

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou

Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique

Département d'électrotechnique



Memoire

De fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme

D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Réseau électrique

Thème

*FILTRAGE DES HARMONIQUES
DANS UNE LIAISON AC /DC MONO
TERMINALE*

Proposé et dirigé par :

Mr .K.HADJ SAID

Etudié et présenté par :

Mr MOUSSA CHERIF

Mr MAKHLOUF SAMIR

Promotion 2009/2010

Remerciements

Nos vifs remerciements vont en premier lieu, à nos chers parents de nous avoir aidé pour arriver au terme de ce travail qui est le fruit de plusieurs années d'études.

Nous remercions aussi notre promoteur

Mr K.HADJ SAID pour son engagement.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation ainsi tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail en particulier

Mr. M. LAGHROUCHE

Nous remercions aussi les membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes chers parents.*
- *Mon frère Rafik*
- *Mes sœurs Faiza et Samira*
- *aux familles MAKHLOUF et KHELOUI.*
- *Mes amis (es) : Bouho, Mangole Sedik, Hamid et Assia.*
- *Mon binôme Cherif et sa famille.*
- *Ainsi que toute la promotion 2009/2010.*

Samir MAKHLOUF

Mes dédicaces vont directement à :

- *Mes chers parents.*
- *Mes frères : Djamel, Mohammed, Youcef,*
- *Mes sœurs : Fatima et son époux, Safia*
- *Mes petits cousins Mohouali et Ghiles.*
- *Mes grands parents.*
- *Mes amis (es) : Bouho et sa muse, Hamid, Sedik, Djemy, Karima et Naïma.*
- *Mon binôme Samir et sa famille*
- *Ainsi que toute la promotion 2009/2010.*

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude théorique de la stratégie de filtrage et de compensation des harmoniques de courants et de tensions dans les réseaux électriques.

Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage : filtres passifs, filtres actifs ou bien encore la combinaison des deux.

La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance.

En ce qui concerne les solutions modernes, nous avons présenté les deux topologies utilisées, le filtre actif et le filtre hybride. Ces topologies ont pour but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux. En effet, grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Ces solutions modernes peuvent être installées pour compenser toutes les perturbations de courant telles que les harmoniques, les déséquilibres ainsi que pour compenser de la puissance réactive.

Nous y avons présenté une étude théorique de la compensation des harmoniques de courant et de tension circulants dans un réseau électrique à trois fils. Ces travaux ont été validés par simulation. L'ensemble des simulations a été effectué à l'aide des outils

MATLAB/SIMULINK

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
I. Généralités sur les harmoniques	
I. Introduction	4
I.1 Explication du phénomène harmonique	4
I.2 Origine des harmoniques	5
I.3 Décomposition en série de Fourier	6
I.4 Différents types d'harmoniques	7
I.4.1 harmoniques de courants	7
I.4.2 harmoniques de tensions	7
I.4.3 harmoniques d'impédances	7
I.5 Grandeurs caractéristiques des harmoniques	8
I.5.1 distorsion harmonique	8
I.5.2 facteur de crête	9
I.5.3 notion de phase	9
I.6 Harmoniques dans un système triphasé	11
I.6.1 système triphasé équilibré	11
I.6.2 système triphasé déséquilibré	12
I.7 Etude du phénomène de résonance	12
I.8 Les inter-harmoniques	13
I.9 Les effets des harmoniques	14
I.9.1 sensibilité des différents types d'appareils	15
I.9.1.1 Machine synchrone	15
I.9.1.2 Machine asynchrone	15
I.9.1.3 Transformateur	15
I.9.1.4. Les câbles	16
I.9.1.5. Les condensateurs	16
I.9.1.6. Les relais de protection	16
Conclusion	17

II. Harmoniques dans les convertisseurs

Introduction	18
II.1 Harmoniques dans les convertisseurs en structure triphasé	18
II.2 Harmoniques générés par des ponts redresseurs	19
II.2.1 Harmoniques de courants absorbés par le redresseur en pont triphasé	19
II.2.2 Harmoniques de courants générés par un pont de Graetz	22
II.2.2.1 Etude des courants de phase	22
II.2.2.2 Etude de la tension de sortie	23
II.2.2.3 Influence de l'impédance de source	25
II.2.2.4 le phénomène d'empiétement	25
II.2.2.5 Perturbations dues a l'empiétement	26
II.2.2.6. contenu harmonique de courant	27
II.2.2.7 Taux de distorsion en courant	30
II.2.2.8 Taux de distorsion en tension	31
II.2.2.9 Facteur de puissance du redresseur	32
Conclusion	33

III. stratégie de dépollution du réseau des harmoniques

Introduction	34
III.1 Solutions de dépollution traditionnelles	34
III.1.1 Dépollution des courants perturbateurs	34
III.1.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique	34
III.1.1.2 Compensation de la puissance réactive	35
III.1.1.3 Insertion de l'inductance antiharmonique	35
III.1.1.4 Transformateurs à couplage passif	37
III.1.1.5 Pont dodécaphasé	38
III.1.1.6 L'augmentation de la puissance de court-circuit	39
III.1.1.7 Filtrage passif	39
III.1.1.7.1 Filtre résonant	39
III.1.1.7.2 Filtre amorti	40
III.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices	41

Sommaire

III.2 Solutions de dépollution moderne	42
III.2.1 Dépollution des courants perturbateurs	42
III.2.2 Dépollution des tensions perturbatrices	43
III.2.3 Solution de dépollution adoptée	43
III.3 Filtrage actif	44
III.3.1 Filtre actif parallèle	44
III.3.2 Filtre actif série	45
III.3.3 Combinaison parallèle-série actifs	46
III.3.4 Combinaison hybride active et passive	46
III.3.4.1 Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	47
III.3.4.2 Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	47
III.3.4.3 filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	48
Conclusion	49
IV. Partie simulation	
Introduction	50
VI. 1 Filtres utilisés dans notre simulation	50
IV.2 Description du modèle	53
IV.3 Caractéristiques du modèle	55
VI.4. Résultats des simulations	56
VI.4.1 Tensions alternatives des phases	56
VI.4.2 Courants alternatifs de ligne	57
VI.4.3 Courants alternatifs du convertisseur	58
VI.4.4 Tension redressée V_d	59
VI.4.5 Courant redressé I_d	60
VI.4.6 Combinaison de la tension des phases avec et sans filtrage	61

Sommaire

VI.4.7 Combinaison du courant des phases avec et sans filtrage	62
VI.4.8 Combinaison du courant du convertisseur avec et sans filtrage	62
VI.4.9 Combinaison de la tension redressée avec et sans filtrage	63
VI.4.10 Combinaison du courant redressé avec et sans filtrage	63
VI.5 Interprétation des résultats	64
CONCLUSION	65
Conclusion générale	66
Bibliographie	68

Chapitre I

GENERALITES SUR LES HARMONIQUES

I. Introduction

Le producteur de l'énergie électrique doit satisfaire certains engagements envers les clients qu'il dessert. Il doit assurer la qualité et la continuité de l'énergie qu'il fournit.

L'onde de tension idéale est une onde sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constantes.

Le transport et l'utilisation de l'électricité déforment la sinusoïde. Cette déformation ou distorsion de l'onde est appelée perturbation harmonique.

La distorsion harmonique est essentiellement due à la progression de l'utilisation des équipements électriques dans l'industrie ainsi que dans les ménages.

Vus les désagréments que peut causer la pollution harmonique sur les éléments du réseau ainsi que sur la qualité de l'énergie, il est donc nécessaire d'étudier ce phénomène.

Dans ce chapitre nous présenterons des généralités sur la qualité de l'énergie électrique, les principales perturbations en particulier les perturbations harmoniques, leurs principales sources ainsi que leurs effets sur le réseau.

I.1 Explication du phénomène harmonique

Les formes des signaux (tension et courants) relevés sur les réseaux sont souvent déformés et loin d'être de forme sinusoïdales parfaites.

Un harmonique est une superposition sur l'onde fondamentale du courant ou de tension, d'ondes de fréquences différentes de celle du fondamentale ; ces fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du réseau.

La figure (I.1) montre la superposition d'une composante harmonique de rang « 3 » à l'onde fondamentale

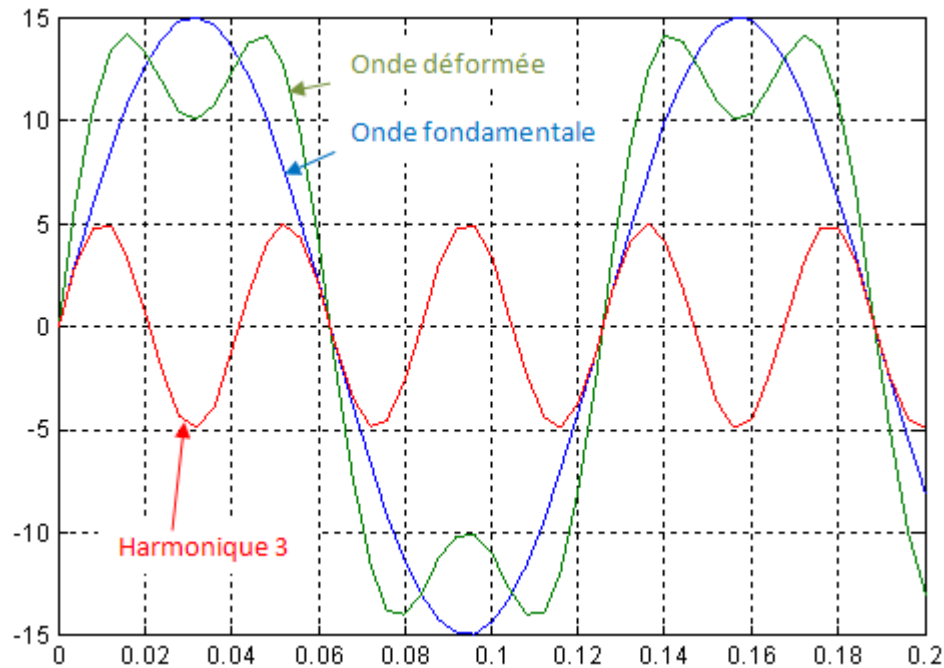


Figure (I.1) : signal déformé

I.2. Origine des harmoniques [1]

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre).

I.3. Décomposition en série de Fourier

Tout signal périodique de période T et de pulsation $\omega = 2\pi/T$ est décomposable en série de Fourier de la façon suivante :

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [(a_h \cos(\omega_h t) + b_h \sin(\omega_h t))] \quad \text{I.1}$$

$$\text{Avec : } a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dt \quad \text{I.2}$$

Et pour $h \geq 1$

$$\begin{cases} a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(\omega_h t) dt \\ b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(\omega_h t) dt \end{cases} \quad \text{I.3}$$

$$\text{Ou : } f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \quad \text{I.4}$$

$$\text{Ou : } \theta_h = \text{Arc tg} \frac{a_h}{b_h} \quad \text{I.5}$$

On définit les fréquences harmoniques f_h comme les fréquences multiples de la fréquence fondamentale f ; $f_h = hf$ donc le rang de l'harmonique $h = \frac{f_h}{f}$.

Le terme : $a_h \cos(\omega_h t) + b_h \sin(\omega_h t)$ est l'harmonique de rang h.

La grandeur $C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ est l'amplitude de l'harmonique de rang h.

La valeur efficace de l'harmonique h est donnée par :

$$C_{\text{h eff}} = C_{\text{h}} / \sqrt{2}$$

La grandeur θ_{h} est la phase de l'harmonique de rang h.

a_0 : est la composante continue.

C_1 : est l'amplitude de la composante fondamentale

I.4 Différents types d'harmoniques

I.4.1 Courant harmonique (I_{h})

L'examen du courant consommé dans un appareil électrique à l'aide d'un oscilloscope montre que celui-ci n'est pas sinusoïdal. Il est périodique, mais s'avère sensiblement déformé.

I.4.2 Tension harmonique (V_{h})

Le raccordement de la charge en un point du réseau revient à connecter une source de courant harmonique à une impédance. Donc d'après la loi d'Ohm y a apparition d'une tension harmonique :

$$V_{\text{h}} = Z_{\text{h}} I_{\text{h}} \quad \text{I.6}$$

I.4.3 Impédance harmonique

L'impédance présentée par un réseau dépend de la fréquence à laquelle on la considère. Pour chaque rang harmonique donné, on peut définir une impédance harmonique en tout point du réseau. Cette impédance représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers le point considéré.

I.5 Grandeurs caractéristiques des harmoniques

I.5.1 Distorsion harmoniques

Le taux de distorsion harmonique caractérise le niveau de pollution du réseau ; On distingue :

➤ **Taux individuel :**

C'est le rapport de la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique de rang h à celle du fondamental

$$D_{\text{h}} (\%) = 100 \frac{Y_{\text{h}}}{Y_1} \quad \text{I.7}$$

Y_{h} : Harmonique de tension ou de courant.

➤ **Taux global :**

Le taux global de distorsion harmonique permet d'évaluer l'écart entre la forme de l'onde réelle et la forme de l'onde sinusoïdale pour un courant ou une tension.

Il représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace du fondamental.

$$\text{TDH} = \frac{\sqrt{\sum_{\text{h}=2}^{\infty} Y_{\text{h}}^2}}{Y_1} ; \text{ le terme } R = \sqrt{\sum_{\text{h}=2}^{\infty} Y_{\text{h}}^2} \text{ est appelé résidu. On distingue :}$$

❖ **Taux de distorsion harmonique en courant THD_i**

Il ne dépend que des valeurs efficaces des courants de charge :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{\text{h}=2}^{\infty} \left(\frac{I_{\text{ch}}}{I_{\text{c1}}}\right)^2} \quad \text{I.8}$$

- I_{ch} : valeur efficace du courant de charge
- I_{c1} : valeur efficace du courant fondamental

❖ Taux de distorsion harmonique en tension THD_v

Il est fonction des courants harmoniques caractérisant la charge et l'impédance de court circuit (Z_{scc}) :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_{ch}}{V_{c1}}\right)^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Z_{scc} I_{ch}}{V_{c1}}\right)^2} \quad \text{I.9}$$

- Z_{scc} : Impédance harmonique du court circuit
- V_{ch} : tension de charge

I.5.2 facteur de crête

Le facteur de crête est défini par le rapport entre la valeur de crête d'un signal et sa valeur efficace. Il caractérise la surtension ou la surintensité instantanée maximale subie par un appareil.

$$F_c = \frac{\text{Valeur maximale}}{\text{Valeur efficace}}$$

$F_c > 6$: Pour les ondes très déformées.

Pour une tension sinusoïdale : $F_c = \frac{\sqrt{2}V_{eff}}{V_{eff}} = \sqrt{2} = 1.41$ I.10

I.5.3 Notion de phase

La phase d'un signal harmonique est une notion très importante, qui permet de calculer la somme vectorielle de plusieurs courants harmoniques circulant dans un même conducteur, et d'identifier le sens de transit du courant harmonique.

Il faut être très attentif à la fréquence utilisée pour indiquer la phase. En effet, de nombreux appareils de mesure fournissent cette grandeur, mais parfois avec des fréquences différentes.

➤ **Phase entre I_h et I_1 (ou entre V_h et V_1)**

L'analyse de Fourier en courant suffit pour connaître le déphasage entre le courant harmonique de rang h et le courant fondamental, ce déphasage est noté (θ_h).

Lorsqu'on veut faire la somme de courants sur une portion donnée du réseau, il est alors nécessaire d'effectuer une correction qui tient compte du déphasage du courant fondamental par rapport à la tension fondamentale.

➤ **Phase entre V_h et I_h (h) :**

Cette notion est introduite lors du calcul des puissances harmoniques actives (P_h) et réactives (Q_h). C'est l'angle entre la tension harmonique (V_h) et le courant harmonique (I_h).

$$P_h = V_h I_h \cos \varphi_h$$

En monophasé

I.11

$$Q_h = V_h I_h \sin \varphi_h$$

$$P_h = 3V_h I_h \cos \varphi_h$$

En triphasé

I.12

$$Q_h = 3V_h I_h \sin \varphi_h$$

➤ **Phase entre le courant I_h et la tension fondamentale V_1**

Il est préférable de connaître l'angle entre le courant harmonique I_h et une référence de tension V_1 qui est beaucoup plus stable en raison de la forme plus sinusoïdale du signal et de sa faible variation angulaire le long des réseaux de courte longueur. Il est nécessaire que l'appareil mesure à la fois le courant et la tension harmonique.

I.6. Harmoniques dans un système triphasé [4]

I.6.1 Système triphasé équilibré

Si on alimente un système équilibré de charges triphasées (c'est-à-dire identiques sur trois phases) par un système équilibré de tensions triphasées :

$$\begin{cases} V_a(t) = V_a\sqrt{2} \sin(\omega t) \\ V_b(t) = V_a\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c(t) = V_a\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{I.13}$$

Un système de courant triphasé y circule :

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a\sqrt{2} \sin(\omega t) \\ I_b(t) = I_a\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_c(t) = I_a\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{I.14}$$

Les expressions des courants harmoniques de rang h sont de la forme suivante :

$$\begin{cases} I_{h,a}(t) = I_a\sqrt{2} \sin[h(\omega t)] \\ I_{h,b}(t) = I_a\sqrt{2} \sin[h(\omega t - \frac{2\pi}{3})] \\ I_{h,c}(t) = I_a\sqrt{2} \sin[h(\omega t - \frac{4\pi}{3})] \end{cases} \quad \text{I.15}$$

Pour $h=3k+1$; avec k entier, les harmoniques forment un système direct.

Pour $h=3k-1$; avec k entier, les harmoniques forment un système inverse.

Pour $h=3k$; avec k entier, les harmoniques forment un système homopolaire.

Dans le cas d'un réseau avec le neutre les courants qui y circulent s'ajoutent arithmétiquement. [4]

I.6.2 Système triphasé déséquilibré

Pour l'étude des systèmes déséquilibrés, il est nécessaire de décomposer les signaux étudiés en systèmes (direct, inverse et homopolaire).

Pour effectuer cette décomposition, on utilise la méthode classique de Fortescue, qui peut se faire à 50Hz et aux fréquences harmoniques.

I.7 Etude du phénomène de résonance [4]

L'association d'éléments capacitifs et inductifs se traduit par l'apparition de résonances. Celles-ci se manifestent par des valeurs particulièrement élevées ou faibles de l'impédance à certaines fréquences. On distingue deux types de résonances, selon que les éléments capacitifs et inductifs sont associés en parallèle ou en série (figure I.2).

➤ Résonance parallèle:

La mise en parallèle d'une inductance L_p et d'une capacité C_p constitue une impédance harmonique donnée par :

$$Z_{\text{in},p} = \frac{jL_p\omega}{1 - L_p C_p \omega^2} \quad \text{I.16}$$

Il y a résonance lorsque le dénominateur est égal à zéro ; l'impédance tend alors vers l'infini. La fréquence de résonance est donnée par :

$$F_{r,p} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} \quad \text{I.17}$$

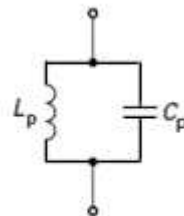


Figure I.2.a

➤ **Résonance série :**

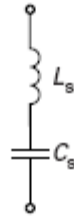


Figure I.2.b

De la même façon, la mise en série d'une inductance L_s et d'une capacité C_s constitue une impédance harmonique donnée par :

$$Z_{\text{h},s} = \frac{1 - L_s C_s \omega^2}{j C_s \omega} \quad \text{I.18}$$

Il y a résonance lorsque le numérateur est égal à zéro ; l'impédance est alors nulle.

La fréquence de la résonance est donnée par :

$$F_{r,s} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad \text{I.19}$$

I.8 Les inter-harmoniques

La tension du réseau peut contenir des composantes fréquentielles qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. Elles peuvent apparaître sous forme de fréquences discrètes, soit sous forme de spectre de large bande. Les sources principales des inter-harmoniques sont : les convertisseurs de fréquence, les fours à arc, les machines à souder

I.9 Les effets des harmoniques [2]

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

a) Les effets instantanés

Les effets instantanés sont principalement les perturbations des dispositifs de régulation, par exemple la commutation des thyristors lorsque le passage à zéro de la tension est décalé. Les compteurs d'énergie à induction présentent des erreurs supplémentaires, des vibrations et du bruit apparaissent dans les transformateurs et les inductances. Des perturbations sont induites sur les lignes à courants faibles (téléphone, contrôle/commande) situées à proximité du réseau pollué.

b) Les effets à terme

Les effets à terme sont la fatigue mécanique des matériaux due aux vibrations ainsi que l'échauffement des composants. Au niveau des condensateurs, les pertes dues à la conduction et à l'hystérésis du diélectrique sont proportionnelles en première approximation au carré du courant efficace. Au niveau des machines et des transformateurs, des pertes supplémentaires apparaissent (courant de Foucault, champs tournants harmoniques).

En ce qui concerne les câbles et les équipements, une élévation de la température sera la conséquence des courants harmoniques. Cela engendre des pertes supplémentaires ayant pour cause l'augmentation de la valeur efficace du courant, l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence et d'une façon générale tous les équipements (tableaux électriques) soumis à des tensions ou traversés par des courants harmoniques ont des pertes accentuées, et devront faire l'objet de déclassements. Par exemple, une cellule de condensateur est dimensionnée pour un courant égal à 1,3 fois le courant réactif de compensation.

Ce surdimensionnement ne tient toutefois pas compte de l'augmentation de l'échauffement due à l'effet de peau dans les conducteurs.

I.9.1 sensibilité des différents types d'appareils [4]

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements peuvent être cités :

I.9.1.1 Machine synchrone

- Echauffement du aux pertes dans les enroulements par effet joule.
- Pertes par hystérésis et courant de Foucault.
- La superposition des champs perturbateurs dus aux courants harmoniques au champ tournant à 50hz, est a l'origine des oscillations du champ résultant qui se traduisent par une fatigue mécanique de la machine.

I.9.1.2 Machine asynchrone

En plus des échauffements et des pertes par hystérésis et courant de Foucault, les harmoniques de séquence inverse ($h=3k-1$) créent un couple de freinage et ceux de séquence direct ($h=3k+1$) créent un couple moteur ce qui conduit à une altération du couple moteur de la machine.

I.9.1.3 Transformateur

Les pertes dans les transformateurs dues à la présence d'harmoniques sont :

$P_j = RI_{eff}^2$ Pertes joules.

$P_{hystérésis} = VSf$ Pertes par hystérésis ou :

- V est volume du circuit magnétique [m^3]
- S surface du cycle d'hystérésis [T.A/m]

$P_{Foucault} = \frac{\pi^2 d^2}{6 \rho} B_{eff}^2 f^2$ pertes par courant de Foucault [4]

- d : l'épaisseur des tôles magnétique [mm].
- ρ : la résistivité du matériau [Ω/mm^2].
- B : l'induction magnétique en [Tesla].
- f : fréquence du réseau [Hertz].

Les transformateurs entrent en résonance mécanique à cause des vibrations causées par les forces électrodynamiques aux fréquences harmoniques et deviennent bruyants.

I.9.1.4. Les câbles

Les pertes dans les câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées. D'où une élévation de température.

Parmi les causes des pertes supplémentaires on peut citer :

- Une augmentation de la valeur efficace du courant pour une même puissance active consommée.
- L'élévation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable.

I.9.1.5. Les condensateurs

Les pertes causées par l'échauffement, sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans le diélectrique. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

Les condensateurs sont sensibles aux surcharges qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence de tensions harmoniques.

I.9.1.6. Les relais de protection

La présence de courants harmoniques, entraîne le sur échauffement des bobines des relais et cause le déclenchement intempestif des protections, ainsi que la perte de précision de leur seuil de protection.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes perturbations qui affectent le réseau électrique, ainsi que leurs origines et leurs effets sur ce dernier ou sur les charges qui y sont connectées. Pour une meilleure prise en charge de ces perturbations, une connaissance des conditions d'exploitation du réseau s'avère nécessaire, d'où l'intérêt d'une étude expérimentale des charges polluantes.

Chapitre II

HARMONIQUES DANS LES CONVERTISSEURS

Introduction

Les convertisseurs statiques et les systèmes de commandes prennent de plus en plus d'importance dans le secteur industriel et domestique. Ils permettent non seulement de convertir une puissance alternative en puissance continue, mais aussi de réaliser l'opération inverse, en l'occurrence la conversion alternative-continue qui utilise en grande envergure des redresseurs à thyristors en pont commandé, et cela n'est pas sans conséquences néfastes sur le réseau d'alimentation.

En effet, ces convertisseurs sont assimilables à des sources génératrices d'harmoniques en courant et en tension.

II.1 Harmoniques dans les convertisseurs en structure triphasée

Dans le cas d'un réseau en structure triphasée équilibrée, on peut écrire :

$$v(t) = V_m \begin{cases} \sin \omega t \\ \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad \text{II.1}$$

$$i(t) = \sum_n I_n \sqrt{2} \begin{cases} \sin[n\omega t - \varphi_n] \\ \sin \left[n \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \varphi_n \right] \\ \sin \left[n \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) - \varphi_n \right] \end{cases} \quad \text{II.2}$$

L'expression des puissances instantanées dans les différentes phases :

$$P = v(t)i(t) \quad \text{II.3}$$

$$P = \sum V_m I_n \sqrt{2} \begin{cases} \cos[(n-1)\omega t - \varphi_n] - \cos[(n+1)\omega t - \varphi_n] \\ \cos\left[(n-1)\omega t - (n-1)\frac{2\pi}{3} - \varphi_n\right] - \cos\left[(n+1)\omega t - (n+1)\frac{2\pi}{3} - \varphi_n\right] \\ \cos\left[(n-1)\omega t - (n-1)\frac{4\pi}{3} - \varphi_n\right] - \cos\left[(n+1)\omega t - (n+1)\frac{4\pi}{3} - \varphi_n\right] \end{cases} \quad \text{II.4}$$

II.2 Harmoniques générés par des redresseurs

Nous utiliserons une structure montée en pont, elle offre un meilleur spectre d'harmoniques soit du côté réseau soit du côté charge. La structure en pont de Graetz est la plus utilisée.

II.2.1 Harmoniques de courant absorbés par le redresseur en pont triphasé

Considérons le schéma de la figure(II.2) qui représente un redresseur triphasé commandé avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le courant de sortie est parfaitement lissé.
- Les tensions d'alimentation sont sinusoïdales équilibrées.
- La commutation des thyristors est instantanée.

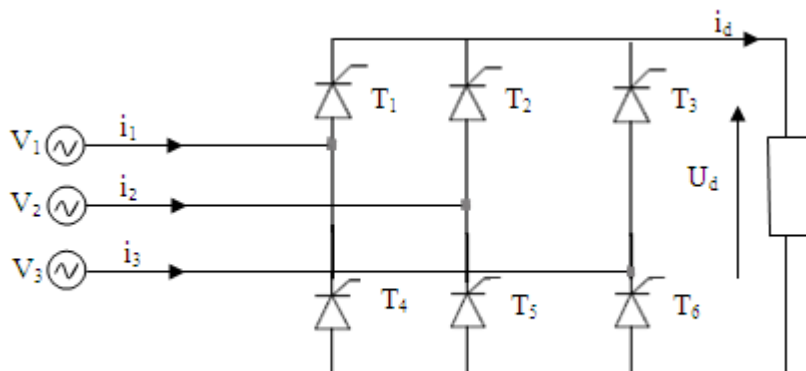


Figure II.2 schéma simplifié d'un redresseur 3~ en pont de Graetz

Le courant dans chaque phase est donné par la figure (II.3), chaque thyristor conduit pendant un temps $\frac{T}{3}$, T étant la période du courant i .

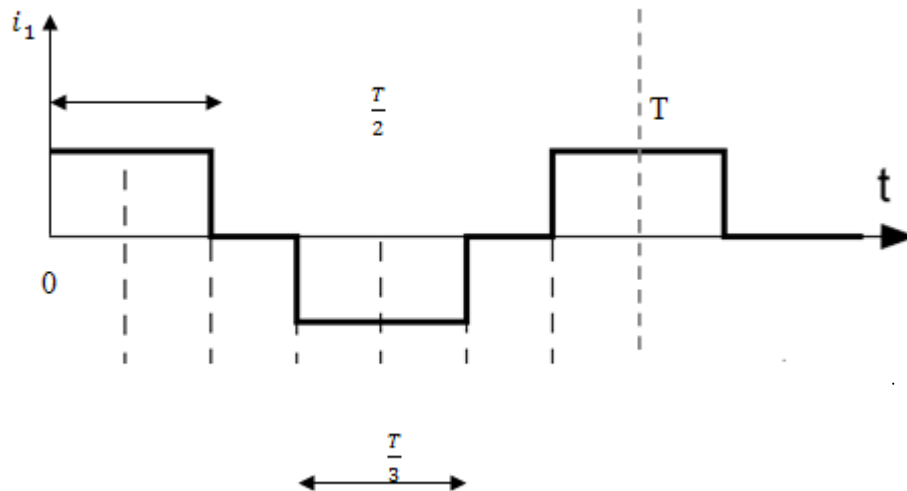


Figure II.3 Allure du courant dans une phase du réseau

Le signal de la figure est périodique et décomposable en série de Fourier comme suit :

$$i(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)] \quad \text{II.5}$$

Avec :

- A_0 : est la valeur moyenne de $i(t)$ définie par :

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad \text{II.6}$$

- A_n et B_n sont les coefficients de Fourier définis par :

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(n\omega t) dt \quad \text{II.7}$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(n\omega t) dt \quad \text{II.8}$$

En posant : $\theta = \omega t$, on aura :

$$A_0 = 0$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \cos(n\theta) d\theta . \quad \text{II.9}$$

$B_n = 0$ fonction paire

On note une symétrie de glissement $[f(\omega t + \pi) = -f(t)]$ et on déduit l'absence d'harmoniques pairs. L'amplitude de chaque harmonique est donné par :

$$A_n = \frac{4I_d}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \quad \text{II.10}$$

L'expression du courant $i(t)$ de chaque phase est :

$$i(t) = \frac{2I_d\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) - \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \dots \right] \quad \text{II.11}$$

Le courant $i(t)$ est décomposé par une somme de sinus de fréquences harmoniques $(6k \pm 1)$.

La valeur efficace de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son rang :

$$I_n = \frac{I_1}{n}.$$

On note également l'absence d'harmoniques de rang multiples de 3. Cette caractéristique est rencontrée dans tous les systèmes triphasés à neutre flottant (pas de composantes homopolaires). En réalité le courant dans la charge contient une ondulation de fréquence égale à 6 fois celle du fondamentale du réseau triphasé.

De plus, la commutation des interrupteurs n'est pas instantanée et génère des harmoniques supplémentaires venant se superposer au courant du réseau, ce qui contribue à la dégradation du taux de distorsion harmoniques des courants harmoniques absorbés par le convertisseur.

II.2.2 Harmoniques de courant générés par un redresseur en pont de Graetz [5]

Le redresseur est supposé associé à une inductance de filtrage de courant continu de très grande valeur de façon à ce que le courant i_d soit parfaitement lissé.

L'impédance de source nulle dans un premier temps.

Les courants de lignes i_1, i_2 et i_3 prennent à tour de rôle la valeur (et la forme du courant continu i_d).

Chaque thyristor assure la conduction du courant pendant $\frac{1}{3}$ de la période.

Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur lorsqu'un thyristor devient conducteur

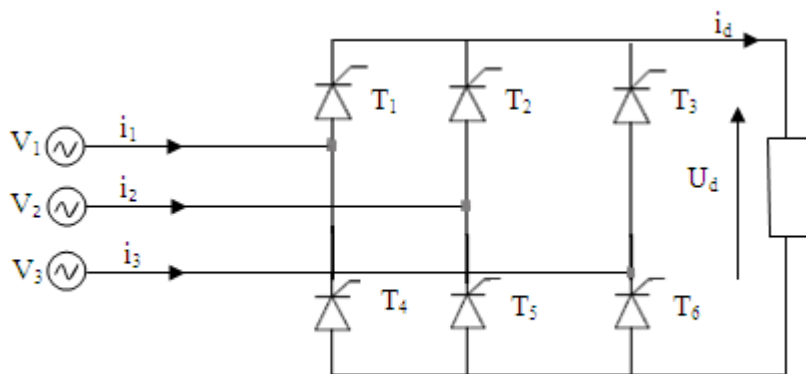


Figure II.4 schéma simplifié d'un redresseur 3~ en pont de Graetz

II.2.2.1 Etude des courants de phase

Les courants d'entrée du redresseur $i_1(t)$, $i_2(t)$ et $i_3(t)$ forment un système triphasé équilibré, leur somme instantanée est nulle. Nous supposons que les courants varient linéairement durant les commutations, ce qui nous donne une allure rectangulaire, leurs développements en série de Fourier ne peuvent contenir ni composante continue ni harmonique du rang pair ni les harmoniques de rang 3 et multiple de 3, à cause du conducteur neutre isolé.

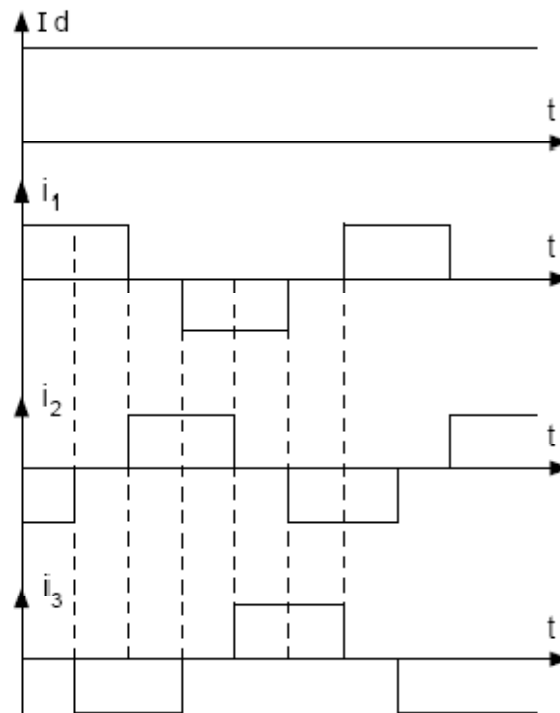


Figure II. 5 courant théorique en amont du redresseur avec impédance de filtre aval infini et impédance de source nulle.

II.2.2.2 Etude de la tension de sortie

La tension U_d d'indice de pulsation $P=6$, obtenue par le redresseur de tensions sinusoïdales de période T , est formée de P portions identiques de sinusoïdes de période T/P . Sa valeur moyenne est donnée par :

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{eff} \cos\alpha. \quad \text{II.12}$$

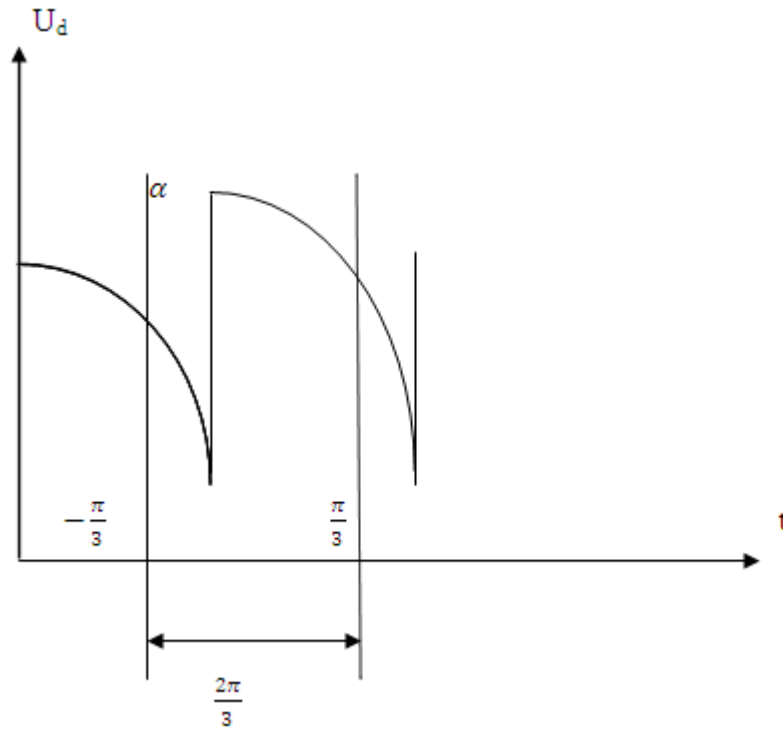


Figure II.6 Allure de la tension de charge.

Le développement en série de Fourier de la tension U_d comprend tous les harmoniques de fréquence $6f_1$ et ses multiples. L'expression de la décomposition est donnée par :

$$U_d(t) = U_{d0} + \sum_{k=1}^n (A_{kp} \sin k p \omega t + B_{kp} \cos k p \omega t) \quad \text{II.13}$$

Avec :

U_{d0} : tension moyenne

P : Indice de pulsation

$h = 6k$, k : entier.

Ce qui donne :

$$U_d(t) = U_{d0} \left[1 + \sum_{k=1}^n \frac{2(-1)^{k+1}}{36k^2} [(\sin 6k\alpha - 6k \cos 6k \alpha (\tan \alpha)) \sin 6k(\omega t) + (\cos 6k\alpha + 6k \sin 6k \alpha (\tan \alpha)) \cos 6k(\omega t)] \right] \quad \text{II.14}$$

II.2.2.3 Influence de l'impédance de source

Celle-ci étant de nature selfique, son inductance interdit les variations instantanées du courant.

II.2.2.4 le phénomène d'empiètement [5]

Définition

Lorsque le thyristor T_2 est commandé alors que le thyristor T_1 est conducteur, le courant i_2 s'établit dans le thyristor T_2 tandis que le courant i_1 diminue dans le thyristor T_1 .

Les inductances L s'opposent aux variations brutales de ces courants.

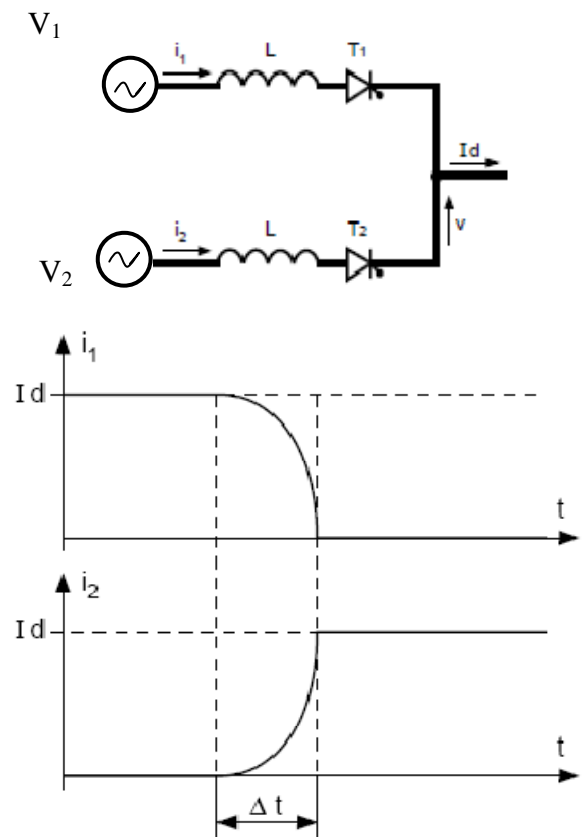
Pendant la durée Δt de la commutation, il y a conduction simultanée de deux thyristors (ce phénomène est appelé empiètement).

La source est donc en régime de court-circuit interphases (1 et 2) limité par les deux inductances

V_1, V_2 : tension de source, phase-neutre

v : tension du + des redresseurs par rapport au neutre

L : inductance de ligne représentant l'impédance de source



Δt : durée de la commutation

Figure II.6 Phénomène d'empiètement

II.2.2.5 Perturbations dues à l'empiétement

On voit pour chaque demi-période, chacune des tensions simples est perturbée deux fois et présente :

- une chute de tension lors de la mise en conduction du thyristor correspondant.
- une surtension lors du blocage de ce thyristor.

La durée Δt de ces perturbations est d'autant plus longue que l'inductance de ligne L est élevée.

Le courant de ligne n'étant plus rigoureusement rectangulaire, son contenu harmonique diminue, (forte atténuation des harmoniques de rangs élevés).

En conséquence la distorsion de tension résultante augmente lorsque l'impédance de ligne augmente mais pas de façon proportionnelle à cette impédance puisque le contenu harmonique du courant diminue.

De plus, le temps de commutation diminue lorsque l'angle de retard a augmenté, ce qui a pour conséquence de faire augmenter, pour une même valeur d'inductance, le contenu harmonique du courant et la distorsion de tension.

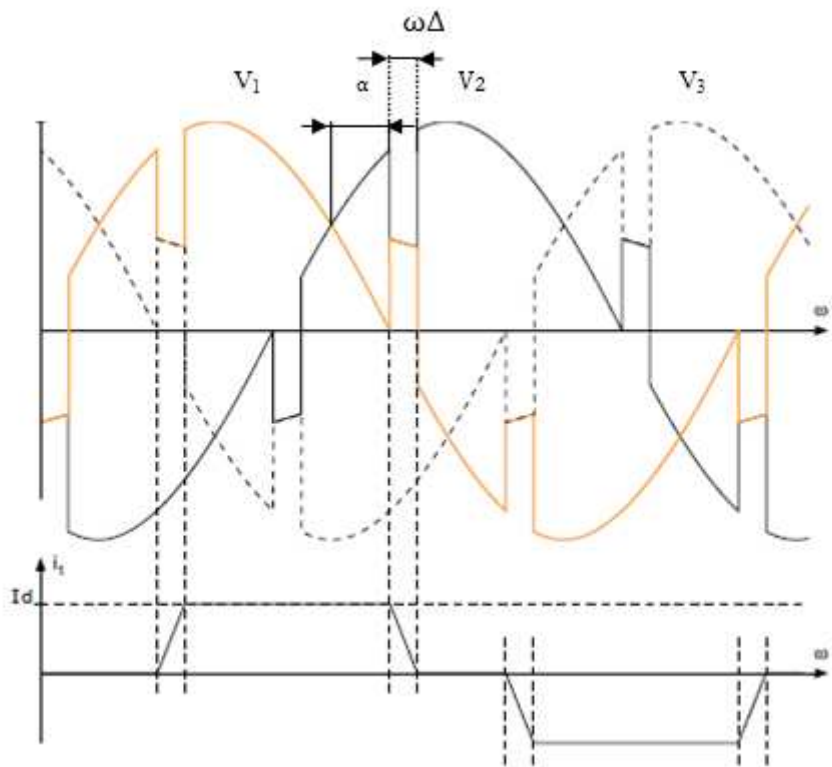


Figure II.7 Empiètement pour un redresseur à thyristor avec un angle de retard $\alpha = 30^\circ$

II.2.2.6. Contenu harmonique de courant

La figure (II.7), extraite de la norme CEI 146-4, montre comment évoluent les courants harmoniques en fonction de l'impédance de source pour différents angles de retard α .

Les courants harmoniques sont représentés en valeur relative par rapport à leur valeur maximale théorique (I_{niN}) :

$I_{nN} = I_{\text{eff}}$ de l'harmonique de rang n

$$I_{niN} = \frac{I_1}{n}$$

I_1 = valeur efficace du fondamental.

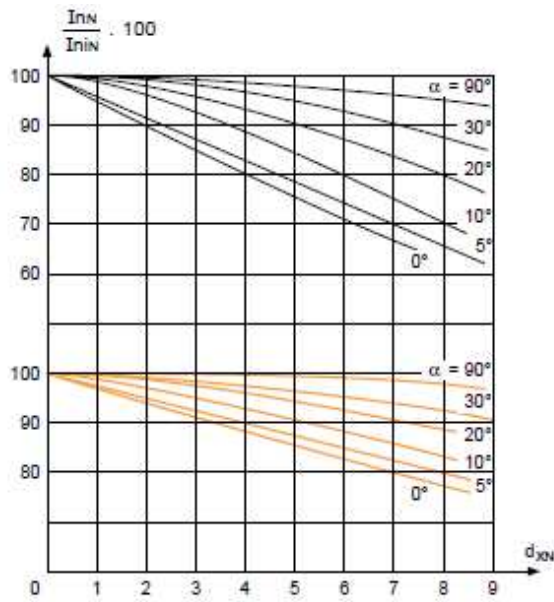
L'impédance de source est représentée ici par le terme d_{xN} qui correspond à la chute de tension relative côté continu.

Celle-ci est due à l'inductance totale de ligne.

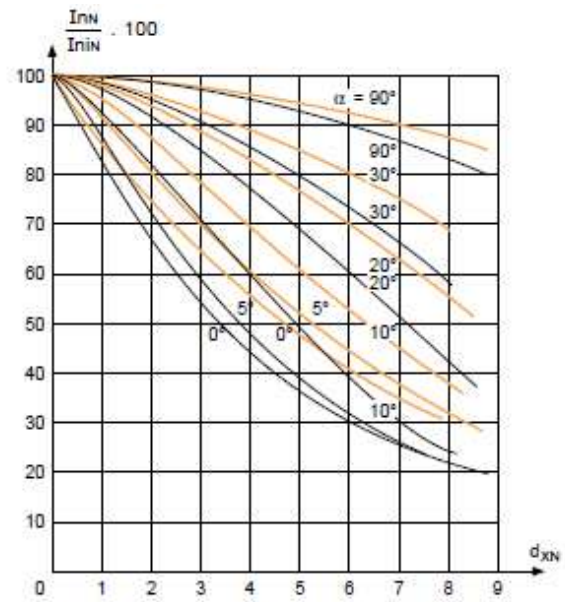
Pour ce redresseur :

$$d_{xN} = \frac{1}{2} \frac{L\omega I_1}{V_1} 100 \quad \text{II.15}$$

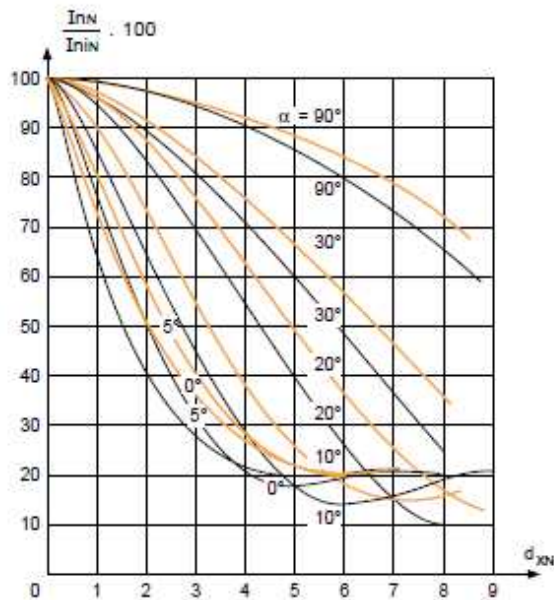
Avec : V_1 valeur efficace des tension simples



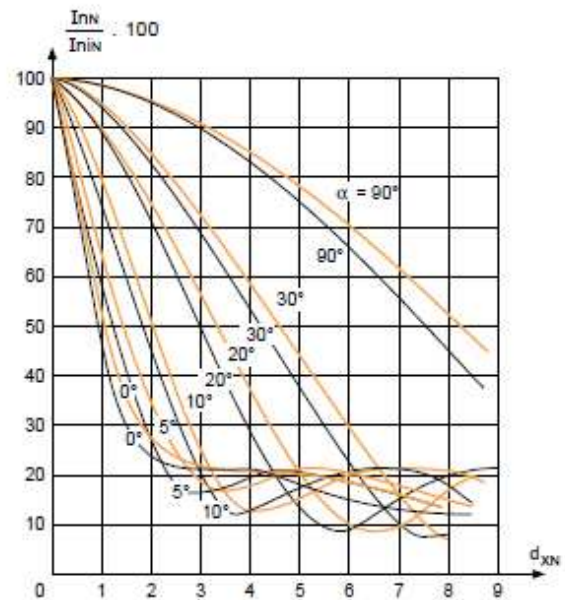
a) harmoniques de rang : — n = 5 ; — n = 7



b) harmoniques de rang : — n = 11 ; — n = 13



c) harmoniques de rang : — n = 17 ; — n = 19



d) harmoniques de rang : — n = 23 ; — n = 25

Figure II.8 évolution de l'amplitude de courant harmonique en fonction de l'impédance de source pour différent angle de retard α du pont de Graetz 3~

En triphasé équilibré, d_{xN} représente la moitié de la chute de tension relative en ligne.

En appelant U'_{cc} cette chute de tension relative assimilable à une tension de court-circuit, il est possible d'écrire :

$$d_{xN} = \frac{1}{2} U'_{cc} \quad \text{II.16}$$

II.2.2.7 Taux de distorsion en courant

Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle et d'un courant continu parfaitement filtré, la valeur efficace de chaque harmonique de courant est de la forme :

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad \text{II.17}$$

Dans ce cas, le contenu harmonique est indépendant de α ($\Delta t = 0$). Le taux global de distorsion théorique est donné par l'expression :

$$D(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{6k+1}^2 + I_{6k-1}^2)}}{I_1}, \text{ Soit } 30\%. \quad \text{II.18}$$

En pratique, pour les calculs, le courant de ligne n'a pas rigoureusement l'allure théorique retenue pour les calculs car le courant continu ne peut pas être parfaitement lissé (fig. II.8).

De ce fait, le contenu harmonique du courant est un peu modifié, et en particulier les harmoniques de rang $(6k - 1)$ sont augmentés, tandis que ceux de rang $(6k + 1)$ sont diminués.

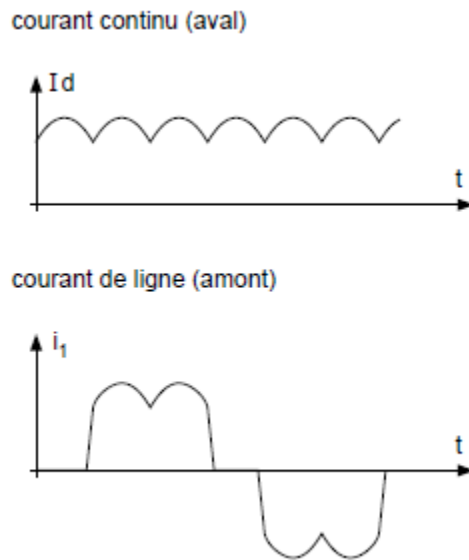


Figure II.9 courants réels en amont et en aval du redresseur.

II.2.2.8 Taux de distorsion en tension

La figure (II.9) montre l'évolution du taux de distorsion de la tension à l'entrée du redresseur en fonction de l'impédance totale de source ramenée à la tension de court-circuit U'_{cc} et de l'angle de retard α à la commande des thyristors. Il apparaît que ce taux de distorsion augmente très rapidement et qu'il est difficile à priori de rester en dessous d'une valeur de 5%

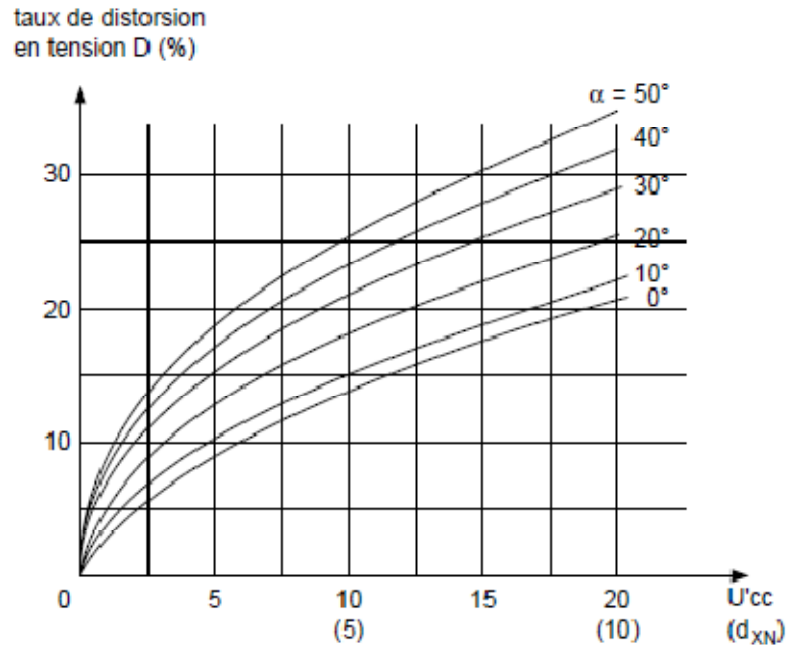


Figure II.9 évaluation du taux de distorsion de la tension en fonction de l'impédance de source pour différentes valeurs de l'angle de retard α

II.2.2.9 Facteur de puissance du redresseur :

Le courant absorbé par le redresseur étant fortement déformé, le courant efficace a une valeur supérieure à celle du fondamental.

La valeur efficace du courant peut être calculée en appliquant la formule de base suivante :

$$I_{eff} = \sqrt{I_1^2 \sum_{k=1}^{\infty} (I_{6k+1}^2 + I_{6k-1}^2)} \tag{II.19}$$

Avec une valeur théorique (source de puissance infinie) du courant égale à :

$$I_{6k\mp 1} = \frac{I_1}{I_{6k\mp 1}}$$

$$\text{D'où : } I_{eff} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{7}\right)^2 + \left(\frac{1}{11}\right)^2 + \dots} \text{ soit } I_{eff} = 1.05 I_1 \tag{II.20}$$

De plus, le courant est déphasé par rapport à la tension d'une valeur minimale égale à α , à laquelle il faut rajouter environ la moitié de l'angle d'empiètement $\omega\Delta t$.

En première approximation, l'angle d'empiètement étant faible devant l'angle de retard, un déphasage égal à α peut être retenu, d'où : $\cos\varphi_1 = \cos \alpha$

En admettant que la valeur efficace de la tension soit très proche de celle du fondamental (ce qui est vrai lorsque son taux de distorsion est faible) le facteur de puissance λ est donné avec une bonne approximation avec :

$$\lambda = 0,95 \cos \alpha \quad \text{II.21}$$

$$\text{Puisque : } \lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi_1}{\sqrt{3}U_{eff} I_{eff}} \quad \text{II.22}$$

(U_1 et U_{eff} . étant les tensions composées).

$$\text{Soit : } \lambda = \frac{1}{1,05} \cos\alpha$$

Conclusion

Les convertisseurs statiques de puissance sont de plus en plus présents comme récepteurs consommateurs dans les réseaux de distribution industrielle.

Les classiques redresseurs à thyristors des ASI (alimentation sans interruption) sont des sources de perturbations harmoniques et détériorent le facteur de puissance de l'installation. Ces pollutions sont acceptables tant que la puissance de l'ASI est faible devant la puissance de court-circuit du réseau.

Chapitre III

STRATEGIE DE DEPOLLUTION

Introduction

Lorsque la puissance mise en jeu dans la conversion d'énergie dans les systèmes d'électronique de puissance est importante, on est amené à attacher plus d'importance à la réduction des pertes occasionnées par les perturbations harmoniques et aux répercussions néfastes sur le réseau ainsi que les consommateurs riverains. Il est indispensable d'opter pour une solution ou plusieurs selon leur efficacité.

Nous présenterons dans ce chapitre certaines solutions pour compenser ces perturbations harmoniques.

III.1 Solutions de dépollution traditionnelles

Suivant les types de perturbation, courant et tension, deux solutions traditionnelles de dépollution sont analysées.

III.1.1 Dépollution des courants perturbateurs

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbations, plusieurs solutions ont été introduites :

III.1.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique [2]

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases.

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. La Fig. III.1 montre ce compensateur, appelé montage de Steinmetz.

Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le montage de Steinmetz provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques.

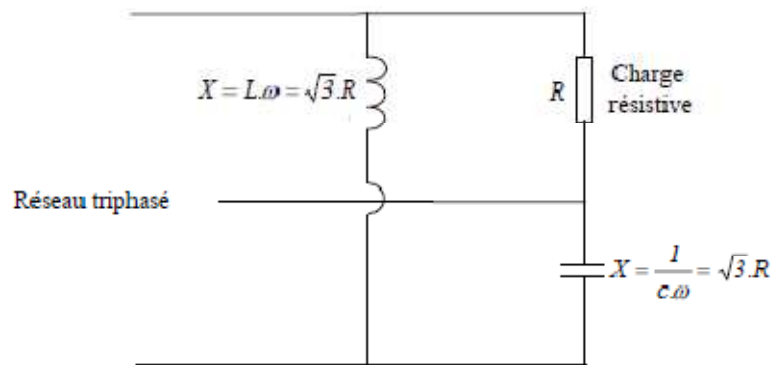


Fig. III.1 montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

III.1.1.2 Compensation de la puissance réactive [1]

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

III.1.1.3 Insertion de l'inductance anti harmonique [4]

Elle permet de protéger une batterie de condensateurs contre les surcharges harmoniques. Le schéma de référence est toujours celui de la figure III.2.

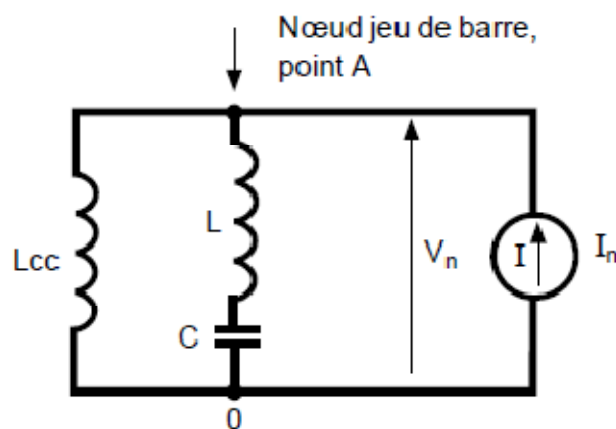


Fig. III.2 Inductance anti harmonique en série avec un condensateur

L_{cc} : inductance de court circuit du réseau, vu d'un point spécifié (théorème de Thevenin)

Dans ce montage, le choix de L est tel que la branche L-C (L inductance antiharmonique, et C condensateurs de compensation du réactif) est inductive dans le domaine des fréquences harmoniques.

Ainsi par principe, la fréquence de résonance f_r de cette branche se situera au dessous du spectre du pollueur. La branche L-C et le réseau (L_{cc}), sont alors tous deux inductifs dans le domaine du spectre, et les courants harmoniques injectés par le pollueur se partagent en proportion inverse des impédances. Il y a donc peu de courants harmoniques dans la branche L-C, ce qui protège les condensateurs, et la majeure partie des courants harmoniques circule dans le restant du réseau, surtout dans l'impédance de court-circuit.

L'impédance du réseau vue du jeu de barres de raccordement de la branche L-C, a alors pour allure la courbe de la figure III.3

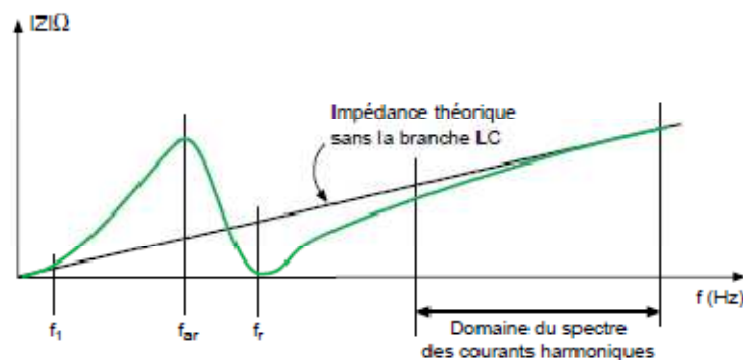


Fig.III.3 impédance du réseau L-C

Il n'y a plus d'antirésonance dans le domaine du spectre de courants, aussi l'emploi d'une inductance antiharmonique présente deux avantages :

- elle supprime les risques de forts courants harmoniques dans les condensateurs
- elle supprime corrélativement les fortes distorsions de la tension du réseau, sans toutefois ramener les taux à une faible valeur spécifiée.

III.1.1.4 Les transformateurs à couplage passif [2]

Certains couplages du type triangle zigzag permettent de supprimer les harmoniques de rang 3 et leurs multiples au prix de l'augmentation de l'impédance de ligne, et donc d'une augmentation de la distorsion de la tension.

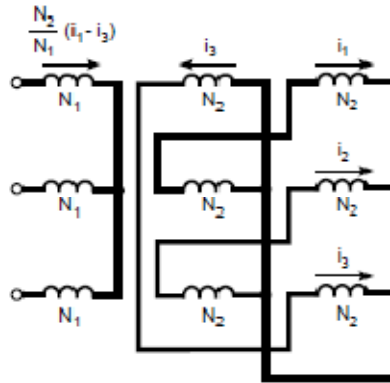


Fig.III.4 transformateur à secondaire zigzag.

La figure III.4 et le calcul ci-après permettent de comprendre pourquoi les courants de pulsation $3k\omega$ ne se retrouvent pas au primaire du transformateur (courant homopolaire nul).

Le courant circulant par exemple dans l'enroulement primaire 1 vaut : $\frac{N_2}{N_1}(i_1-i_3)$.

$$\begin{cases} i_1 = I_{1(3k)} = I \sin(3k\omega t) \\ i_3 = I_{3(3k)} = I \sin 3k(\omega t - \frac{4\pi}{3}) = I \sin(3k\omega t) = i_1 \end{cases}$$

$$\text{D'où: } \frac{N_2}{N_1}(i_1-i_3) = 0$$

Dans le cas de charges triphasées il est possible d'éliminer certains rangs d'harmoniques en utilisant des transformateurs ou des autotransformateurs avec plusieurs secondaires déphasés ; cette disposition se rencontre surtout dans le cas de redresseurs puissants.

Le plus connu de ces montages est le redresseur constitué de deux ponts mis en série ou en parallèle, alimentés par un transformateur à deux secondaires dont l'un est en étoile et l'autre en triangle. Cette disposition entraîne un déphasage de 30 degrés entre les tensions des deux secondaires.

Le calcul montre que les harmoniques de rangs $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés au primaire du transformateur. Les premiers harmoniques éliminés, qui sont également les plus importants en amplitude, sont pour $k = 1$, les harmoniques 5 et 7. Les premiers harmoniques présents sont alors le 11 et le 13.

Il est possible de généraliser cette propriété, en augmentant le nombre de redresseurs et le nombre de secondaires du transformateur ou le nombre de transformateurs en choisissant correctement les déphasages relatifs de chacun des secondaires.

Cette solution est largement employée dans le cas de redresseurs de très fortes puissances pour lesquels la répartition des courants dans les différents ponts est facilement réalisable. Elle est couramment utilisée par les redresseurs d'électrolyse (jusqu'à 72 phases).

Un cas particulier intéressant est obtenu avec les alimentations sans interruption placées en parallèle. Dans ce cas en effet, les onduleurs se répartissent les courants en sortie et les redresseurs qui les alimentent absorbent des courants identiques.

III.1.1.5 Pont dodécaphasé [3]

Le redresseur triphasé en pont ne laisse que les harmoniques $12k \pm 1$ au primaire du transformateur. Nous obtiendrons le même résultat en utilisant deux transformateurs ayant respectivement pour montage triangle-étoile et étoile-étoile. Cependant, cette solution augmente l'impédance de la ligne et par voie de conséquence la distorsion harmonique de tension. En plus, le nombre des semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse.

III.1.1.6 L'augmentation de la puissance de court-circuit [1]

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance. On a donc intérêt à connecter les sources polluantes à un point du réseau où l'impédance réseau est la plus faible possible en séparant magnétiquement les différentes charges.

III.1.1.7 Filtrages passifs [3]

Le filtrage passif se fait par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance devant l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer, le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique pour lequel le filtre a été dimensionné, sera dévié à travers ce dernier. Le facteur de qualité, le rapport de la résistance ou de la capacitance résonante par rapport à la résistance du filtre, que détermine la précision de l'accorde doit être assez élevé, supérieur à 50, toutefois la bande passante étant inversement proportionnel au facteur de qualité, de forte valeur de ce dernier peut être gênante dans le cas d'un filtre même légèrement désaccordé.

Des filtres passifs dit amortis peuvent aussi être aussi utilisés. Ils sont conçus de telle sorte à filtrer une plage de fréquence, ils sont généralement utilisés avec un faible facteur de résonance car pour ce genre de filtres, ce facteur de qualité est défini comme le rapport de la résistance sur la réactance.

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- Le filtre résonant (ou filtre de type shunt);
- Le filtre amorti.

III.1.1.7.1 Filtre résonant

Le filtre résonant (ou filtre shunt) est composé d'une inductance L en série avec un condensateur C .

Les valeurs d'inductance L et de capacité C sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer.

Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer (Fig. III.5)

Un filtre shunt efficace doit posséder un grand facteur de qualité Q . Celui-ci s'exprime par la relation suivante : $Q=Z/r$, avec $r \ll x$ soit $Q= x/r$ puisque $Z=\sqrt{x^2 + r^2}$

L'ordre de grandeur de ce facteur est de 75

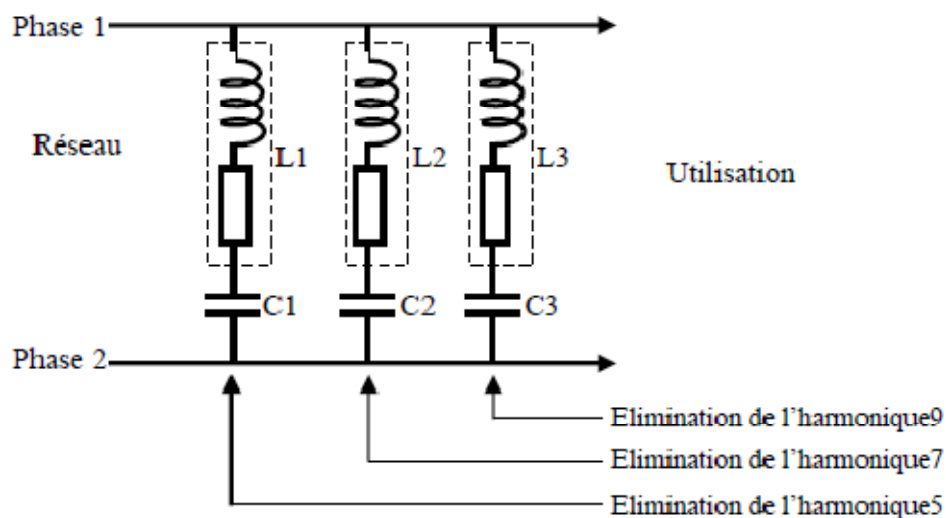


Fig.III.5 filtre résonant agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

III.1.7.2 Filtre amorti

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance (Fig.III.6).

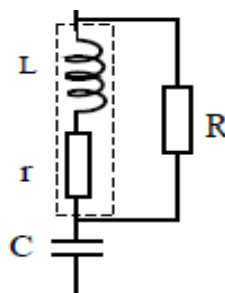


Fig.III.6 filtre amorti

Il est moins sélectif, atténuant les harmoniques supérieurs ou voisins de son rang d'accord. La figure (III.7) représente l'évolution de leur impédance en fonction de la fréquence.

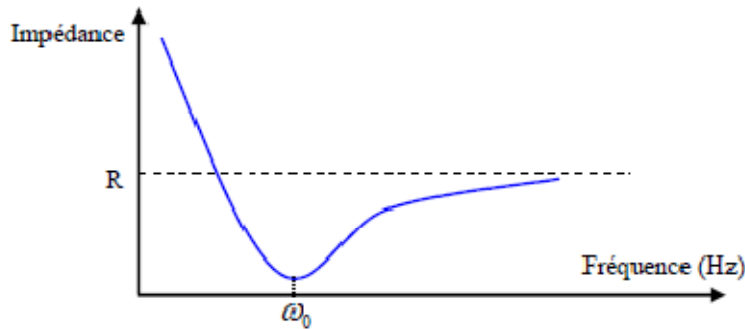


Fig.III.7 Evolution de l'impédance en fonction de f

Ce filtre assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquence que le filtre résonant mais sans éliminer concrètement ces perturbations. Il ne réalise donc pas la suppression de ces harmoniques, mais contribue à améliorer sensiblement le taux de distorsion harmonique global d'une installation polluée.

Pour des installations utilisant le filtrage harmonique, on peut concevoir de mettre en œuvre un filtre résonant pour les rangs 5 et 7, associé à un filtre amortie accordé pour h égale à 13. Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- Equipements volumineux,
- Problème de résonances avec l'impédance du réseau,
- Leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, mal connue et susceptible de varier.

- Leur incapacité de couvrir une large bande de fréquence, d'où l'utilisation de plusieurs filtres de rang d'accord différents.

III.1.2 dépollution des tensions perturbatrices [1]

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrés. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.

Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique.

Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

III.2 Solutions de dépollution modernes [1]

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées.

III.2.1 Dépollution des courants perturbateurs [1]

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de *filtres actifs parallèles* a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant.

III.2.2 Dépollution des tensions perturbatrices

D'autres solutions modernes pour la compensation des creux de tension se basent sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASI (Alimentation Sans Interruption). Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

Afin de réaliser une solution flexible universelle de dépollution de toutes les perturbations de tension des réseaux électriques, une famille de *filtres actifs séries* a été proposée

III.2.3 Solution de dépollution adoptée

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

III.3 Filtres actifs [1] [3]

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations des réseaux électriques. Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal.

Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs. Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique.

Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisés dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs -passifs.

III.3.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Fig. III.8, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du *filtre actif parallèle* (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

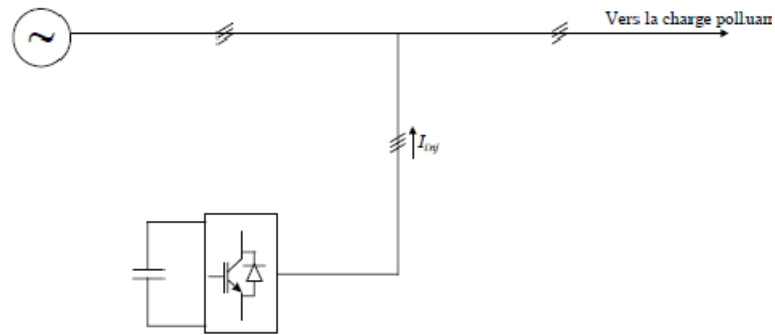


Fig.III.8 Filtre actif parallèle

III.3.2 Le filtre actif série (F.A.S)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Fig. III.9, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

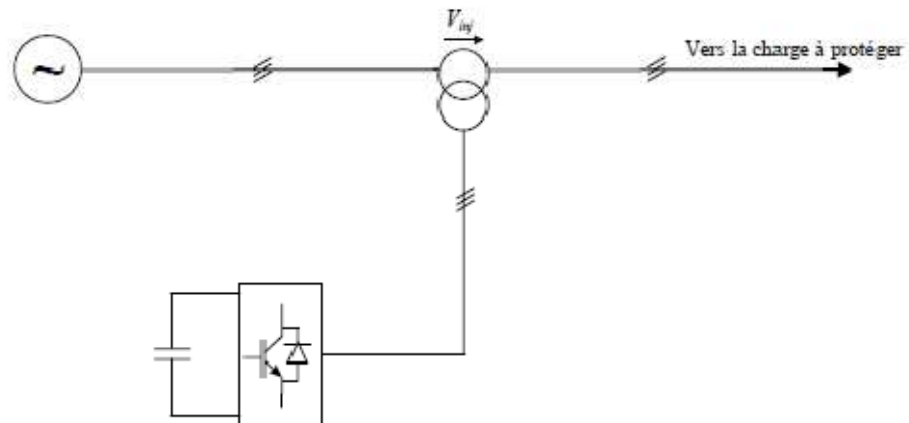


Fig.III.9 Filtre actif série

III.3.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La *combinaison parallèle-série actifs*, aussi appelée *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*, résulte de l'association des deux *filtres actifs parallèle* et *série*, comme le montre la Fig.III.10. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'*UPQC* assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

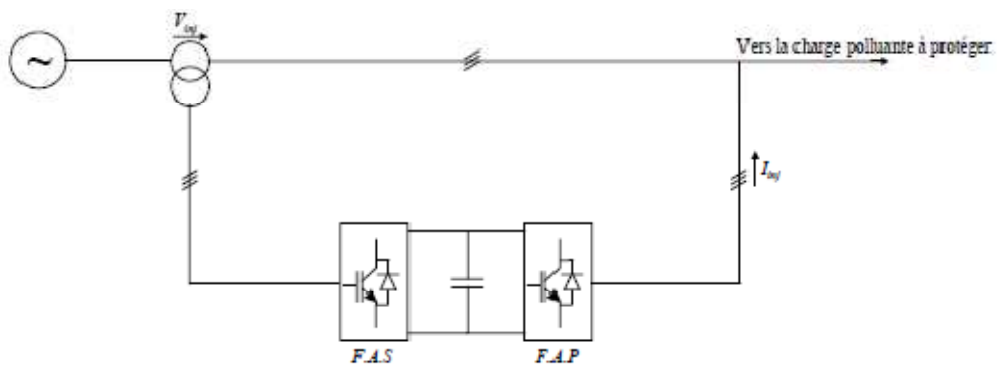


Fig.III.10 Combinaison parallèle-série actifs(UPQC)

III.3.4 Combinaison hybride active et passive

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

III.3.4.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du *filtre actif série* dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Fig. III.11.

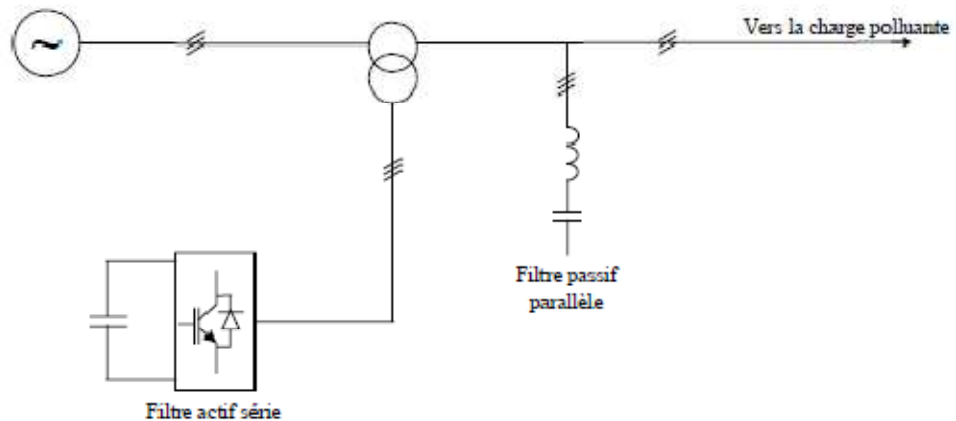


Fig.III.11 Filtre actif série et filtre passif parallèle

III.3.4.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Fig. III.12, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du *filtre actif série* car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le *filtre actif série* est à l'abri d'un éventuel court circuit de la charge.

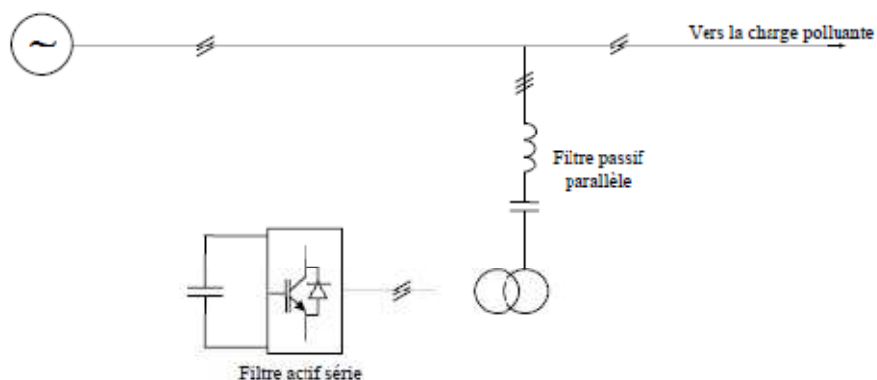


Fig.III.12 Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

III.3.4.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du *filtre actif parallèle* dans cette configuration, montrée en Fig. III.13, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante.

Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le *filtre actif parallèle*. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance.

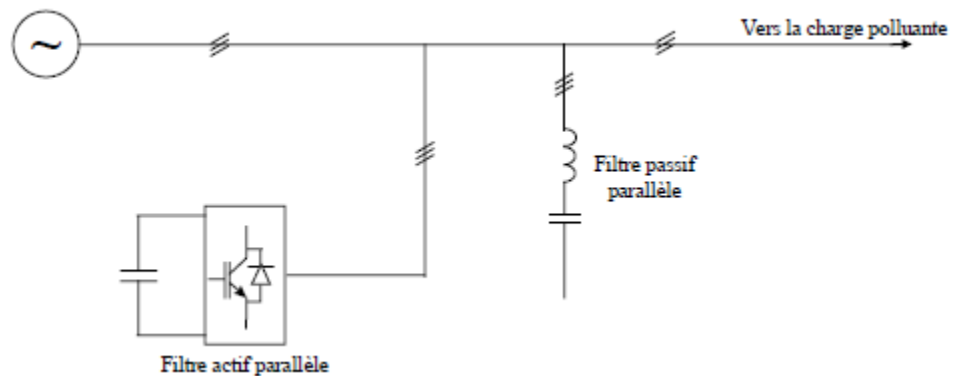


Fig.III.13 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs solutions de dépollution, traditionnelles et modernes. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance.

De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les *filtres actifs parallèles et séries*, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Le *filtre actif parallèle* peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

Le *filtre actif série* peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

La *combinaison parallèle-série actifs* est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

Les filtres hybrides étant conçus essentiellement pour dépolluer les réseaux électriques des courants harmoniques.

chapitre IV

PARTIE SIMULATION

Introduction

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires.

Les filtres harmoniques triphasés sont des éléments parallèles utilisés dans les systèmes de puissance pour diminuer la distorsion de la tension et pour élever le facteur de puissance.

Des composants non linéaires comme les convertisseurs d'électronique de puissance génèrent des courants harmoniques qui seront injectés dans le système de puissance ; ces courants en traversant l'impédance du système produisent des tensions harmoniques. Les filtres réduisent la déformation de l'onde de tension en détournant les courants harmoniques dans les chemins de faible impédance.

Les filtres harmoniques sont conçus pour être capacitifs à la fréquence fondamentale et ainsi, ils sont utilisés aussi pour la production de la puissance réactive requise par les convertisseurs et pour l'élévation du facteur de puissance.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un modèle de simulation, composé d'une source de tension, d'une ligne et d'un convertisseur (redresseur), le tout connecté à une charge.

Nous allons essayer de montrer d'une manière qualitative l'apport d'un filtre et d'un compensateur à un réseau électrique.

VI. 1 Filtres utilisés dans notre simulation

Afin d'obtenir une déformation acceptable des ondes de tension et de courant, plusieurs bancs de filtres de différents types sont usuellement connectés en parallèle. Les types les plus communément utilisés sont :

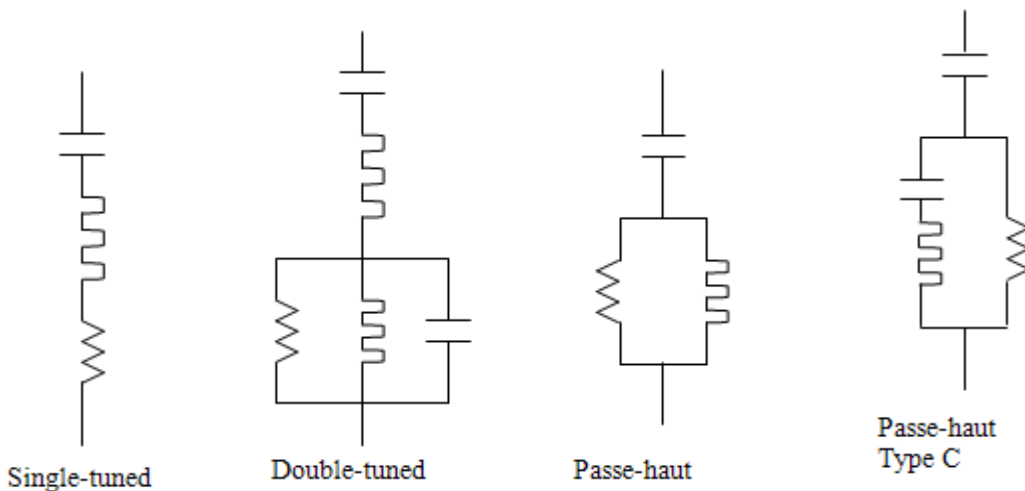
- Les filtres passe-bande qui sont utilisés pour filtrer les harmoniques de rangs faibles, 5^{ème}, 7^{ème}, 11^{ème}, 13^{ème} etc . Ces filtres peuvent être accordés à une seule fréquence (Single-tuned-filter) ou à deux fréquences (Double-tuned-filter).
 - Les filtres passe-haut qui sont utilisés pour filtrer les harmoniques de rangs élevés et couvrent un large éventail de fréquence.
-

Un type spécial de filtre passe-haut nommé de type C sont aussi utilisés pour fournir la puissance réactive et éviter les résonances parallèles. Ils filtrent également les harmoniques d'ordre bas (tel que le 3^{ème}) tout en maintenant les pertes nulles à la fréquence fondamentale.

Les filtres d'harmoniques triphasés passifs sont des circuits RLC. Les valeurs des résistances, des inductances et des capacités sont déterminées en fonction du type du filtre ainsi que des paramètres suivants :

- La puissance réactive à la fréquence fondamentale ;
- Les fréquences sur lesquelles les filtres sont accordés ;
- Le facteur de qualité déterminé par la valeur de la résistance ;

Les quatre types de filtres sont modélisés de la manière suivant-haut



Pour définir certains paramètres d'un filtre, choisissons le filtre le plus simple.

Single-tuned

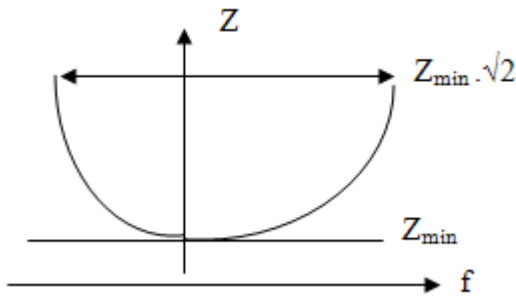
Ordre (rang) de l'harmonique : $n = \frac{fn}{f_1} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$

Facteur de qualité : $Q = \frac{nX_L}{R} = \frac{X_C}{nR}$

Largeur de la bande passante : $B = \frac{fn}{Q}$

Puissance réactive à la fréquence f_1 : $Q_C = \frac{V^2}{X_C} \frac{n^2}{(n^2 - 1)}$

Puissance active à la fréquence f_1 (pertes) : $P = Q_C = \frac{1}{Q} \frac{n}{(n^2 - 1)}$



Où f_1 : est la fréquence du fondamental ;

$\omega = 2. \pi f_1$ pulsation ;

f_n : fréquence de l'harmonique n ;

n : ordre de l'harmonique = f_n / f_1 ;

V : tension nominale entre phases ;

X_L : réactance de l'inductance à la fréquence fondamentale ; $X_L = L. \omega$

X_C : réactance de la capacité à la fréquence fondamentale ; $X_C = 1 / C. \omega$

Le filtre à double fréquences fonctionne comme deux filtres à fréquence unique mais avec certains avantages :

- Les pertes sont beaucoup plus faibles.
- L'amplitude de l'impédance à la fréquence de résonance parallèle est plus faible.

Le filtre à double fréquences consiste à mettre en série un circuit LC avec un circuit RLC branché en parallèle.

Si f_1 et f_2 sont les fréquences sur lesquelles le filtre doit être accordé, les deux circuits série et parallèle sont accordés approximativement à une fréquence moyenne $f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$

Le facteur de qualité Q pour un filtre double fréquence est défini comme le facteur de qualité d'un

circuit RL parallèle à la fréquence moyenne f_m : $Q = \frac{R}{L \cdot 2\pi \cdot f_m}$

Le filtre passe-haut est un filtre où les éléments R et L sont connectés en parallèle au lieu de série.

Le facteur de qualité pour le filtre passe-haut est le même que celui du circuit RL parallèle à la

fréquence à laquelle il est accordé. $Q = \frac{R}{L \cdot 2\pi \cdot f_n}$

Le filtre passe-haut de type C est une variation du filtre passe-haut où l'inductance L est remplacée par un circuit LC en série accordé à la fréquence fondamentale.

Le facteur de qualité du filtre de type C est aussi donné par le rapport : $Q = \frac{R}{L \cdot 2\pi \cdot f_n}$

VI.2 Description du modèle

La figure VI.1 représente l'ensemble de la structure du bloc à étudier, composé :

- D'une source de tension triphasée à trois fils.
- D'un double pont de redresseurs à tout thyristor (pont de Graetz) alimentant une charge (R-L), pour la représentation de la charge non linéaire génératrice des harmoniques.
- D'un transformateur triphasé connecté à l'entrée de la charge non linéaire.
- D'un bloc de commande pour générer l'angle α de la commutation des thyristors.
- D'une charge linéaire résistive (R_d) triphasée déséquilibrée.
- D'un ensemble de filtres triphasé (type passe haut, double raccordements) pour réduire les harmoniques : 3, 11, 13 et 24 respectivement.
- D'un compensateur de la puissance réactive

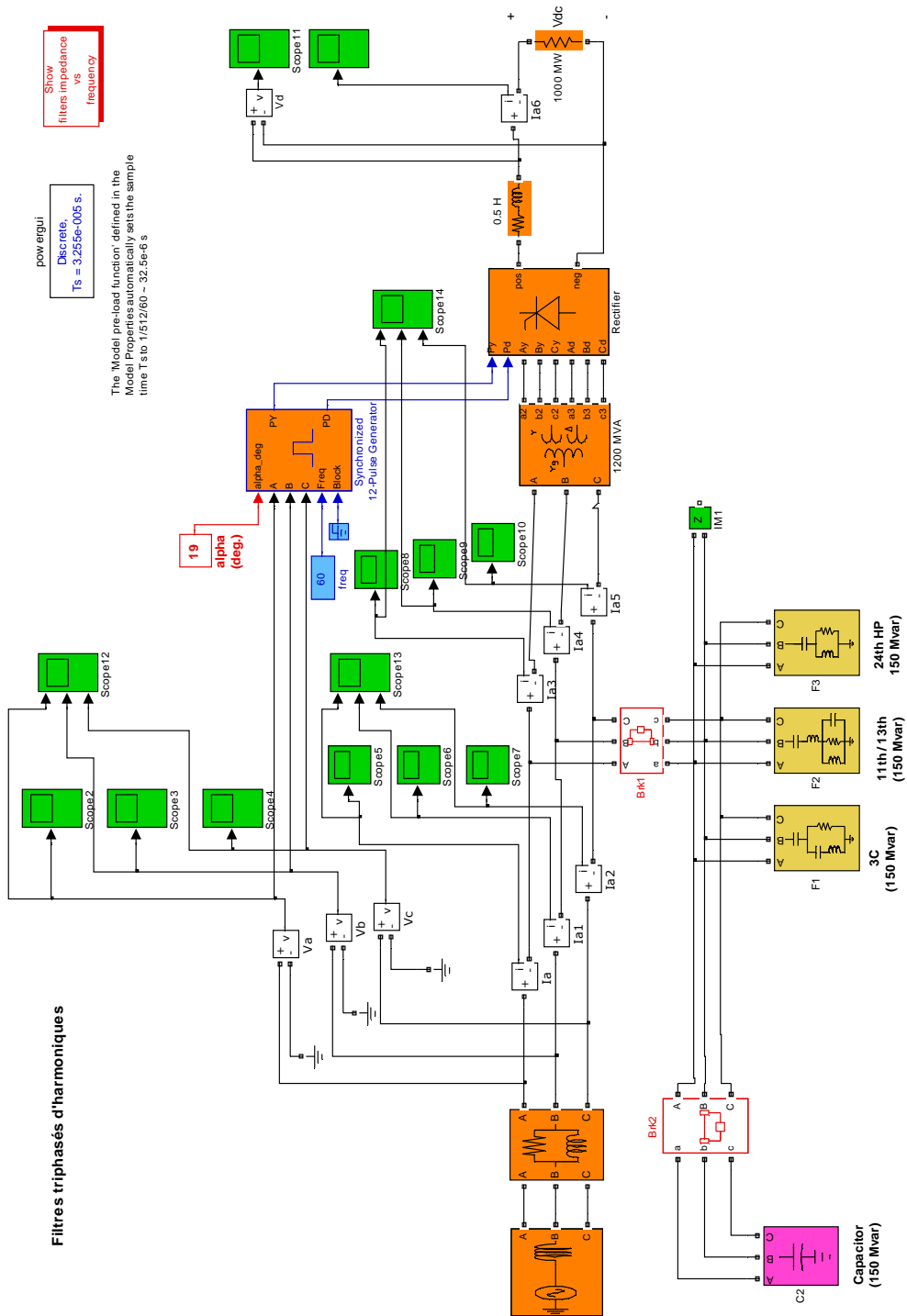


Fig. IV.1 Modèle de base

IV.3 Caractéristiques du modèle

blocs	caractéristiques	
Source	U=500kv	
	$L_s=98.03\text{mH}$	
	f=60hz	
Lignes	R=26.07ohms	
	L=48.86mH	
Transformateur	Enroulement 1	$V_1=500*0.9\text{ kv}$
		$R_1=0.0025\text{ pu}$
		$L_1=0\text{ pu}$
	Enroulement 2	$V_2=200\text{ kv}$
		$R_2=0.0025\text{ pu}$
		$L_2=0.24\text{ pu}$
	Enroulement 3	$V_2=200\text{ kv}$
		$R_2=0.0025\text{ pu}$
		$L_2=0.24\text{ pu}$
	$R_m=500\text{ pu}$	
$L_m=500\text{ pu}$		
Pont tout thyristors	$R_s=2000\text{ ohm}$	
	$L_s=0.1\mu\text{f}$	
Impédance de lissage	R=1 ohm	
	L=0.5 H	
Charge	R=250 ohms	
	P=1000 MW	
Filtres	Filtre 1	f=3*60 Hz
		Q=150 MVAR
		Facteur de qualité : 2
	Filtre 2	f= 11*60 ; 13*60 Hz
		Q=150 MVAR
		$V_n = 500\text{ kv}$
		Facteur de qualité : 20
	Filtre 3	f=24*60 Hz
		Q=150 MVAR
		Facteur de qualité : 7
Compensateur	$U_n=500\text{ kv}$	
	f=60 Hz	
	$Q_L=0$	
	$Q_c=-150\text{ mVAR}$	

VI.4. Résultats des simulations

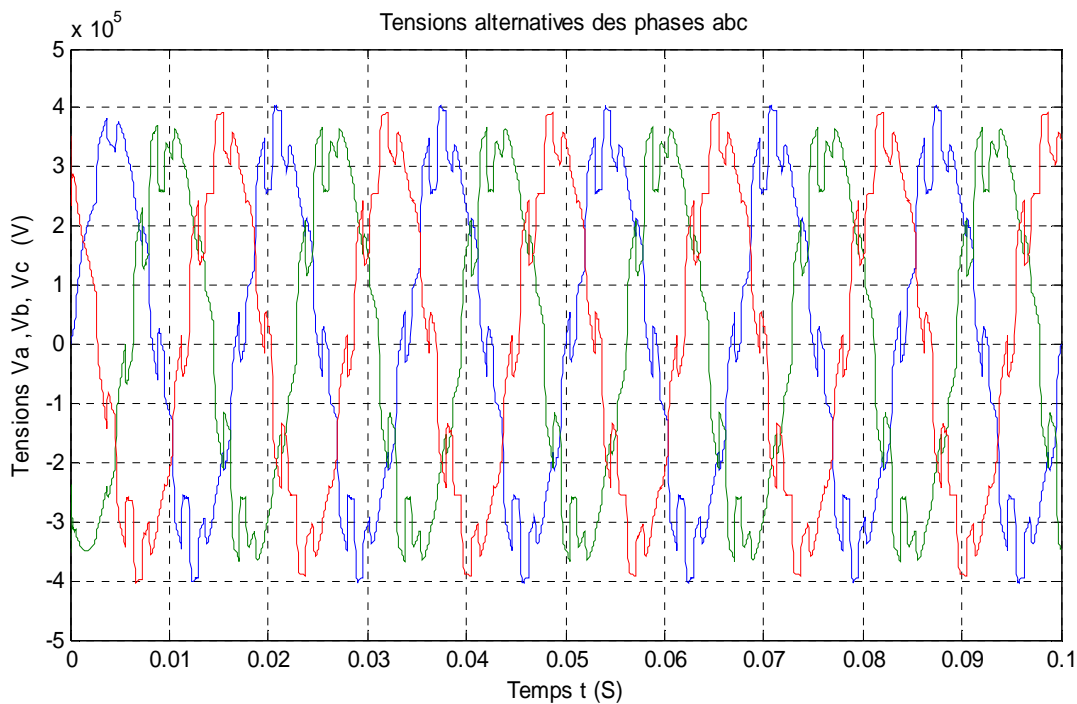
Le convertisseur est modélisé pour fonctionner en mode redresseur. Pour notre simulation on prend pour l'angle d'amorçage $\alpha = 19^\circ$. La simulation consiste à faire fonctionner le système sans filtrage, avec filtrage et enfin combiner avec et sans filtrage dans un même intervalle.

On visualise les tensions alternatives des phases, les courants alternatifs des phases et du convertisseur et la tension et le courant redressés.

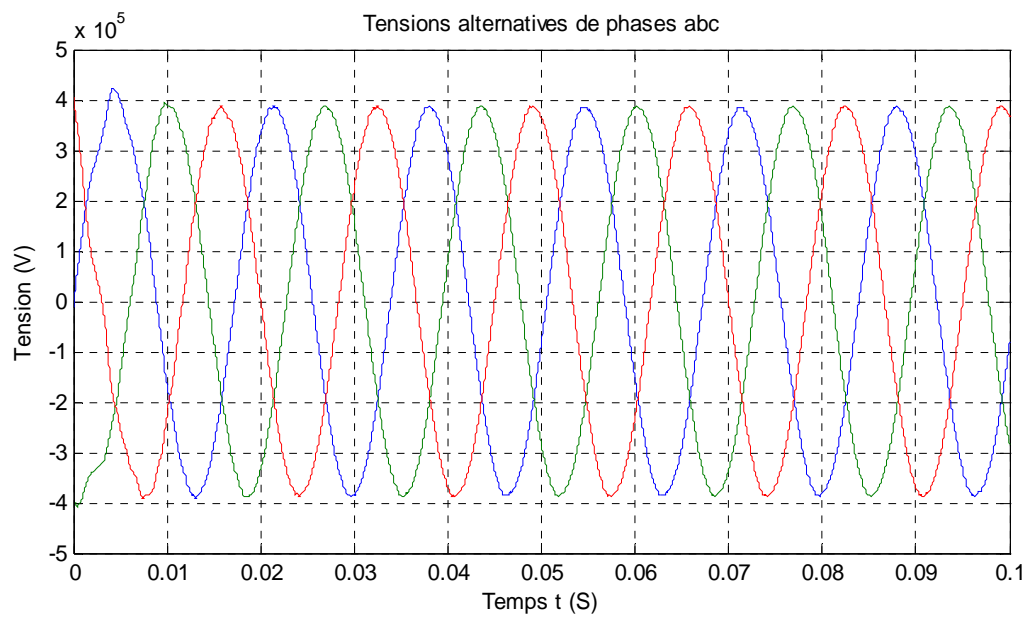
Pour pouvoir comparer, on montre pour chaque signal avec et sans filtrage.

VI.4.1 Tensions alternatives des phases

➤ Sans filtrage

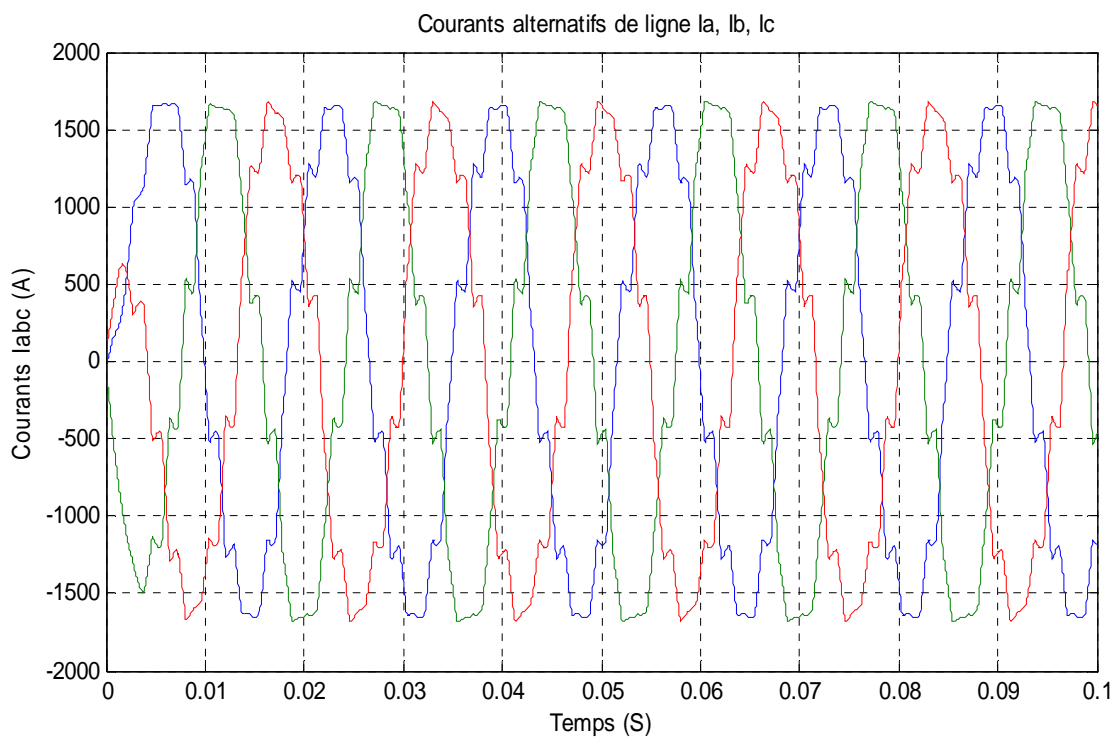


➤ Avec filtrage

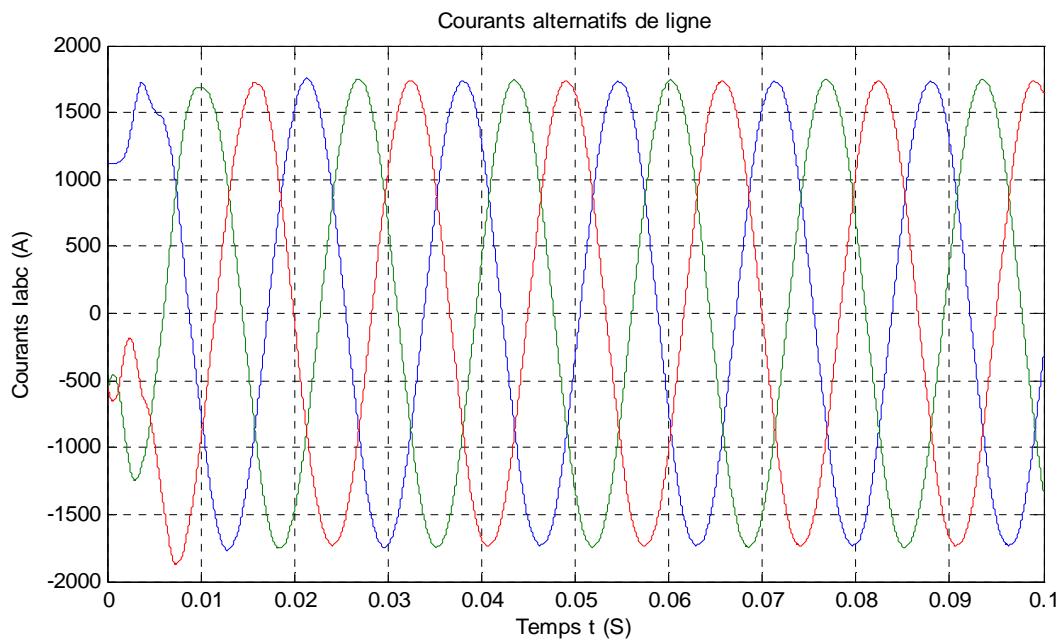


VI.4.2 Courants alternatifs de ligne

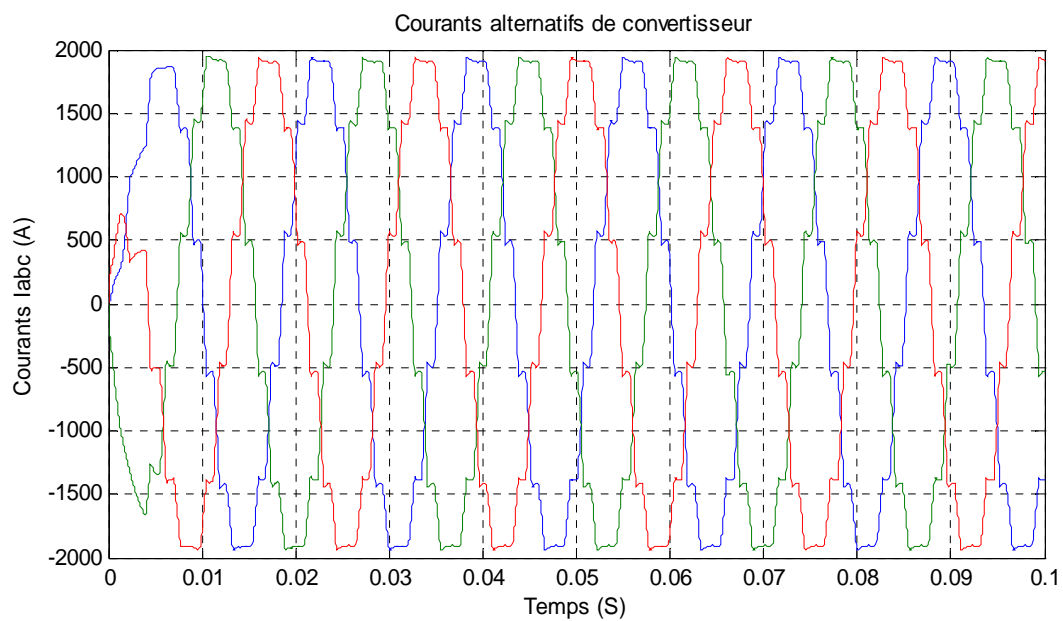
➤ Sans filtrage : Les courants de ligne et de convertisseur sont les mêmes



➤ Avec filtrage

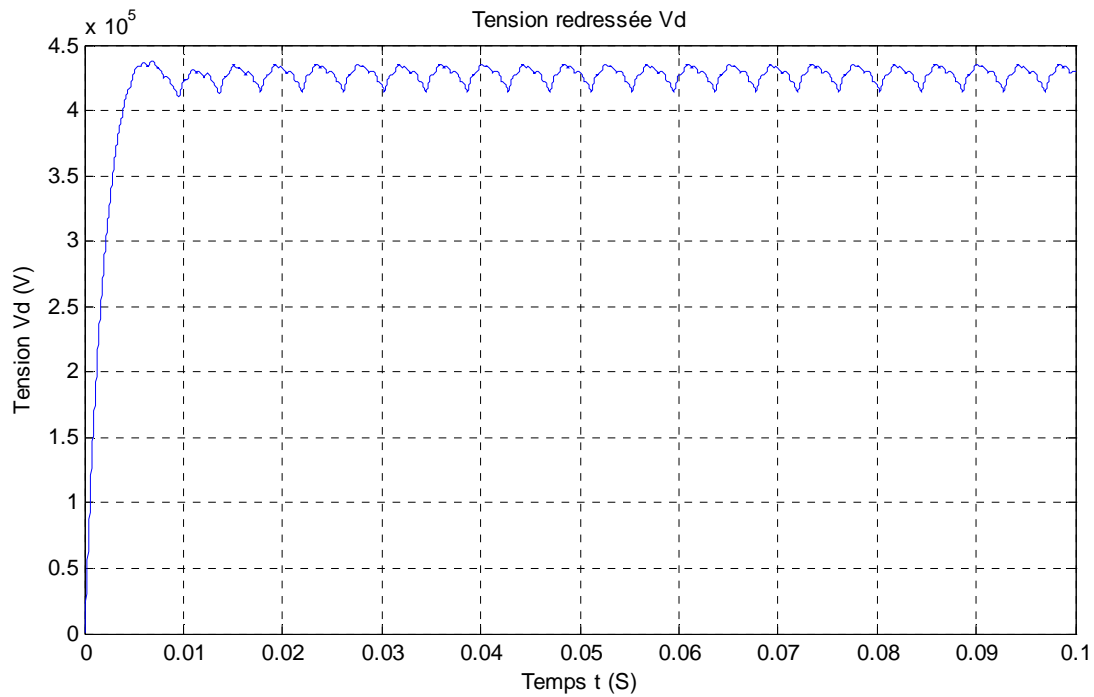


VI.4.3 Courants alternatifs du convertisseur

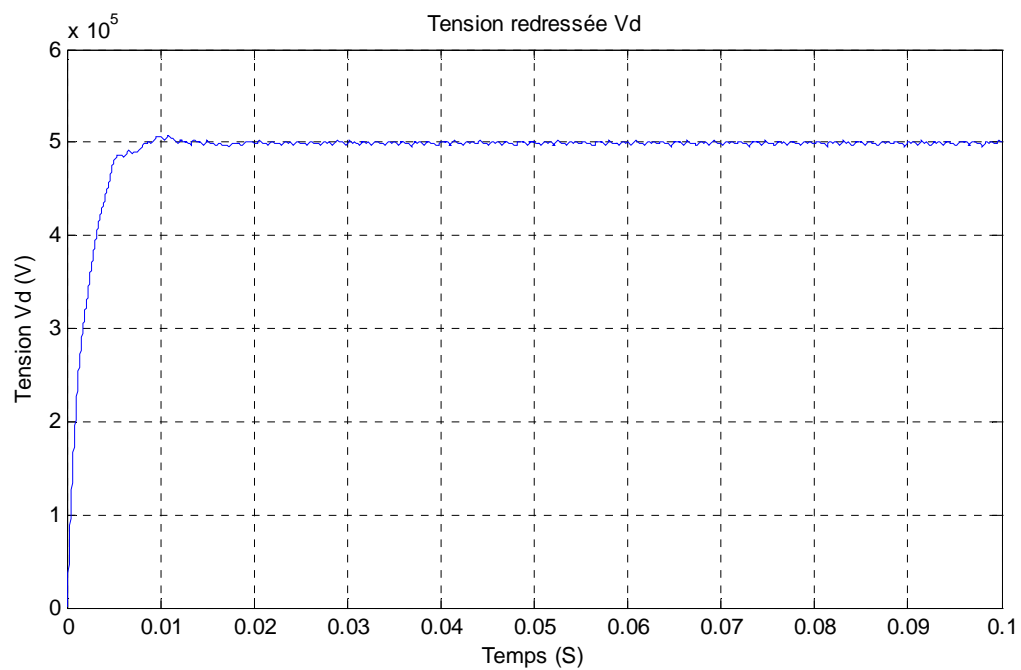


VI.4.4 Tension redressée V_d

➤ Sans filtrage

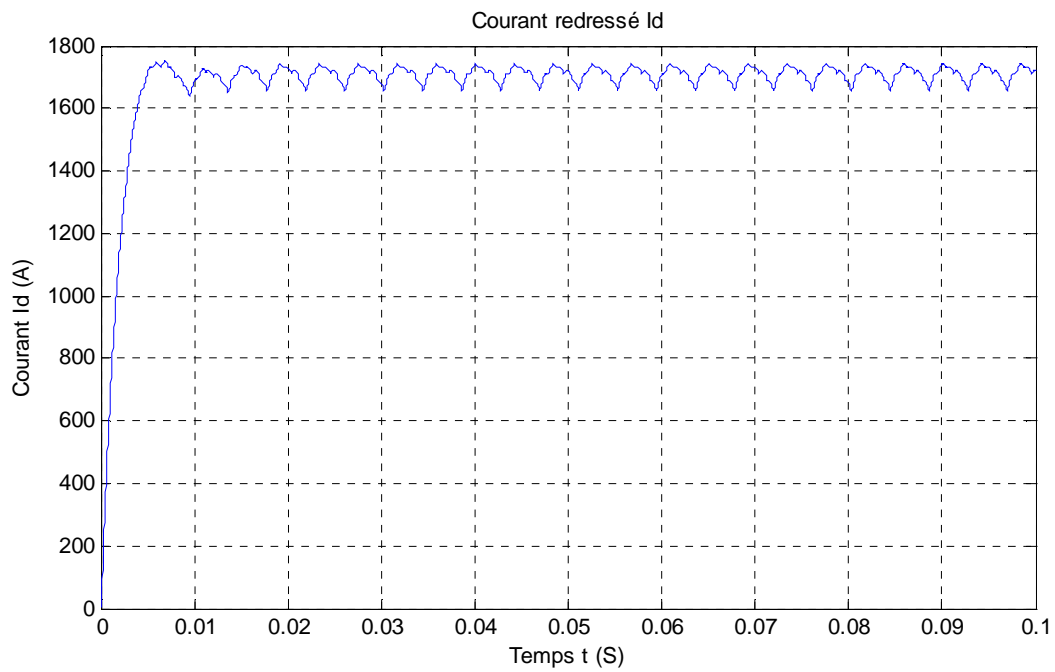


➤ Avec filtrage

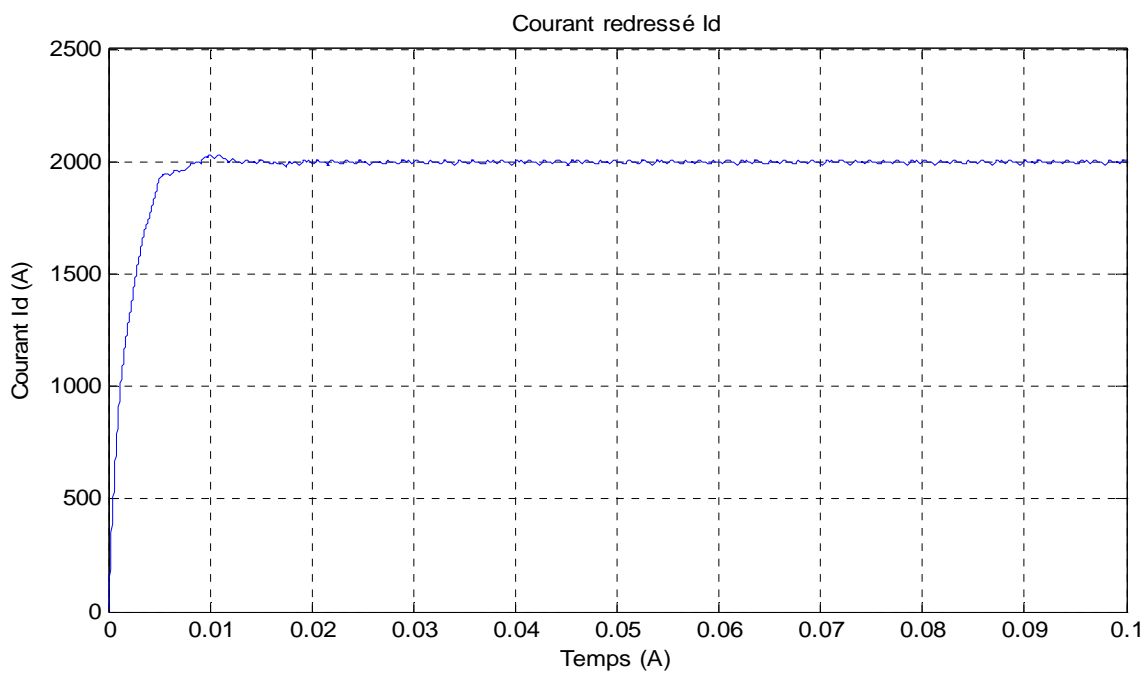


VI.4.5 Courant redressé I_d

➤ Sans filtrage

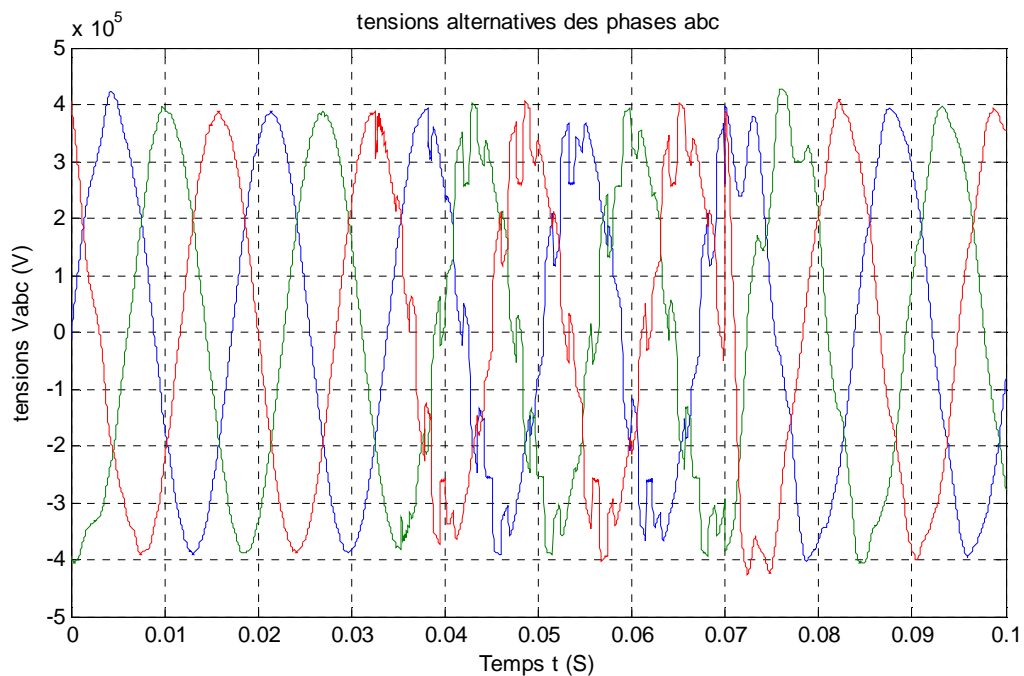


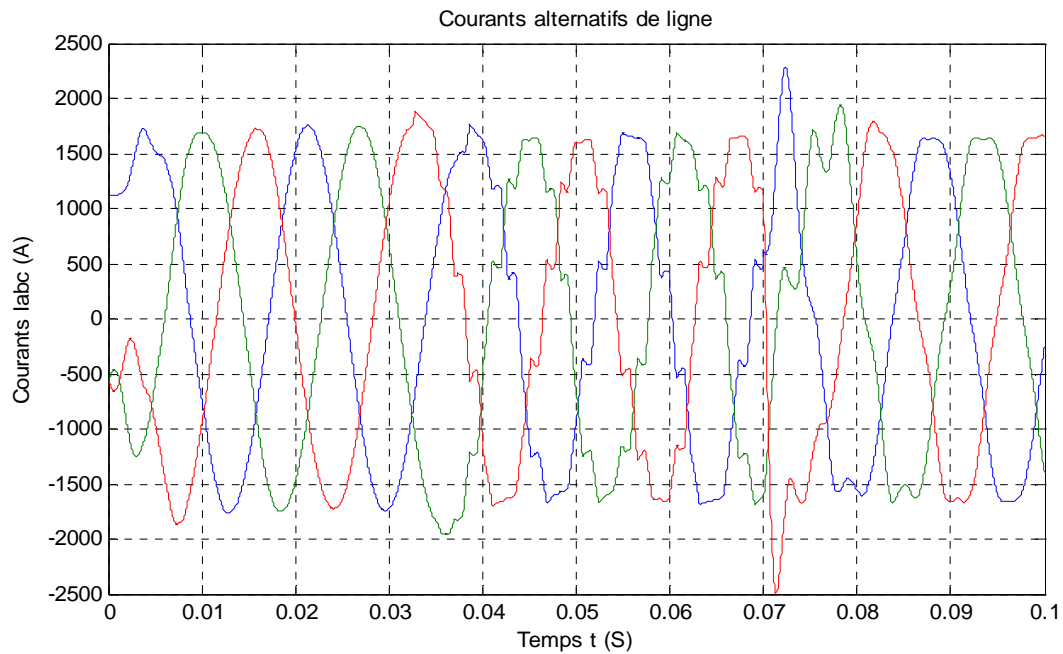
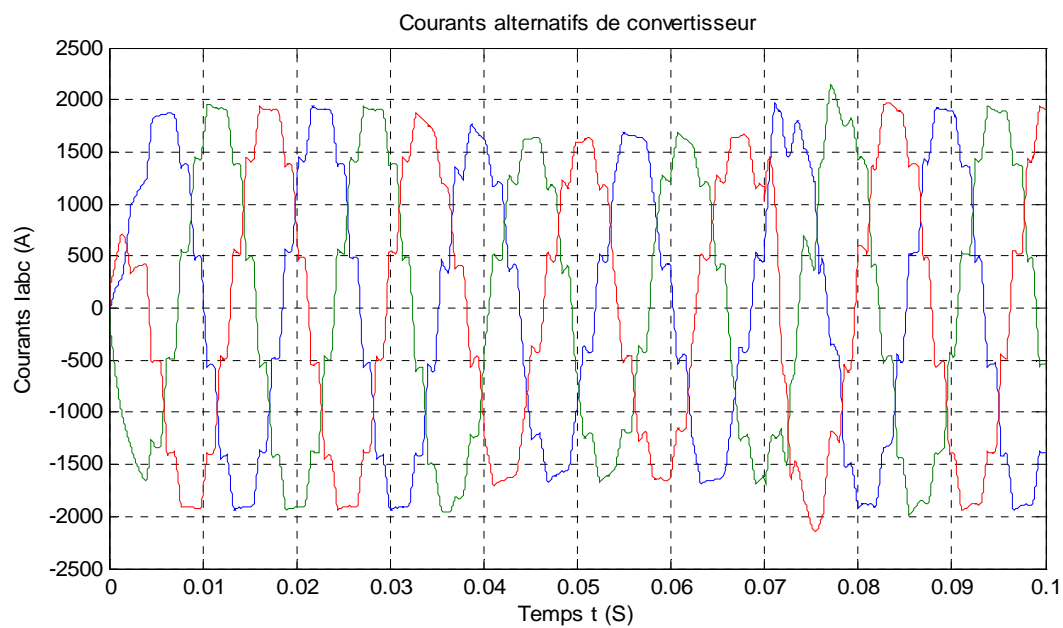
➤ Avec filtrage

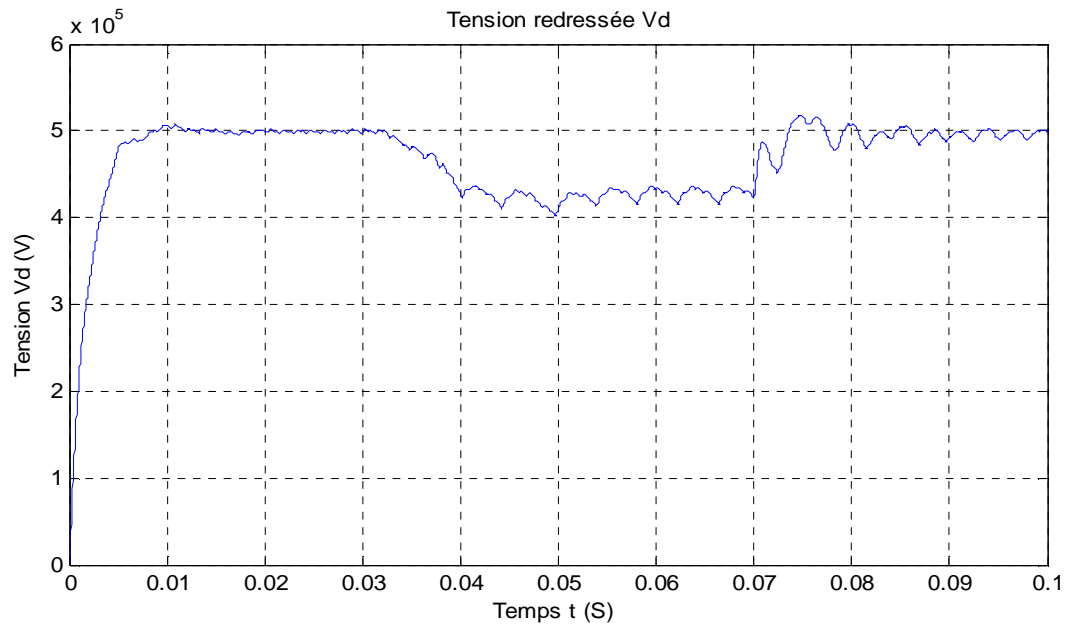
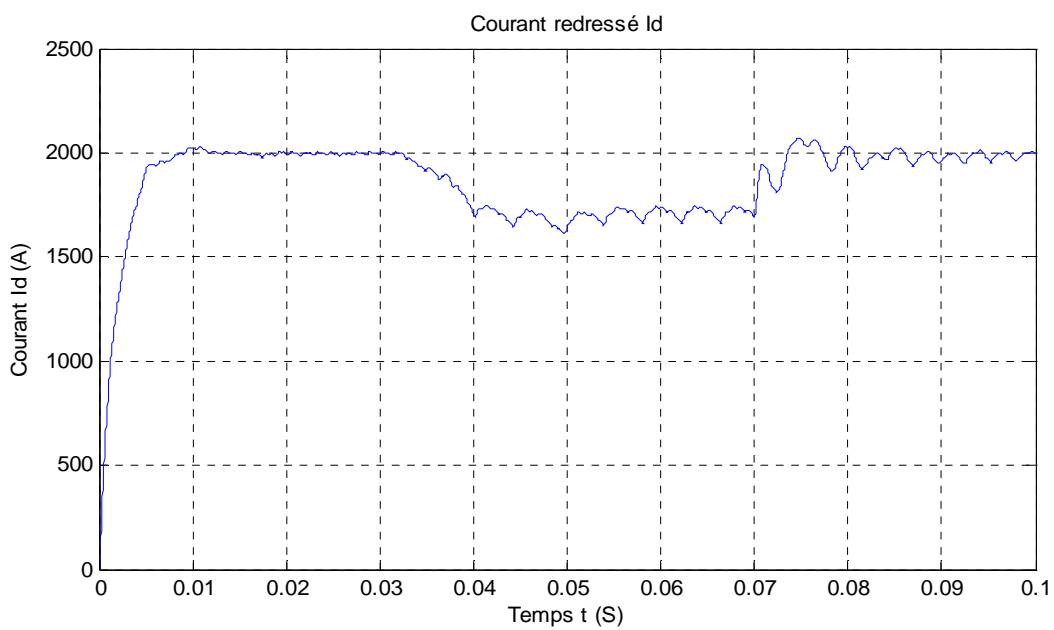


Afin de voir le rôle des filtres dans l'absorption des harmoniques et donc la stabilisation des tensions alternatives et continue ainsi que le courant continu, nous allons simuler le système en faisant intervenir les filtres pendant un intervalle de temps [0, 0.03s] puis on isole les filtres [0.03s, 0.07s], ensuite on les fait agir pendant [0.07s, 0.1s].

VI.4.6 Combinaison de la tension des phases avec et sans filtrage



VI.4.7 Combinaison des courants alternatifs de ligne avec et sans filtrage**VI.4.8 Combinaison des courants alternatifs du convertisseur avec et sans filtrage**

VI.4.9 Combinaison de la tension redressée avec et sans filtrage**VI.4.10 Combinaison du courant redressé avec et sans filtrage**

VI.5 Interprétation des résultats

La première simulation est lancée avec l'interrupteur ouvert, donc sans l'action des filtres. Les tensions alternatives des phases fortement perturbées par le convertisseur, leurs formes sont non sinusoïdales, mais alternatives, elles sont donc la combinaison d'un signal sinusoïdal fondamental et d'autres signaux sinusoïdaux nommés harmoniques. Cela est également visible dans les courbes des courants alternatifs des phases, du convertisseur ainsi que dans la forme de la tension et du courant redressés dont les ondulations sont importantes.

Le TDH dépasse en moyenne 13% pratiquement pour tous les signaux.

En fermant l'interrupteur, donc en lançant la simulation avec filtrage, on remarque que les harmoniques sont sensiblement atténués puisque les signaux des tensions et des courants alternatifs deviennent pratiquement sinusoïdaux.

La tension et le courant redressés deviennent continus et très fortement lissés.

Enfin, la 3^{ème} simulation est réalisée en combinant les deux premières, c'est-à-dire, en divisant l'intervalle [0 0.1] en trois intervalles.

[0 0.03] : Les filtres sont branchés ;

[0.03 0.07] : Les filtres sont branchés ;

[0.07 0.1] : Les filtres sont rebranchés ;

Sur les courbes on remarque aisément l'action du filtrage et les signaux qui reprennent leurs formes initiales du système filtré.

CONCLUSION

Les convertisseurs sont aujourd'hui les principales sources d'harmoniques dans les systèmes de puissance. Le filtrage devient donc indispensable pour tout fonctionnement normal de ces systèmes.

Dans cette simulation nous avons essayé de mettre en évidence le rôle des filtres passifs dans la réduction des tensions et des courants harmoniques, ainsi que l'alimentation du système de puissance, en puissance réactive exigée par le convertisseur. Les formes de la tension et du courant redressés sont pratiquement continus après filtrage, on dit qu'on a obtenu une meilleure stabilité pour le système.

Le modèle du système utilisé peut être exploité pour plusieurs types d'études, comme l'influence de l'angle d'amorçage du convertisseur dans la génération des harmoniques, l'utilisation des filtres actifs, la compensation statique de la puissance réactive ..., c'est pourquoi, nous souhaitons que ce travail soit complété par d'autres études à l'avenir.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude théorique de la stratégie de filtrage et de compensation des harmoniques de courants et de tensions dans les réseaux électriques.

Une étude générale a été présentée sur les perturbations ou distorsions harmoniques générées par des charges non linéaires connectées aux réseaux électriques.

L'augmentation régulière du nombre de dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes électriques ne fait qu'accentuer ces perturbations. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés.

Les classiques redresseurs à thyristors des ASI (alimentation sans interruptions) sont des sources de perturbations harmoniques et détériorent le facteur de puissance de l'installation. Ces pollutions sont acceptables tant que la puissance de l'ASI est faible devant la puissance de court-circuit du réseau.

Lorsque le taux de distorsion en tension dépasse les valeurs acceptables (de l'ordre de quelques %), il est nécessaire de prendre des mesures correctives.

En effet, des normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques.

Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage : filtres passifs, filtres actifs ou bien encore la combinaison des deux.

La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance.

Conclusion Générale

En ce qui concerne les solutions modernes, nous avons présenté les deux topologies utilisées, le filtre actif et le filtre hybride. Ces topologies ont pour but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux. En effet, grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Ces solutions modernes peuvent être installées pour compenser toutes les perturbations de courant telles que les harmoniques, les déséquilibres ainsi que pour compenser de la puissance réactive.

Nous y avons présenté une étude théorique de la compensation des harmoniques de courant et de tension circulants dans un réseau électrique à trois fils. Ces travaux ont été validés par simulation. L'ensemble des simulations a été effectué à l'aide des outils MATLAB/SIMULINK.

Nous pensons que les résultats de simulation obtenus étaient satisfaisants et ont montré l'efficacité du système proposé à savoir

Une baisse très sensible des taux de distorsion dans tous les cas de simulation. Le courant de la ligne après compensation est un courant équilibré sinusoïdal presque dépourvu des harmoniques.

Notre étude permettra d'ouvrir le passage pour nombreuses orientations de recherche dans le domaine du filtrage :

- Etude de la stratégie du filtrage actif.
- Compensation actifs des réseaux électriques.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[1]. **M.ALALI**. Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basses tension. Thèse doctorat, université Louis Pasteur, Strasbourg, 2002.

[2]. **F.Defay**. Commande prédictive direct d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif. Thèse doctorat de l'université de Toulouse, 2008.

[3]. **S.M.Tadjer**. Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque (GPV). Thèse magister en génie électrique, université de Boumerdes, 2008.

[4]. **Schneider Electric, n°152**, perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement, édition 1999.

[5]. **Schneider Electric, n°160**, harmoniques en amont des redresseurs des ASI, édition 1993.