

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté par

BELRECHID RAOUF

Pour l'obtention du diplôme Master en Electrotechnique option : Machines Electriques

Thème

**FILTRAGE DES HARMONIQUES ET
EQUILIBRAGE DE LA TENSION D'UN RESEAU EN
UTILISANT L'ENERGIE EOLIENNE**

Proposé par: Dr. BELAZZOUG Messaoud

Année Universitaire 2013-2014

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الحمد لله وحده والصلاة والسلام على من لا نبي بعده

Remerciements

Je remercie, avant tout, mon Dieu de m'avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.

Je remercie mon encadreur Mr : Dr. BELAZZOUG Messaoud, pour son aide, sa patience avec laquelle il a bien travaillé avec moi durant toute l'année.

J'adresse mes chaleureux remerciements aux membres du jury. Nous souhaitons également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant cette année d'étude.

Enfin, je remercie ma famille pour leur aide, compréhension, encouragement et soutien, le long du parcours de mon études, et à toutes mes amis.

DEDICACE

Je dédie mon Travail avant tous A mes Chères Parents, Mon cher PERE qui ne cesse pas de M'encourager, et qui Ma toujours soutenu.
A ma très chère MERE, le joyau de ma vie et qui est tout pour moi, pour Sa Tendresse profonde. « Que Dieux me les protègent ».

Je dédie ce travail également:

A mes grands parents, que je les souhaite une longue vie.
Plus profond , mon chère grand père "BABA HAMOU" en témoignage de leur amour et de leur sacrifices sans limites, je leur souhaite une bonne santé, que Dieu le garde pour nous .

A mes sœurs

A mes oncles et mes tantes

A toute ma famille "BELRECHID "et "BENAMAR"

A tout mes amis



NOTATIONS

Notations

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

g : Glissement

P_s : Puissance statorique

P_r : Puissance rotorique

P_m : Puissance mécanique

p : Nombre de paire de pole

E_r : Tension rotorique

E_s : Tension statorique

N_r : Nombre de spire rotorique

N_s : Nombre de spire statorique

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : Pulsation rotorique

ω_{mec} : Pulsation mécanique

θ_s : Angle électrique statorique

θ_r : Angle électrique rotorique

P : Opérateur de Laplace

v_s, v_r : Tension simple respectivement statorique et rotorique.

v_a, v_b, v_c : Tension composée respectivement des phases a, b et c.

v_{ds}, v_{qs} : Tensions statorique dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q.

v_{dr}, v_{qr} : Tensions rotoriques dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q.

i_s, i_r : Courants statorique et rotorique

i_{ds}, i_{qs} : Courants statorique dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q.

i_{dr}, i_{qr} : Courants rotoriques dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q.

R_s : Résistance de chaque enroulement du stator.

R_r : Résistance de chaque enroulement du rotor.

L_s : Inductance propre de chaque enroulement du stator.

L_r : Inductance propre de chaque enroulement du rotor.

M_s : Inductance mutuelle entre les enroulements du statorique.

M_r : Inductance mutuelle entre les enroulements du rotoriques.

M : Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique.

NOTATIONS

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant

f_r : Coefficient de frottement visqueux

J : Inertie de la machine

ϕ_s, ϕ_r : Flux statorique et rotorique respectivement

$\phi_{ds}, \phi_{qs}, \phi_{dr}, \phi_{qr}$: Respectivement flux statorique et flux rotorique sur les axes d et q

P_s : Puissance active statorique

Q_s : Puissance réactive statorique

k_p, k_i : Paramètres du régulateurs PI

C : Capacité du filtre intermédiaire

S_a, S_b, S_c : Etats des commutateurs de puissance

V_{dc} : Tension du bus continu

m : Indice de modulation.

r : Taux de modulation.

V_m : L'amplitude de la tension.

I_m : L'amplitude du courant.

ω : La fréquence angulaire.

φ : Déphasage entre le courant et la tension.

v_1, v_2, v_3 : Les tensions de réseau.

v_{n1}, v_{n2}, v_{n3} : Les tensions à l'entrée du convertisseur.

i_c : Courant de la charge.

I_d : Courant redressé.

Δi : Largeur de la bande d'hystérésis

f : Fréquence du réseau

f_c : Fréquence de coupure.

i_{fref} : Le courant de référence que doit générer le filtre actif

i_{ffr} : Le courant réactif

i_{href} : Le courant harmonique généré par la charge

α : Angle d'amorçage des thyristors.

V_{dc} : Tension redressée.

v_d, v_i, v_o : Tension respectivement direct, inverse et homopolaire.

a : Paramètre complexe tel que ($a = e^{j(\frac{2\pi}{3})}$)

ملخص:

هذا العمل يهدف إلى إيجاد وسيلة ناجعة لإزالة الاضطرابات الناجمة عن تواجد شحنة مستهلكة لتيار كهربائي غير جيبي مما يؤدي إلى ظهور تموجات وكذلك إعادة توازن التوتر الكهربائي. وذلك عن طريق استخدام طاقة الهواء. لهذا الغرض نقوم باستخدام الماكنة اللاتزامنية الثنائية الإستقطاب نقوم بتوفير التيار الازم لإزالة التموجات و كذا توفير المركبة العكسية لتيار لإعادة التوازن وهذا باستخدام نظام التحكم الشعاعي للألية و بالتالي نضمن استمرار التوازن من جهة منبع التوتر الثلاثي لجيبي

الكلمات المفتاحية : إعادة توازن التوتر الكهربائي, الماكنة اللاتزامنية الثنائية الإستقطاب, إزالة التموجات, نظام التحكم

الشعاعي

Résumé

Ce travail consiste, en l'utilisation de l'énergie éolienne pour faire simultanément dépollué un réseau électrique des harmoniques causé par la présence d'une charge non linéaire, et l'équilibrage de la tension d'un réseau qui alimente une charge non symétrique. On produit à l'aide de l'éolienne un couple qui va faire tourné la machine asynchrone a double alimentation, cette dernière va généré à travers une cascade (redresseur-onduleur), les composantes de courant que nous devons injecté pour compensé le taux de perturbation en amant des charges polluantes et équilibré la tension en injectant la composante inverse introduite par la charge déséquilibré.

Mots clés: MADA, éolienne, commande de puissance, cascade deux niveaux, filtrage d'harmoniques, équilibrage d'un réseau.

Abstract:

This work is about the use of wind power generator for harmonics filtering and unbalanced three phase's voltage regulation, the harmonics are caused by the presence of a non linear load in an electrical installation, while unbalances of voltage are enjoyed by the three phase's unbalanced loads. We produce using the wind turbine a torque which drives the doubly fed induction, this last one will generate through a power electronic system formed with the association of an inverter and a rectifier, the necessary current to eliminate both of harmonic perturbation and three voltage unbalances.

Key words: wind power generator, harmonics filtering, voltage calibration, doubly fed induction generator.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Modélisation de la machine Asynchrone à rotor bobiné.	
I.1 Introduction	3
I.2 Modèle linéaire de la Machine Asynchrone	3
I.2.1 Hypothèses simplificatrices.....	3
I.2.2 Equations générales de la machine Asynchrone.....	4
I.2.3 Equations des flux.....	4
I.2.4 mise en équations matricielle	5
I.2.5 Utilisation de la transformation de Park	6
I.2.5.1 application de la transformation de Park sur les tensions et les courants.....	9
I.2.5.2 application de la transformation de Park sur les flux.....	11
I.2.6 Expression de couple	11
I.2.7 Représentation sous forme d'équations d'état.....	11
I.3 simulation du modèle linéaire de la machine Asynchrone avec rotor en court-circuit	13
I.5 Conclusion	14
Chapitre II : commande de la machine asynchrone double alimentation.	
Introduction.....	16
III.1 méthode d'orientation du flux.....	16
III .1.1 Commande vectorielle de la MADA.....	16
III.1.1.1 Modèle de la machine dans le repère Park	17
III.1.1.2 Relations entre les courants statorique et rotorique.....	18
III .1.2 Expressions des puissance active et réactive dans le repère synchrone .	18
III .1.2.1 Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques.....	19
III .1.2.2 Etude du régulateur PI	20
III .1.2.2.1 Commande directe	22
III .1.2.2.2 Commande indirecte.....	22
III.2 Résultats des simulations	23
III.2 conclusion.....	25

Chapitre V : filtrage des harmoniques

V.1 Introduction.....	27
V.2 Solution adopté pour dépolluer le réseau	27
V .2.1 Schéma de fonctionnement du système	27
V .2.2 Simulation du réseau alimentant une charge polluante	28
V.3 Résultats de la simulation	29
V.3 Détermination des références harmoniques	30
V.3 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées	34
V.3 Identification avec compensation de l'énergie réactive.....	36
V.3.1 simulation de la méthode de filtrage adopté.....	38
V.3.2 Résultats de la simulation après filtrage.....	40
V.4 Conclusion	42

Chapitre VI : équilibrage de la tension

VI.1 Introduction.....	44
VI.2 Système triphasé équilibre	44
VI .2.1 réseau triphasé symétrique	45
VI .2.2 Réseau triphasé non symétrique	47
VI.3 Définition des composantes symétriques.....	48
VI.3.1 Système triphasé déséquilibre étudié.....	49
VI.3.2 Résultats des simulations.....	49
VI.4 Solution adopté pour le rééquilibrage	51
VI.4.1 Résultats après équilibrage	53
VI.4.2 Système triphasé déséquilibre avec intégration de l'effet de la charge non linéaire	53
VI.3.2 Résultats des simulations	54
VI.4.2 Solution adopté.....	56
VI.4.2 schéma du principe de fonctionnement du modèle simulé.....	56
VI.4.2 résultats des simulations.....	57

VI.5 Conclusion.....	58
Conclusion générale	60
Annexe 01	
Annexe 02	
Annexe 03	

Introduction générale

L'énergie électrique est souvent produite et transportée sous forme de tensions triphasées sinusoïdale équilibrée, pour alimenter différents types de charges et équipements électriques, ces derniers sont parfois des sources de perturbations, provenant de la nature du courant qu'ils absorbent, souvent une charge qui consomme un courant non sinusoïdale crée des harmoniques qui vont être rejetés en amont et en présence de l'impédance de la source elles peuvent créer des perturbations de tension. Une charge non symétrique crée un déséquilibre en courant.

Le développement croissant de l'électronique de puissance et l'augmentation des puissances mises en jeu ainsi que la souplesse de l'utilisation des semi-conducteurs, a encouragé les électrotechniciens à entreprendre d'importantes associations de convertisseurs statiques de puissance à des machines électriques.

Ces dispositifs sont généralement des charges non linéaires, qui absorbent un courant non sinusoïdal et se comportent comme des générateurs d'harmoniques. De plus, elles consomment parfois de l'énergie réactive. Ce phénomène touche aussi l'ensemble des autres secteurs (informatique, éclairage public, téléviseurs, appareils électroménagers...). Par conséquent, la forme d'onde du courant de la source perd sa forme sinusoïdale et on obtient également une dégradation du facteur de puissance.

Par ce fait, les distributeurs d'énergie électrique se voient donc obligés d'imposer des normes et de se protéger contre ces perturbations. Actuellement, les progrès remarquables réalisés dans le domaine des dispositifs électroniques de puissance, ont permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables appelés compensateurs actifs d'harmoniques, ou encore filtres actifs. Ces filtres actifs ont pour principal objectif de compenser les courants harmoniques injectés dans le réseau.

Nous allons étudier l'impact de ces défauts introduits précédemment en utilisant des simulations à l'aide du logiciel Matlab, à travers lesquelles on va voir l'influence de ces perturbations sur la forme de l'onde électrique et le facteur de puissance.

Dans le cadre de ce travail, on présente une solution à base d'énergie éolienne. En effet, l'énergie éolienne est une énergie renouvelable, géographiquement diffuse, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif, d'où l'importance d'utilisation de cette énergie.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent.

En associant l'éolienne avec la MADA, on obtient un système capable de fournir des services intéressants au réseau, tels que, l'amélioration de la qualité de l'énergie par le filtrage des harmoniques de courant et la fourniture de puissance réactive pour la correction du facteur de puissance. Et son insertion dans les réseaux sera plus simple. Avec ce système, l'énergie éolienne ne sera plus considérée comme une simple source aléatoire et délicate à gérer mais plus comme une aide à la gestion du réseau avec des services assurés et une puissance fournie constante.

De manière à atteindre cet objectif, notre mémoire sera divisé en quatre chapitres : Le premier chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné, et nous terminons le chapitre par la simulation du modèle avec rotor en court-circuit.

Dans le second chapitre, on présentera la modélisation de la MADA en vue d'une alimentation par convertisseurs statiques. La mise en équation permettra de simuler son modèle, ceci a pour objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement.

Le troisième chapitre abordera l'aspect qualitatif de l'énergie en proposant une structure, afin d'éliminer les harmoniques de courant et ainsi limiter leur propagation dans le réseau. On expliquera le principe du fonctionnement de cette structure. Ainsi, quelques méthodes d'identification des courants harmoniques seront présentées. Et enfin, on appliquera le filtrage aux différentes charges non linéaires avec et sans compensation du courant réactif.

Le quatrième chapitre sera consacré au rééquilibrage de la tension d'un réseau en utilisant la MADA pour généré la composante inverse du courant, ainsi le réseau nous nous fournira que la composante directe, et donc on maintien l'équilibre du réseau. Dans ce chapitre nous présentant le cas ou on a juste le déséquilibre et le cas ou on a à la fois le déséquilibre et la perturbation harmonique.

Nous terminerons ce présent travail par une conclusion général.

Chapitre I :

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A ROTOR BOBINE

I.1 Introduction

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique [1]. C'est ce qu'on appelle modélisation; Il est donc évident que cette étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes performants.

Après la description et la modélisation de la machine dans un référentiel lié aux phases statorique, une transformation dite de Park est utilisée; cette transformation rapporte les équations statorique et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature) [2, 3].

I.2. modélisation de la Machine Asynchrone

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulement identiques, leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à $(2\pi/3)$.

I.2.1.Hypothèses Simplificatrices:

La modélisation mathématique de la Machine Asynchrone est basée sur un certain nombre d'hypothèses qui rend le modèle plus simple mais moins précis [2, 5]. On suppose :

- ✓ La machine est de construction symétrique, à entrefer lisse.
- ✓ Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- ✓ Le bobinage est réparti de manière à donner une Fmm sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.
- ✓ On néglige les pertes fer, l'hystérésis et le courant Foucault.
- ✓ Influence de la température sur les résistances est négligés.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants, les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements et le flux est additif.

I.2.2.Equations générales de la Machine Asynchrone.

La machine possède 6 enroulements (3 au stator et 3 au rotor) couples magnétiquement (Fig. I.1).

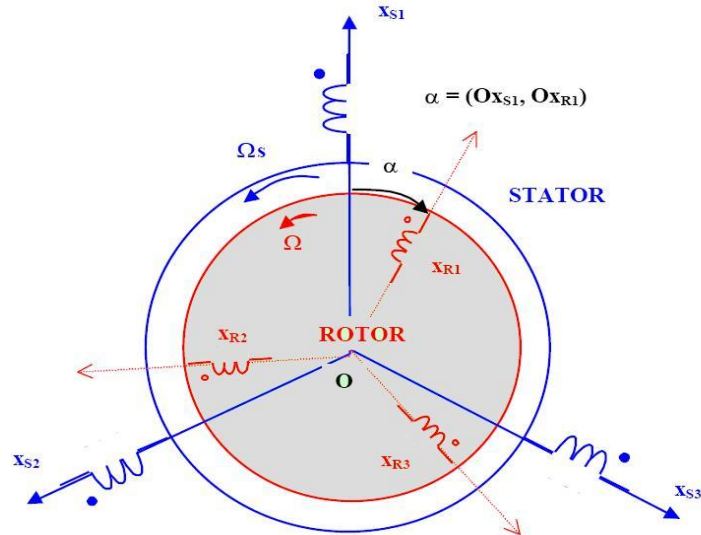


Fig. I.1 Représentation schématique de la machine asynchrone triphasée

Pour chacun d'eux on peut écrire une équation :

$$V = RI + \frac{d\phi}{dt} \tag{I.1}$$

Où ϕ représente le flux total à travers l'enroulement.

Pour l'ensemble des enroulements statorique et rotoriques, on écrira en notation matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{s1} \\ \phi_{s2} \\ \phi_{s3} \end{bmatrix} \tag{I.2}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{r1} \\ \phi_{r2} \\ \phi_{r3} \end{bmatrix} \tag{I.3}$$

I.2.3. Equations des flux:

On désigne par :

L_s : Le coefficient d'inductance propre d'un enroulement statorique

M_s : Le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statorique.

M_1, M_2 et M_3 : Les coefficients d'inductance mutuelle avec les 3 bobinages rotoriques. Compte tenu du schéma ci-dessus, on écrira :

$$\begin{cases} M_1 = M \cos(\alpha) \\ M_2 = M \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) = M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M_3 = M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) = M \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (I.4)$$

où M représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les bobinages en question sont en regard l'un de l'autre.

L'expression du flux total à travers le bobinage statorique 1 sera la suivante :

$$\Phi_{s1} = L_{s1}i_{s1} + M_s(i_{s2} + i_{s3}) + M_1i_{r1} + M_2i_{r2} + M_3i_{r3} \quad (I.5)$$

L'écriture matricielle ci-dessous résume les 3 équations de flux statorique :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \\ \Phi_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M \cos(\alpha) & M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\alpha) & M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

De façon similaire, on aura au rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{r1} \\ \Phi_{r2} \\ \Phi_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M \cos(\alpha) & M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & M \cos(\alpha) & M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & M \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

I.2.4.Mise en équation matricielle:

En reprenant les résultats du paragraphe précédent(I.4) et (I.5) (équations des flux), il vient avec des notations évidentes :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \\ 0 = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \end{cases} \quad (I.8)$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

On constate que ce sont des matrices diagonales.

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\phi_r] = [L_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (I.10)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M \cos(\alpha) & M \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & M \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ M \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\alpha) & M \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) \\ M \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & M \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

La matrice L_s est symétrique et l'on a une notation analogue pour L_r . La matrice M_{rs} est la transposée de M_{sr} .

I.2.5. Utilisation de la transformation de PARK:

I.2.5.1. Application de la transformation de Park sur les tensions et les courants

Pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), on va faire un changement de repère de PARK aussi bien au stator qu'au rotor, θ_s désignera l'angle pour le stator et θ_r celui pour le rotor.

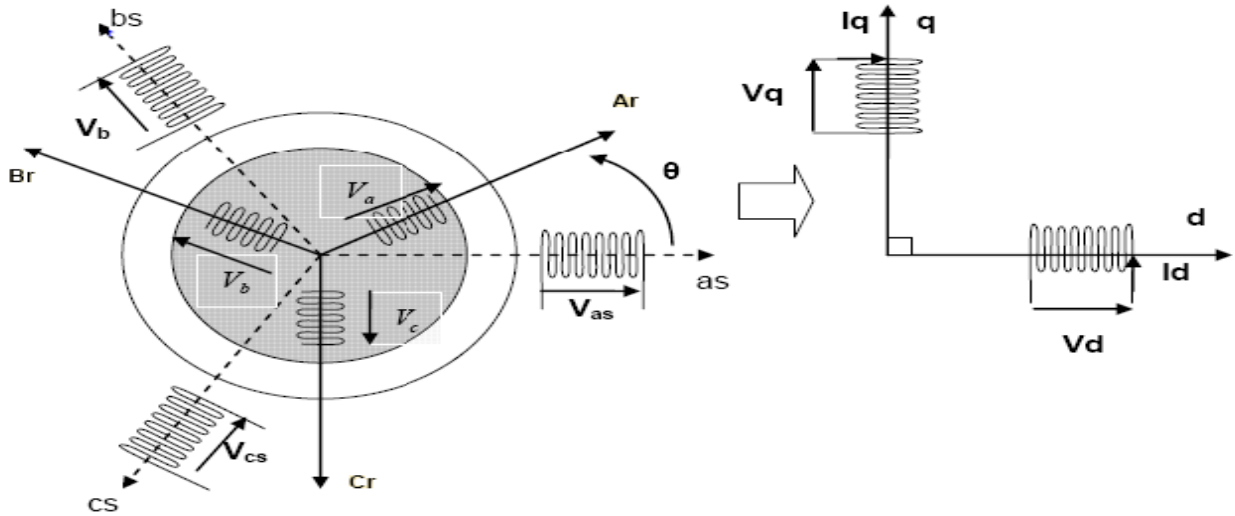


Fig. I.2 Transformation de système triphasé à un système biphasé.

Loi des mailles:

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (I.12)$$

A l'aide de la formule de changement de base il vient :

$$[P_1(\theta_s)][V_{sr}] = [R_s][P_1(\theta_s)][i_{sr}] + \frac{d}{dt} [P_1(\theta_s)][\phi_{sr}] \quad (I.13)$$

Avec:

$$[P_1(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

En multipliant à gauche par $[P_1(\theta_s)]^{-1}$:

$$[V_{sr}] = [R_s][i_{sr}] + [P_1(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} ([P_1(\theta_s)][\phi_{sr}]) \quad (I.14)$$

$$[V_{sr}] = [R_s][i_{sr}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sr}] + [P_1(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt} [P_1(\theta_s)] \right) [\phi_{sr}] \quad (I.15)$$

C'est le dernier terme de la somme qui pose problème. On a:

$$\frac{d}{dt} [P_1(\theta_s)] \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\theta_s}{ds} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_s) & -\cos(\theta_s) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

$$\frac{d}{dt} [P_1(\theta_s)] \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \omega_s \begin{bmatrix} -\sin(\theta_s) \phi_{sd} & -\cos(\theta_s) \phi_{sq} \\ -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \phi_{sd} & -\cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \phi_{sq} \\ -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \phi_{sd} & -\cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \phi_{sq} \end{bmatrix} \quad (I.17)$$

Avec : $\omega_s = \frac{d\theta_s}{ds}$

Il est alors facile de montrer en effectuant la multiplication des matrices que :

$$[P_1(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt} [P_1(\theta_s)] \right) [\phi_{sr}] = \omega_s \begin{bmatrix} -\phi_{sq} \\ \phi_{sd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (I.18)$$

D'où le résultat final :

$$[V_{sr}] = [R_s][i_{sr}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sr}] + \omega_s \begin{bmatrix} -\phi_{sq} \\ \phi_{sd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (I.19)$$

En développant les composantes de PARK pour le stator.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{s0} = R_s i_{s0} + \frac{d}{dt} \phi_{s0} \end{cases} \quad (I.20)$$

On notera le couplage de V_{sd} avec ϕ_{sq} et V_{sq} avec ϕ_{sd} [27].

On aura les mêmes équations au niveau du rotor en changeant partout l'indice « S » en « R » et en annulant les tensions puisque le rotor est en court-circuit.

V_{s0} Est considéré nul puisque le rotor est couplé en triangle et le neutre n'est plus accessible [5].

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \\ V_{r0} = R_r i_{r0} + \frac{d}{dt} \phi_{r0} \end{cases} \quad (I.21)$$

Avec : $\omega_r = \frac{d\alpha}{dt}$

Le même pour V_{r0} qui est considéré nul.

I.2.5.2. Application de la transformation de Park sur les Flux

$$[\phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (I.22)$$

$$[P_1(\theta_s)][\phi_{sp}] = [L_s][P_1(\theta_s)][i_{sp}] + [M_{sr}][P_1(\theta_s)][i_{rp}] \quad (I.23)$$

$$[\phi_{sp}] = [P_1(\theta_s)]^{-1}[L_s][P_1(\theta_s)][i_{sp}] + [P_1(\theta_s)]^{-1}[M_{sr}][P_1(\theta_r)][i_{rp}] \quad (I.24)$$

On remarquera ici l'angle θ_s pour le stator et l'angle θ_r pour le rotor

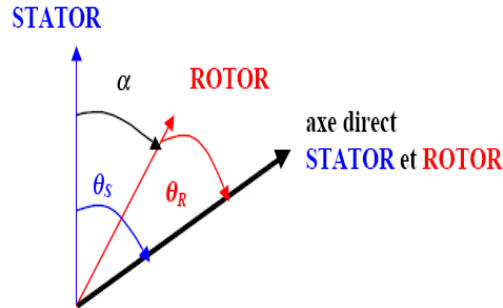
La matrice $[P_1(\theta_s)]^{-1}[L_s][P_1(\theta_s)]$ ne pose pas de problème, compte tenu de la formule de changement de base pour les matrices :

Soit :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M_s \end{bmatrix} \quad (I.25)$$

$[P_1(\theta_s)]^{-1}[M_{sr}][P_1(\theta_r)]$ Est moins simple à obtenir à cause des deux angles θ_s pour le stator et l'angle θ_r pour le rotor qui interviennent.

En faisant coïncider les axes directs rotor et stator, le calcul se simplifie.



On a alors : $\theta_s = \theta_r + \alpha$

Fig. I.3 Coïncidassions des axes directs de rotor et de stator

$$[M_{sr}][P_1(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} M \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 0 \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \quad (I.26)$$

$$[P_1(\theta_s)]^{-1}[M_{sr}][P_1(\theta_r)] = \frac{3}{2} M \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (I.27)$$

Où l'on constate que l'on a ici aussi une matrice diagonale, ce qui justifie l'intérêt de la transformée de PARK. En reprenant les notations $L_s = L_s - M_s$ et $M_c = \frac{3}{2} M$, et en développant chaque ligne, on obtient les composantes de PARK du flux statorique :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_c i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_c i_{rq} \\ \phi_{s0} = (L_s - 2M_s) i_{s0} \end{cases} \quad (I.28)$$

Avec : $\phi_{s0}=0$;

On notera cette fois, l'absence de couplage entre les axes d et q de la transformation [30].

Au rotor, on aura les mêmes équations en substituant l'indice « S » à l'indice « R ».

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_c i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_c i_{sq} \\ \Phi_{r0} = (L_r - 2M_r) i_{r0} \end{cases} \quad (I.29)$$

Avec : $\Phi_{r0}=0$;

I.2.6. Expression du couple.

Puisque la transformation de PARK orthonormée conserve la puissance instantanée.

$$P_E = [V_s]^t [i_s] = V_{s1} i_{s1} + V_{s2} i_{s2} + V_{s3} i_{s3} = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \quad (I.30)$$

En tenant compte du fait que le terme homopolaire sera nul.

Faisons intervenir les lois des mailles

$$P_E = \left(R_s + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \right) i_{sd} + \left(R_s + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \right) i_{sq} \quad (I.31)$$

$$P_E = (R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2) + \left(\frac{d}{dt} \Phi_{sd} i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} i_{sq} \right) + \omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (I.32)$$

Le premier terme entre accolades est facilement identifiable aux pertes joules. Le second terme correspond à de la puissance électromagnétique stockée dans le champ. Reste donc le 3ème terme: ce terme ne peut donc représenter que la puissance électrique transformée en puissance mécanique puisque notre modélisation néglige les pertes fer.

Cette puissance peut se mettre sous la forme :

$$P_{mec} = C_{em} \Omega_s = \omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (I.33)$$

I.2.7. Représentation sous forme d'équation d'état

Reprenons les équations de système (I.20) et (I.21) avec $V_{rd} = 0, V_{rq} = 0$ (rotor en CC)

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \omega_r \Phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (I.34)$$

Soit $(i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq})$ le vecteur d'état choisit:

En remplaçant ((I.28)) et ((I.29)) dans ((I.34)), on obtient:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sd} + M_c i_{rd}) - \omega_s (L_s i_{sq} + M_c i_{rq}) \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sq} + M_c i_{rq}) + \omega_s (L_s i_{sd} + M_c i_{rd}) \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} (L_r i_{rd} + M_c i_{sd}) - \omega_r (L_r i_{rq} + M_c i_{sq}) \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} (L_r i_{rq} + M_c i_{sq}) + \omega_r (L_r i_{rd} + M_c i_{sd}) \end{cases} \quad (I.35)$$

Et on obtient les équations d'états suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \phi_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + v_{ds} \\ \frac{d\phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \phi_{qs} - \omega_s \cdot \phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + v_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot p \omega \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \beta \cdot p \omega \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{qr} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \left[\frac{pM}{JL_r} (\phi_{qs} \cdot i_{dr} - \phi_{ds} \cdot i_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \Omega_r \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right) \\ \gamma_r = - \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2} \right) \end{cases} \quad \beta = \frac{M}{\sigma_r L_s}$$

on rappellent que :

II.3.Simulation et interprétation des résultats :

Afin de simuler la machine, on a fait appel au logiciel SIMULIK. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe.

Le stator de la machine étant alimenté à partir du réseau avec le rotor en court circuit ; c'est-à-dire que la machine fonctionne en moteur.

✚ Régime à vide:

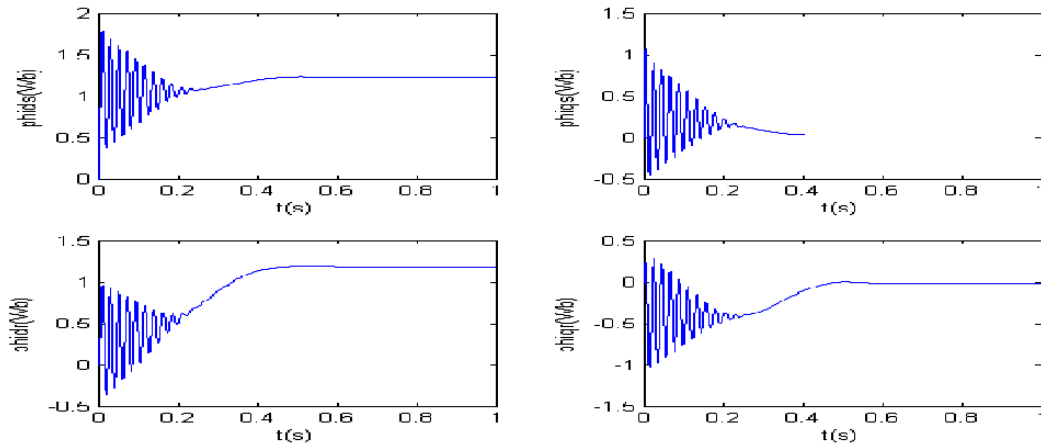


Figure I.4.Flux statoriques et rotoriques en marche à vide.

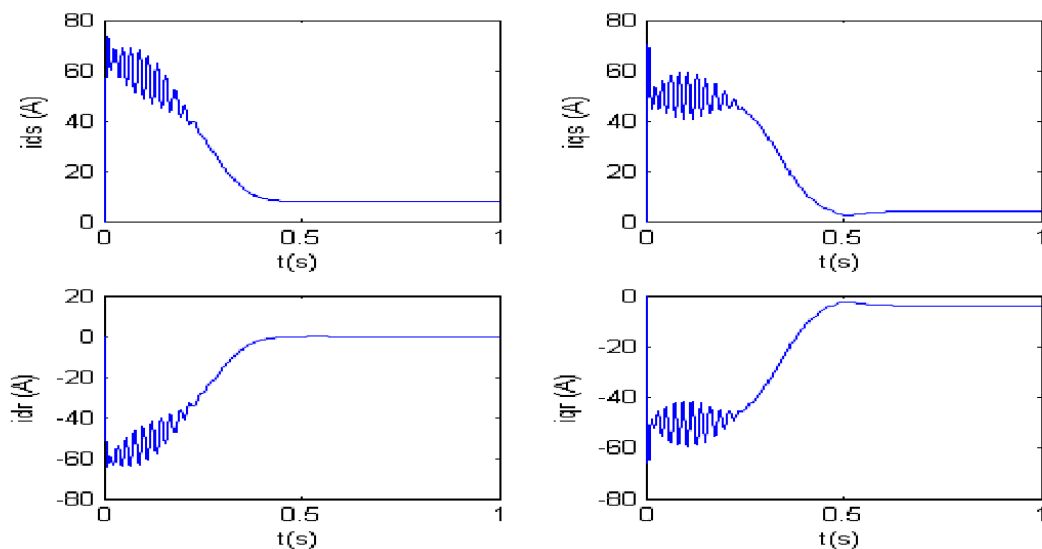


Figure I.5.Courants statoriques et rotoriques à vide

Pendant la phase de démarrage, les courants statoriques sont fortement oscillatoires ; leurs valeurs dépassent (65A.) De telles valeurs peuvent causer la destruction de la machine par sur échauffement en cas de démarrages répétés. En régime permanent, ces courants tendent vers des valeurs proches de (8A). Les courants rotoriques, eux, prennent des valeurs négatives d'amplitude égale à (60A), puis tendent vers zéro à t=0.5s.

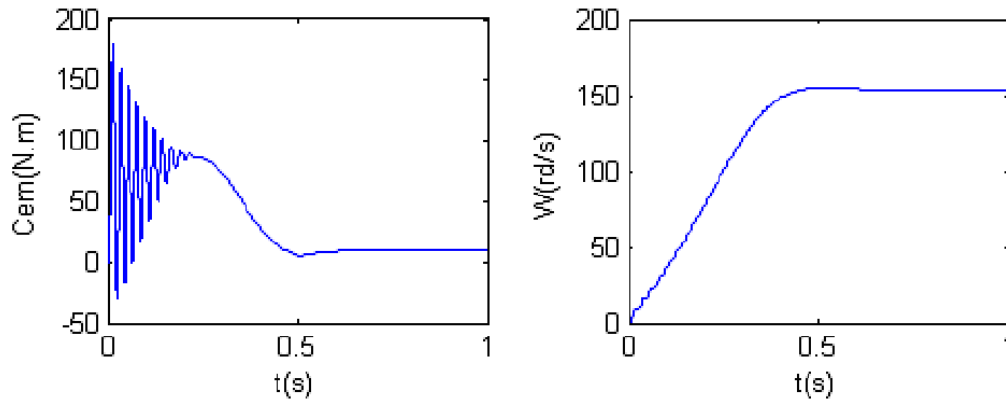


Figure I.6. Couple et vitesse de rotation à vide

La courbe représentant les variations du couple électromagnétique montre que pendant la phase de démarrage, l'amplitude du couple atteint une valeur voisine de (150N.m), puis se stabilise à sa valeur nominale (26N.m). La vitesse de rotation, W , passe de zéro à (157rad/s) au bout d'un temps $t=0.4$ s, ensuite, elle reste constante.

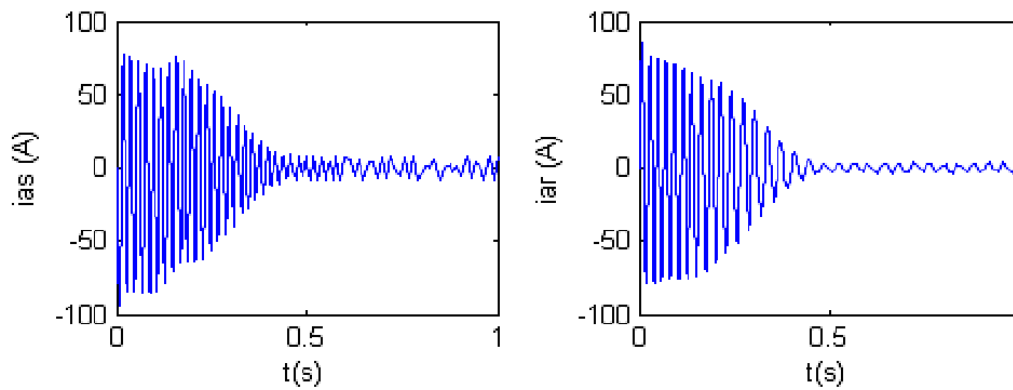


Figure I.7. Courants statorique et rotorique

On remarque que ces courants atteignent des amplitudes importantes durant le régime transitoire, puis se stabilisent autour d'une valeur proche de zéro.

I.4.Conclusion :

Dans ce chapitre, on a rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère naturel (a, b, c).Ce modèle est non linéaire et fortement couplé.Pour contourner cette difficulté, on a fait appel à la transformation de Park Le modèle dynamique de la machine écrit dans le repère de Park puis traduit sous forme d'équations d'état, a été simulé. Les résultats de simulation sont satisfaisants. On remarque également que le modèle de la machine met évidence le couplage indésirable existant entre les axes d et q. L'élimination de ce couplage passe par la commande vectorielle à flux orienté ; cela sera étudié dans le chapitre II.

L'alimentation de la machine sera assurée par un onduleur triphasé à deux niveaux qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II:

COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Introduction

la commande vectorielle par orientation de flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

II.1.méthode d'orientation du flux

La commande par flux orienté est une technique associée au système d'entraînement formé par une machine asynchrone chargée et alimentée par un convertisseur statique. La commande de la machine asynchrone nécessite une connaissance de la position exacte du flux a orientée a tout instant et la coïncider avec l'axe direct tournant a la vitesse du champ tournant [6].

Il existe deux approche pour la détermination de la phase du flux :

II.1.1. La méthode directe

consiste a déterminer la position et le module de flux .a cet effet deux procédé sont utilisés , a savoir la mesure de flux dans l'entrefer dans la machine a l'aide de capteurs et l'estimation de flux a l'aide de modèles mathématiques.

II.1.1. La méthode indirecte

la phase du flux est estimée a partir d'une relation donnant la vitesse du glissement .

II.2.Commande vectorielle de la MADA :

Il existe trois choix possibles pour l'orientation du flux selon l'axe direct d du repère tournant

1. Orientation de flux rotoriques :

$$\phi_{dr} = \phi_r \text{ et } \phi_{qr} = 0 \quad (\text{II. 1})$$

2. orientation de flux statorique :

$$\phi_{ds} = \phi_s \text{ et } \phi_{qs} = 0 \quad (\text{II. 2})$$

3. orientation de flux d'entrefer :

$$\phi_{dm} = \phi_m \text{ et } \phi_{qm} = 0 \quad (\text{II. 3})$$

II.3. Modèle de la machine dans le repère Park

Le modèle mathématique de la MADA se traduit dans le repère de Park, lié au champ tournant, par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} [v_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d(\phi_{ds})}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ [v_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d(\phi_{qs})}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (II.4)$$

$$\begin{cases} [v_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d(\phi_{dr})}{dt} - (\omega_s - \omega)\phi_{qr} \\ [v_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d(\phi_{qr})}{dt} + (\omega_s - \omega)\phi_{dr} \end{cases} \quad (II.5)$$

En orientant le flux statorique suivant l'axe direct ($\phi_{qs} = 0$ et $\phi_{ds} = \phi_s$) le modèle obtenu de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également [2].

Et le système précédant s'écrit alors :

$$\begin{cases} [v_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d(\phi_{ds})}{dt} \\ [v_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (II.6)$$

$$\begin{cases} [v_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d(\phi_{dr})}{dt} - (\omega_s - \omega)\phi_{qr} \\ [v_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d(\phi_{qr})}{dt} + (\omega_s - \omega)\phi_{dr} \end{cases} \quad (II.7)$$

L'équation de couple électromagnétique sera donnée par:

$$C_{em} = -p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \cdot \phi_{ds} \quad (II.8)$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connecté la MADA est stable, le flux ϕ_{ds} et le couple électromagnétique produit par la machine devient alors constant, et par conséquent la puissance active uniquement dépendant de courant rotoriques d'axe q [6, 7].

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d(\phi_s)}{dt} \quad (II.9)$$

Avec :

R_s : Négligeable pour les machines de forte puissance, l'expression de la tension statorique devient alors :

$$\mathbf{v}_s = \frac{d(\phi_s)}{dt} \quad (\text{II. 10})$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable, les équations des tensions s'exprimeront par :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} \phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

II.5. Relations entre les courants statorique et rotorique

A partir des équations des composantes direct et quadrature du flux statorique, nous pouvons écrire les équation liant les courants statorique au courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 13})$$

En remplaçant dans les expressions des composantes directes et quadratures des équations des flux rotoriques , on aura :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{dr} + \frac{M}{L_s} \frac{v_s}{\omega_s} \\ \phi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 14})$$

II.6. Expressions des puissance active et réactive statoriques dans le repère synchrone

Dans un repère biphasé quelconque les puissances active et réactive sont exprimé par :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \\ Q_s = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds}=0$) donne:

$$\begin{cases} P_s = v_s i_{qs} \\ Q_s = v_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

En remplaçant i_{qs} et i_{ds} par leurs expressions données l'équation, nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -v_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + v_s \frac{\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

$$\phi_s = \frac{v_s}{\omega_s} \quad (\text{II. 18})$$

$$\begin{cases} P_s = -v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -v_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

II.7. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g \frac{M v_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

Ces équations montrent que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut-être commandé avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront:

La puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire coté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyer sur le réseau.

L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc du système à réguler :

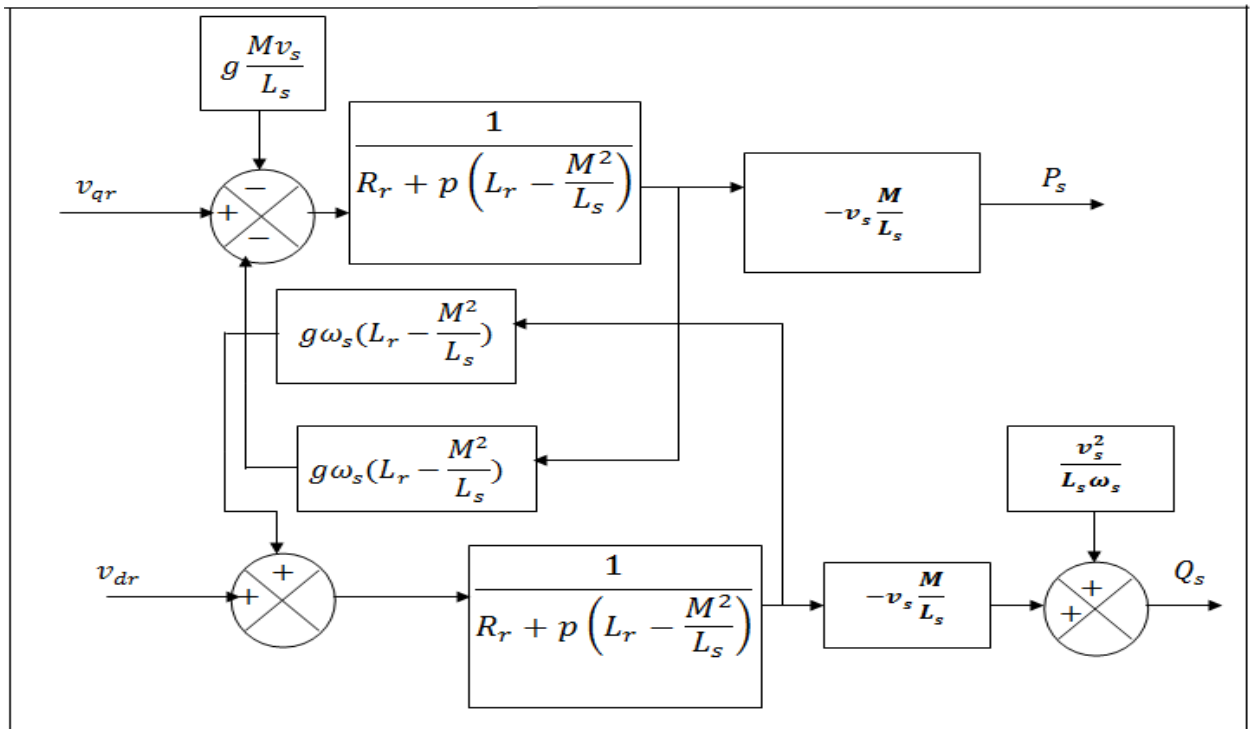


Fig. II.1: schéma bloc du système à réguler

II.7.1. Etude du régulateur PI

Dans ce type de correcteur le signal de commande est réalisé à partir de l'association d'un terme d'action proportionnelle et un terme d'action intégrale, ce type de correcteur à une fonction de transfert qui s'écrit sous la forme générale suivante :

$$C(p) = K_p + \frac{k_i}{p} \quad (\text{II. 21})$$

Ce régulateur possède une intégration, il convient donc bien lorsque l'on souhaite annuler l'erreur statique d'un système. De plus ce correcteur est tout a fait réalisable physiquement, c'est d'ailleurs le correcteur le plus utilisé. En revanche, il présente l'inconvénient de saturation de l'entrée du système due à son action intégrale c'est pour ça qu'il faut toujours l'associé à un dispositif d'anti-saturation.

Le correcteur à action proportionnelle et intégrale donne :

- Permet d'amélioré la précision statique par augmentation de la classe du système.
- Diminue la stabilité par perte de phase.
- Généralement il ralentit le système par diminution de la bonde passante.

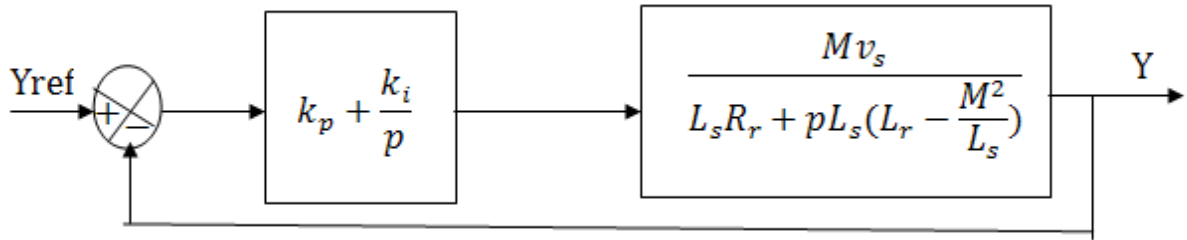


Fig. II.2: schéma bloc du régulateur PI

La fonction de transfert en boucle ouverte *FTBO* avec le régulateur PI s'écrit comme suit :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} * \frac{\frac{Mv_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (II. 22)$$

En boucle fermée on aura :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p}$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{Mv_s}$$

Avec τ_r le temps de repense du système que l'on fixe de l'ordre de 10ms. Correspondant à une valeur suffisamment pour l'utilisation de l'énergie éolienne ou les variations du vent sont peu rapides et les constants de temps mécaniques sont importantes [7].

Ainsi les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{Mv_s} \\ k_i = \frac{1}{\tau_r} * \frac{R_r L_s}{Mv_s} \end{array} \right. \quad (II. 23)$$

Il existe trois types de commande :

II.7. 3.1. Commande directe

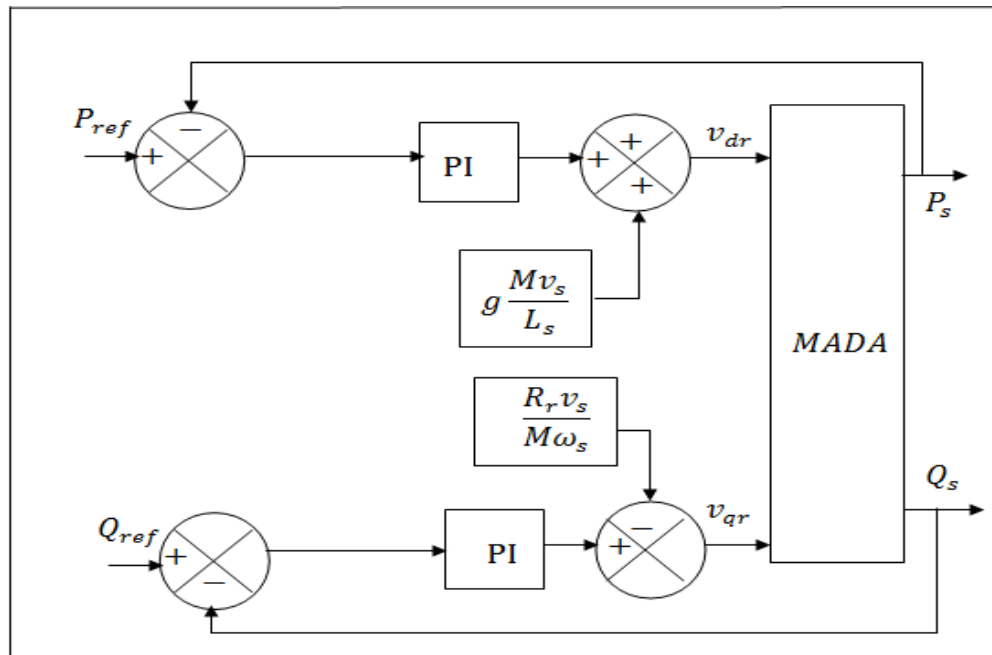


Fig. II.3: schéma bloc de la commande directe de la MADA

II.7. 3.2. Commande indirecte

La commande indirecte consiste en la reproduction du schéma bloc du système à réguler dans le sens inverse. On aura ainsi un schéma permettant l'expression de la tension en fonction des puissances, donc on obtient un modèle de la machine en sens inverse.

II.7. 3.2.1. Commande indirecte sans retour de puissance

On établit le système de régulation de la Fig. III.4 avec une boucle de régulation du courant rotorique.

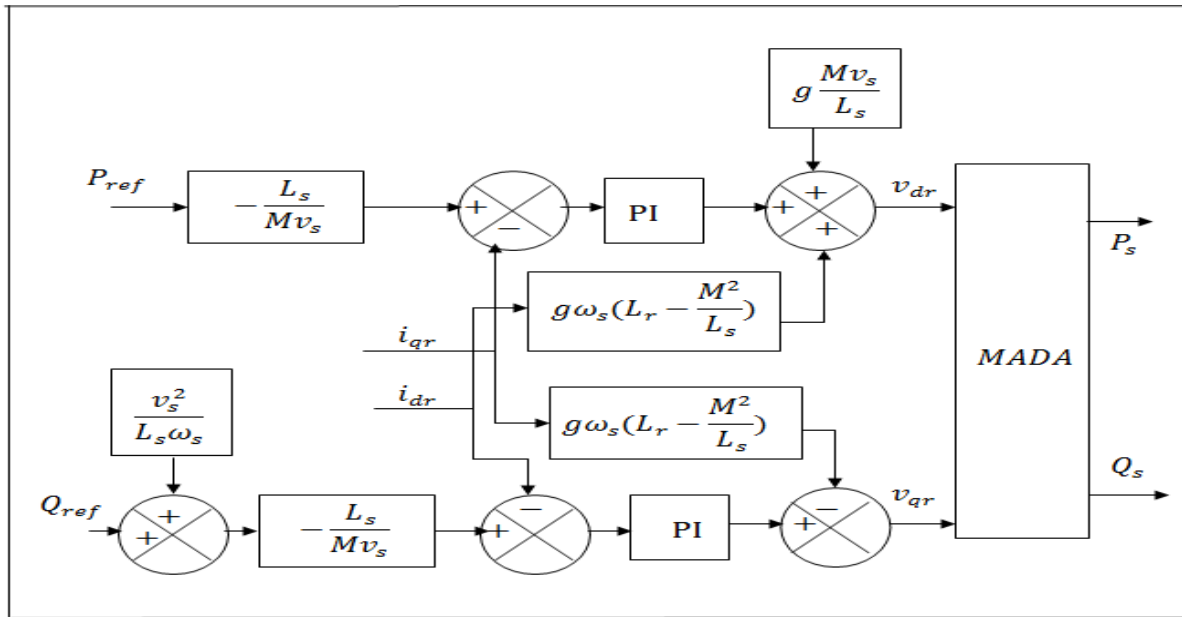


Fig. II.4: schéma bloc de la commande indirecte sans retour de puissance de la MADA

II.7. 3.2.2. Commande indirecte avec retour de puissance

Pour améliorer la commande on rajoute une boucle de régulation de la puissance

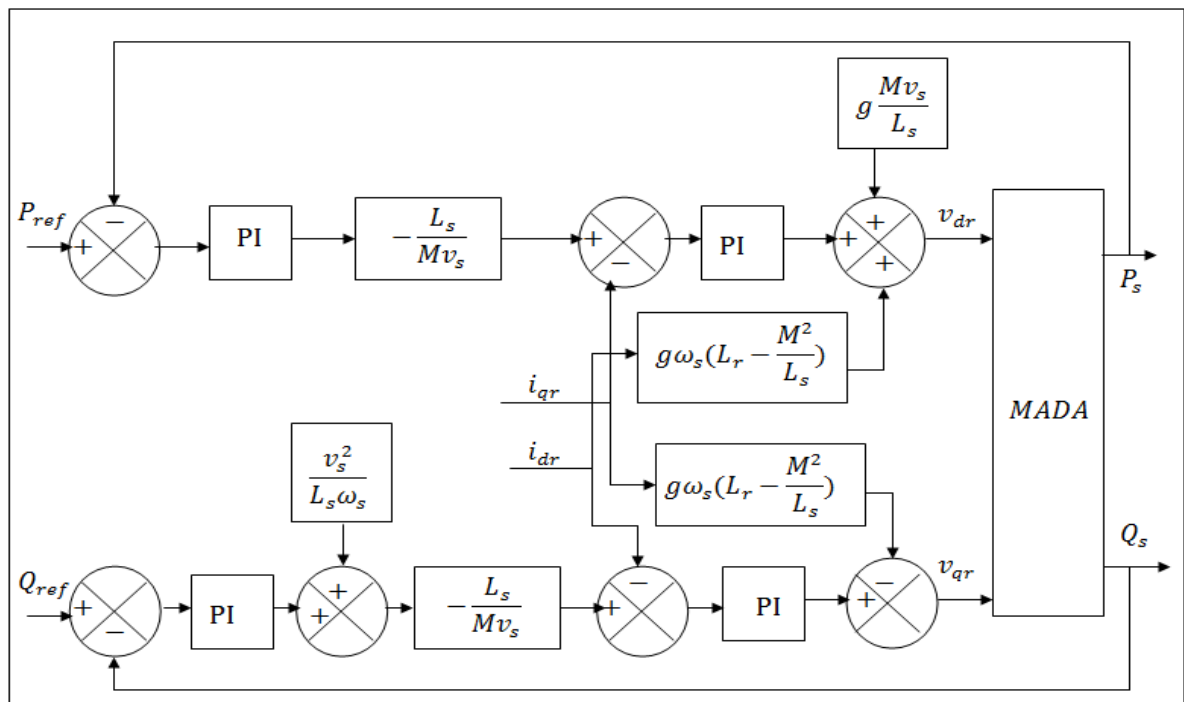


Fig. II.4: schéma bloc de la commande indirecte avec retour de puissance de la MADA

II.7. 4. Résultats des simulations

Ces résultats sont obtenus pour une commande indirecte avec retour de puissance, quand la MADA est entraînée à une vitesse $\Omega_r = 301 \left(\frac{rd}{s}\right)$

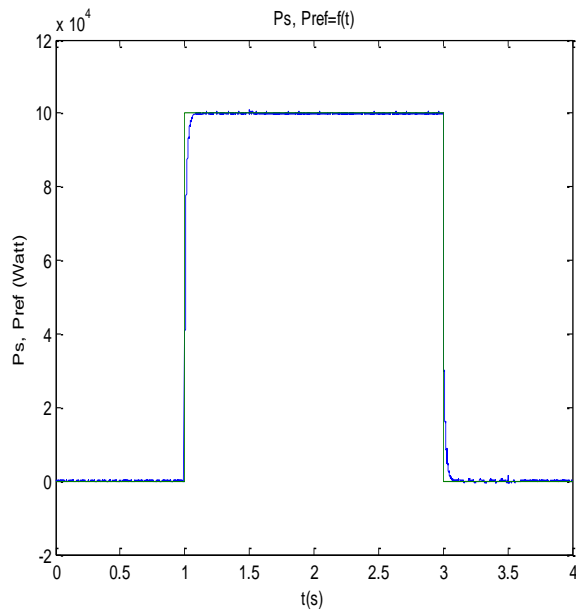


Fig. II.5: allure de P_s et P_{ref}

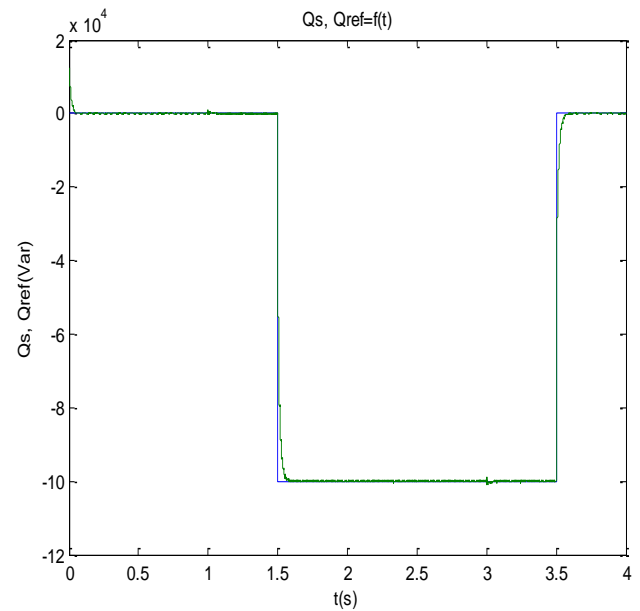


Fig. II.6: allure de Q_s et Q_{ref}

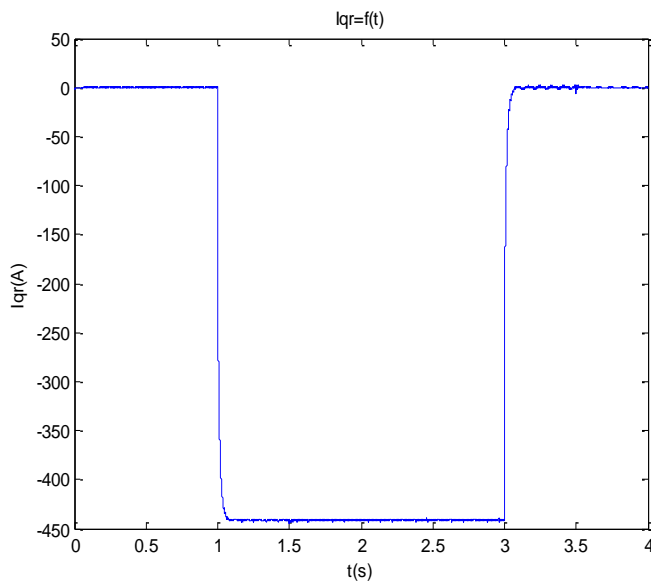


Fig. II.7: allure I_{qr} et I_{qr_ref}

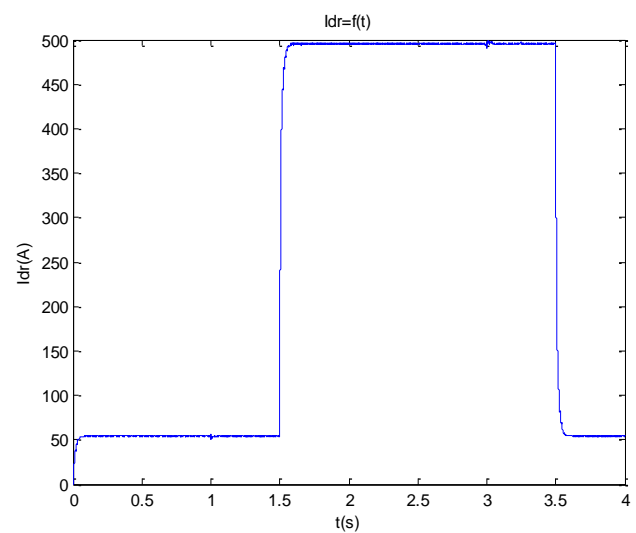


Fig. II.8: allure I_{dr} et I_{dr_ref}

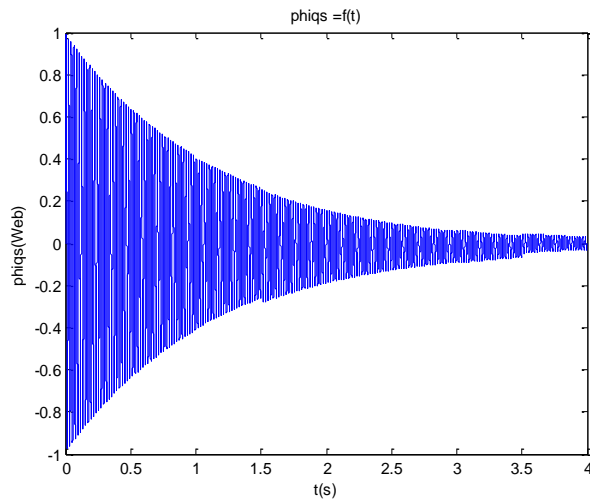


Fig. II.9: allure ϕ_{iqs}

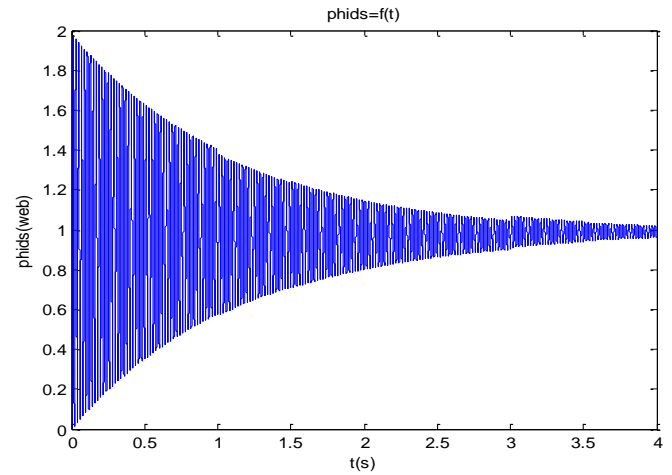


Fig. II.10: allure ϕ_{ids}

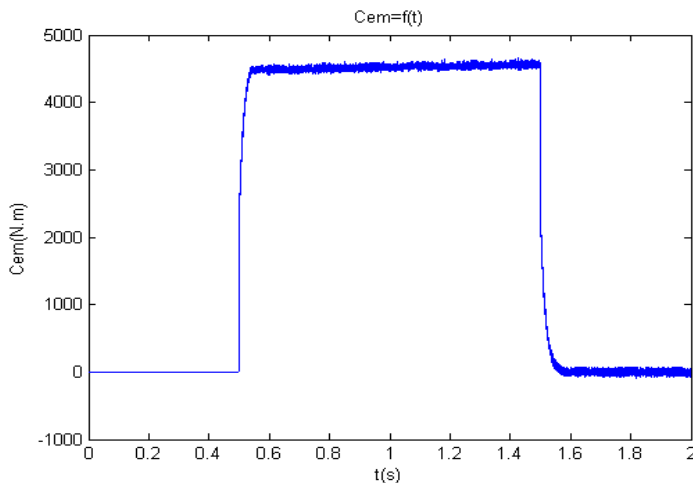


Fig. II.11: allure C_{em} .

II.8. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et appliqué la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la MADA utilisée en génératrice, ce qui permet de simplifier le modèle de la machine et de découpler la régulation du couple et celle du flux, donc de rendre le modèle de la MADA similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée.

L'association de l'onduleur avec la MADA a pour but d'obtenir une alimentation variable en tension et en fréquence à partir d'une source continu.

Pour cette commande, nous avons utilisé deux boucles de régulation : une boucle régule les puissances active et réactive et un autre régulateur les courants (régulateurs PI) en orientant le flux statorique selon l'axe d , par conséquent la puissance active sera dépendante uniquement du courant I_{qr} .

Chapitre III :

FILTRAGE DES HARMONIQUES

Introduction

De ce chapitre nous allons présenter une simulation du filtrage d'harmoniques à l'aide d'une installation à énergie renouvelable à bases d'éoliennes.

III 1. Solution adopté pour dépollué le réseau

La solution consiste en la mise au point d'un système de production d'énergie à base d'éoliennes qui va nous permettre la production de l'énergie nécessaire pour la compensation de la perturbation. Ce correspond à un filtre actif mis en parallèle avec la charge

III.1.1. Principe de fonctionnement du système

À travers une source triphasée sinusoïdale on alimente une installation qui contient à la fois des charges polluantes (qui consomme un courant non sinusoïdale), et des charges linéaires consommant un courant sinusoïdale.

Dans le cas de notre simulation la charge non linéaire est un redresseur débitant sur une (R, L). Le schéma de l'installation est donné par la figure (III.1).

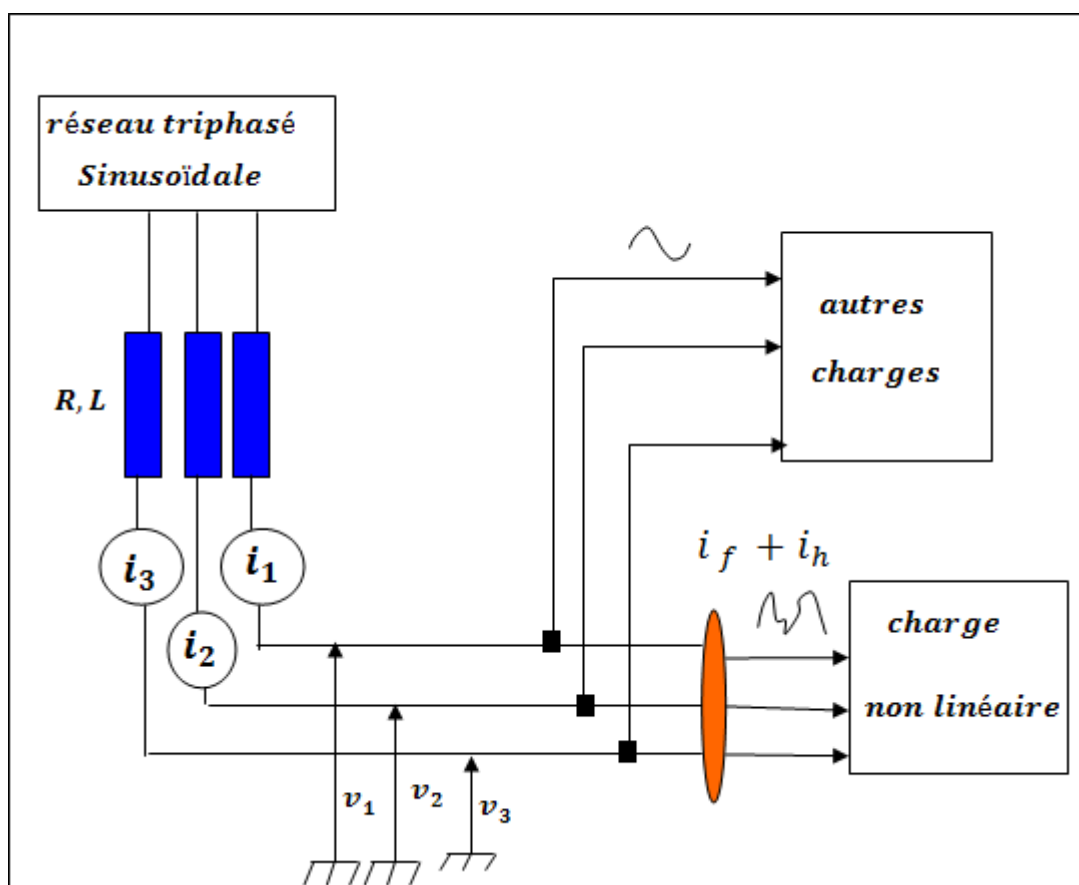


Fig. III .1: schéma du système étudié.

III.1.2. Schéma de la charge non linéaire utilisé :

La charge utilisée est un redresseur commandé à ($\alpha = 30^\circ$), ce dernier débite sur une charge inductive $Z = R + jL$ comme l'indique la figure (III .2).

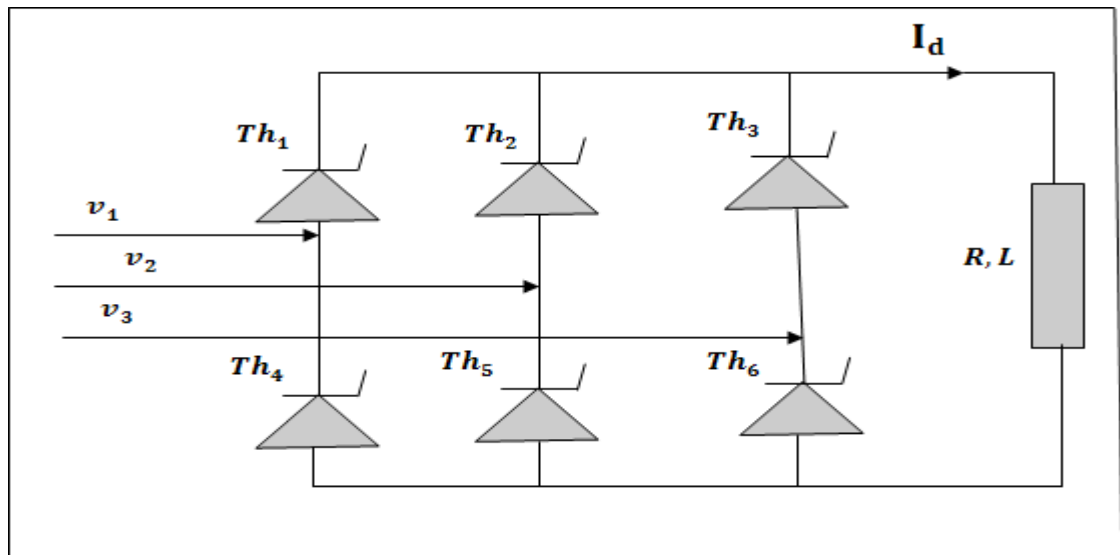


Fig. III .2: schéma du système étudié.

Ainsi on aura le schéma de l'installation de la figure (III .3), qui décrit le système étudié.

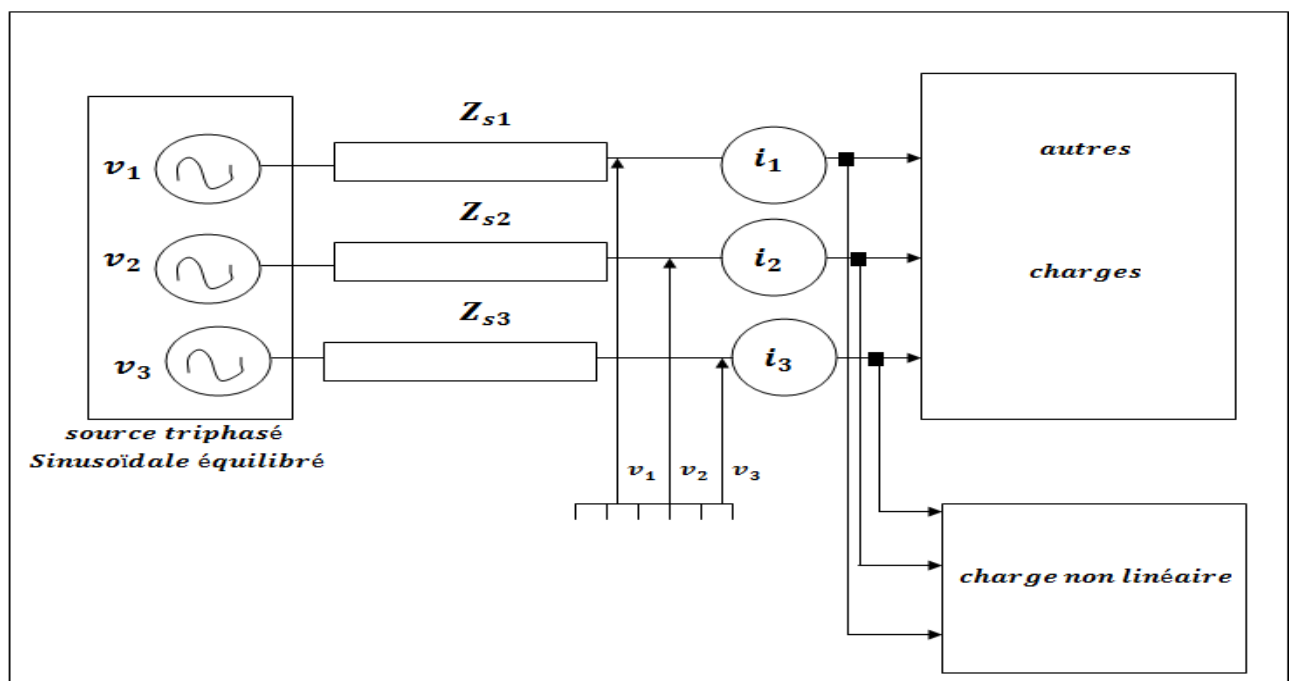


Fig. III .3: schéma du système étudié.

III.2. Détermination des références harmoniques

Le filtrage actif par la MADA se base sur la connaissance des courants harmoniques de référence que doit générer la MADA.

L'identification des perturbations consiste à extraire l'information d'un signal donné, et ce, par séparation de la partie souhaitée (perturbation) du signal global. On peut regrouper les différentes méthodes d'identification de courant harmoniques en deux familles :

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Ainsi, elle donne l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques [15].

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total. La méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation [15].

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont été proposées

- identification à partir de la détection du courant de la charge polluante
- identification à partir de la détection du courant de la source
- identification à partir de la détection de la tension de la source

On présente par la suite quelques méthodes d'identifications des harmoniques.

III.2.1. Le filtre Passe-bas

Le diagramme fonctionnel de la figure (III.4) explique le principe de la détermination du fondamental du courant de charge par un filtre passe-bas dimensionné à une fréquence de coupure $f_c=60 \text{ Hz} (\geq 50\text{Hz})$.

Pour le choix de l'ordre du filtre, il est à noter que, plus l'ordre augmente plus le transitoire du filtre est petit et le fondamental se rapproche plus de la sinusoïde. Pour cela on travaillé avec un filtre passif passe-bas d'ordre huit. L'inconvénient est la possibilité d'affectation de la stabilité et une augmentation du coût de réalisation [7].

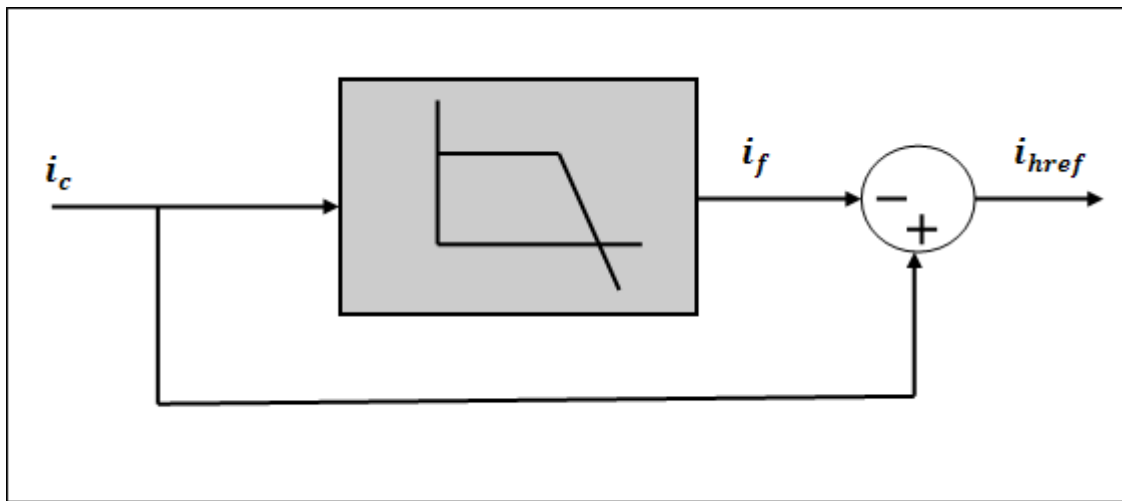


Fig. III.4 : Schéma fonctionnel du fonctionnement du filtre passe-bas

La fonction de transfert de ce filtre :

$$F(p) = \frac{1}{(1 + \tau p)^n}$$

Avec :

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}, \text{ et } n: \text{ ordre du filtre.}$$

Il est à noter que malgré l'ordre du filtre est élevé il y a un retard du courant filtré par rapport du courant réel. Ce problème peut être résolu en utilisant un correcteur à avance de phase.

III.2.2. Le filtre sélectif

Le filtre sélectif est un filtre passe-bande, qui va extraire dans le repère (α, β) les composantes de courant harmoniques pour les filtrer. Sa fonction de transfert [7],[16]:

$$H(p) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(p)}{x_{\alpha\beta}(p)} = k \frac{(p + k) + j\omega_c}{(p + k)^2 + j\omega_c^2} \quad (III .1)$$

Ou $x_{\alpha\beta}(p)$ est la composante du signale mesuré dans le repère (α, β) qui est définie par :

$$x_{\alpha\beta}(p) = x_{\alpha}(p) + jx_{\beta}(p) \quad (III .2)$$

$\hat{x}_{\alpha\beta}(p)$: est la composante fondamentale dans le repère (α, β) qui est définie par

$$\hat{x}_{\alpha\beta}(p) = \hat{x}_{\alpha}(p) + j\hat{x}_{\beta}(p) \quad (III .3)$$

k : une constante

ω_c : La pulsation de signal filtré.

P : l'opérateur de Laplace.

En traçant le diagramme de Bode de cette fonction de transfert pour $\omega_c = 2\pi f_c$ ($f_c = 50\text{Hz}$), et pour des déférentes valeurs de K, on obtient le diagramme de la figure(III.5). On remarque qu'il s'agit bien d'un filtre sélectif car les pentes du gain sont très importantes autour de la pulsation de coupure ω_c . De plus, ce filtre présente l'avantage d'avoir un déphasage de 0° à la pulsation de coupure, cela signifie que le signal extrait du signal d'entrée sera en phase avec celui-ci [15].

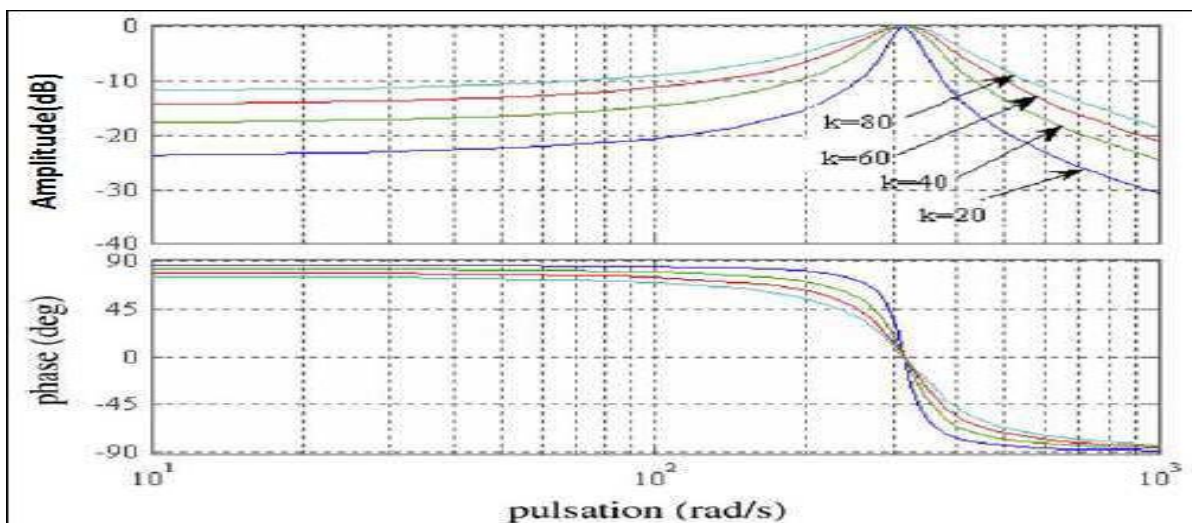


Fig. III.5 : Diagramme de Bode du filtre sélectif ($\omega_c = 100\pi \text{ rad/s}$) [16].

Ceci est donc très intéressant car ce filtre va nous permettre d'extraire le fondamental (à 50 Hz) des tensions sans introduire de retard et l'on pourra ainsi directement utiliser les signaux de sortie du filtre pour se synchroniser sur le réseau

On exprime alors les composantes fondamentales \hat{x}_α et \hat{x}_β en fonction de x_α et x_β :

$$\hat{x}_\alpha(p) = k \frac{(p+k)}{(p+k)^2 + j\omega_c^2} x_\alpha(p) - k \frac{\omega_c}{(p+k)^2 + j\omega_c^2} x_\beta(p) \quad (\text{III.4})$$

$$\hat{x}_\beta(p) = k \frac{(p+k)}{(p+k)^2 + j\omega_c^2} x_\beta(p) - k \frac{\omega_c}{(p+k)^2 + j\omega_c^2} x_\alpha(p) \quad (\text{III.5})$$

Ceci nous permet d'écrire :

$$\hat{x}_\alpha(p) = \frac{k}{p} (x_\alpha(p) - \hat{x}_\alpha(p)) - \frac{\omega_c}{p} \hat{x}_\beta(p) \quad (\text{III.6})$$

$$\hat{x}_\beta(p) = \frac{k}{p} (x_\beta(p) - \hat{x}_\beta(p)) - \frac{\omega_c}{p} \hat{x}_\alpha(p) \quad (\text{III.7})$$

Ces équations nous permettent d'établir le schéma du filtre sélectif qui est présenté en figure (III.6).

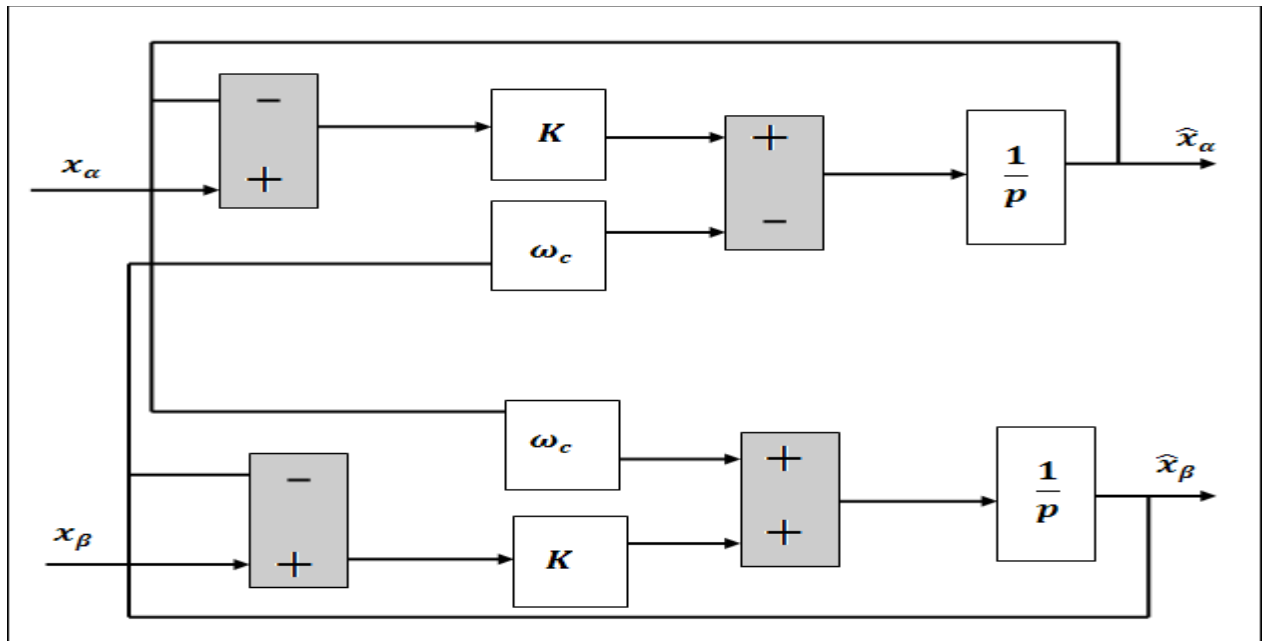


Fig. III.6 : Schéma du filtre sélectif multi variable

L'élaboration des courants de références harmoniques par le filtre sélectif est montrée par la figure(III.7)

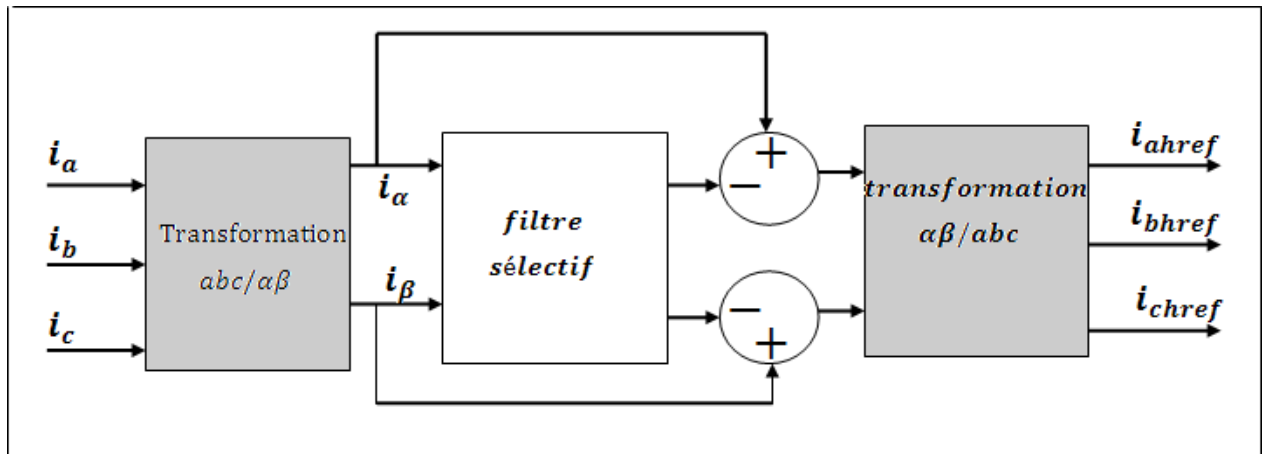


Fig. III.7 : Elaboration des courants de références harmoniques par le filtre sélectif

Cette méthode de détermination des références harmoniques permet de prendre en compte tous les harmoniques présents dans les courants de la charge polluante. On ne se contente pas d'atténuer quelques harmoniques particuliers mais l'on veut compenser tous les harmoniques au travers de la machine asynchrone. De plus, ce filtre est adaptatif; le calcul des références se fait en temps réel. Les courants de la charge polluante peuvent donc évoluer, la génératrice les compensera en temps réel [7].

III.2.3 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

III.2.3.1 Principe de la méthode

Pour cette méthode, l'identification des courants harmoniques est réalisée sur les puissances réelle et imaginaire instantanées par transformation des grandeurs électriques (tension, courant) dans un repère fixe par la transformée de Concordia [15].

Cependant, il y a lieu de signaler que cette méthode n'est pas une méthode d'identification directe des composantes harmoniques du courant mais identifie plutôt les composantes harmoniques qui ne servent pas à véhiculer de la puissance active.

$$\begin{bmatrix} |I_{s\alpha}| \\ |I_{s\beta}| \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |I_{res1}| \\ |I_{res2}| \\ |I_{res3}| \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

I_{res1} , I_{res2} , I_{res3} : étant les courants de ligne du système triphasé.

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

V_{res1} , V_{res2} , V_{res3} : Étant les tensions simples du système triphasé.

La puissance réelle instantanée P et la puissance réactive instantanée Q peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$P(t) = I_{res1} V_{res1} + I_{res2} V_{res2} + I_{res3} V_{res3} = I_{s\alpha} V_{s\alpha} + I_{s\beta} V_{s\beta} \quad (\text{III.10})$$

$$\begin{aligned} Q(t) &= -\frac{1}{\sqrt{3}} (I_{res1} (V_{res2} - V_{res3}) + I_{res2} (V_{res3} - V_{res1}) + I_{res3} (V_{res1} - V_{res2})) \\ &= I_{s\beta} V_{s\alpha} - I_{s\alpha} V_{s\beta} \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

En séparant le courant dans le repère (α, β) en trois termes, actif, réactif à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques, on obtient :

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left(\begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$$\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$$

$$\begin{cases} P = \bar{P} + \tilde{P} \\ Q = \bar{Q} + \tilde{Q} \end{cases}$$

\bar{P} et \bar{Q} : représentent les puissances continues instantanées active et réactive liée à la composante fondamentale du courant.

\tilde{P} et \tilde{Q} : représentent les puissances alternatives instantanées active et réactive liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

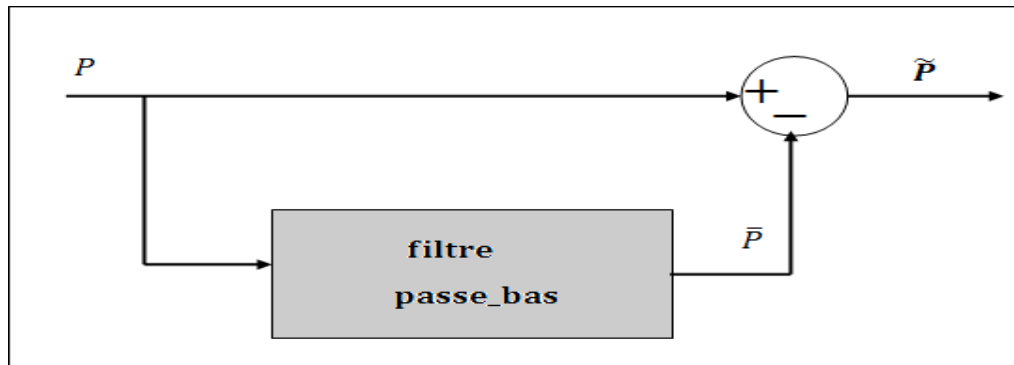


Fig. III.8 : Filtrage de la composante de la puissance continue

Les courants triphasés de référence sont obtenus par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} I_{cref1} \\ I_{cref2} \\ I_{cref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes [17]

- Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- Elle peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmonique).
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.
- Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).

III.2.3.2 Identification avec compensation de l'énergie réactive

La compensation de l'énergie réactive consiste à rendre le déphasage entre le courant et la tension du réseau nul, c'est à dire un facteur de puissance unitaire. Pour cela, on identifie le courant de charge pour avoir la valeur du courant du filtre i_{fr} qu'il faut ajouter pour que le courant délivré par la source soit sinusoïdal et en phase avec la tension [15].

$$i_f = i_{ch} - i_{res} \quad (\text{III .16})$$

i_{ch} : Le courant d'entrée de la charge polluante.

i_{res} : Le courant de réseau.

Le courant généré par le filtre doit être égal à la somme d'une composante harmonique i_{fh} (servant à dépolluer le réseau, autrement dit à éliminer les harmoniques), et une composante fondamentale réactive i_{ffr} (qui va servir à compenser l'énergie réactive, c'est-à-dire rendre le facteur de puissance unitaire). Donc il faut déterminer le courant réactif i_{ffr} que le filtre actif doit générer pour compenser l'énergie réactive.

$$i_{fr} = i_{fh} + i_{ffr} \quad (\text{III .17})$$

III.2.3.2 Détermination de courant réactif i_{ffr}

On utilise le même algorithme d'identification pour déterminer le courant réactif:

$$\begin{bmatrix} I_{fr\alpha} \\ I_{fr\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Q} \end{bmatrix} \quad (\text{III .18})$$

Par l'application de la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} I_{fr1} \\ I_{fr2} \\ I_{fr3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fr\alpha} \\ I_{fr\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III .19})$$

Pour neutraliser cette puissance réactive, on somme le courant harmonique généré par la charge avec le courant réactif désigné par i_{ffr} pour permettre d'avoir le courant de référence que doit générer le filtre actif afin d'obtenir un courant de source sinusoïdal et en phase avec sa tension.

Donc :

$$i_{fr} = i_{ffr} + i_{href} \quad (\text{III .20})$$

i_{fr} : Le courant de référence que doit générer le filtre actif.

i_{ffr} : Le courant réactif.

i_{href} : Le courant harmonique généré par la charge.

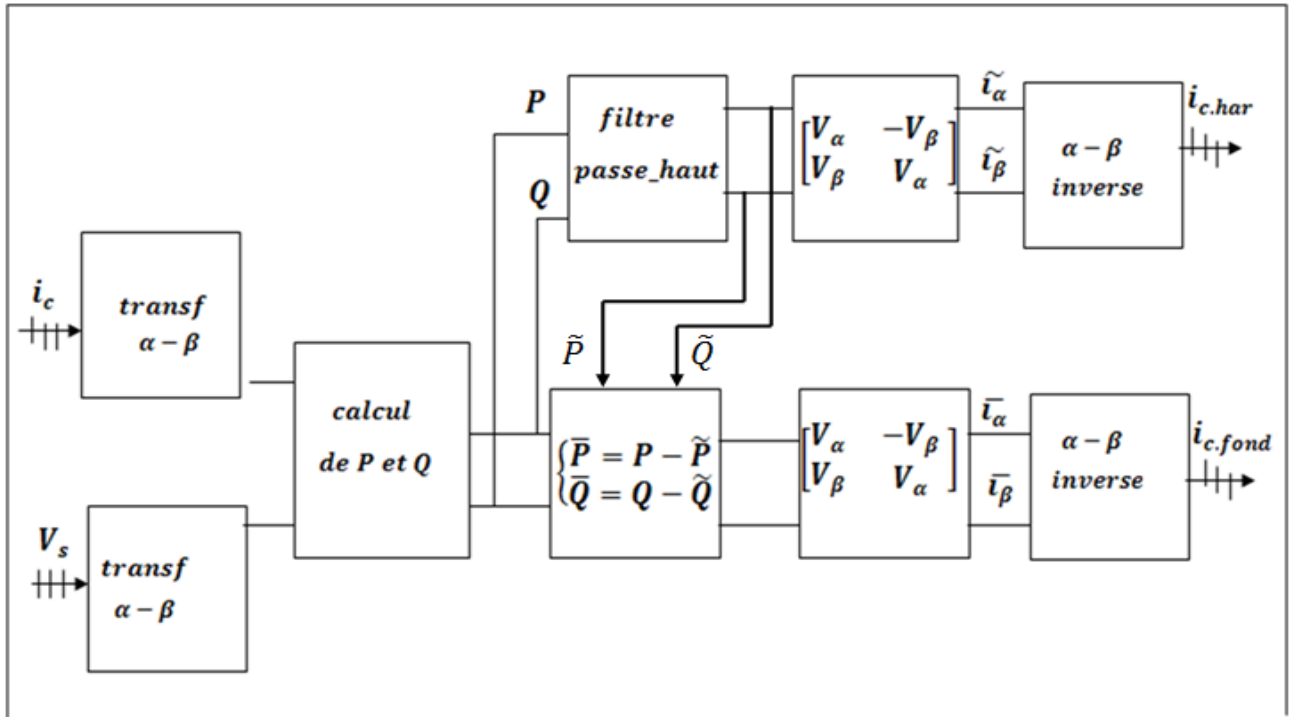


Fig. III.9 : algorithme d'identification des harmoniques [15].

III .1.3. Résultat de la simulation avant filtrage

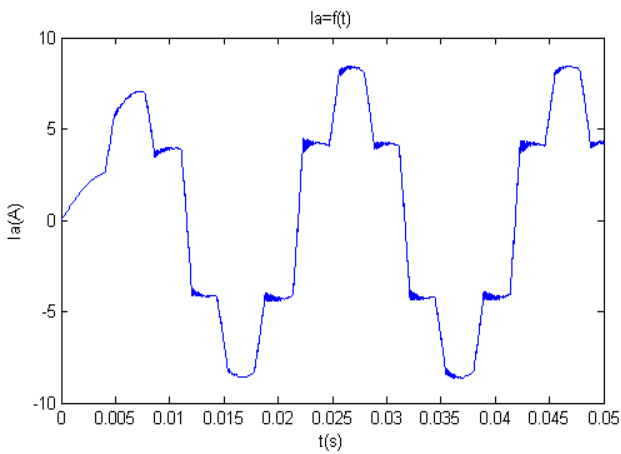


Fig. III.10: allure du courant Ia

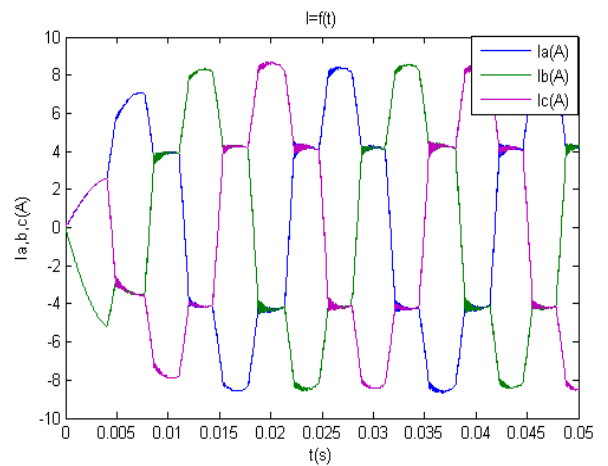


Fig. III.11: allure du courant Ia, Ib, Ic.

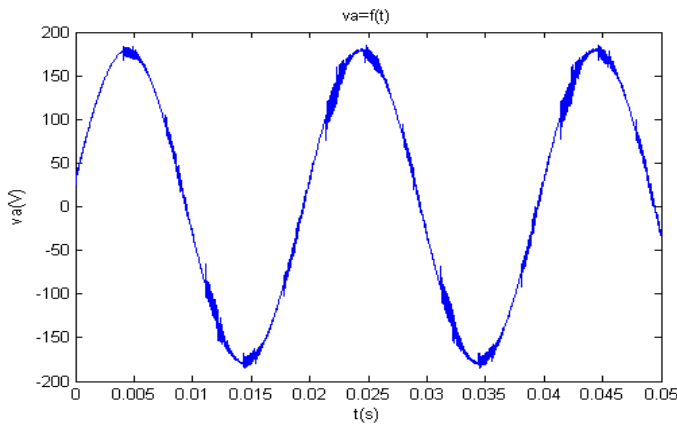


Fig. III.12: allure de la tension Va

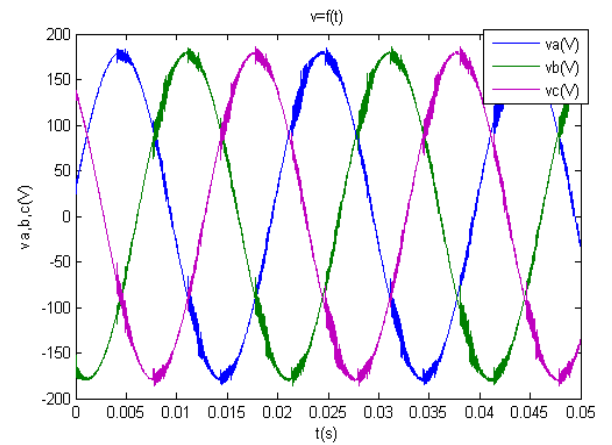
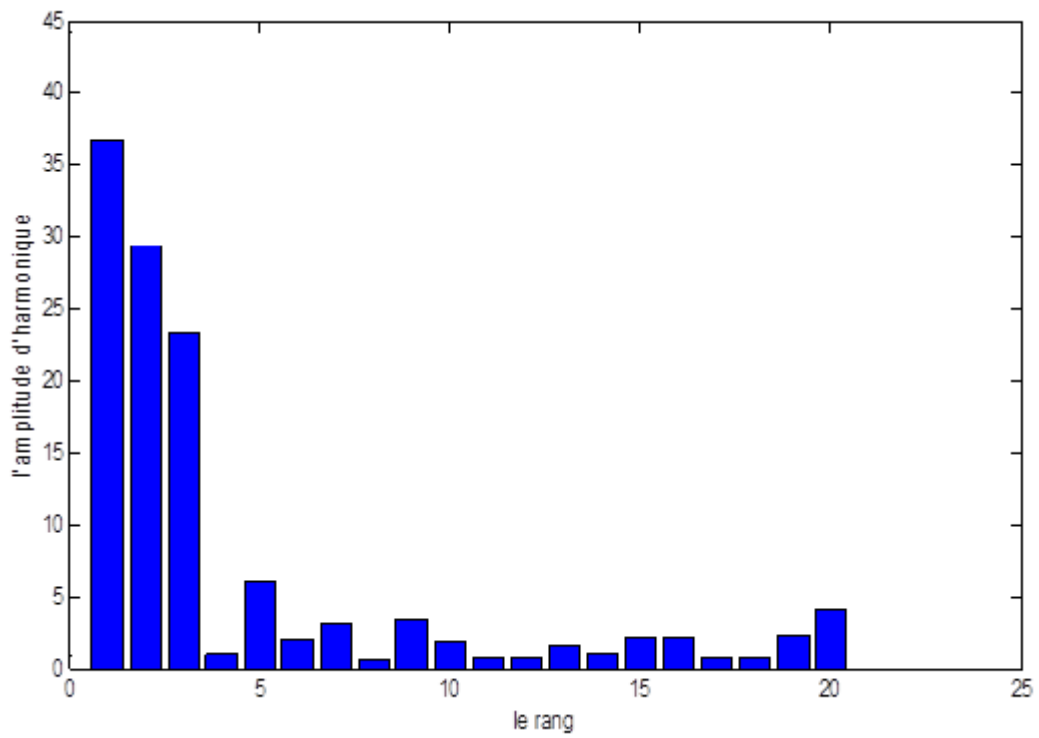


Fig. III.13: allure des tensions Va, Vb, Vc.



(Fig.III.14) :Le spectre harmonique avant filtrage

Interprétations :

Après connexion d'une charge non linéaire (dans notre simulation on a utilisé un redresseur qui débite sur une charge inductive R, L) au réseau triphasé on voit que les ondes électriques respectivement celle de la tension et celle du courant se trouvent déformées, Elles ne sont plus sinusoïdale. Ceci est due au faite que la charge consomme un courant non sinusoïdal, ainsi il y a création d'harmoniques de courant. L'interaction de ces dernières avec les impédances de la source et celle des lignes crée à son tour une déformation de l'onde de tension.

Le calcul du facteur de puissance en faisant un bilan de puissance, nous donne

($S = 1522.3 \text{ VA}$, $P = 1200 \text{ Watt}$, $Q = 705.2 \text{ Var}$ et on aura $F_p = \frac{P}{S} = 0.7883$), Ainsi $F_p < 0.8$ ce qui montre que le facteur de puissance est dégradé.

Ainsi nous devons donc procéder simultanément à améliorer la qualité de l'onde et à relever le facteur de puissance ceci en utilisant le filtrage d'harmoniques. Électrique pour empêcher la propagation des harmoniques.

III .3. Solution adoptée pour dépolluer le réseau

Un filtre actif se compose essentiellement de deux parties

Une partie d'électronique de puissance qui comporte un onduleur, et la source d'énergie qui va alimenter l'onduleur sera une machine asynchrone à double alimentation à travers un redresseur.

Une partie commande qui sert à contrôler la commutation des éléments semi-conducteurs qui constitué l'onduleur

Suivant la nature de la commande utilisé il y aura génération de signaux harmoniques a la sortie de l'onduleur pour compenser les distorsions existant sur l'installation.

III .3.1. Schéma de fonctionnement du système de filtrage

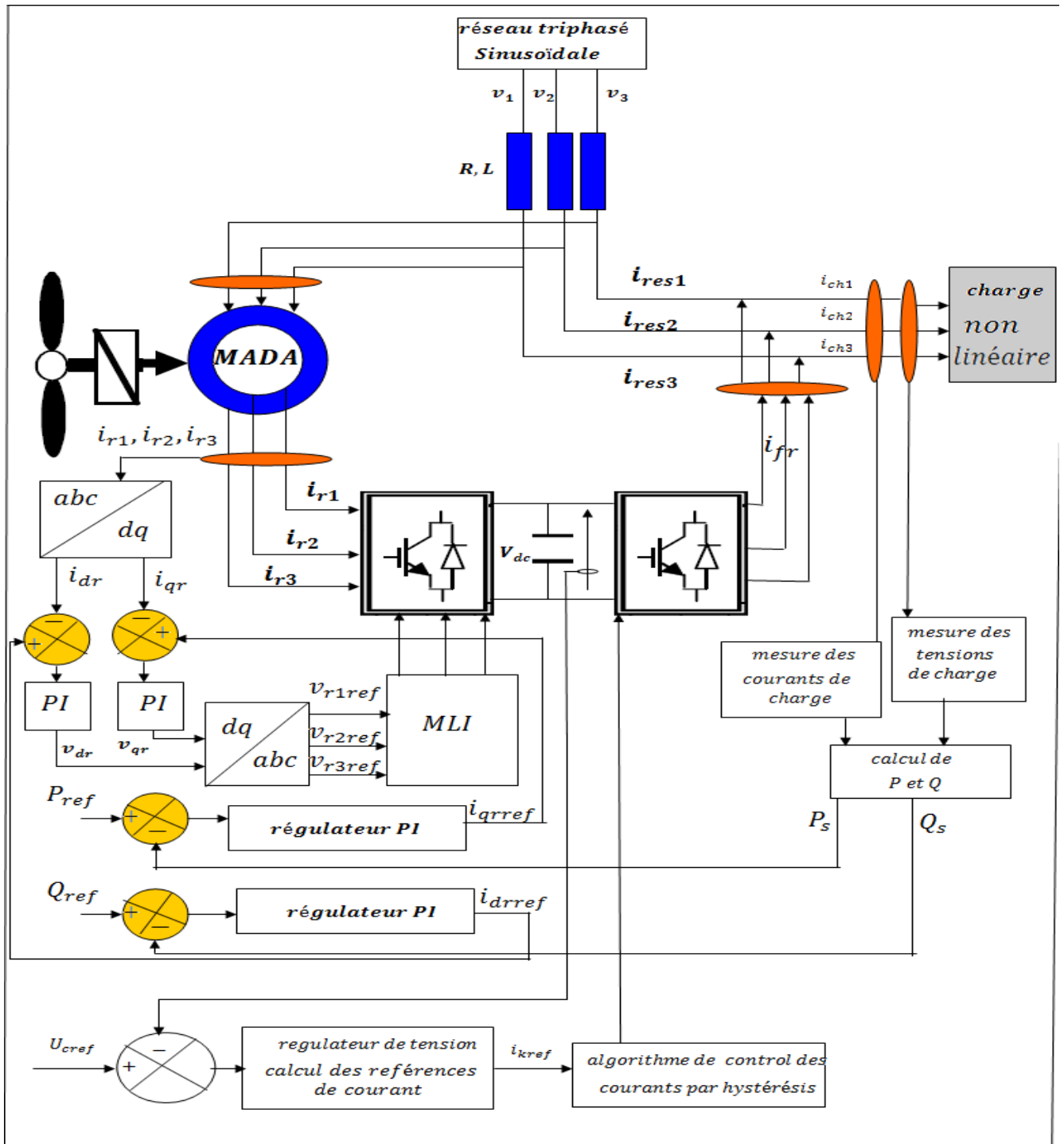


Fig. III.14: schéma du système de filtrage.

V.3.2. Résultats des simulations après filtrage

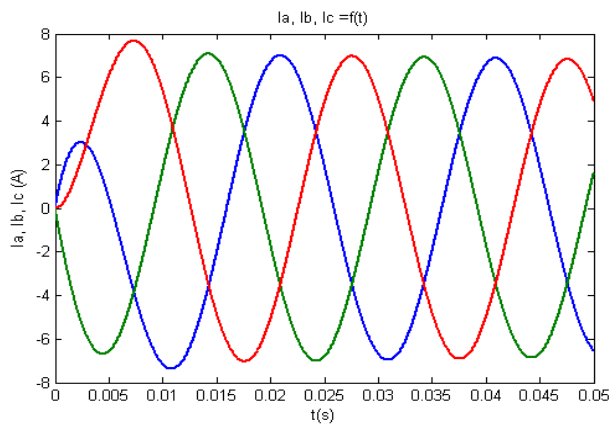


Fig. III.15 : allure des courants i_a , i_b , i_c .

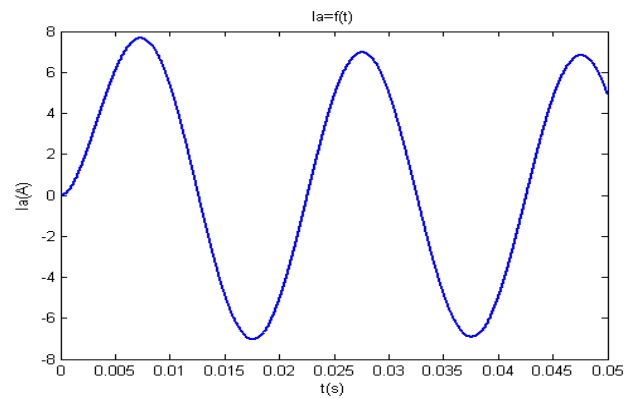


Fig. III.16 : allure des courants i_a .

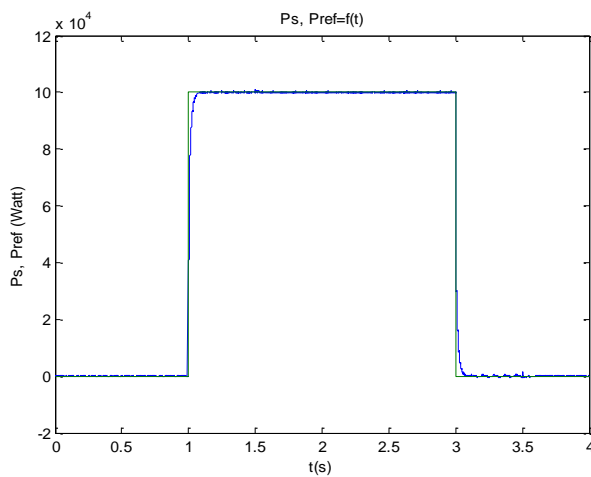


Fig. III.17 : allure de P_s et

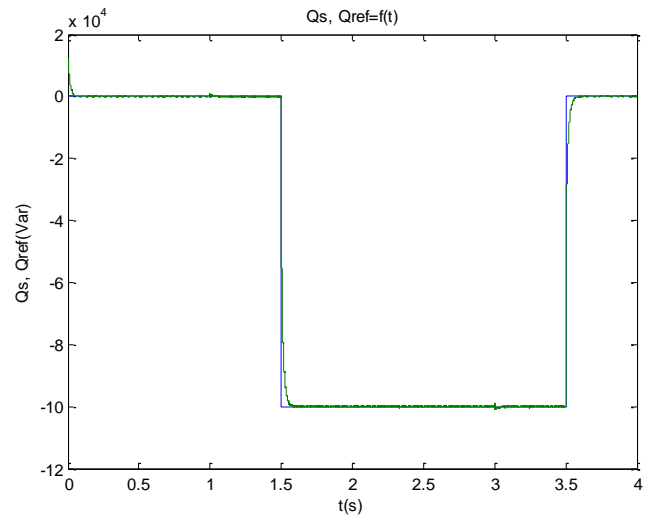


Fig. III.18: allure de Q_s et Q_{ref}

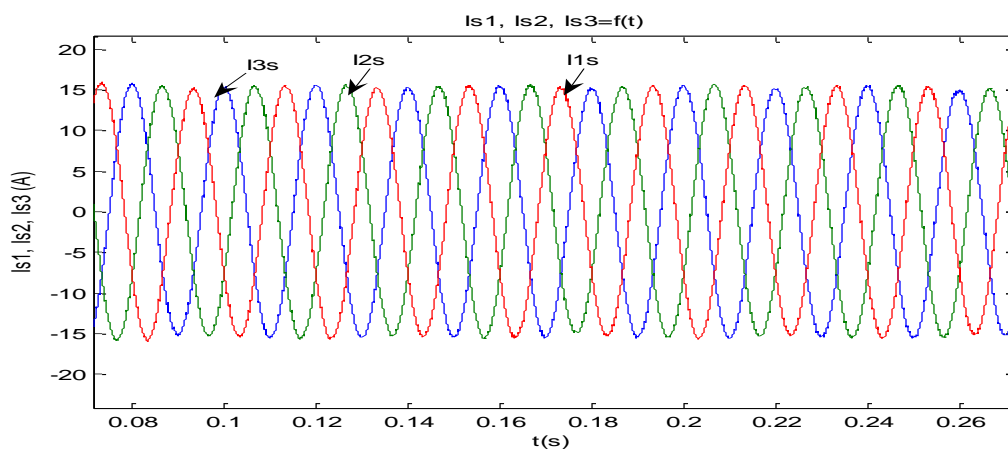


Fig. III19: allure des courants statorique avec un zoom i_{s1} , i_{s2} et i_{s3}

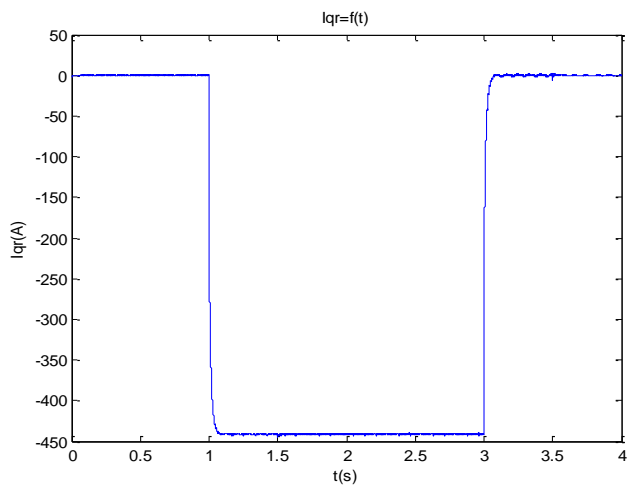


Fig. III.20 : allure de i_{qr}

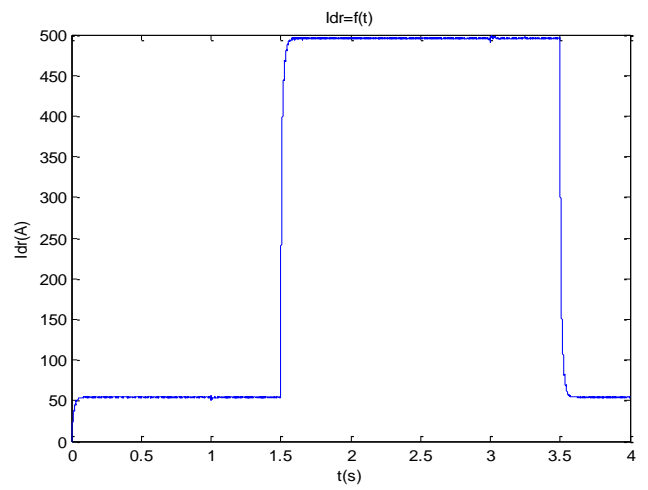


Fig. III.21 : allure de i_{dr}

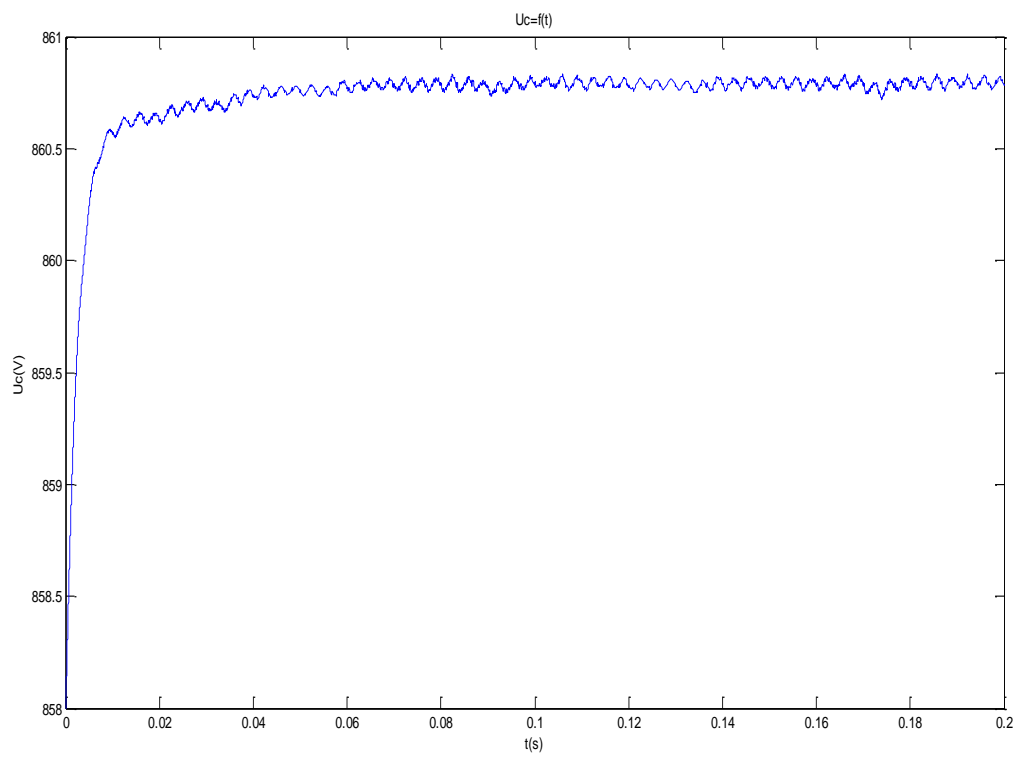
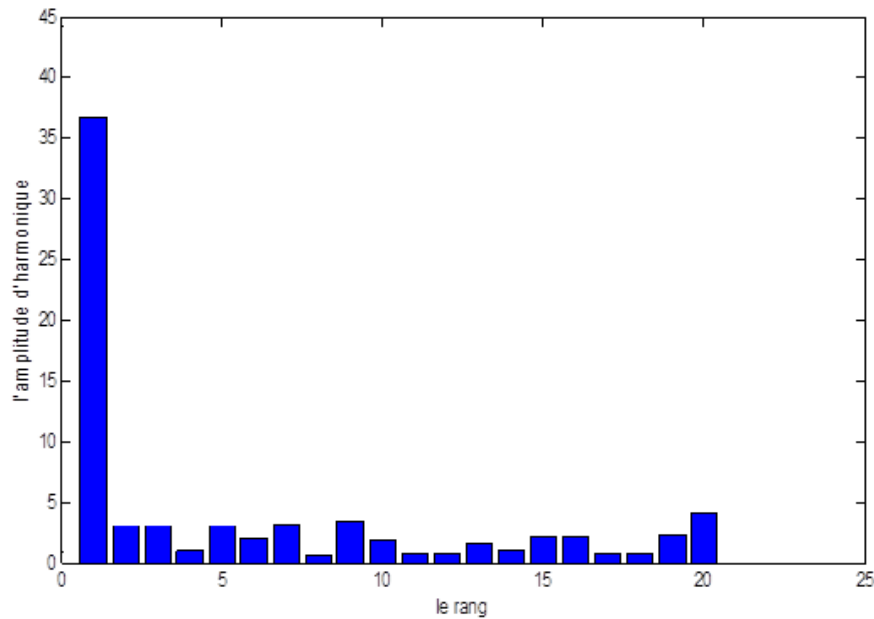


Fig. III.22 : allure de la tension du bus continu U_c



(Fig.III.23)Le spectre harmoniques après filtrage

V.3.3. Interprétation :

Après application du filtrage actif par la MADA pour une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur débitant sur une charge R, L on voit que :

L'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées (méthode directe), le convertisseur coté réseau génère un courant qui sera analysé par le filtre sélectif pour extraire les courants harmoniques. On constate que les courants harmoniques du filtre suivent bien leurs références et dès que le filtrage est en fonctionnement, la forme du courant devient sinusoïdale.

Donc l'insertion du filtre induit une des ondes électriques sont améliorées et prennent une forme sinusoïdale.

Le calcul du facteur de puissance nous donne ($S = 471.0745$ VA, $P = 412.7$ Watt,

$Q = 272.1$ Var et on aura $F_p = \frac{P}{S} = 0.8761$), On voit que le F_p est nettement amélioré.

Les puissances active et réactive suivent leurs références, et la tension du bus continu se stabilise à la valeur voulue (860V).

Le flux statorique a la même forme obtenue pour la cascade lors de la commandes indirecte de la MADA, et les courants triphasés statorique sont parfaitement sinusoïdaux et donc pas d'harmoniques dans le stator.

III. 4. Conclusion

La pollution harmonique est un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

Les filtres passifs peuvent altérer d'une manière indirecte la propagation des harmoniques, mais leur comportement dépend fortement de la structure du réseau. Les filtres actifs, avec un comportement plus autonome, peuvent réagir directement sur le courant ou sur la tension harmonique dans le réseau. Cependant, l'utilisation des dispositifs actifs comme les filtres actifs pour le contrôle de la propagation des harmoniques n'a été abordée que récemment par un nombre limité de chercheurs. Plus d'études de cas sont indispensables afin de développer des solutions efficaces et viables économiquement.

Dans ce cas, on analysera le phénomène d'amplification harmonique dans les réseaux de distribution industrielle et on développera une stratégie de commande du filtre satisfaisant le plus possible aux caractéristiques demandées.

Chapitre IV:

ETUDE DU DESEQUILIBRE

Introduction

Les réseaux triphasés sont très répandus dans le monde industriel en raison de leurs nombreuses propriétés favorables à la production, au transport et à l'utilisation des grandeurs électriques.

Un système triphasé est formé de trois grandeurs alternatives de même nature, de même fréquence, intervenant au même endroit : les trois tensions aux bornes d'une source, les trois courants dans une ligne...

IV.1. Système triphasé équilibre

IV.1.1. Définition

Trois grandeurs sinusoïdales forment un système triphasé équilibré si elles ont les mêmes valeurs efficace et si elles sont régulièrement déphasées entre elles.

Dans le cas ordinaire on considère des systèmes équilibrés directs : les trois grandeurs sont déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ et on repère les trois phases par (1, 2, 3), de façon à ce que la grandeur de la seconde phase est retardé de $\frac{2\pi}{3}$ par rapport à celle de la première, celle de la troisième est retardé de $\frac{2\pi}{3}$ par rapport à la seconde. Les trois courants d'un système équilibré sont donnés par l'expression [27] :

$$\begin{cases} i_1 = I\sqrt{2} \cos(\omega t) \\ i_2 = I\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_3 = I\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{IV. 1})$$

Ce système présente une propriété fondamentale qui est le faite que la somme des trois grandeurs sinusoïdales est nulles.

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (\text{IV. 2})$$

$$I\sqrt{2} \cos(\omega t) + I\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = 0 \quad (\text{IV. 3})$$

Ainsi on aura :

$$\cos(\omega t) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = 0 \quad (\text{IV. 4})$$

IV.1.2. Opérateur rotation

L'opérateur rotation a est introduit pour facilité les calculs sur les quantités complexes pour les systèmes équilibrés, il est défini par [27]:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{IV. 5})$$

Ont multipliant une grandeur complexe par a , le module reste inchangé, mais l'argument sera augmenté de $\frac{2\pi}{3}$, donc il fait tourner le vecteur représentatif de $\frac{2\pi}{3}$ dans le sens trigonométrique.

Ainsi, un système triphasé équilibré peut s'écrire :

$$\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3 \text{ ou } \bar{i}_1, a^{-1}\bar{i}_1, a^{-2}\bar{i}_1 \quad (\text{IV. 6})$$

Les valeurs de a et a^2 seront donnés par :

$$\begin{cases} a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + j\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases} \quad (\text{IV. 7})$$

Et on aura :

$$\begin{cases} a^3 = a^0 = 1, & a^4 = a \\ a^2 = a^{-1} = \frac{1}{a}, & a = a^{-2} = \frac{1}{a^2} \end{cases} \quad (\text{IV. 7})$$

Ainsi, on a :

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (\text{IV. 8})$$

Et l'on a :

$$\begin{cases} 1 - a = 1 + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} \right) = \sqrt{3} e^{-j\frac{\pi}{6}} \\ 1 - a^2 = \sqrt{3} e^{j\frac{\pi}{6}} \end{cases} \quad (\text{IV. 9})$$

Un système équilibré en courant s'écrit :

$$\bar{i}_1, a^2 \bar{i}_2, a \bar{i}_3 \quad (\text{IV. 10})$$

IV.2. Réseau triphasé symétrique

IV.2.1. Définition

Un système triphasé est une catégorie particulière de réseau polyphasé à trois grandeurs (tensions ou courants) sinusoïdales de même fréquence. Le système est symétrique si les grandeurs sinusoïdales sont de mêmes valeurs efficaces et déphasées de $2\pi/3$. Il est direct si

les phases sont ordonnées dans le sens trigonométrique inverse et inverse dans l'autre cas [27].

Un réseau triphasé est un assemblage de trois générateurs de tension indépendants connectés en étoile, c'est à dire avec un pôle commun appelé point neutre. La ligne est l'ensemble des conducteurs transportant l'énergie. On distingue trois conducteurs (un par phase) et éventuellement un quatrième pour le retour du courant appelé conducteur de neutre.

IV.2.2. Les tensions délivrées

IV.2.2.1. Les tensions simples

Puisque les grandeurs sont sinusoïdales, les tensions et courants utiliseront la notation complexe. Les trois tensions entre phase et neutre sont les tensions simples, notées V .

IV.2.2.2. Les tensions composées

Ces trois tensions forment un système triphasé symétrique en avance de $\pi/6$ sur celui des tensions simples. Le rapport des modules des tensions simples et composées est: $U = \sqrt{3}V$

On notera enfin, qu'à chaque instant, la somme des trois tensions simples, comme celle des trois tensions composées est nulle.

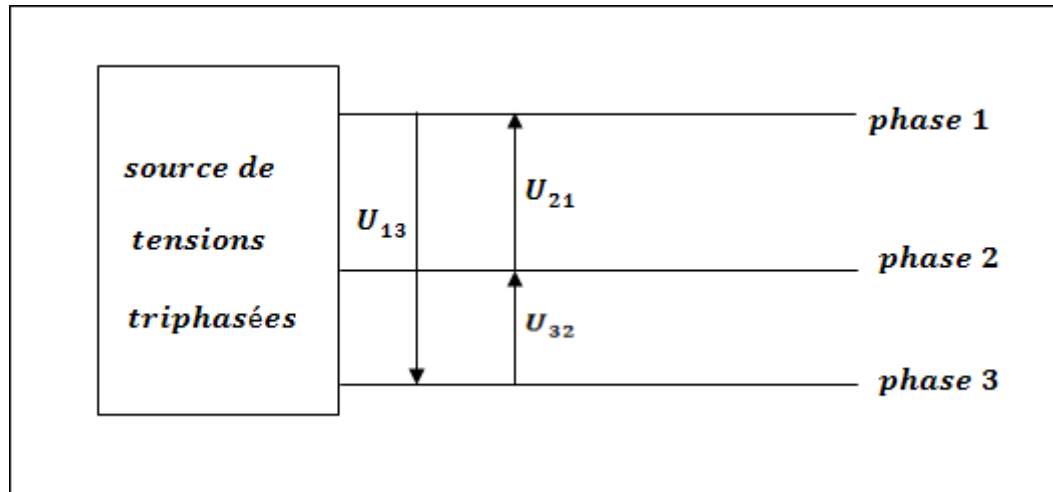


Fig. IV.1: tensions composées

IV.2.3. Représentation du système triphasé avec les phases

Dans le système triphasé, les trois phases sont notées 1, 2, 3. la fréquence f est la même pour les trois phases. Dans des conditions idéales les phases sont à 120° l'une de l'autre et leurs amplitudes sont les mêmes. et on aura [23]:

$$\begin{cases} v_1(t) = V \sin(2\pi ft) \\ v_2(t) = V \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3(t) = V \sin(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{IV. 11})$$

La représentation vectoriel du système triphasé équilibré est donné par :

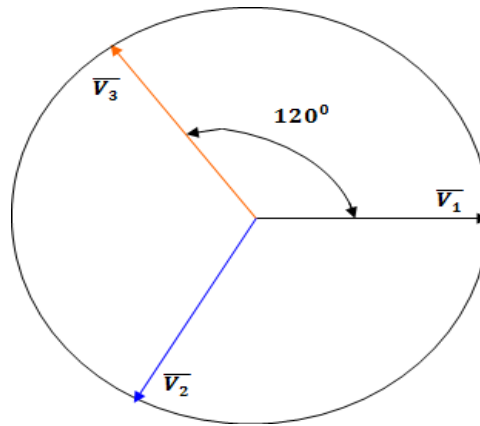


Fig. IV.2:schéma du système triphasé équilibré.

IV.3.Réseau triphasé déséquilibré (non symétrique)

Un système triphasé déséquilibré est un ensemble de trois grandeurs de même nature, de même fréquence, mais qui ont des amplitudes quelconques et qui sont déphasées d'un angle quelconque.

Le déséquilibre est engendré par Les générateurs et les récepteurs triphasés qui peuvent être déséquilibrés à cause d'une dissymétrie de construction ou d'un défaut de fonctionnement. Le branchement d'une charge monophasé est aussi une source de déséquilibre.

IV.3.1. Définition

Une charge est non équilibrée si elle est constituée de trois impédances différentes $\overline{Z}_1, \overline{Z}_2, \text{ et } \overline{Z}_3$, couplées en étoile ou en triangle. Les courants de ligne ne sont alors pas tous égaux. La conséquence la plus immédiate est que le potentiel du neutre de la charge est décalé par rapport à celui de l'équilibre.

Les déséquilibres homopolaires et les déséquilibres inverses sont :

Provoqués par les courts-circuits et les charges dissymétriques. Leur existence modifie l'équilibre des grandeurs électriques en présence.

La forme des courts-circuits et le mode de raccordement des charges dissymétriques déterminent le type de déséquilibre affectant le système électrique.

Le déséquilibre homopolaire affecte le système des tensions simples. Il modifie le rendement des charges monophasées. Un déséquilibre homopolaire important produit du déséquilibre inverse. Le déséquilibre inverse affecte le système des tensions composées. Il perturbe le rendement des charges raccordées entre phases.

La valeur du déséquilibre inverse induit par le déséquilibre homopolaire dépend du régime de neutre.

IV.3.2. Définition des composantes symétriques

Tout système triphasé déséquilibré $\overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3$ est superposition de trois systèmes équilibré qui sont [25]:

- Un système homopolaire : X_o, X_o, X_o .
- Un système équilibré direct: $X_d, a^2 X_d, a X_d$.
- Un système équilibré inverse : $X_i, a X_i, a^2 X_i$.

Nous avons déjà a défini le système triphasé équilibré direct :

$$\begin{cases} X_{d1} = X_d \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_d) \\ X_{d2} = X_d \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_d - \frac{2\pi}{3}) \\ X_{d3} = X_d \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_d - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{IV. 14})$$

Dans lequel la phase (1) est en avance sur la phase (2), elle-même en retard sur la phase (3). On définit également le régime sinusoïdal triphasé équilibré inverse :

$$\begin{cases} X_{i1} = X_i \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_i) \\ X_{i2} = X_i \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_i + \frac{2\pi}{3}) \\ X_{i3} = X_i \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_i + \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{IV. 15})$$

Dans lequel la phase (1) est en retard sur la phase (2), elle-même en avance sur la phase (3). On définit également le régime sinusoïdal triphasé équilibré homopolaire :

$$\begin{cases} X_{o1} = X_o \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_o) \\ X_{o2} = X_o \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_o) \\ X_{o3} = X_o \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_o) \end{cases} \quad (\text{IV. 16})$$

Dans lequel les grandeurs sont en phase. Nous remarquons que le système homopolaire n'est pas un système triphasé équilibré, il est formé de trois grandeurs identiques.

En notation complexe, cela donne pour le système direct :

$$\begin{cases} \overline{X_{d1}} = X_d e^{j\alpha_d} \\ \overline{X_{d2}} = X_d e^{j(\alpha_d - \frac{2\pi}{3})} \\ \overline{X_{d3}} = X_d e^{j(\alpha_d - \frac{4\pi}{3})} \end{cases} \quad (\text{IV. 17})$$

En utilisant l'opérateur de rotation a défini précédemment dans le premier paragraphe on aura pour le système direct :

$$\begin{bmatrix} X_{d1} \\ X_{d2} \\ X_{d3} \end{bmatrix} = X_d \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}$$

Pour le système inverse on aura :

$$\begin{bmatrix} X_{i1} \\ X_{i2} \\ X_{i3} \end{bmatrix} = X_i \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix}$$

Et pour le système homopolaire on aura :

$$\begin{bmatrix} X_{o1} \\ X_{o2} \\ X_{o3} \end{bmatrix} = X_o \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Décomposition d'un système déséquilibré :

Considérons un système triphasé déséquilibré quelconque :

$$\begin{cases} X_1 = X_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_1) \\ X_2 = X_2 \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_2) \\ X_3 = X_3 \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_3) \end{cases} \quad (\text{IV. 18})$$

Qui va s'écrire en notation complexe :

$$\begin{cases} \overline{X_1} = X_1 e^{j(\alpha_1)} \\ \overline{X_2} = X_2 e^{j(\alpha_2)} \\ \overline{X_3} = X_3 e^{j(\alpha_3)} \end{cases}$$

On peut écrire ce système comme la somme d'un système direct X_d , d'un système inverse X_i , et d'un système homopolaire X_o .

Ainsi, un système triphasé déséquilibré de tensions sinusoïdales simples $\overline{V_1}, \overline{V_2}, \overline{V_3}$ s'écrit :

$$\begin{cases} V_1 = \bar{V}_d + \bar{V}_i + \bar{V}_o \\ V_2 = a^2 \bar{V}_d + a \bar{V}_i + \bar{V}_o \\ V_3 = a \bar{V}_d + a^2 \bar{V}_i + \bar{V}_o \end{cases} \quad (\text{IV. 19})$$

Avec :

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

V_o, V_d, V_i : sont appelé composantes symétrique de Fortescue du système triphasé $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3$, nous remarquons que le système homopolaire n'est pas un système triphasé équilibré, il est formé de trois grandeurs identiques. Le passage du système triphasé déséquilibré à ces composantes est appelé transformation de Fortescue.

Le déterminant du système de trois équations n'étant pas nul, il y a toujours un ensemble unique de composantes V_o, V_d, V_i associé à ce système.

$$\begin{cases} \bar{V}_d = \frac{1}{3}(V_1 + aV_2 + a^2V_3) \\ \bar{V}_i = \frac{1}{3}(V_1 + a^2V_2 + aV_3) \\ \bar{V}_o = \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3) \end{cases} \quad (\text{IV. 20})$$

Le passage des intensités dites naturelles, c'est à dire celles qui sont directement observables sur une ligne, aux intensités symétriques, s'effectue de la manière suivante:

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_i \\ I_o \end{pmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (\text{IV. 21})$$

Avec :

I_d : est dite intensité directe. C'est la seule qui ne soit pas nulle lorsqu' I_1, I_2 et I_3 , forment un système équilibré. Si, dans un alternateur il n'y a que de l'intensité directe, il fonctionne dans les conditions optimales.

I_i : est dite intensité inverse. Elle crée dans l'alternateur une induction tournant en sens inverse du rotor. Elle doit rester faible, moins de 2% de l'intensité directe, faute de quoi elle occasionne un échauffement inacceptable du rotor.

I_o : est dite intensité homopolaire. Elle vaut le tiers du courant qui s'écoule dans la terre, et qui est appelé courant résiduel. Cette intensité ne crée pas de dommages dans les alternateurs, mais peut générer par induction des surtensions gênantes pour les lignes de télécommunication proches des lignes de transport d'énergie.

IV.3.3. Degré du déséquilibre

Le degré du déséquilibre δ d'un système triphasé est introduit comme étant le rapport entre les valeurs efficaces de sa composante inverse et sa composante direct :

$$\delta = \frac{V_i}{V_d} \quad (\text{IV. 22})$$

IV.3.4. Puissance

La puissance en régime déséquilibré est définie comme étant la somme de toutes les puissances transmises par les trois composantes, elle est définie en complexe comme suit :

$$\bar{S} = 3\bar{V}_o\bar{I}_o^* + 3\bar{V}_d\bar{I}_d^* + 3\bar{V}_i\bar{I}_i^* \quad (\text{IV. 23})$$

Et on aura :

$$\bar{S} = \bar{S}_o + \bar{S}_d + \bar{S}_i \quad (\text{IV. 24})$$

De même on aura les expressions des puissances actives et réactives :

$$\begin{cases} P = P_o + P_d + P_i \\ Q = Q_o + Q_d + Q_i \end{cases} \quad (\text{IV. 25})$$

Ainsi, la puissance apparente sera donné par :

$$S = \sqrt{(P_o + P_d + P_i)^2 + (Q_o + Q_d + Q_i)^2} \quad (\text{IV. 27})$$

IV.4. Algorithme d'identification de séquence directe :

Le principe de cet algorithme est illustré dans la figure (IV.3), C'est une technique récente. Elle est basée sur le besoin d'avoir un courant de source qui soit équilibré, non distordu et en phase avec la séquence positive de la tension de source. En conséquence, le filtre actif sera capable de réaliser [22]:

- Un facteur de puissance unitaire à la séquence positive de la fréquence fondamentale

- Une puissance active minimale absorbée ou fournie par le filtre actif
- Une compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive
- Une compensation du courant du neutre si ce n'était pas un système isolé

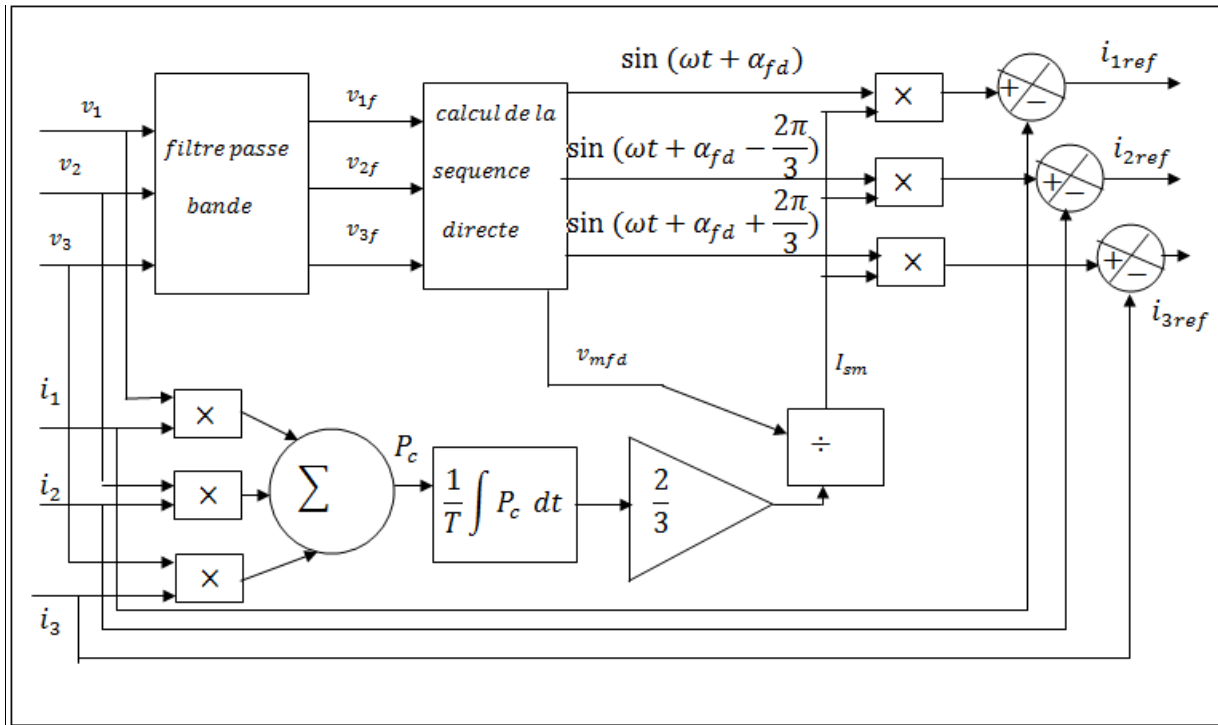


Fig. IV.3: schéma de l'algorithme d'identification de séquence directe

Afin d'atteindre ces objectifs, les courants triphasés désirés côté source doivent être en phase avec la séquence positive de la composante fondamentale de la tension de source. Ces derniers seront alors donnés par:

$$\begin{bmatrix} i_{1ref} \\ i_{2ref} \\ i_{3ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} - I_{sm} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \alpha_{fd}) \\ \sin(\omega t + \alpha_{fd} - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \alpha_{fd} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Avec :

I_{sm} : Amplitude (valeur max) du courant de source,

α_{fd} : Argument de la séquence positive obtenue à partir de la transformation de Fortescue de la composante fondamentale de la tension de source α_{fd} : Argument de la séquence positive obtenue à partir de la transformation de Fortescue de la composante fondamentale de la tension de source.

Extraction de la composante fondamentale de la tension de source v_f :

Pour ce faire, on fait passer chacune des tensions de source par un filtre passe-bande réglé à la fréquence 50 Hz. Ainsi, à la sortie du filtre, on obtient une composante fondamentale sinusoïdale.

Séquence positive de la composante fondamentale de la tension de source v_{fd} :

Une fois les composantes fondamentales des tensions de source obtenues, on les fait passer maintenant par la transformation de Fortescue afin d'en extraire la composante de séquence positive. La transformation de Fortescue est exprimée par la matrice $[F]$ ci-dessous. Il est à noter que les grandeurs instantanées doivent d'abord être converties en vecteurs ou en grandeurs complexes avant de passer par la matrice $[F]$.

$$[F] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

IV.4.2. Calcul de la puissance active P_c de la charge

Par définition, la puissance active P_c est la valeur moyenne de la puissance instantanée. Ainsi, la puissance active absorbée par la charge est égale à [22]:

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T P_c(t) dt \quad (\text{IV.28})$$

Ainsi on a :

$$P_c = V_{res1} i_{ch1} + V_{res2} i_{ch2} + V_{res3} i_{ch3} \quad (\text{IV.29})$$

En supposant que le filtre actif consomme zéro puissance active P les puissances actives côté source P_s et côté charge P_c seront alors identiques. La puissance active côté source est donnée par:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T P_s(t) dt \quad (IV.30)$$

Avec P_s fonction à la fois des trois composantes (directes, inverse et homopolaire), de plus il y aura une puissance fondamentale et une puissance due aux harmoniques et on aura [22]:

$$P_s = P_{sfd} + P_{sfi} + P_{sfo} + P_{shd} + P_{shi} + P_{sho} \quad (IV.31)$$

Avec :

$$\begin{cases} P_{sfd} = v_{1fd}i_{res1} + v_{2fd}i_{res2} + v_{3fd}i_{res3} \\ P_{sfi} = v_{1fi}i_{res1} + v_{2fi}i_{res2} + v_{3fi}i_{res3} \\ P_{sfo} = v_{1fo}i_{res1} + v_{2fo}i_{res2} + v_{3fo}i_{res3} \end{cases} \quad (IV.32)$$

Et la composante harmonique de la tension sera donné par :

$$\begin{cases} P_{shd} = \sum_{h=2}^{\infty} (v_{1hd}i_{res1} + v_{2hd}i_{res2} + v_{3hd}i_{res3}) \\ P_{shi} = \sum_{h=2}^{\infty} (v_{1hi}i_{res1} + v_{2hi}i_{res2} + v_{3hi}i_{res3}) \\ P_{sho} = \sum_{h=2}^{\infty} (v_{1ho}i_{res1} + v_{2ho}i_{res2} + v_{3ho}i_{res3}) \end{cases}$$

En considérons ω la pulsation du fondamental, les composantes (directe, inverse et homopolaire) fondamentales de la tension seront données par les équations suivantes:

$$\begin{bmatrix} v_{1fd} \\ v_{2fd} \\ v_{3fd} \end{bmatrix} = V_{mfd} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \alpha_{fd}) \\ \sin(\omega t + \alpha_{fd} - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \alpha_{fd} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 34})$$

$$\begin{bmatrix} v_{1fi} \\ v_{2fi} \\ v_{3fi} \end{bmatrix} = V_{mfi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \alpha_{fi}) \\ \sin(\omega t + \alpha_{fi} + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \alpha_{fi} - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 35})$$

$$\begin{bmatrix} v_{1fo} \\ v_{2fo} \\ v_{3fo} \end{bmatrix} = V_{mfo} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \alpha_{fo}) \\ \sin(\omega t + \alpha_{fo}) \\ \sin(\omega t + \alpha_{fo}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 36})$$

Et si on prend ω_k la pulsation du rang harmonique k , et ω_k sera donnée par $\omega_k = k * \omega$, et les tensions harmoniques seront données en composantes symétriques par :

$$\begin{bmatrix} v_{1hd} \\ v_{2hd} \\ v_{3hd} \end{bmatrix} = V_{mhd} \begin{bmatrix} \sin(\omega_k t + \alpha_{hd}) \\ \sin(\omega_k t + \alpha_{hd} - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_k t + \alpha_{hd} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 37})$$

$$\begin{bmatrix} v_{1hi} \\ v_{2hi} \\ v_{3hi} \end{bmatrix} = V_{mhi} \begin{bmatrix} \sin(\omega_k t + \alpha_{hi}) \\ \sin(\omega_k t + \alpha_{hi} + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_k t + \alpha_{hi} - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 38})$$

$$\begin{bmatrix} v_{1ho} \\ v_{2ho} \\ v_{3ho} \end{bmatrix} = V_{mho} \begin{bmatrix} \sin(\omega_k t + \alpha_{ho}) \\ \sin(\omega_k t + \alpha_{ho}) \\ \sin(\omega_k t + \alpha_{ho}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 39})$$

Si le réseau n'était ni déséquilibré, ni perturbé nous devions avoir une puissance fournie qui dépend uniquement du fondamental, et elle sera donnée par [22]:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T P_{sfd}(t) dt \quad (\text{IV.40})$$

En calculons l'intégrale on aura :

$$P_s = \left(\frac{3}{2}\right) v_{mfd} i_m \quad (\text{IV.41})$$

Et il reste à injecter la puissance $P = P_{sfi} + P_{sfo} + P_{shd} + P_{shi} + P_{sho}$ à travers le système de conversion constitué du filtre actif par la MADA met en parallèle avec le réseau.

IV.4.2. Identification des perturbations de tension

Dans l'objectif de séparer les tensions perturbatrices de la composante fondamentale directe de la tension du réseau électrique, plusieurs méthodes d'identification sont envisageables. Les plus connues, utilisant deux bases différentes de calcul, vont être détaillées. Leurs limites ainsi que leurs difficultés de mise en œuvre seront discutées et une nouvelle méthode d'identification va être proposée [18].

IV.4.3. Méthodes basées sur le calcul des composantes symétriques :

Ces méthodes se basent sur le calcul des composantes symétriques de la tension du réseau électrique. Les tensions composées d'un réseau électrique en montage triangle sont données par l'équation suivante [18]:

$$[V_{abc}] = [V_a \quad V_b \quad V_c] ^t$$

Ces tensions peuvent être décomposées en trois séquences positives v_d (composante directe), négatives v_i et homopolaire v_o :

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_i \\ v_o \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$$

Considérant que le réseau étudié est composé de trois fils (système isolé), les composantes homopolaires V_o deviennent nulles. Afin de calculer la composante négative, le premier paramètre de compensation doit être défini. Il s'agit du facteur négatif δ appelé aussi taux inverse, qui est le rapport entre les composantes négative et positive de tension [18]:

$$\delta = \frac{V_i}{V_d}$$

Afin de calculer la composante positive nécessaire pour réguler la tension de la charge à protéger, le deuxième paramètre de compensation doit être défini. Il s'agit du facteur d'amplitude M_p qui est le rapport entre la composante positive et la tension de référence $V_{désé}$.

$$M_p = \frac{V_d}{V_{désé}}$$

Les tensions composées nécessaires pour compenser les tensions négatives sont :

$$\begin{cases} [I_c] = -V_i[T] \\ [T] = [1 \quad a \quad a^2]^t \end{cases}$$

Ainsi :

$$[I_c] = -\delta M_p [T]$$

Les tensions négatives simples ($V_{i1,2,3}$) peuvent être obtenues par l'équation suivante :

$$[V_{i1,2,3}] = \frac{U_c}{1-a} = -\delta M_p \frac{[T]}{1-a}$$

La référence des courants qui sert à la compensation du déséquilibre est obtenu en calculons la valeur des composantes inverse et homopolaire, le filtre actif est conçu de façon à ce qu'il génère ces composantes, ceci est possible en appliquons la transformé inverse de Fortescue [32].

Et l'on obtient :

$$\begin{bmatrix} i_{1ref} \\ i_{2ref} \\ i_{3ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ 0 \\ i_i \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 42})$$

Ou i_o, i_i sont respectivement la composante homopolaire et la composante inverse. Et puisque le système utilisé en simulation est isolé, la composante homopolaire est nul, ainsi on aura [32]

$$\begin{bmatrix} i_{1ref} \\ i_{2ref} \\ i_{3ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_i \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 43})$$

Et l'on aura :

$$i_{iref} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1ref} + ai_{2ref} + a^2i_{3ref}) \quad (IV.44)$$

Le schéma d'équilibrage et filtrage sera :

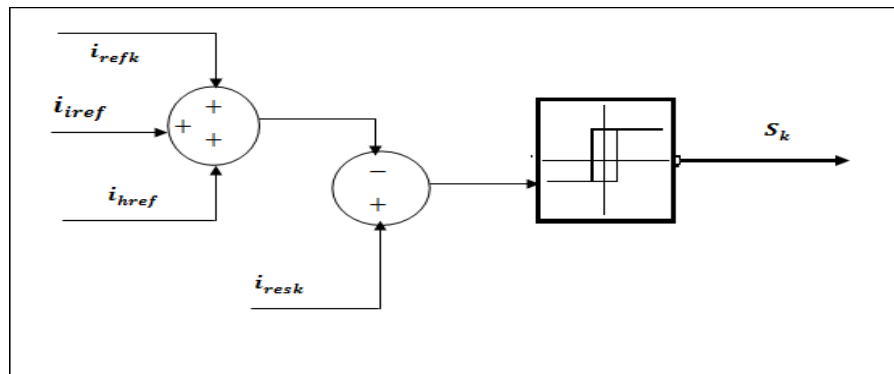


Fig. IV.4 : Principe de la stratégie de commande par hystérisés pour le filtrage

i_{href} : est obtenu en mesurant le courant consommé par la charge non linéaire

i_{iref} : est obtenu en calculons la composante inverse du courant à l aide de la transformation de Fortescue.

Ainsi le courant de référence qui va permettre l'équilibrage de la tension du réseau, l'élimination des harmoniques et la compensation de l'énergie réactif est donné par :

$$i_{inj} = i_h + i_i + i_{fr} \quad (IV.45)$$

IV.5. Système triphasé déséquilibré

Le système simulé est constitué d'une source de tension sinusoïdale (220 /380 V, 50Hz), qui va alimenter une charge triphasé déséquilibré. Les trois pôles qui constitué cette charge ne sont pas les même.

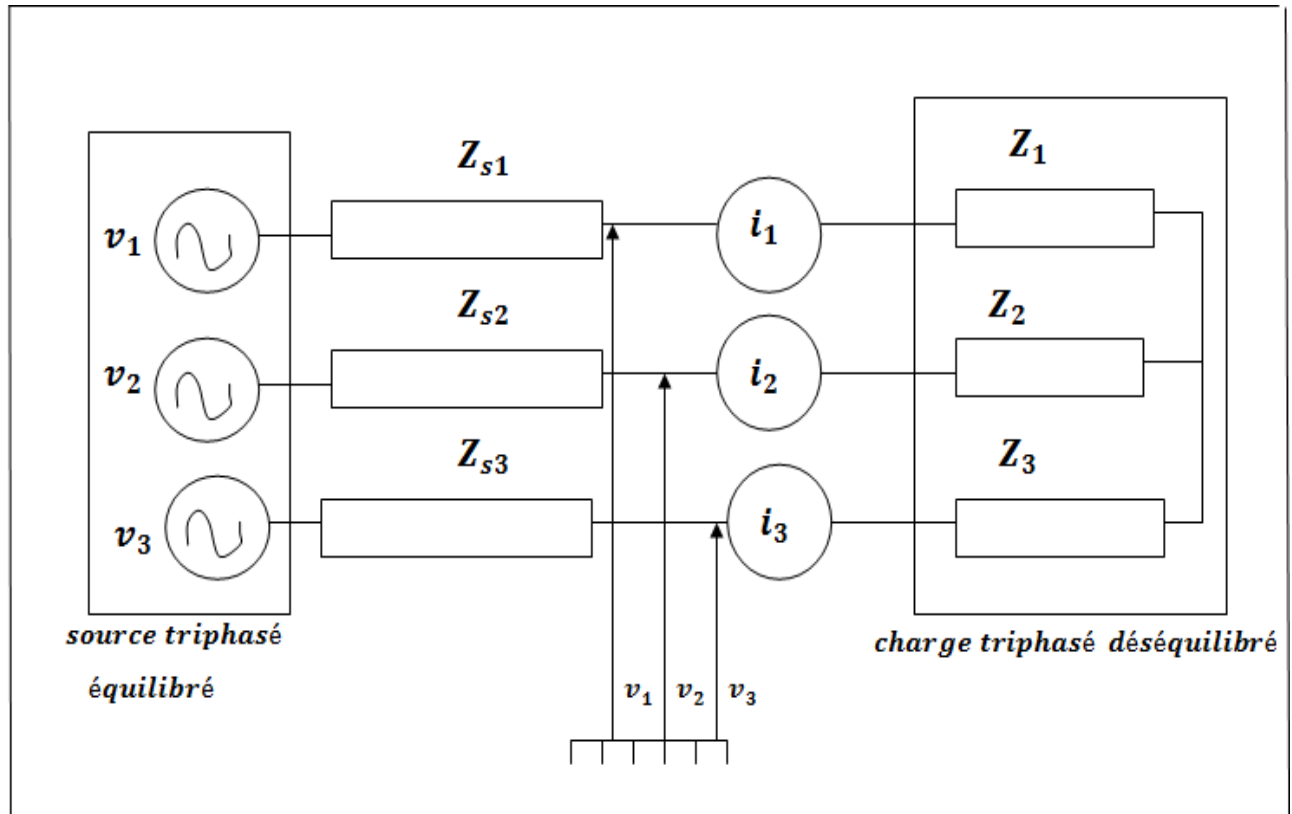


Fig. VI.5: Schéma du système déséquilibré simulé

VI.5.1. Résultats des simulations

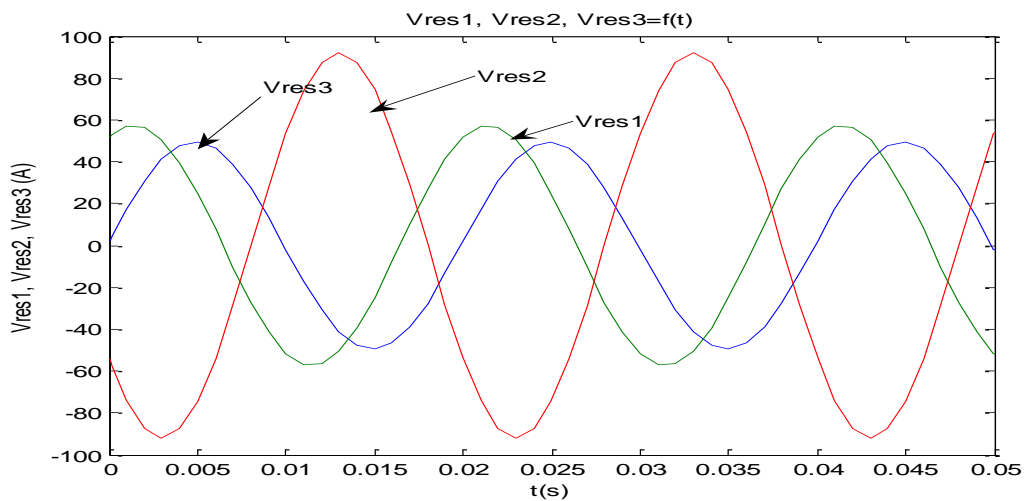


Fig.

VI.6: allure des courants Vres1, Vres2, Vres3.

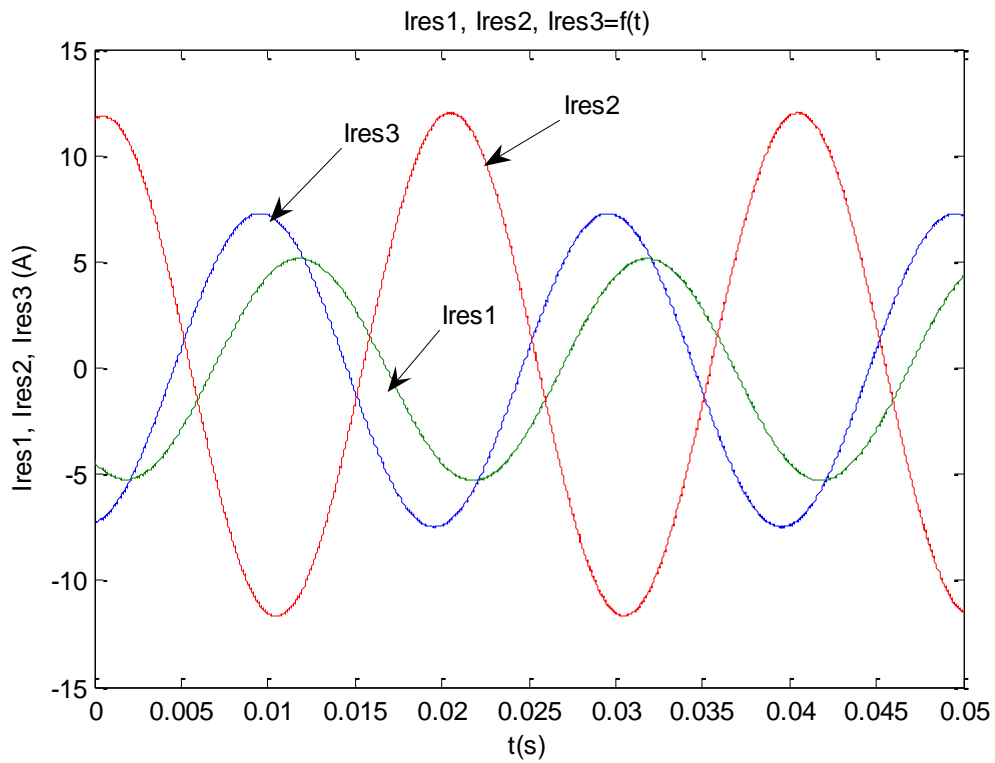


Fig. VI.7 : allure des tensions Ires1, Ires2, Ires3.

VI .5.2. Déséquilibre sans intégration de l'effet de la charge non linéaire

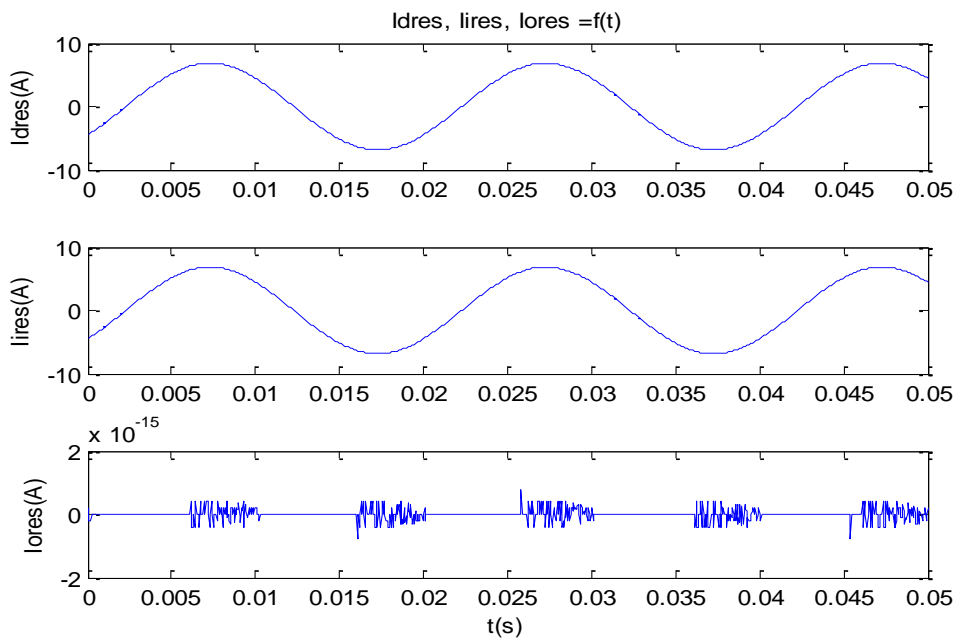


Fig. VI.8: allure des courants Idres, Iires, Iores pour le système déséquilibré sans harmoniques

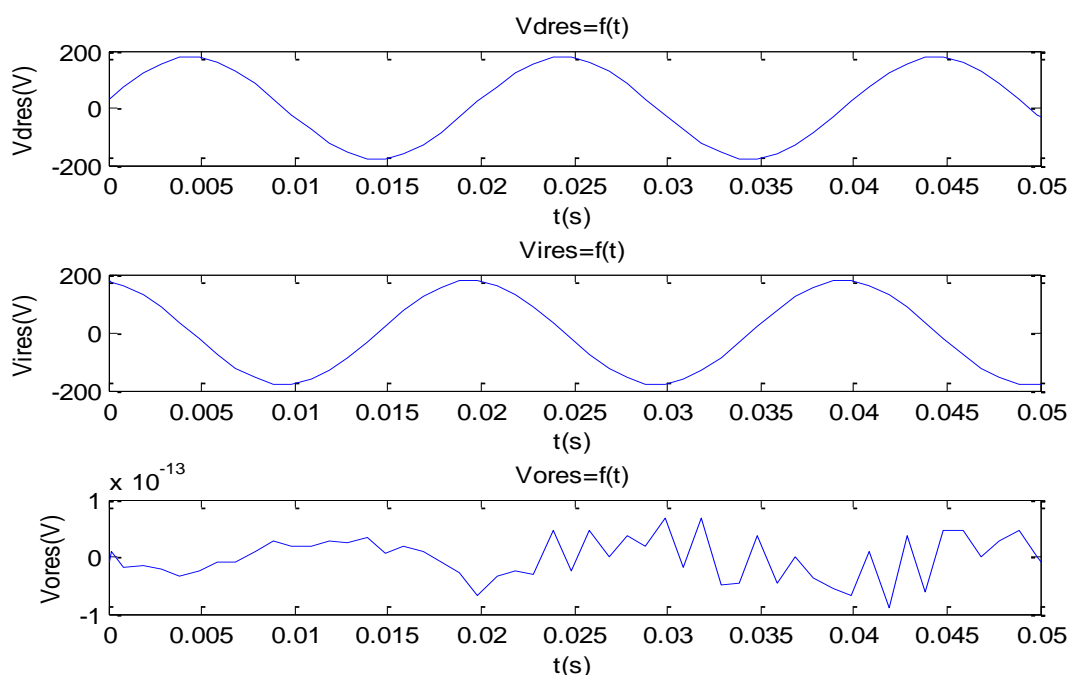


Fig. VI.9: allure des tensions V_{dres} , V_{ires} , V_{ores} pour le système déséquilibré sans harmonique.

Interprétations

Les courbes précédentes montre que l'intégration d'une charge non symétrique (une charge triphasée qui présente des impédances différentes) sur un réseau crée un déséquilibre en courant du système triphasé, ceci se justifie par les amplitudes des courants qui sont différentes, ce a son tour crée un déséquilibre en tension à travers l'impédance de la source. L'application de la transformation de Fortescue aux courants et tension montre qu'ils sont décomposables en deux composantes dites composante directe et inverse.

Après connexion d'une charge non symétrique (dans notre simulation on a utilisé une charge triphasé qui présentent des impédances déférentes $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$) au réseau triphasé on voit que les ondes électriques respectivement celle de la tension et celle du courant se trouve déformés, Elles présentent des amplitudes déférents, ceci est due au faite que le courant consommé par les trois impédances qui constitué la charge n'est pas le même, ainsi il y a création d'un déséquilibré en courant. L'interaction de ces dernières avec les impédances de la source et celle des lignes crée à son tour un déséquilibre en tension.

VI.5.4. Solution adoptée pour le rééquilibrage de la tension

Elle consiste en l'injection de la composante inverse du courant engendré par le déséquilibre à travers un système de régulation à base d'énergie renouvelable.

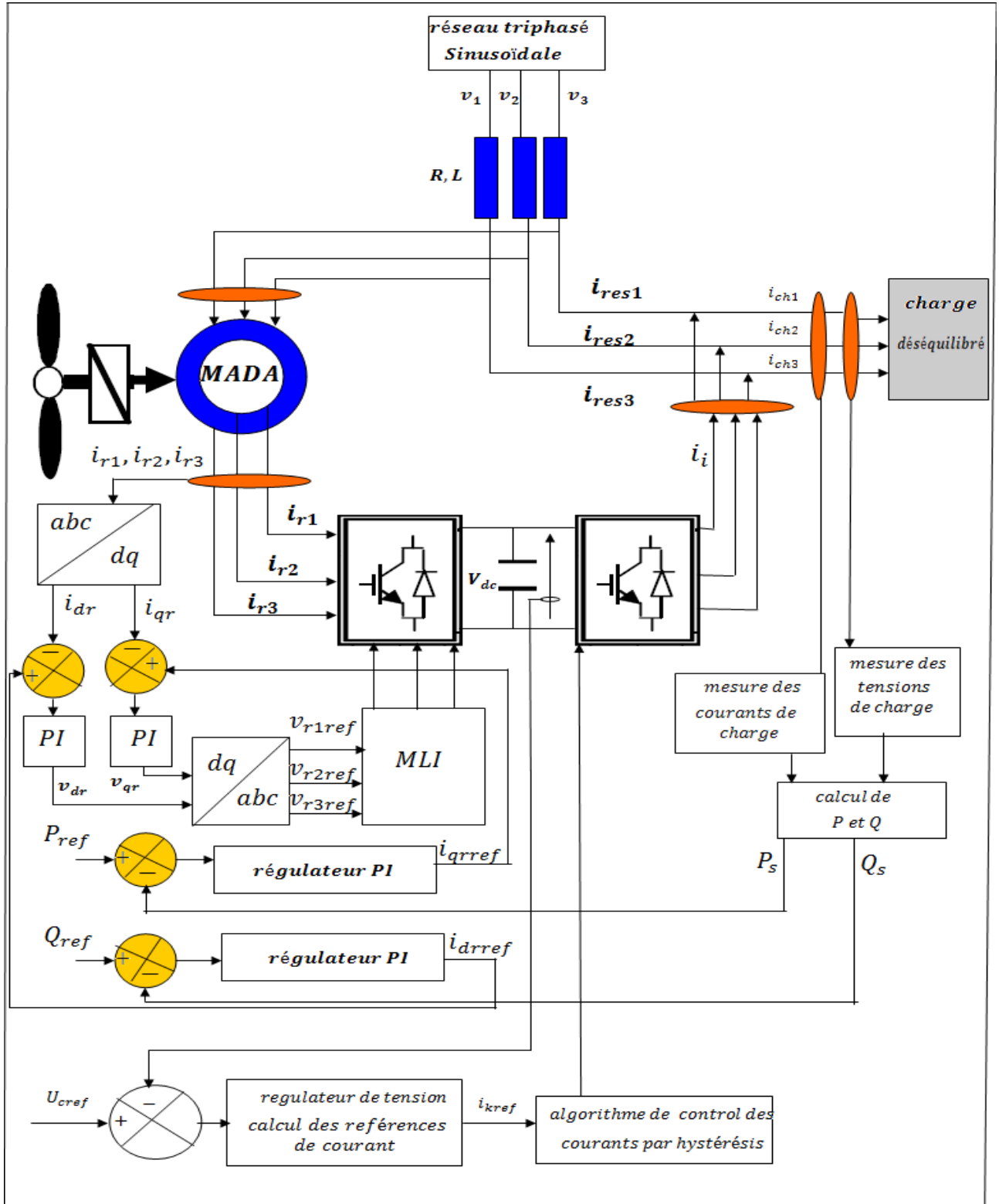


Fig. VI.10: schéma d'équilibrage sans filtrage

VI.5.5. Résultats après équilibrage

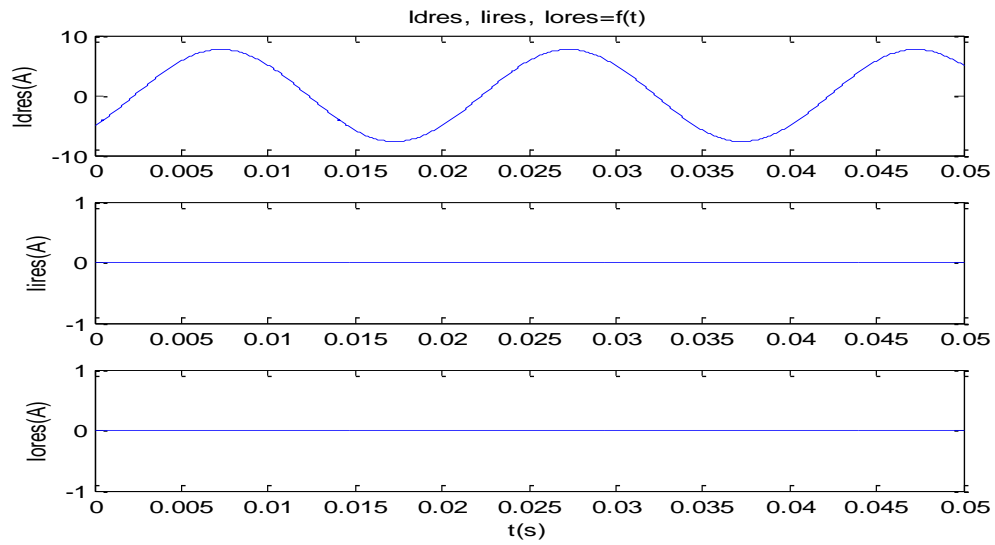


Fig. VI.12: allure des courants I_{dres} , I_{ires} , I_{ores} après équilibrage

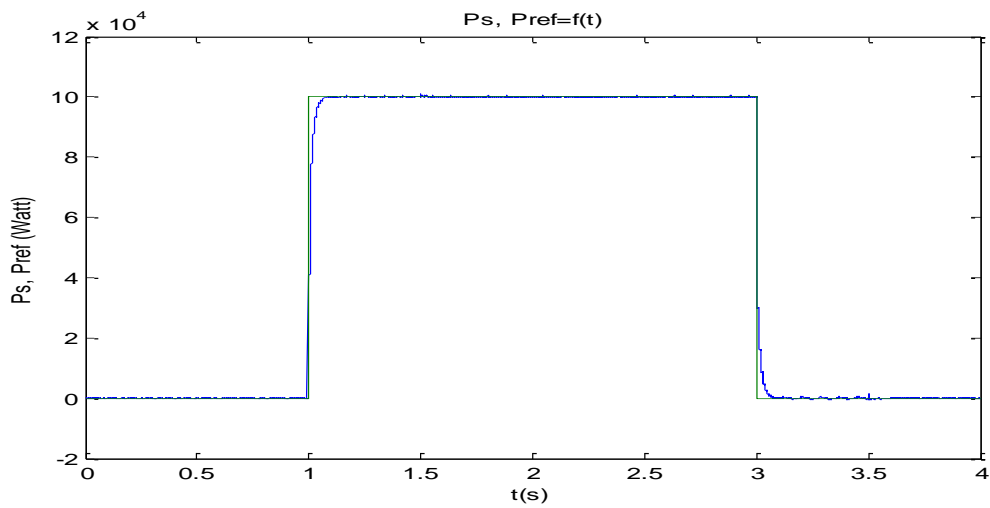


Fig. VI.15: allure de P_s et P_{ref}

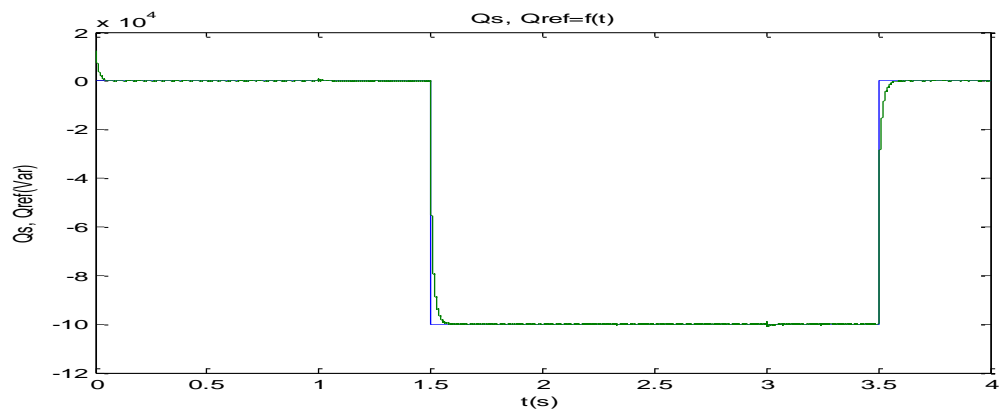


Fig. VI.16: allure de Q_s et Q_{ref}

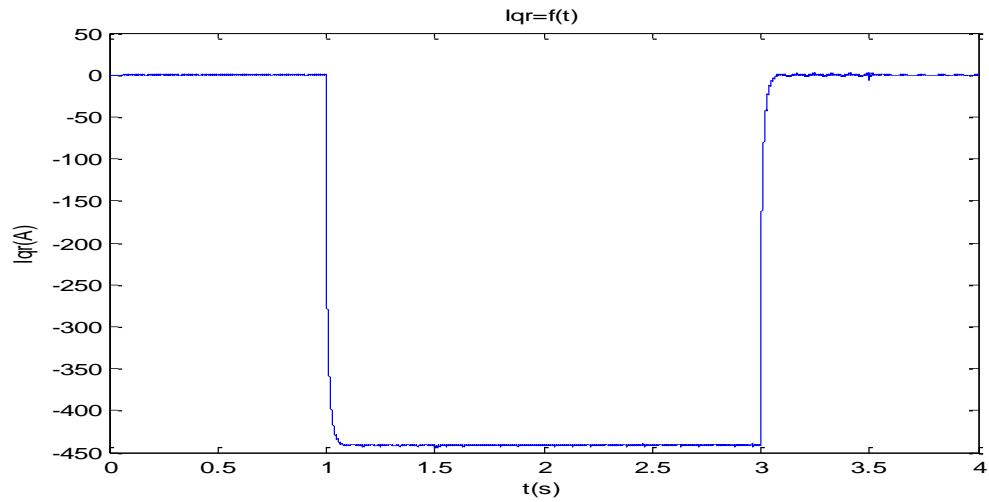


Fig. VI.13: allure de i_{qr}

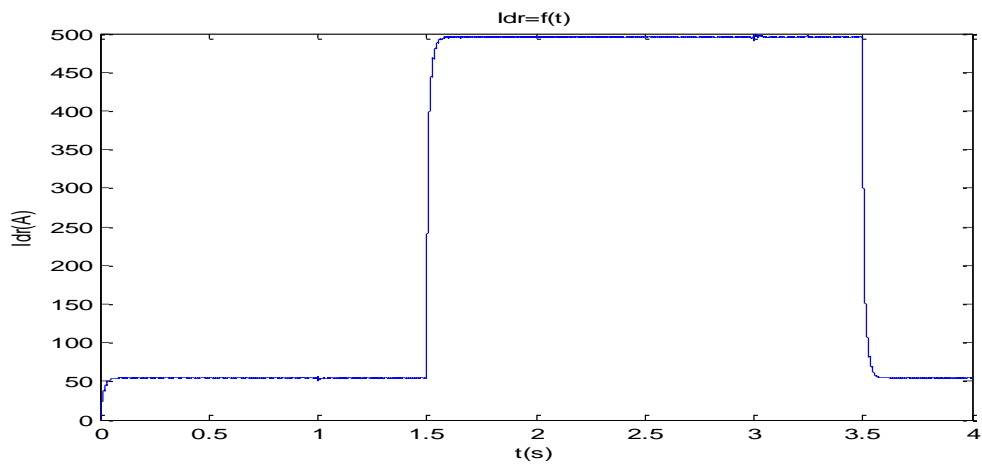


Fig. VI.14: allure de i_{dr}

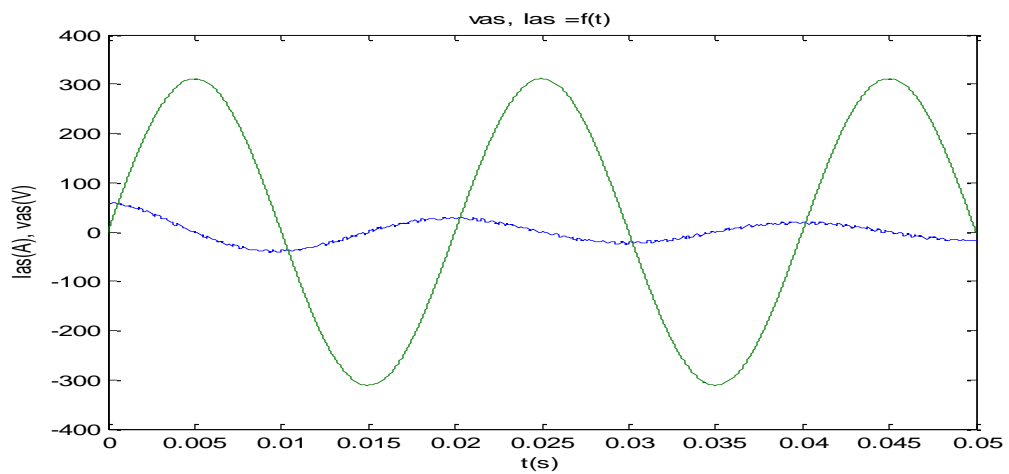


Fig. VI.17: allure des tensions d'une phase statorique i_{as} et v_{as}

VI.6. Système triphasé déséquilibré avec une charge non linéaire

On garde le système déséquilibré utilisé précédemment et on introduit une charge non linéaire comme le montre le (Fig. VI.18).

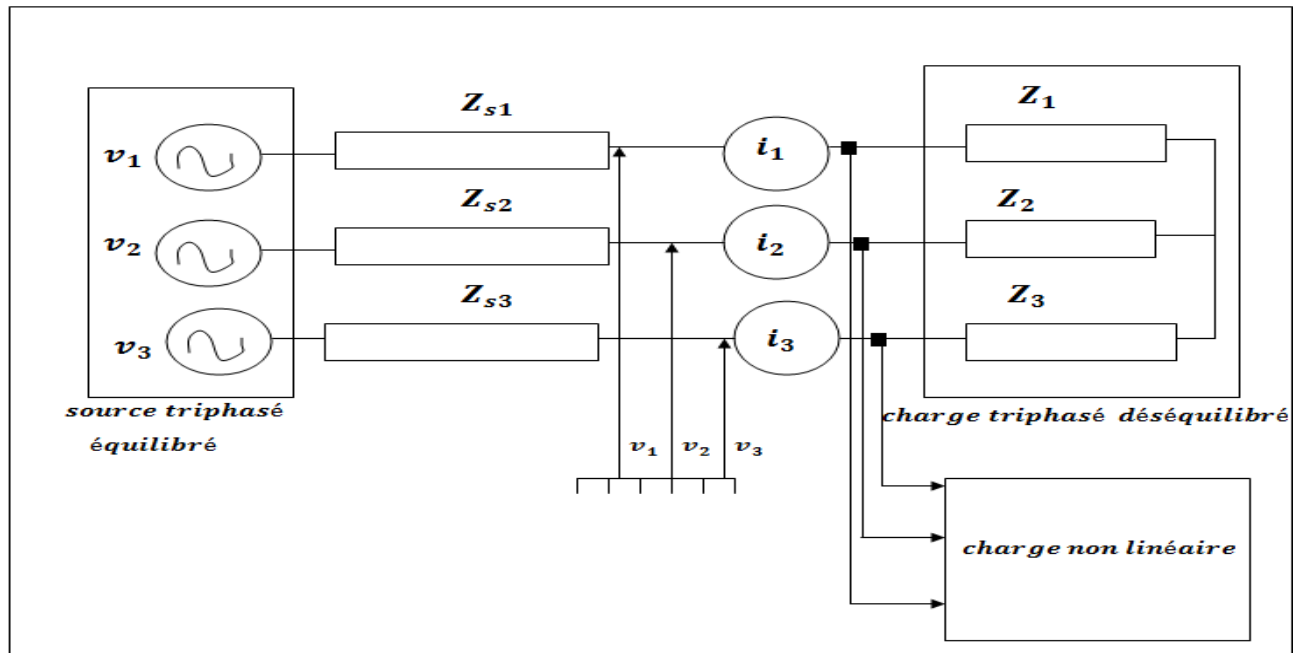


Fig. VI.18: Schéma du système déséquilibré pollué simulé

V.6.1. Résultats des simulations :

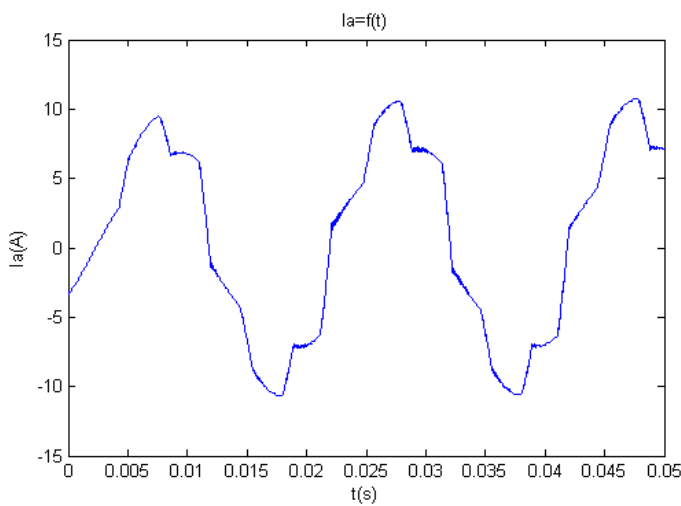


Fig. VI.19: allure du courant I_a .

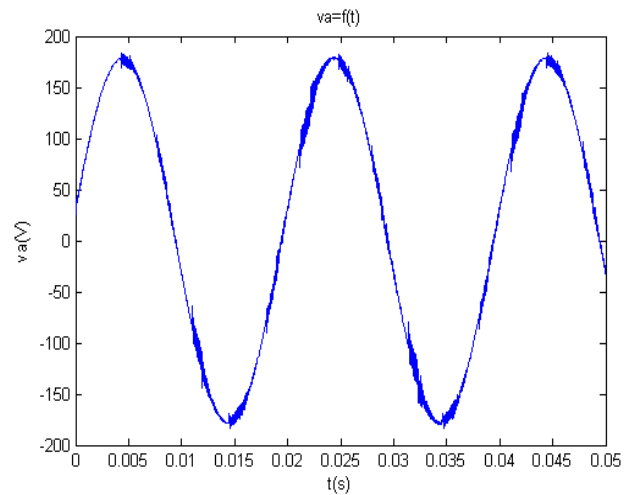


Fig. VI.20: allure de la tension V_a .

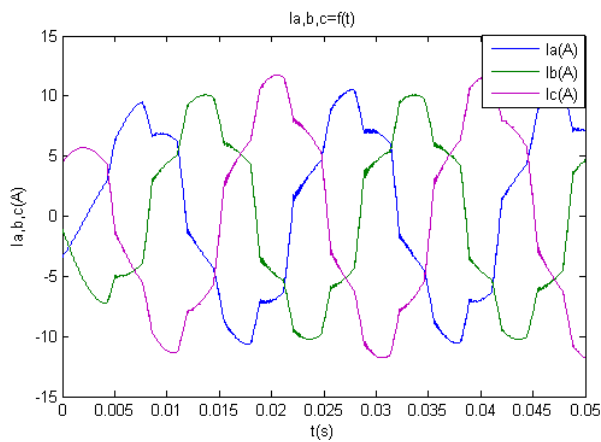


Fig. VI.21: allure des courants du réseau Ia, Ib, Ic.

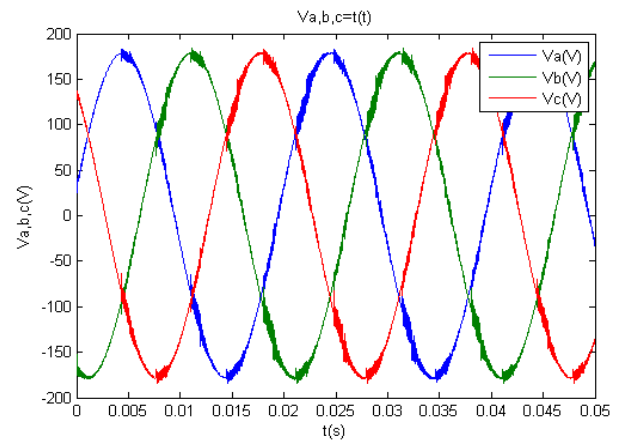


Fig. VI.22: allure des tensions du réseau Vb, Ib, Ic.

Interprétations :

Dans ce cas en connecte à la fois les deux charges utilisé précédemment (la charge non linéaire et la charge non symétrique) au réseau de tension triphasé sinusoïdal, on voit que les ondes électriques respectivement de tensions et de courants présentent des ondes d'amplitude déférents de forme non sinusoïdales.

Le calcul du facteur de puissance nous donne ($S = 1878.2 \text{ VA}$, $P = 1297 \text{ Watt}$,

$Q = 721.1 \text{ Var}$ et on aura $F_p = \frac{P}{S} = 0.6905$), On voit que le F_p est trop dégradé.

Ont utilisant la décomposition à l'aide de la transformation de Fortescue pour la tension du réseau, on voit qu'ils existent simultanément les deux composantes directe et inverse

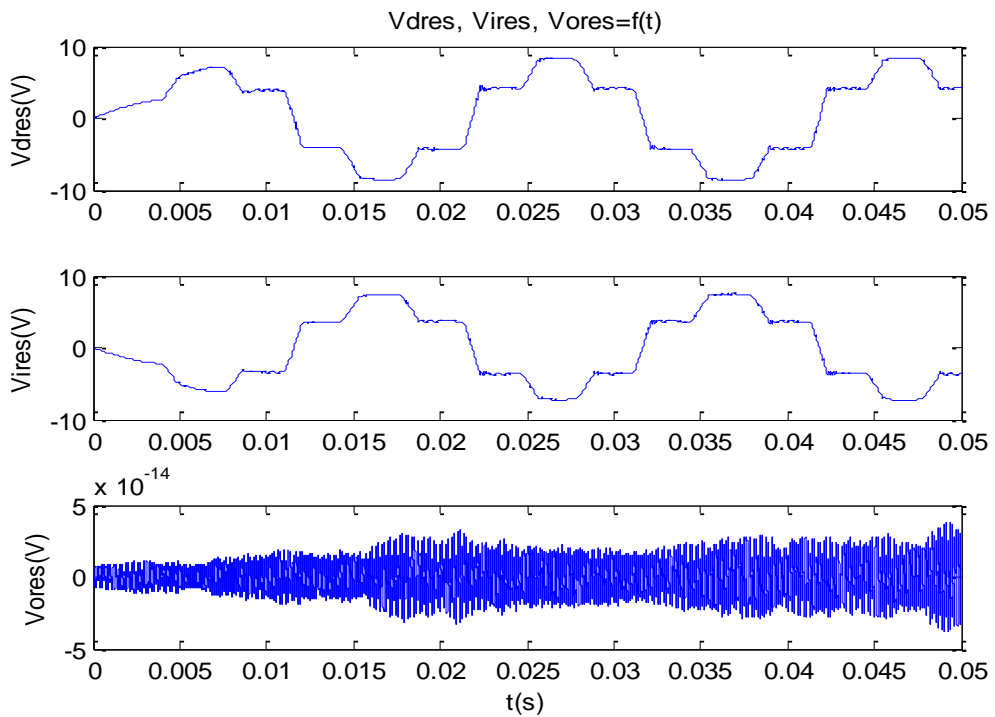


Fig. VI.23: allure des courants I_{dres} , I_{ires} , I_{ores} pour le système déséquilibré avec charge non linéaire

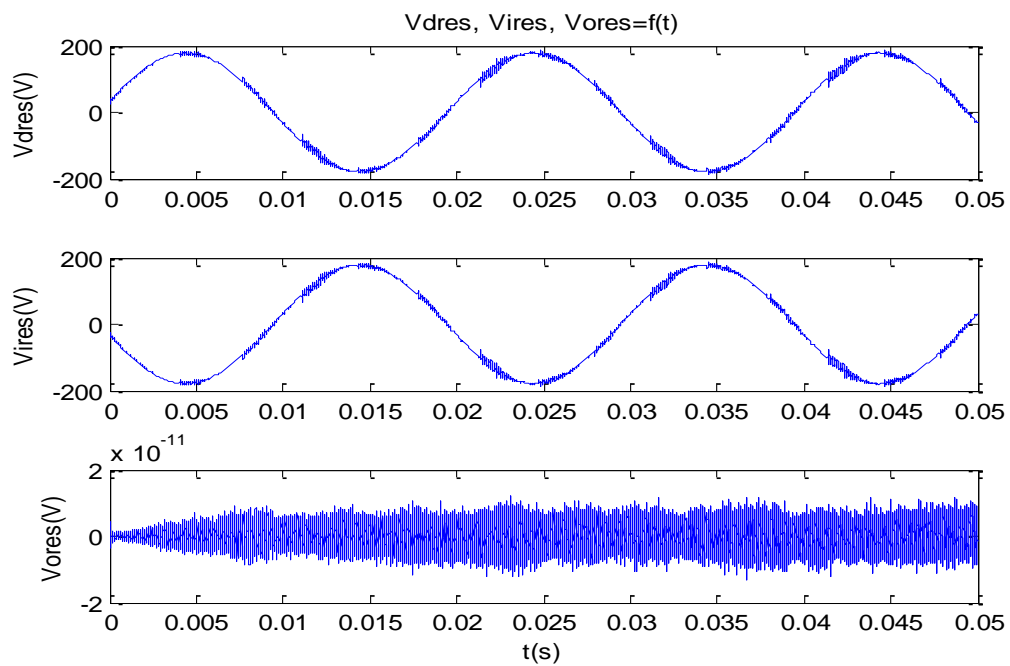


Fig. VI.24: allure des tensions V_{dres} , V_{ires} , V_{ores} pour le système déséquilibré avec charge non linéaire.

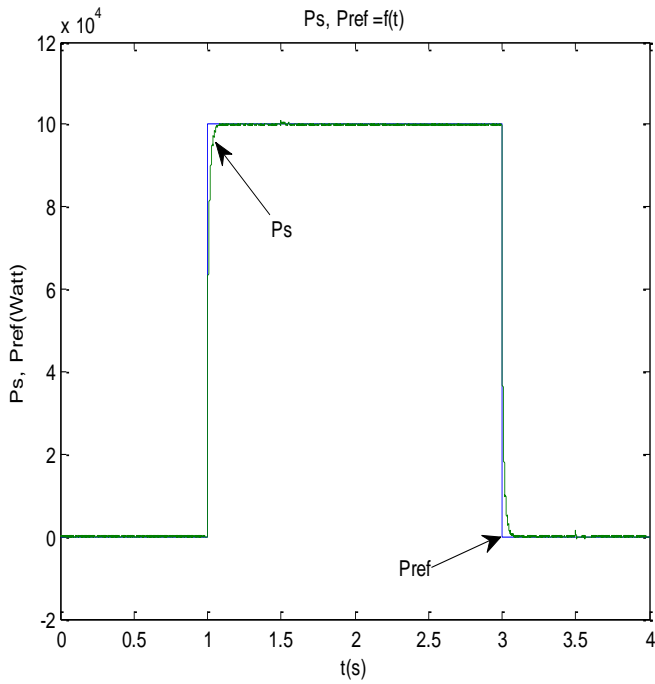


Fig. VI.25: allure des P_s et P_{ref}

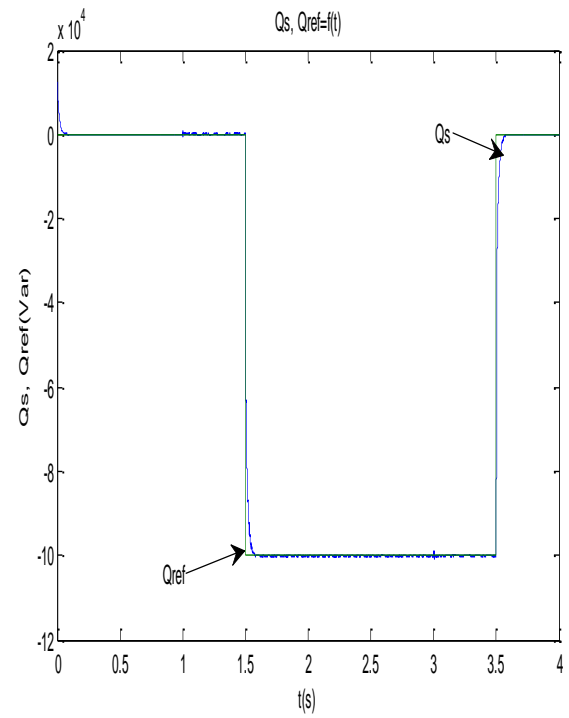


Fig. VI.26: allure de Q_s , Q_{ref}

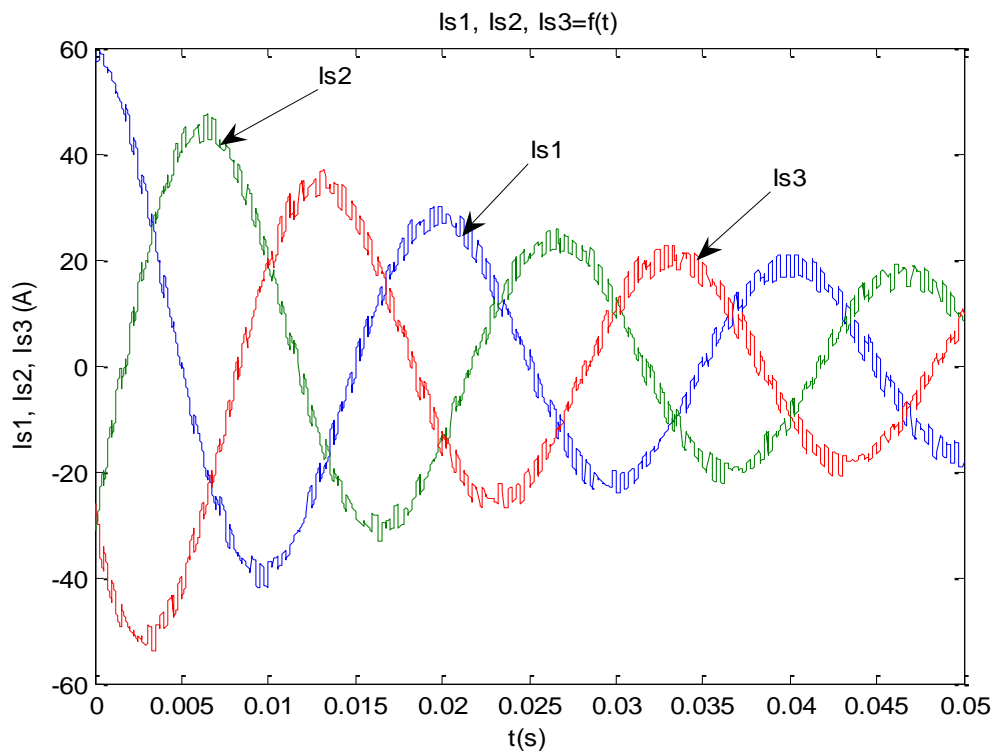


Fig. VI.27: allure des courants statoriques I_{s1} , I_{s2} , I_{s3} .

VI.6.3. schéma du principe de fonctionnement du système d'équilibrage et de filtrage

Elle consiste en l'injection à la fois de la composante inverse du courant engendré par le déséquilibre et le courant harmonique nécessaire pour éliminer la pollution harmonique à travers un système de régulation à base d'énergie renouvelable.

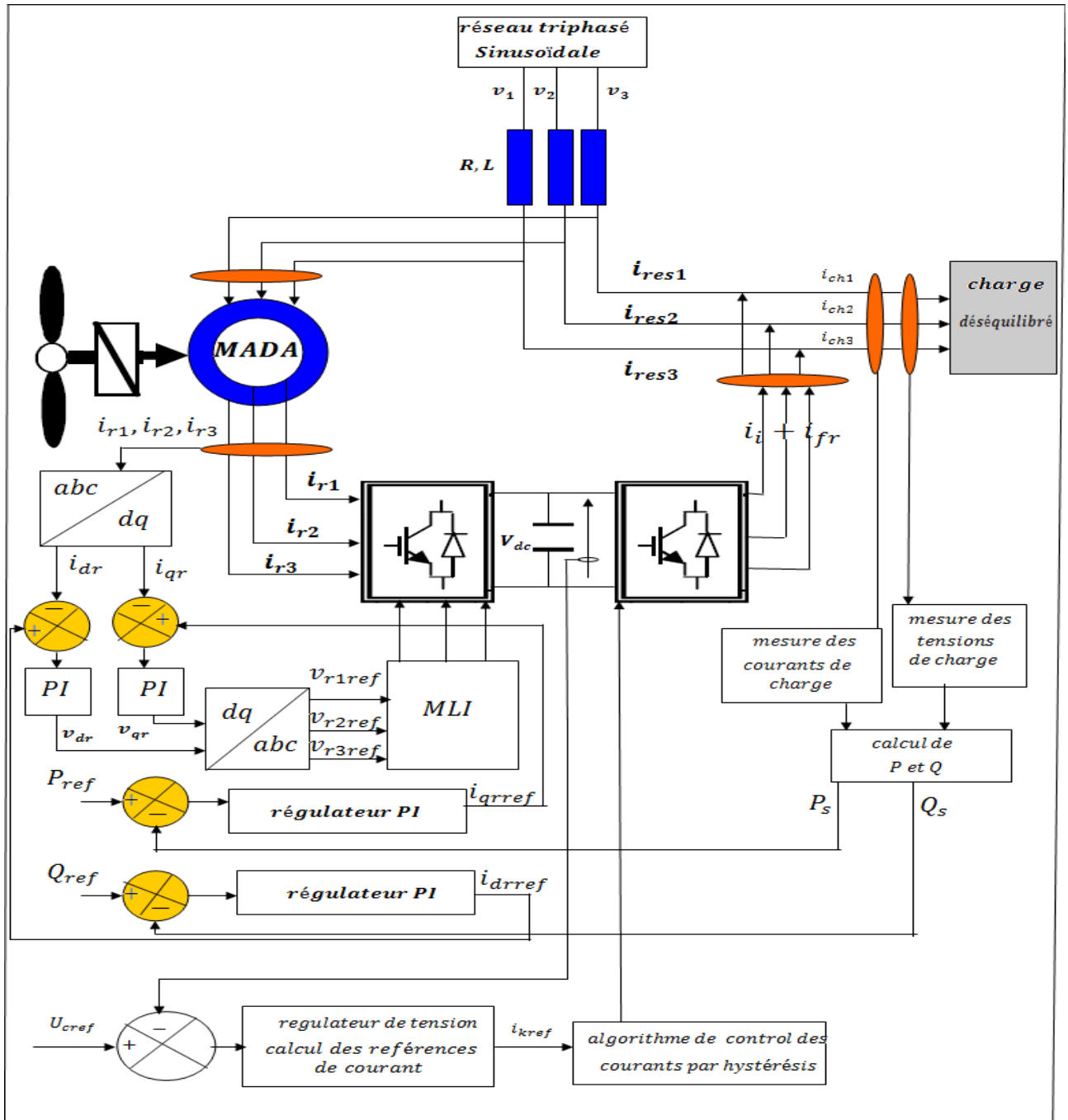


Fig. VI.28: schéma d'équilibrage avec filtrage

VI.6.4. Résultats des simulations :

Après injection de la composante inverse du courant.

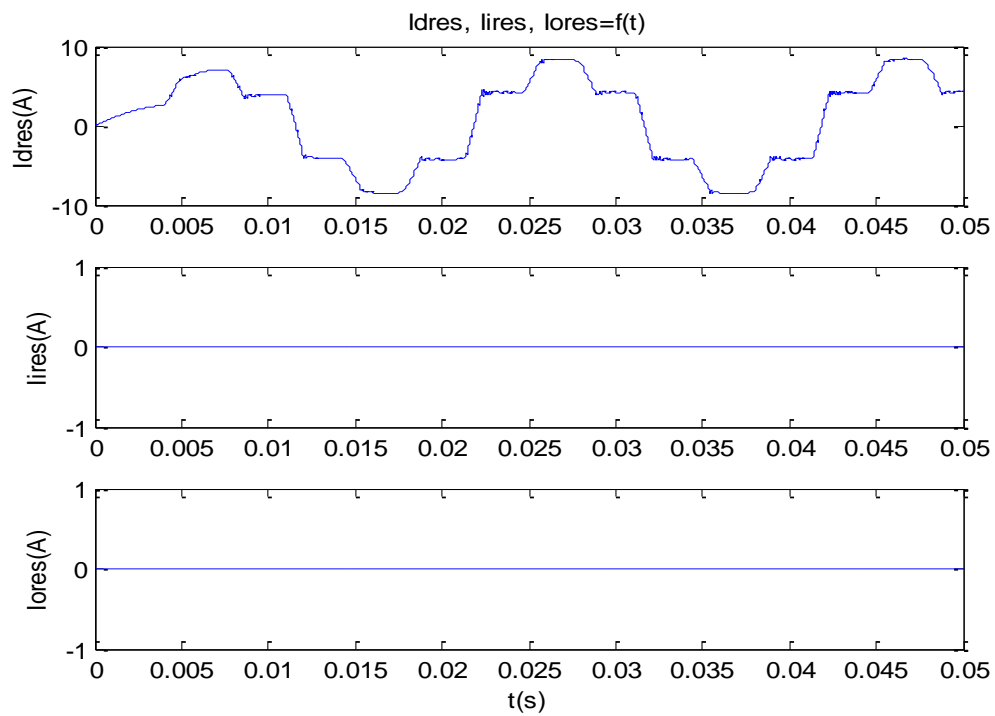


Fig. VI.30: allure des courants I_{dres} , I_{ires} , I_{ores} après équilibrage

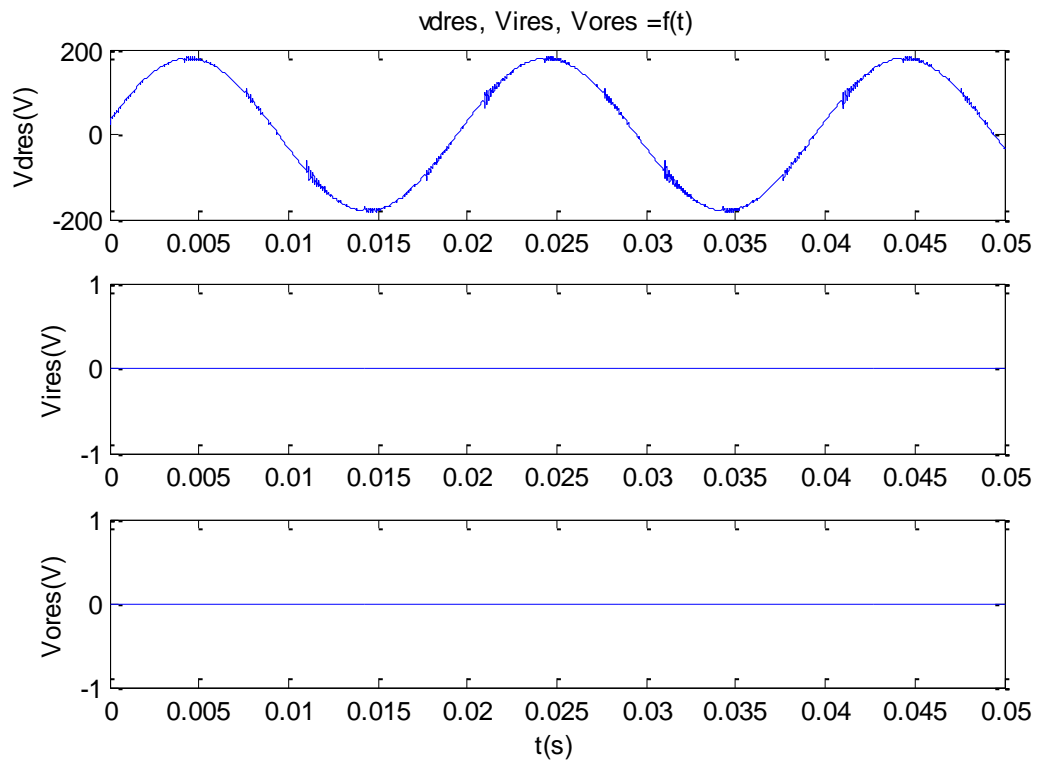


Fig. VI.31: allure des courants V_{dres} , V_{ires} , V_{ores} après équilibrage

Après injection a la fois de la composante inverse du courant et du courant harmonique consommé par la charge non linéaire.

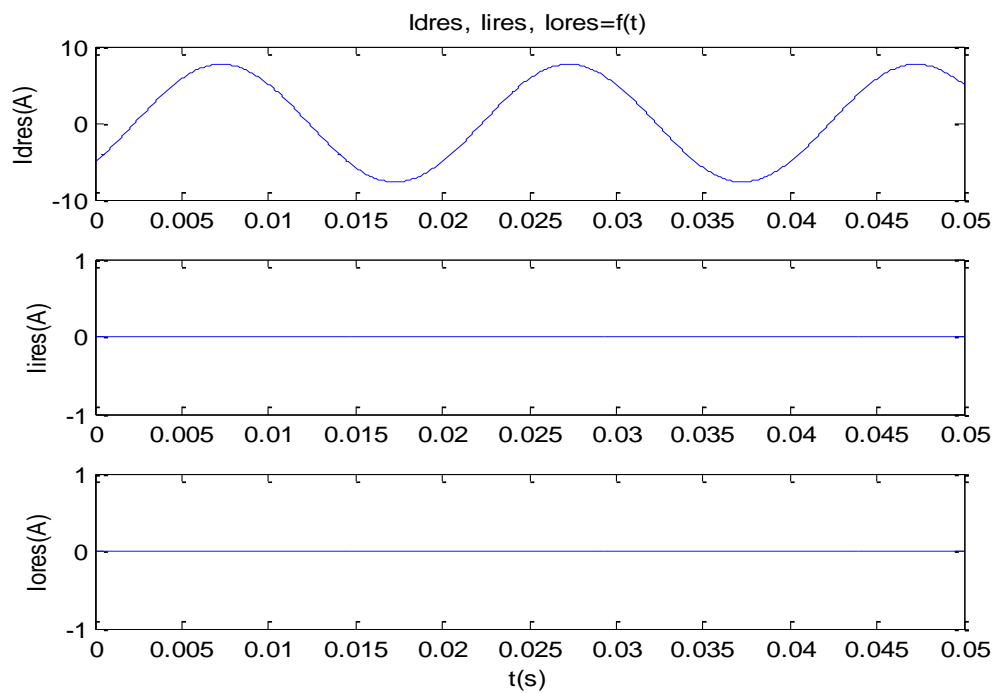


Fig. VI.32: allure des courants I_{dres} , I_{ires} , I_{ores} après équilibrage et filtrage

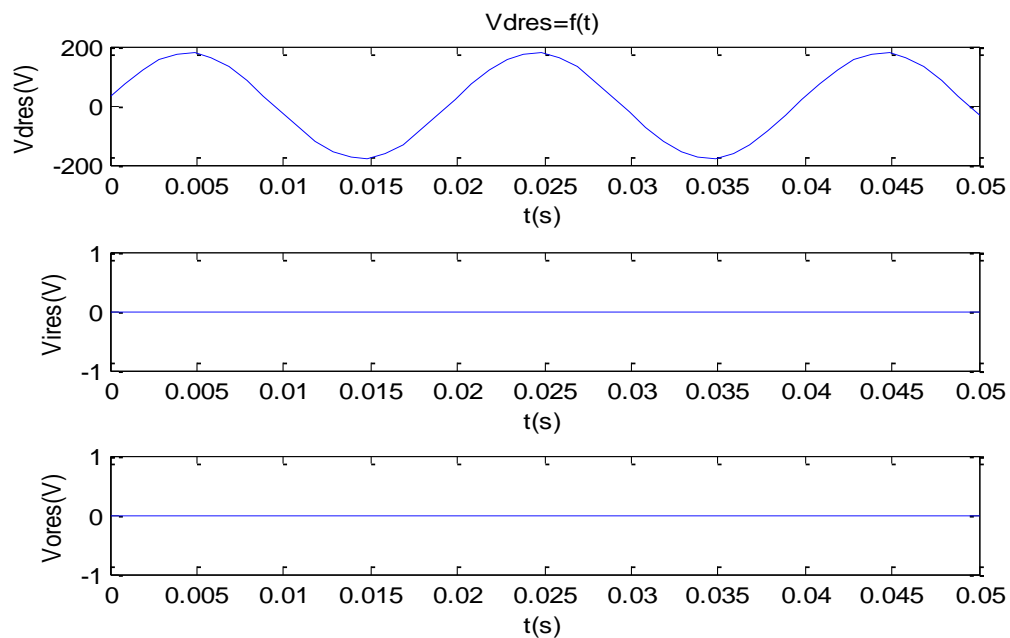
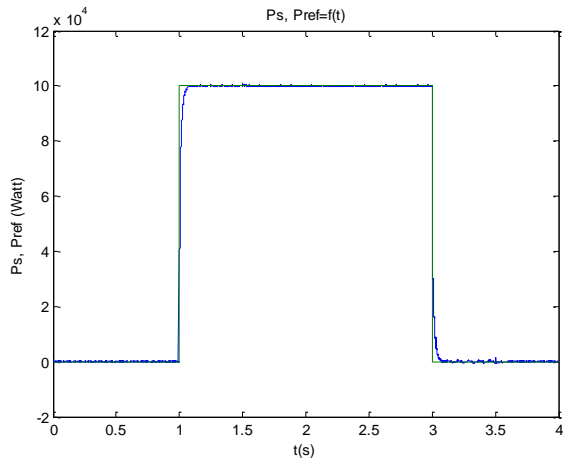


Fig. VI.33: allure des courants V_{dres} , V_{ires} , V_{ores} après équilibrage et filtrage



VI.34: allure de P_s, P_{ref}

Fig.

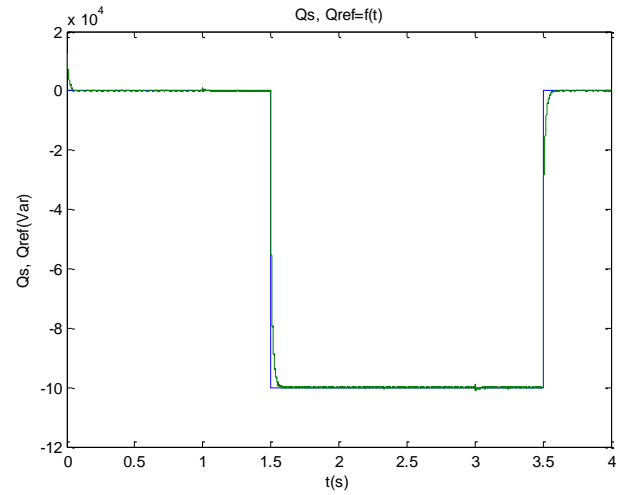


Fig. VI.35 : allure de Q_s, Q_{ref}

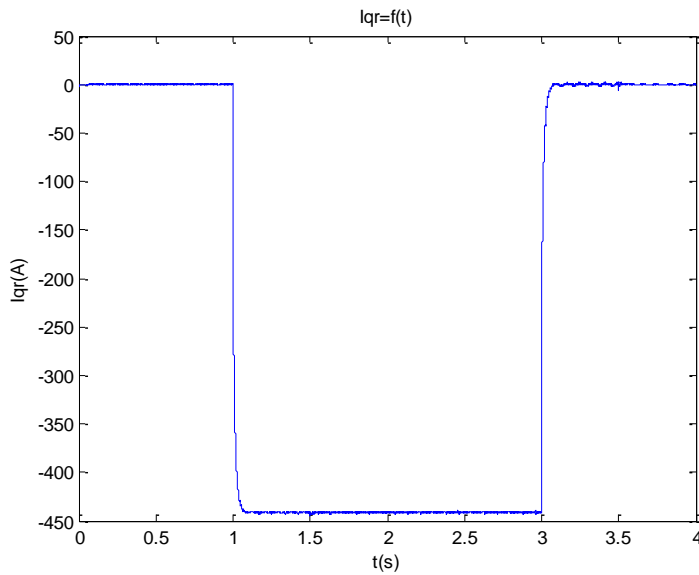


Fig. VI.36: allure des courants I_{qr}

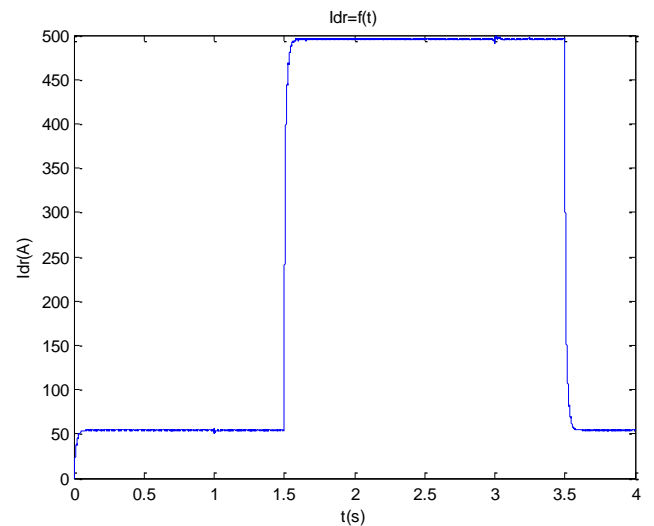


Fig. VI.37: allure des courants

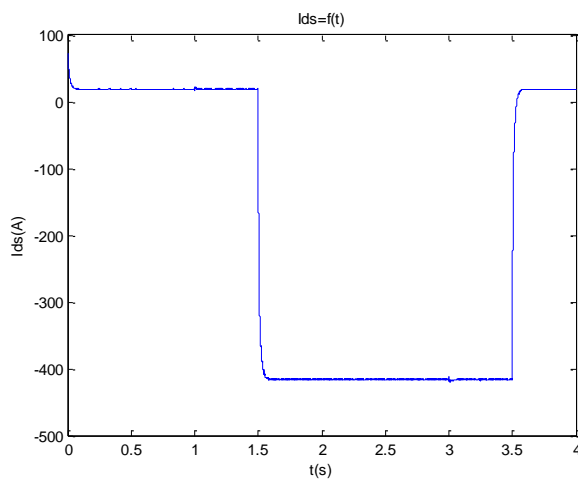


Fig. VI.38: allure des courants I_{ds}

I_{dr}

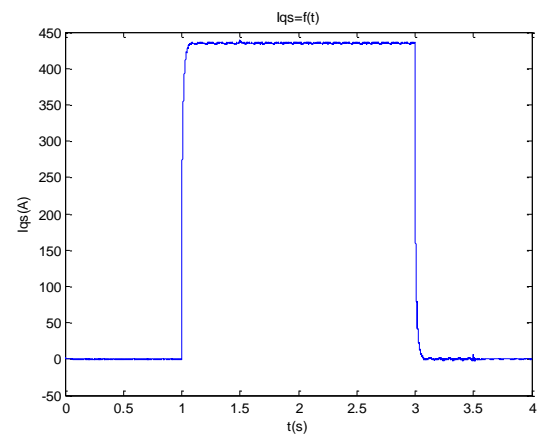


Fig. VI.39: allure des courants I_{qs}

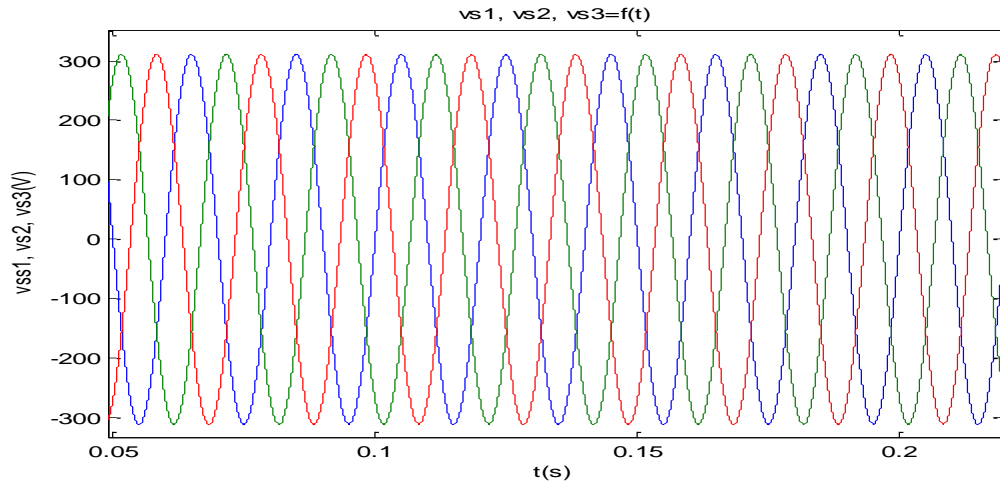


Fig. VI.40: allure des tensions statoriques $vs1, vs2, vs3$

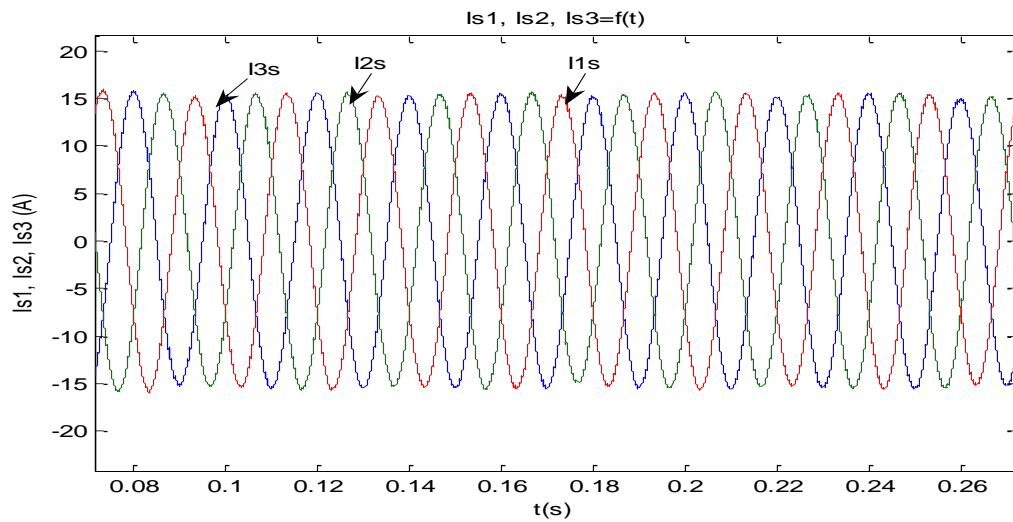


Fig. VI.41: allure des courants statoriques $Is1, Is2, Is3$

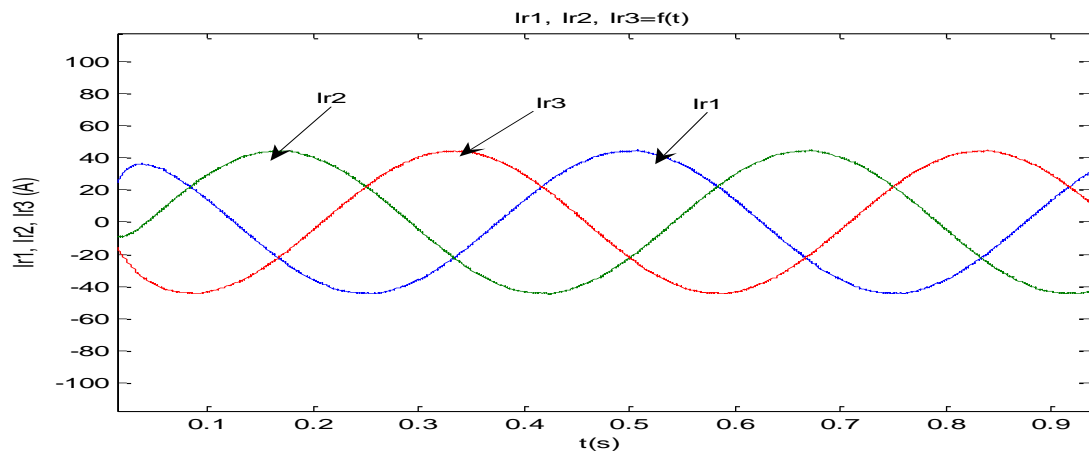


Fig. VI.42: allure des courants rotoriques $Ir1, Ir2, Ir3$.

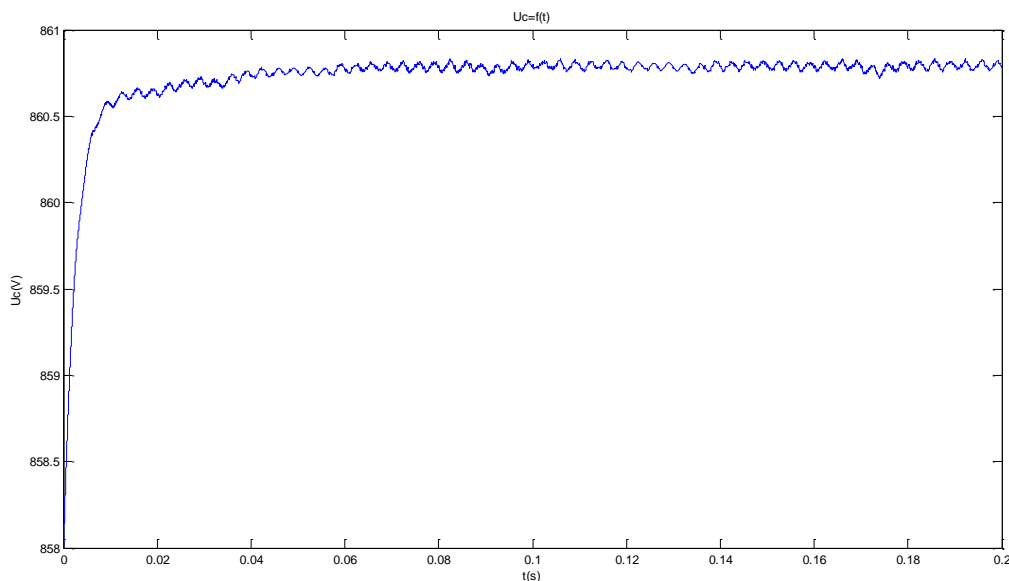


Fig. VI.44: allure du bus continu U_c

VI.6.5. Interprétations :

Dans ce paragraphe on a utilisé le filtre actif par la MADA pour injecté simultanément la composante inverse du courant et le courant nécessaire pour compensé les harmoniques.

D'après les courbes obtenues on voit que le courant du réseau i_{res} et la tension du réseau v_{res} ne sont plus déséquilibré, et leurs décomposition en composantes symétriques montre qu'il y a que la composante directe, car la composante inverse est injecté à travers le filtre.

Les puissances active et réactive suivent leurs références, et la tension du bus continu se stabilise à la valeur voulue (860V).

Le flux statorique a la même forme obtenue dans le chapitre II pour la commande de la MADA, et les courants triphasés statoriques sont parfaitement sinusoïdaux et équilibré donc il y a plus ni déséquilibre, ni harmoniques dans le stator.

VI.7. Comparaison entre les modes de fonctionnement du système :

D'après les résultats vus précédemment dans ce chapitre on en déduit que l'état de fonctionnement de la MADA peut être influencé par l'existence de perturbations sur le réseau, de tel façon que :

Lorsqu'on avait un déséquilibre les courant statoriques de la MADA était déséquilibré, ils présenté des amplitudes défèrent, et quand on a rééquilibré le système ils sont devenus équilibré (de formes sinusoïdales qu'ont la même amplitude).

Quand on a introduit à la fois une charge non linéaire et une charge non symétrique, c.-à-d. on a au même le déséquilibre et les perturbations harmoniques on voit que les courants statorique sont simultanément déséquilibré et pollué, après filtrage et équilibrage du système on voit que les courants statoriques devient purement sinusoïdales et équilibré.

De ce qui précède, on en déduit que l'état de la tension du réseau influe sur le bon fonctionnement des dispositifs électrique connectés.

VI.8. Conclusion

L'existence d'une charge non symétrique sur un réseau électrique donnée crée un déséquilibre en courant, qui crée à son tour un déséquilibre en tension engendré par l'impédance de la source. Si nous décomposant les tensions en composantes (direct, inverse et homopolaire), on voit qu'il y a à la fois la composante directe et inverse.

A l'aide d'un système de régulation à base de l'énergie éolienne on injecte la composante inverse du courant consommé par la charge, ainsi, la source ne fournira que la composante directe du courant, et le déséquilibre sera éliminé.

Dans le deuxième cas on a introduit à la fois une charge polluante et une charge non symétrique, les résultats été l'existence des deux composantes (directe et inverse) avec une forme non sinusoïdale due à l'introduction de la charge non linéaire.

On utilise le même système de régulation seulement au lieu d'injecté juste la composante inverse on injecte à la fois la composante inverse et ce que consomme la charge non linéaire, ainsi on élimine la perturbation et le déséquilibre.

Conclusion générale

Vu que l'impact des perturbations sur installation électrique peut être désastreux sur les différents équipements qui présente souvent des sensibilités variable suivant leur utilisation, la grande sensibilité à un des quatre paramètres introduits dans l'annexe II implique le nécessité de le gardé dans les normes d'utilisation pour avoir un bon fonctionnement des appareils.

Parfois une perturbation relativement importante peut même induire la détérioration complète de certains appareils, ou engendrer un dysfonctionnement complet (tel est le cas des appareils de mesures qui vont nous menés à des résultats complètement erronés).

Ainsi, il c'est avéré primordiale de limité l'existence des perturbations sur le réseau ont empêchant la propagation des défauts créés par certaines charges (polluante) pour les harmoniques et (non symétriques) pour le déséquilibre, ceci en faisant appel à divers techniques (technique de filtrage et rééquilibrage).

Ces dernières font souvent appel aux techniques d'électronique de puissance qui offrent une solution efficace en procurant aux charges polluantes et non symétriques l'énergie qu'elles consomment à travers des onduleurs commandés.

Le travail que nous avons présenté est dans le cadre de retrouvé une solution de dépollution et d'équilibrage des réseaux électriques en utilisant l'énergie éolienne. Les résultats de simulation ont montré que le fonctionnement en filtrage actif par la MADA est possible. De plus, le fonctionnement en filtre actif n'entraîne pas de dégradation du fonctionnement en puissance du système qui peut toujours assurer une puissance constante au réseau électrique

Pour cela, nous avons présenté dans le premier chapitre, la modélisation d'une machine asynchrone à rotor bobiné, et la commande de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet du deuxième chapitre. En effet, la mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices. Les résultats de simulation de ce modèle sur Matlab nous confirment la possibilité de double alimentation par la stabilité des différentes grandeurs de la machine étudiée.

L'établissement de la cascade alimentant le rotor à partir du réseau est dans le l'annexe I. Celle-ci est composée d'un onduleur, d'un bus continu et d'un redresseur. Grâce à l'asservissement du redresseur de courant à deux ni veaux nous avons pu imposer une référence sur la tension du bus continu pour l'alimentation de l'onduleur à deux niveaux.

Et dans l'annexe II, on a introduit le problème des harmoniques, ainsi que les différentes techniques utilisées pour minimiser leurs impacts sur le réseau, à l'aide de deux types de filtrages (filtrage passif et filtrage actif)

Dans le troisième chapitre nous avons démontré que la MADA peut agir comme un filtre actif parallèle avec de très bons résultats. La mise en place de cette commande supplémentaire pour corriger les harmoniques de courant a été possible car l'on disposait, sur la commande de la MADA, de régulation des courants générés par le convertisseur côté réseau. Pour déterminer les courants harmoniques de référence, on a utilisé la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées et on a utilisé aussi, le filtre sélectif qui des bons résultats. Le filtrage actif des courants harmoniques avec la MADA est intéressant pour un coût raisonnable. Il faut mettre deux ou trois capteurs de courant au niveau de la connexion de la charge polluante et injecter les références de courant harmonique. Ceci ne devrait pas poser de problème car la mesure des courants peut se faire au niveau des postes source où est raccordée l'éolienne.

Dans le dernier chapitre nous avons démontré que la MADA peut être utilisée pour rééquilibrer un réseau déséquilibré, ceci on injectant la composante inverse du courant, la source va donc fournir uniquement la composante directe et le réseau sera équilibré. Après on utilise la MADA pour faire à la fois filtrer les harmoniques et équilibrer la tension du réseau ceci on injectant simultanément le courant harmonique et la composante inverse du courant.

Bibliographie

- [1] **SALLOUM G.**, "Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation", Thèse de doctorat, I.N.P de Toulouse 2007, France.
- [2] **J.CHATLAIN**, "Machines Electriques ", Tome1, Dunod 1983.
- [3] **Philippe. BARRET**, "Régimes Transitoires des Machines Electriques", Edition EYROLLES, 1982.
- [27] **Patrick BRUNET** et **LTEG Henri BRISSON**, "cours Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrones", VIERZON, France.
- [4] **Razik. HUBERT**, « La machine Asynchrone à Vitesse Variable « Tome 1, Hermmes Sciences Lavoisier.
- [5] **ZERMANI Yacine** et **KERBOUAL Hamza**, "étude dynamique d'une génératrice asynchrone auto-éxcité", PFE, école nationale polytechnique Alger, promotion, 2009.
- [6] **ABBAS Mourad** et **MECHENTEL Mohamed**, "Modélisation et Commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux application à l'énergie éolienne", PFE, école nationale polytechnique Alger, promotion 2006
- [7] **Armand BOYETTE**, "contrôle et commande d'un générateur à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, décembre 2006.
- [8] **Rachid AZAIZIA**, "étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux", thèse de magister, Université Boumerdes 2008.
- [9] **François Defaÿ**, "Commande Prédicative Directe d'un Convertisseur Multicellulaire Triphasé Pour Une Application de Filtrage Actif", l'Institut National Polytechnique de Toulouse, décembre 2008.
- [10] **Stefan Laurentiu CAPITANEANU**, "Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux", Ingénieur de l'ENSEEIH de TOULOUSE, option Génie Electrique, novembre 2002.
- [11] **Frédéric POITIERS**, "Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour L'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [12] **O. GERGAUD, B. MULTON, H. BEN AHMED**, "Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance", Electrotechnique du Futur 2001, Nancy, novembre 2001.
- [13] **J. REYNAUD** and **P. PILLAY**, "Reclosing Transients in Induction Machines Including the Effects of Saturation of the Magnetizing Branch and a Practical Case study", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.9, No.2, October 1994, pp.192-197.
- [14] **BOUFASSA Rabah** et **MEKARNIA Omar**, "modélisation et commande d'une UPFC utilisé en filtrage des courants harmoniques d'un réseau électrique", PFE, école nationale polytechnique Alger, promotion juin 2007.

- [15] **TAOURIRI Mohamed** et **BENAMSILI Mustapha**, "filtrage actif par l'éolienne", PFE, école nationale polytechnique Alger, promotion 2009.
- [16] **A. GAILLARD, M. MACHMOUM** et **S. SAADATE**, «Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation», journal homepage, 2009
- [17] **S.BEAULIEU**, «Etude Et Mise Au Point D'un Filtre Actif D'harmoniques En Vue D'améliorer La Qualité De L'alimentation Électrique», Thèse de Doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [18] **Mohamad Alaa Eddin Alali**, " Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension", Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Septembre 2002.
- [19] **KHETTACHE LAID**, " Etude et commande d'un système éolienne à base d'une machine électrique double alimentée ", Magister en Electrotechnique université de Batna 2007.
- [20] **KEBBAL Med Racim** et **BAKIR Karim**, " Paramètres de la qualité de la tension d'un réseau électrique étude et analyse", PFE, ENP, ALGER Juin 2008.
- [21] **MEKKAOUI Naïma**, " Contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentée", Thèse de magister, université de Batna, 2004.
- [22] **DJEGHLOUD Hind**, " filtrage actif de puissance ", thèse doctorat, université MENTOURI Constantine, décembre 2007..
- [23] **Nils Lundström et Rikard Ströman**, " Auxiliary Module for Unbalanced Three Phase Loads with a Neutral Connection", Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, 2006.
- [24] **Vanya Ignatova**, " Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique, application aux creux de tension et à la pollution harmonique", université JOSEPH FOURIER, Octobre 2006.
- [25] **V. Ignatova, P. Granjon, S. Bacha** et **F. Dumas**, " Classification and characterization of three phase voltage dips by space vector methodology", IEEE International Conference on Future Power Systems 2005.
- [26] **JOHAN LUNDQUIST**, " On Harmonic Distortion in Power Systems", Chalmers university of Technology, Sweden 2001.
- [27] **Guy Séguier** et **Francis NOTELET**, "Electrotechnique industrielle", Technique et documentation Lavoisier, Paris, 3ème édition, 2006.
- [28] **Frédéric POITIERS**, " étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de doctorat de l'université de Nantes, décembre 2003.
- [29] **Edouard Laroche**, " Modélisation et Commande des Dispositifs de Gestion de l'énergie Electriques", master sciences pour l'ingénieur, université de Strasbourg.

[30] **MERRAHI Farid**, " Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone `a Double Alimentation (Application `a l'Energie Eolienne)", thèse de magister automatique, école nationale polytechnique, 2007.

[31] **K. Idjdarene**, " Contrôle d'une génératrice asynchrone à cage dédiée à la conversion de l'énergie éolienne“, Université de Bejaia, décembre 2008.

Annexe I

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation et la commande d'un onduleur deux niveaux.

I.1. Onduleur à deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté à travers un onduleur de tension à deux niveaux qui est lui-même alimenté par un redresseur à une tension continue considérée constante.

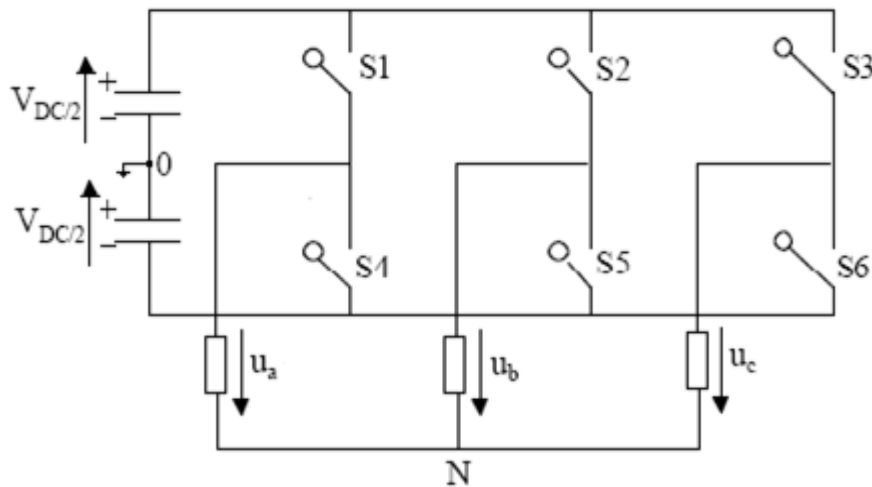


Fig. I.1:Schéma d'un onduleur de tension `a deux niveaux

I.2. Modèle de l'onduleur à deux niveaux

La tension générée par les convertisseurs est donnée par :

$$U = \frac{2}{3} (U_a(t) + U_b(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + U_c(t)e^{-j\frac{2\pi}{3}}) = U_{as} + U_{bs} \quad (I.1)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_{as} = U_a(t) \\ U_{bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_b(t) - U_c(t)) \end{cases} \quad (I.2)$$

L'expression des tensions de ligne en fonction de la tension continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ,ca les variables \$S_a, S_b, S_c\$ en fonction de l'état des commutations dans les trois branches.

Branche 1:

$S_a=0$ Si S1 est en position off et S4 est `a on.

$S_a=1$ Si S1 est en position on et S4 est `a off.

Branche2 :

$S_b=0$ Si S2 est en position off et S5 est `a on.

$S_b=1$ Si S2 est en position on et S5 est `a off.

Branche3 :

$S_c=0$ Si S3 est en position off et S6 est `a on.

$S_c=1$ Si S3 est en position on et S6 est `a off.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{DS} * (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{DS} * (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{DS} * (S_c - S_a) \end{cases} \quad (I.3)$$

Ont considérant que les tensions sont ´equilibrées on aura :

$$U_a + U_b + U_c = 0 \quad (I.4)$$

On peut d´eduire les expressions des tensions de lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3} (U_{ab} - U_{ac}) \\ U_b = \frac{1}{3} (U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3} (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (I.5)$$

Et on obtient :

$$\begin{cases} U_a = \frac{V_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ U_b = \frac{V_{dc}}{3} (2S_b - S_c - S_a) \\ U_c = \frac{V_{dc}}{3} (2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (I.6)$$

I.3. Modélisation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

Pour un onduleur triphasé à deux niveaux, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Donc pour chaque bras, il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.

- $S_{a,b,c} = 1$: interrupteur du demi- bras haut (a,b ou c) fermé
- $S_{a,b,c} = 0$: Interrupteur du demi- bras bas (a, b ou c) fermé.

La figure (I.2) montre le schéma d'un onduleur triphasé :

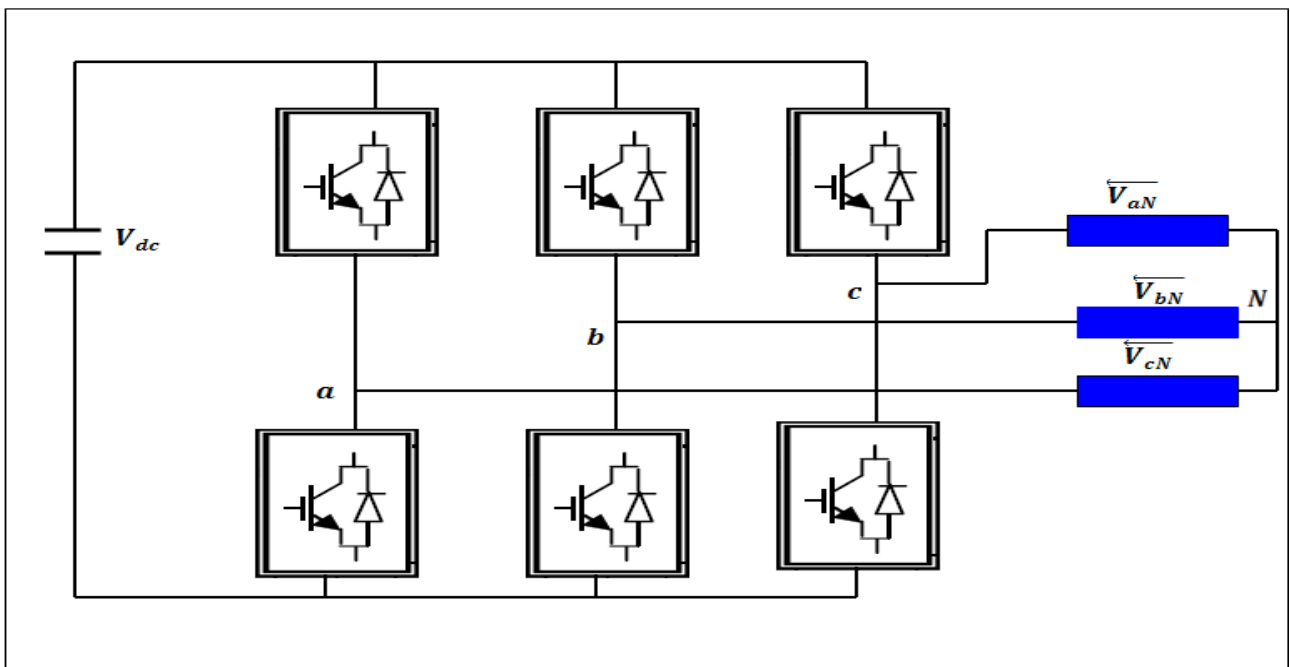


Fig. I.2 : Schéma d'un onduleur triphasé a deux niveaux

Pour simplifier l'étude, on ne supposera que son alimentation en tension comme une source parfaite dans le sens où, quelque soit le courant ' i ' délivré ou absorbé, la tension 'E' à ses bornes reste toujours constante, et que cette alimentation est constituée par deux générateurs de f.é.m.

égales à $\frac{E}{2}$ connectés entre eux par un point fictif noté n_0 .

Les tensions entre phases sont données par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (1.7)$$

Si la charge est équilibrée :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (1.8)$$

Et in aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (1.9)$$

I.4. Stratégie de commande :

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions (MLI) triangulo_sinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire (tension à haute fréquence de commutation). Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

L'indice de modulation m qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f .

$$m = \frac{f_p}{f}$$

Taux de modulation r qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence V_{ref} et celle de la porteuse U_p

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p}$$

I.4.1 Algorithme de commande :

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo_sinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes.

-Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p & V_k = V_{dc} \\ V_{refk} \leq U_p & V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (I.10)$$

Avec :

V_{dc} : La tension du bus continue.

-Etape 2:

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} & S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} & S_k = 0 \end{cases} \quad (I.11)$$

I.5. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI

La structure de la cascade est celle représentée sur la figure (I.2). Les deux convertisseurs interposés entre le rotor de la MADA et le réseau sont de type MLI à deux niveaux, bidirectionnels en puissance. Le modèle du convertisseur connecté au rotor a été déjà présenté dans le troisième chapitre où les signaux de commande sont déterminés en appliquant la commande vectorielle à la MADA. Le convertisseur coté réseau aura le même modèle que l'autre, sauf que les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

L'avantage de la commande MLI ne s'arrête pas au contrôle de la puissance active, mais la puissance réactive également, permettant à ce type de convertisseur de corriger le facteur de puissance du réseau. Ainsi, la commande MLI nous permet d'avoir une bonne qualité de signal (formes sinusoïdales), ramenant le contenu harmonique vers des fréquences élevées et par la suite la facilité de filtrage.

I.6. Contrôle du convertisseur coté réseau

L'objectif de ce convertisseur est de main tenir la tension du bus continu constante quelle que soit l'amplitude et le sens de la puissance.

Le principe de fonctionnement de ce convertisseur consiste à mesurer la tension de bus continu et de la comparée à une valeur de référence désirée. Après une correction par un régulateur PI

(Proportionnel Intégral), on obtient la puissance active de référence qui va nous fixer par la suite la valeur du courant de référence.

Le réglage de la tension du bus continu est réalisé par une boucle externe (les courants transités sont eux réglés par une boucle interne)

I.6. Modélisation

La figure (I.3) montre la structure du redresseur de courant triphasé à deux niveaux, la source est modélisée par une f.é.m. triphasée sinusoïdale en série avec une inductance L et une résistance R qui représentent l'impédance totale de la ligne.

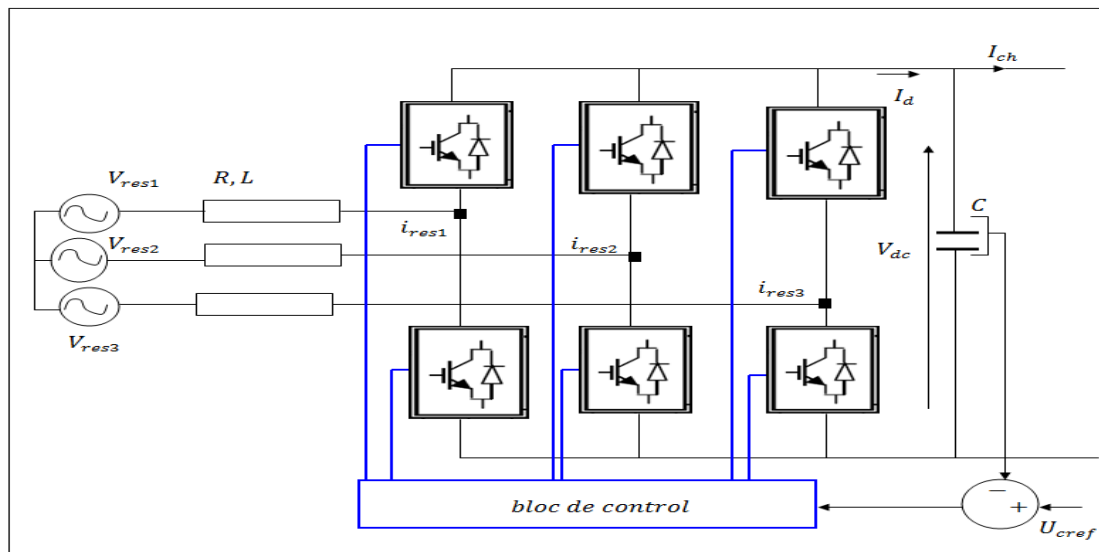


Fig. I.3 : Redresseur de courant triphasé à M.L.I à deux niveaux

I.8. Commande du redresseur en courant par hystérésis

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références [2].

I.9. Modèle de la boucle de tension

Avec l'hypothèse d'un redresseur sans pertes, la modélisation de la boucle de tension est basée sur le principe de conservation de la puissance instantanée. Cette boucle impose la valeur efficace du courant de référence du réseau [1]

Puissance d'entrée :

$$V_j = V_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} (j - 1) \right) \quad (I.12)$$

$$I_j = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} (j - 1) + \varphi \right) \quad (I.13)$$

Avec :

$j = 1, 2, 3$;

V_m : Amplitude de la tension

I_m : Amplitude du courant

ω : Fréquence angulaire

φ : Déphasage entre le courant et la tension

On fait de telles sortes qu'on aura :

$$I_{res1} + I_{res2} + I_{res3} = 0 \quad (I.14)$$

Les équations de tension pour un système triphasé équilibré, sans raccordement du fil neutre, peuvent être écrites comme suit :

$$V_{resj} = V_{indj} + V_{nj} \quad (I.14)$$

$$V_{resj} = RI_{resj} + L \frac{dI_{resj}}{dt} V_{nj} + V_{nj} \quad (I.15)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{res1} + S_b i_{res2} + S_c i_{res3} - i_{ch} \quad (I.16)$$

Avec :

$V_{res1}, V_{res2}, V_{res3}$: Les tensions de lignes

V_{n1}, V_{n2}, V_{n3} : Tensions a l'entrée du convertisseur

Le redresseur à MLI donné par la figure (I.4) est constitué de six IGBT shuntés par des diodes antiparallèles pour assurer la continuité du courant. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. Il modélisé en associant a chaque bras une fonction logique S_j selon la figure :

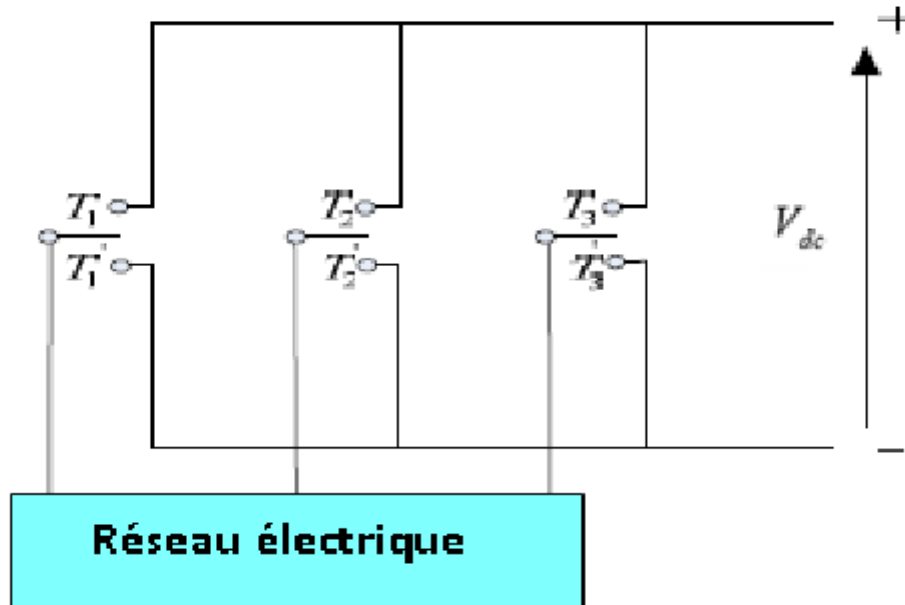


Fig. I.4 : Modèle équivalent du convertisseur AC/DC triphasé

I.10. Commande du redresseur en courant par hystérésis

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence.

Pour le redresseur triphasé à deux niveaux, on a deux états de commande possibles pour un bras, donc on utilise un régulateur à hystérésis à deux positions [24][29].

Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références (figure I.6).

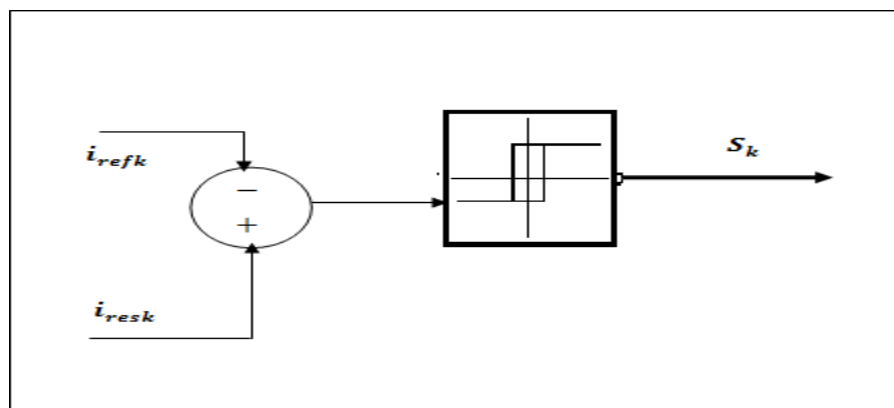


Fig. I.5 : principe de la stratégie de commande par hystérésis en courant

L'algorithme de commande de cette stratégie, est donné par :

$$\begin{cases} \varepsilon_k \geq \Delta_i \text{ donc } S_k = 0 \\ \varepsilon_k \leq -\Delta_i \text{ donc } S_k = 1 \end{cases}$$

Avec :

ε_k : est l'écart entre le courant de référence et le courant réel pour une phase k, tel que :

$$\varepsilon_k = i_{resk} - i_{refk}$$

Et Δ_i est la largeur de bande de l'hystérésis

La valeur efficace du courant du réseau imposé doit être calculée de manière à avoir la conservation de la puissance à l'entrée et à la sortie du redresseur (sans neutre), c'est-à-dire :

$$v_{res1}i_{res1} + v_{res2}i_{res2} + v_{res3}i_{res3} = U_{red}I_{red} \quad (I.17)$$

Donc :

$$3v_{eff}I\cos(\varphi) + 3RI^2 = U_{red}I_{red} \quad (I.18)$$

Pour un facteur de puissance unitaire et en négligeant les pertes Joule, on a :

$$3v_{eff}I\cos(\varphi) = U_{red}I_{red} \quad (I.19)$$

Où i et v sont respectivement les valeurs efficaces des tensions et des courants du réseau. Pour assurer la commandabilité du redresseur, la valeur initiale de la tension redressée U_{red} doit être impérativement supérieure à la valeur efficace de la tension du réseau v . Ceci est justifié par la représentation de Fresnel de la figure (I.5) :

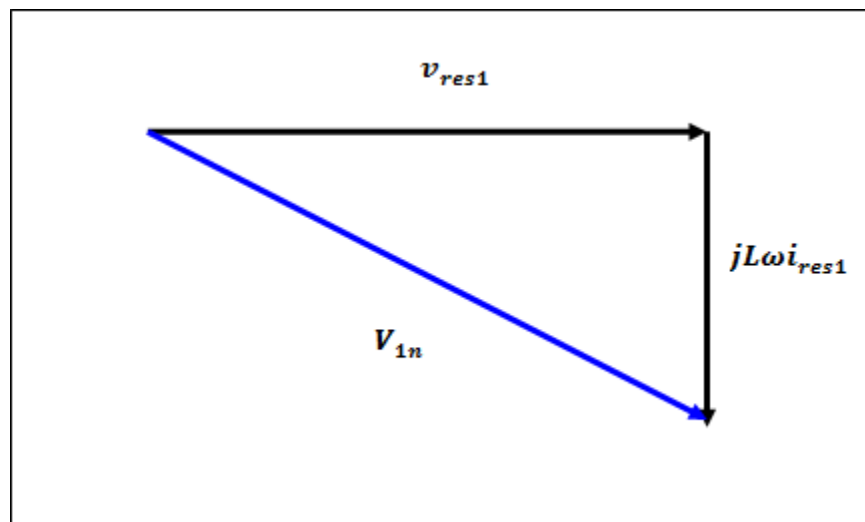


Fig. I.5 : Représentation de Fresnel du circuit du réseau

I.11. Régulation de la tension du bus continu

Le réglage de la tension du bus continu se fait par une boucle externe (Fig. I.6). La transition de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Donc, la boucle de régulation externe permet de maintenir une tension constante au niveau du bus continu et de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur.

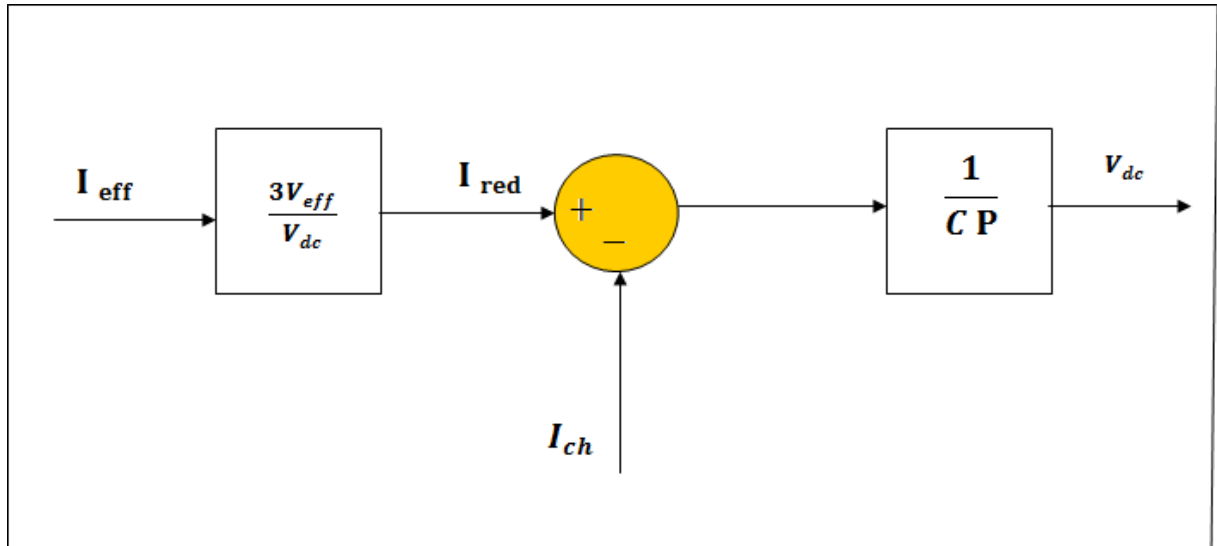


Fig. I.8 : Modèle de la tension du redresseur triphasée à deux niveaux

I.12. Modélisation du bus continu

On obtient la tension du bus continu à partir de l'intégration du courant capacitif

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c$$

Le courant du condensateur est :

$$i_c = i_{red} - i_{ch}$$

Avec :

i_{ch} : représente le courant de charge

$$V_{dc} = \int \frac{dV_{dc}}{dt} + V_{dc}(t_0)$$

Avec :

$V_{dc}(t_0)$: La valeur de la tension continue à l'instant initial

I.13. Modélisation de la boucle de courant

L'asservissement des courants du réseau se faisait par des boucles internes, afin de minimiser le contenu harmonique dans les courants et avoir un facteur de puissance pratiquement unitaire.

Le schéma bloc du principe de la régulation en cascade d'un redresseur de courant est celui de la figure (IV.11)

Le dimensionnement des paramètres du régulateur IP utilisé est mentionné dans l'annexe 3.

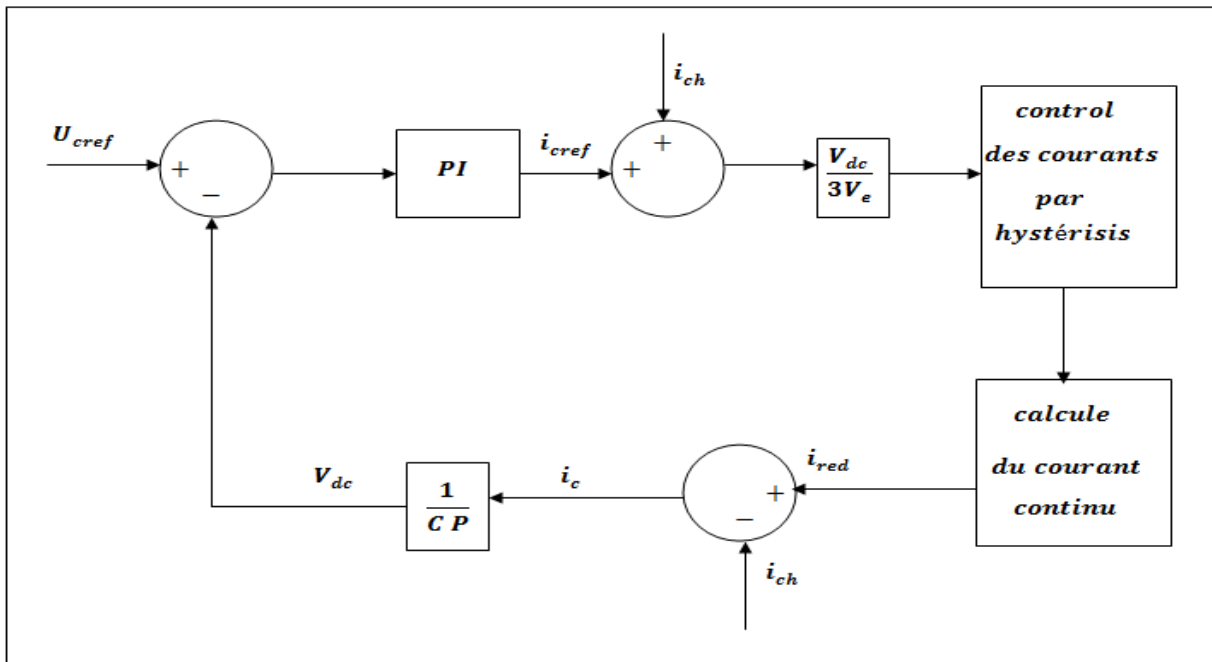


Fig. I.8 : Principe de la régulation en cascade du redresseur de courant à MLI

I.14. Résultats des simulations

I.14.1. Tension à la sortie du redresseur

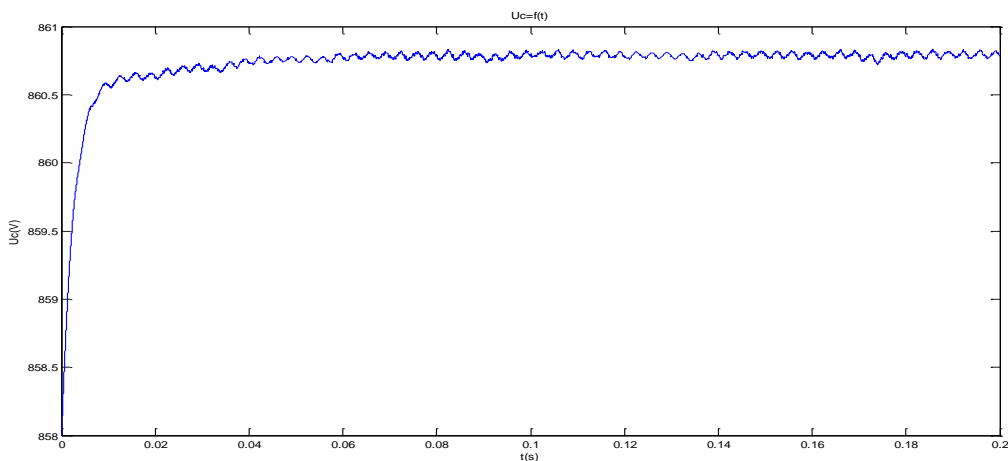


Fig. I.9 : tension à la sortie du redresseur

I.14.2. Tension à la sortie de l'onduleur

(f=1500Hz et U0=100)

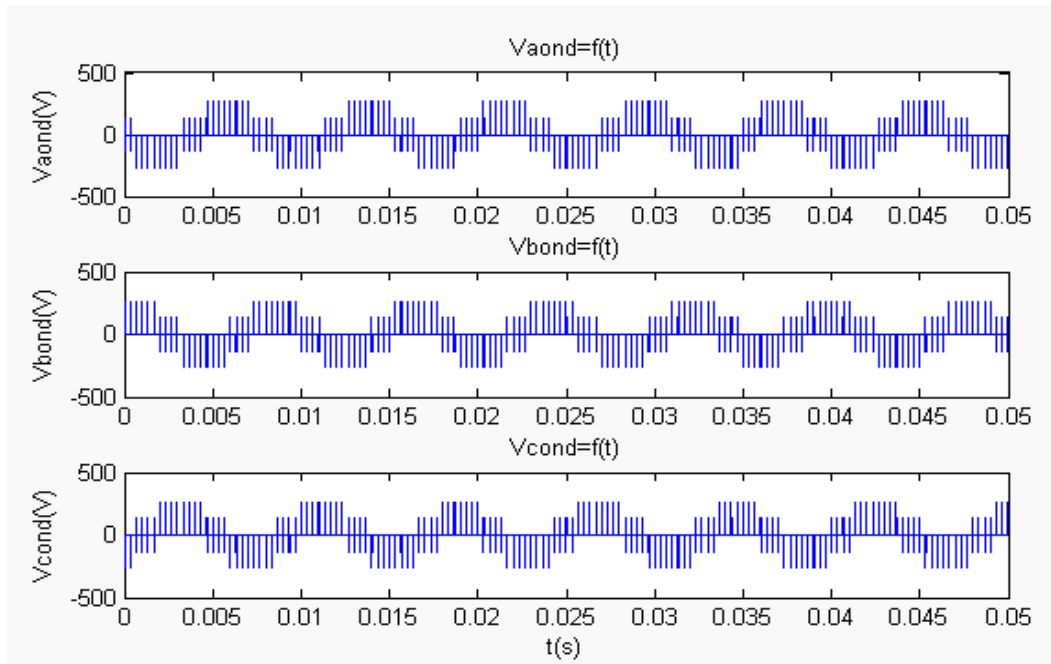


Fig. I.10 : tension à la sortie de l'onduleur

(f=3000Hz et U0=100)

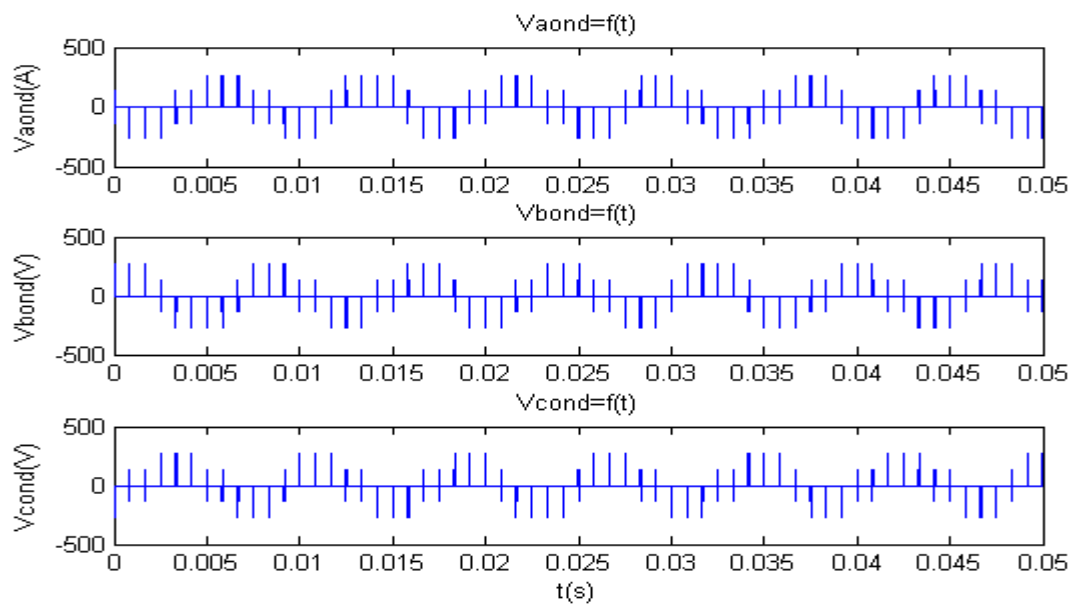


Fig. I.11 : tension à la sortie de l'onduleur

Annexe II

Introduction

Dans ce chapitre nous allons introduire le problème des harmoniques et ces différents effets sur la qualité de l'énergie électrique et le bon fonctionnement des équipements électriques, ainsi que les différents remèdes utiliser pour diminué leurs présence sur le réseau.

Un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes [13]:

- Les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques
- les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension.

II .1. Caractéristiques des perturbations électriques

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 Hz . Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants [13]:

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents physiques liés à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

II .1.1. Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz :

Elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport;

II .1.2. Les variations de l'amplitude :

Il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme de coupures brusques.

II.1.3. La modification de la forme d'onde de la tension :

Cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque;

II .1.4. La dissymétrie du système triphasé (déséquilibre) :

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques en basse tension et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension.

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance déséquilibrées. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

II .2. Définition des Distorsions harmoniques

On entend par distorsion harmonique les déformations de l'onde de courant ou de tension, dont l'analyse spectrale révèle des fréquences rigoureusement multiples de la fréquence fondamentale. Les distorsions harmoniques sont aussi des grandeurs aléatoires qui sont souvent la résultante de perturbations issues d'appareils distincts et transmises par le réseau.

Ce sont des tensions ou courants qui présentent une fréquence multiple de la fréquence fondamentale. L'harmonique est aussi défini comme étant un outil mathématique utilisé pour modéliser la distorsion du signal des ondes électriques ont le décomposant en une série de signaux sinusoïdaux de fréquences qui sont multiple de la fréquence de l'onde initialement fourni (Courant, tension).

Ainsi, un signal périodique non sinusoïdale s de fréquence f , et de pulsation $\omega = 2 * \pi * f$ peut être décomposé en une série de signaux sinusoïdaux de fréquences $k*f$ Le premier représente le fondamental et Les autres ce sont des harmoniques.

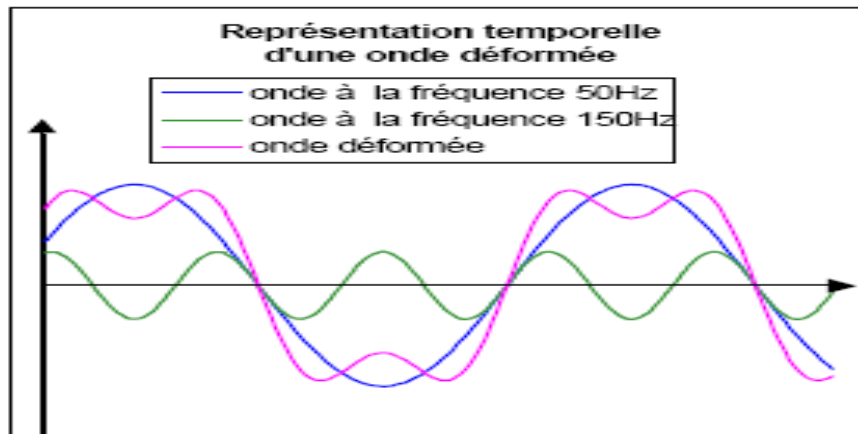


Fig. II.1: allure d'un signal avec ses harmoniques [31].

II .3. Origines des distorsions harmoniques

Elles sont dues, pour la majeure part aux équipements des usagers qui absorbent des courants non sinusoïdaux ; le phénomène le plus gênant est la prolifération d'appareillage comportant des éléments de circuit non linéaire, tel que l'éclairage fluorescent. Et pour un faible part aux machines tournantes et aux transformateurs, ainsi les charges peuvent être subdivisées en :

II .3 .1. Charge linéaire

Se sont des charges qui consomment un courant sinusoïdal lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale.

II .3 .2. Charge non linéaire

Ce sont des charges qui absorbent un courant non sinusoïdal lorsqu'elles sont soumises à une tension sinusoïdale. Ce type de charges est générateur d'harmoniques de courants.

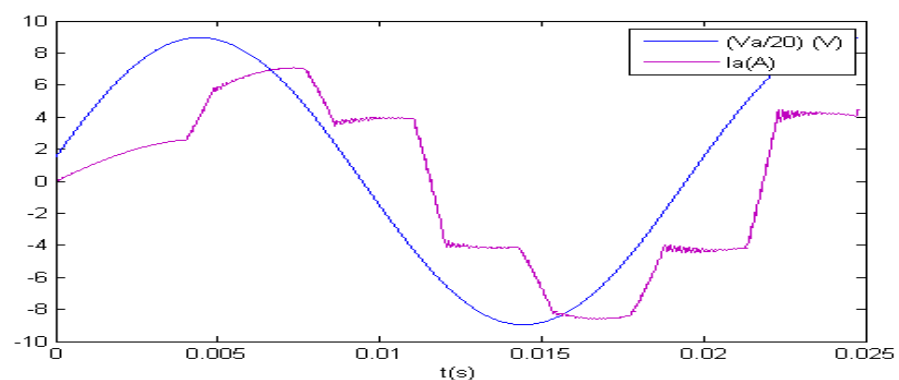


Fig. II.2: allure d'un signal de la tension est du courant en amont d'une charge non linéaire

Parmi les charges non linéaire existantes il ya :

Les appareils qui comportent des bobines à noyau ferromagnétique, et tous les équipements qui présentent un circuit magnétique. Il y a aussi des charges qui génèrent des harmoniques telles que les appareils comportant :

- soit un arc électrique, tels que fours à arc, soudeuses, éclairage fluorescent
- Soit des redresseurs

II .4. Conséquences et effets des perturbations harmoniques

L'effet de la pollution harmonique peut être ressenti loin de la source de perturbation et peut être plus important en un lieu éloigné que dans le voisinage immédiat.

Bien que les susceptibilités des différents appareils à l'égard des harmoniques soient très diversifiées, on distingue deux sortes d'effets possibles.

II. 4.1. Effets instantanés

- Perturbations des dispositifs de mesures et de protection.
- Pertes ohmiques supplémentaires dans les lignes, surtout dans le conducteur du neutre.
- Interférences d'ondes avec les lignes de télécommunications.
- Provocation de surintensités au niveau des postes de transformation.
- Surcharge du conducteur du neutre.
- Vibrations et bruits.

II .4.2. Effets à long terme

- Apparition du flicker en présence de tension harmonique pour l'éclairage.
- Pertes fer supplémentaires par courant de Foucault dans les transformateurs et les machines tournantes.

- Pertes diélectriques supplémentaires se traduisant par leur vieillissement et une durée de vie courte.
- Les harmoniques dans les moteurs à induction réduisent le couple utile et empêchent le moteur d'atteindre sa vitesse maximale.
- Les harmoniques dans les machines tournantes provoquent des pertes et des échauffements supplémentaires.

II .5. Types de distorsions harmoniques

Les harmoniques sont des signaux de courant ou de tension, dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale (50 Hz) [13].

II .5.1. Les harmoniques en courant

Les harmoniques en courant sont dus à l'utilisation des charges non linéaires, car ces charges consomment un courant non sinusoïdal lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale ; causé par leurs systèmes de commutation rapide qui autorise le découpage de l'onde (50 Hz).

II .5.2. Les harmoniques en tension

La circulation d'un courant harmonique ; engendré par le passage d'un courant à travers une forte charge linéaire dans le réseau ou à travers des impédances, provoque une distorsion en tension car les impédances sont en grande partie linéaires.

Si l'impédance est à prédominance selfique, le courant est plus proche d'une sinusoïde que la tension d'autant plus que le rang harmonique est élevée. Ce pendant si l'impédance est capacitive, le courant sera plus déformé que la tension.

II .6. Caractéristiques des distorsions harmoniques

II .6.1. Le taux de distorsion (TDH)

Le TDH est calculé pour quantifier la déformation et évaluer la nocivité d'un réseau sur la famille des matériels et pour les visualiser on utilise la représentation spectrale.

II .6. 1.1. Le taux de distorsion individuel (TDH_i)

Le taux de distorsion individuel caractérise la déformation sur un rang particulier en définissant le rapport entre la valeur d'une amplitude harmonique et celle du fondamental.

$$TDH_i(\%) = \frac{C_h}{C_1} * 100$$

II .6.1.2. Le taux de distorsion globale

II .6.2. Influence des harmoniques sur la qualité de l'énergie

II .6. 2.1. Dégradation du facteur de puissance

Le facteur de puissance en régime sinusoïdale est introduit comme étant le déphasage entre la tension et le courant et il est donné par :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos(\varphi)$$

Ou :

F_p : Facteur de puissance

P : Puissance active

Q : Puissance réactive

φ : Déphasage entre la tension et le courant.

En régime pollué la puissance apparente n'est plus donnée uniquement en fonction de la puissance active et réactive, mais il y a introduction d'une nouvelle puissance dite déformante induite de la présence des harmoniques, ainsi on aura :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Avec :

D : Puissance déformante

Et le facteur de puissance sera donné par :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \neq \cos(\varphi)$$

II.7. remèdes pour minimiser les effets indésirables des harmoniques

Pour la compensation des perturbations, il y a deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne.

II .7.1. Solutions de dépollution traditionnelles

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

II .7.1.1. Dépollution des courants perturbateurs

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature.

II .7.1.1.1. Rééquilibrage des courants du réseau électrique

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.

II .7.1.1.2. Compensation de la puissance réactive

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.

II .7.1.1.3. Compensation des courants harmoniques :

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,

_ L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut (Fig. IV.3) :

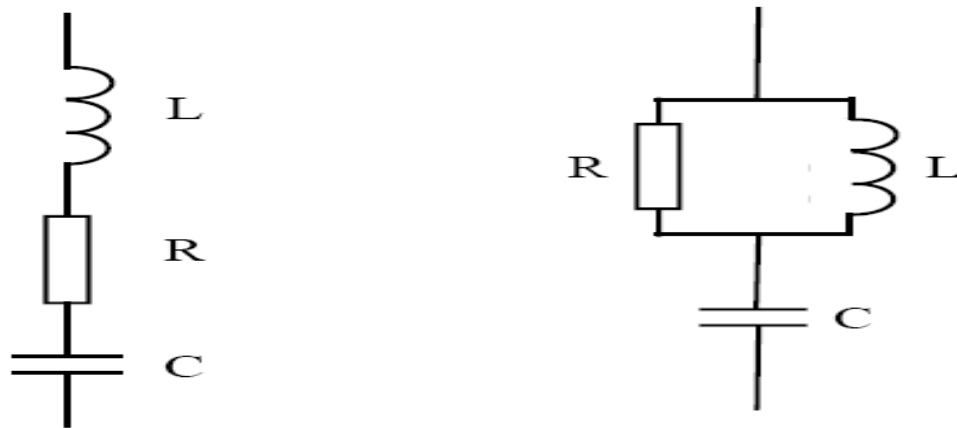


Fig. II.3: Schéma de filtres passifs

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

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.
- Équipements volumineux.
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

II .7.1.1.3. Dépollution des tensions perturbatrices

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.

II .7.2. Solutions de dépollution modernes

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.

II .7.2.1. Dépollution des courants perturbateurs

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur déca phase, 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.

II .7.2.2. 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

II .7.3. 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.

II .7.3.1. Filtres actifs

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 du réseau 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.

Dans cette partie du chapitre, nous allons introduire les principales structures, proposées dans la littérature, à savoir les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif-passif.

II .7.3.2. Principe de fonctionnement

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Fig. I.3, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant [13]. 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.

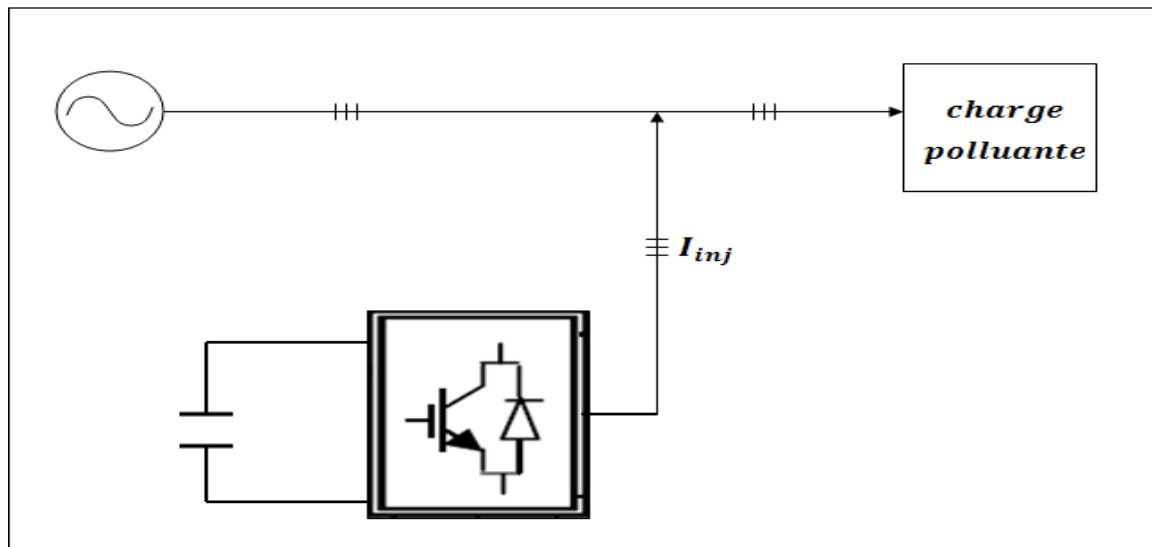


Fig. II.4: filtre actif parallèle

II .7.3.3. Mise en œuvre

Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèles ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles.

En effet, dans ces années là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de filtre actif parallèle à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance,

commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des filtres actifs parallèles.

Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels.

II .7.3.2. Le filtre actif série

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Fig. I.4, 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.

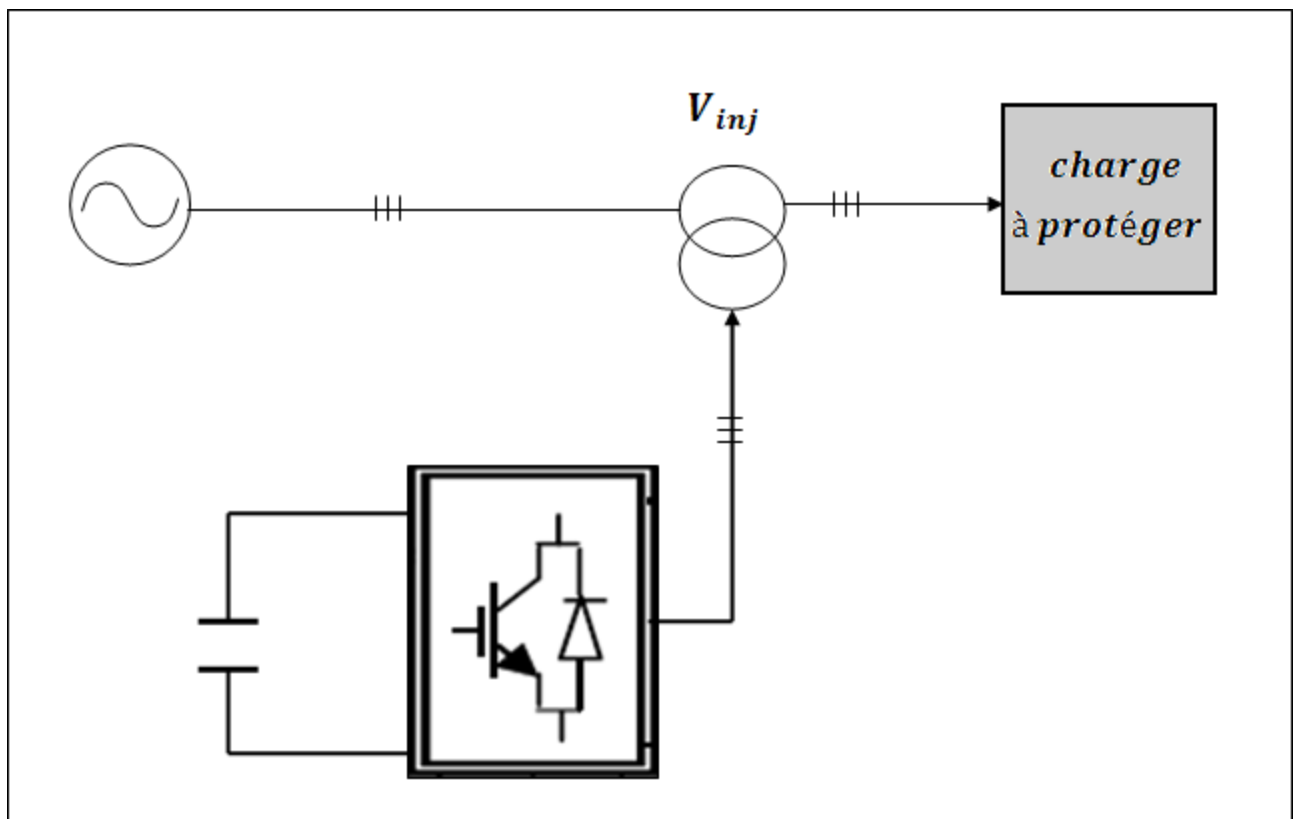


Fig. II.5: filtre actif série

II .7.3.2.2. Mise en œuvre

Le filtre actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes [13].

En 1976, une famille de filtres actifs séries avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution [13].

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique.

Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et la solution de compensation par le compensateur actif série.

II.7.4. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, la puissance réactive et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. 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.

Annexe III

Conditions de simulations :**La MADA utilisé présente la plaque signalétique suivante**

- Valeurs nominales : 1.5MW, 220/380 V, 50 Hz, 3000 tr/min.
- Résistance statorique: $R_s = 0.012 \Omega$
- Résistance rotorique: $R_r = 0.01 \Omega$
- Inductance cyclique statorique: $L_s = 0.0135H$
- Inductance cyclique rotorique: $L_r = 0.021H$
- Inductance cyclique mutuelle: $M = 0.0137H$
- Le nombre de paires de pôles est: $p = 2$

Constantes mécaniques de la MADA:

- Moment d'inertie : $J=0.05 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f_r=0.035 \text{ N.m.s/rd}$.
- Elle est entraîné a une vitesse $\Omega_r = 301 \text{ rd/s}$;

Les autres caractéristiques du système

- La capacité utilisée pour le bus continu est $C = 22\mu F$;
- L'impédance caractéristique des lignes est $Z = 6 + j0.02$;
- La tension continue de référence est $U_{cref} = 860V$;
- Les constantes du régulateur PI utilisé pour le bus continu sont: $K_i = 0.8$ et $K_p = 5$
- Les constantes des régulateur PI utilisé pour le control de la MADA sont :

$$k_{i1} = 125 \quad k_{p1} = 1$$

$$k_{i2} = 10 \quad k_{p2} = 7.32$$

- Les puissances de références sont: $P_{ref} = 100000Watt$

$$et \quad Q_{ref} = -100000Var$$

- Le réseau utilisé est réseau qui présente $220/380V$ et $f = 50Hz$;
- La charge non linéaire alimenté est redresseur à thyristors commandé a $\alpha = 30^\circ$;
- La charge non symétrique utilisée pour l'étude du déséquilibre est une charge triphasée qui présente des impédances de branche déférentes ;
- Le couple engendré par l'éolienne est considéré constant égal à $\Gamma_m = 20 Nm$