

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



Département de Génie Electrique

Spécialité électrotechnique

Projet de fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

THÈME

Filtrage actif par l'éolienne

Proposé et dirigé par :

Pr. E.M.BERKOUK

Etudié par : -BENAMSILI Mustapha

-TAOURIRI Mohamed

PROMOTION : juin 2009

Ecole Nationale supérieure Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie

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

Remerciements

Nous remercions avant tout notre Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions notre encadreur Mr : E.M. BERKOUK pour leurs aides, leurs encouragements et la patience avec laquelle il a bien travaillé avec nous en nous guidant et nous corrigeant durant toute l'année.

*Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury
Nous souhaitons également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant nos années d'études*

Enfin, nous remercions notre famille pour leurs aides, compréhensions, encouragements et soutiens, qu'elles nous ont apportés tout le long de nos études et à toutes nos amis.

Dédicaces

Je dédie ce travail essentiellement à

- *Mes parents*
- *Mes frères et ma sœur*
- *Toute ma famille*

Mohamed

Notations

Notations

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

p_{vent} : Puissance du vent

R : la longueur de la pale

ρ : Masse volumique de l'air

V_{vent} : La vitesse du vent

C_p : Le coefficient de puissance

S_t : Surface balayée par la turbine éolienne

λ : Rapport de vitesse

Ω_t : Vitesse de la turbine

Ω_r : Vitesse du rotor de la génératrice

K_g : Multiplicateur mécanique

C_m : Couple de la turbine éolienne

R_t : Rayon de la turbine éolienne

V_n : Vitesse nominale

T_t : Couple de la turbine

V_{min} : vitesse de seuil du vent

V_{max} : Vitesse maximale du vent

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

U_a, U_b, U_c : Tension composée respectivement des phase 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 statoriques 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 statoriques

M_r : Inductance mutuelle entre les enroulements du rotoriques

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

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

Φ_f : Flux inducteur de la machine à courant continu

i_a : Courant d'induit de la machine à courant continu

i_f : Courant d'inducteur de la machine à courant continu

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_{res1} ; V_{res2} et V_{res3} : Les tensions de réseau

V_{n1} ; V_{n2} et V_{n3} : Les tensions à l'entrée du convertisseur

i_{ch} : Courant de la charge

i_{red} : 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

I_d : Courant redressé

U_d : Tension redressée

Sommaire

Sommaire

Notations

Introduction générale 01

I. Généralités sur les éoliennes et la MADA et les différentes structures d'alimentation de la MADA

I.1 Introduction 03

I.2 Historique 03

I.3 Présentation du système éolien 04

I.3.1 Introduction 04

I.3.2 Développement de l'énergie éolienne 04

I.3.3 Emplacement des parcs éoliens 05

I.3.4 Les différents composants d'une éolienne 05

I.3.5 Les différents types d'éoliennes 08

I.3.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 09

I.3.7 Principe de fonctionnement 10

I.4 La machine asynchrone à double alimentation 15

I.4.1 Structure de la machine 15

I.4.2 Modes de fonctionnement 16

I.4.3 Domaine d'utilisation de la MADA 18

I.4.4 L'application de la MADA dans les systèmes éoliens 18

I.4.5 Différentes topologies de la MADA 19

I.4.6 Avantages et inconvénients de la MADA 22

IV.5 Conclusion 23

II. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1 Introduction **24**

II.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation 24

II.3 Hypothèses simplificatrices 25

II.4 Modèle mathématique de la MADA 26

II.4.1 Equations électriques de la machine 26

II.4.2 Equations mécaniques de la MADA 27

II.4.3 Modèle de la MADA dans le plan dq 28

II.4.4 Choix du référentiel 30

II.4.5 Mise sous forme d'équations d'état 31

II.5 Résultats de simulation et interprétations 32

II.6 Conclusion	36
III. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation	
VI.1 Introduction	37
III.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA.....	37
III.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	39
III.3.1 Introduction	39
III.3.2 Orientation du flux statorique.....	40
III.3.3 Relation entre le courant statorique et le courant rotorique	42
III.3.4 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	42
III.3.5 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	42
III.3.6 Commande indirecte.....	45
III.3.7 Type de régulateurs utilisés	47
III.4 L'onduleur à deux niveaux	47
III.4.1 Modèle de l'onduleur à deux niveaux	48
III.4.2 Stratégie de commande.....	49
III.4.3 Algorithme de commande	49
III.5 Résultats de simulation et interprétations.....	50
III.6 conclusion.....	54
IV. La cascade basée sur une machine asynchrone à double alimentation	
IV.1 Introduction	55
IV.2 Description du montage	55
IV.3 Le redresseur à MLI	57
IV.3.1 introduction	57
IV.3.2 Modélisation.....	57
IV.3.3 Connexion du redresseur au réseau électrique	60
IV.3.4 La Charge	61
IV.3.5 Commande du redresseur en courant par hystérésis	61
IV.3.6 Résultats de simulation	63
IV.4 Régulation de la tension du bus continu	64
IV.5 Modélisation du bus continu	65
IV.6 Modélisation de la boucle de courant.....	65
IV.7 Résultats de simulation	66
IV.8 Conclusion.....	68
V. Filtrage actif par l'éolienne	

V.1 Introduction	69
V.2 Principe d'opération	69
V.3 Détermination des références harmoniques	71
V.3.1 Le filtre Passe-bas.....	72
V.3.2 Le filtre sélectif.....	73
V.3.3 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées	75
V.3.4 Méthode basée sur le principe du courant actif.....	79
V.3.5 Méthode de puissance instantanées p-q étendue	80
V.4 Application du filtrage actif par la MADA à la charge non linéaire	81
V.4.1 Modélisation de la charge polluante.....	81
V.4.2 Résultats de simulation.....	84
V.4.2.1 Redresseur triphasé à diode	84
V.4.2.2 Redresseur triphasé à thyristors ($\alpha = 30^\circ$)	88
V.4.3 Interprétation des résultats.....	94
V.5 Conclusion	95
Conclusion générale	96
Annexe 1	
Annexe 2	
Annexe 3	
Annexe 4	
Bibliographie	

Introduction générale

Introduction Générale

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 des 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.

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 cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur l'éolienne en précisant les différents éléments qui la constituent, les différents types, le principe du fonctionnement et les avantages et inconvénients.

Ainsi, nous présenterons des généralités sur la MADA, ses modes de fonctionnement, ses applications dans les systèmes éoliens, l'état de l'art sur la conversion électromécanique à travers la MADA et les convertisseurs qui leur sont associés, suivi par les avantages et les inconvénients de la MADA.

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 dans le mode moteur et générateur, ceci a pour objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement.

Le troisième chapitre traitera la commande vectorielle en puissance active et réactive statoriques de la MADA. Cette commande permet d'assurer le découplage des axes d et q , dont le but est d'améliorer le comportement statique et dynamique du système. Le stator est alimenté par une source triphasée et le rotor est connecté à un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par la stratégie MLI triangulosinusoidale, et son alimentation continue est supposée constante.

Le quatrième chapitre est un complément du chapitre précédent, on abordera la commande du redresseur à deux niveaux, puis on passera au système complet où on se met dans le cas le plus pratique où l'alimentation de l'onduleur connecté au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur.

Le dernier 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.

Nous terminerons ce présent travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur les éoliennes
et la MADA et les
différentes structures
d'alimentation de la MADA

I.1 Introduction

Actuellement, les énergies renouvelables n'entrent qu'à hauteur de 20 % environ dans la production mondiale d'électricité [1]. Bien qu'énergie finale propre par excellence, il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles et uranium). C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité. Parmi ces énergies renouvelables, on trouve l'énergie éolienne.

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû à la crise pétrolière de 1974 [2]. Donc beaucoup de pays, notamment les pays occidentaux se sont lancés dans l'étude et l'expérimentation des éoliennes.

Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ses différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique [3]. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants.

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie éolienne.

Dans ce chapitre, on présente des généralités sur les éoliennes et sur la MADA, ainsi que le choix de la MADA en fonctionnement génératrice.

I.2 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ.

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de

l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Cette application a évolué en terme de puissance et de rendement durant tout le 20^{ème} siècle et jusqu'au début du 21^{ème}. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique [2]. En 2006, l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [5].

I.3 Présentation du système éolien

I.3.1 Introduction

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable (non dégradée), géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

I.3.2 Développement de l'énergie éolienne

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (figure I.1). Ceci est principalement dû à deux raisons :

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles [6].

On constate que la production de l'énergie éolienne connaît depuis quelques années le taux de croissance le plus important de l'industrie de la production d'électricité. Avec une croissance de 30% en 2003, la capacité de production d'énergie éolienne dans le monde a atteint 39,4 GW durant la même année. L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît

le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergie plus traditionnelle, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90 [4].

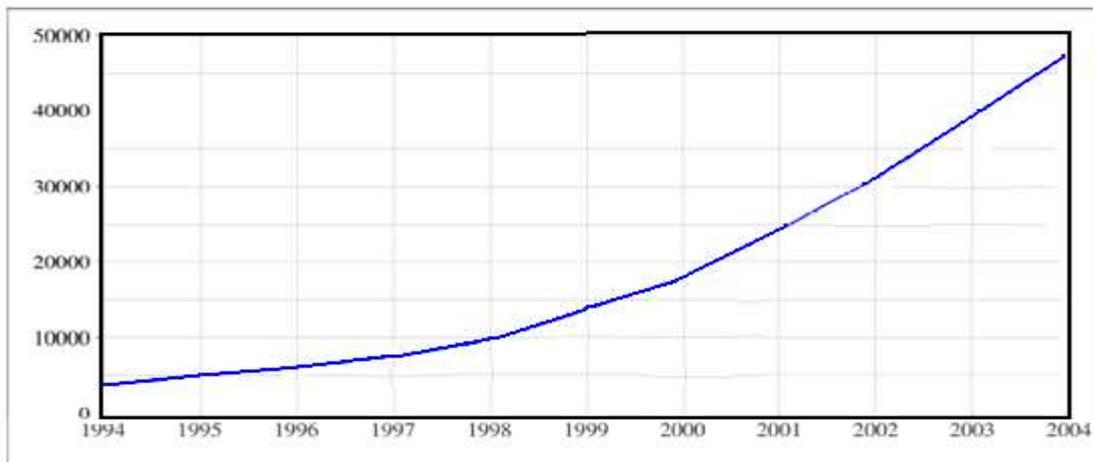


Fig.I.1 Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW

I.3.3 Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en terme de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits [6].

I.3.4 Les différents composants d'une éolienne

En général une éolienne est constituée de trois éléments principaux : la tour ou mât qui est l'élément porteur, une nacelle et l'ensemble rotor – pales (Fig.I.2).

➤ Le mat

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500kW à une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance.

➤ Les pales

Les pales permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor.

Elles sont des pièces techniquement difficile à réaliser car elles doivent obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elles doivent aussi être fabriquées avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante.

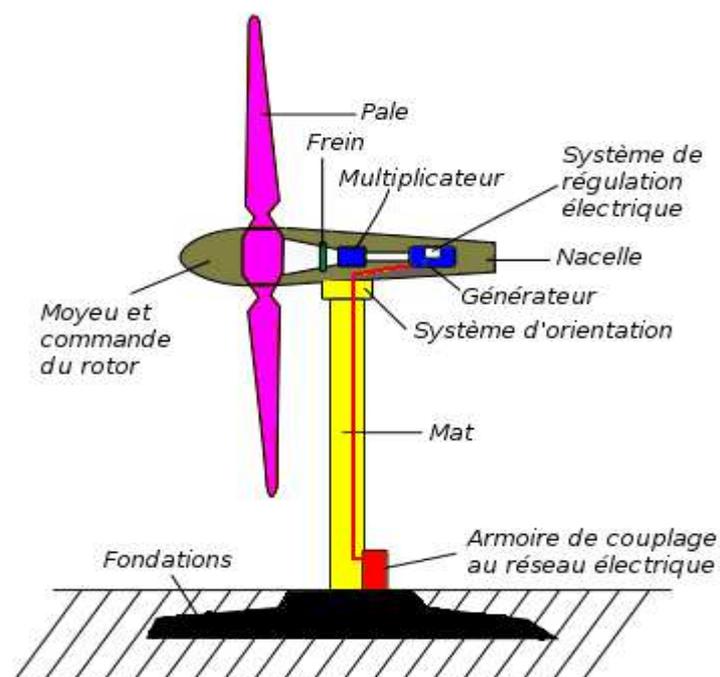


Fig.I.2 Constitution d'une éolienne

Les aérogénérateurs modernes ont 1, 2 ou 3 pales. Ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

Les machines unies et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuation mécanique, elles ont un rendement énergétique moindre, elles font plus de bruit dans la mesure où elles vont plus vite et elles provoquent un impact visuel plus important. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

➤ **La fondation**

Une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grand vent et/ou dans des conditions de givrage.

➤ **La nacelle**

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet

d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne (Fig.I.3).

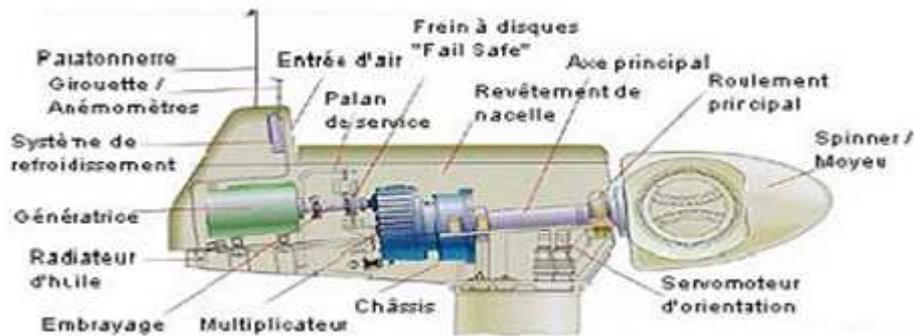


Fig.I.3 La nacelle.

➤ Le multiplicateur

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

➤ la génératrice

La fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone. De plus un convertisseur de puissance associé éventuellement à la génératrice selon le type (direct ou indirect) de connexion au réseau.

➤ L'arbre lent

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

➤ L'anémomètre

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control-commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint

approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne.

➤ **Le système de control-commande**

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

➤ **Le rotor**

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz).

➤ **Le moyeu**

C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

I.3.5 Les différents types d'éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent, suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice: les aérogénérateurs à axe vertical et à axe horizontal.

➤ **Les éoliennes à axe vertical**

Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Elles présentent l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol donc pas besoin de munir la machine d'une tour, facilitant ainsi les interventions de maintenance. Mais elles présentent certaines caractéristiques pénalisantes : elles ne peuvent pas démarrer seule (nécessité d'un dispositif de lancement), les pales sont plus chères à construire et engendrent un niveau de bruit important ; faible rendement aérodynamique, et provoquent des fluctuations importantes de puissance. Toutes ces raisons ont conduit à l'abandon de la technologie de l'éolienne à axe vertical (Fig.I.4.a).

➤ **Les éoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont beaucoup plus largement employée, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, elles captent le vent en hauteur et loin du sol ; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A

dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical (Fig.I.4.b).

Un autre avantage, et non des moindres, est l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale [6]. Elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Dans ce type d'éoliennes l'arbre est parallèle au sol .Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolienne [7] [8].



Fig.I.4 a- éolienne à axe vertical

b- éolienne à axe horizontal

I.3.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [4]

➤ Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et respecte l'environnement ;
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;
- La production d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂ ;
- L'énergie éolienne ne présente pas de risque comme l'énergie nucléaire;
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie ;
- En fonctionnement, les éoliennes peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

➤ **Inconvénients**

- L'impact visuel (néanmoins un thème subjectif) ;
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques ;
- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne ;
- Le bruit mécanique et L'impact sur les oiseaux.

I.3.7 Principe de fonctionnement

A la hauteur de la nacelle souffle un vent à la vitesse V_{vent} . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt.

A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine.

On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques [4].

La puissance cinétique du vent traverse un disque éolien de rayon R (en m), est donnée par la relation suivante :

$$p_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (I.1)$$

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale ;

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25kg/m en atmosphère normale) ;

V_{vent} : La vitesse du vent.

Cette puissance ne peut être totalement captée, cela veut dire que la vitesse du vent est nulle en derrière les pales, on exprime alors la puissance captée par une éolienne :

$$p_{cap} = C_p(\lambda) P_{vent} \quad (I.2)$$

C_p : Le coefficient de performance ou coefficient de puissance, il représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient qui ne peut dépasser la valeur limite, appelée limite de Betz qui est $16/27$ soit $0,5926$, c'est cette valeur qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée [4]. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [6].

Sa relation s'exprime comme suit :

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho S_t V^3} \quad (I.3)$$

P_t : Puissance de la turbine éolienne ;

$S_t = \pi R^2$: Surface balayée par la turbine éolienne.

Le C_p est en fonction du rapport λ entre la vitesse linéaire des extrémités des pales et la vitesse du vent, il est donné par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (I.4)$$

Où Ω_t en (rad/s) est la vitesse du rotor à faible vitesse, sachant que la vitesse Ω_r du rotor de la génératrice est liée à celle du rotor lent par :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{K_g} \quad (I.5)$$

Où K_g représente le rapport de la vitesse du multiplicateur. On peut donc exprimer le rapport λ en fonction de la vitesse de la machine par :

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{K_g V_{vent}} \quad (I.6)$$

Ce rapport λ s'appelle rapport de vitesse en bout de pales (tip-speed ratio) ou rapport d'avance. La puissance mécanique transmise au rotor égale à la puissance captée, et s'écrit :

$$P_{tr} = P_{cap} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (I.7)$$

L'allure de la variation du C_p en fonction du rapport de vitesse est illustrée sur la figure (I.5).

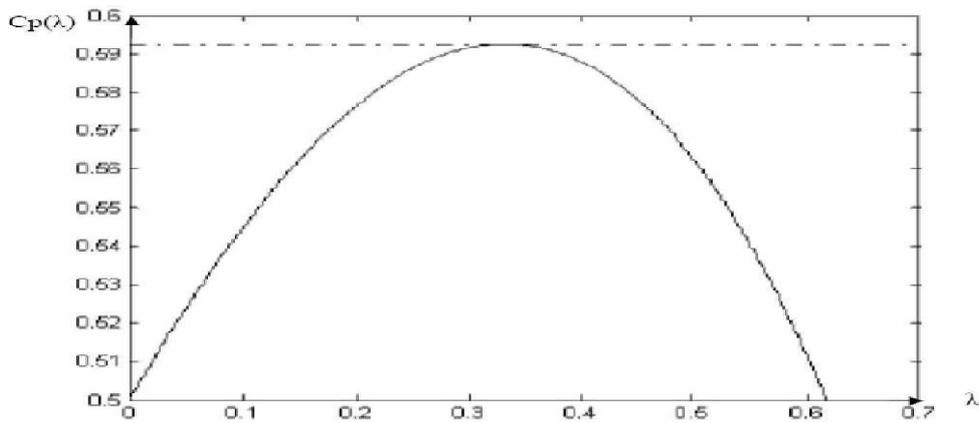


Fig.I.5 Variation du C_p en fonction du rapport de vitesse

A partir de cette caractérisation $C_p(\lambda)$, il est possible de déterminer une famille de courbe qui décrit la puissance mécanique disponible sur le rotor de la génératrice en fonction de la vitesse de rotation des pales pour différentes vitesses du vent [8].

Sur la figure (I.6) on peut remarquer que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de la génératrice qui permet de capter une puissance maximale.

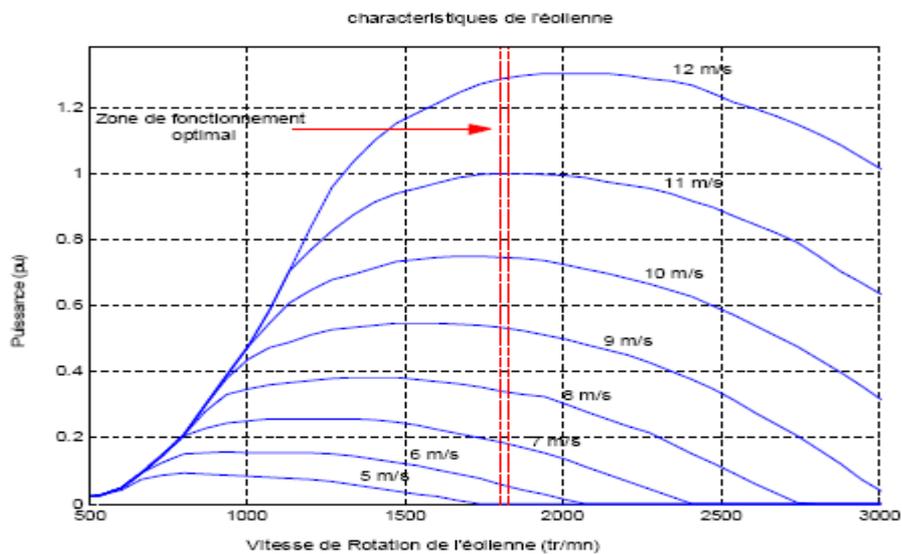


Fig.I.6 Puissance théorique disponible d'une éolienne donnée

➤ **Le coefficient du couple**

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance. Il est très utile afin d'estimer la valeur des couples aux différents points de fonctionnement. Sa valeur est déterminée par la relation suivante :

$$C_m = \frac{T_t}{\frac{1}{2}\rho S_t R_t V_{vent}^2} \quad (I.8)$$

R_t : Rayon de la turbine éolienne

T_t : Couple de la turbine [4],[10].

➤ **Production optimale d'énergie**

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la figure (I.7). La puissance maximale qui peut être produite (captée) par une éolienne est sa puissance nominale, ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \lambda_{opt} \cdot \frac{V_{vent}}{R} \quad (I.9)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la figure (I.7) [7]. La vitesse du vent pour laquelle la puissance nominale de l'éolienne est atteinte est appelée vitesse nominale du vent V_n . Au-dessus de celle-ci, il y a une vitesse du vent maximale, appelée vitesse maximale de fonctionnement V_{max} à laquelle l'éolienne est conçue pour s'arrêter afin de protéger ses parties mécaniques des effets néfastes des grandes vitesses du vent. (Zone III).

La vitesse du vent la plus basse à laquelle une éolienne fonctionne est connue comme la vitesse de seuil V_{min} . Au-dessous de V_{min} c'est la zone I qui correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne.

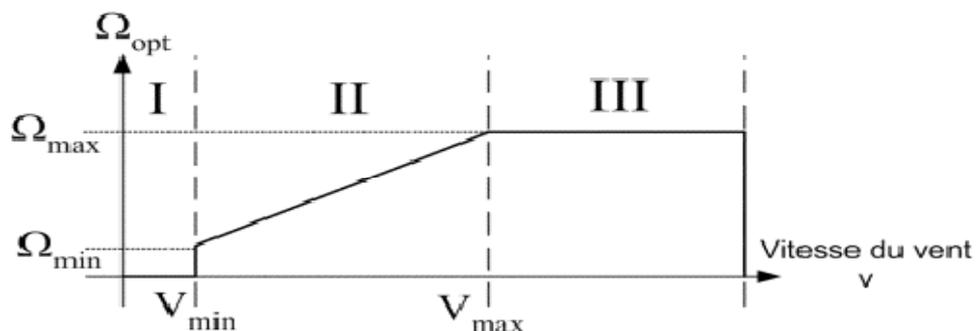


Fig.I.7 Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

- Pour $V_{vent} < 4\text{m/s}$, la turbine ne fonctionne pas ;
- Pour $4\text{m/s} < V_{vent} < 14\text{m/s}$, la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent ;

- Pour $14\text{m/s} < V_{vent} < 25\text{m/s}$, la puissance fournie est limitée à la puissance nominale;
- Pour $V_{vent} > 25\text{m/s}$ environ (90 km/h), arrêt de l'éolienne ($R=60\text{m}$) [4].

➤ **Intérêt de la vitesse variable**

On donne sur la figure (I.8) la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

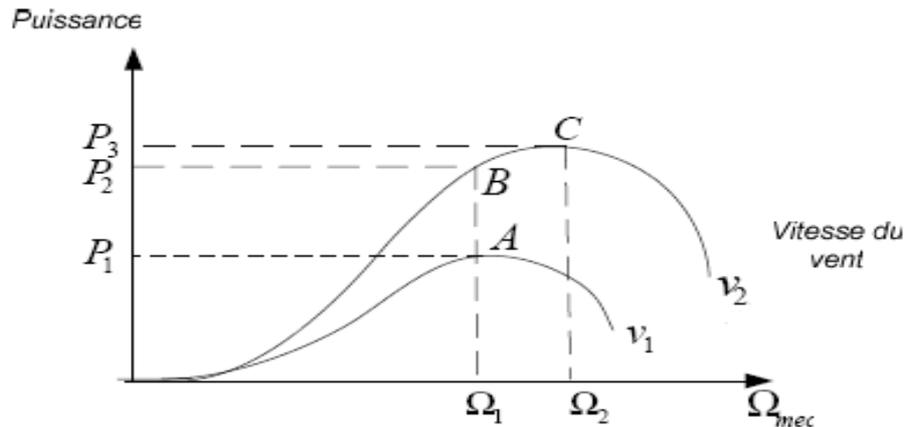


Fig.III.8 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour une vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence Ω_{ref} , calculée pour maximiser la puissance extraite [9].

➤ **Le mode de régulation**

On parle souvent de deux types de régulation :

- par variation d'angle de calage « Pitch régulation » ;
- par décrochage aérodynamique « Stall-régulation ».

Le premier est réalisé en orientant les pales, faisant ainsi varier la surface apparente au vent donc faisant varier l'effort, exercé par ce dernier, sur les pales. Ce système permet aussi de freiner la turbine s'il est nécessaire. Le second utilise le phénomène de décrochage aérodynamique : plus la vitesse du vent est élevée, plus l'effort exercé par le vent sur les pales diminue, les éoliennes utilisant ce type de régulation possède en général un mécanisme de freinage en bout des pales qui, en cas de survitesse, actionne des masselottes par effet centrifuge pour orienter une partie de l'extrémité de la pale, freinant ainsi le rotor de manière aérodynamique [4],[11].

I.4 La machine asynchrone à double alimentation

Un intérêt croissant est accordé à la Machine Asynchrone à Double Alimentation pour plusieurs raisons :

- Un plus grand nombre de degrés de liberté liés à l'accessibilité aux variables rotoriques,
- Une plus grande souplesse de fonctionnement liée à la présence des convertisseurs statiques associés aux deux armatures,
- Une possibilité de réglage de la répartition des puissances statorique et rotorique pour optimiser les dimensions des convertisseurs,
- Un élargissement de la plage de vitesse pour un fonctionnement à flux constant et à couple maximal,
- La possibilité de faire fonctionner la machine à vitesse très faible tout en gardant des pulsations statorique et rotorique de valeurs moyennes. Cela permet de minimiser l'effet des chutes de tension résistives [12].

I.4.1 Structure de la machine

La MADA se compose principalement de deux parties. Un stator analogue à celui des machines triphasées classiques, constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Et un rotor qui tourne à l'intérieur de la cavité de la machine, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent se frotter des balais lorsque la machine tourne. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un onduleur (Fig.I.9) [11].

La structure de la machine asynchrone à double alimentation permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près

que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif, pour cela elle est aussi appelée machine généralisée. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme « machine synchrone à excitation alternative » [4].

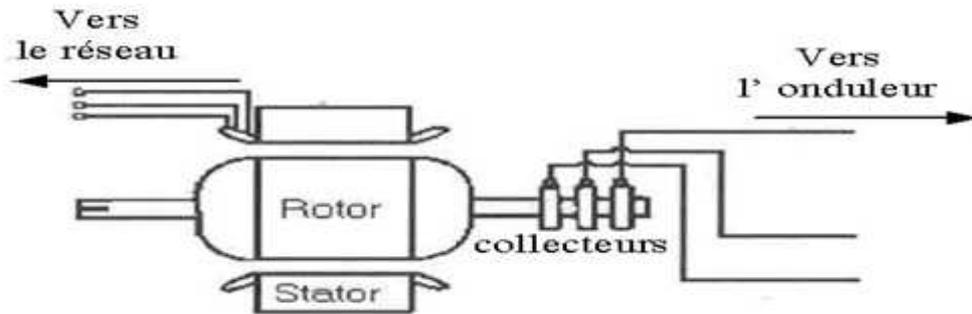


Fig.I.9 MADA connectée à deux sources triphasées

I.4.2 Modes de fonctionnement

On base sur le mode de fonctionnement où le stator est connecté directement au réseau et le rotor est alimenté par un convertisseur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule : la puissance rotorique, on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine [11],[13].

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou en générateur.

Une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur. Ici c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [6].

Les puissances (en ignorant les pertes) de la MADA peuvent être écrites par les expressions suivantes :

$$Pr = -gPs \text{ et } Pm = -(1-g) Ps \quad (I.10)$$

➤ **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone : ($P_m < 0$, $P_s > 0$, $P_r < 0$)**

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor (Figure I.10.a).

➤ **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone : ($P_m < 0$, $P_s > 0$, $P_r > 0$)**

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique (Figure I.10.b).

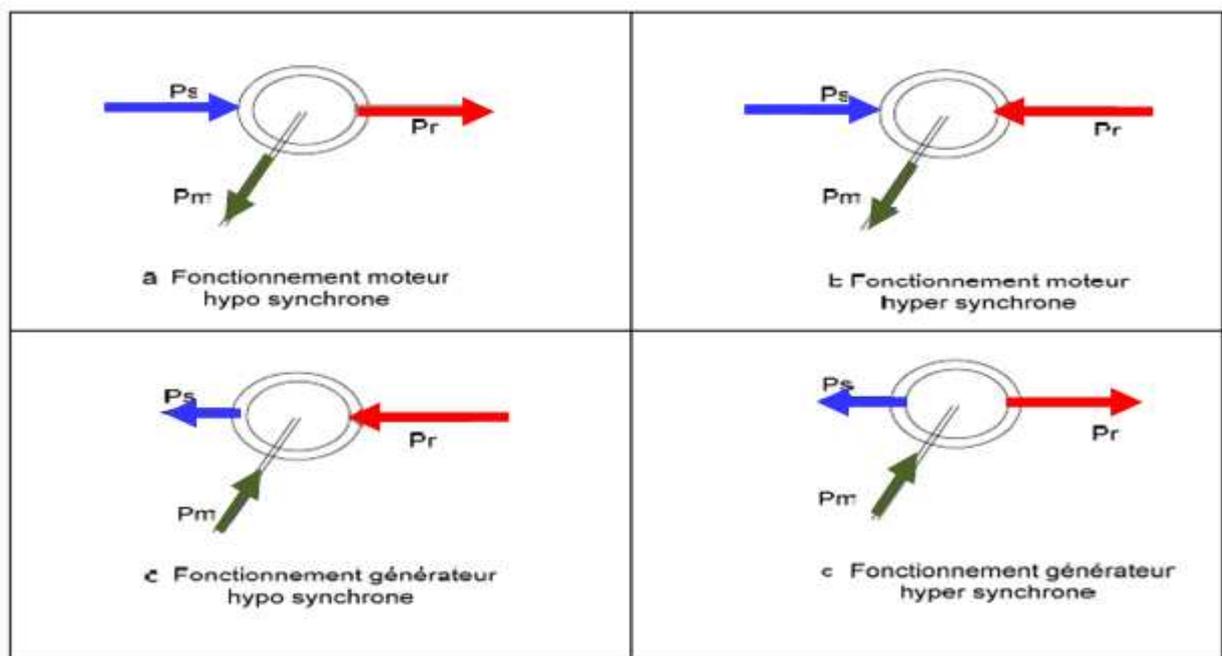


Fig.I.10 les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA

➤ **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone : ($P_m > 0$, $P_s < 0$, $P_r > 0$)**

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor (Figure I.10.c).

➤ **Fonctionnement en générateur hyper synchrone : ($P_m > 0$, $P_s < 0$, $P_r < 0$)**

La puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor (Figure I.10.d) [6],[9],[11].

I.4.3 Domaine d'utilisation de la MADA

La MADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [14].

I.4.4 L'application de la MADA dans les systèmes éoliens

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas (\pm) 30% en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale [3],[11].

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des machines asynchrones doublement alimentées (à rotor bobiné) [4].

La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance situés au circuit rotorique. La plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator, et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor (fig.I.11). Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite système de refroidissement moins lourd et génère moins d'harmoniques [3],[11].

L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.

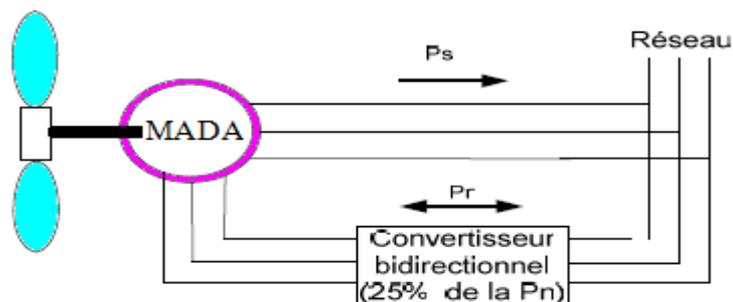


Fig.IV.11 Application de la MADA dans les systèmes éoliens

I.4.5 Différentes topologies de la MADA

On distingue deux types de dispositifs utilisant la machine asynchrone pour la production de l'énergie éolienne : Un dispositif tournant à vitesse fixe et utilisant un moteur à cage et un autre dispositif tournant à vitesse variable utilisant la MADA.

On présente dans cette partie quelques architectures utilisant toutes une MADA et des convertisseurs bidirectionnels pour la conversion électromécanique.

a) Machine asynchrone à double alimentation « type brushless »

Cette machine est à double stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée, il a une grande section. L'autre bobinage est de section moins importante. On peut contrôler la vitesse de la génératrice autour d'un point de fonctionnement en agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique qui sera appelé enroulement d'excitation. Il est connecté à des convertisseurs d'électronique de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit (Figure I.12).

Le rotor dans cette machine est à cage d'écureuil, cependant il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques.

Ce système n'a pas été exploité industriellement mais existe à l'état de prototype [9],[15].

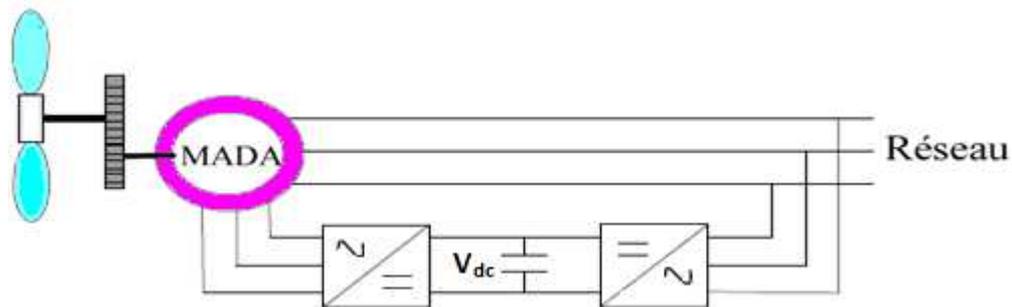


Fig.I.12 Machine asynchrone à double bobinage statorique

b) Machine asynchrone à double alimentation par le stator et le rotor

L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau, mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance (Fig.I.13).

Pour expliquer son principe de fonctionnement, en négligeant toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$, est retrouvée sous forme de puissance

mécanique ; le reste, gP sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Donc le réseau reçoit $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs.

La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g .

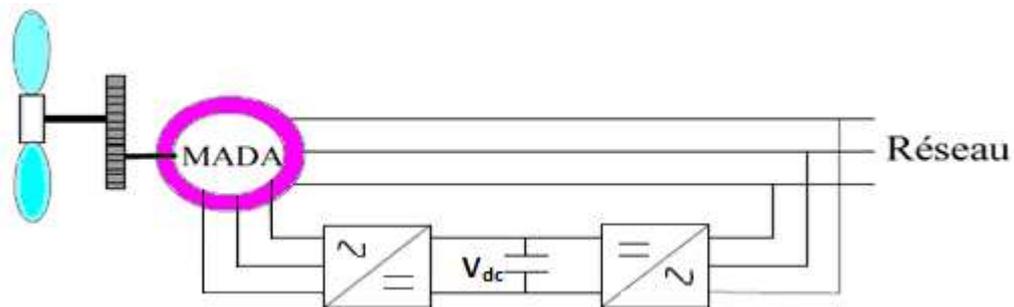


Fig.I.13 Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

c) Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive R est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. On peut varier le glissement par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans R . Cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse (Fig.I.14).

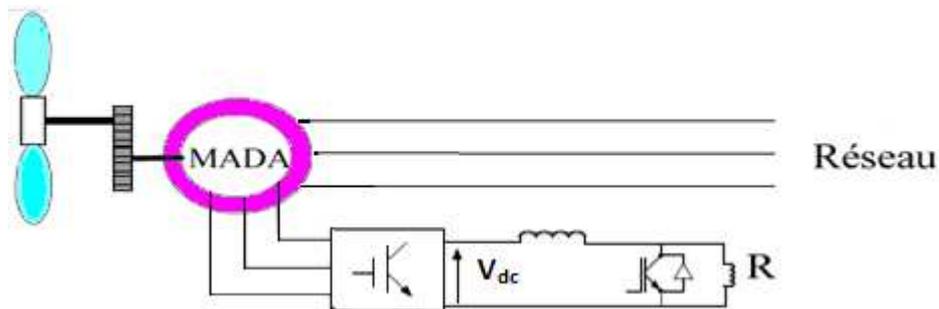


Fig.I.14 MADA avec un contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique

d) Machine asynchrone à double alimentation pont à diodes et pont à thyristor
« Structure de Kramer »

Cette structure consiste à utiliser un pont à diodes et un pont à thyristors, Les tensions entre bagues sont redressées par le pont à diodes. L'onduleur à thyristors non autonome applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (Fig.I.15). Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.

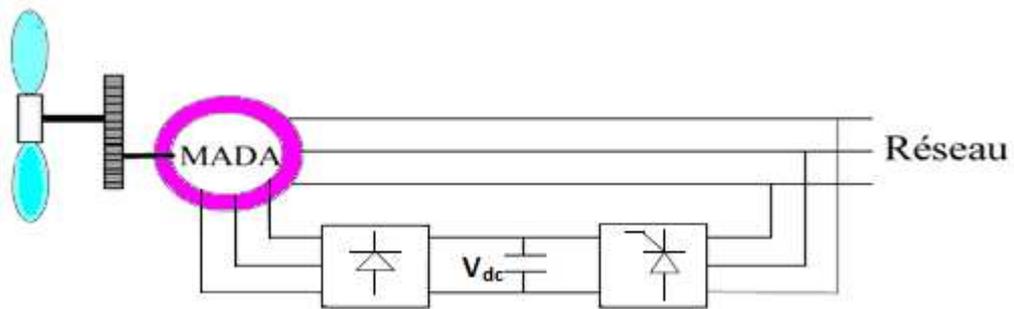


Fig.I.15 MADA alimentée par un pont à diodes et un pont à thyristors

e) Machine asynchrone à double alimentation pont à diodes et pont à transistor
« Structure de Kramer » :

Les onduleurs à commutation naturelle constitués des thyristors de la structure précédente sont remplacés par des onduleurs à commutation forcée et à modulation de largeurs d'impulsions (MLI) constitués par des transistors de puissance (Fig.I.16).

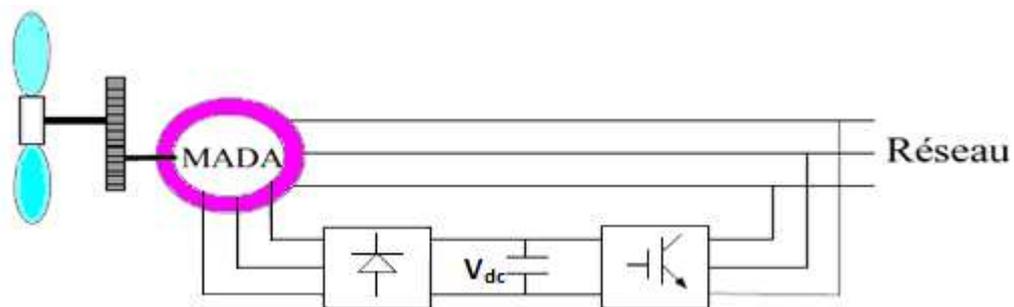


Fig.I.16 MADA alimentée par un pont à diodes et un onduleur MLI

Cette structure permet de contrôler le flux de la puissance réactive et utilise un onduleur fonctionnant à fréquence élevée, et n'injecte pas de courants harmoniques ; mais elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la génératrice ; Ainsi elle permet de magnétiser la machine asynchrone par le biais du bus continu, ce qui alourdit le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre. Les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des $\frac{dv}{dt}$ importantes qui peuvent réduire leur durée de vie.

f) Machine Asynchrone à Double Alimentation : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin de permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le réseau et le rotor on utilise un cycloconvertisseur, (Fig.I.17). Cette configuration a les mêmes caractéristiques que la précédente, sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans les deux sens. Le montage est conçu pour des valeurs de fréquence rotorique très inférieures à celles du réseau autrement dit pour des glissements très faibles. Ainsi, ceci permet l'utilisation des thyristors qui sont intéressants du point de vue coût. Comme le flux de puissance est bidirectionnel, il est possible de faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur. L'utilisation des thyristors dans ce montage implique une présence de fortes composantes harmoniques nuisant ainsi à la qualité du facteur de puissance.

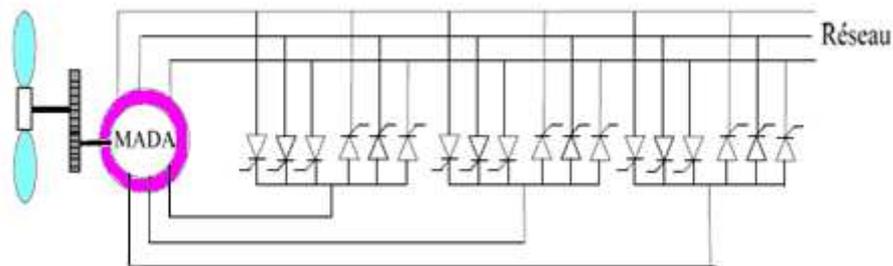


Fig.I.17 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

I.4.6 Avantages et inconvénients de la MADA

➤ Avantages

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de

rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.

- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale.
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

➤ **Inconvénients**

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur le système éolien en précisant les différents éléments d'une éolienne, les différents types d'éoliennes et le principe de fonctionnement. Ainsi on a présenté les avantages et les inconvénients des éoliennes.

La structure de la MADA est aussi présentée, et ses différentes structures d'alimentation.

La MADA se distingue au plan économique par l'utilisation de convertisseurs de plus faible puissance. Elle a l'avantage d'être flexible d'où le nom de machine généralisée. Le fonctionnement sur les quatre cadrans dans une large gamme de vitesse est l'argument majeur de sa supériorité. Grâce à une commande spécifique cette machine peut être dédiée à l'optimisation des échanges d'énergie d'où son application dans la génération d'énergie éolienne.

Notre choix dans le cadre de ce travail, c'est la structure cherbius avec convertisseur MLI. Elle offre une simplicité de fonctionnement et un faible coût de fabrication et de maintenance.

Chapitre II :

Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1 Introduction

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. La seule différence réside dans le fait que ces enroulements ne sont plus systématiquement en court-circuit par conséquent les tensions diphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après ne sont pas nulles. La modélisation d'une machine asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. Mais il y a une grande complexité physique liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. L'utilisation des méthodes matricielles est la base pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande. Dans ce chapitre, on va modéliser et simuler la MADA.

II.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Comme la machine asynchrone, elle se compose d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoidalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre.

Le stator est alimenté par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II.1})$$

ω_s : La pulsation du réseau d'alimentation triphasé,

p : le nombre de paire de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Le rotor qui est exécuté comme le stator, tourne à la vitesse $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$ par rapport au stator, avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure (II.1). Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m créées au rotor et au stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (\text{II.2})$$

Où : N_s et N_r sont respectivement le nombre de spires des bobinages statoriques et rotoriques.

ω_s et ω_{mec} sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

En posant :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (\text{II.3})$$

L'équation (I.2) devient :

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot \frac{N_r}{N_s} \quad (\text{II.4})$$

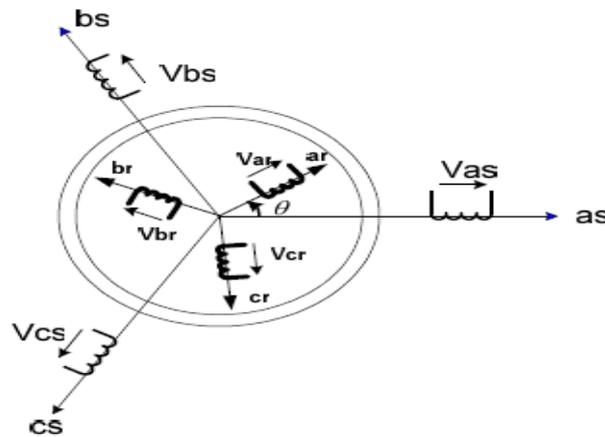


Fig. II.1 Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation

Où : as, bs, cs : phases du stator et ar, br, cr: phases du rotor.

II.3 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices qui sont [4],[16]:

- La machine est de constitution symétrique ;
- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire ;
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé ;
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor donc seuls les enroulements sont parcourus par des courants ;
- Les paramètres de la machine sont considérés indépendants de la température ;

- la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures d'où résulte du fait que l'entrefer est constant ;
- l'effet d'encoche est négligé et les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor.

II.4 Modèle mathématique de la MADA

II.4.1 Equations électriques de la machine

Sous les hypothèses précédentes et en utilisant La loi de Faraday et la loi d'Ohm, Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II.5})$$

Et les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par :

$$[v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (\text{II.6})$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (II.7) dans (II.5) et (II.6), on obtient:

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + P[L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + P[L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

P : opérateur de Laplace ;

Avec :

$$\begin{aligned} [v_s] &= \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} ; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} ; \\ [v_r] &= \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} ; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} ; \end{aligned}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix};$$

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix};$$

$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$, θ :Ecart angulaire entre deux phases, statorique et rotorique correspondant.

Où:

- $[v_s], [v_r]$: vecteurs de tensions statorique et rotorique;
- $[i_s], [i_r]$: vecteurs de courants statorique et rotorique;
- $[\Phi_s], [\Phi_r]$: vecteurs de flux statorique et rotorique;
- $[R_s], [R_r]$:matrices de résistances statorique et rotorique;
- R_s, R_r : résistances statorique et rotorique par phase;
- $[L_{ss}], [L_{rr}]$: matrices d'inductances statorique et rotorique;
- L_{ss}, L_{rr} : inductances propres d'une phase statorique et rotorique;
- $[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles ;
- M_s, M_r : inductances mutuelles entre deux phases respectivement statorique et rotorique;
- M : maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique (les axes des deux phases coïncident);

II.4.2 Equations mécaniques de la MADA

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2} p [i]^T \frac{d[L]}{dt} [i] \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$[i] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} : \text{Matrice de courant total ;}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} : \text{Matrice inductance totale ;}$$

p : Le nombre de paire de pôle.

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants, on aura :

$$C_{em} = p [i_s]^T \frac{d[M_{sr}]}{dt} [i_r] \quad (\text{II.10})$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{II.11})$$

Avec :

J : Moment d'inertie ;

C_r : Couple résistant ;

f_r : Coefficient de frottement.

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

II.4.3 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan dq

II.4.3.1 Transformation de Park

La transformation de R.H.Park appelée souvent transformation des deux axes, est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q, o) continu (Figure II.2), afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [17].

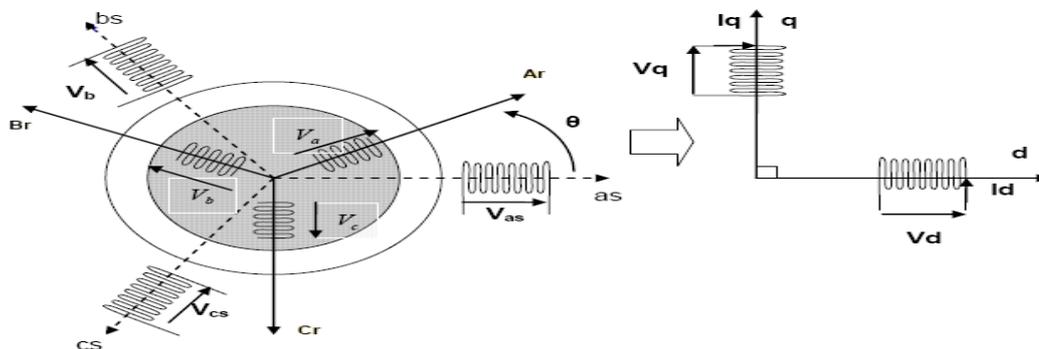


Fig. II.2 Passage du triphasé au biphasé

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ qui est donnée sous la forme suivante :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

L'angle θ est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que $[P(\theta)]$ soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T \quad (\text{II.12})$$

II.4.3.2 Application de la transformation de Park à la MADA

En remplaçant dans la matrice de Park θ par θ_s pour les équations du stator et θ par θ_r pour celles du rotor, (Figure II.3) Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

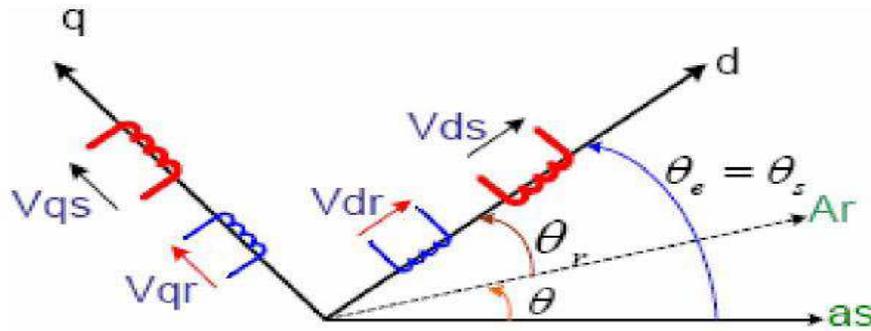


Fig. II.3 Représentation de la machine dans le repère diphasé.

$$[v_{s,dq}] = [P(\theta_s)][v_s] ; [i_{s,dq}] = [P(\theta_s)][i_s] ; [\Phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)][\Phi_s] ; \quad (\text{II.13})$$

$$[v_{r,dq}] = [P(\theta_r)][v_r] ; [i_{r,dq}] = [P(\theta_r)][i_r] ; [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_r)][\Phi_r] ; \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [v_{s,dq}] &= [v_{ds} \ v_{qs} \ v_{os}]^T ; [i_{s,dq}] = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{os}]^T ; [\Phi_{s,dq}] = [\Phi_{ds} \ \Phi_{qs} \ \Phi_{os}]^T \\ [v_{r,dq}] &= [v_{dr} \ v_{qr} \ v_{or}]^T ; [i_{r,dq}] = [i_{dr} \ i_{qr} \ i_{or}]^T ; [\Phi_{r,dq}] = [\Phi_{dr} \ \Phi_{qr} \ \Phi_{or}]^T \\ \begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} & \quad (\text{II.15}) \end{aligned}$$

Tel que :

$L_s = l_s - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$L_r = l_r - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2}M_{rs} = \frac{3}{2}M_{sr}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

En introduisant les équations (II.13), (II.14) dans l'équation (II.5) on obtient :

$$\begin{cases} [v_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_e \Phi_{qs} \\ [v_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_e \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Par analogie, on obtient pour les grandeurs rotoriques les tensions suivantes:

$$\begin{cases} [v_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_e - \omega)\Phi_{qr} \\ [v_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_e - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}; \omega = \frac{d\theta}{dt}; \theta_e = \theta_s = \theta_r + \theta$$

Après qu'on a effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut s'exprimer sous différentes formes, on trouve celle-ci [3] :

$$C_{em} = p \cdot (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.18})$$

II.4.4 choix du référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié :

II.4.4.1 Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_e}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation.

II.4.4.2 Référentiel lié au rotor

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_e}{dt} = \omega$$

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

II.4.4.3 Référentiel lié au champ tournant

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s ; \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s = \omega_r ;$$

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines [13].

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} [v_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ [v_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{cases} [v_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \\ [v_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{cases} C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \\ \frac{J}{p} \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - C_f \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II.4.5 Mise sous forme d'équations d'état

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les flux statoriques et les courants rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par les équations suivantes [18] :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{ds} + \omega_s \cdot \Phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + v_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{qs} - \omega_s \cdot \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + v_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{dr} + \omega_r \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot p \cdot \omega \cdot \Phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} - \omega_r \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{qs} + \beta \cdot p \cdot \omega \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\mu \cdot p}{J} (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) - \frac{p}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \omega \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s} ; \sigma_r = L_r \cdot \left(1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}\right) ; \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s \cdot M^2}{L_s^2 \cdot \sigma_r} ; \beta = \frac{M}{L_s \cdot \sigma_r} ; \mu = \frac{3M}{2L_s} .$$

p : le nombre de paires de pôles.

II.5 Résultats de simulation

A l'aide du logiciel MATLAB, la simulation de la MADA a été faite. Les données de la machine utilisée en simulation sont données en annexe A. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant.

- Les résultats de simulation de démarrage à vide de la MADA à rotor en court circuit sont présentés sur les figures (II.4), (II.5), (II.6), (II.7) concernant respectivement la vitesse et le couple, les composantes du flux statoriques, les composantes du courant statoriques et rotoriques.

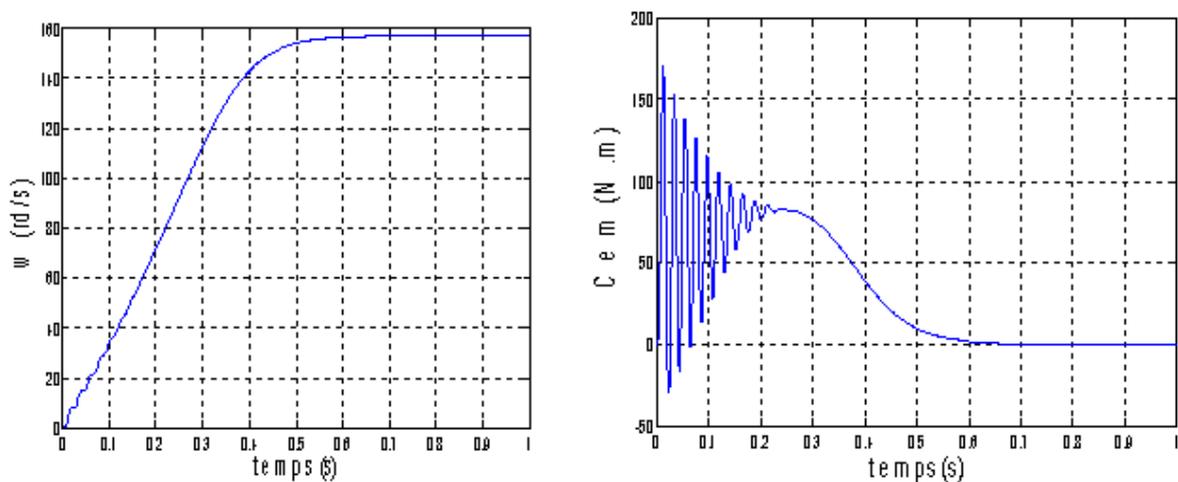


Fig. II.4 Vitesse et le couple électromagnétique

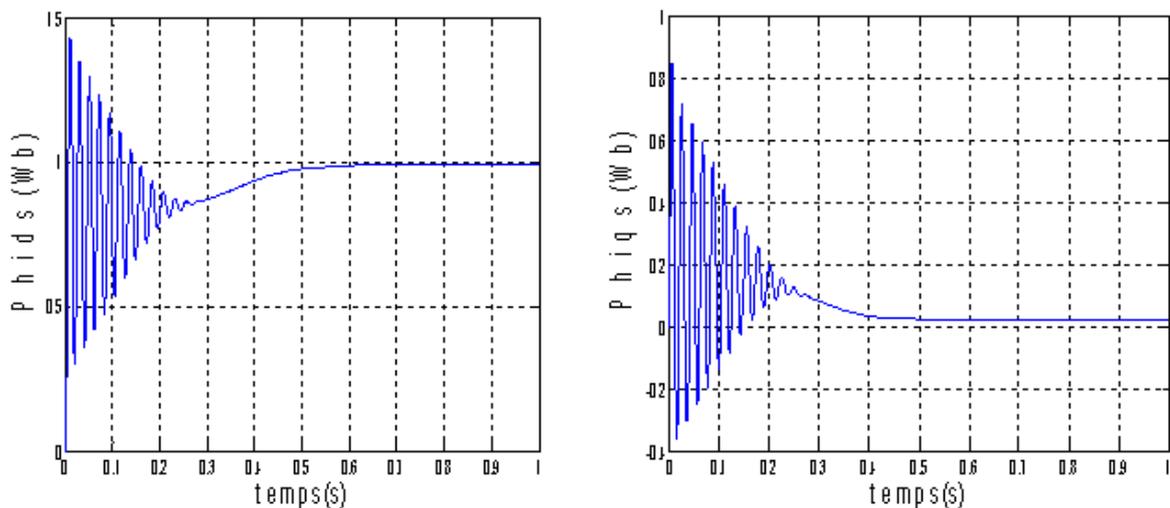


Fig. II.5 Les composantes du flux statorique

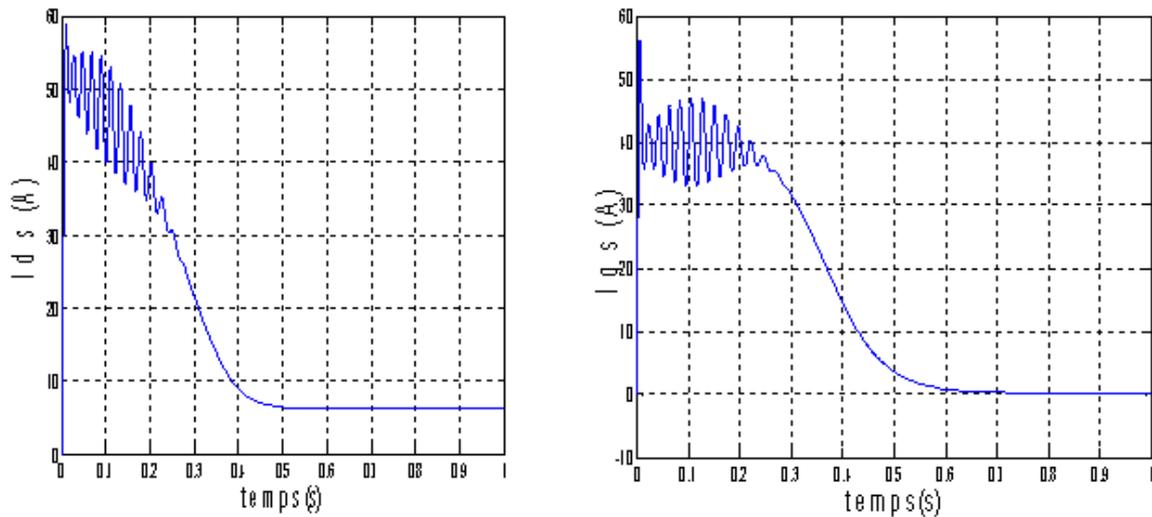


Fig. II.6 Les composantes du courant statorique

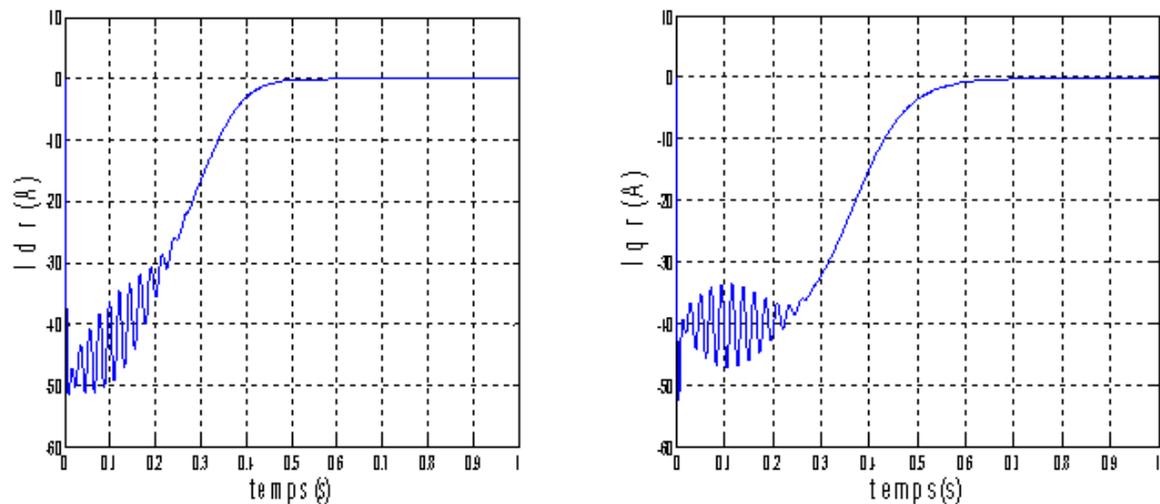


Fig. II.7 Les composantes du courant rotorique

- Les résultats de simulation de démarrage à vide de la MADA à rotor en court circuit en appliquant un couple de charge à la machine $C_r = +20 \text{ Nm}$ entre les instants 1s et 2s et un couple de charge à la machine $C_r = -20 \text{ Nm}$ entre les instants 3s et 4s, sont présentés sur les figures (II.8), (II.9), (II.10), (II.11), (II.12), (II.13) concernant respectivement la vitesse et le couple, les composantes du flux statoriques, les composantes du courant statoriques, le courant d'une phase statorique, les composantes du courant rotoriques et la tension triphasée appliquée au stator.

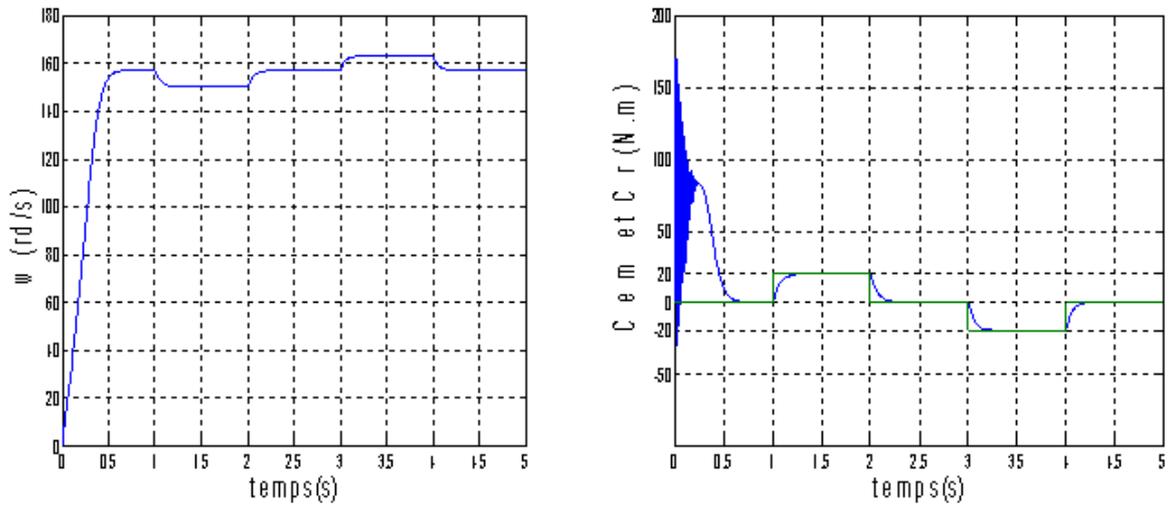


Fig. II.8 Vitesse et le couple électromagnétique avec le couple résistant

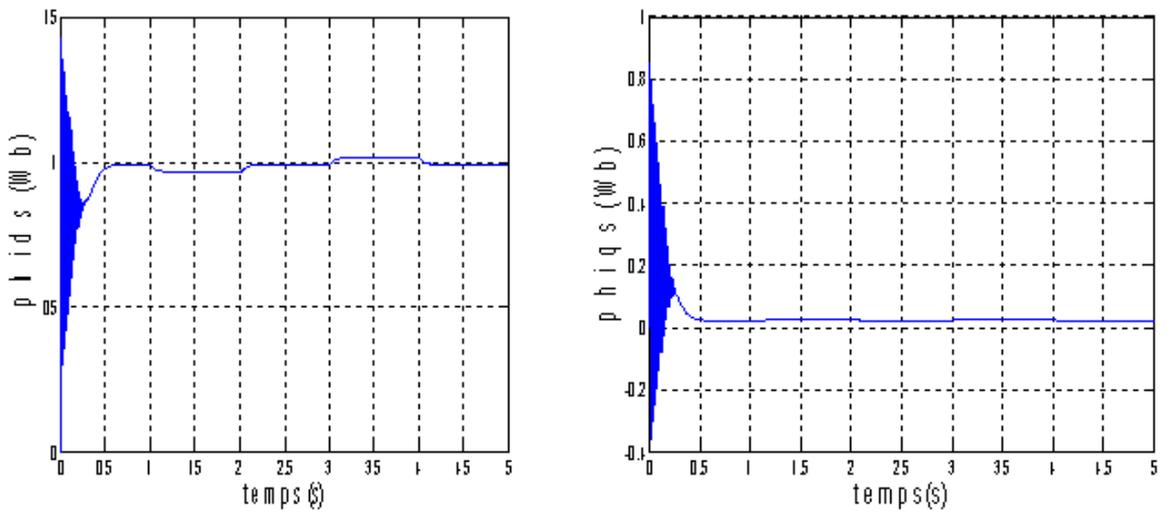


Fig. II.9 Les composantes du flux statorique

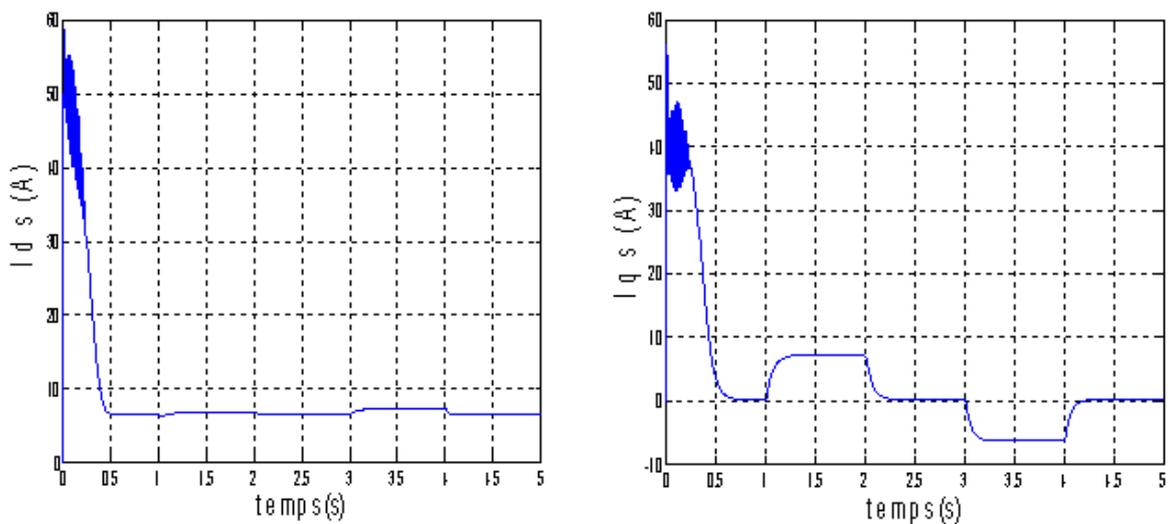


Fig. II.10 Les composantes du courant statorique

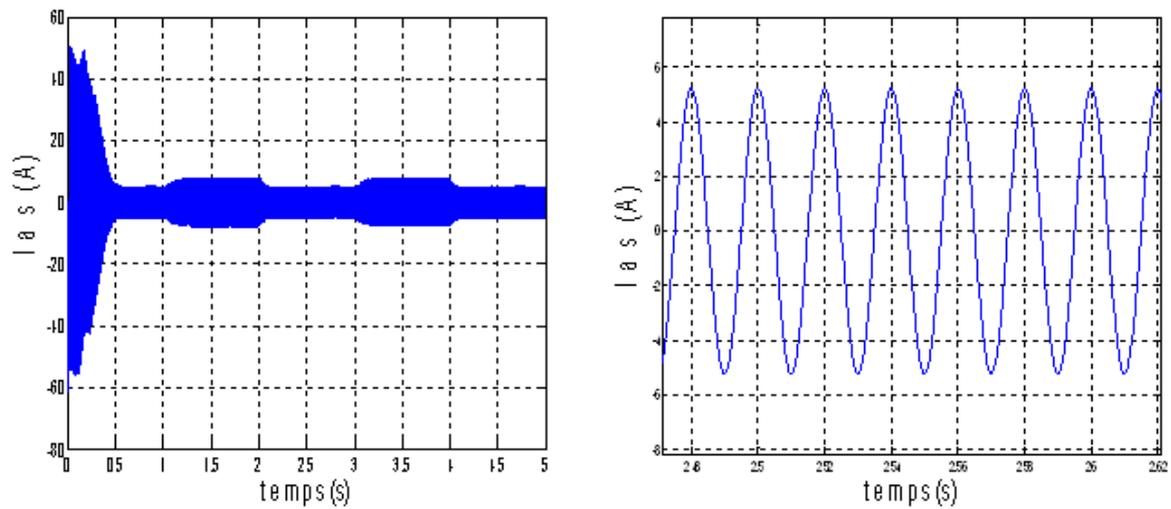


Fig. II.11 Le courant d'une phase statorique avec zoom

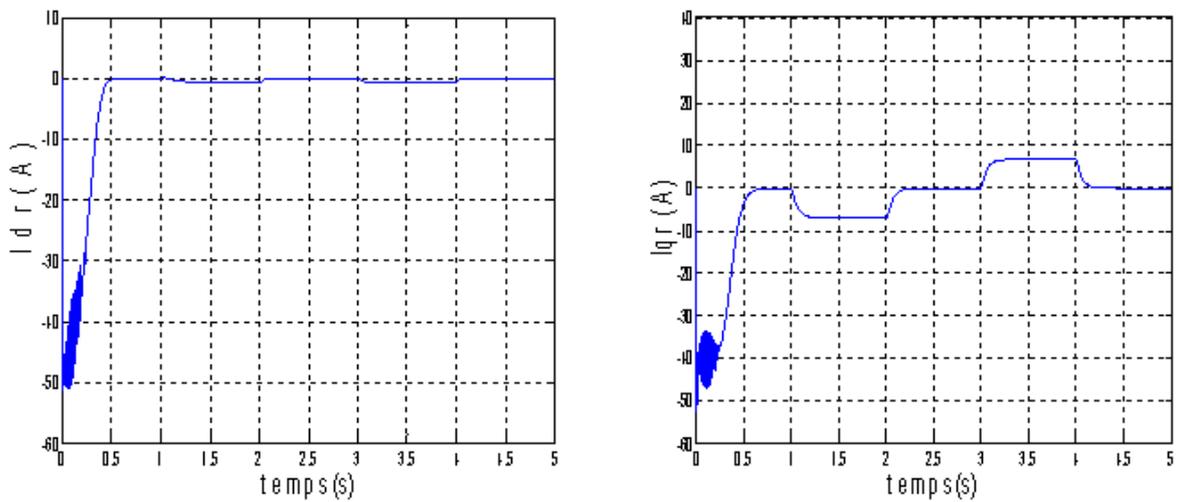


Fig. II.12 Les composantes du courant rotorique

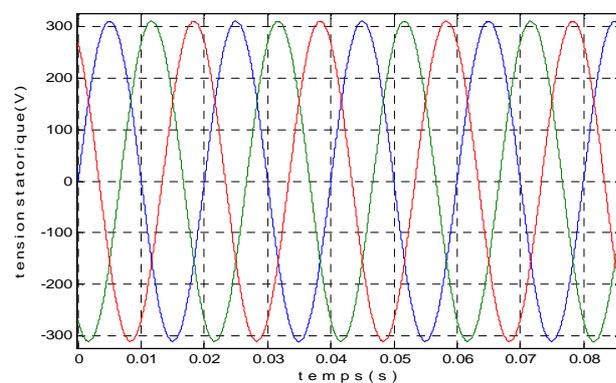


Fig. II.13 La tension triphasée appliquée au stator avec zoom

La simulation s'effectue au départ d'un démarrage à vide. On remarque que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. Le couple électromagnétique est pulsatoire, oscille autour d'une valeur qui correspond à la valeur du couple résistant de la machine. Ce qui explique le bruit engendré côté mécanique.

On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, et après un temps égal à environs 0,5 s, les courants i_{dr} et i_{qr} se stabilisent et prennent des valeurs proches de zéro. Ainsi la vitesse se stabilise à une valeur à vide proche de 157 rad/s après un temps égal à environs 0,5 s.

Ce démarrage rapide a permis d'avoir un établissement rapide du couple électromagnétique au régime transitoire.

Après que le régime permanent s'est établi, on applique un couple de charge à la machine $C_r=+20\text{Nm}$ entre 1s et 2s, par la suite on applique un couple $C_r=-20\text{ N.m}$ entre 3s et 4s. Nous observons une bonne stabilité de la machine. En appliquant un couple résistant, le couple électromagnétique augmente afin de compenser le couple de résistant, cela induit une légère diminution de vitesse traduite par un glissement supplémentaire (+g, ou -g) correspondant au glissement nominal de la machine. À vide la vitesse du rotor est proche de la vitesse de synchronisme (glissement nul), et au moment où on applique un couple résistant $C_r=+20\text{N.m}$, la vitesse diminue (augmentation du glissement) et pour $C_r=-20\text{N.m}$, la vitesse augmente (diminution du glissement) le couple électromagnétique répond au couple résistant, ainsi que les courants de phase.

De même pour les flux statoriques ϕ_{ids} et ϕ_{iqs} se changent à l'instant de l'application de la charge, qui explique le couplage naturel existant entre le flux et le couple.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la machine asynchrone à double alimentation en basant sur quelques hypothèses simplificatrices, pour réduire la complexité. Le modèle triphasé obtenu s'est réduit en un modèle biphasé à l'aide de la transformation de PARK. Le modèle de la MADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. Et enfin, nous avons présenté les résultats de simulation.

Le même modèle sera exploité pour étudier la stratégie de commande de la machine asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive au chapitre suivant.

Chapitre III :

Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Chapitre IV:

La Cascade basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation

IV.1 Introduction

Dans le précédent chapitre, on a supposé que la tension d'entrée de l'onduleur était constante, où l'onduleur peut être alimenté par des batteries par exemple, mais ceci n'est possible que pour des utilisations en faible puissance. Pour cela, on propose la génération de la tension V_{dc} à partir d'un réseau alternatif à 50 Hz en utilisant un convertisseur alternatif-continu.

Plusieurs types de redresseurs ont été proposés par différents auteurs [24],[25],[26] pour assurer l'alimentation réelle de l'onduleur à deux niveaux. Ces redresseurs peuvent être à MLI ou non. On distingue :

- Les redresseurs de tension monophasés ou triphasés.
- Les redresseurs de courant à MLI monophasés ou triphasés à deux ou trois niveaux.

On propose d'utiliser un redresseur de courant à MLI à facteur de puissance unitaire pour éviter les inconvénients que présente le redresseur à commutation naturelle [25].

L'ensemble composé du redresseur, du bus continu et de l'onduleur formera la cascade qui sera la liaison entre le rotor de la MADA et le réseau.

IV.2 Description du montage

L'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue. Ceci est assuré par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur (Fig.IV.1), Les deux convertisseurs interposés entre le rotor et le réseau sont à deux niveaux et ils ont six interrupteurs (transistors IGBT) qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture.

Le stator de la génératrice est directement connecté au réseau. La puissance échangée entre le rotor et l'onduleur correspond à la puissance de glissement, limitée à 30% de la puissance nominale de la machine. Ainsi, l'onduleur alimentant le rotor sera dimensionné pour cette puissance réduite (il est dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine). On a donc un système de production de forte puissance avec de l'électronique dimensionnée pour une puissance réduite, ce qui est intéressant en terme de coût et de fiabilité. Plusieurs études récentes montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien fonctionnant à vitesse variable [11], [26].

Pour alimenter en tension continue le convertisseur coté rotor, il faut mettre en œuvre un redressement, à partir de la tension du réseau. Une des contraintes majeures pour une machine asynchrone à double alimentation réside dans le fait que la

puissance au rotor est bidirectionnelle selon que l'on est en fonctionnement hyper ou en hypo synchrone.

Le redresseur alimentant le convertisseur coté rotor doit donc être capable de faire transiter l'énergie électrique dans les deux sens en fonctionnement permanent. Il doit donc être bidirectionnel en courant. C'est principalement pour cette raison que nous mettrons en œuvre un redresseur à Modulation de Largeur d'Impulsions et pas un pont de diodes classique.

Donc La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise le fonctionnement en hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

On va donc créer un bus de tension continue reliant l'onduleur coté rotor au redresseur MLI connecté au réseau. Ce bus est entièrement géré par le redresseur et possède une capacité de filtrage suffisante permettant d'avoir une tension stable et fixe quel que soit le fonctionnement de l'ensemble [6].

Le redresseur à MLI a le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. Sa tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée, d'où la nécessité d'avoir une tension du bus continu supérieure à la valeur crête des tensions composées du réseau [28].

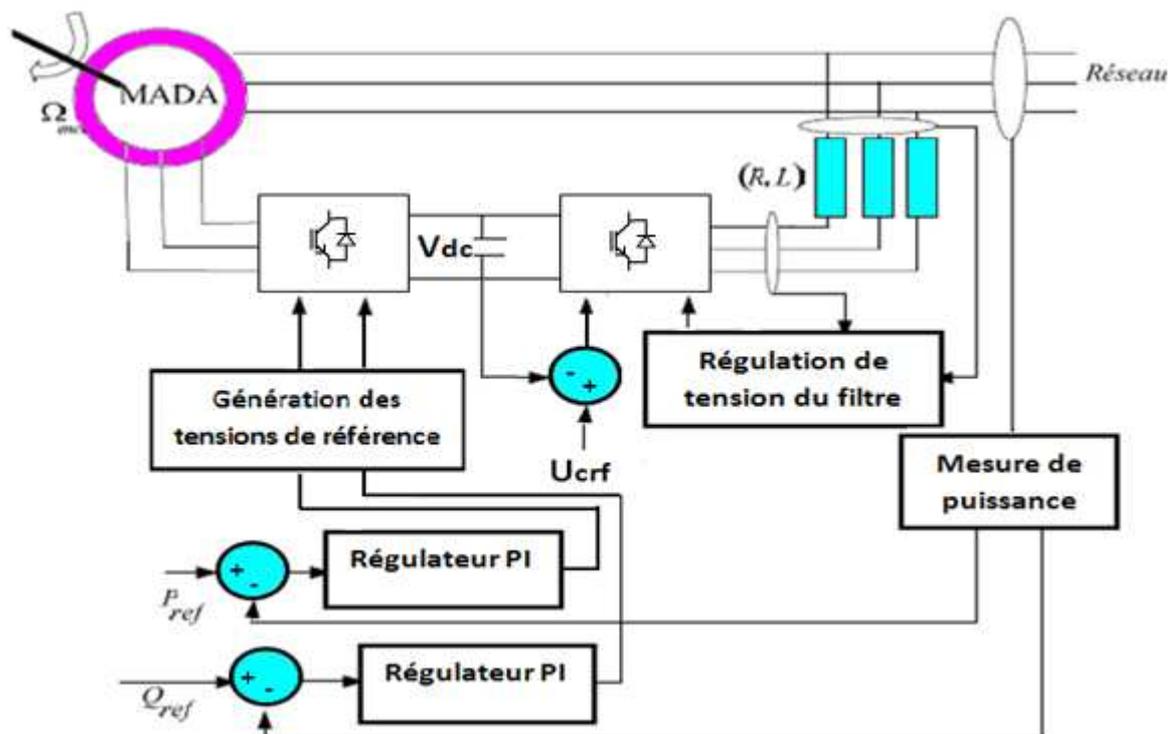


Fig.IV.1 Principe de la cascade basée sur une machine asynchrone à double alimentation

Après avoir repoussé les harmoniques générées par le redresseur vers un rang supérieur grâce à la technique MLI, celles-ci doivent être atténuées grâce à un filtre liant le réseau au redresseur. Ce filtre étant passe bas, la qualité du réseau sera améliorée en y atténuant les harmoniques supérieurs.

IV.3 Le redresseur à MLI

IV.3.1 introduction

Le modèle du redresseur de courant triphasé à MLI à deux niveaux est celui de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux présenté dans le chapitre précédent en fonctionnement inverse où la convention générateur sera pour la source de courant triphasé alternatif et la convention récepteur pour la source de tension continue. Les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

La commande par MLI à hystérésis contrôle les courants injectés par ce convertisseur dans le réseau. Ainsi, il est possible de contrôler non seulement la puissance active mais aussi la puissance réactive permettant à ce type de redresseur de ne pas dégrader le facteur de puissance du réseau. En outre, les formes d'ondes des courants alternatifs peuvent être sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées, et par la suite la facilité de filtrage [28].

Pratiquement les paramètres du réseau (résistance et inductance) sont difficiles à identifier. Généralement, on ajoute en série un filtre d'entrée R,L de valeurs plus importantes pour pouvoir négliger les paramètres du réseau. L'inductance dans le filtre permet également de respecter l'alternance des sources et de filtrer les harmoniques des courants du réseau.

IV.3.2 Modélisation

La figure (IV.2) montre la structure du redresseur de courant triphasé à deux niveaux, la source est modélisée par une f.e.m triphasée sinusoïdale en série avec une inductance L et une résistance R qui représentent l'impédance totale de la ligne.

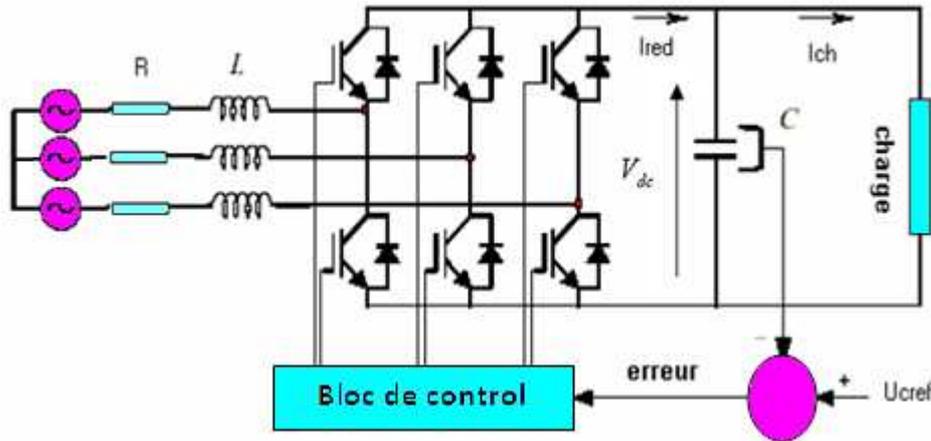


Fig. IV.2 : Redresseur de courant triphasé à M.L.I à deux niveaux

A l'équilibre, les tensions de ligne et les courants fondamentaux sont exprimés comme suit :

$$V_{resj} = V_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} (j - 1) \right) \quad (\text{IV.1})$$

$$i_{resj} = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} (j - 1) + \varphi \right) \quad (\text{IV.2})$$

$j = 1, 2, 3$;

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.

On s'assure que :

$$i_{res1} + i_{res2} + i_{res3} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

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

$$V_{resj} = V_{indj} + V_{nj} \quad (\text{IV.4})$$

$$V_{resj} = R \cdot i_{resj} + L \frac{di_{resj}}{dt} + V_{nj} \quad (\text{IV.5})$$

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = S_a \cdot i_{res1} + S_b \cdot i_{res2} + S_c \cdot i_{res3} - i_{ch} \quad (\text{IV.6})$$

Le système d'équations différentielles, donnant le courant ($i_{res1}, i_{res2}, i_{res3}$) dans chaque phase est donné par :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{res1} - V_{n1} \\ V_{res2} - V_{n2} \\ V_{res3} - V_{n3} \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

Avec :

V_{res1} ; V_{res2} et V_{res3} : Les tension de lignes.

V_{n1} ; V_{n2} et V_{n3} : Les tensions à l'entrée du convertisseur.

Le redresseur à MLI donné par la figure (IV.2) 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 est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique S_j selon la figure (IV.3).

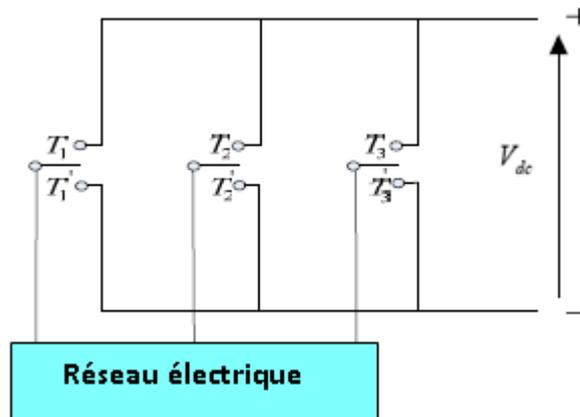


Fig. IV.3 Modèle équivalent du convertisseur AC/DC triphasé

Les tensions entre lignes sont données par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (IV.8)$$

Connaissant l'état de chaque interrupteur, on peut définir la matrice de conversion du convertisseur. Les tensions simples V_{n1} , V_{n2} et V_{n3} s'expriment par :

$$\begin{bmatrix} V_{n1} \\ V_{n2} \\ V_{n3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (IV.9)$$

Le courant redressé est donné par :

$$i_{red} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (IV.10)$$

IV.3.3 Connexion du redresseur au réseau électrique

Pour connecter le convertisseur au réseau électrique, on doit placer un filtre passif intermédiaire. Le rôle de ce filtre est d'atténuer l'amplitude des harmoniques d'ordre supérieur car celui-ci est passe bas.

Afin de générer un courant au réseau, il faut que la tension du bus continu V_{dc} soit supérieure à la valeur crête des tensions composée du côté du filtre. En appliquant la transformation de Park, ainsi la transformée de Laplace pour l'équation (IV.5), on aura le modèle du filtre où on fait apparaître deux fonctions de transfert identiques [4] :

$$F(P) = \frac{i_{dr}(P)}{V_{ondd}(P)} = \frac{i_{qr}(P)}{V_{ondq}(P)} = \frac{1}{R+L.P} \quad (IV.11)$$

On peut également placer un transformateur le transformateur est modélisé par la fonction de transfert suivante :

$$F(P) = \frac{V_{res}}{V_{ond}} = m \quad (IV.12)$$

Avec :

V_{res} : Tension au secondaire du transformateur ;

V_{ond} : Tension au primaire du transformateur ;

P : opérateur de Laplace.

Pour la simulation, l'effet de filtrage du transformateur est intégré dans celui du filtre. De là, la non prise en compte du transformateur dans la simulation.

IV.3.4 La Charge

La charge est constituée d'une capacité C pour diminuer les ondulations de la tension redressée placée en parallèle avec une impédance équivalente vue de la capacité C (Fig.IV.4).

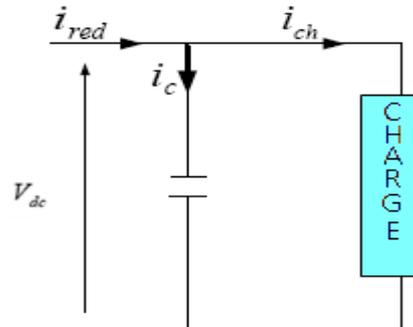


Fig. IV.4 Schéma de la charge.

Donc :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{i_{red} - i_{ch}}{C} \quad (IV.13)$$

i_{ch} : Courant de la charge.

i_{red} : Courant redressé.

Pour une charge résistive: $i_{ch} = \frac{V_{dc}}{R_c}$ (IV.14)

IV.3.5 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 IV.5).

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

$$\begin{cases} \varepsilon_k \geq \Delta i \Rightarrow S_k = 0 \\ \varepsilon_k \leq -\Delta i \Rightarrow S_k = 1 \end{cases} \quad (IV.15)$$

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

$$\varepsilon_k = i_{resk} - i_{refk} \quad (IV.16)$$

Et Δi est la largeur de la bande d'hystérésis.

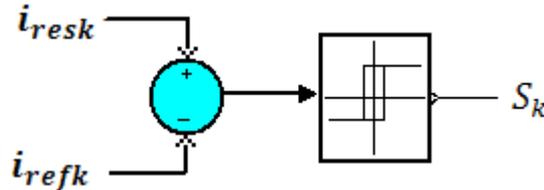


Fig. IV.5 principe de la stratégie de commande par hystérésis en courant

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 :

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

Donc :

$$3V_{eff} \cdot I \cdot \cos\varphi + 3 \cdot R \cdot I^2 = U_{red} \cdot i_{red} \quad (IV.18)$$

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

$$3 \cdot V_{eff} \cdot I = U_{red} \cdot i_{red} \quad (IV.19)$$

Où V et I 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 (IV.6) [26].

En négligeant la résistance, on a :

$$V_{1n}^2 = V_{res1}^2 + (L\omega i_{res1})^2 \quad (IV.20)$$

V_{1n} : la tension d'entrée d'une phase du redresseur.

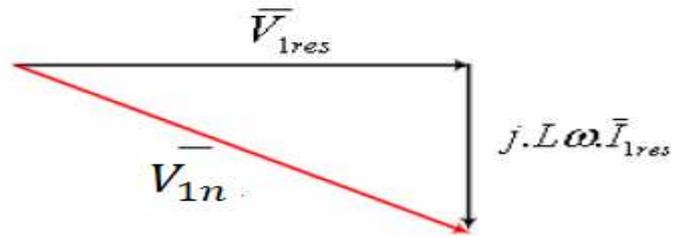


Fig. IV.6 Représentation de Fresnel du circuit du réseau

IV.3.6 Résultats de simulation

On présente ici les résultats obtenus par l'application de la stratégie à hystérésis de courant pour une hystérèse de valeur $\Delta i = 0.1 A$. Le redresseur alimente une charge résistive R_c .

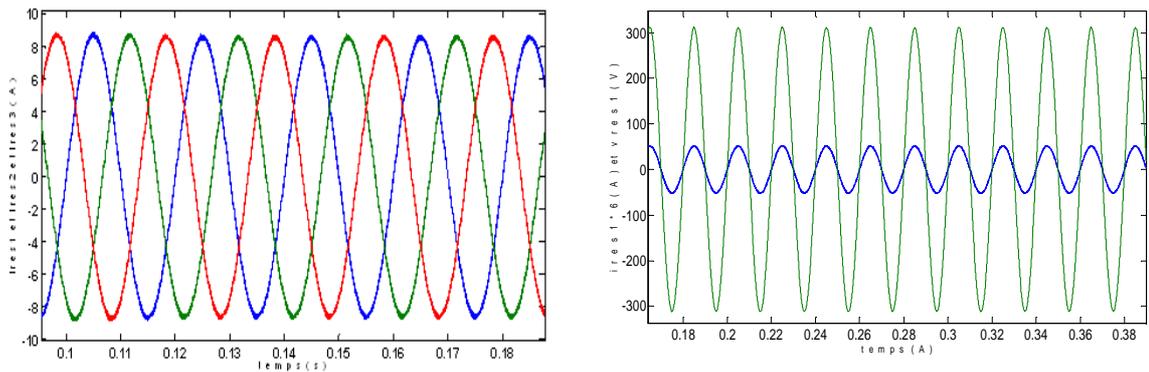


Fig. IV.7 Les trois courants ires1, ires2, ires3 et le courant ires1 avec la tension vres1

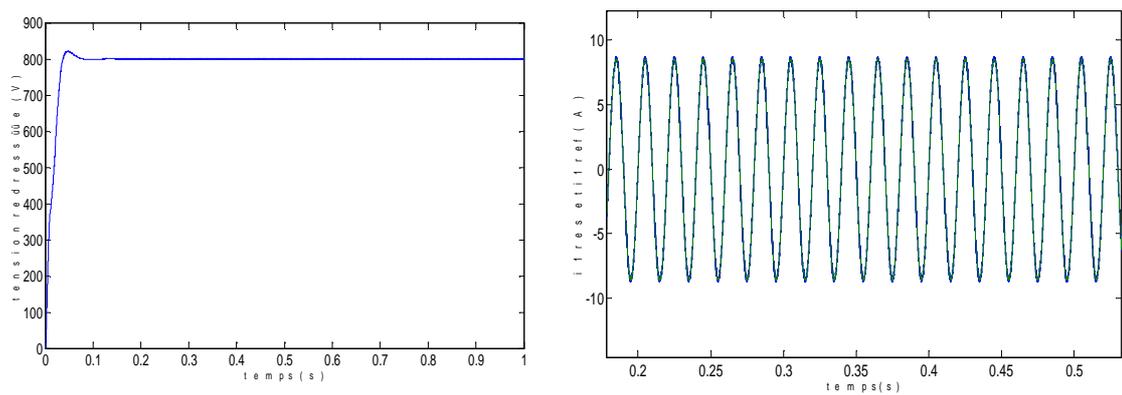


Fig. IV.8 la tension redressée et le courant de la phase 1 du réseau avec son courant de référence

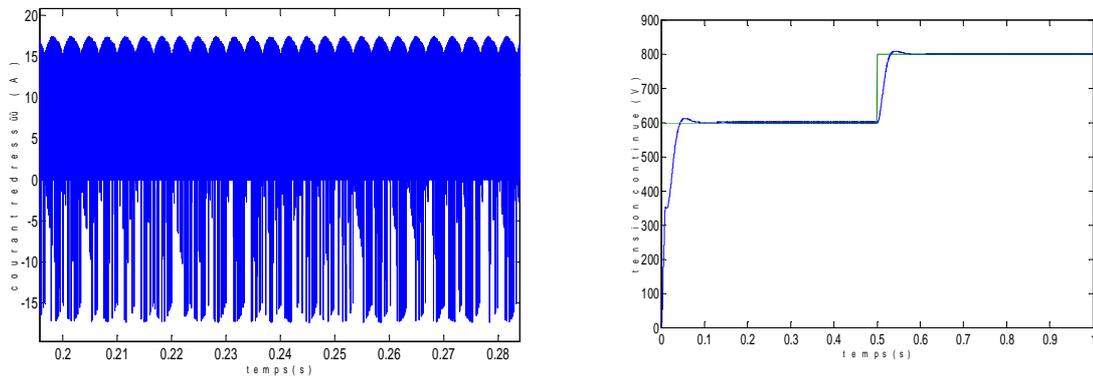


Fig. IV.9 Courant redressé et la réponse à un échelon de la tension

D'après les résultats présentés au-dessus, on voit que notre convertisseur fonctionne à facteur de puissance unitaire avec un courant absorbé du réseau qui possède une forme sinusoïdale et une tension à la sortie réglable et constante.

On constate bien que le courant du réseau suit sa référence et que la tension et le courant du réseau sont en phase.

Les paramètres choisis pour la simulation sont :

$f=50$ Hz; $U_{ref} = 800$ V; $C=2.2$ mF; $L=16$ mH; $R_c=165\Omega$; $V=220$ V.

IV.4 Régulation de la tension du bus continu

Le réglage de la tension du bus continu se fait par une boucle externe (Fig. IV.10). 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.

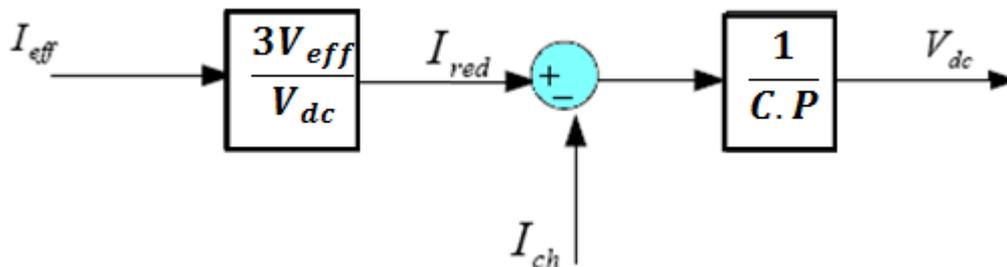


Fig. IV.10 Modèle de la tension du redresseur triphasé à deux niveaux

IV.5 Modélisation du bus continu

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

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (IV.21)$$

Le courant du condensateur est :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (IV.22)$$

Où : i_{ond} représente le courant de charge.

La tension de bus continu est modéliser par :

$$V_{dc} = \int \frac{V_{dc}}{dt} + V_{dc}(t_0) \quad (IV.23)$$

Avec :

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

IV.6 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.

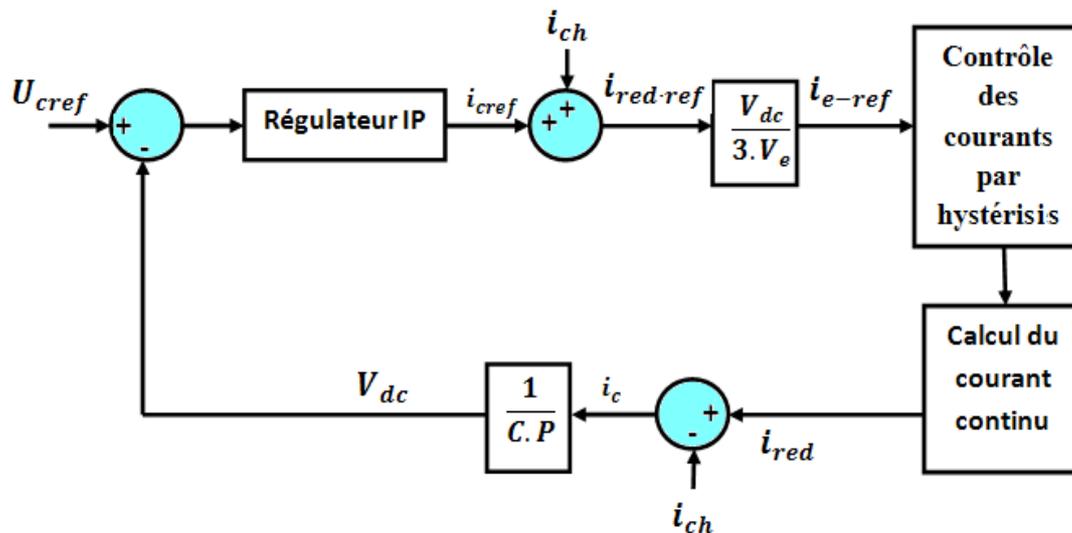


Fig. IV.11 Principe de la régulation en cascade du redresseur de courant à MLI

IV.7 Résultats de simulation

Après la modélisation de la liaison au réseau et le filtre intermédiaire, la commande vectorielle élaborée et appliquée dans le dernier chapitre, nous a permis de déterminer les signaux de commande du convertisseur du côté rotor.

Les résultats de simulation présentés sur les figure ci-dessous, nous permettent de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie triangulosinusoidale, avec un démarrage à vide puis avec une application d'une puissance active $P = -1000\text{W}$ entre $t = 1\text{s}$ et $t = 3\text{s}$, et une puissance réactive $Q = 1000\text{VAR}$ entre $t = 1.5\text{s}$ et $t = 3.5\text{s}$ avec une fréquence de porteuse $f_p = 3\text{kHz}$.

On travaille pour une fréquence rotorique fixe, $f_r = 2\text{Hz}$.

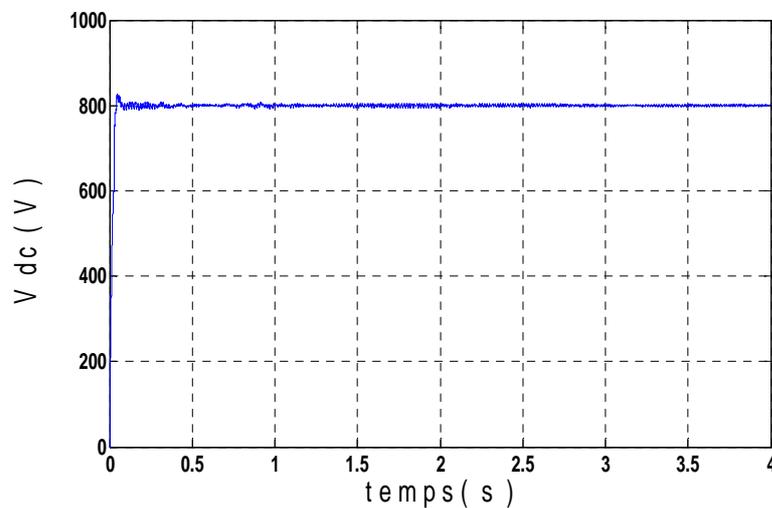


Fig. IV.12 La tension du bus continu continue

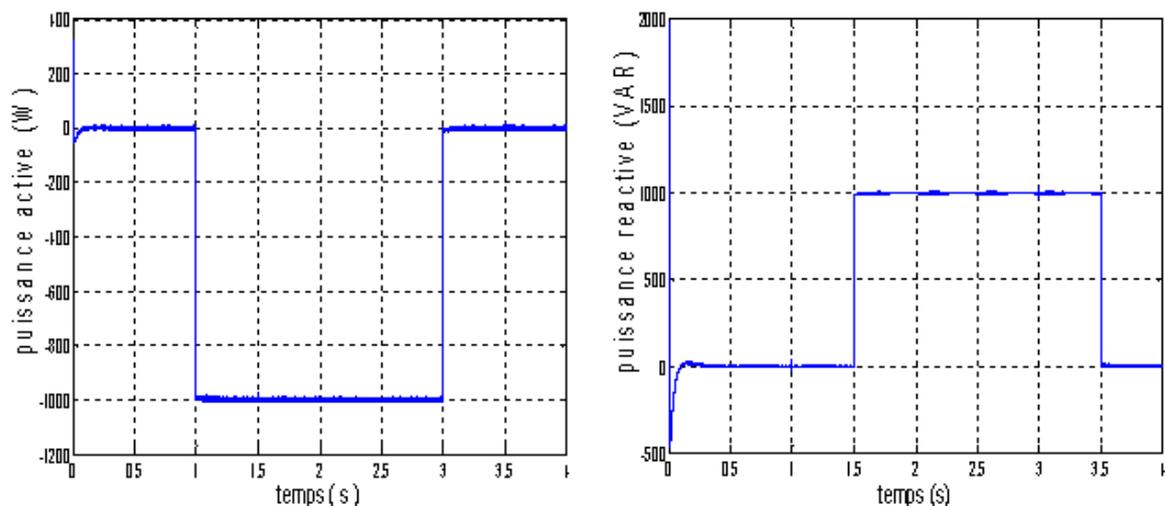


Fig. IV.13 La puissance active et la puissance réactive

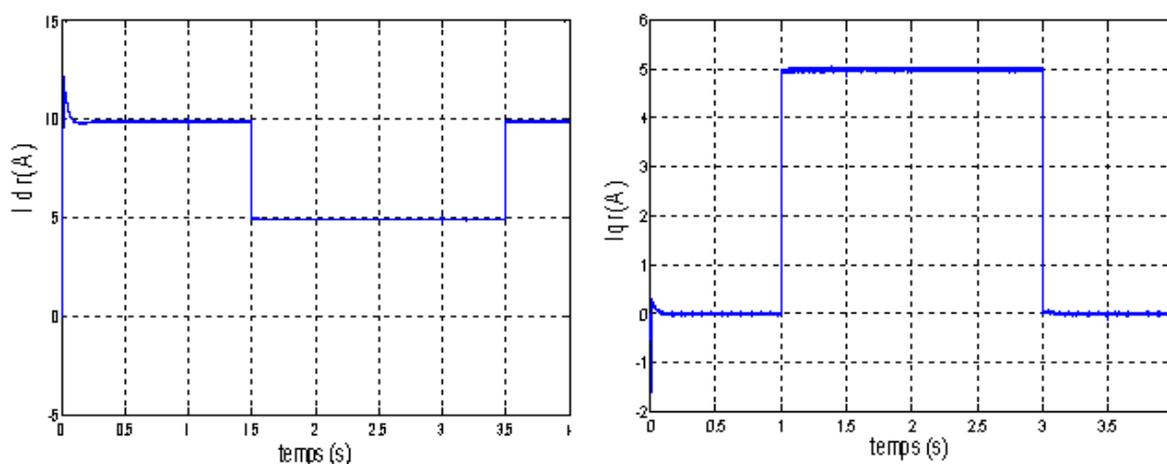


Fig. IV.14 Les deux composantes du courant rotorique

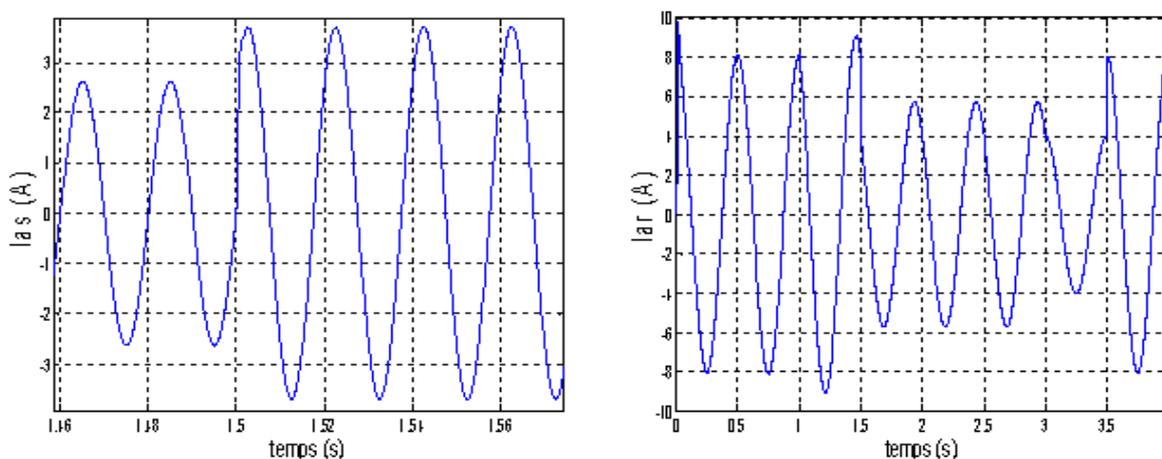


Fig. IV.15 Le courant statorique avec leur zoom et le courant rotorique

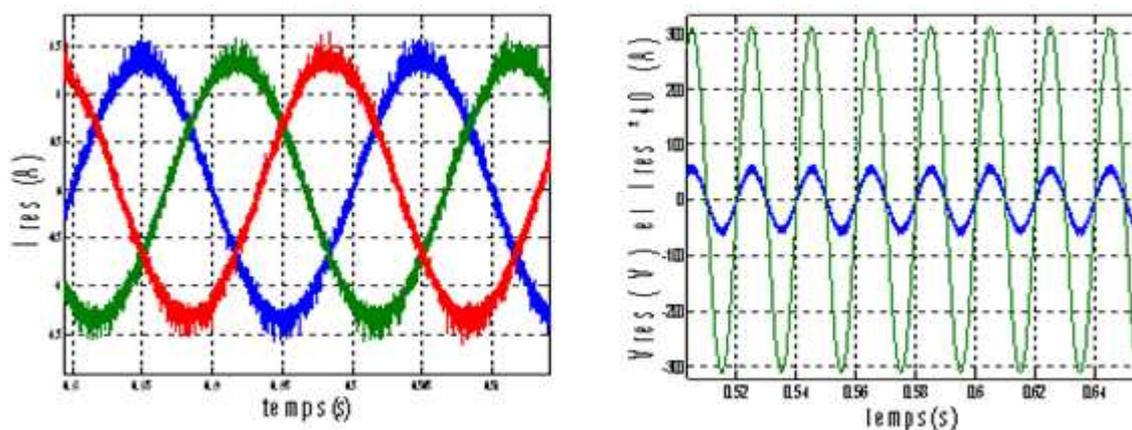


Fig. IV.16 Les courants générés par le convertisseur côté réseau avec un zoom et le courant i_{red1} avec la tension v_{res1}

Les résultats de simulation montre que toutes les grandeurs et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continu parfaite.

La tension du bus continu suit bien sa référence qui est 800V .Elle dépend du courant dans le condensateur. En contrôlant ce dernier il devient possible de commander la valeur de la tension. Ainsi il est constaté que cette dernière suit sa référence dès que le condensateur est chargé.

Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique est constaté. Il est à noter que le suivi de consigne ne commence que lorsque la tension du bus atteint un niveau suffisant, (800 V).

Le courant injecté par le redresseur est sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau. Il présente des chartings, puisque on n'a pas utilisé des régulateurs type échantillonnés.

IV.8 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre, les différents composants de la cascade liant le réseau au rotor de la MADA. On a commencé d'abord par l'étude du convertisseur coté réseau. Celui-ci est à deux niveaux et commandé par une commande à modulation de largeur d'impulsion à hystérésis. Ce convertisseur nous permet la régulation de la tension du bus continu qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA.

De manière générale, il est constaté que le but de cette commande est atteint car la tension du bus continu se stabilise autour d'une valeur proche de celle de sa référence. La MADA suit les consignes des puissances actives et réactives.

Le système conçu avec cette cascade est le plus utilisé en pratique pour les petites puissances, mais pour les fortes puissances on le trouve pas intéressant à cause de leur limitation en fréquence, ainsi qu'en puissance.

Chapitre V :

Filtrage actif par l'éolienne

V.1 Introduction

L'électronique de puissance moderne s'est considérablement développée ces dernières années. On constate une prolifération de convertisseurs et autres charges non linéaires qui ont des répercussions néfastes sur les réseaux électriques. En effet, les convertisseurs statiques introduisent des courants harmoniques et des perturbations des courants des lignes. La pollution résultante peut se traduire par les interférences harmoniques avec d'autres équipements et un mauvais facteur de puissance.

Pour éviter la propagation de ces harmoniques, il convient de les capter le plus près possible de leurs sources d'émission de façon à forcer le courant de source à être sinusoïdal et donc garantir la qualité d'énergie satisfaisante. C'est avec cet objectif, nous voulons utiliser l'éolienne pour contribuer à la dépollution du réseau. Ceci pourrait être réalisé en utilisant la cascade qu'on a étudié dans le chapitre précédent. Donc la MADA est utilisée comme un filtre actif en ajoutant des références de courants harmoniques à la commande qui contrôle déjà les courants générés par le convertisseur coté réseau.

Pour notre étude, nous allons nous intéresser à la compensation des harmoniques de courant générés par un pont redresseur alimentant une charge inductive.

Des recherches sont effectuées dans ce domaine pour faire du filtrage actif en utilisant des machines électriques telles que les machines asynchrones à double alimentation [6],[32].

V.2 Principe d'opération

On recherche ici à diminuer la pollution harmonique présentée sur un réseau afin qu'elle se propage le moins possible dans celui-ci pour ne pas perturber les utilisateurs de ce réseau. Pour cela, on utilise la MADA dont le stator est connecté directement au réseau.

En plus, la machine présente une amplification de puissance entre le rotor et le stator. C'est cette amplification que l'on veut utiliser pour mettre en place un filtrage actif à partir du rotor de la machine asynchrone à travers les deux convertisseurs [6].

La figure (V.1) montre la structure permettant de filtrer les harmoniques de courants générés par des charges polluantes connectées au réseau.

On commande la machine asynchrone afin qu'elle produise un courant sinusoïdal correspondant à la puissance qu'elle doit produire et un courant harmonique, correspondant au courant harmonique de la charge polluante. Ensuite, au niveau du

raccordement de l'éolienne et de la charge polluante, la somme des courants donne un courant sinusoïdal vu du réseau qui se retrouve ainsi dépollué.

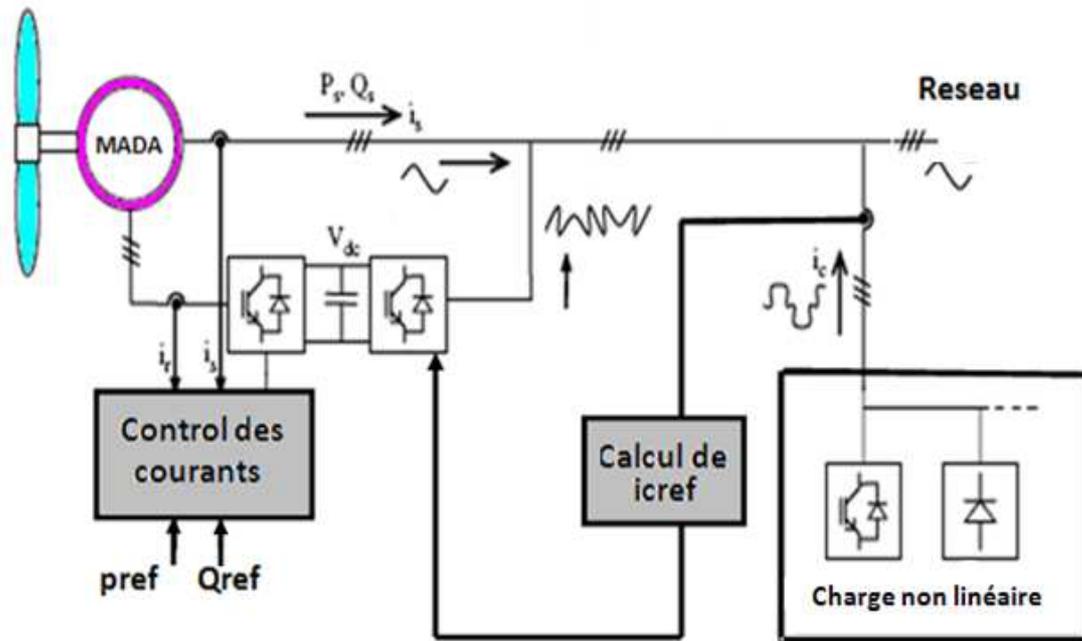


Fig.V.1 Schéma de principe du filtrage actif avec la MADA

Le montage fonctionne exactement comme la cascade présentée dans le dernier chapitre sauf qu'on ajoute des références de courants harmoniques à la commande qui contrôle les courants générés par le convertisseur coté réseau comme montre la figure(V.2)

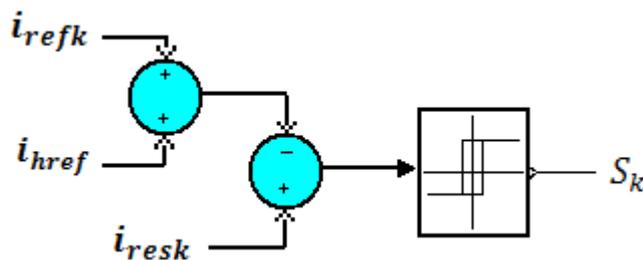


Fig.V.2 Principe de la stratégie de commande par hystérises pour le filtrage

i_{href} est obtenu en mesurant le courant consommé par la charge non linéaire i_c , puis on extrait les harmoniques en utilisant les méthodes d'identification présentées dans le paragraphe (V.3).

Les courants harmoniques qui circulent dans le réseau électrique sont générés

de perturbations et de pertes d'énergie sur toutes les portions de circuit qu'ils traversent. Il est donc opportun de pouvoir éliminer ces courants polluants au plus près de leurs sources. C'est pour cela que l'on place généralement les filtres actifs :

- Soit directement à proximité des charges non linéaires dans les usines et industries ; ce sont des filtres de petite puissance et souvent dédiés à filtrer seulement quelques harmoniques prédominants de la charge.
- Soit au niveau des postes sources du réseau de distribution électrique. Ces filtres compensent les harmoniques de différentes charges polluantes en s'adaptant en permanence aux courants harmoniques.

Du fait que les éoliennes sont elles aussi connectées sur le réseau de distribution, elles vont se trouver à proximité de charges polluantes. Il serait donc pratique de pouvoir utiliser les éléments qui permettent le fonctionnement et la régulation de l'éolienne afin de pouvoir la commander de manière à filtrer les harmoniques de courant. Ceci permettrait d'augmenter encore les services systèmes que pourrait offrir l'éolienne et permettrait de faire l'économie d'un filtre actif classique installé au point de raccordement où est déjà connectée l'éolienne.

V.3 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.

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.

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 [33].

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

V.3.1 Le filtre Passe-bas

Le diagramme fonctionnel de la figure (V.3) 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.

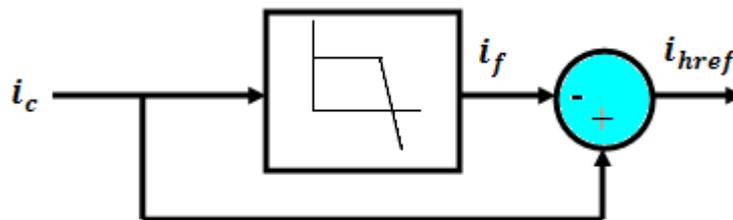


Fig.V.3 Schéma fonctionnel du fonctionnement du filtre passe-bas

La fonction de transfert de ce filtre :

$$F(P) = \frac{1}{(1+\tau.P)^n} \quad (\text{V.1})$$

Avec: $\tau = \frac{1}{2.\pi.f_c}$ et n : 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 [31].

V.3.2 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 [6],[32]:

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

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

$$x_{\alpha\beta}(P) = x_{\alpha}(P) + j.x_{\beta}(P) \quad (V.3)$$

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

$$\hat{x}_{\alpha\beta}(P) = \hat{x}_{\alpha}(P) + j.\hat{x}_{\beta}(P) \quad (V.4)$$

Et dans l'équation (V.2) k : une constante et 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 différentes valeurs de K , on obtient le diagramme de la figure(V.4). 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.

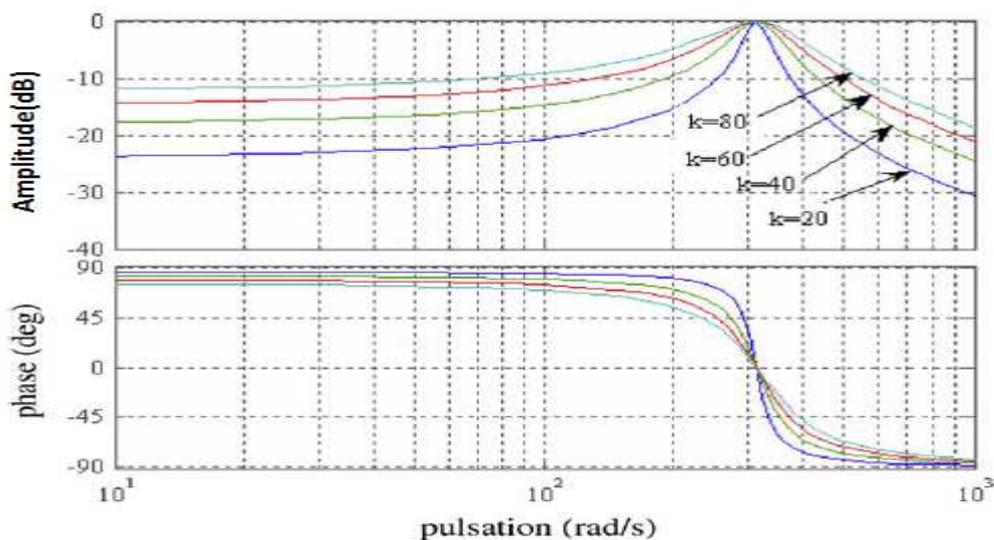


Fig.V.4 Diagramme de Bode du filtre sélectif ($\omega_c = 100.\pi \text{ rad/s}$) [32]

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 [6]. On exprime alors les composantes fondamentales \hat{x}_α et \hat{x}_β en fonction x_α et x_β :

$$\hat{x}_\alpha(P) = \frac{k.(P+k)}{(P+k)^2 + \omega_c^2} \cdot x_\alpha(P) - \frac{k.\omega_c}{(P+k)^2 + \omega_c^2} \cdot x_\beta(P) \quad (V.5)$$

$$\hat{x}_\beta(P) = \frac{k.(P+k)}{(P+k)^2 + \omega_c^2} \cdot x_\beta(P) - \frac{k.\omega_c}{(P+k)^2 + \omega_c^2} \cdot x_\alpha(P) \quad (V.6)$$

Ceci nous permet d'écrire :

$$\hat{x}_\alpha(P) = \frac{k}{P} \cdot [x_\alpha(P) - \hat{x}_\alpha(P)] - \frac{\omega_c}{P} \cdot \hat{x}_\beta(P) \quad (V.7)$$

$$\hat{x}_\beta(P) = \frac{k}{P} \cdot [x_\beta(P) - \hat{x}_\beta(P)] - \frac{\omega_c}{P} \cdot \hat{x}_\alpha(P) \quad (V.8)$$

Ces équations nous permettent d'établir le schéma du filtre sélectif qui est présenté en figure (V.5).

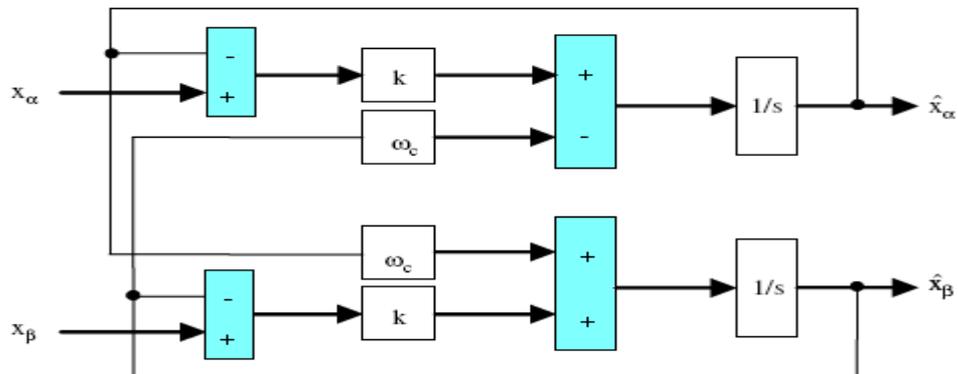


Fig.V.5 Schéma du filtre sélectif multi variable

L'élaboration des courants de références harmoniques par le filtre sélectif est montrée par la figure (V.6)

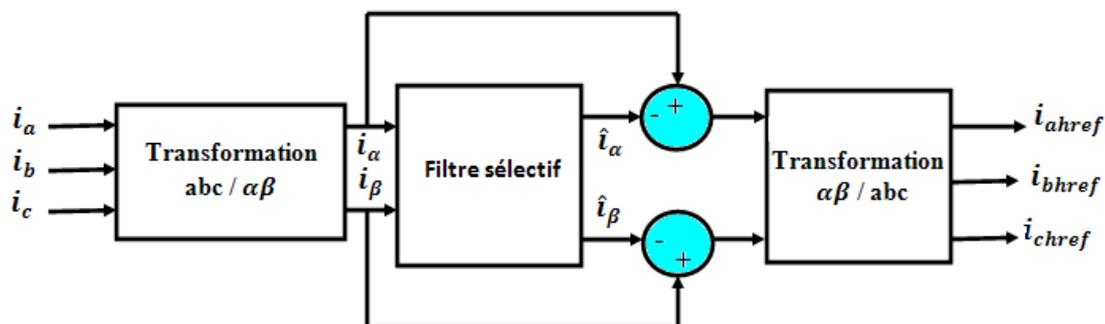


Fig.V.6 Elaboration des courants de références harmoniques par le filtre sélectif

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.

V.3.3 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

V.3.3.1 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.

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.

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

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

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} \quad (\text{V.10})$$

$V_{res1}, V_{res2}, V_{res3}$ 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 :

$$p(t) = V_{res1} \cdot I_{res1} + V_{res2} \cdot I_{res2} + V_{res3} \cdot I_{res3} = V_{s\alpha} \cdot I_{s\alpha} + V_{s\beta} \cdot I_{s\beta} \quad (V.11)$$

$$\begin{aligned} q(t) &= -\frac{1}{\sqrt{3}} ((V_{res2} - V_{res3}) \cdot I_{res1} + (V_{res3} - V_{res1}) \cdot I_{res2} + (V_{res1} - V_{res2}) \cdot I_{res3}) \\ &= V_{s\alpha} \cdot I_{s\beta} - V_{s\beta} \cdot I_{s\alpha} \end{aligned} \quad (V.12)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (V.13)$$

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \cdot \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (V.14)$$

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 :

$$\begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left(\begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \right) \quad (V.15)$$

$$\text{Avec :} \quad \Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2 \quad (V.16)$$

$$\begin{cases} p = \tilde{p} + \bar{p} \\ q = \tilde{q} + \bar{q} \end{cases} \quad (V.17)$$

\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.

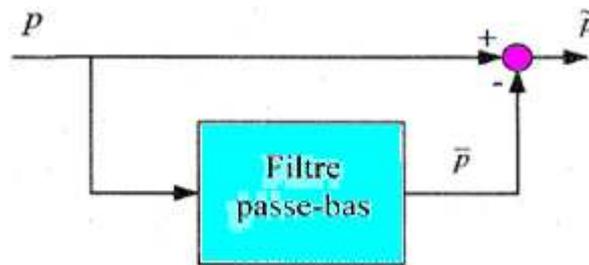


Fig.V.7 Filtrage de la composante de la puissance continue

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

$$\begin{bmatrix} I_{cref1} \\ I_{cref2} \\ I_{cref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & +\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{V.18})$$

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes [34] :

- 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).

V.3.3.2 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_f qu'il faut ajouter pour que le courant délivré par la source soit sinusoïdal et en phase avec la tension.

$$i_f = i_c - i_{res} \quad (\text{V.19})$$

i_c : 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.

$$i_f = i_{ffr} + i_{fh} \quad (\text{V.20})$$

➤ **Détermination de courant réactif i_{ffr}**

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

$$\begin{bmatrix} I_{fr\alpha} \\ I_{fr\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{V.21})$$

Par l'application de la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} I_{fr1} \\ I_{fr2} \\ I_{fr3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{fr\alpha} \\ I_{fr\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{V.22})$$

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 [35].

Donc :

$$i_{fref} = i_{ffr} + i_{href} \quad (\text{V.23})$$

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.

L'écart ε_k entre le courant réel du filtre actif i_f et le courant du filtre de référence i_{fref} permet la détermination des commandes des interrupteurs.

$$\varepsilon_k = i_{frefk} - i_{fk} \quad \text{Avec : } k=1, 2, 3. \quad (\text{V.24})$$

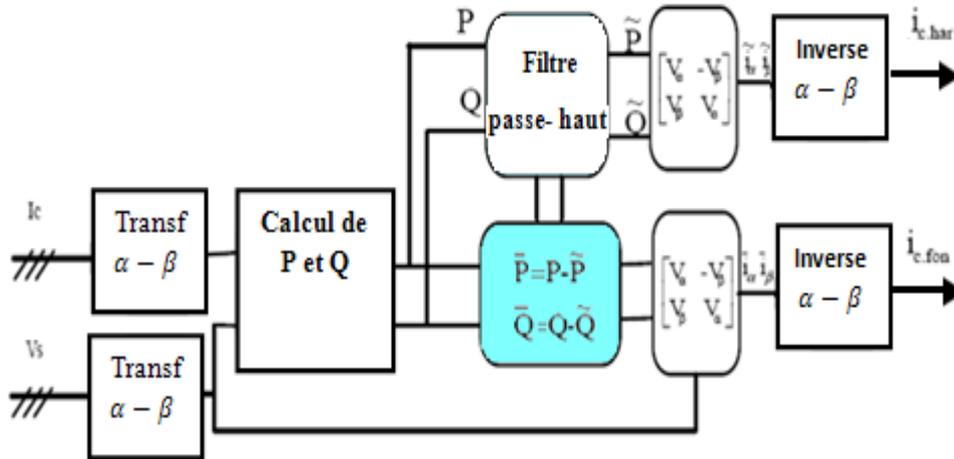


Fig.V.8 algorithme d'identification des harmoniques

Comme la figure (V.8) montre, Le courant de source de référence déterminé par cette méthode est soustrait du courant de charge pour déterminer le courant de référence du filtre qui est comparé avec le courant réel généré par le filtre pour avoir la commande des interrupteurs du filtre actif.

V.3.4 Méthode basée sur le principe du courant actif [35]

Le principe de cette méthode est basé sur la décomposition de la puissance absorbée par la charge polluante en puissance active, réactive et déformante.

Donc le courant absorbé par la charge non linéaire i_c peut être décomposé en deux parties : le courant actif et le courant non actif.

La puissance active p résulte du courant actif i_{cak} qui est proportionnel à la tension V_{sk} si celle-ci n'est pas déformée.

Donc :

$$i_{cak} = \frac{p}{\sum_{k=1}^3 V_{sk}^2} * V_{sk} = G * V_{sk} \tag{V.25}$$

V_{sk} : Tensions d'alimentation.

G : La conductance équivalente par phase de la charge.

Le courant non actif i_{cnk} est obtenu par la relation suivante:

$$i_{cnk} = i_c - i_{cak} \tag{V.26}$$

On décompose le courant non actif en deux parties : réactive et déformante. Le courant réactif, en phase avec la tension en quadrature V'_{sk} , s'obtient, à partir de la puissance réactive, par l'expression suivante :

$$i_{crk} = \frac{Q}{\sum_{k=1}^3 V_{sk}^2} * V'_{sk} = Y * V'_{sk} \quad (V.27)$$

Y : La susceptance équivalente par phase de la charge.

La composante déformante qui représente la somme de tous les courants harmoniques $i_{ck,h}$ s'obtient en retranchant les courants actifs et réactifs du courant total.

$$\sum_{h=2}^{\infty} i_{ck,h} = i_c - i_{cak} - i_{crk} \quad (V.28)$$

Chacune des trois composantes du courant absorbé par une charge non-linéaire ou déséquilibrée peut être calculée à partir de la connaissance de la tension au point de raccordement, supposée sinusoïdale, et du courant total.

Et la méthode d'identification se fait comme suit :

- Les courants de la charge i_c ainsi que les tensions V_{ck} sont obtenus par mesure directe.
- En partant de la mesure des V_{sk} , on obtient les tensions en quadrature V'_{sk} par un circuit déphaseur.
- On obtient les puissances P et Q par intégration numérique ou en utilisant des filtres passe bas.

V.3.5 Méthode de puissance instantanées p-q étendue

La puissance active p et la puissance réactive q étant définies respectivement par:

$$\begin{cases} p = V_{s1} * i_1 + V_{s2} * i_2 + V_{s3} * i_3 \\ q = V_{s1}' * i_1 + V_{s2}' * i_2 + V_{s3}' * i_3 \end{cases} \quad (V.29)$$

Avec : (V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}) est un système en quadrature retard sur $(V'_{s1}, V'_{s2}, V'_{s3})$ respectivement de 90° :

Pour le cas d'un système triphasé à trois fils :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (V.30)$$

L'expression des puissances instantanées p et q sera exprimée par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} - V_{s3} & V_{s2} - V_{s3} \\ V'_{s1} - V'_{s3} & V'_{s2} - V'_{s3} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (\text{V.31})$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{\Delta}} \begin{bmatrix} V'_{s2} - V'_{s3} & V_{s3} - V_{s2} \\ V'_{s3} - V'_{s1} & V_{s1} - V_{s3} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{V.32})$$

$$\hat{\Delta} = (V_{s1} - V_{s3}) * (V'_{s2} - V'_{s3}) - (V'_{s1} - V'_{s3}) * (V_{s2} - V_{s3}) \quad (\text{V.33})$$

Le courant de référence peut être calculé en utilisant les mêmes démarches de la méthode p-q :

$$\begin{bmatrix} i_{f1_ref} \\ i_{f2_ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{s1_ref} \\ i_{s2_ref} \end{bmatrix} \quad (\text{V.34})$$

$$\begin{bmatrix} i_{s1_ref} \\ i_{s2_ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{\Delta}} \begin{bmatrix} V_2 - V_3 & V_3 - V_2 \\ V_3 - V_1 & V_1 - V_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_s \\ q_s \end{bmatrix} \quad (\text{V.35})$$

V.4 Application du filtrage actif par la MADA à la charge non linéaire

Parmi les charges polluantes, on trouve les redresseurs triphasés à diodes et les redresseurs triphasés à thyristors qui dominent largement aujourd'hui dans le domaine industriel pour leur importance en nombre et en puissance.

Pour pouvoir filtrer ces harmoniques, il convient d'abord de les identifier. Une bonne identification de ces derniers nécessite la mobilisation de telles charges polluantes.

V.4.1 Modélisation de la charge polluante

Le redresseur est alimenté par un réseau triphasé, représenté sur la figure (V.9). Il génère les harmoniques de courant d'ordre $6k \pm 1$.

Selon la valeur de l'angle d'amorçage α des thyristors, on peut avoir le fonctionnement redresseur ou onduleur. Le thyristor Th1 est débloquenté avec l'angle de retard α , donc pour $t = \alpha + \frac{\pi}{6}$.

Les autres thyristors sont débloqués de sixième de période en sixième de période dans l'ordre suivant : Th'3, Th2, Th'1, Th3, Th'2.

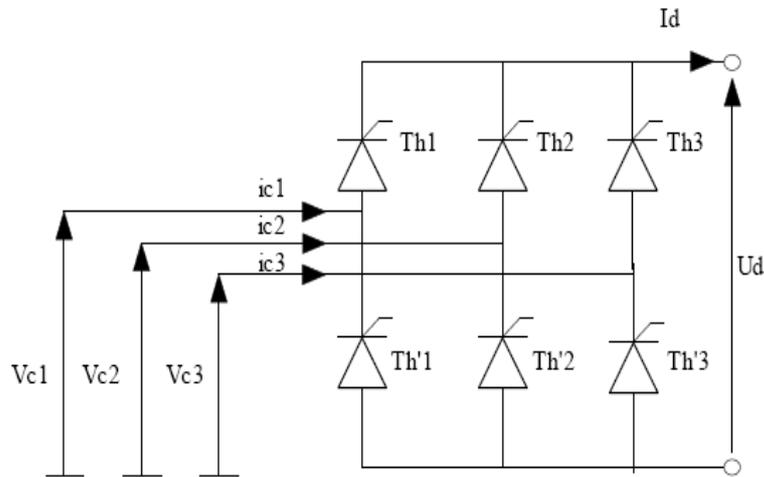


Fig.V.9 Schéma d'un redresseur triphasé à thyristors

En fonctionnement idéal des semi-conducteurs on résume les états de conduction de la tension redressée U_d et des courants i_{ci} ($i=1,2,3$) :

$$i_{ci} = x_i \cdot I_d \quad (\text{V.36})$$

$$U_d = \sum_{i=1}^3 x_i \cdot V_i \quad (\text{V.37})$$

I_d : Courant redressé.

V_i : Tensions de source.

x_i : Les fonctions de conversion des semi-conducteurs. Elles sont données par :

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \alpha + \frac{\pi}{6} < \omega \cdot t < \alpha + 5 \cdot \frac{\pi}{6} \\ -1 & \alpha + 7 \cdot \frac{\pi}{6} < \omega \cdot t < \alpha + 11 \cdot \frac{\pi}{6} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{V.38})$$

Les autres fonctions sont décalées de 120° et de 240° .

Dans la figure (V.10), on montre la forme d'onde de la tension redressée et le courant I_{c1} pour $\alpha=0$ (redresseur triphasé à diode).

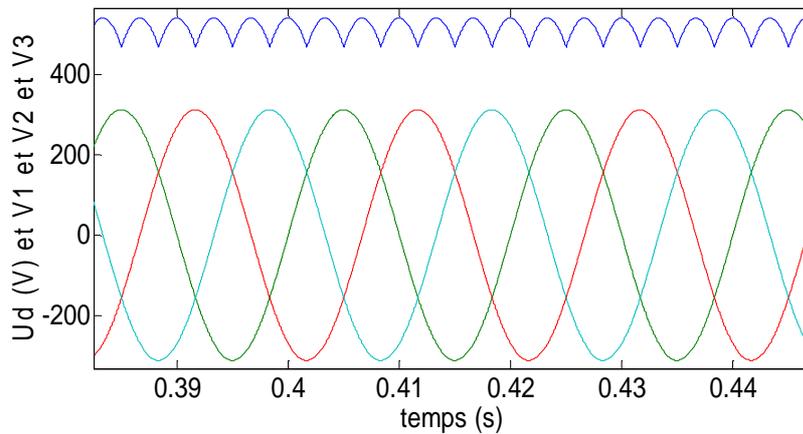


Fig.V.10.a La forme d'onde de la tension redressée

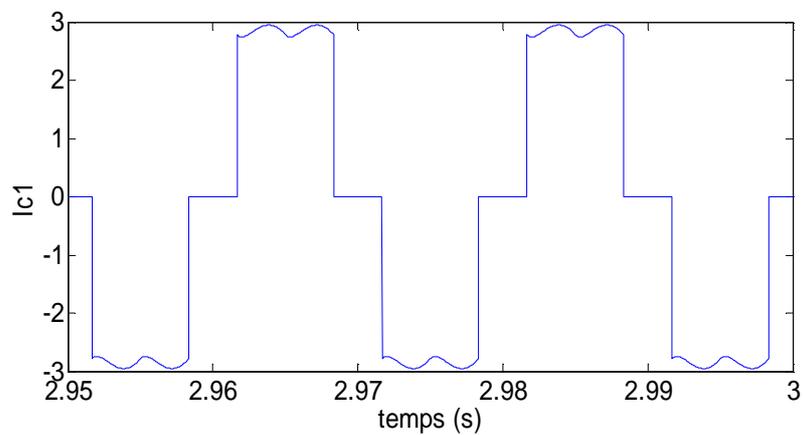


Fig.V.10.b La forme d'onde du courant de charge

Dans la figure (V.11), on montre la forme d'onde de la tension redressée et le courant I_{c1} pour $\alpha=30^\circ$.

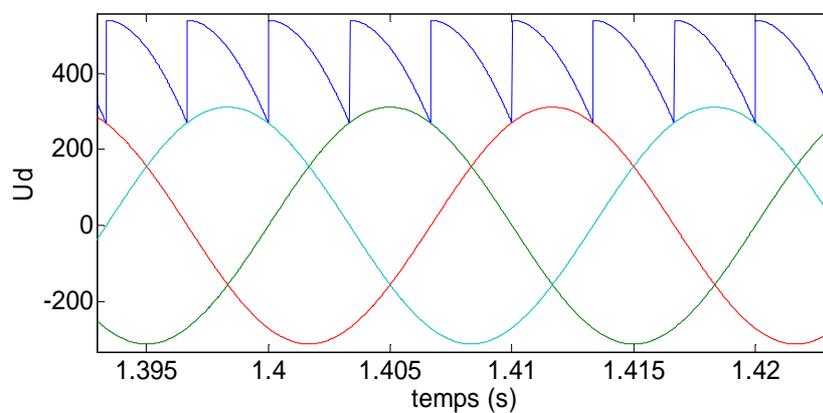


Fig.V.11.a La forme d'onde de la tension redressée

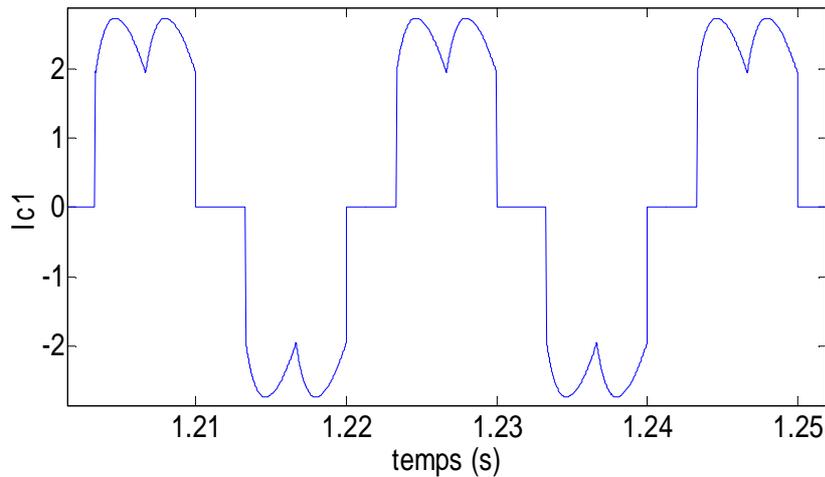


Fig.V.11.b La forme d'onde du courant de charge

V.4.2 Résultats de simulation

Dans cette partie, on applique le filtrage sur le redresseur triphasé alimentant une charge R, L. On commence par le redresseur à diodes ($\alpha=0$), puis le redresseur à thyristors ($\alpha=30$). Pour ce dernier, le filtrage se fait sans et avec compensation du courant réactif. Le convertisseur coté réseau est commandé par la stratégie MLI à hystérésis pour $\Delta i = 0.01$. On présente les résultats de simulation obtenus ci-dessous.

V.4.2.1 Redresseur triphasé à diode

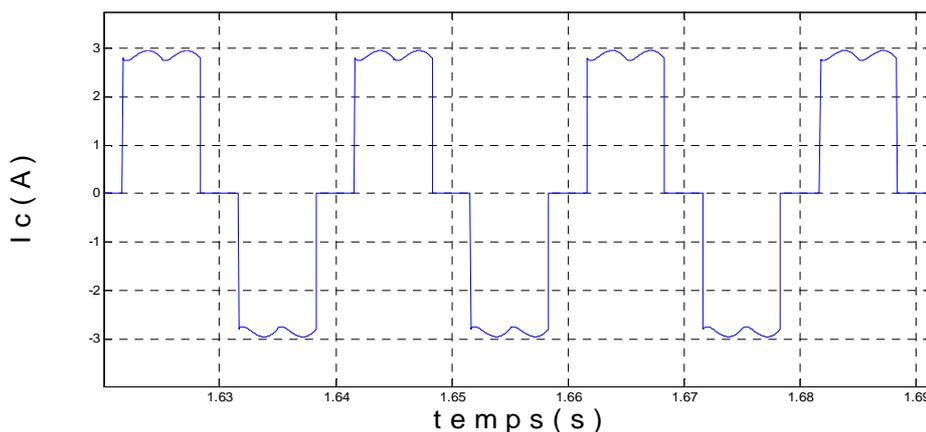


Fig.V.12.a Courant de charge

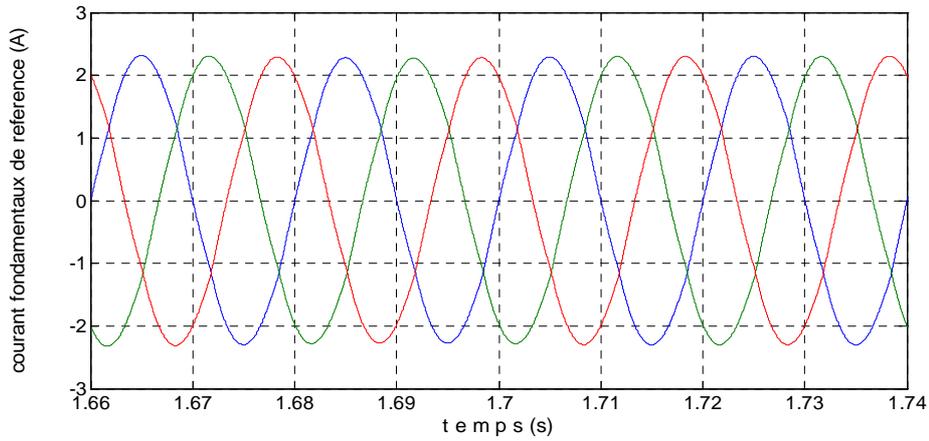


Fig.V.12.b Courants fondamentaux de référence

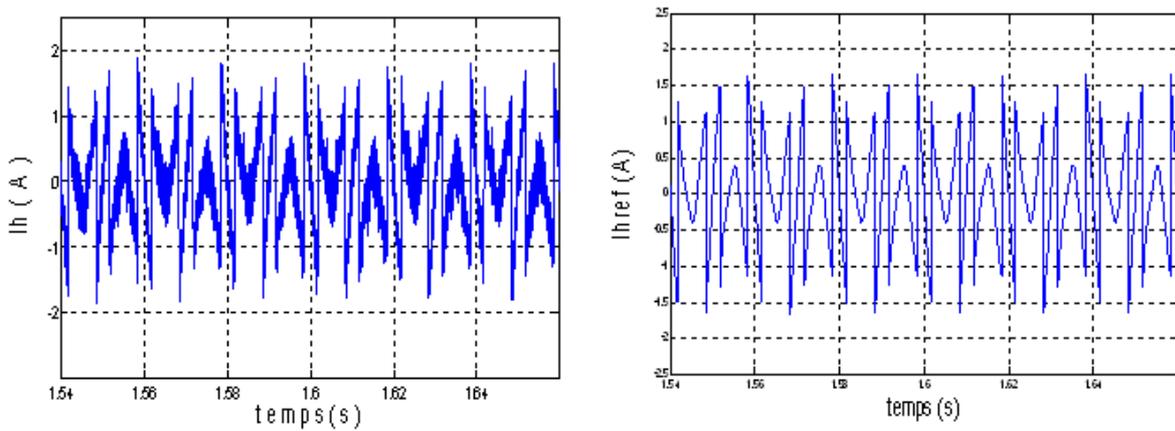


Fig.V.12.c Courant harmonique généré et le courant harmonique de référence

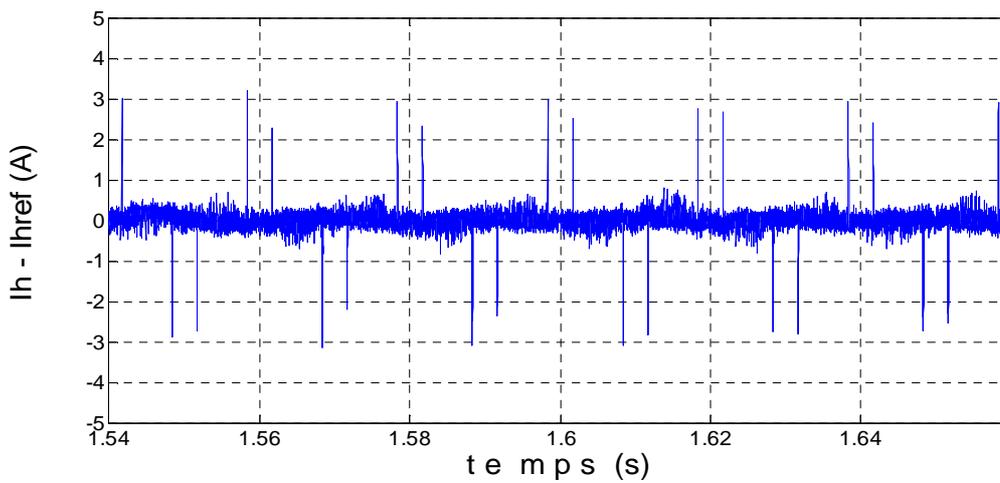


Fig.V.12.d L'écart entre I_h et I_{href}

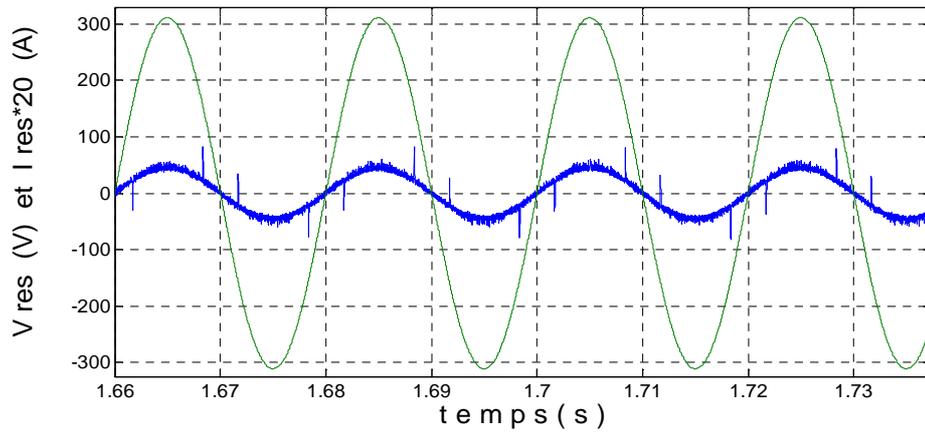


Fig.V.12.e Tension et courant de réseau après filtrage

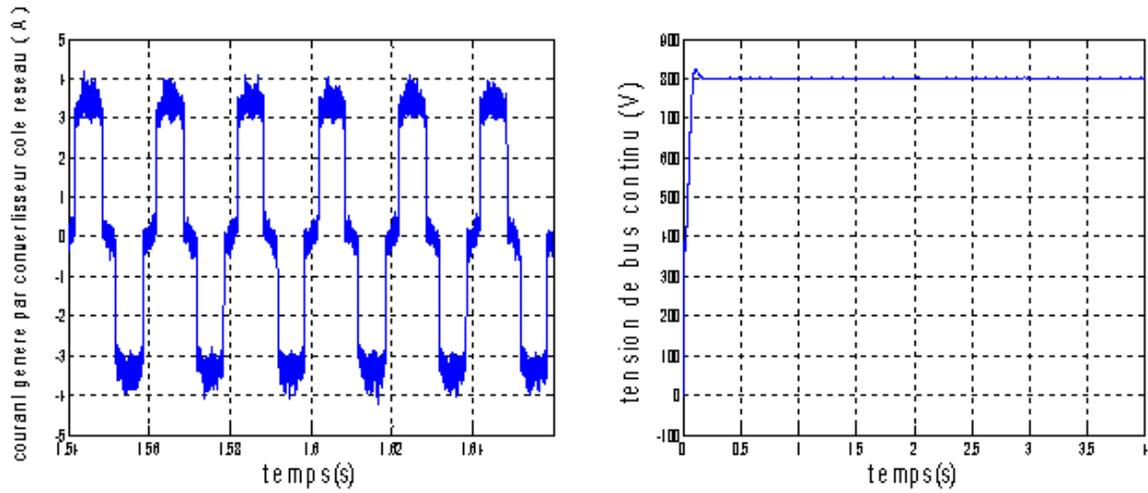


Fig.V.12.f Le courant total généré par convertisseur coté réseau et tension du bus continu

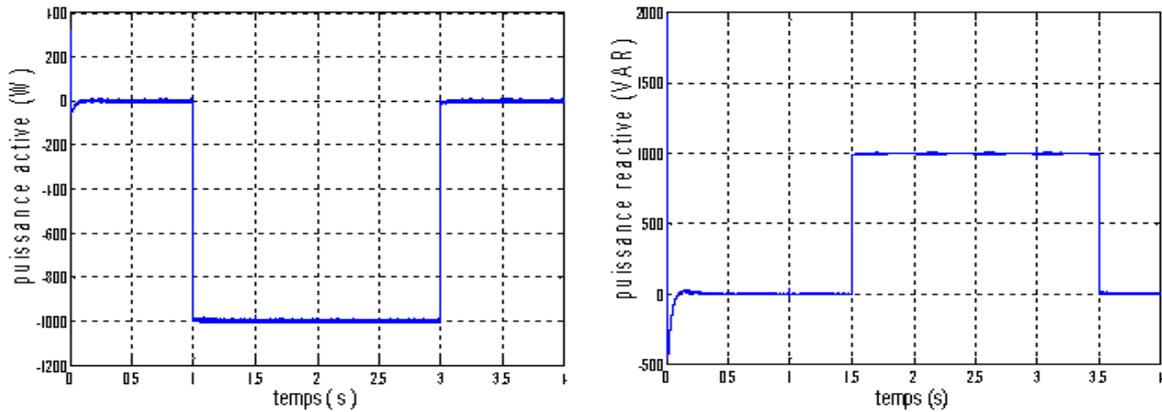


Fig.V.12.g La puissance active et réactive avec leurs références

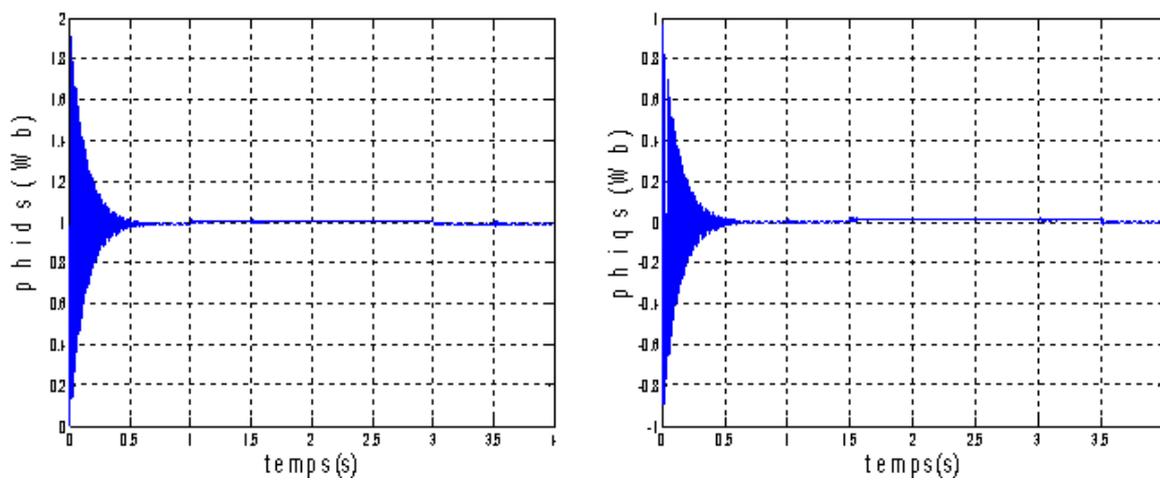


Fig.V.12.h Les deux composantes du flux statoriques

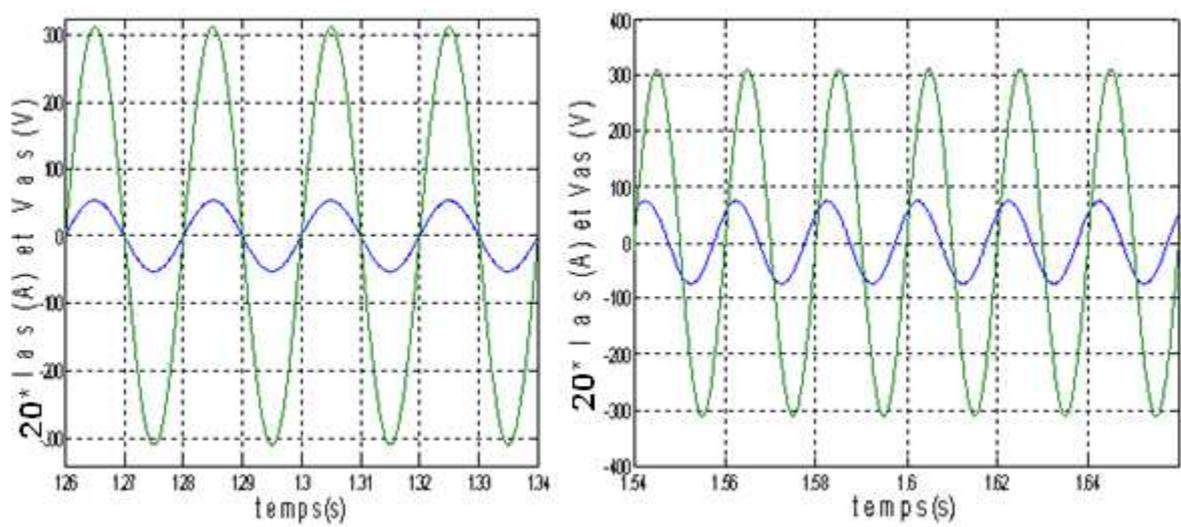


Fig.V.12.i Le courant statoriques avec la tension statorique

V.4.2.2 Redresseur triphasé à thyristors ($\alpha = 30^\circ$)

a. Sans compensation de la puissance réactive

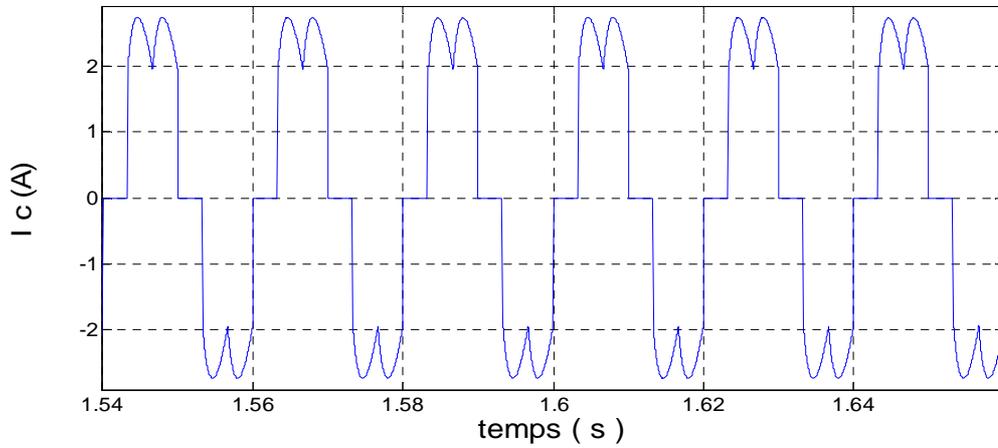


Fig.V.13.a Courant de charge

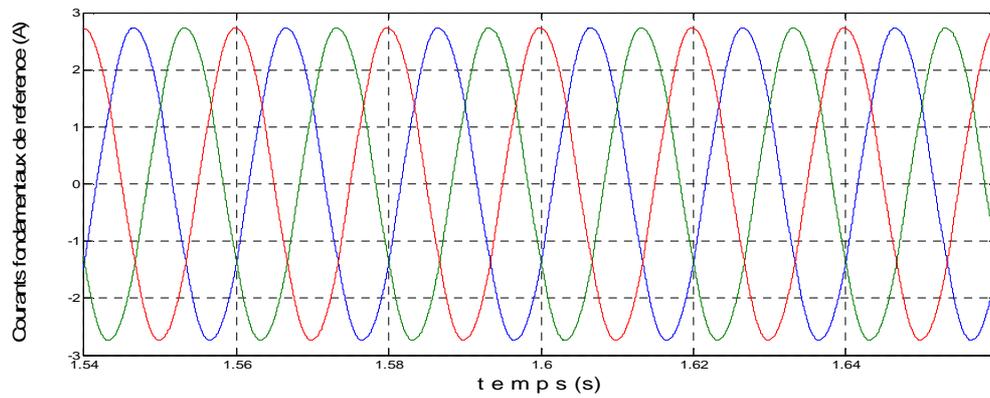


Fig.V.13.b Courants fondamentaux de référence

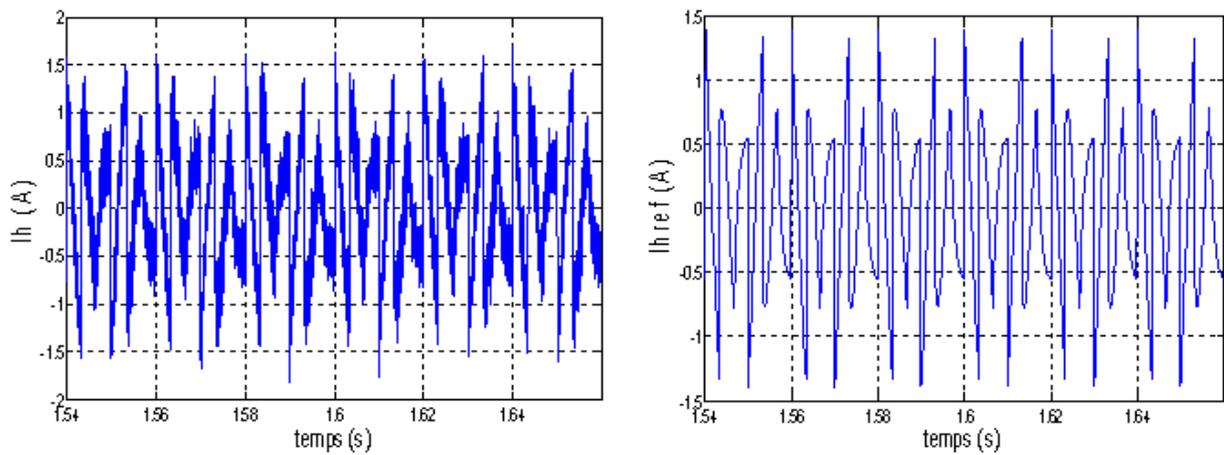


Fig.V.13.c Courant harmonique généré et le courant harmonique de référence

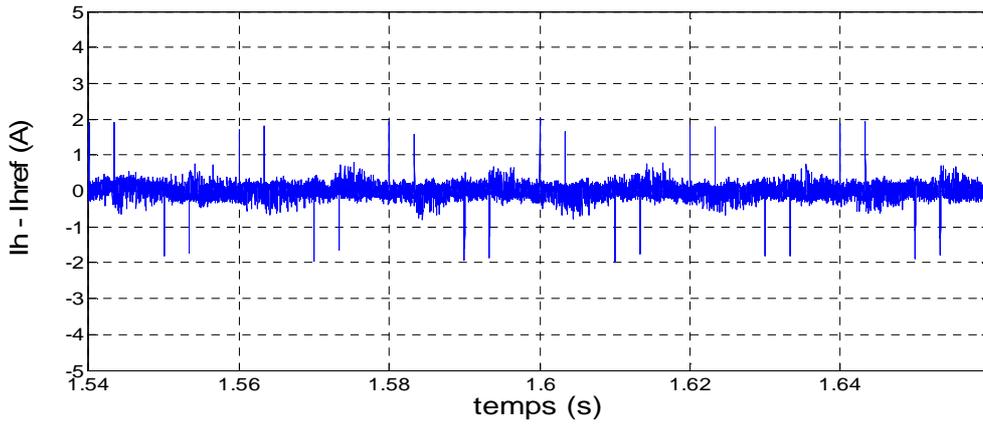


Fig.V.13.d L'écart entre I_h et I_{href}

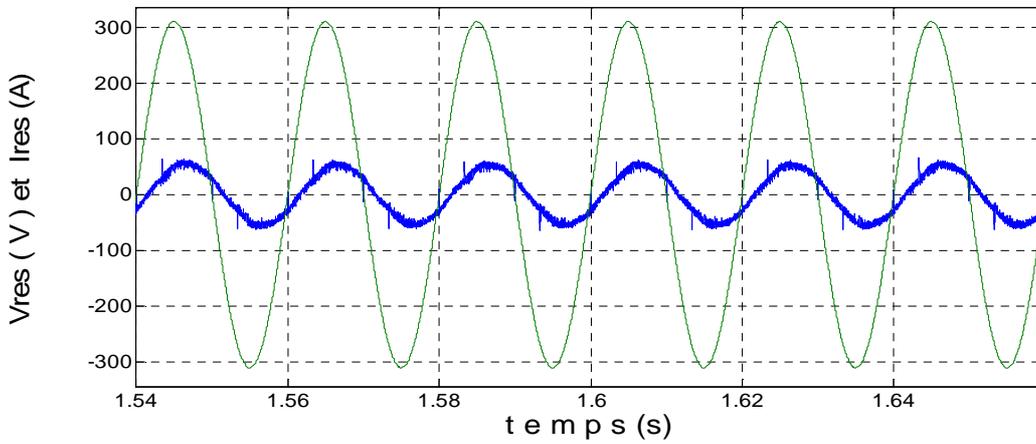


Fig.V.13.e Tension et courant de réseau après filtrage

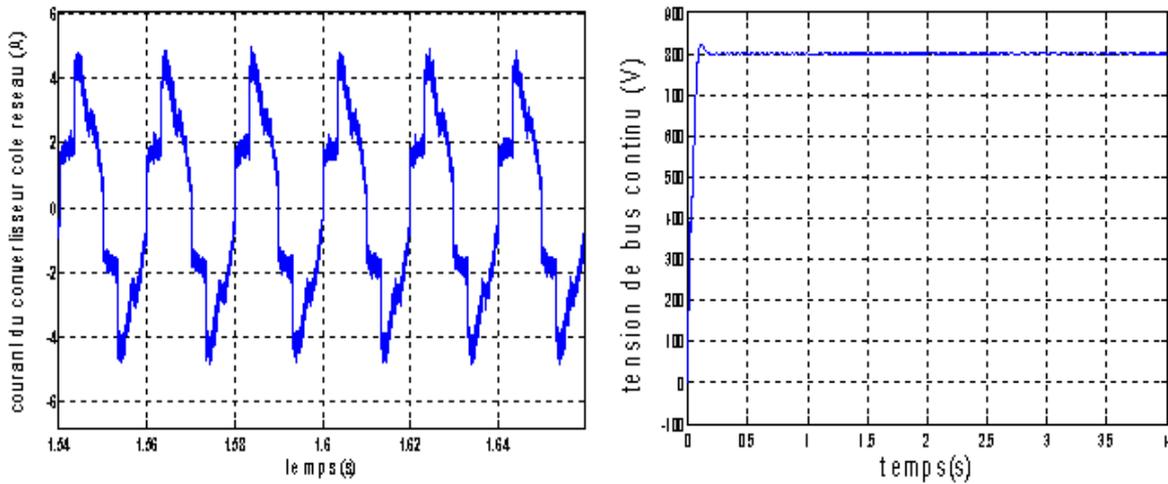


Fig.V.13.f Le courant du convertisseur coté réseau et la tension du bus continu

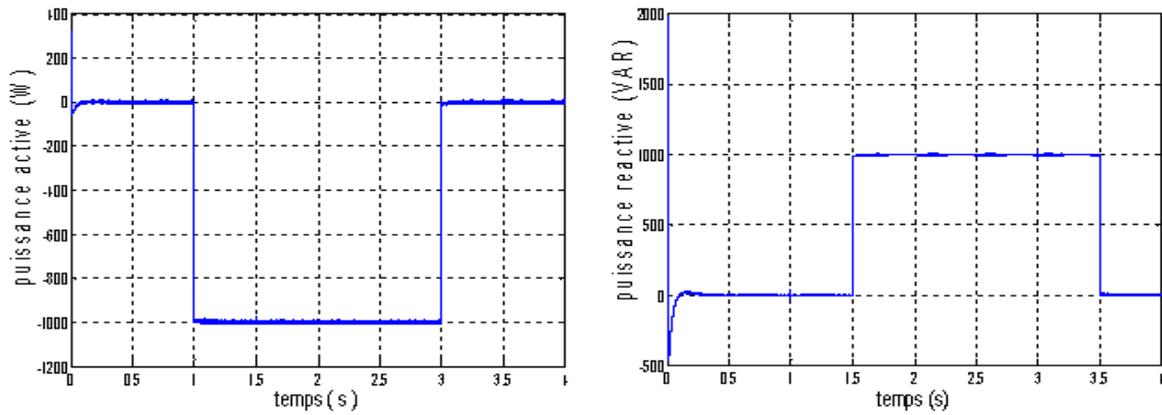


Fig.V.13.g La puissance active et réactive avec leurs références

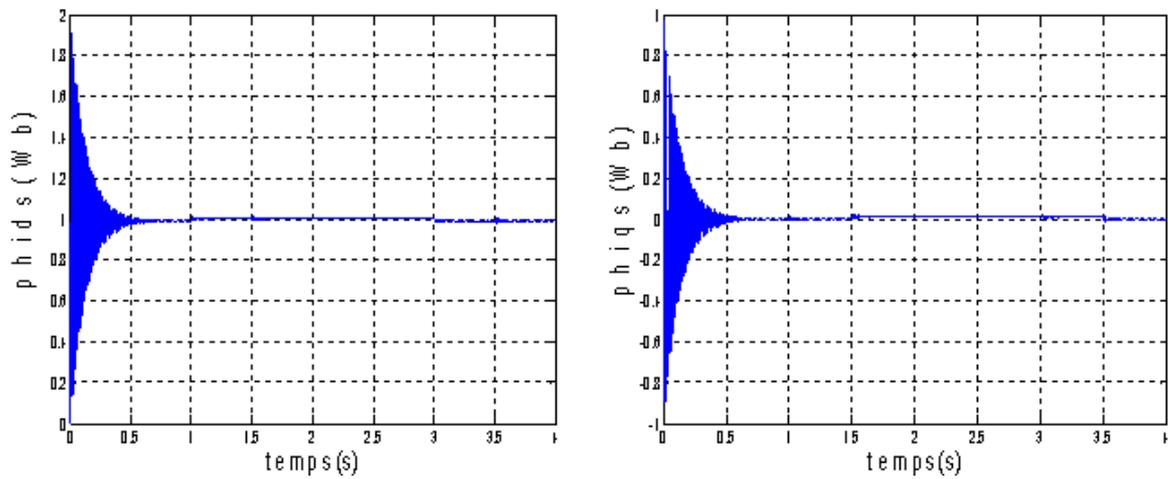


Fig.V.13.h Les deux composantes du flux statoriques

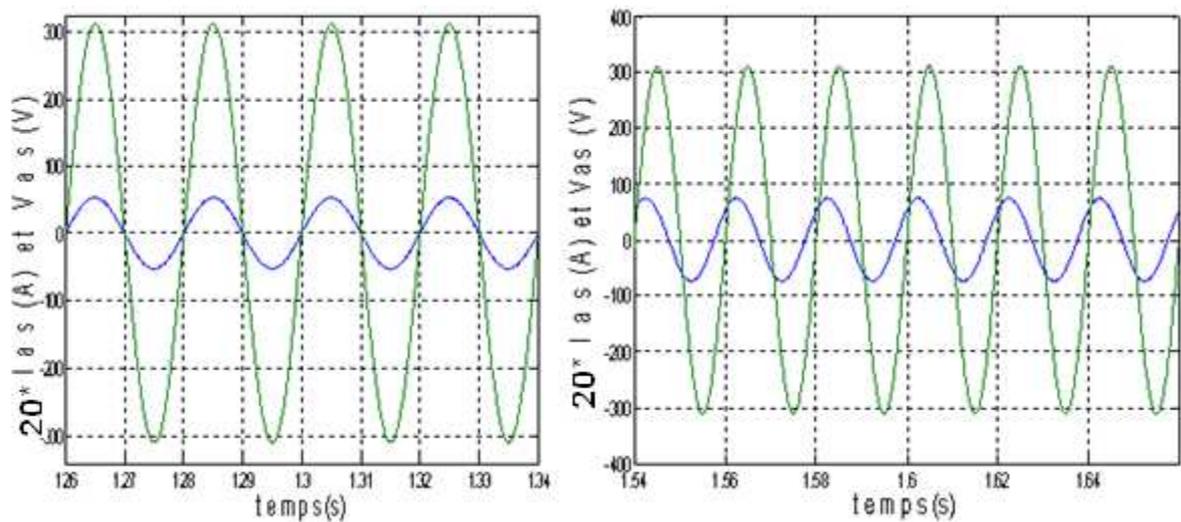


Fig.V.13.i Le courant statoriques avec la tension statorique

b. avec compensation de la puissance réactive ($\alpha = 30^\circ$)

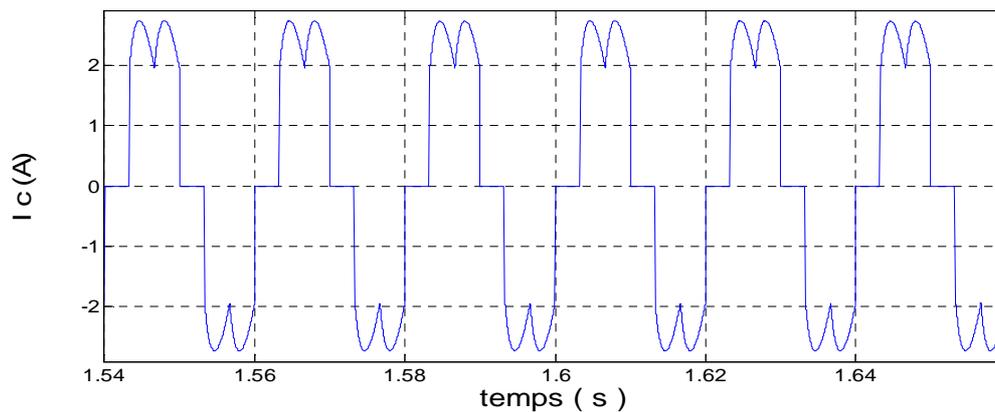


Fig.V.14.a Courant de charge

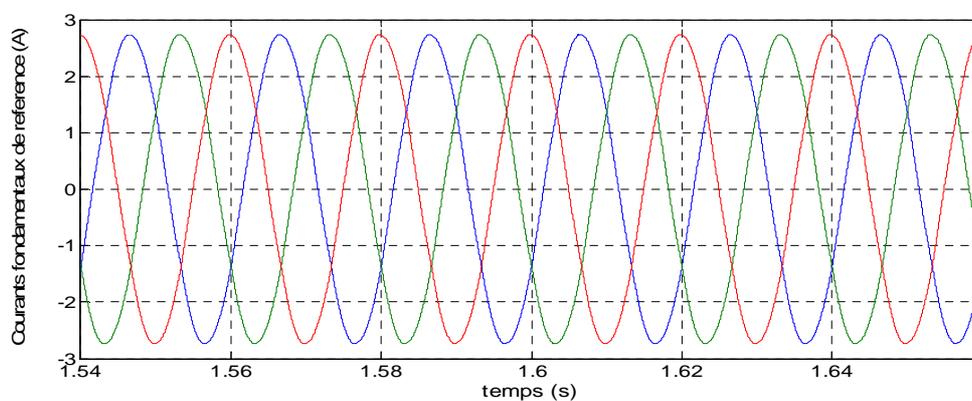


Fig.V.14.b Courants fondamentaux de référence

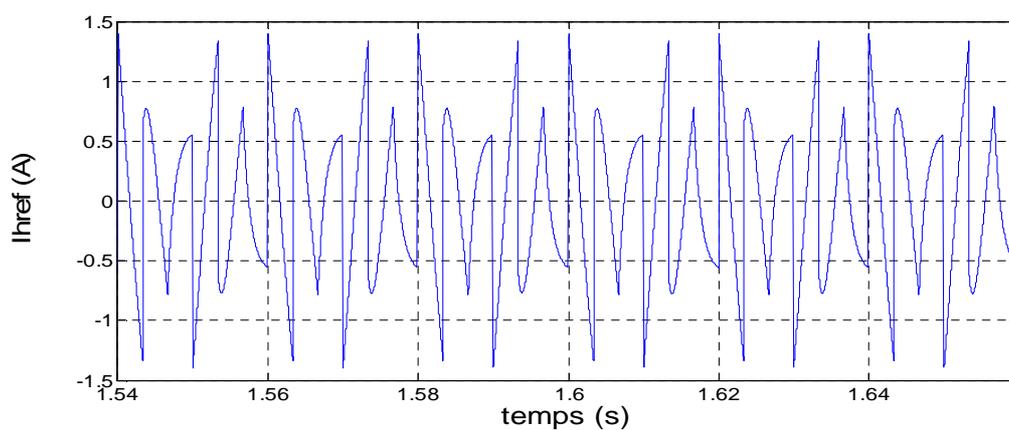


Fig.V.14.c Courant harmonique de référence

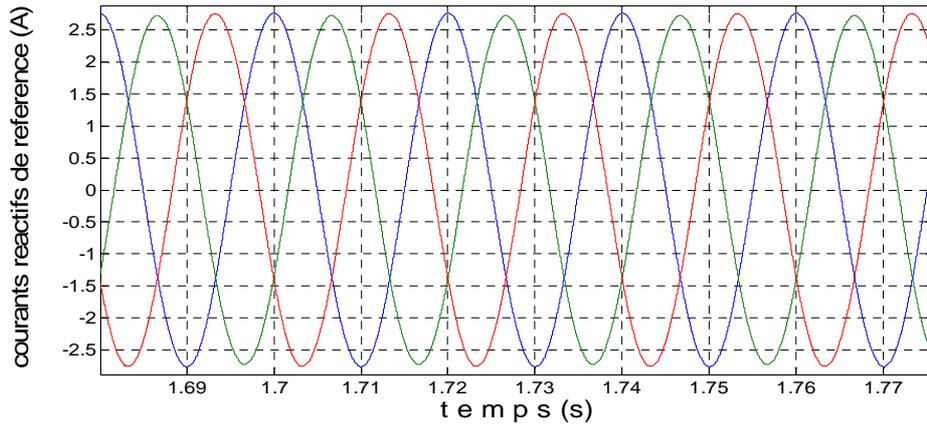


Fig.V.14.d Courants réactifs de référence

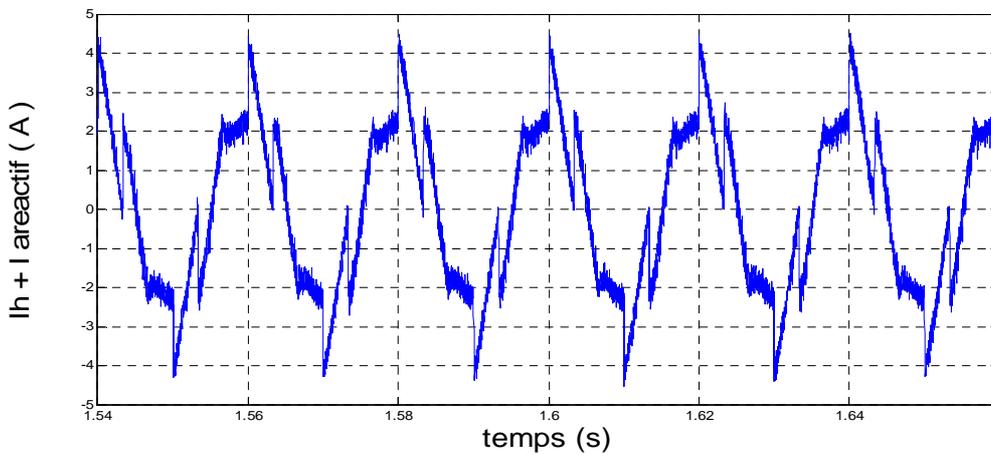


Fig.V.14.e La somme du courant harmonique et courant réactif générés par le convertisseur coté réseau

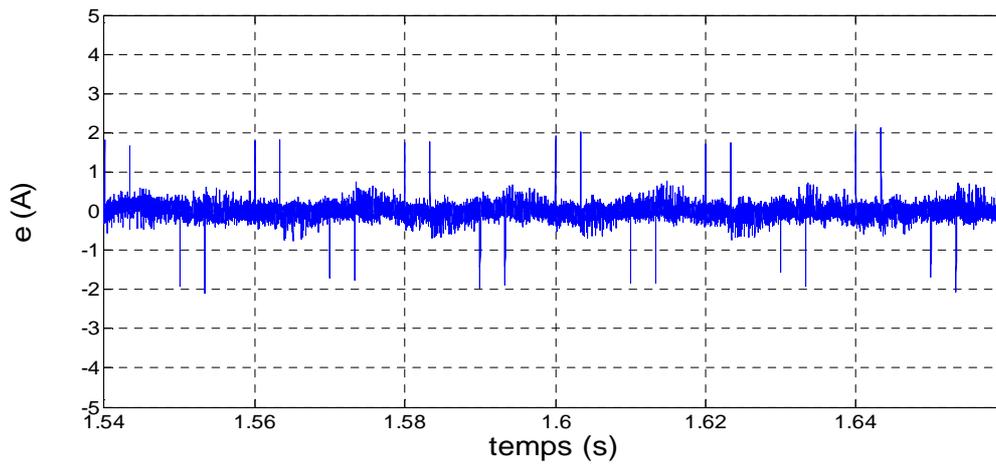


Fig.V.14.f L'écart entre $I_{href} + I_{reactif}$ et courant généré par le convertisseur coté réseau

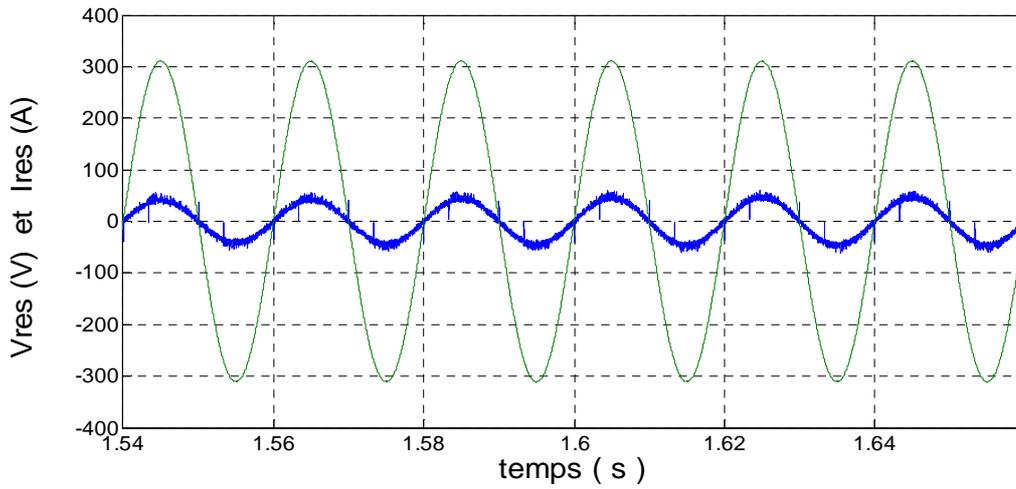


Fig.V.14.g Tension et courant de réseau après filtrage

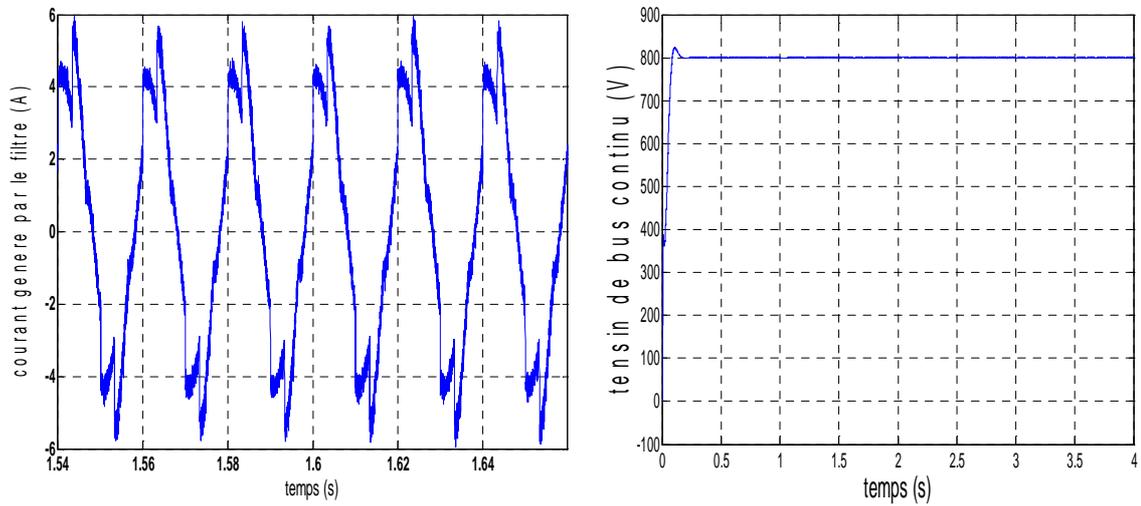


Fig.V.14.h Le courant du convertisseur coté réseau et tension du bus continu

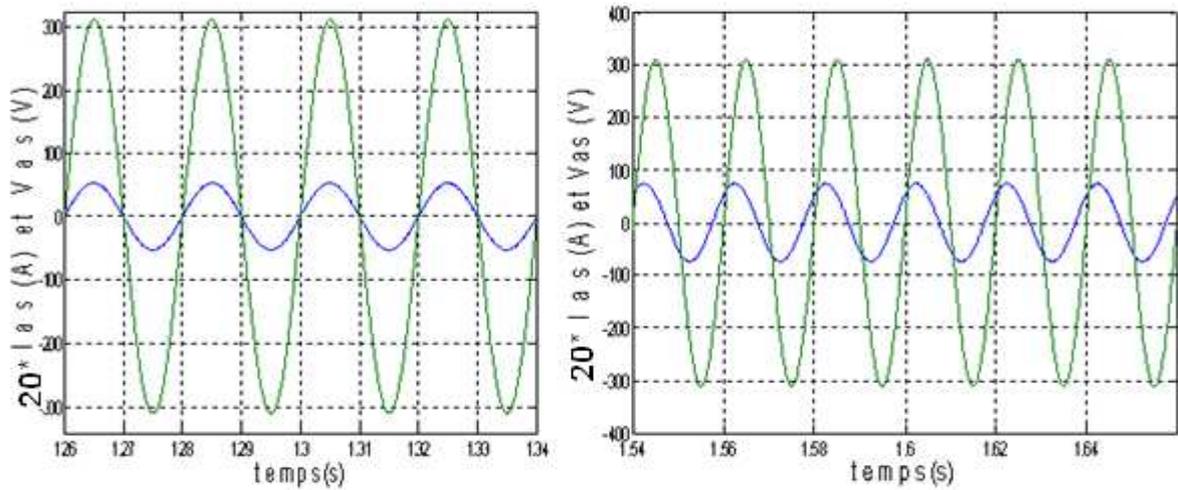


Fig.V.14.i Le courant statoriques avec la tension statorique

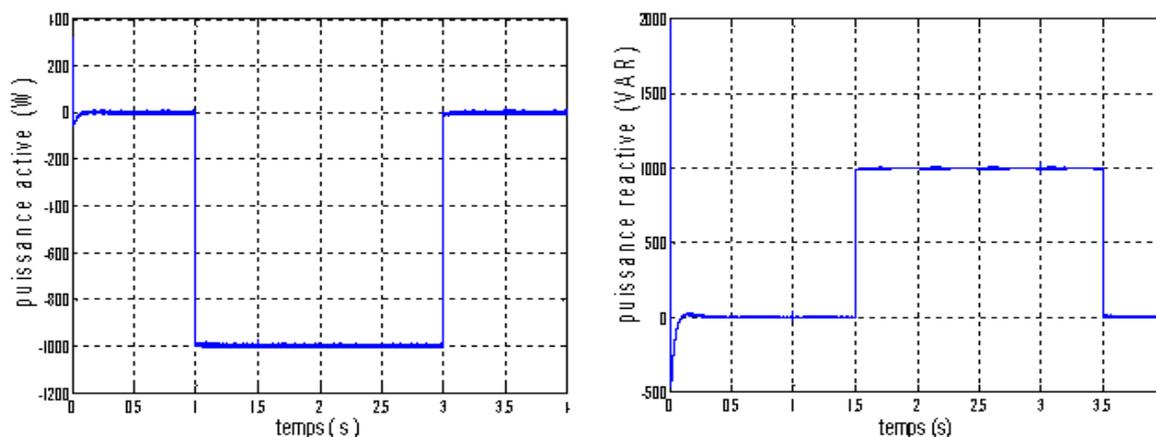


Fig.V.14.j La puissance active et réactive avec leurs références

V.4.3 Interprétation des résultats

Nous avons appliqué le filtrage actif par la MADA pour une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur débitant sur une charge R, L.

Après 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. On peut observer quelques pics lors des fortes variations du courant de la charge polluante. Ces pics peuvent s'expliquer par le fait que la MADA présente des inductances importantes qui s'opposent aux variations brutales du courant dans ses enroulements ($\frac{di}{dt}$).

Pour le redresseur à diodes (Fig.V.12), on remarque que le courant est en phase avec la tension du réseau. Mais ce n'est pas le cas pour le redresseur à thyristors (fig.V.13), le courant est déphasé par rapport à la tension du réseau.

En utilisant la même charge polluante avec compensation de l'énergie réactive, on remarque que le courant du réseau devient en phase avec sa tension (Fig.V.14), D'où un facteur de puissance unitaire coté réseau.

Les puissances active et réactive suivent leurs références, et la tension du bus continu se stabilise à la valeur voulue (800V).

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

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons étudié l'aspect qualité de l'énergie en nous intéressant aux charges non linéaires qui gènèrent des courants harmoniques.

On a présenté quelques méthodes d'identification des courants harmoniques et les algorithmes qui donnent les courants harmoniques de référence que le filtre actif doit générer. Ainsi, on a étudié l'algorithme du filtrage actif avec compensation de l'énergie réactive.

La méthode d'identification la plus utilisée est la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode est simple offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Elle permet facilement, le passage d'un calcul des puissances active et réactive instantanées à la détermination des composantes harmoniques du courant de charge.

L'utilisation de la MADA comme filtre actif est intéressante car elle ne modifie pas la structure de la commande de la MADA et n'entraîne donc pas de modification de la structure de l'ensemble du système (la cascade).

La MADA est capable de compenser la pollution harmonique sans modification de son fonctionnement en puissance active.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail présenté s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions de dépollution des réseaux électriques en exploitant l'énergie éolienne.

Les résultats de simulation ont montré que le fonctionnement en filtrage actif par la MADA est possible et intéressant en termes de qualité de services, ainsi, de coût d'installation. 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 ce faire, dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art sur l'éolienne, en précisant leurs composantes, leur principe du fonctionnement et leurs avantages et inconvénients. Le choix de la génératrice et sa structure d'alimentation, et la modélisation 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.

Le troisième chapitre de ce mémoire est consacré à l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau et fonctionnant en mode générateur à vitesse constante. La génératrice asynchrone est destinée pour donner une énergie utilisée pour le filtrage. Il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée est en puissance active et réactive statoriques. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau, et le rotor est alimenté à travers un onduleur à deux niveaux par une source continue (batterie). Le bon suivi des consignes pour les deux puissances active et réactive statoriques par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée.

L'établissement de la cascade alimentant le rotor à partir du réseau est le but du quatrième chapitre. 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 niveaux nous avons pu imposer une référence sur la tension du bus continu pour l'alimentation de l'onduleur à deux niveaux.

Et dans le dernier chapitre, on a démontré que démontré la capacité de la MADA à 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 coté 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 bonnes 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.

Il serait intéressant d'envisager quelques perspectives pour la continuation de ce travail telle que :

- L'utilisation des convertisseurs multi-niveaux ;
- Le filtrage actif des harmoniques à travers le stator ;
- La compensation de l'énergie réactive à travers le stator ;
- La réalisation expérimentale du système.

Annexe A

Données de la machine asynchrone à double alimentation

Valeurs nominales : 4 kW, 220/380 V – 50 Hz, 15/8.6A, 1440 tr/min.

- Résistance statorique: **$R_s = 1.2 \Omega$**
- Résistance rotorique: **$R_r = 1.8 \Omega$**
- Inductance cyclique statorique: **$L_s = 0.1554 \text{ H}$**
- Inductance cyclique rotorique: **$L_r = 0.1568 \text{ H}$**
- Inductance cyclique mutuelle: **$M = 0.15 \text{ H}$**
- Le nombre de paires de pôles est: **$p = 2$**

Constantes mécaniques de la MADA:

- Moment d'inertie : $J = 0.2 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f_r = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$.

Annexe B

Dimensionnement du régulateur PI

La figure (B.1) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

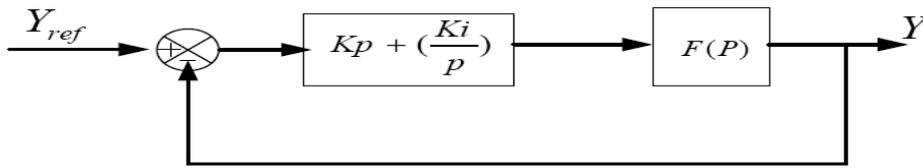


Fig.B.1 Schéma bloc d'un système réglé par un PI

La forme du correcteur est la suivante : $Cp = Kp + \left(\frac{Ki}{P}\right)$

Avec Kp : est le gain proportionnel du régulateur ;

Ki : est le gain intégral du régulateur.

Si on considère la fonction de transfert suivante :

$$F(P) = \frac{K}{1 + \tau P}$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{Bo}(P) = \frac{Kp + \left(\frac{Ki}{P}\right)}{1 + \tau P} = \frac{K(KpP + Ki)}{P(1 + \tau P)} = KKi \frac{1 + \frac{KpP}{Ki}}{P(1 + \tau P)}$$

On prend :

$$\tau = \frac{Kp}{Ki}$$

Alors :

$$F_{Bo}(P) = \frac{KiK}{P}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(P) = \frac{KiK}{KiK + P} = \frac{1}{1 + \frac{1}{KiK}P}$$

Pour attendre 95% de la consigne, le temps de repense t_r du système bouclé vaut : $t_r = 3 \frac{1}{KiK}$

Or, $Ki = \frac{Kp}{\tau}$;

Alors :

$$t_r = 3 \frac{1}{KpK}$$

D'où :

$$\begin{cases} Kp = 3 \frac{\tau}{t_r K} \\ Ki = \frac{3}{t_r K} \end{cases}$$

Annexe C

Régulateurs IP

La figure (C.1) représente la boucle de régulation de la tension U_c après compensation et linéarisation

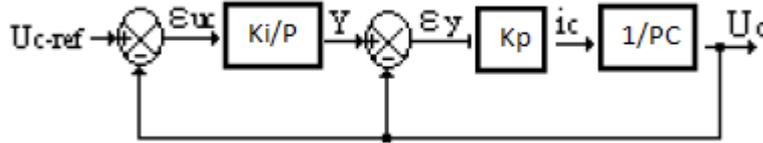


Fig.C.1 Régulateur IP

Cette figure permet d'écrire :

$$\frac{U_c}{\varepsilon_y} = \frac{Kp}{P.C} \Rightarrow \frac{U_c}{Y} = \frac{Kp}{Kp + PC}$$

$$\frac{U_c}{\varepsilon_y} = \frac{KiKp}{P(Kp + CP)} \Rightarrow \frac{U_c}{\varepsilon_y} = \frac{KiKp}{KiKp + PKp + CP^2}$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système de la figure (C.1) s'exprime alors comme suit :

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \frac{1}{Ki}P + \frac{C}{KiKp}P^2}$$

L'identification de cette fonction de transfert avec celle d'un système de seconde ordre, donne :

$$\begin{cases} \frac{2\zeta}{\omega_0} = \frac{1}{Ki} \\ \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{C}{KiKp} \end{cases}$$

En imposant la pulsation propre et l'amortissement ζ , on peut déterminer Ki et Kp comme suit :

$$\begin{cases} Ki = \frac{\omega_0}{2\zeta} \\ Kp = 2\zeta\omega_0 \end{cases}$$

Avec $C = 20\text{mF}$, nous aurons

$$\begin{cases} \omega_0 = 10^2 \\ \zeta = \frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Ki = 70.71 \\ Kp = 2.83 \end{cases}$$

Annexe D

D.1 Introduction

Aujourd'hui, La qualité du courant électrique dans les installations électriques se dégrade incontestablement. La situation au niveau des réseaux alternatifs est devenue très préoccupante. Outre les perturbations extérieures telles que les creux, les coupures, et les pointes provoquées par les phénomènes atmosphériques et par la commutation. Ainsi, il existe des causes intrinsèques et internes spécifiques à chaque site, dues à une utilisation conjuguée de charges linéaires et non linéaires.

Des surcharges harmoniques, un déclenchement intempestif des dispositifs de protection, des niveaux élevés de distorsion des tensions et des courants, et l'augmentation de la température dans les conducteurs et les générateurs sont autant des facteurs contribuant à détériorer la fiabilité et la qualité d'un réseau électrique.

Le fournisseur d'énergie doit distribuer à l'ensemble de ses utilisateurs et clients une énergie de qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré.

Cependant cet objectif n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus agressif, et par conséquent, il doit faire face de nombreux types de perturbations qui peuvent être d'origine interne comme l'évolution et la complexité du réseau et des charges qui lui sont connectées, ou externe liées aux phénomènes des changements climatiques.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et par la suite chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

Dans ce chapitre on va exposer les principales perturbations affectant la qualité de l'onde électrique, notamment les harmoniques pour les quelles on s'intéresse particulièrement. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles et des normes en vigueur. Nous discuterons ensuite les solutions envisagées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques, en particulier le filtrage actif.

D.2 Qualité de l'énergie électrique et perturbations

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système sinusoïdal triphasé, dont la fréquence de base est de 50 Hz ou de 60 Hz .Les caractéristiques de ce système sont :

- La fréquence ;
- L'amplitude des trois tensions ;
- La forme d'onde ;

- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de l'onde de tension laquelle est caractérisée par les paramètres suivants :

- Forme d'onde doit être parfaitement sinusoïdale ;
- Facteur de puissance dans des limites tolérables ;
- Equilibre et symétrie parfaite des phases en amplitude et en phases ;
- Valeurs efficaces dans les limites tolérées ;
- Stabilité de la fréquence.

D.3 Les perturbations électriques et leurs origines

Les perturbations sont tous les phénomènes externes ou internes au réseau ayant un pouvoir de changer d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme des grandeurs électriques du réseau (courant, tension, fréquence). On peut classer ces perturbations selon deux critères :

- La durée de persistance ;
- Le mode d'affectation c'est-à-dire leurs conséquences sur les grandeurs électriques.

Ainsi, selon la première classification, on a deux catégories essentielles :

- Perturbations périodiques : (qui durent dans le temps), comme le cas des distorsions harmoniques, chutes de tension dues aux flux de puissance réactive dans le réseau, et les déséquilibres.
- Perturbations apériodiques : l'ensemble des phénomènes fugitifs souvent très difficiles à prévoir comme les creux de tension ou surtension transitoires.

Et selon leurs modes d'affectation des grandeurs électriques, on distingue trois catégories principales :

- Perturbations sur l'amplitude ou les valeurs efficaces ;
- Déséquilibre des systèmes triphasés ;
- Distorsion harmonique [38].

a. Creux et coupures de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture. Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale, est suivie du rétablissement de la tension après une courte durée du temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn.

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [33].

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) [37].

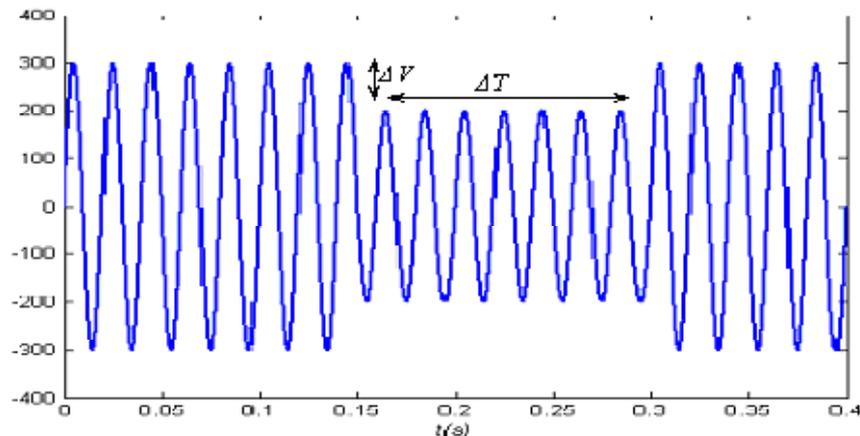


Fig.D.1 Creux de tension

Ils sont caractérisés par leur amplitude (ΔV) et par leur durée (ΔT). Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées. (Fig.D.1)

Ils sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques (ouverture des contacteurs pour le cas des dispositifs de protection, Perte de synchronisme et décrochage pour les moteurs...) qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements [33].

b. Fluctuations de la valeur efficace

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes (figure D.2).

Elles sont en particulier dues à la propagation de courants d'appel importants sur les lignes du réseau. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de

l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé Flicker [37].

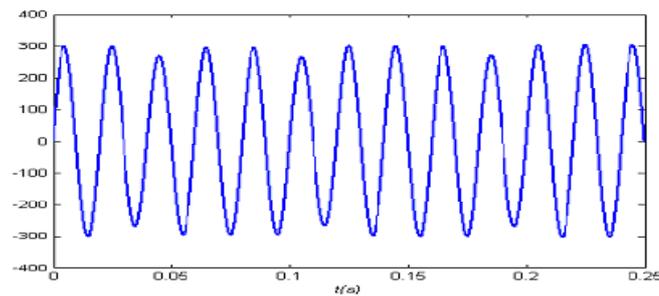


Fig.D.2 Fluctuation de la tension

c. Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé.

Ce type de perturbation est causé essentiellement par les asymétries d'impédances des lignes du réseau ou des charges, et aussi par des courts-circuits monophasés ou biphasés [38].

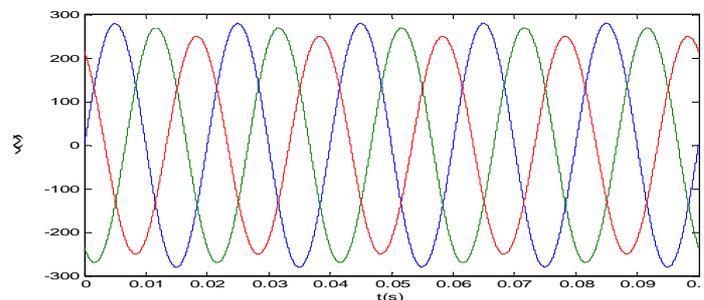


Fig.D.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

d. Fluctuations de la fréquence

Une variation sensible de la fréquence peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [37].

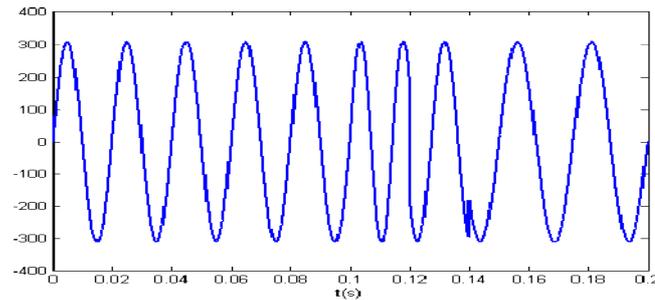


Fig.D.4 Fluctuation de la fréquence

D.4 Les perturbations harmoniques

D.4.1 Harmoniques et interharmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors.

Les interharmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle - commande [37].

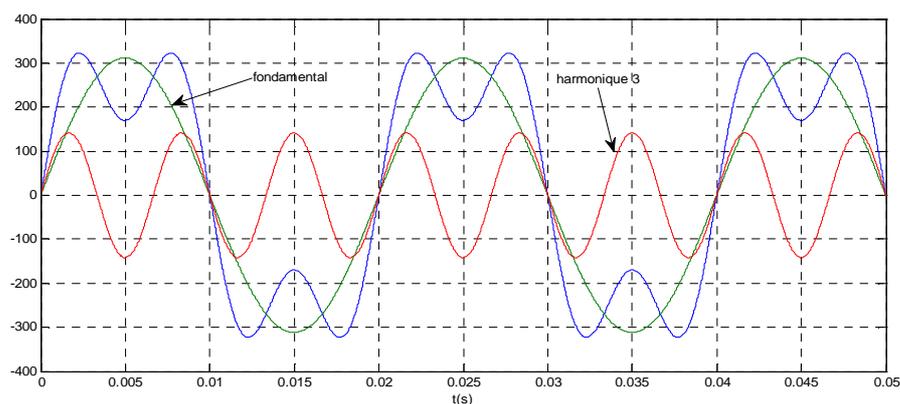


Fig.D.5 Harmoniques

D.4.2 Origine des harmoniques

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels les thyristors, les triacs, les GTO,

les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composantes ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique.

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés. En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

Nous présentons dans cette section quelques-unes des charges les plus importantes.

a) Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif

Ce montage est utilisé comme premier étage pour la commande en vitesse variable des machines asynchrones. La commande de la machine asynchrone en vitesse variable est utilisée dans des applications comme l'entraînement de compresseurs, de ventilateurs, de pompes, de convoyeurs, etc.

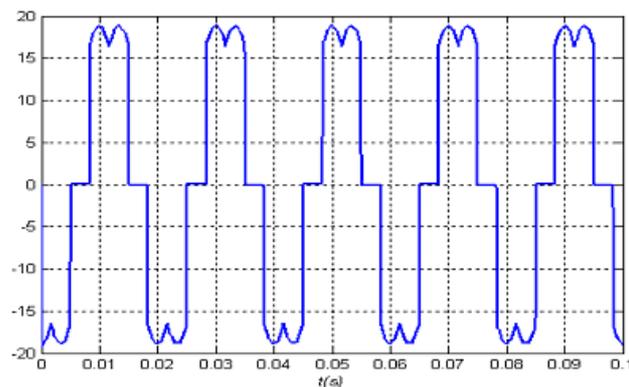


Fig.D.6 le courant absorbé par un redresseur à diode

b) Convertisseur de courant

Les convertisseurs de courant constituent l'un des montages les plus répandus dans le secteur industriel. Ce type de montage est constitué de thyristors qui sont commandés en

ouverture. Ceci ce fait en jouant sur l'angle d'allumage α de commande des gâchettes des thyristors. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles :

- **La commande en vitesse variable des moteurs à courant continu**

Les machines à courant continu sont utilisées dans de multiples activités nécessitant de la vitesse variable aussi bien dans les applications de faible puissance que celle de grande puissance telles les machines outils, les procédés de commande dans l'industrie du papier et du textile ainsi que les laminoirs.

- **La commande en vitesse variable des machines synchrones**

On rencontre des convertisseurs de courant suivis d'un onduleur pour commander la machine synchrone en vitesse variable.

- **Les fours à induction régulés**

Ils sont utilisés majoritairement dans les secteurs industriels des métaux, de la chimie et de la galvanoplastie.

c) Les appareils à arc électrique

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc à courant alternatif ou continu.

D.4.3 Caractérisation des perturbations harmoniques

On peut classer les récepteurs en deux familles principales :

Des récepteurs linéaires et des récepteurs non-linéaires :

Un récepteur est dit linéaire si, alimenté par une tension sinusoïdale, il consomme un courant sinusoïdal. Les récepteurs linéaires couramment utilisés sont constitués de résistances, de capacités et d'inductances. Le courant et la tension peuvent être déphasés.

Un récepteur est dit non-linéaire si, alimenté par une tension sinusoïdale, il consomme un courant non-sinusoïdal. Donc la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire.

Des charges non-linéaires monophasées consomment un courant périodique, de même période que celle de la tension. Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs), les circuits magnétiques saturés, les lampes à décharges...

Le courant consommé (périodique) est décomposé en une série de Fourier. En outre, sa période étant identique à celle de la tension, seules les fréquences multiples de celle de la tension sont présentes. Par conséquent, la tension v et le courant de la charge i sont modélisés sous la forme:

$$v = V\sqrt{2}\sin(2\pi ft)$$

$$i = I_1\sqrt{2}\sin(2\pi ft + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h\sqrt{2}\sin(2\pi hft + \varphi_h)$$

f : Fréquence du fondamental ;

V : Valeur efficace de la tension ;

I_1 : Valeur efficace du fondamental du courant de charge ;

I_h : Valeur efficace de l'harmonique de rang h du courant de la charge ;

φ_1 : Déphasage entre le fondamental du courant de charge et la tension ;

φ_h : Déphasage entre l'harmonique de rang h du courant de charge et la tension.

Les courants harmoniques ont pour effet de déformer la tension par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit (figure D.7). Cette déformation est d'autant plus importante que l'impédance de court-circuit est élevée.

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux de distorsion harmonique, le facteur de puissance et le taux harmonique sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive [36].

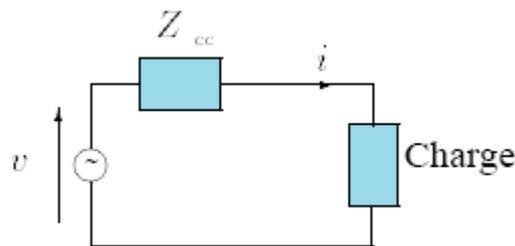


Fig.D.7 Modélisation du réseau et de la charge

➤ **Le taux harmonique de rang k**

$$s_k = C_k/C_1$$

Où C_k représente la composante harmonique de rang k , C_1 représente la composante fondamentale [33].

➤ **le taux global de distorsion harmonique**

Le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde du courant déformée. Donc il donne une idée sur l'amplitude de la perturbation harmonique ; il est donné par l'expression suivante :

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \frac{X_k^2}{X_1^2}}$$

Avec X soit un courant, soit une tension.

Donc la déformation qualitative d'une onde dépend autant de l'amplitude des harmoniques que du déphasage de des derniers par rapport au fondamental [31].

Le tableau D.1 donne des différents taux de distorsion en courant.

Charges non-linéaires	THD (%)
Variateurs de vitesse	80
Alimentations de micro-ordinateur	70
Tubes fluorescents	> 100

Tableau D.1 TDH pour diverses charges non-linéaires [36]

Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence [37].

➤ **Le facteur de puissance**

Le facteur de puissance d'un dispositif est une mesure de la façon dont laquelle il consomme ou génère de la puissance active depuis/au réseau électrique.

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements [33].

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D . (figure I.8) Soit :

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

Le facteur de puissance FP devient :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos\varphi_1 \cdot \cos\gamma$$

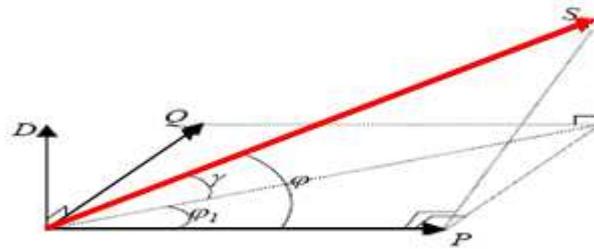


Fig.D.8 Diagramme de Fresnel des puissances

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant ($D = 3V\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}$) [33].

Pour deux dispositifs consommant des quantités égales de puissance active et effectuant de ce fait la même quantité de travail, le dispositif qui consomme ou produit une puissance plus imaginaire exigera un plus grand courant de fonctionnement pour transférer la puissance active voulue.

Par conséquent, des niveaux de courants plus élevés seront exigés sans aucun avantage supplémentaire pour le consommateur. Ces courants élevés signifient que le fournisseur doit ajouter la capacité au réseau de distribution sans bénéficier d'un avantage réel. En général seulement la puissance active est comptée au consommateur [28].

Tout dépassement des valeurs imposées du taux de distorsion harmonique et du facteur de puissance est facturé [31].

D.4.4 Réglementation

Une onde de tension trop déformée entraîne un certain nombre d'inconvénients, en particulier pour les convertisseurs eux-mêmes dont l'angle d'amorçage sera alors décalé [4].

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies :

- Au niveau international par la CEI ;
- Au niveau européen par le CENELEC ;
- Au niveau français, par l'UTE et le CEF.

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré.

Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

- faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques,
- assurer la qualité des produits,
- garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes,
- contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits,
- contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Pour les réseaux électriques, les recommandations d'EDF pour les tensions sont :

- Pour un harmonique pair : $\frac{V_h}{V_1} < 0.6\%$

- Pour un harmonique impair : $\frac{V_h}{V_1} < 1\%$

- Pour le taux de distorsion global de tension : THD < 1.6% [39].

❖ La norme CEI 61000-2-2

Elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau (D.2). Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau de basse tension déformé.

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25/h				

Tableau D.2 Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2) [37]

❖ La norme CEI 61000-3-2

Cette norme représentée sur le tableau (D.3) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

Harmoniques paires		Harmoniques impaires	
Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)	Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
2	1.08	3	2.3
4	0.43	5	1.14
6	0.3	7	0.77
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 * 8/h$	9	0.40
		11	0.33
		13	0.21
		$15 \leq h \leq 39$	$0.15 * 15/h$

Tableau D.3 Limite des composantes harmoniques en courant (CEI 61000-3-2) [37]

❖ **La norme CEI-1000-2-2**

Les normes CEI-1000-2-2 précise le niveau des harmoniques de tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension (tableau D.4).

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang g	Tension harmonique en % du fondamental	Rang g	Tension harmonique en % du fondamental	Rang g	Tension harmonique en % du fondamental
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.5				
> 25	$0.2 + 0.5 * 25/k$				

Tableau D.4 Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2) [39]

Compte tenu de toutes ces normes imposées par la réglementation CEM, nous avons besoin de mettre en œuvre des moyens efficaces afin de limiter la propagation de la pollution harmonique des réseaux de distribution d'énergie. Les normes citées sont obligatoires mais restent incomplètes et ne permettent pas de garantir totalement la compatibilité électromagnétique sur les réseaux publics car elles ne tiennent pas compte de l'influence du réseau et de la déformation initiale de la tension. Par ailleurs, elles paraissent un peu laxistes pour les appareils de faibles puissances [39].

D.5 Conséquences des harmoniques

D.5.1 Généralités

En injectant des courants harmoniques, qui déforment la tension, des nombreux effets sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance :

D.5.1.1 L'échauffement

Il est commun de se rapporter à l'échauffement en tant que pertes Joule. En utilisant le principe de la superposition, les pertes sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$RI^2 = \sum_{h=1}^{\infty} RI_h^2$$

I : le courant total.

I_h : le courant harmonique de rang h (h=1 représente le fondamental).

R : la résistance traversée par le courant I.

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

D.5.1.2 Interférences dans les systèmes de communication

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de communication peut provoquer des interférences. Le courant circulant dans le réseau électrique engendre un champ magnétique qui induit un courant dans les conducteurs des réseaux de communication. L'importance des interférences est fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux.

L'interférence provoque la nuisance à la qualité de l'image (téléviseur) et du son.

D.5.1.3 Le dysfonctionnement de certains équipements électriques

Les harmoniques peuvent influencer sur le fonctionnement des dispositifs à semi-conducteurs. Si l'équipement est sensible au passage par zéro, un état de résonance peut produire une forme d'onde de courant qui effectue plus qu'un passage par zéro chaque demi-cycle, ce qui mènera à un dysfonctionnement du dispositif. Les problèmes avec les dispositifs à semi-conducteurs se développent également avec l'équipement qui fonctionne par la détection des valeurs maximales de la tension. Autres défauts de fonctionnement de dispositif à semi-conducteurs sont :

- Erreurs dans l'équipement de mesure,
- Déclenchement indésirables des relais et des contacteurs,
- Interférence avec des contrôleurs de moteurs,
- Fonctionnement instable des circuits d'allumages par le passage de la tension par zéro.
- Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque,
- Déclenchements intempestifs des disjoncteurs (dépassements des valeurs crêtes de la tension).

D.5.1.4 Le risque d'excitation de résonance

Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées.

L'utilisation des condensateurs dans un système d'alimentation en présence d'équipement polluant produit un état de résonance harmonique. L'impédance capacitive diminue directement avec la fréquence et l'impédance inductive augmente avec la fréquence. A la fréquence de résonance de tout circuit, l'impédance inductive égalera l'impédance capacitive. Dans les systèmes électriques réels employant des condensateurs de compensation de phase, une résonance série, parallèle ou une combinaison des deux peut se produire. Dans le cas de la résonance série, l'impédance totale à la fréquence de résonance est réduite à la composante résistive du système. Si cette composante est faible, un fort courant va être engendré par cette fréquence.

Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification importante d'harmoniques qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.

D.5.2 Effet des harmoniques sur les machines tournantes [41]

Les machines tournantes sont des génératrices d'harmoniques même si elles sont alimentées par des courants parfaitement sinusoïdaux.

La répartition spatiale du flux tournant dans l'entrefer n'est pas rigoureusement sinusoïdale à cause de la saturation du circuit magnétique. Les enroulements ne sont pas répartis tout au long des armatures, mais logés dans des encoches, d'où la présence des harmoniques d'encoches. Ces harmoniques, dont la valeur relative est d'autant plus faible qu'il y a plus d'encoches par pôles et par phases, se composent avec ceux arrivant du réseau ou du convertisseur auquel est reliée la machine.

Les pertes supplémentaires dans les stators des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) provoquent l'échauffement à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

D.5.2.1 Machines synchrones

Les courants harmoniques les plus importants circulant au stator d'une machine triphasée peuvent être groupés par paires : 5 et 7, 11 et 13, et plus généralement $6k-1$ et $6k+1$.

Si on suppose la machine bipolaire, le rotor tourne dans le sens direct à la vitesse ω , égale à la pulsation $2\pi f$ du fondamental des courants.

Les harmoniques de rang $6k-1$ créent un flux tournant dans le sens inverse à la vitesse $(6k-1)\omega$, donc à la vitesse $6k\omega$ par rapport au rotor et en sens inverse de celui-ci.

Les harmoniques de rang $6k+1$ créent un flux tournant dans le sens direct à la vitesse $(6k+1)\omega$, donc à la vitesse $6k\omega$ par rapport au rotor et dans le même sens que celui-ci.

Ces flux tournants créent dans le rotor des courants de fréquence $6kf$.

On peut remarquer que la composition du champ direct de vitesse $6k\omega$ dans un sens avec un champ inverse de vitesse $6k\omega$ en sens inverse correspond à un champ elliptique, les axes de l'ellipse étant fixes par rapport au rotor.

Ce champ tournant elliptique est voisin de celui créé par un bobinage monophasé. S'il est important on a des effets du même que ceux dus à l'interaction d'une armature monophasée avec une armature triphasée.

Dans le cas où la machine synchrone ne possède pas d'amortisseur, des courants de fréquence $6kf$ induits au rotor circulent dans le fer de celui-ci et dans les bobines inductrices, afin de compenser la variation de flux qui leur a donné naissance.

La résistance des circuits rotoriques empruntés par ces courants de fréquence $6kf$ étant relativement élevée, on constate une augmentation des pertes rotoriques et des échauffements supplémentaires par rapport au cas où les courants statoriques sont sinusoïdaux.

Si la machine est munie d'amortisseurs, c'est dans ceux-ci que se développe l'essentiel des courants de fréquence $6kf$. Les pertes dans les amortisseurs peuvent être maintenues dans des limites raisonnables si leur résistance reste faible malgré l'effet Kelvin. En pratique, les cages d'amortissements fonctionnant en basse ou moyenne tension sont généreusement dimensionnées.

Dans le cas d'un alternateur dont la puissance (grandes centrales) est très largement supérieure à celle des convertisseurs perturbants, les effets des harmoniques sont très limités. Au contraire lorsqu'un alternateur débite sur un convertisseur électronique de puissance comparable, on constate une influence très importante des harmoniques sur les pertes Joule au stator et les pertes fer de la machine.

En ce qui concerne les moteurs, on doit éviter les alimentations dont le taux d'harmoniques de tension dépasse 10%. Au delà, le rendement de la machine est fortement affecté, par ailleurs les harmoniques peuvent engendrer des bruits et des vibrations inacceptables.

D.5.2.2 Machines asynchrones

Le passage des courants harmoniques dans les enroulements statoriques du moteur asynchrone crée des couples moteurs s'il s'agit de systèmes directs ($h=3k+1$) ou des couples antagonistes s'il s'agit de systèmes inverses ($h=3k-1$). Mais ces couples sont d'ordinaire négligeables devant le couple dû au fondamental et même devant les couples parasites du moteur lui-même.

L'impédance permettant le passage d'une tension harmonique au courant correspondant diffère peu du produit de la réactance du moteur au démarrage par le rang d'harmonique.

A cause des harmoniques ce courant devient :

$$I \cong I_n \sqrt{1 + \sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{U_h}{hU_n}\right)^2}$$

Où :

U_n : Tension nominale.

I_n : Courant statorique nominal.

U_h : Valeur de l'harmonique h de tension.

Les pertes Joule au stator augmentent sensiblement comme $(I / I_n)^2$. Les pertes Joule au rotor sont plus affectées par les harmoniques que celles au stator car la résistance du rotor croit rapidement en fonction de la fréquence des courants qui y sont induits.

Aussi la norme CEI 892, qui définit les limites à respecter pour les moteurs asynchrones, utilise le taux d'harmoniques pondéré défini par :

$$THD_M = \frac{1}{U_1} (\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h^2}{h})^{1/2}$$

Pour les moteurs ordinaires, ce taux doit être inférieur à 2%.

Une règle pratique consiste, comme les moteurs synchrones, à ne pas dépasser un taux d'harmoniques en tension de 10% pour l'alimentation du moteur asynchrone.

D.5.3 Effet des harmoniques sur les composants passifs du réseau

D.5.3.1 Transformateur de puissance

Dans un transformateur la présence d'harmoniques produit trois types d'effets :

a. Augmentation des pertes

Les pertes dans le fer sont accrues du fait des harmoniques de la tension :

- qui par les courants supplémentaires induits dans les tôles augmentent les pertes par courants de Foucault.
- qui ajoutant des cycles d'hystérésis secondaires au cycle principal que le fondamental fait décrire aux tôles, augmentent les pertes par hystérésis.

Les pertes Joules dans les enroulements sont elles aussi accrues car la valeur efficace des courants est supérieure à celle de leur seul fondamental.

Pour tenir compte des effets des courants harmoniques, la norme UTE C15-112 détermine un facteur de déclassement K défini par la relation :

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \sum_{h=2}^{40} h^{1.6} (\frac{I_h}{I_1})^2}}$$

Si, en l'absence d'absence d'harmoniques la puissance nominale du transformateur est S_n , à cause des harmoniques la puissance admissible devient $K.S_n$.

b. Augmentation du bruit

Les courants harmoniques peuvent générer des forces électrodynamiques venant exciter des fréquences propres de la structure mécanique que constitue l'ensemble du transformateur (circuit magnétique, enroulements, cuve...).

Les vibrations dues à de telles résonances mécaniques se traduisent par une augmentation plus au moins importante du bruit acoustique. Celui-ci est l'indice d'une fatigue mécanique anormale.

c. Création de surtension interne

Des surtensions peuvent apparaître au sein même du transformateur dans des cas très particuliers de fonctionnement des convertisseurs qu'il alimente. Elles sont dues à des harmoniques anormaux ou à des interharmoniques non ou mal filtrés à leur sortie des convertisseurs et pour qui le transformateur, avec ses inductances et capacités réparties, constitue un circuit bouchon de grande impédance.

D.5.3.2 Condensateur

Du fait même de l'importance de leur rôle dans la limitation de la propagation des harmoniques, les condensateurs peuvent être soumis à des contraintes importantes liées aux harmoniques :

- En dérivant les courants harmoniques, il augmente la valeur efficace qui les traverse,
- En produisant involontairement ou volontairement dans le cas de filtrage, des phénomènes de résonance, ils augmentent la tension à leurs bornes.

Or la durée de vie d'un condensateur dépend :

- Des contraintes en tension qui s'exercent sur le diélectrique.
- Des échauffements qui apparaissent tant au niveau du diélectrique que des traversées du courant.

L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

Il faut Donc s'assurer :

- Que la tension crête qui apparaît aux bornes du condensateur du fait de la présence des harmoniques ne dépasse pas les limites prescrites par le constructeur.
- Que les pertes totales sont acceptables.
- Que la valeur efficace du courant n'est pas excessive, afin de ne pas produire un échauffement excessif des traversées et des connexions internes et, par là, de l'enceinte.

En ce qui concerne l'impact des harmoniques sur l'immunité des condensateurs de puissance, la norme CEI 871 indique :

- Qu'ils doivent résister à une tension efficace égale à 110% de tension nominale fondamentale.

- Qu'ils doivent admettre un courant efficace égal à 130% du courant nominal fondamental.

D.5.3.3 Câbles de puissance

Les courants harmoniques passant dans un câble augmentent la valeur efficace du courant et par là les pertes et l'échauffement, particulièrement dans le neutre en cas de présence d'harmonique 3.

Ces augmentations sont plus générales pour les câbles que pour les lignes aériennes à cause de l'isolant qui entoure les conducteurs et dont l'échauffement accélère le vieillissement.

Les pertes dans le diélectrique dépendent du facteur de crête de la tension.

D.5.4 Les effets sur l'aspect économique

- Diminution de la durée de vie des câbles, et la dégradation des matériaux isolants,
- Dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie),
- Surdimensionnement des équipements,
- Perte de productivité (vieillissement accéléré des équipements, déclenchements intempestifs),
- L'influence sur la télécommande dans les réseaux.

D.6 solutions de dépollution des réseaux électriques [33], [34], [35], [37], [39]

Afin de compenser toutes les perturbations, deux types de solutions sont envisageables : traditionnelle et moderne. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques.

D.6.1 Solutions traditionnelles [33], [35], [37].

D.6.1.1 Agir sur la structure de l'installation

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

D.6.1.2 Compensation

Il consiste à superposer à la source de perturbation une autre source d'énergie capable d'absorber ou de compenser les composantes non souhaités.

Ces systèmes sont généralement des compensateurs d'harmoniques et/ou d'énergie réactive placés, selon la nature de la perturbation à éliminer.

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

D.6.1.3 Augmentation de la puissance de court-circuit

L'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Aussi l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande.

D.6.1.4 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

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

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

Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée.

Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation.

D.6.1.5 Rééquilibrage des courants du réseau électrique

C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibres dans un réseau électrique basse tension.

D.6.1.6 Filtrage passif

C'est la solution classique pour améliorer de la qualité d'énergie, elle repose sur le principe de piéger les harmoniques dans des éléments passifs (R,L,C) connectés, en dérivation au réseau, formant des impédances dont la fréquence de résonance est accordée à celle de l'harmonique de courant que l'on veut atténuer ou éliminer.

Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs.

Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible.

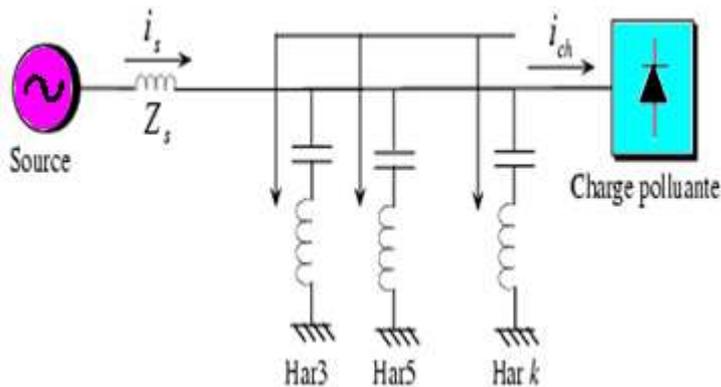


Fig. D.8 Principe de filtrage passif

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients :

- Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire,
- les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre,
- le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées,
- équipements volumineux,
- inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

D.6.2 Solutions modernes

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance).

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif :

- inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques.
- l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT.

D.6.2.1 Pont dodécaphasé

Ce pont est composé de deux redresseurs hexaphasés montés en série, qui est le pont le plus utilisé (cas des puissances importantes) (Figure D.9).

L'utilisation d'un grand nombre de semi-conducteurs et de transformateurs à deux enroulements secondaires rend cette solution onéreuse. Elle entraîne un coût supplémentaire et demande plus que le savoir faire habituel pour les mettre en œuvre.

Cette solution ne résolve pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

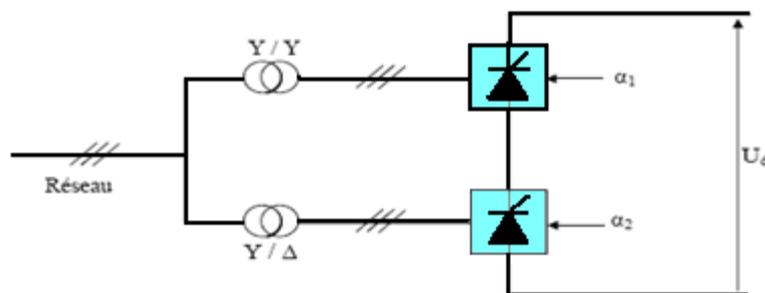


Fig.D.9 Pont dodécaphasé

D.6.2.2 Les redresseurs à MLI

Les convertisseurs AC/DC à absorption sinusoïdale sont réalisés grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsion MLI, C'est bonne solution, cependant elle doit être généralisée, ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours. Dans le cas monophasé, la structure la plus répandue est une mise en parallèle d'un pont redresseur monophasé à diode et d'un hacheur, tandis que dans le cas triphasé, c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou IGBT qui est la plus répandue. Cette solution permet de réduire les harmoniques produits par les convertisseurs AC/DC et elle ne peut agir sur les harmoniques créés par d'autres sortes de charges polluantes.

D.6.2.3 Filtres actifs

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.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Donc le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdale.

Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs. Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

a. Filtre actif série (FAS)

Dans cette configuration, le filtre est placé en série sur le réseau (Fig.D.10). Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau et compense la tension au point de connexion de la charge. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale, mais ce qui n'est pas le cas du courant dans la source, car cette dernière est traversée par la totalité du courant de charge. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

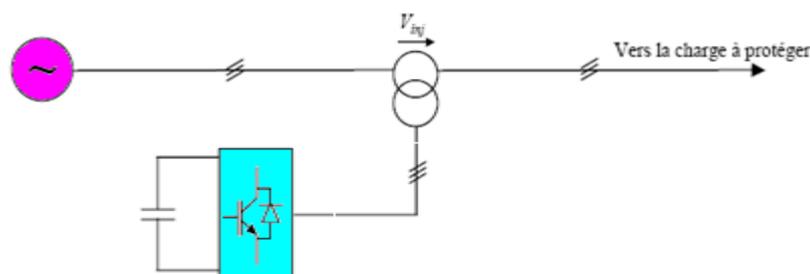


Fig.D.10 Filtre actif série.

b. Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau (Fig.D.11) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi, l'objectif du filtre actif parallèle FAP consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques et réactifs) produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

Le filtre actif parallèle peut en même temps compenser le courant réactif mais avec un dimensionnement plus important. Il peut être utilisé suivant deux modes de fonctionnement :

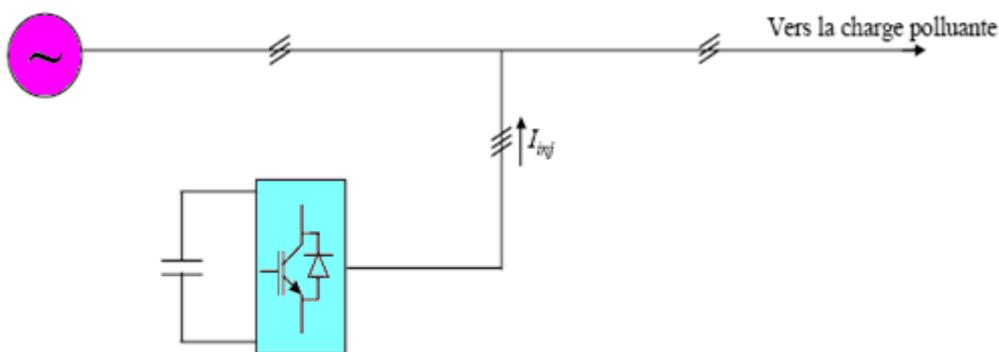


Fig.D.11 Filtre actif parallèle.

❖ Filtre dédié :

Si les harmoniques à filtrer sont connus à priori, la commande du filtre actif est dédiée. L'exemple type est la suppression des premiers harmoniques du courant absorbé par un redresseur alimentant une charge fortement inductive. Dans ce cas, les harmoniques peuvent être approximativement estimés à partir de l'amplitude et la phase du courant fondamental.

❖ Filtre adaptatif :

Ce filtre est capable d'identifier par lui-même les harmoniques et de s'adapter automatiquement à leurs éventuelles harmoniques en opposition de phase.

Cette nouvelle solution plus performante est en cours d'étude et dans certains cas, au stade industriel grâce notamment à l'apport de l'évolution des techniques de commande et de mise en œuvre des semi-conducteurs de puissance.

c. Combinaison parallèle-série de filtres actifs (UPFC) ou (UPQC)

La figure (D.12) illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, également appelée « Unified Power Quality Conditioner » (UPQC).

Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale.

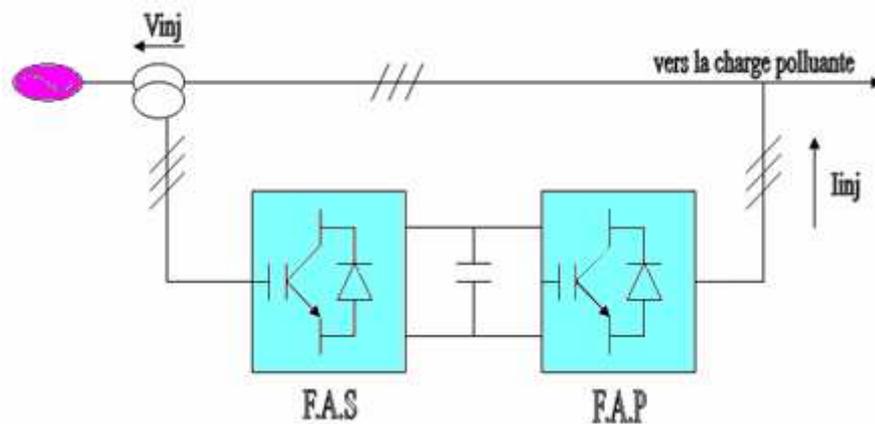


Fig.D.12 Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

d. Combinaison hybride de filtres actifs et passifs

Les inconvénients des filtres passifs (résonances série ou parallèle avec la source et/ou la charge, détérioration des performances du filtre lors de variations de l'impédance du réseau...) et des filtres actifs (coût élevé en raison du dimensionnement des composants de puissance) ont conduit à l'élaboration d'une nouvelle topologie de filtre actif. Il s'agit du filtre hybride qui est en réalité l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs.

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT.

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

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles (Fig.D.13) (empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences).
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles (Fig.D.14) (réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible).
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle (Fig.D.15) (compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante par le filtre actif parallèle et élimination des harmoniques hautes fréquences par le filtre passif).

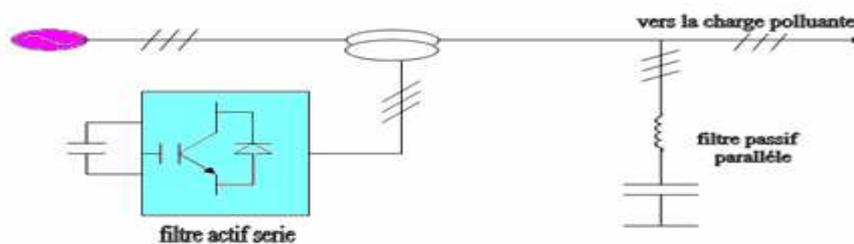


Fig. D.13 Filtre actif série et filtre passif parallèle

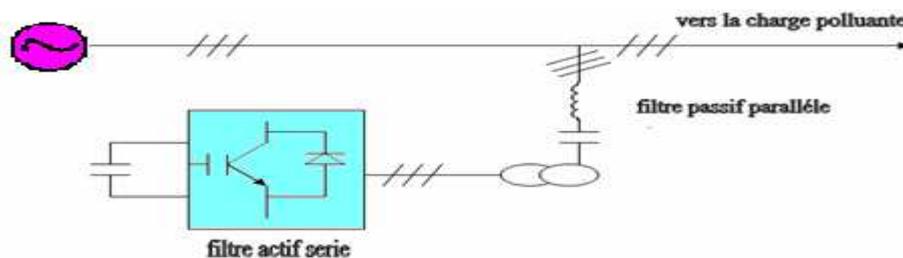


Fig. D.14 Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

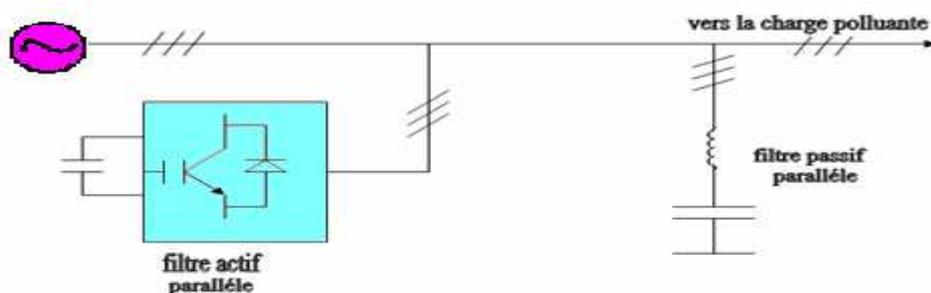


Fig. D.15 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Bibliographie

- [1] B.MULTON, X.ROBOAM, H.BEN AHMED, « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'ingénieur, D 3 960.
- [2] A.MIRECKI, « Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [3] S.EL AIMANI, « Modélisation de Différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, 2005.
- [4] F.MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», thèse de magistère, ENP, 2007.
- [5] Y.BENCHERIF, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», projet de fin d'études, ENP, 2008.
- [6] A.BOYETTE, "Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat, Université Henri, Nancy 1, France, 2006.
- [7] A.SAKI, «Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne», projet de fin d'études, ENP, 2006.
- [8] A.ABDELLI, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, France ; 2007.
- [9] I.HAMZAOUI, «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur», thèse de magistère, ENP, 2008.
- [10] J.MARTIN, « Energies éoliennes ». Techniques de l'ingénieur, B1360.
- [11] F. POITIERS, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour L'utilisation de l'énergie Éolienne », thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [12] G.SALLOUM, « Contribution à La Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, France ; 2007.
- [13] G. SEGUIER, « Electrotechnique industrielle », éditions TEC & DOC, 200
- [14] A.DENDOUGA, « Commande par Mode Glissante de la Machine à Double Alimentation Alimentée par un Onduleur de Tension », thèse de Magister, Université de Batna.
- [15] H.TAMRABET, "Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone", these de magister, Université de Batna, 2006.
- [16] J. CHATELAIN, « Machines électriques tournantes », Edition Dunod, tome1, 1983.

- [17][4] M.PINARD, « Commande Electronique des Moteurs Electriques », DUNOD, Série EEA, 2004.
- [18] M.ABBAS, « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne», projet de fin d'études, ENP, 2006.
- [19] K.BOULAAM, « Analyse et Commande de la cascade redresseur triphasé à trois niveaux à MLI-onduleur triphasé à trois niveaux. Application à la conduite d'une MSAP», thèse de magister, ENP, 2000.
- [20] M .CHERKAOUI, « Contribution a la modélisation, à l'étude et à la commande des machines application à une machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat, Polytechnique de Lorraine, France, 1990.
- [21] R.ACHOURI, M.HIDOUCHE, « Commande vectorielle de la machine asynchrone », projet de fin d'étude, ENP, Juin 2007.
- [22] F. BRICHANT, «Les onduleurs autonomes, Conception et applications industrielles», Dunod 1982.
- [23] H.FOCH, F.FOREST, et T.MEYNARD, "Onduleurs de tension : Structures, Principes et Applications", Techniques de l'ingénieur, D 3 176.
- [24] EL M.BERKOUK, « Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasée et triphasée alimentée par des convertisseurs directs et indirects. Application aux gradateurs et onduleurs multi niveaux », Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers, 1995.
- [25] R.GUEDOUANI, « Commande d'un onduleur de tension multi-niveaux . Application à la conduite d'une machine synchrone à aimants permanent», these de magistère, ENP, 1998.
- [26] K.BOULAAM, « Etude de la cascade redresseur à MLI à trois niveaux-Onduleur à trois niveaux- MSAP. Application à la commande de vitesse et de position», projet de fin d'étude, ENP, 1998.
- [27] H.CAMBLONG, « Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003.
- [28] S.NOUI, « Etude et réalisation d'un redresseur à MLI commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un onduleur à 3 niveaux », Mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2001.
- [29] [H.BUHLER, « Electronique de réglage et de commande », Edition DUNOD, 1987.
- [30] F.LABRIQUE, G.SEGUIER, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », T1 et T2. Edition DUNOD, 1989.

- [31] C.LAROUCI et R M.AMEURI, « Onduleur à trois niveaux utilisé en filtrage actif parallèle », projet de fin d'étude, ENP, 1998.
- [32] A. GAILLARD, M. MACHMOUM et S. SAADATE, « Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation », journal homepage, 2009.
- [33] M A E.ALALI, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse de Doctorat, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur, France, 2002.
- [34] 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.
- [35] R.BOUFASSA,O. MEKARNIA, « Modélisation Et Commande D'un UPFC Utilisé En Filtrage Des Courants Harmoniques D'un Réseau Electrique », projet de fin d'étude, ENP, 2007.
- [36] T.GOURAUD, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de Doctorat, Université de NANTES, France, 1997.
- [37] D.OULD ABDESLAM, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace, 2005.
- [38] F.HAMOUDI, « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils », Thèse de Magistère, Université de Batna, 2008.
- [39] MM.ABDUSALAM. « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse de Doctorat, Université de Nancy, 2008.
- [40] OULD ABDESLAM, WIRA, FLIELLER ET MERCKLE, « Une nouvelle approche neuromimétique pour l'identification et la compensation des harmoniques dans les systèmes électriques », International Conference on Electrical Engineering and its Applications, Sidi Bel-Abbes, Algeria, 2006.
- [41] J. BONAL, G. SEGUIER, « Entraînement électrique à vitesses variables, Volume 3 : interaction convertisseur-réseau et convertisseur-moteur-charge », Technique et documentation, 2000.

ملخص

في الشبكات الكهربائية ذات التوتر المنخفض، الاضطرابات الناجمة عن التيار غير الخطي والاستطاعة الرديئة و عدم توازن التوتر و التيار له نتائج سلبية على مختلف التجهيزات الكهربائية. في هذا العمل هدفنا هو التزويد و التحكم في الماكنة اللامتزامنة ذات تزويد مضاعف بتطبيق ذلك في ناعورة هوائية بهدف تصحيح الاضطرابات الناجمة عن التيار. طبقنا هذه العملية على مستقبليات غير خطية بازالة التيار التفاعلي و بعدمه.

كلمات مفتاحية

ماكنة لامتزامنة ذات التغذية المضاعفة، التحكم الشعاعي بالفدرة الفعالة و فدرة رد الفعل، الطاقة الهوائية، الاضطرابات، الاستطاعة الرديئة، عازل الاضطرابات.

Résumé

Dans les réseaux électriques basses tension, les harmoniques, la puissance réactive, les déséquilibres de courant et de tension, et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne, l'alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation avec une application dans une chaîne de conversion éolienne, pour la dépollution du réseau.

On applique le filtrage sur une charge non linéaire avec sans et avec compensation du courant réactif.

Mots Clés : Machine asynchrone à double alimentation, Commande vectorielle en puissance active et réactive, énergie éolienne, harmoniques, compensation de la puissance réactive, méthodes d'identification, filtre sélectif.

Abstract

In electrical networks, unbalanced and harmonic currents generated by nonlinear and unbalanced loads can cause harmonics and unbalanced voltage. These voltage perturbations along with voltage sag can strongly degrade customer power quality.

The work presented in this memory concerns, the feeding and controls of an asynchronous machine with doubly supply with its application in a chain of wind conversion to isolate the harmonics current.

We applied this approach on Non linear loads with and without compensation of a reactive current.

Key words

Asynchronous machine with double power supply, vector control in active and reactive power, Wind energy, harmonics, compensated reactive power, harmonic detection methods, and High selectivity filter.