de résonance lié à la présence de condensateurs.

II.1.1.1.a. Mise en évidence de l'inductance de fuite des transformateurs

Au niveau des transformateurs il y a des enroulements au primaire comme au secondaire donc les inductances de ceux-ci ne peuvent être négligeables.

Nous Modéliserons le schéma du transformateur mettant en évidence les enroulements au primaire et au secondaire.

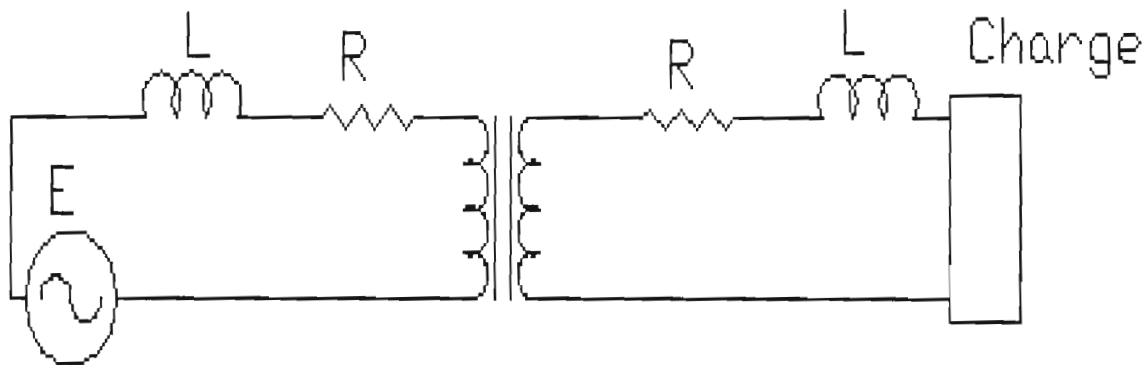


Figure 9 : mise en évidence de l'inductance de fuite d'un transformateur

Partie 2: La commutation

I. Phénomène de la commutation

I.1. Nécessité de la commutation

L'électronique de puissance a pour ambition la conversion des ondes électriques (de continu en continu, de continu en alternatif, d'alternatif en alternatif) et la commande de la puissance électrique ainsi convertie au moyen des composants électriques, c'est-à-dire d'éléments de petites dimensions devant les systèmes alimentés.

Lorsque ces éléments se déroulent à forte puissance (par rapport à celles facilement commandées en électronique linéaire) elles doivent obligatoirement l'être à très faible pertes relatives, non seulement pour des raison de rendement mais surtout parce qu'il est alors exclu que les composants électroniques utilisés puissent dissiper sans risque un pourcentage non négligeable de la puissance en jeu.

Autrement dit, pour les puissances (par exemple au-delà d'un kilowatt) nécessitant des tensions et des intensités élevés, un élément de convertisseur parcouru par une

portion importante du courant du courant nominal ne pourra provoquer qu'une chute de tension très faible pour que ces pertes soient compatibles avec les dimension et sa température maximale de travail, inversement, s'il supporte tout ou une partie de la tension nominale il pourra être traversé que par un courant d'intensité négligeable. En définitive, les composants électroniques ne pourront travailler que dans deux types d'état :

- Courant de l'ordre de grandeur du courant nominal, très faible tension
- Tension de l'ordre de grandeur de la tension nominale, très faible courant

Pour réaliser les conversions recherchées il faudra que les composants passent d'un type d'état à un autre au cours de transitions rapides et peu dissipatrice (c'est-à-dire en respectant leur contrainte thermique) ; on dira alors qu'ils commutent.

Ce mode de fonctionnement des composants électroniques ressemble à celui des interrupteurs mécaniques.

En conclusion l'électronique de puissance est nécessairement une électronique de commutation.

I.2 Causes de la commutation

On remarque qu'au niveau des variateurs de vitesse, existe un ensemble de thyristors ou diodes .Donc y aura une commutation des différents ponts, mais cette commutation ne se fait pas de manière instantanée. A cause de l'impédance selfique du réseau en amont du convertisseur (inductance du transformateur), le courant dans les semi-conducteurs ne peut pas varier de façon continue, de la valeur maximale à la valeur zéro et inversement. Ainsi, lorsque sur un demi-pont, un thyristor s'éteint alors qu'un autre devient passant, il se produit un court-circuit entre deux phases d'alimentation du réseau. Ces courts-circuits appelés « **encoche de commutation** » inhérent au fonctionnement de tout pont à thyristor peuvent provoquer des creux de tension au primaire du transformateur.

I.2.1 Principe de fonctionnement des diodes

Définition

Une diode est un semi-conducteur constitué par une seule jonction PN. Il constitue l'élément unidirectionnel le plus simple. La figure 10 donne sa représentation

symbolique et indique les conventions de signe adoptées pour le courant et la tension.

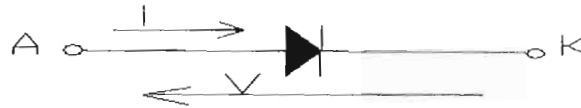


Figure 10 : représentation d'une diode

1.2.1.1 Mode de fonctionnement

Quand le circuit dans lequel est placée la diode tend à faire passer le courant le courant dans le sens direct, c'est-à-dire de l'anode A vers la cathode K, la diode est conductrice ou passante :

- Le courant i positif prend la valeur qui lui est imposée par le reste du circuit. Il faut veiller à ce que la valeur moyenne i_{moy} de i ne dépasse pas le courant nominal moyen de la diode ;
- La tension V aux bornes a une valeur positive faible de l'ordre du volt. En première approximation on peut négliger cette chute de tension directe devant les autres tensions rencontrées dans le circuit.

Quand une tension négative aux bornes tend à faire passer le courant dans le sens inverse, la diode est isolante ou bloquée :

- La tension négative ou tension inverse imposée à la diode par le reste du circuit peut prendre une valeur élevée. Il faut veiller à ce qu'elle reste inférieure à la tension inverse nominale de la diode ;
- Le courant négatif ou courant inverse est très faible de l'ordre de quelques dizaines de milliampères. En première approximation on peut le négliger.

1.2.1.3. Caractéristiques statiques simplifiées

La caractéristique d'une diode a l'allure représentée sur la figure 11

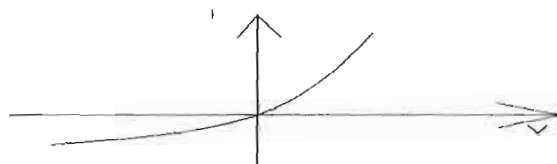


Figure 11 : caractéristique statique d'une diode

1.2.2 Principe de fonctionnement des thyristors

Définition

Le thyristor est un semi conducteur de type PNPN assimilable à un ensemble de trois jonctions. Comme la diode, il constitue un interrupteur unidirectionnel à fermeture commandée. Outre l'anode A et la cathode K ; le thyristor est muni d'un électrode de déblocage ou gâchette G . On peut illustrer le thyristor par le schéma suivant :



Figure 12 : représentation d'un thyristor

1.2.2.1 Modes de fonctionnement

- Si la tension v à ses bornes est négative, le thyristor est bloqué ; il n'est parcouru que par un faible courant de fuite inverse. Il faut veiller à ne pas dépasser la tension inverse maximale.
- Si de négative la tension devient positive, le thyristor reste bloqué ; il n'est traversé que par un faible courant de fuite direct. Il faut veiller à ne pas dépasser la tension directe blocable à courant de gâchette nul. Pour les thyristors normaux elle est toujours voisine à la tension inverse maximale.
- Si la tension v étant positive, on fait passer entre la gâchette et la cathode une impulsion positive de courant, le thyristor devient passant. La durée de l'impulsion de déblocage doit être suffisante pour que le courant i puisse atteindre une valeur dite « courant décrochage ».
- Quand il est conducteur le thyristor se comporte comme une diode, la chute de tension est cependant un peu plus forte.

- Que la tension directe appliquée au thyristor bloqué ne croît pas rapidement (limitation du dv/dt), sinon il s'amorce sans impulsion de déblocage ;
- Qu'après, une tension positive n'est pas appliquée à ses bornes avant un intervalle de temps suffisant, sinon il se réamorce sans impulsion de déblocage. Cet intervalle de temps est appelé temps de blocage.

Dans les montages des redresseurs, il est rarement nécessaire de mettre en série avec les semi-conducteurs une inductance destinée à limiter di/dt . L'inductance de la source qui est souvent un transformateur assure cette limitation.

Dans ces montages, de brusques variations de la tensions aux bornes du semi-conducteurs apparaissent du fait du comportement même du convertisseur ; il y a en plus des surtensions dues aux transistors et aux parasites. Il est nécessaire de protéger les semi-conducteurs contre les coups de tension. Pour cela dans les montages, on dérive aux bornes de chacun d'eux un circuit résistance - capacité.

1.3. Commutation des redresseurs

Lorsque plusieurs redresseurs ont une électrode commune, chacun n'est conducteur que pendant une durée limitée et qu'un seul conduit à chaque instant (lorsque l'on considère les interrupteurs redresseurs comme parfaits).

Si le courant produit par le montage redresseur est ininterrompu, ce qui représente le cas général, cela impose que l'enclenchement d'un redresseur s'accompagne du blocage de celui qui conduisait auparavant.

La figure 14 montre qu'à l'instant t_1 le redresseur $th2$ devient conducteur tandis que $th1$ se bloque.

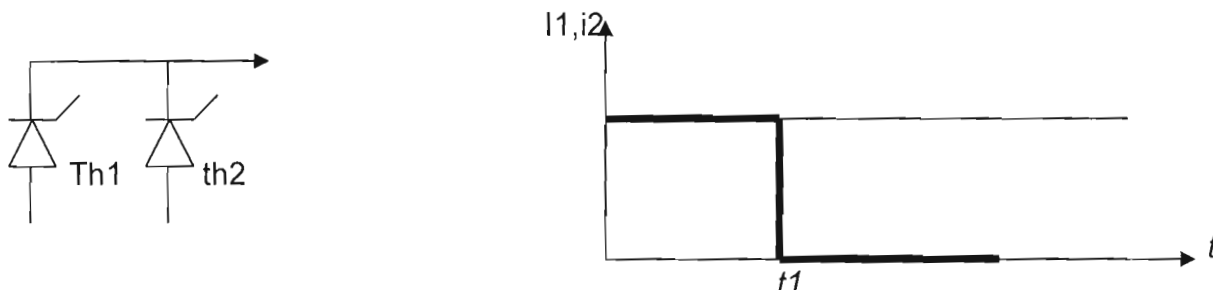


Figure 14. Commutation instantanée des interrupteurs redresseurs.

En pratique, le phénomène de commutation n'est jamais instantané. Cette réalité physique a des conséquences que nous aborderons dans la suite. Pour l'instant, on considérera toujours une commutation instantanée.

On note toutefois les caractéristiques statiques et dynamiques des thyristors.

1.2.2.2 Caractéristique statique simplifié

Elle comprend trois branches :

- Tension négative, thyristor bloqué.
- Tension positive, pas d'impulsion sur la gâchette, thyristor bloqué.
- Tension positive, envoi d'une impulsion, thyristor conducteur.

Tout cela peut être illustré par le schéma suivant :

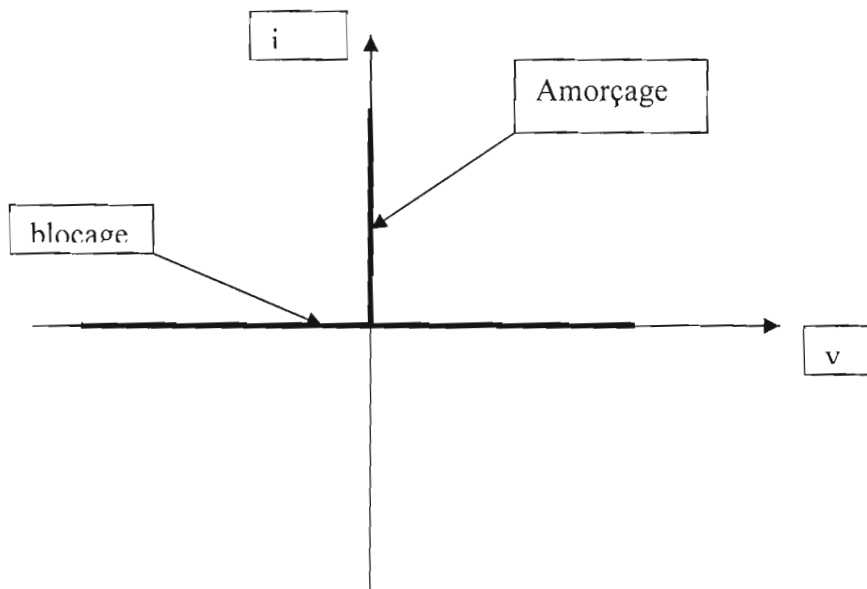


Figure 13 : caractère statique d'un thyristor

1.2.2.3 Caractéristique dynamique

Lors de la mise en œuvre d'un thyristor dans un redresseur, après avoir veillé :

- à ce que le courant ne soit pas excessif (valeur moyenne ou plus souvent valeur efficace du courant) ;
- à ce que les valeurs maximales de la tension inverse et de la tension directe à l'état bloqué ne soit pas excessives,

Il suffit de s'assurer que :

- Que le courant direct ne s'établisse pas rapidement (limitation du di/dt), sinon des échauffements locaux détruisent les composants ;

On distinguera plusieurs types de commutations suivant le mode de blocage du redresseur à déclencher :

- *Commutation par la charge ou par la source* (dite également **commutation naturelle**) lorsque ce sont des conditions extérieures (et donc naturelles) au convertisseur (tensions ou f.é.m. de la charge ou de la source) qui contraignent au blocage le redresseur conducteur quand un nouveau redresseur s'enclenche ;
- *Auto-commutation* (ou **commutation forcée**) lorsque le redresseur est commandé.

1.3.1 Indice de commutation q du montage

L'indice de commutation est donné par la durée de conduction de chaque diode et correspond au nombre de phases du réseau de distribution. Par exemple, pour le montage PD3, l'indice de Commutation est égale à 3 (chaque semi conducteur conduit pendant un tiers de période ou T/q).

1.3.2 Phénomène d'empiétement

Nous avons jusqu'ici supposé tous les éléments du redresseur parfaits, et en particulier le transformateur.

En réalité, les enroulements primaire et secondaire du transformateur présentent des inductances de fuite.

En conséquence, l'intensité du courant ne peut varier de façon discontinue dans ces éléments et la commutation ne peut être instantanée : l'intensité du courant dans le Semi-conducteur qui se bloque ne peut passer instantanément de I_c à 0 tandis que celle du Semi-conducteur qui s'enclenche passe de 0 à I_c . On se propose dans ce paragraphe d'étudier l'influence de ce phénomène sur la tension redressée.

Nous allons chercher à évaluer la chute de tension moyenne de la moyenne de la tension redressée liée au phénomène d'empiétement.

Pour simplifier l'étude (nous généraliserons à la fin), nous considérons la commutation entre deux diodes d'un commutateur parallèle.

Nous supposons constante l'intensité du courant de la charge (charge fortement inductive) et nommons l l'inductance totale de fuite ramenée au secondaire du Transformateur.

La figure 15 décrit le montage étudié, l'allure des tensions et courants mis en jeu

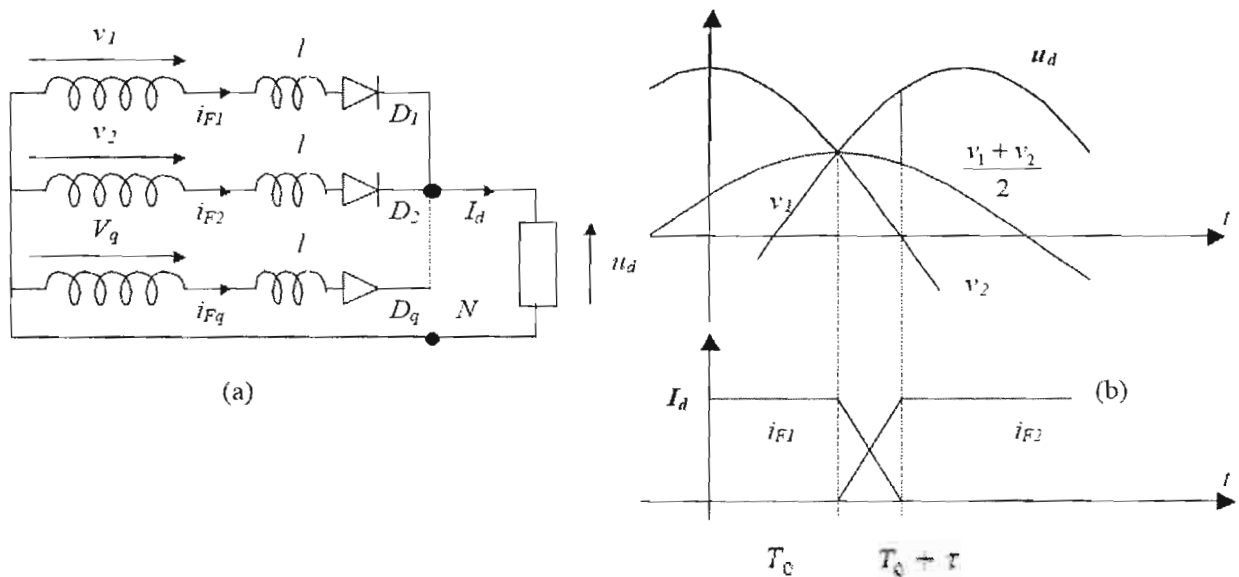


Figure 15: Montage d'un redresseur et mise en évidence du phénomène d'empiétement

1.3.3 la chute de tension moyenne

A l'instant t_0 où $v_1(t) = v_2(t)$ les diodes commutent : l'intensité i_{F2} du courant dans D_2 cesse d'être nulle et commence à augmenter. i_{F2} prend la valeur I_c à l'instant $T_c - \tau$ où se termine la commutation. Simultanément l'intensité i_{F1} du courant dans D_1 est passée de I_c à l'instant T_c à 0 à l'instant $T_c + \tau$. Pendant la durée τ , les deux diodes sont simultanément conductrices ; c'est le **phénomène d'empiétement** (la diode D_1 reste enclenchée au-delà de la limite idéale de conduction et empiète sur la région de conduction de D_2).

La valeur moyenne de $\Delta_1 u_d$ vaut donc :

$$\Delta U_{d0} = \frac{1}{T} \Pi_{Id} = \frac{l\omega}{2\pi} I_d \quad (\text{voir annexe 1}) \quad (1.19)$$

En conclusion, on voit que la chute de tension moyenne en charge est d'autant plus grande que l'inductance de fuites ramenée au secondaire est plus importante et l'intensité du courant à commuter plus grande.

1.3.4 la durée de l'empiètement en fonction de I , w et U

U est la valeur efficace de la tension composée appliquée entre les anodes des deux diodes qui commutent.

Les relations :

$$I_d = \frac{U\sqrt{2}}{L\omega} \sin \frac{\pi}{q} (1 - \cos \mu) \quad (1.20)$$

$$\mu = \arccos \left[1 - \frac{L\omega I_d}{U\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{q}} \right] \quad (1.21)$$

Donc le temps d'empiètement τ sera donné par la relation suivante :

$$\mu = \omega\tau \quad (1.22)$$

$$\tau = \frac{1}{\omega} \arccos \left[1 - \frac{L\omega I_d}{U\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{q}} \right] \quad (1.23)$$

Pour les ponts à thyristor l'angle de commutation peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$\cos \alpha - \cos (\alpha + \mu') = \frac{L\omega I_d}{U\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{q}} \quad (1.24)$$

q = nombre de phases

μ = angle d'empiètement pour les pont de diodes

μ' = angle d'empiètement pour les pont de thyristors

L = inductance au secondaire du transformateur

La durée de l'empiètement est donc d'autant plus grande que l'intensité du courant à commuter est importante et que l'inductance de fuite est plus élevée. Elle diminue lorsque l'amplitude de la tension composée qui provoque la commutation augmente.

1.3.5 Cas général : redresseur quelconque

La chute de tension est proportionnelle au nombre de commutations par période, soit à l'indice de pulsation.

$$\Delta_1 U_{d0} = \frac{l\omega}{2\pi} p \cdot I_d \quad (1.25)$$

P=Indice de pulsation p de la tension redressée.

L'indice de pulsation p donne le nombre de portions de sinusoïde par période de la tension redressée.

Par exemple, pour le montage PD3, nous verrons que l'indice de pulsation est égal à 6 (la tension redressée se compose de six portions par période).

1.4 Effets des commutations

Dans une modélisation on tiendra compte de l'inductance des fuites du transformateur et de l'inductance du réseau par une inductance unique ramenée au secondaire comme montré plus haut.

Nous voyons nettement que le principal effet de la commutation est la chute de tension, mais il existe d'autres effets beaucoup plus dangereux pour le bon fonctionnement d'un réseau électrique. On pourra citer ainsi :

- le court-circuit créé entre les phases du réseau ;
- L'altération de la forme d'onde des tensions alternatives ;
- Le déphasage des ondes des courants pris dans le réseau.

NB : Nous noterons pour la commutation avec les thyristors que le début des transferts est retardé d'un angle α .

Conclusion partielle

Ce chapitre qui a traité de manières générales sur les perturbations des réseaux électriques nous donne une vision globale sur les harmoniques et sur le phénomène de commutation. De ce fait les généralités de ce chapitre nous permettront de vérifier dans ce qui suit l'existence de ces phénomènes au niveau de la station de pompage de la SONES se trouvant à Ngaye Mékhé.

Chapitre II : Application à la station de Ngaye Mékhé

I. Description et schéma de l'installation

I.1 Description de l'installation

L'installation est constituée de deux parties : l'une est hydraulique et l'autre électrique. Notre étude se limitera sur la partie électrique.

Le réseau utilisé est aérien moyenne tension de 90 kV et prend sa source à TOBENE. Au travers de plusieurs transformateurs, des variateurs de vitesses sont alimentés à 3.3kv (90/30kv ; 30/3,3kv).

Le transformateur 30/3,3 kV est un transformateur spécial car ayant un (1) primaire et deux(2) secondaires. Tout ceci dans le but d'augmenter la tension efficace qui sera redressée.

La ligne électrique qui lie le poste de TOBENE au transformateur 90/30kv est distante de 40km.

La station de pompage comporte 4 pompes entraînées par des moteurs asynchrones de 2228kw, 458A et $\eta=95\%$. Donc ces moteurs sont alimentés 3.3kv via les variateurs de vitesses.

Il existe aussi un circuit de régulation commandé par un débitmètre placé en amont de la pompe commandant ainsi la vitesse du moteur via le variateur de vitesse. Toute cette description est illustrée par les schémas ci-après.

I.2 Schéma synoptique de l'installation

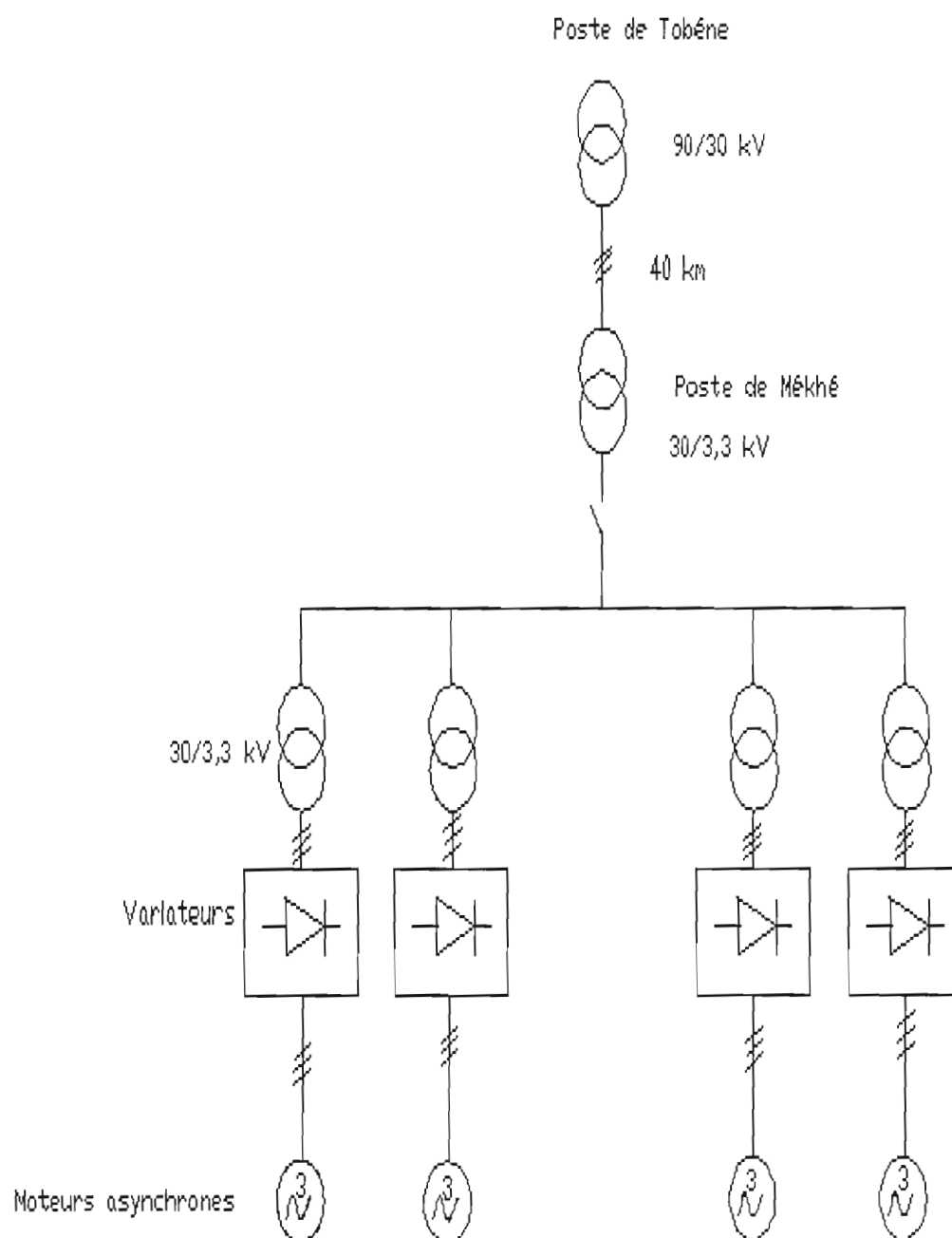


Figure 16 : schéma de l'installation

Quelques caractéristiques des variateurs et des moteurs

Variateur de vitesse de 25 à 50hz, $I_n=586A$

Moteur asynchrone triphasé, $P=2228kw$, $I=458A$, $\eta=95\%$

I.2.1 Schéma synoptique de l'asservissement

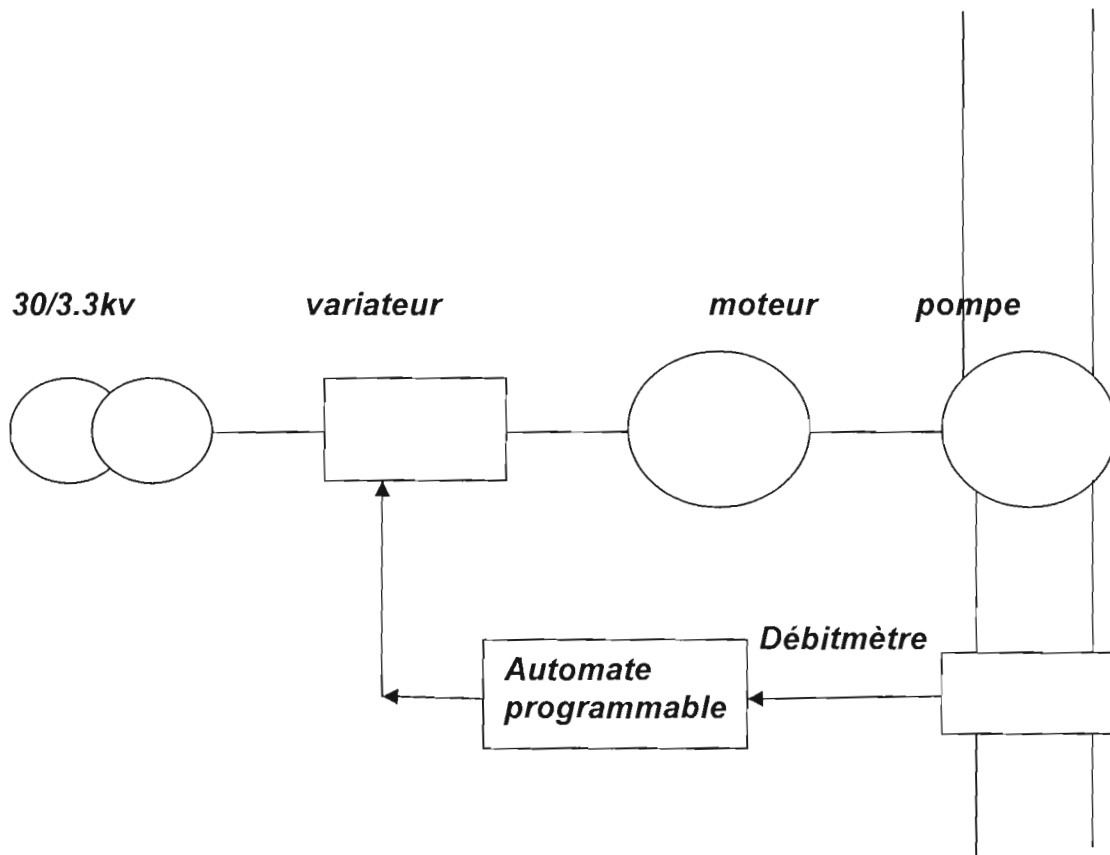


Figure 17 : schéma d'asservissement

I.3 Principe de fonctionnement de la station

Le fonctionnement de la station repose essentiellement sur la quantité d'eau présente en amont de la pompe.

Ainsi en fonction de la quantité d'eau présente, par un système d'asservissement le système régule la fréquence du moteur asynchrone. En effet, il existe en amont de la pompe un débitmètre qui envoie un signal vers le variateur de fréquence et avec « **un système électronique (voir annexe 3) (technologie DTC)** », le variateur ajuste la fréquence.

Nous notons ainsi une grande présence de charges non linéaires, ce qui est synonyme de perturbations. Mais comme énoncé plus haut un analyseur de réseau jouera le rôle de protection pour toute la centrale.

I.3.1 Principe d'un analyseur de réseau

Introduction

Le principal appareil de mesure en hyperfréquence est l'analyseur de réseaux. Contrairement à ce que son nom pourrait laisser supposer, il n'est pas destiné aux systèmes de télécommunication. En fait, il sert à déterminer les paramètres S d'un dipôle ou d'un quadripôle actifs ou passifs (il est également possible en multipliant les mesures et dans des conditions de mesures particulières de caractériser des multipôles).

Il existe deux grandes familles d'analyseurs de réseaux : **les scalaires** qui ne mesurent que le module des paramètres S et **les vectoriels** qui mesurent le module et la phase. Le premier nommé ne donne accès qu'à une partie de l'information mais son coût est plus faible à l'achat. Son principe de base est l'association de coupleurs et de mesureurs.

Nous commencerons par faire quelques rappels sur la définition des paramètres S dans le cas d'un quadripôle, puis nous présenterons le fonctionnement d'un analyseur de réseaux et enfin nous traiterons les différentes erreurs qui entachent les mesures et les moyens de les corriger.

I.3.1.1 Rappel sur les paramètres S

Considérons le quadripôle suivant (figure 1) :



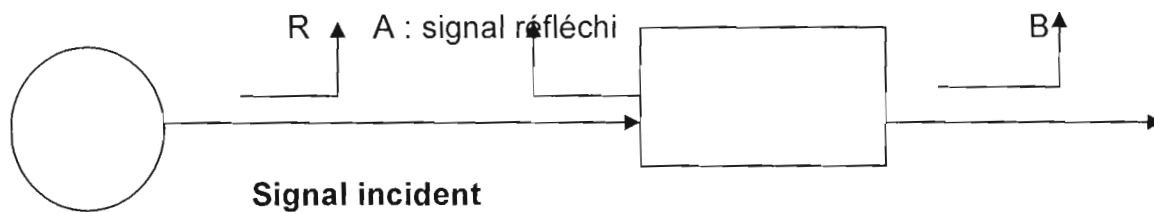
Figure 18: Accès d'un quadripôle

Les paramètres S caractérisant ce quadripôle sont définis par :

$$S_{11} = \frac{\text{signal.réfléchi.au.port1}}{\text{signal.incident.au.port1}} \quad \text{Coefficient de réflexion en entrée}$$
$$S_{21} = \frac{\text{signal.transmis.au.port2}}{\text{signal.incident.au.port1}} \quad \text{Coefficient de transmission en entrée-sortie}$$
$$S_{12} = \frac{\text{signal.transmis.au.port1}}{\text{signal.incident.au.port2}} \quad \text{Coefficient de réflexion en sortie- entrée}$$
$$S_{22} = \frac{\text{signal.réfléchi.au.port2}}{\text{signal.incident.au.port2}} \quad \text{Coefficient de réflexion en sortie}$$

1.3.1.2 Schéma de principe d'un analyseur de réseaux vectoriel

Nous avons vu lors des rappels précédents qu'il est nécessaire pour pouvoir calculer les paramètres S de connaître les signaux réfléchis et transmis mais aussi le signal incident. La figure 2 montre un schéma simplifié du prélèvement des signaux.



Source

Figure 19 : schéma de base de mesure des différents signaux

Le signal émis par une source est en général divisé en deux à l'aide d'un diviseur Wilkinson (voir annexe 5). La partie prélevée servira de référence (R). L'autre partie attaque le DUT. Une partie est réfléchie et l'autre est transmise (en supposant que le quadripôle est sans perte). A l'aide de coupleurs, nous dérivons une portion des signaux (A et B).

A partir de ces signaux, il est possible de calculer les paramètres S du DUT par les formules suivantes :

$$S_{11} = \frac{A}{R} \quad (2.1)$$

$$S_{21} = \frac{B}{R} \quad (2.2)$$

Pour obtenir les deux autres, on «retourne» les entrées et les sorties.

L'ensemble du travail effectué par l'analyseur est représenté sur le schéma suivant :

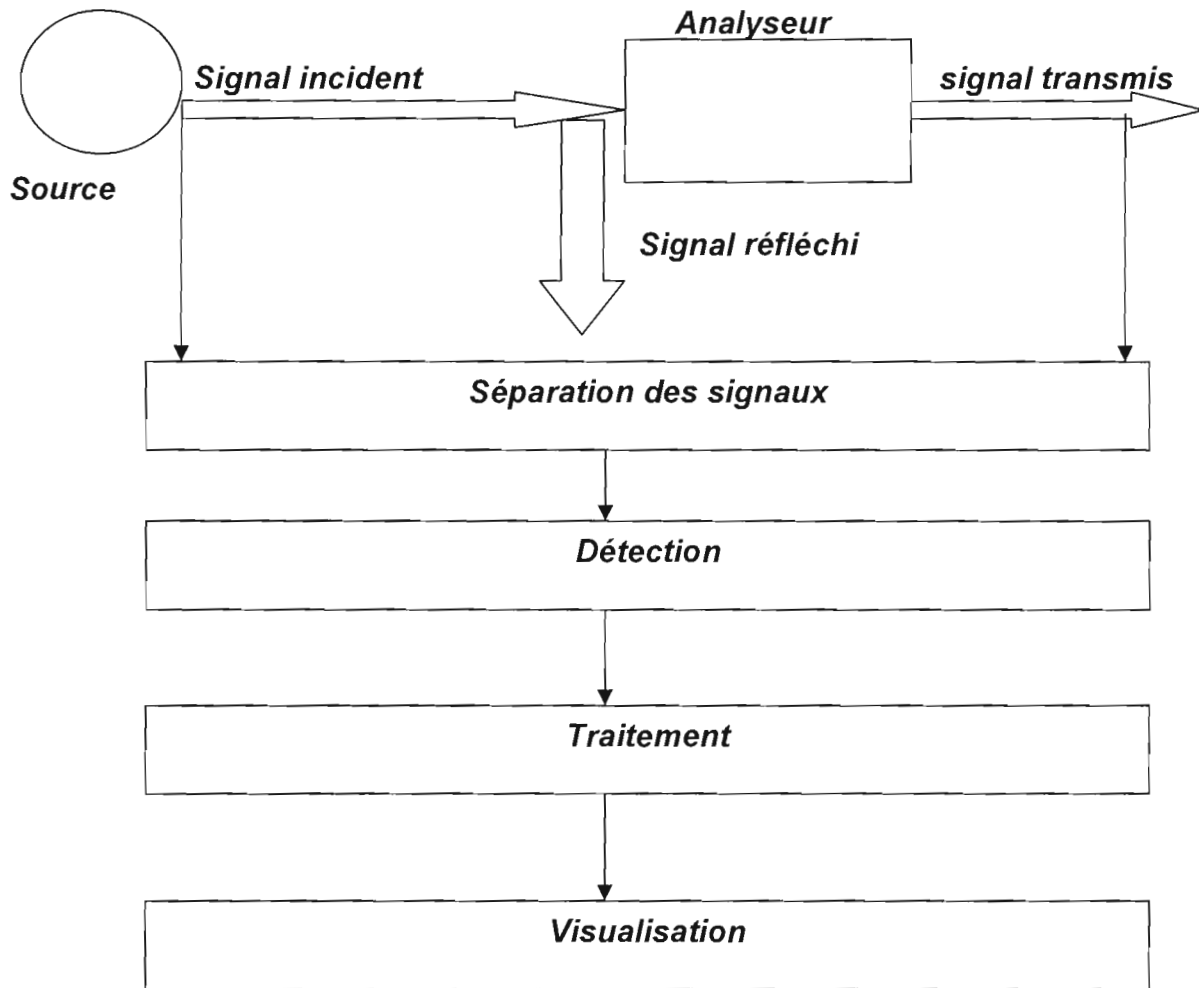


Figure 20 : schéma de fonctionnement d'un analyseur de réseau

En résumé la première étape est de séparer les signaux (à l'aide des coupleurs) puis de mesurer le module et la phase des signaux et enfin la dernière étape est de traiter les données ainsi mesurées (passage domaine temporel, échelle dB,...) à l'aide d'un processeur.

Le principe décrit plus ici suppose que les composants utilisés sont parfaits c'est à dire sans pertes et de caractéristique fréquentielle idéale. En pratique, les mesures effectuées contiennent un certains nombres d'erreurs qui peuvent être, suivant les cas, corrigés.

L'ensemble des erreurs existantes est regroupé en trois grandes familles :

- Erreurs systématiques : elles sont dues aux imperfections de l'analyseur, elles sont invariantes dans le temps ;
- Erreurs aléatoires : la principale cause est le bruit interne des composants,

elles sont imprévisibles (varie en fonction du temps) et ne peuvent pas être corrigés ;

➤ Erreurs de dérive : les deux principales causes sont les variations de

température et l'utilisateur. Elles sont correctibles numériquement.

Dans la suite, nous allons présenter les méthodes de corrections des erreurs Systematiques.

La figure 4 présente les six erreurs dans le cas d'une mesure entrée-sortie.

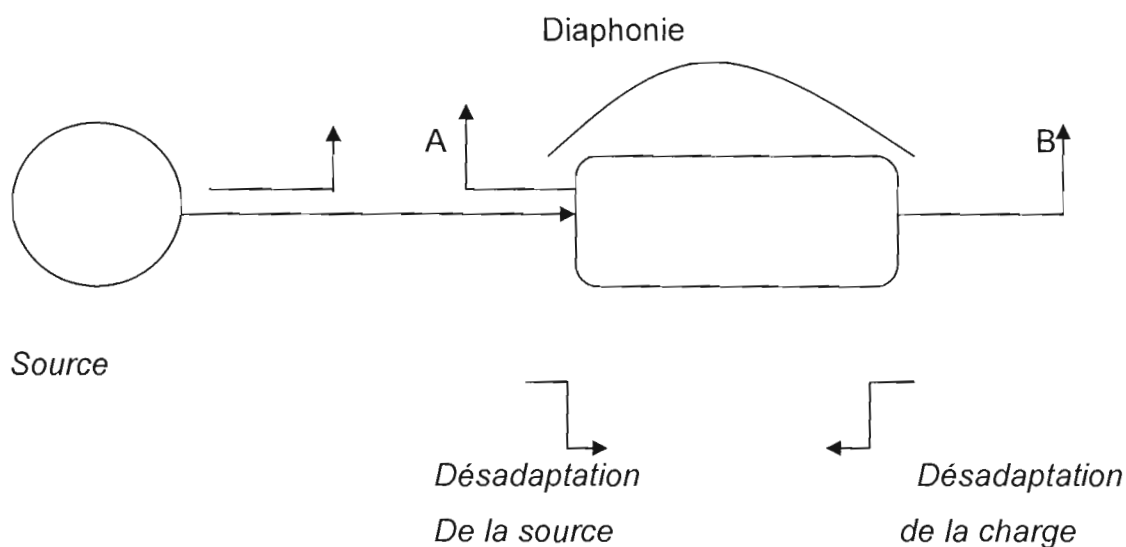


Figure 21: représentation des six(6) erreurs pour une mesure entrée sortie

Ces erreurs sont au nombre de six dans le sens direct et de six dans le sens inverse. La première est la directivité du coupleur en entrée : une partie du signal incident passe directement sur la voie A sans être réfléchi par le l'analyseur. Ensuite nous avons les désadaptations de la source et de la charge. Puis les réponses fréquentielles des dispositifs de mesures : leur fonction de transfert n'est pas égale à 0dB sur l'ensemble de la bande de mesure de l'analyseur. Enfin, la dernière erreur est la diaphonie qui correspond à une partie du signal qui passe directement sur la voie B sans traverser le DUT.

NB :

Diaphonie=défaut de transmission résultant de l'interférence des signaux en provenance de deux signaux, de deux circuit.

II. Etude du variateur de vitesse

Introduction

C'est un variateur de marque «ACS 1000 »qui est un convertisseur de fréquence moyenne pour la commande des moteurs triphasés à cage d'écureuil.

Nous noterons ainsi que ce variateur ne peut faire varier la fréquence que de 25hz à 50hz. avec un courant nominal de 586 Ampère (A).

II.1 Circuit d'entrée

L'ACS 1000 est équipée d'un redresseur à diodes 12 pulses. La tension du réseau est fournie aux ponts redresseurs via le transformateur à trois(3) enroulements associés au convertisseur. Pour le redressement 12 pulses, un décalage de phase de 30 degré est indispensable pour le deux(2) enroulements secondaire du transformateur. Ainsi un secondaire est connecté en étoile l'autre en triangle.

Les deux(2) ponts redresseurs sans fusible sont connectés en série de sorte que les tensions c.c s'additionnent.

Les selfs (non illustrés à la figure) sont utilisés dans l'onduleur pour protéger ses diodes de roue libre des fortes variations d'intensités pendant la commutation. Chaque bras du pont onduleur triphasé deux (2) thyristors IGCT pour une commutation à trois(3) niveaux : la tension commune entre la tension c.c positive, le point neutre et la tension cc négative. Ainsi la tension de sortie et la fréquence peuvent être commandées en continu de zéro à la valeur maximale avec la technologie DTC.

II.2 Circuit de sortie

Sur la sortie du convertisseur, un filtre est LC passe-bas réduit la teneur en harmonique de la tension de sortie. La fréquence passe bas est conçue pour être très inférieure à la fréquence de commutation la plus basse utilisée par l'étage de sortie de l'onduleur. On améliore très nettement la forme des ondes de tension et de courant appliqué au moteur. Avec ce filtre la forme de l'onde est quasi sinusoïdale. Ainsi les moteurs standards peuvent être utilisés à leur valeur nominale. Le filtre supprime également tous les phénomènes de variation importante de tension. On s'affranchit ainsi des réflexions de tension dans les câbles moteurs et contraintes

imposés à l'isolation du moteur. On évite la défaillance prématurée des enroulements liés au courant HF de couplage capacitif.

Mais avant toutes études poussées sur ces variateurs, posons-nous d'abord les questions suivantes :

➤ **Qu'est qu'un variateur de fréquence ?**

Un variateur de fréquence est un appareil permettant de faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone standard par variation de la fréquence des tensions et courants appliqués au moteur.

Ce principe grâce à l'électronique de puissance est utilisé dans les variateurs de vitesse et permet de répondre aux applications où le besoin de réguler un mouvement d'un objet ou d'un fluide est nécessaire.

➤ **Comment fonctionne un variateur de fréquence ?**

Le principe est de convertir le réseau alternatif distribué à 50 ou 60 Hz en courant continu, grâce à un montage redresseur, et de transformer ensuite cette tension continue en composantes alternatives de fréquence et tension, variables grâce à un onduleur. Ou alors utiliser le principe du Cycloconvertisseur (annexe 4).

Une régulation de vitesse et une régulation de couple permettent de contrôler la vitesse, en fonction des besoins et des variations de charge du moteur. Dans notre cas on utilise la technologie du « **contrôle direct de couple** » (DTC voir annexe 3). C'est une technique de commande unique des moteurs à courant alternatif par laquelle la commutation de l'onduleur est directement commandée par les variables de bases du moteur qui sont le flux et le couple.

Les valeurs mesurées de courant moteur et de tension du bus cc constituent les valeurs d'entrée du bloc qui élabore toutes les 25 microsecondes les valeurs réelles exactes de couple et de flux. Les comparateurs de couple et de flux comparent ces valeurs réelles aux valeurs de références élaborées par les blocs « régulateur de référence de couple et de flux ». En fonction des valeurs de sortie des régulateurs d'hystérésis « le bloc sélectionneur d'impulsion » détermine directement la position optimale des commutateurs de l'onduleur.

Le schéma de fonctionnement d'un variateur avec redresseur et onduleur est illustré comme suit :

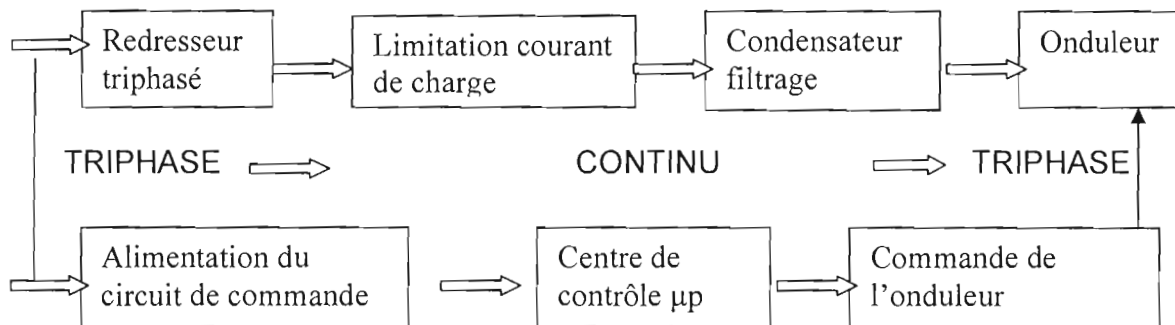


Figure 22: Le schéma de fonctionnement d'un variateur de vitesse

II.3 Schéma de principe avec onduleur

Un variateur de vitesse est constitué de manière simplifiée d'un pont de redresseur pour la conversion alternatif-continu, d'un condensateur pour le lissage de la tension redressée et d'un onduleur pour la conversion continu-alternatif. Pour un réseau triphasé, le redresseur est constitué de six(6) semi conducteurs conduisant deux à deux c'est-à-dire par paire.

De manière simplifiée on peut avoir le schéma suivant :

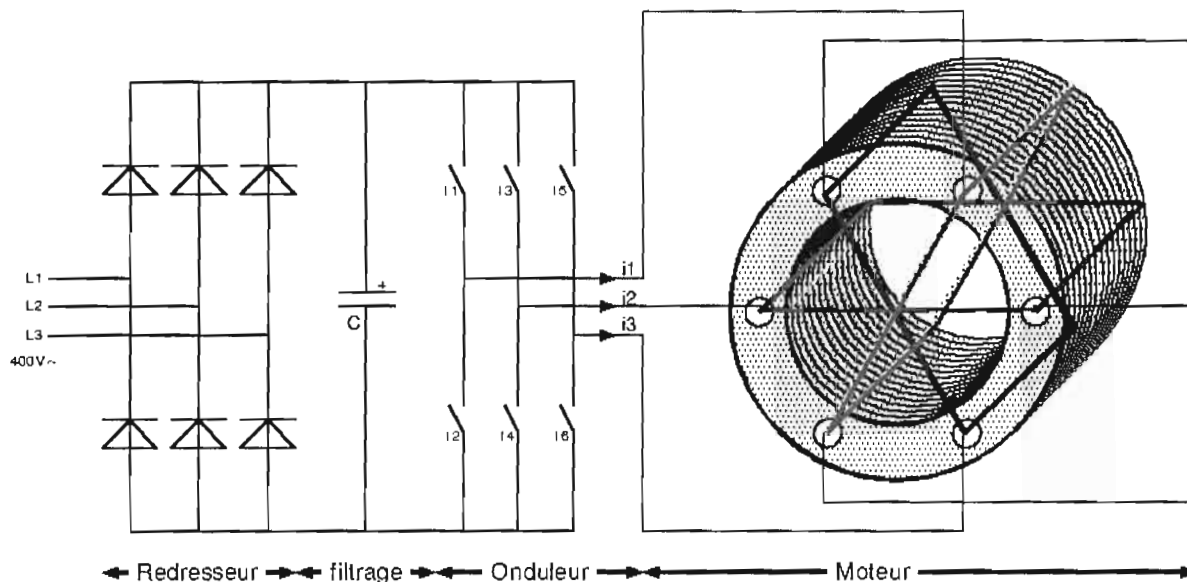


Figure 23 : schéma de principe d'un variateur de vitesse

II.4 Caractéristiques du variateur de fréquence

Comme énoncé plu haut, le variateur est de type MT avec redresseur à pont décaphasé (12 pulses) alimenté par 6 phases via un transformateur spécifiquement adapté.

Les données propres à prendre en compte sont les suivantes :

- Moteur de puissance nominale minimale de 2500 kW ;
- Alimentation en MT ;
- Température extérieure pouvant atteindre 45°C à l'ombre ;
- Hygrométrie pouvant atteindre 95% ;

A titre indicatif, le variateur proposé pour une MT à les caractéristiques principales suivantes :

- Puissance nominale estimée:3350 KVA délivrant un In de 586 A sous 3300 V ;
- Tension d'entrée : 1905 V sur pont dodécaphasé ;
- Fluctuation admissible de la fréquence: 25-50 Hz
- Facteur de puissance global, coté réseau > 0,96
- Equipement refroidi par eau
- Débit d'eau nécessaire : 150l/mn ;
- Perte de charges dans le circuit d'eau : 1 bar ;
- Pression acceptée en entrée : 3-6 bars ;
- Température d'entrée d'eau maxi : 35°C ;
- Echangeur air-eau de refroidissement des auxiliaires ;
- Pertes à évacuer par le circuit d'eau brute : 1,8% de la puissance nominale du variateur plus 7 KW (auxiliaire) ;
- Pertes dissipées par radiation carcasse de l'armoire variateur : 1 KW

II.5 Caractéristiques du transformateur convertisseur

Ce transformateur est placé juste avant les redresseurs à diode.

- Puissance nominale : 3900 KVA
- Tension Primaire : 30 KV
- Tension secondaire : 3,3 KV
- Fréquence : 50 Hz
- Couplage : 2xDyd0 et 2xDd0y1

- Perte à vide : 5 KW
- Pertes dues à la charge : 31 KW
- Transformateur à huile de type respirant pour l'installation extérieure sou abri.
- Température ambiante max : 55°C

III. Etude du fonctionnement

III.1 Schéma de montage simplifié du variateur :

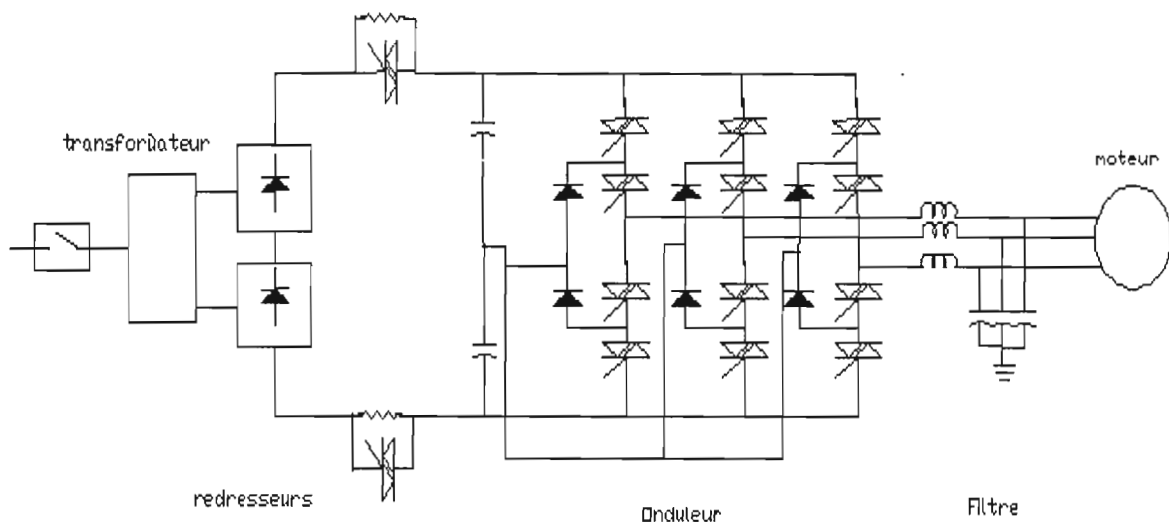


Figure 24 : Schéma de montage simplifié du variateur ACS 1000

A. Partie redresseur :

III.A.1 Objectifs de la mise en série des deux ponts

On regroupe les redresseurs en série pour ajouter leurs tensions redressées ou leurs courants redressés. Cependant il y a des précautions à prendre :

- Vérifier que les deux redresseurs mises en série sont aptes à débiter le même courant débité puisque les cotés continus des deux montages sont parcourus par le même courant.
- Vérifier que le tenions d'isolement entre les deux groupes de diodes et entre les enroulements qui les alimentent sont suffisantes.

D'ordinaire, on profite de cette mise en série pour obtenir de l'ensemble des performances supérieures à celles que donnerait chaque redresseur pris séparément :

- Augmentation de l'indice de pulsation de la tension redressée totale ;
- Amélioration du facteur de puissance dans le primaire commun ou dans la ligne d'alimentation commune

On peut l'illustrer par la figure 25

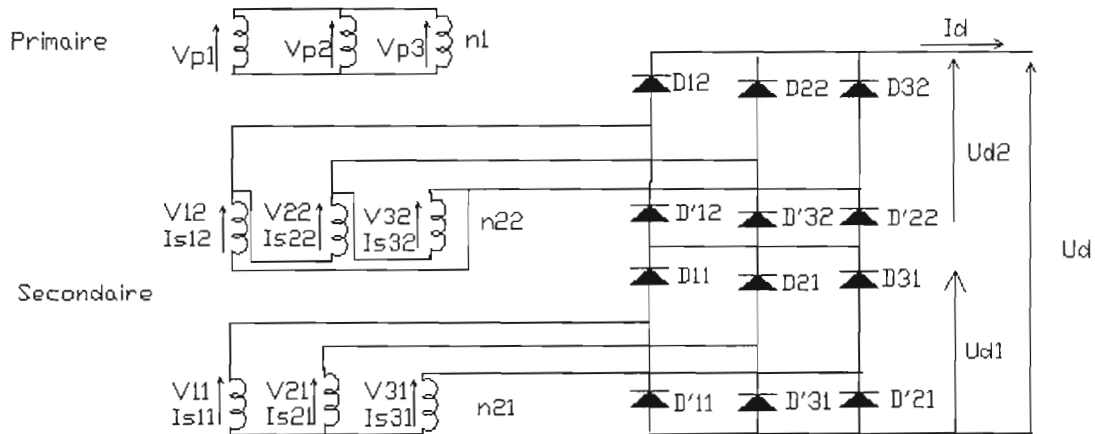


Figure 25 : schéma de mise en série des deux ponts

III .A.2 Etude du phénomène de commutation

A partir du réseau triphasé, on obtient au secondaire du transformateur deux systèmes triphasés équilibrés de tensions $V_{12}, V_{32}, V_{22}, V_{11}, V_{21}, V_{31}$

Si la valeur efficace est : 3300V et la fréquence du réseau 50 Hz donc $V_m = 3300\sqrt{2}$

et $\omega = 100\pi$ sur un enroulement

Ainsi on aura :

$$V_{12} = V_2 \sqrt{2} \sin 100\pi t \quad (2.3)$$

$$V_{32} = V_2 \sqrt{2} \sin(100\pi t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.4)$$

$$V_{22} = V_2 \sqrt{2} \sin(100\pi t - \frac{4\pi}{3}) \quad (2.5)$$

$$V_{11} = V_1 \sqrt{2} \sin 100\pi t \quad (2.6)$$

$$V_{21} = V_1 \sqrt{2} \sin(100\pi t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.7)$$

$$V_{31} = V_1 \sqrt{2} \sin(100\pi t - \frac{4\pi}{3}) \quad (2.8)$$

Ceci peut être représenté par :

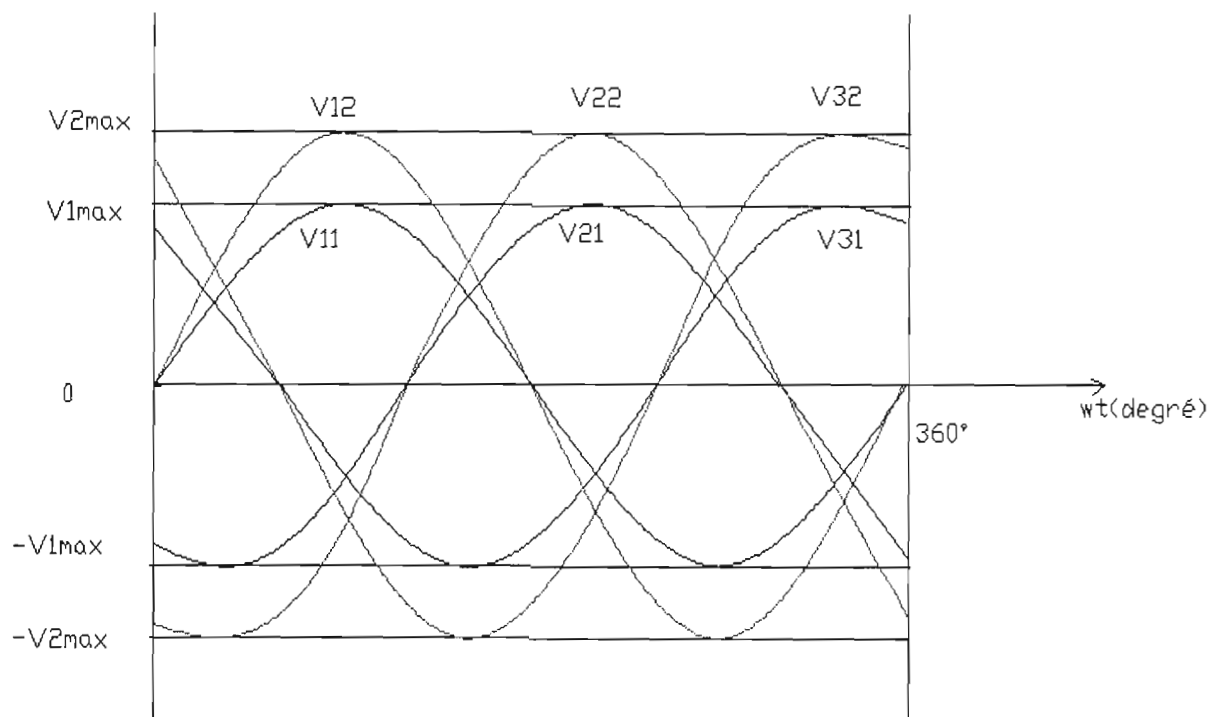


Figure 26 : représentation des différentes tensions

Pour que les tensions délivrées par les deux redresseurs U_{d1} et U_{d2} aient les mêmes valeurs moyenne, il faut que la valeur efficace V_1 des tensions V_{11}, V_{21}, V_{31} et celle V_2

Des tensions V_{12}, V_{22}, V_{32} sont liées par la relation :

$$\frac{6}{\pi} V_1 \sqrt{2} \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{\pi} V_2 \sqrt{2}$$

$$V_1 \sqrt{3} = V_2 \tag{2.9}$$

Le nombre de spires des deux secondaires doit donc être dans le rapport :

$$\frac{n_{22}}{n_{21}} = \sqrt{3} \tag{2.10}$$

Si on représente la tension redressée on aura :

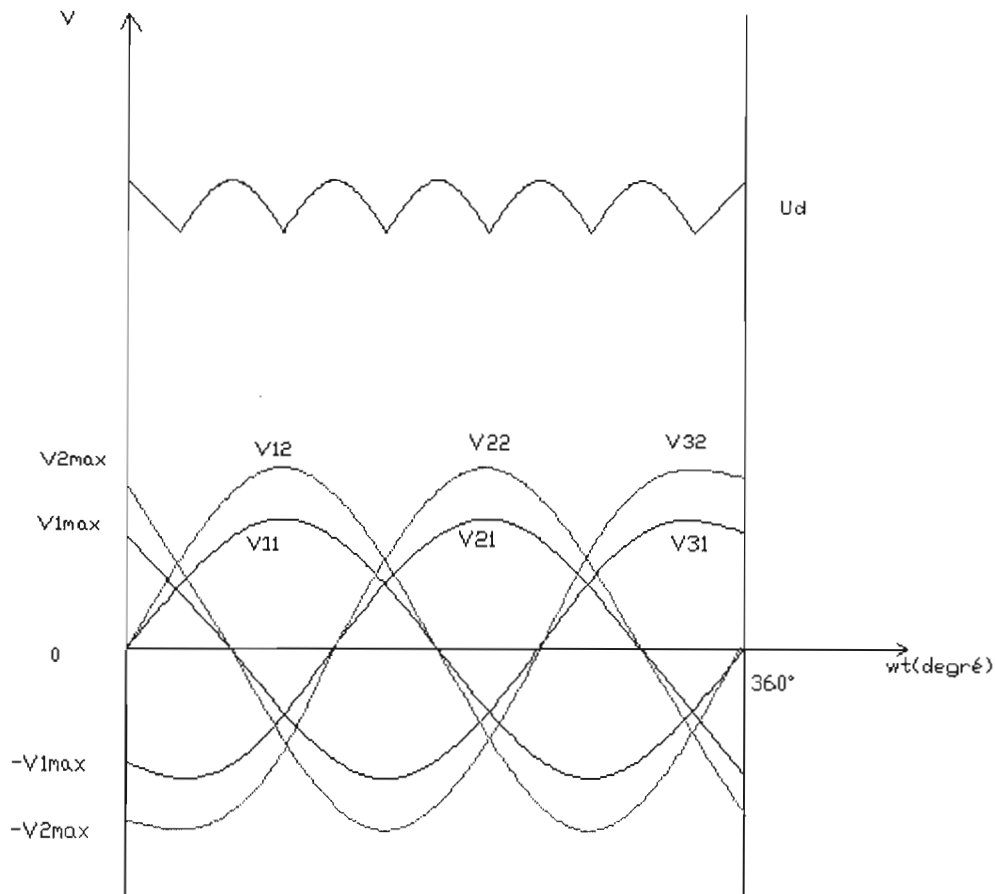


Figure 27 : représentation de la tension de sortie

Si on tient en compte l'empiétement

III.A.3 Phénomène d'empiétement

Comme il a été énoncé au chapitre 1 , à cause de l'impédance selfique du réseau en amont du convertisseur (inductance du transformateur), le courant dans les diodes ne peut pas varier de façon continue, de la valeur maximale à la valeur zéro et inversement. Ainsi, lorsque sur un demi-pont, une diode s'éteint alors qu'une autre devient passant, il y aura ainsi un intervalle de temps t pendant lequel les deux diodes conduiront ensemble. C'est ce temps $t = \tau$ que l'on appelle **temps d'empiétement**. De ce fait, il se produit un court-circuit entre deux phases d'alimentation du réseau. Ces courts-circuits appelés « **encoche de commutation** » inhérent au fonctionnement de tout pont à diodes peuvent provoquer des creux de tension au primaire du transformateur.

III.A.3.1 temps d'empiétement

Chacun des diodes mis en série conserve, pour ce qui est des diodes et des enroulements secondaires ses propriétés. Donc pourrons écrire :

➤ Pour le redressement avec source en étoile

$$I_{moy} = \frac{I_d}{3} \quad (2.11)$$

$$I_{1eff} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.12)$$

Sachant que $I_{1eff} = 586 A$
 $I_d = 718 A$

Les temps d'empiétement pour ce circuit peuvent être calculés comme suit :

$$\tau_{\text{étoile}} = \frac{1}{100\pi} \arccos\left[1 - \frac{718 \times 100\pi \times L_1}{1905\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{3}}\right]$$
$$\tau_{\text{étoile}} = \frac{1}{100\pi} \arccos\left[1 - \frac{359 \times 4\pi \times L_1}{33\sqrt{2}}\right] \quad (2.13)$$

Sachant que l'inductance au secondaire du transformateur est loin d'être nulle et est de l'ordre du millihenry, donc $\cos 100\pi\tau < 1$ ainsi $\tau \neq 0$

Cette relation nous permettra de plus mettre en évidence la commutation qui se passe pendant de ce temps τ qui est non nul.

III.A.4 Les conséquences de la commutation

III.A.4.1 chute de tension due à la commutation

Définition

C'est la chute de tension provoquée pendant ce temps d'empiétement μ . c'est définie par :

Par commutation on a :

$$\Delta U_d = \frac{1}{T} L I_d = \frac{L\omega}{2\pi} I_d \quad (2.14)$$

AN

$$\Delta U_d = \frac{1}{T} I_d = 50 L I_d \quad (2.15)$$

Donc nous pouvons conclure que la chute de tension existe étant donnée que l'inductance n'est pas nulle.

III.A.4.2 Court-circuit

Un **court-circuit** est un contact entre deux conducteurs de potentiel différent. Il entraîne le passage direct du courant «au plus court», d'un conducteur à l'autre au lieu de traverser le reste du circuit. Si il est involontaire, c'est un défaut qui entraîne une augmentation de l'intensité du courant et une élévation potentiellement dangereuse de la température des conducteurs. Le temps de montée peut varier de moins de quelques microsecondes à plusieurs millisecondes. Ces surtensions en BT sont généralement inférieures à 800 V, mais elles peuvent dépasser 1000 V suite à la fusion d'un fusible.

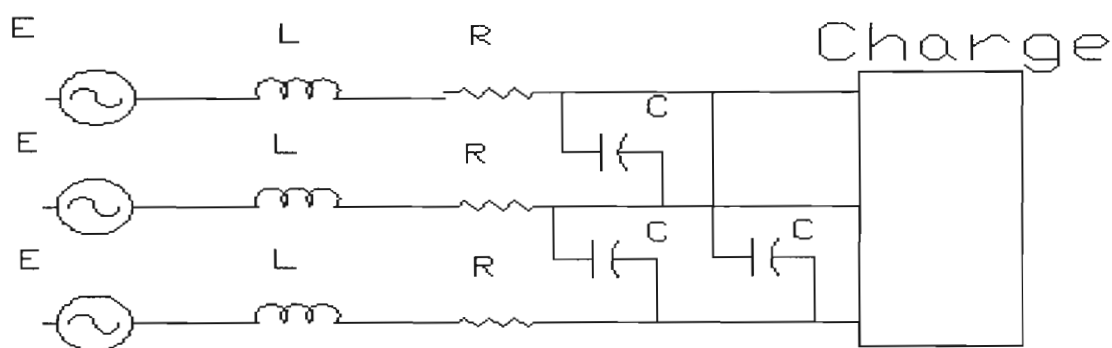


Figure 28 : Schéma équivalent au secondaire du transformateur

Secondaire en court-circuit

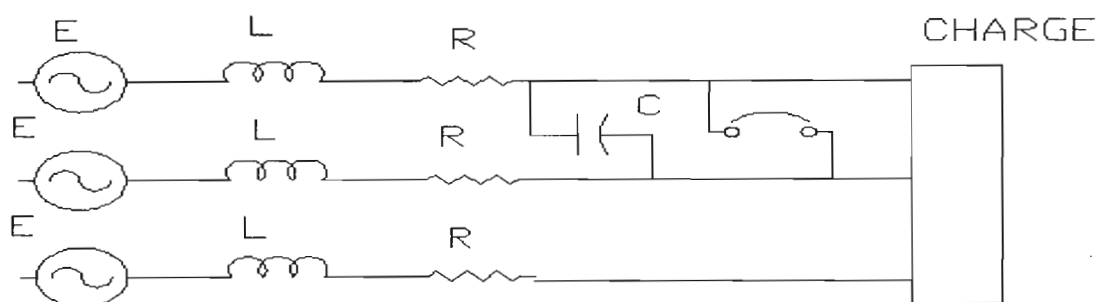


Figure 29: Schéma de modélisation en court circuit

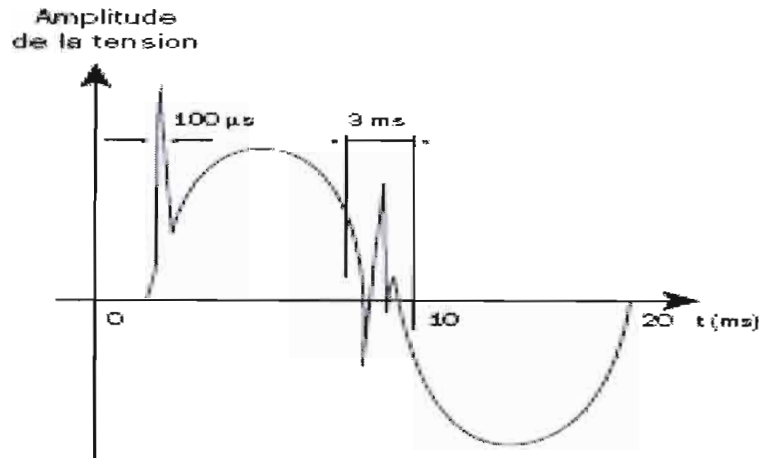


Figure 30 : Schéma d'illustration de la surintensité

B. Partie onduleur

Définition

Un onduleur est d'un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie continue. C'est la fonction inverse d'un onduleur.

III.B.1 Principe

Les onduleurs sont des structures en pont constitués le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, les transistors ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée. On module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirable.

Deux types d'onduleurs sont utilisés. On retrouve l'onduleur de tension et l'onduleur de courant.

On distingue habituellement :

- **L'onduleur autonome** qui délivre une tension de fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau pour fonctionner. Par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture pour convertir 12 V continu en 220 V alternatif 50Hz.
- **L'onduleur non autonome** : c'est le nom donné au montage redresseur tout thyristor (pont de Graetz) qui en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé permet un fonctionnement en onduleur.

Par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans des entraînements à moteur électrique. A la base du développement des entraînements statique à vitesse variable pour moteur à courant continu et alternateur, cycloconvertisseurs, onduleur de courant pour machines synchrones et asynchrones jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit du de convertisseurs à IGBT ou GTB.

III.B.2 Schéma simplifié de l'onduleur

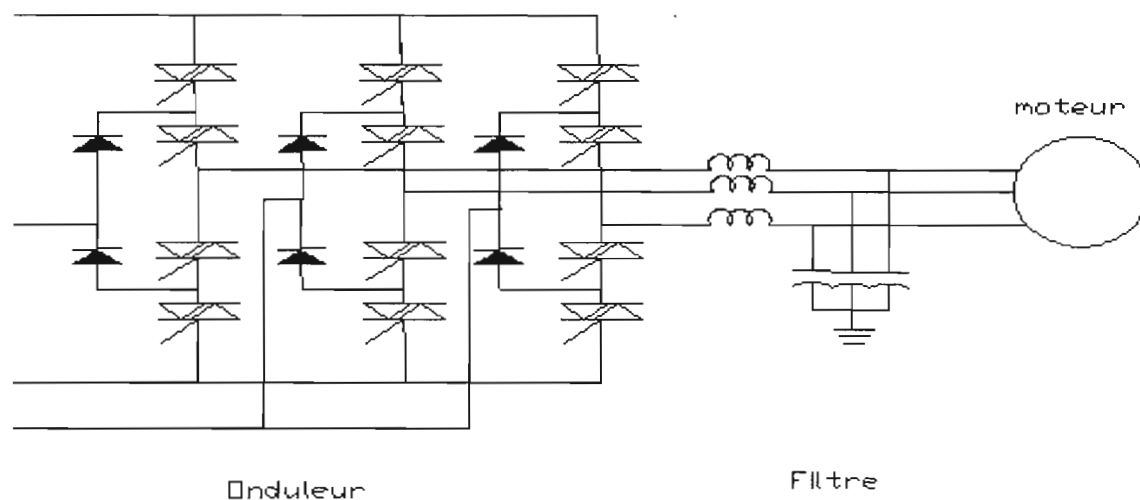


Figure 31 : Schéma simplifié de l'onduleur

III.B.2.1 Principe de fonctionnement

L'ensemble thyristor peut être considéré comme un interrupteur :

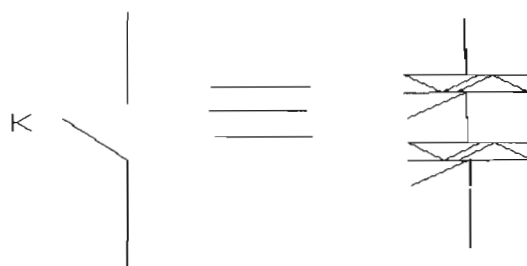


Figure 32 : représentation de l'interrupteur

III.B.3 La commutation au niveau des onduleurs

Le circuit est semblable à celui d'un redresseur donc le phénomène de commutation sera le même. Nous essaierons tout simplement d'illustrer les différentes phases.

Commande (+E,-E) :

$E = \text{tension à la sortie du redresseur}$

Les commandes des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. Les commandes du bras 2 sont déphasées de $2\pi/3$ par rapport à celle du bras 1. Les commandes du bras 3 sont déphasées de $4\pi/3$ par rapport à celle du bras 1.

Chaque interrupteur conduit pendant une demi-période. Une période de fonctionnement comprend six séquences

$(1,2',3) ; (1,2',3') ; (1, 2,3) ; (1, 2,3') ; (1', 2,3) ; (1',2',3) ;$

Dans chaque séquence elle prend une valeur qui dépend du schéma électrique équivalent. En guise d'exemple on prendra la séquence suivante : $(1,2',3)$

Pour une charge équilibrée de phases A, B, C on a :

1 et 3 conduisent : on relie les bornes A et C à la borne positive de la source .

2' conduit :

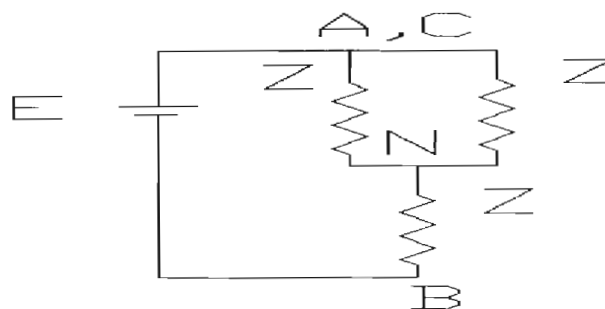


Figure 33 : résultat de la séquence coté moteur $(1,2',3)$

$$\text{On a ainsi } V_{AN} = \frac{E}{3} \quad V_{BN} = -\frac{2E}{3}$$

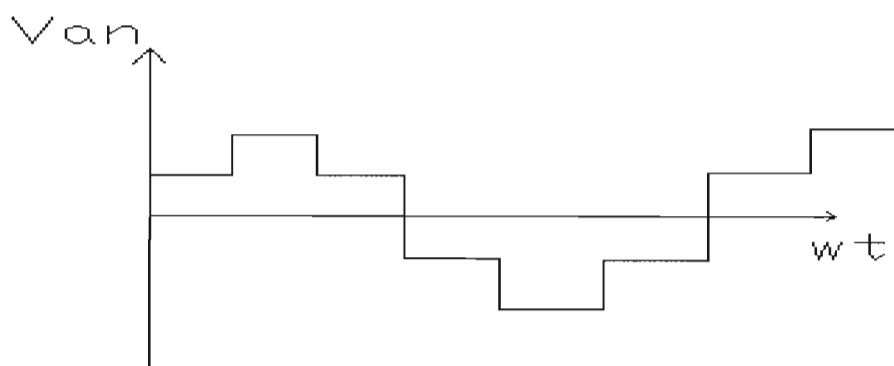


Figure 34 : Représentation de V_{an}

Nous pouvons le circuit du courant par la figure 35

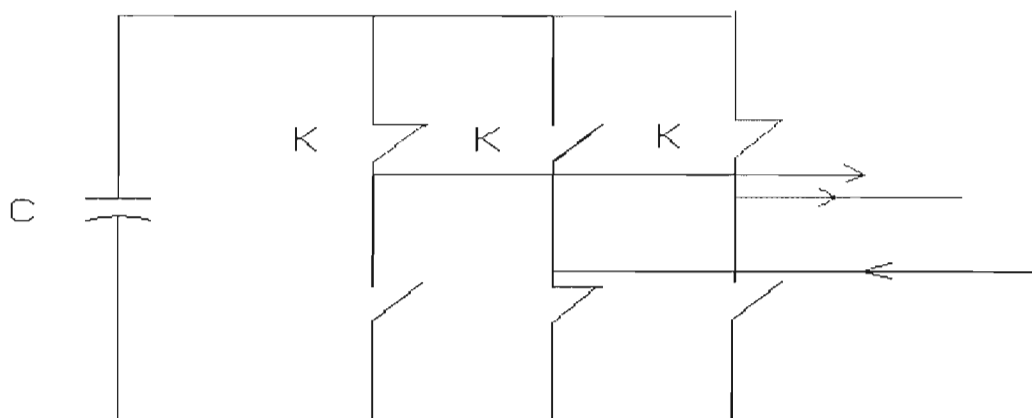


Figure 35 : Représentation de la séquence (1,2',3)

IV. Les harmoniques

IV.1 Qualité du signal de sortie

Le spectre d'un signal rectangulaire inclut une onde fondamentale (rang $n = 1$, pulsation ω_1) et des ondes harmoniques (rang $n > 1$, pulsation $\omega_n = n\omega_1$) d'amplitude plus ou moins importante.

. On cherche à diminuer le plus possible l'amplitude des harmoniques de rang *faible* car les harmoniques de rang élevé sont faciles à filtrer.

Projet de fin d'études

Etant donné que l'onduleur n'est qu'une partie de l'alimentation tout comme le transistor l'était pour les postes radio à transistors. Ces alimentations comprennent aussi des filtres pour une bonne ondulation de la tension.

IV.2 Equation du circuit

D'après la figure 33 entre A et N on a deux résistances de même valeur en parallèle

$$\Rightarrow Z_{\theta q} = \frac{Z}{2} \quad (2.16)$$

$$\Rightarrow \text{Diviseur de tension} \Rightarrow V_{AN} = \frac{\left(\frac{Z}{2}\right)E}{\frac{Z}{2} + Z} = \frac{E}{3} \quad (2.17)$$

Analyse de Fourier $\forall n, a_n = 0$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{AN}(\alpha) \sin \alpha \, d\alpha \quad (2.18)$$

Ce qui donne l'équation suivante :

$$b_n = \left(\frac{2E}{3\pi n}\right) \left(1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right) - (-1)^n\right) \quad (2.19)$$

$$\text{Pour } n \text{ pair, } b_n = 0 \quad (2.20)$$

$$\text{Pour } n \text{ impair, } b_n = \left(\frac{4E}{3\pi n}\right) [1 + \sin(n\pi/6) \sin(n\pi/2)] \quad (2.21)$$

Pour n est multiple de 3, $b_n = 0$

IV.3 Les courants harmoniques

Pour l'alimentation d'une charge R-L il se produit un courant qui se décompose en harmonique et en fondamental.

$$i_1 = \frac{b_1}{(\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2})} \quad (3.22)$$

$$i_3 = \frac{b_3}{(\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2})} \quad (2.23)$$

$$i_5 = \frac{b_5}{(\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2})} \quad (2.24)$$

En guise d'exemple nous allons prendre les données suivantes :

$$R = 10\Omega ; L\omega = 10\Omega ; E = 100V$$

$$i_1 = 9A$$

$$i_3 = 1.34A$$

$$i_5 = 0.5A$$

Nous pouvons en conclure que les courants les plus élevés proviennent des harmoniques de plus faible rang.

IV.3.1 Effets des courants harmoniques

Dans un réseau les courants harmoniques créent de nombreux effets nocifs pouvant provoquer :

- Une augmentation des pertes dans les condensateurs et une provocation d'échauffement anormaux.
- Une création d'interférence avec les réseaux de télécommunications (téléphone, télévision, télécommunication).
- Une provocation des défauts de fonctionnement des systèmes de régulation en déplaçant les passages par zéro de l'onde de passage de tension.
- Une accélération du vieillissement des équipements d'éclairage avec les lampes fluorescentes.
- Une provocation des erreurs de mesure et de comptage.
- Un risque d'excitation du **phénomène de résonance parallèle** dans les réseaux ou il y a des batteries de condensateurs.

NB : Les perturbations en tensions sont d'autant plus faibles que le réseau est plus puissant ou d'impédance plus faible.

Conclusion

Cette nous a permis de vérifier l'existence des courants harmoniques et du phénomène de commutation et leurs conséquences dont les plus marquantes sont : la chute de tension et la dégradation des ondes induites par le réseau. Nous partons de ce conséquences pour pouvoir faire des analyses dans le but de proposer des méthodes qui tendent à l'atténuation de ces perturbations et enfin d'en proposer une qui soit adéquate.

Chapitre III : Précautions à prendre

I. Les solutions proposées

Il existe aujourd'hui toute une panoplie de matériels et de solutions pour l'atténuation des harmoniques ; tous présentent cependant des inconvénients. Les solutions en question sont énumérées ci-après.

L'objectif n'est pas d'éliminer les courants harmoniques circulant dans l'installation électrique, mais plutôt de "faire avec", en évitant leurs conséquences.

Au moment de la conception d'une installation nouvelle, l'idée consiste à surdimensionner tous les éléments de l'installation susceptibles de véhiculer des courants harmoniques, à savoir les transformateurs, les câbles, les disjoncteurs, les groupes électrogènes et les tableaux de distribution. La solution la plus largement utilisée est le surdimensionnement du conducteur neutre.

La conséquence est un **accroissement important du coût de l'installation**.

Dans des installations existantes, la solution la plus répandue consiste à déclasser les équipements de distribution électrique soumis aux courants harmoniques. La conséquence est l'impossibilité de tirer profit du potentiel réel de l'installation .

I.1 Transformateur à couplage spécial

Cette solution empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et de leurs multiples. Il s'agit d'une solution centralisée pour un ensemble de charges monophasées. Car dans un réseau triphasé équilibré la somme des courants des trois phases est nulle pour le fondamental. Le courant du neutre est donc théoriquement nul.

Par contre la somme des courants des trois phases pour les harmoniques de rang 3, 6,9.....n'est pas nul. Les courants harmoniques résultant dans le fil du neutre ne sera pas nul mais sera trois fois la composante de phase. Le déphasage des trois (3) phase est montré par la figure :

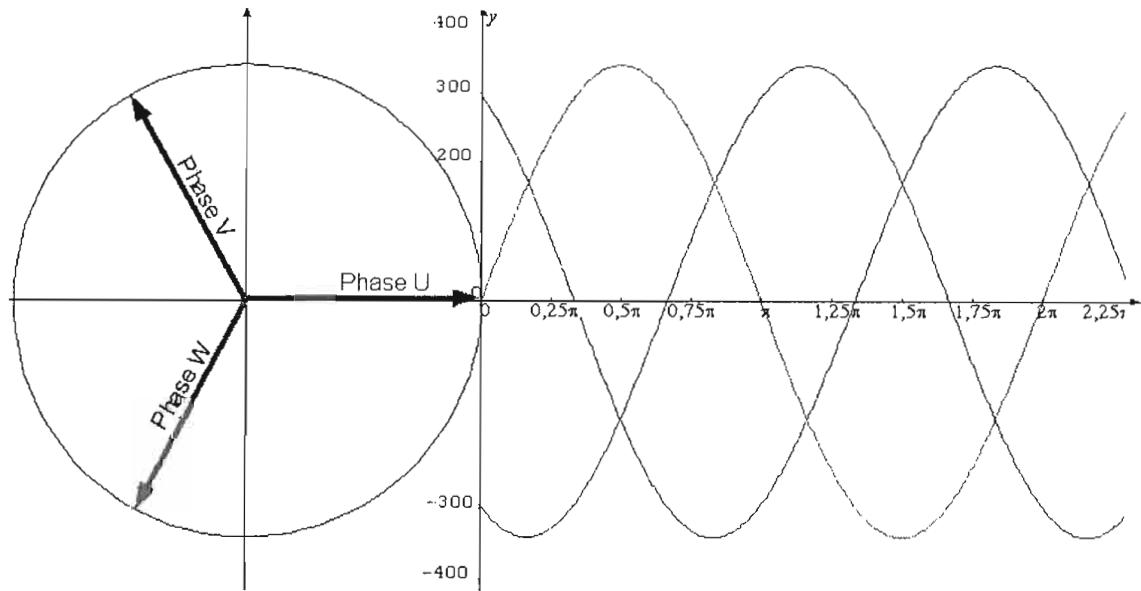


Figure 36 : représentation des tensions déphasées

Puisqu'ils s'additionnent dans le point neutre, il est possible que ces courants surchargent le conducteur du neutre ou encore la borne de raccordement de neutre d'une connexion de transformateur en étoile.

Cette solution n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques (H5, H7, etc...).

Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.

1.2 Les inductances en série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux.

I.3 Filtre passif accordé

Le principe est de "piéger" les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Un filtre comprend donc une série de "gradins" qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés.

On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Il convient également de coordonner ses caractéristiques avec les besoins en puissance réactive des charges; enfin, il est souvent difficile de concevoir les filtres de manière à éviter un facteur de puissance avance (capacitif) pour certaines conditions de charge. Cette solution est d'une efficacité moyenne et sa conception dépend entièrement de la source d'énergie et des charges concernées : elle n'offre très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité. Son utilisation peut créer des résonances, qui dépendent des caractéristiques spécifiques du réseau. Note : lorsqu'il est bien conçu, ce type de filtre peut aussi être utilisé pour éliminer la distorsion harmonique déjà présente sur le réseau électrique du distributeur d'énergie, sous réserve d'un surdimensionnement significatif pour l'absorption des harmoniques issus du réseau.

I.3.1. Exemple d'installation Filtres d'harmoniques

Si la puissance de l'équipement du redresseur est faible par rapport à la puissance de court-circuit du réseau à l'endroit où l'équipement est installé, il n'y a pas de précaution à prendre. Sinon il faut installer des filtres qui arrêtent les courants harmoniques avant qu'ils se propagent dans le réseau.

Le filtre destiné à empêcher les courants de pulsation ωh (pulsations harmoniques) de se propager dans le réseau est constitué par un circuit résonnant série (en réalité un pour chacune des phases). Si l'inductance et la capacité sont telles que

$$L\omega^2 C_h = 1.$$

L'impédance d'une telle dérivation est nulle pour le courant de fréquence f_h . Tout le courant I_h y passe, au delà du filtre le réseau est exempt de courants et de tensions harmoniques.

On peut le modéliser comme suit :

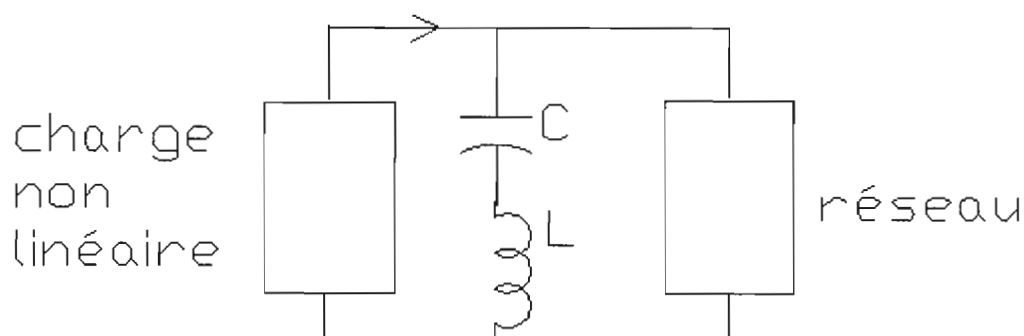


Figure 37 : Exemple d'installation Filtres d'harmoniques

Nous avons énoncé plus haut que le filtre est constitué par un circuit résonnant d'inductance l et de capacité c telle que $l\omega^2c_h = 1$. Mais nous savons qu'en toute rigueur une inductance ou une capacité n'est jamais pure, donc il apparaît une résistance qui rendra l'impédance non nulle. L'idée sera donc de choisir une inductance et une capacité ayant des résistances parasites avec une valeur moindre pour pouvoir faire tendre l'impédance vers zéro. Outre le souci sur la nullité de l'impédance du filtre, faudra veiller aussi au choix du condensateur sachant qu'un condensateur de capacité élevé peut dans certain cas provoquer une résonance.

1.4 Notion de compensateur actif d'harmoniques (filtre actif)

Le concept de **compensateurs actifs d'harmoniques**, aussi appelés filtres actifs, est relativement ancien même si l'absence d'une technologie performante à un prix compétitif a freiné son développement pendant un certain nombre d'années.

A l'heure actuelle, l'utilisation largement répandue des transistors IGBT, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal préparent la voie d'un avenir beaucoup plus brillant pour le compensateur actif d'harmoniques.

Le principe du compensateur actif d'harmoniques est d'utiliser l'électronique de puissance pour produire des composantes harmoniques qui annulent les composantes harmoniques des charges non linéaires. Il est proposé un certain nombre de topologies différentes ; quelques-unes d'entre elles sont décrites ci-après. Pour chaque topologie interviennent des problèmes de caractéristiques nominales requises des composants, et de méthode de détermination des caractéristiques du compensateur pour les charges à compenser.

I.4.1 Compensateur série

Ce type de compensateur, connecté en série sur le réseau de distribution, compense à la fois les courants harmoniques générés par la charge et la distorsion de tension déjà présente sur le réseau. Proche dans le principe des conditionneurs de réseau, ils doivent être dimensionnée pour la puissance totale de la charge.

I.4.2 Compensateur parallèle

Appelé aussi compensateur "shunt", il est connecté en parallèle sur le réseau. Il est dimensionné pour la seule puissance harmonique (ou le courant harmonique) absorbée par la ou les charges non linéaires. La topologie parallèle choisie pour SineWave ne dépend en rien de la charge ou des caractéristiques du réseau.

I.4.3 Compensateur hybride

De type série ou de type parallèle, il est constitué de l'association d'un compensateur actif et d'un filtre passif. Dans certains cas, cette solution est économiquement intéressante. Le filtre passif effectue le filtrage de base (rang 5, par exemple), et le compensateur actif, grâce à son action précise et dynamique, couvre les autres rangs.

Conclusion Partielle

Cette panoplie de solutions nous permettra d'en faire une synthèse pour pouvoir l'adopter dans notre cas bien précis.

Chapitre IV : Solution retenue

I. Installation d'une inductance anti-harmonique

Cela consiste à installer une inductance L en série avec une batterie de condensateur (voir fig.) afin de réaliser l'accord du circuit LAH à une fréquence pauvre en harmonique pour supprimer les risques de forts courants harmoniques dans les condensateurs.

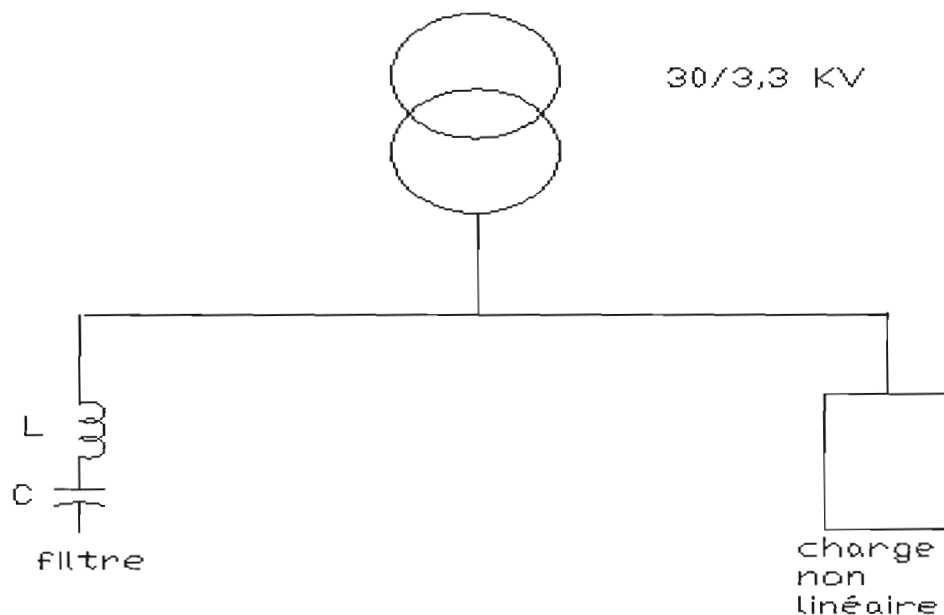


Figure 38 : Schéma de principe de l'installation

I.1 Modélisation du circuit

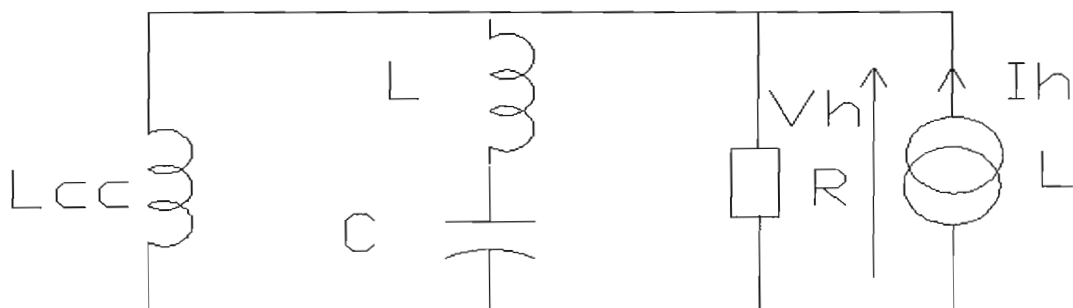


Figure 39 : Schéma de principe de l'installation

L_{cc} : Inductance de court-circuit au niveau du jeu de barres

R : résistance correspondant à la puissance active des charges linéaires

(Impédances du réseau + impédance du transformateur).

Il existe une résonance série entre l'inductance anti-harmonique et la batterie de Condensateurs. L'impédance équivalente à la branche L, C est donc presque nulle à la résonance (réduite à la résistance de la bobine d'inductance). Cette résonance série est appelée fréquence de résonance f_r .

La fréquence d'accord du circuit bouchon composé de l'inductance de court-circuit en parallèle avec la branche L, C est la fréquence d'anti-résonance f_{ar} . A cette fréquence, l'impédance équivalente du réseau est R .

1.2 Détermination de la fréquence de résonance série :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

En moyenne tension, la fréquence de résonance est choisie entre 215 Hz et 240 Hz, correspondant aux rangs 4,3 à 4,8. En basse Tension le premier rang significatif est cinq (5). Donc on prendra 215 HZ qui correspond aux rangs 4,3.

Données : Puissance active aux bornes du variateur :

$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi \quad (4.2)$$

Pour l'enroulement couplé en triangle :

$$V_2 = 3300 \text{ V}$$

$$I_2 = 586 \text{ A}$$

Pour l'enroulement couplé en étoile :

$$V_1 = 1905 \text{ V}$$

$$I_1 = 879 \text{ A}$$

facteur de puissance de la SENELEC ~ 0,86

Donc on aura :

$$P = 2880,5 \text{ Kw}$$

La puissance réactive sera donc $Q = 1709 \text{ Kvar}$

I.3 Détermination des éléments du filtre

I.3.1 Détermination de la capacité C du condensateur

Objectifs : Piéger les harmoniques de rang 5, 7, 9, etc, et relever en même temps le facteur de puissance à 0,95.

$$\cos \varphi_1 = 0,86 \implies \tan \varphi_1 = 0,59$$

$$\cos \varphi_2 = 0,95 \implies \tan \varphi_2 = 0,33$$

$$Q_1 = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (4.3)$$

$$Q_1 = 749 \text{ kvar}$$

Cette valeur représente la puissance réactive fournie par la batterie du condensateur si elle était placée seule.

La puissance réactive qui sera fournie en présence de l'inductance et pour les harmoniques de rang 5 est :

$$Q_2 = \frac{p_r^2}{p_r^2 - 1} Q_1 \quad (4.4)$$

$$p_r = \text{rang de la résonance} = \frac{\omega_r}{\omega_0}$$

$$\omega_r = \text{fréquence de résonance}$$

$$\omega_0 = \text{fréquence du réseau}$$

$$Q_2 = \text{puissance réactive fournie par le filtre} = 779 \text{ kvar}$$

$$C = 76 \mu\text{F}$$

I.3.2 Détermination de l'inductance L

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C} \quad (4.5)$$

$$L = 7,2 \text{ mH}$$

Il nous faudra donc un filtre ayant comme : $L = 7,2 \text{ mH}$ et $C_b = 71 \mu\text{F}$

Il nous faudra vérifier leur disponibilité dans le marché.

Le branchement de ces filtres est en triangle, car procurant plus de puissance réactive pour le relèvement du facteur de puissance.

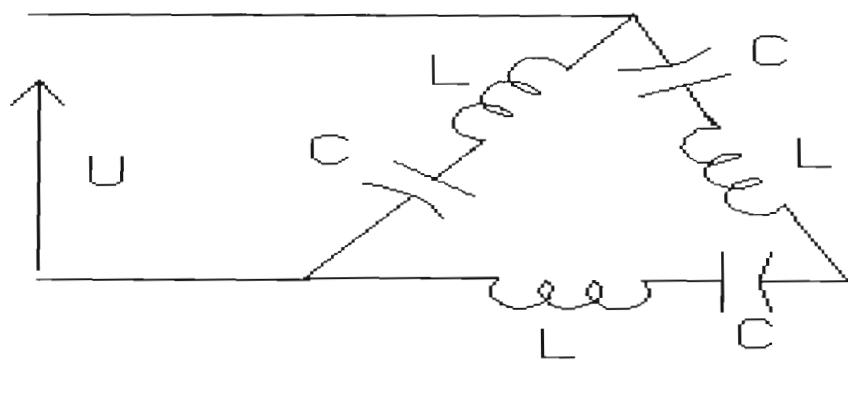


Figure 40: couplage triangle des filtres

I.3.3 Coûts estimatifs

Suite à des investigations faites dans le marché Sénégalais, nous avons retenus les prix suivants :

Tableau 1 : Estimation du coût total de l'installation des filtres

Equipements	Nombre	prix unitaire (francs CFA)	prix total (francs CFA)
Filtre (condensateur +self)	06	450000	2 700 000
Main d'œuvre		157500	945 000

total couts (francs CFA)	3 645 000
--------------------------	------------------

Conclusion

Le coût du filtre est estimé 450 000 Fcfa l'unité. Puisqu'il y a six (06) filtres à installer, cela revient à 2 700 000 Fcfa. En tenant compte de la main-d'œuvre qui est de 35 % du prix des filtres, nous aurons une somme de 3 645 000 Fcfa pour l'installation de filtres.

Chapitre V : Calcul des économies financières

Importance de l'installation d'un variateur de vitesse

La variation de vitesse est une solution qui permet une économie substantielle des coûts énergétiques grâce au contrôle direct de la vitesse des moteurs au point optimal de fonctionnement et réduisant les consommations d'appel lors des phases de transition et de démarrage. Pour certaine application la consommation est réduite de la moitié pour les mêmes performances électriques.

La variation de vitesse permet aussi d'augmenter la durée de vie des équipements mécaniques et de réduire les coûts de maintenance, le stress moteur (échauffement réduit, vibration, transitoire) et les perturbations du système (réduit les courants d'appel), tout en améliorant la puissance du moteur avec un couple de démarrage élevé et un couple d'accélération limité seulement par le couple max du moteur. Les variateurs de vitesse qui se sont imposés comme étant la solution parfaite pour remplacer les systèmes mécaniques. Plusieurs applications dont les ventilateurs, les convoyeurs, les pompes, les levages et broyages intègrent la variation de vitesse.

Grace à leur meilleur rendement et leurs fonctionnalités avancées permettant de répondre à des applications complexes et précises.

Pour calculer le gain que peut générer l'installation d'un variateur nous allons la formule suivante :

$$E = D.K.P.C_e.\Delta E_m \quad (\text{Source : CENTRELEC MAROC}) \quad (5.1)$$

E = Economie annuelle en DH par an

D = durée annuelle de fonctionnement (h)

K = taux de charge du moteur(%)

C_e = Cout moyen de l'électricité(en DH par Kwh)

ΔE_m = économie moyenne générée par un variateur

P = Puissance installée du moteur (kw)

- ✓ Pour une pompe dont la charge varie de 60 à 100% du débit nominal l'économie générée par un variateur se situe entre 10 et 50%, on prendra 25% ;
- ✓ Le taux de charge moyen du moteur est : 80 %

Projet de fin d'études

- ✓ Puissance du moteur : 2228 kW
- ✓ Durée annuelle de fonctionnement : 6570 h ;
1 Dirham = 0,08923913104 Euro
Le cout de l'électricité moyen est de : 85 Fcfa / kWh
- ✓ Cout moyen d'électricité : 1, 45 DH / kWh

Tableau 2 : Economie financière annuelle

D(h)/an	K	Ce (kW)	Δem	P (kW)	E(DH)/an	E(FCFA)/an
6570	0,8	1,45	0,25	2228	4245008,4	248497012

Donc l'économie générée par l'installation d'un variateur de vitesse est de **248 497 012 Fcfa.**

Une fois les économies prévisionnelles calculées, on estime facilement le temps de retour de l'investissement. Les variateurs sont dimensionnés en fonction de la puissance des moteurs qu'ils commandent et leur prix. Il faudra cependant tenir compte également du cout des études et du cout de l'installation (armoie électrique, câblage, régulation) qui varie de 25 à 50% du cout du variateur nu.

Il serait juste de prendre aussi en compte dans les calculs les gains autres qu'énergétiques procurés par l'utilisation des variateurs. Ces gains sont les suivantes :

- ✓ Allongement de la durée de vie des équipements ;
- ✓ Réduction des frais d'entretiens ;
- ✓ Amélioration de la fiabilité ;
- ✓ Possibilité d'utiliser un variateur pour commander plusieurs moteurs ;
- ✓ Fonctionnement entièrement automatique.

Conclusion partielle

D'une manière générale, la mise en place d'un variateur se traduit par une amélioration de la productivité de l'équipement et de la qualité des produits. Sur une installation neuve, elle permet de réduire le surdimensionnement des moteurs (donc les couts d'investissement) ainsi que le diamètre des câbles (surintensité de démarrage). Tous ces gains secondaires ne sont pas facilement chiffrables mais sont présents.

Conclusion générale

Les informations recueillies dans les généralités nous ont permis de vérifier l'existence des perturbations dans le site de Ngaye Mékhé. Cette étude confirme l'existence inévitable des conséquences de l'installation des équipements d'électronique de puissance qui sont principalement les harmoniques et la durée non nulle de commutation des semi-conducteurs.

Donc en plus de l'analyseur de réseau, l'installation de filtres anti-harmoniques renforcera la protection des équipements de l'installation et du réseau de la SENELEC.

Pour ce qui est de l'installation des filtres anti-harmoniques une somme de quatre cent cinquante milles francs CFA (450000 francs CFA) plus les frais d'installation qui sont de cent cinquante sept milles cinq cents francs CFA (157500 francs CFA) l'unité. Ce qui fait un total de trois millions six cents quarante cinq mille francs CFA (3 645 000 Fcfa).

De plus une estimation de l'économie financière a été réalisée pour l'installation de ces variateurs. On voit quelle est plutôt considérable et s'élève à deux cents quarante huit millions quatre cent quatre-vingt dix sept milles douze francs CFA (248 497 012 Fcfa).

Ainsi toutes nos recommandations doivent être mises en pratique afin de vraiment améliorer une bonne marche de la station de pompage de Mékhé.

Recommandations

- 1) Installer ces filtres ;
- 2) Partir de cette étude pour approfondir la réflexion sur ce problème ;
- 3) Renforcer l'utilisation des variateurs de vitesse.

Références

Bibliographie

- [1] GUY SEGUIER, **Les convertisseurs de l'électronique de puissance : La conversion alternatif-continu** (deuxième (2) édition) ;
- [2] cours électronique de puissance, 2006-2007, Dr Mamadou Wade.

Wébographie

[1] <http://sitelec.free.fr/cours/ond.pdf>

[2] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur>

[3]

http://web.ujf-grenoble.fr/PHY/intra/Formations/M2/EEATS/CSEE/GEL_592/Guide_conception_reseaux/08_harmoniques/Conce08d.PDF

[4] http://www.cours.polymtl.ca/ele4458/Cours%203_Harmoniques_et_Reseaux.pdf

[5]

http://www.univ-savoie.fr/labos/lahc/MEMBRES_LAHC/Ferrari/Ens_FERRARI/base%20de%20donnee/Licence%20EEA/Cours/COURS3_1.PDF

[6] www.chauvin-arnoux.com/Groupe/pdf_mag/dossier_F_PTM_CAM54.pdf

[7]

http://www.google.com/search?hl=fr&as_qdr=all&q=+perturbations+%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques++filetype%3Apdf&lr=

Annexe 1

Pendant la durée μ de l'empiétement la tension redressée U_d doit satisfaire à (loi des mailles) :

$$u_d = v_1 - l \frac{di_{F1}}{dt} = v_2 - l \frac{di_{F2}}{dt}$$

Le courant de charge est supposé d'intensité constante I_d , ce qui impose :

$$i_{F1} + i_{F2} = I_d = C^{te} \Rightarrow \frac{di_{F1}}{dt} + \frac{di_{F2}}{dt} = 0$$

$$u_d = v_1 - l \frac{di_{F1}}{dt} = v_2 - l \frac{di_{F2}}{dt} \Rightarrow u_d = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Pendant la durée μ de l'empiétement la tension redressée vaut donc $\frac{1}{2}(v_1 + v_2)$

au lieu de v_2 dans le cas idéal. Au delà de l'instant $t_0 + \mu$, on a :

$$i_{F1} = 0$$

$$i_{F2} = I_d$$

$$u_d = v_2$$

Si la commutation était instantanée, la tension redressée u_d vaudrait v_2 au delà de l'instant t_0 ;

L'empiétement se traduit donc par une chute de tension instantanée:

$$\Delta_1 u_d = u_{d1} - u_d = v_2 - \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = \frac{1}{2}(v_2 - v_1) = l \frac{di_{F2}}{dt}$$

où u_{d1} est la forme de la tension redressée dans le cas d'une commutation

instantanée. La valeur moyenne de $\Delta_1 u_d$ vaut donc :

$$\Delta_1 u_{d0} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \mu} \frac{1}{2}(v_2 - v_1) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \mu} l \frac{di_{F2}}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_0^{I_d} l di_{F2} = \frac{1}{T} l \cdot I_d$$

$$\text{Soit encore : } \Delta_1 U_{d0} = \frac{1}{T} l \cdot I_d = \frac{l\omega}{2\pi} I_d$$

Annexe 2

U est la valeur efficace de la tension composée appliquée entre les anodes des deux diodes qui commutent.

$$u_d = v_1 - l \frac{di_{F1}}{dt} = v_2 - l \frac{di_{F2}}{dt} = v_1 + l \frac{di_{F2}}{dt}$$

Les relations : $2l \frac{di_{F2}}{dt} = v_2 - v_1 = u_{21} = U \sqrt{2} \sin(\omega(t - t_0))$

$$i_{F2} = \frac{U \sqrt{2}}{2l\omega} \cos(\omega(t - t_0)) + C^{te}$$

A l'instant $t=t_0$ =déphasage, début de commutation, l'intensité i_{F2} est nulle, ce qui

permet de déterminer la constante d'intégration : $C^{te} = \frac{U \sqrt{2}}{2l\omega}$

L'instant $t_0 + \mu$ définit la fin de l'empiétement à laquelle i_{F2} prend la valeur i_d .

Donc :

$$i_d = \frac{U \sqrt{2}}{2l\omega} \cos(\omega(t - t_0))$$

$$\mu = \frac{1}{\omega} \arccos \left(1 - \frac{2l\omega}{U \sqrt{2}} i_d \right) = \frac{T}{2\pi} \arccos \left(1 - \frac{2l\omega}{U \sqrt{2}} i_d \right)$$

Annexe 3

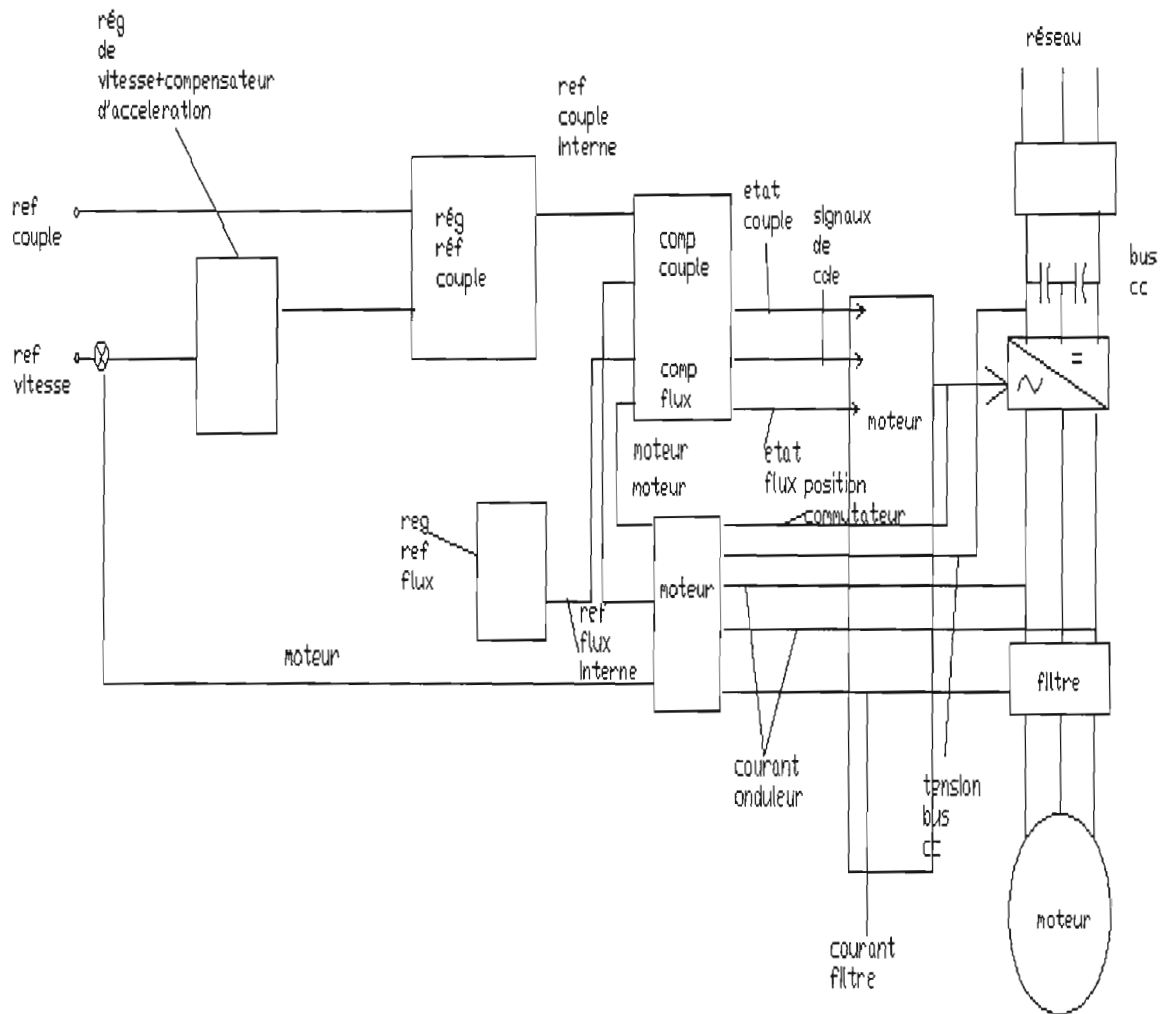


Schéma fonctionnel de la technologie DTC

Annexe 4

Schéma de principe avec Cycloconvertisseur

Le Cycloconvertisseur est un convertisseur direct qui permet à la fois de faire varier tension efficace aux bornes d'une charge alternative, mais aussi d'en changer la fréquence

C'est une forme de convertisseur matriciel c'est-à-dire pour N phases à l'entrée et P phases à la sortie, il faut $N \cdot P$ interrupteur bidirectionnels. Ces interrupteurs bidirectionnels sont une association de deux thyristors (en anti parallèle), ou triac, dont la commutation au blocage se fait de manière naturelle avec le passage par zéro du courant qui le traverse.

Le plage de réglage de la tension est similaire à celle d'un redresseur à thyristors tandis que la plage de réglage en fréquence est limitée pour des fréquences bien inférieures à celle du réseau.

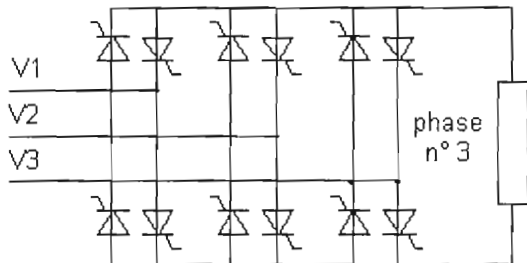
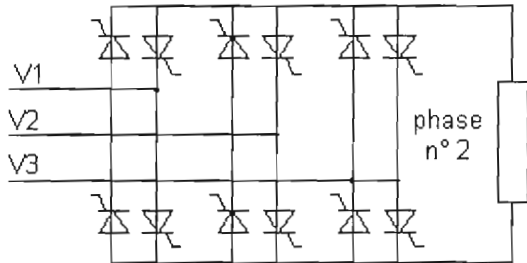
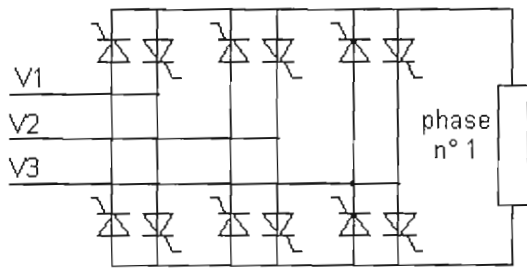
Lorsqu'on souhaite disposer d'une plage de réglage en fréquence plus étendue, il faudra se tourner vers les montages de type « onduleur » : convertisseur « continu alternatif ».

Contrairement aux convertisseurs indirects (redresseur- onduleur), un Cycloconvertisseur ne peut fabriquer qu'une fréquence inférieure à celle de l'entrée.

A causes des mauvaises formes d'ondes obtenues sauf pour de très fortes puissances, ce montage n'est plus utilisé.

Le Cycloconvertisseur reprend la structure d'un redresseur triphasé réversible à thyristors pour chaque phase à commander.

Le schéma électrique d'un Cycloconvertisseur ci-dessous fait donc apparaître 36 thyristors.



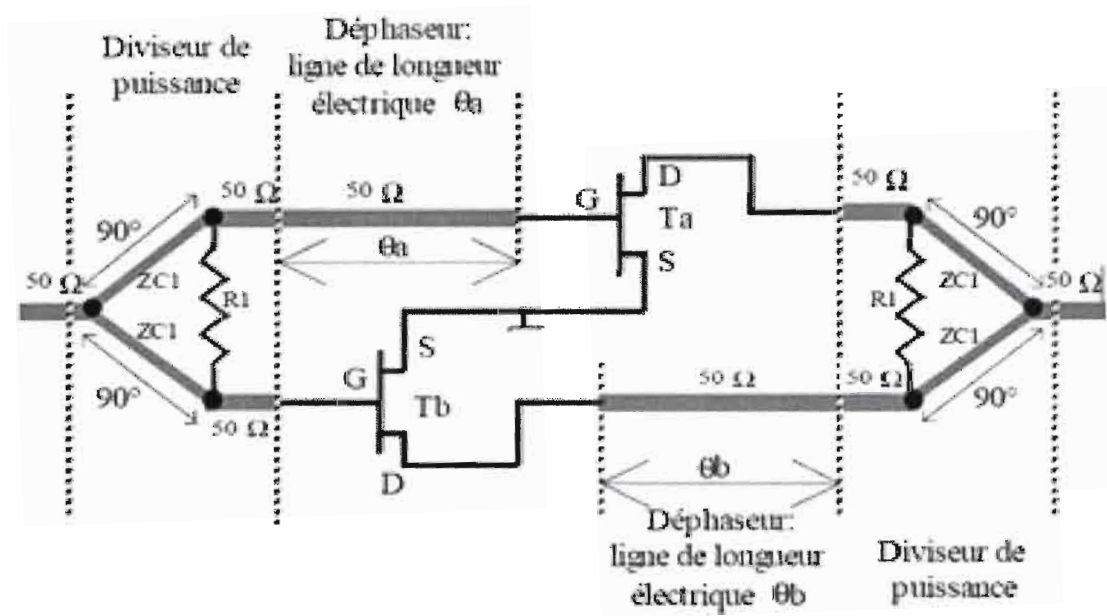
La commande d'un tel ensemble est complexe pour assurer le bon déclenchement des composants avec une fréquence variable.

Ce montage reste réservé à la réalisation de variateurs de vitesse destinés à des moteurs très lents de forte puissance.

De la même manière que pour les gradateurs, ces montages commutant directement sur le secteur sont responsable de nombreuses perturbations électriques et radioélectriques.

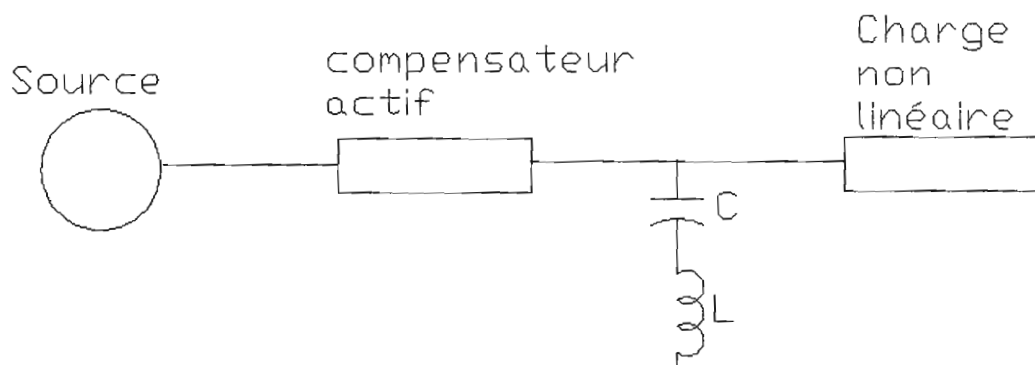
On peut réaliser ce schéma aussi avec des interrupteurs bidirectionnels bicommandables (à base de transistor ou de thyristor GTO), mais le terme Cycloconvertisseur est réservé à ceux utilisant des thyristors.

Annexes 5

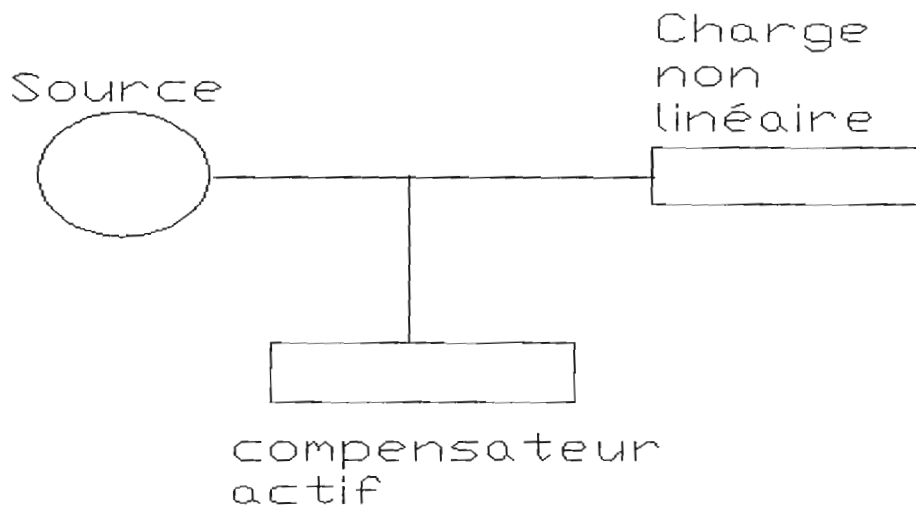


Diviseur Wilkinson

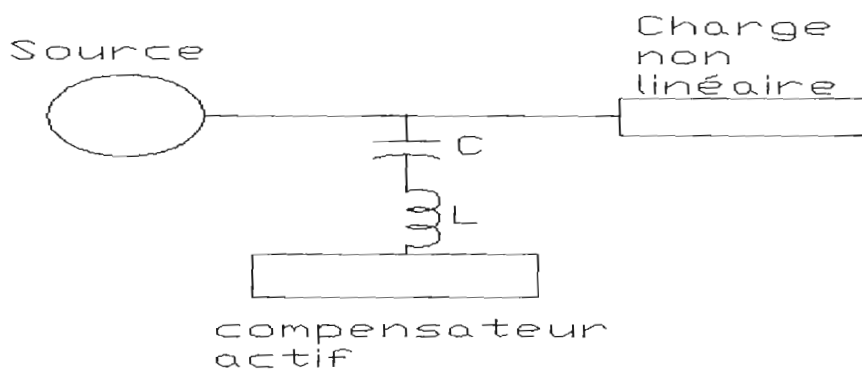
Annexe 6



Exemple de Compensateur série



Exemple de Compensateur parallèle



Exemple de Compensateur hybride