

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

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Électrotechnique
Spécialité : **Machines Electriques**

Présenté par

**Arezki Hammadou
Ahmed Batatache**

Thème

Etude par modélisation et simulation numérique d'une cascade de deux MADAs

Mémoire soutenu publiquement le 23/09/2024 devant le jury composé de :

M^{me} Rahma KACHENOURA

MCB, UMMTO, Présidente

M^{me} Fatma LOUNNAS

MCB, UMMTO, Rapporteur

M^r Mohamed Lamine HAMIDA

MCA, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous remercions Dieu pour le courage, la patience et la santé qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à **M^{me} LOUNNAS Fatma**, enseignante au département d'électrotechnique, qui nous a proposé ce sujet, nous a orientées le long de la réalisation de ce mémoire, nous à prodigué les précieux conseils, qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Notre sincère gratitude va aussi aux membres du jury **M^{elle} KACHENOURA Rahma** et **M^r HAMIDA Mohamed Amine** qui ont bien accepté de juger ce présent travail.*

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

Dédicace

C'est avec un grand honneur que je dédie ce travail :

- ✓ *A mes chers parents*
- ✓ *A mes chères sœurs*
- ✓ *A mes chers frères*
- ✓ *A mes chères amis (es)*
- ✓ *A tous ceux qui me sont chers*

Ahmed

Dédicace

C'est avec un grand honneur que je dédie ce travail :

- ✓ *A la mémoire de mon père*
- ✓ *A ma chère mère et ma petite sœur*
- ✓ *A mes chers oncles*
- ✓ *A mes chères amis (es)*
- ✓ *A toute ma famille*

Arezki

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur la cascade de MADAs

I.1 Introduction	2
I.2 Types de machines asynchrones.....	2
I.2.1 Machine asynchrones à cage d'écureuil	2
I.2.1.1 Constitution.....	2
I.2.1.2 Domaines d'application.....	3
I.2.1.3 Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à cage	4
I.2.2 Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	4
I.2.2.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation	4
I.2.2.2 Modes de fonctionnements de la MADA.....	5
I.2.2.3 Avantages et inconvénients de la MADA.....	6
I.3 Cascade de MADAs	7
I.3.1 Description de la cascade de la MADAs.....	7
I.3.2 Evolution historique de la cascade de MADAs	8
I.3.3 Types de couplages de la cascade de MADAs.....	10
I.3.4 Modes de fonctionnements de la cascade de MADAs.....	11
I.3.5 Avantages de la cascade de MADAs.....	13
I.4 Conclusion.....	13

Chapitre II : Modélisation de la MADA et la cascade de la MADAs

II.1 Introduction.....	14
II.2 Modélisations de la machine asynchrone à double alimentation	14
II.2.1 Hypothèses simplificatrices	14
II.2.2 Modèle mathématique de la MADA.....	14
II.3 Modélisation de la cascade de deux MADAs	16
II.3.1 Modélisation de la cascade de deux MADAs dans le repère (d,q).....	17
II.4 Conclusion.....	20

Chapitre III : Simulation du modèle de la cascade de la MADAs

Introduction.....	21
III.2 Descriptions de la structure étudiée de la cascade.....	21
III.3 Equations des tension d'alimentation de la cascade de MADAs.....	22
III.4 Constructions du modèle de la cascade de la MADAs sous Matlab/Simulink.....	22
III.5 Résultat de simulation et interprétations.....	23
III.5.1 Couplage direct de deux MADAs.....	23
III.5.2 Couplage inverse de la MADAs.....	27
III.6 Conclusion.....	32

Chapitre IV : Simulation de l'association de la cascade de MADAs-onduleur de Tension

IV.1 Introduction.....	33
IV.2 Alimentations de la cascade de la cascade de MADAs par des onduleur de tensions... ..	33
IV.3 Modélisations de l'onduleur.....	33
IV.4 Technique de commande MLI sinus-triangle.....	36
IV.5 Résultats de simulation et interprétations	38
IV.6 Conclusion.....	42
Conclusion générale	43
Annexe	
Bibliographie	

Introduction générale

Les machines asynchrones à cage sont largement utilisées, non seulement dans l'industrie, mais aussi dans les appareils domestiques, et ce en raison de leur fiabilité, leur simplicité de construction, leur faible coût, leur bon rendement et enfin leur vitesse qui presque constante (proche de synchronisme).

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très utilisée dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne en particulier et dans les systèmes d'entraînement électriques à vitesse variable en général. Ces systèmes qui font de plus en plus appel aux onduleurs. Mais la présence du système balais-bagues au niveau de ce type de machines réduit sa fiabilité et engendre des coûts de maintenance élevés. C'est ainsi qu'est née l'idée de faire appel à des machines dites sans balais (brushless).

La cascade de machines asynchrones à double alimentation peut être considérée comme étant la première réalisation pratique d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais, elle représente le type fondamental d'une machine à induction sans balais. Cette configuration essaye d'allier les avantages de la machine asynchrone à cage et de la MADA.

L'objectif de notre travail est l'étude par modélisation et simulation numérique d'une cascade de deux Machines asynchrones à double alimentation de puissance de 1,5MW chacune. Le travail réalisé est reparti comme suit :

Le **premier chapitre** sera consacré à la présentation de quelques notions générales sur la machine asynchrone en général et sur la cascade de MADAs en particulier, dans lequel aussi un petit historique sur cette structure sera présenté.

Le **deuxième chapitre** sera dédié à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Cette modélisation servira de base pour la modélisation de la cascade de MADAs dans le repère de Park (d,q).

Dans le **troisième chapitre**, on trouvera la simulation du modèle de la cascade établi dans le deuxième chapitre, un programme de simulation sous Matlab/Simulink sera développé à cet effet, des résultats de simulation de la cascade durant son fonctionnement à vide et en charge et pour les deux cas de connexions des bobinages rotoriques seront présentés et discutés.

Le **quatrième chapitre** fera l'objet de l'analyse des grandeurs électriques et mécaniques obtenues par la simulation numérique du modèle de la cascade de MADAs, alimentée par des onduleurs de tension.

Enfin la synthèse des points importants de ce mémoire ainsi que quelques perspectives seront présentés en conclusion.

Chapitre I

Généralités sur la cascade de MADAs

I.1 Introduction

Avant d'aborder la modélisation de la cascade de machines asynchrones à double alimentation, nous allons présenter quelques généralités les machines asynchrones en général et sur cette structure de cascade de MADAs en particulier.

Nous allons commencer par donner des rappels sur les machines asynchrones, à savoir leurs constitutions, leurs fonctionnements ainsi que leurs avantages et inconvénients. Puis nous présenterons les différents modes de fonctionnement de la cascade de MADAs, après avoir donner sa description, son évolution dans le temps ainsi que les différentes configurations de couplages des machines constituant cette structure.

I.2 Types de machines asynchrones

1.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone est une machine électrique à courant alternatif qui tourne à une vitesse inférieure à celle du champ magnétique du stator, d'où son nom « asynchrone ». Le moteur asynchrone est actuellement le moteur électrique le plus couramment employé dans le domaine industriel. Il présente un avantage majeur : il ne comporte pas de connexions électriques glissantes, ce qui se traduit par une structure simple, solide et facile à réaliser [1].



Figure I.1 Moteur asynchrone à cage d'écureuil

1.2.1.1. Constitution

A. Le stator

Il est constitué d'une carcasse en acier contenant un empilage de tôles identiques formant un cylindre vide ; ces tôles sont perforées à leur extrémité intérieure. Les trous alignés créent des encoches dans lesquelles un bobinage triphasé est placé. Les moteurs

de petites et moyennes puissances isolent ces tôles entre elles par oxydation ou par un verni pour les moteurs de grandes puissances [1].

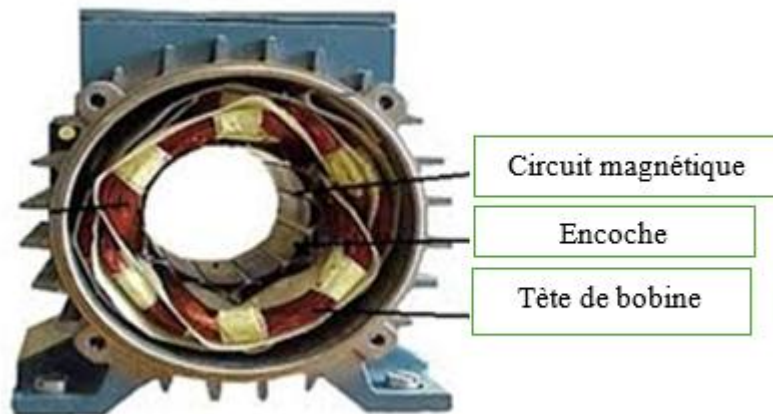


Figure I.2 Stator d'une machine asynchrone

B. Le rotor à cage

Les barres de cuivre nues sont placées dans les encoches de l'enroulement à cage d'écureuil. À chaque extrémité de ces barres, deux anneaux les court-circuitent, ce qui donne l'apparence d'une cage d'écureuil. Les barres et les anneaux des moteurs de petites et moyennes puissances sont constitués d'un seul bloc d'aluminium coulé. En fonction des caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur, ces barres peuvent être fabriquées en cuivre, en bronze ou en aluminium [2].



Figure I. 3 Rotor à cage d'une machine asynchrone

1.2.1.2. Domaine d'application

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur, on la retrouve dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie, électroménager (cela

représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, mais grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus utilisée en génératrice comme dans le cas des systèmes de conversion de l'énergie éolienne..

1.2.1.3. Les avantages et inconvénients de la machine asynchrone à cage

A. Avantages

- ☞ Elle possède un système électrique simple ;
- ☞ Elle possède une très grande fiabilité ;
- ☞ Elle est moins chère ;
- ☞ Robuste est facile à construire ;
- ☞ Utilisé dans la puissance moyenne et élevées

B. Inconvénients

- ☞ La puissance extraite est non optimisée ;
- ☞ La magnétisation de la machine est imposée par le réseau ;
- ☞ Il n'y a pas de contrôle de l'énergie réactive [3]

1.2.2 Machine asynchrone à double alimentation (rotor bobiné)

1.2.2.1 Description de la machine asynchrone double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator similaire à celui des machines triphasées classiques, composé principalement de tôles magnétiques empilées avec des encoches dans lesquelles les enroulements s'insèrent. Cette machine a l'originalité de ne plus être une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais [4] comme le montre la figure 1.4.

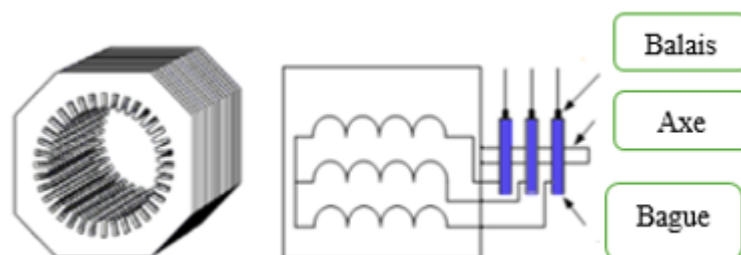


Figure I.4 Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobiné

Actuellement, la plupart des projets éoliens de plus de 1 MW utilisent la machine asynchrone pilotée par le rotor. La connexion de son circuit statorique au réseau électrique est directe. Un circuit supplémentaire situé sur le rotor est également connecté au réseau, mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

1.2.2.2 Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA peut fonctionner en moteur comme en générateur aux vitesses hypo- synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractérisant la machine [5].

A. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

La figure I.5 montre que 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. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joule dans le rotor.

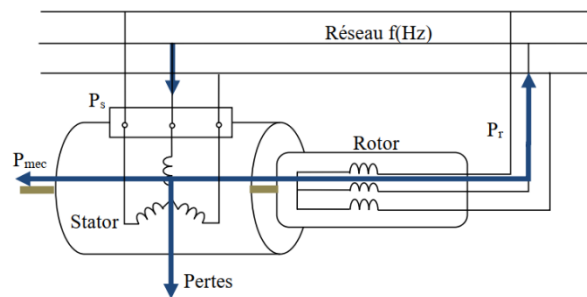


Figure I.5 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

B. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

La figure I.6 montre que 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. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

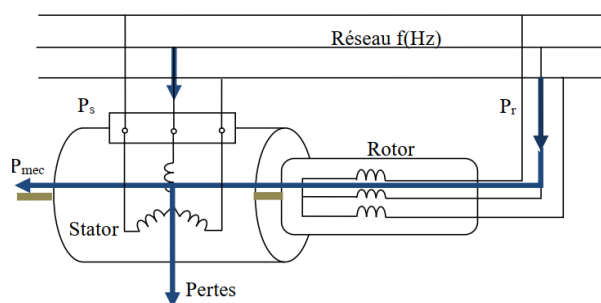


Figure I.6 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

C. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

La figure I.7 montre que 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. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

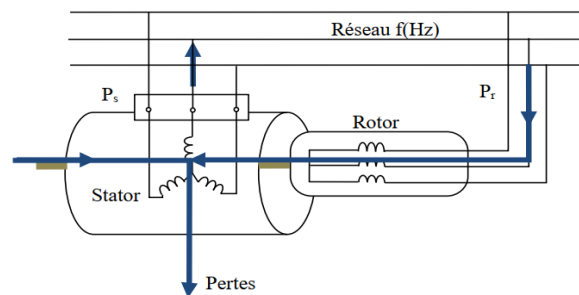


Figure I.7 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

D. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

La figure I.8 montre que la puissance est alors 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.

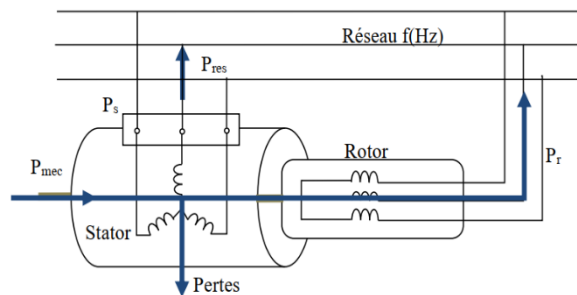


Figure I.8 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

1.2.2.3 Avantage et inconvénient de la MADA

A. Avantages

- ☞ L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- ☞ Transfert bidirectionnel de la puissance rotoriques ;

- ☞ 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 possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale ;

B. Inconvénients

- ☞ Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;
- ☞ Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais ;
- ☞ Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

I.3 Cascade de MADAs (Cascaded Doubly Fed Induction Machine)

1.3.1 Description de la cascade de MADAs

La cascade est constituée de deux MADAs, couplées mécaniquement via leurs arbres rotoriques et électriquement par le raccordement de leurs bobines rotoriques comme indiqué sur la figure I.9. L'intérêt de ce couplage réside principalement dans l'élimination de l'ensemble bagues-balais qui reste le problème majeur dans les éoliennes équipées de simple MADA [MAAFA] [6]. Cette structure en cascade de deux MADAs trouve son application dans plusieurs domaines à savoir les systèmes de production de l'énergie éolienne, les petites centrales hydrauliques et l'aviation [6].

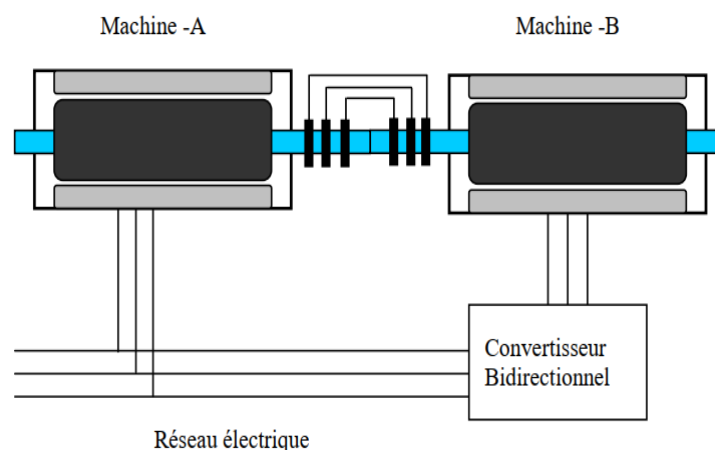


Figure I.9 Cascade de deux machines asynchrones à double alimentation

Cette configuration de machine essaye d'allier les avantages de la MAS et de la MADA. Elle peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais [7].

1.3.2 Évolution historique de la cascade de MADAs jusqu'à la machine asynchrone sans balais

Depuis l'introduction des machines à courant alternatif, des méthodes de contrôle de la vitesse ont été mises au point. Les composants semi-conducteurs n'avaient pas encore été inventés, et il était donc difficile de contrôler efficacement la vitesse des machines à courant alternatif sur une large plage de fonctionnement. Dès 1897, dans le but d'offrir une plus grande souplesse de contrôle aux machines asynchrones, Steinmetz (États-Unis) et Görges (Allemagne) ont tous deux conçu le système de contrôle en cascade [8]. Leur principe de connexion en cascade de deux machines à asynchrones à rotor bobiné allait finalement conduire au développement de ce que l'on appelle aujourd'hui la machine asynchrone sans balais. Une connexion en cascade est réalisée en connectant deux machines à induction via un arbre commun. Les enroulements du rotor de la première machine à induction sont connectés aux enroulements du stator de la deuxième machine à induction. Les enroulements du rotor de la seconde machine à induction sont ensuite connectés à un ensemble de résistances en série appelées « rhéostats » (figure I.10) [9].

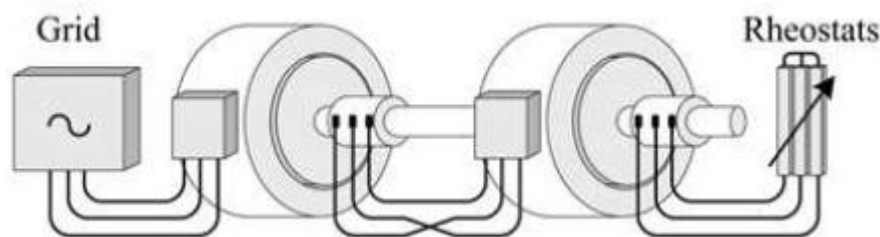


Figure I.10 Machines asynchrones en cascade (avec bagues collectrices) : 1897 [9]

Le même principe de fonctionnement pourrait être obtenu en connectant les enroulements du rotor de la première machine aux enroulements du rotor de la seconde et en connectant les rhéostats au stator de la deuxième machine. Dans ce cas l'utilité des bagues collectrices est éliminée (figure I.11).

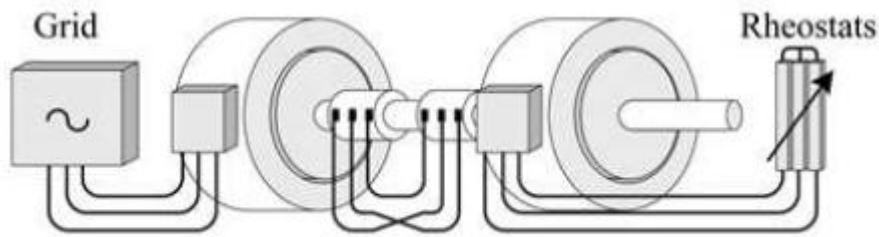


Figure I.11 Machines asynchrones en cascade (sans bagues collectrices) : 1897 [9]

Le système en cascade permettait un contrôle plus efficace, mais les inconvénients étaient considérables et incluaient des pertes dans le cuivre accrues, un faible facteur de puissance, une faible capacité de surcharge et un coût élevé du système. Néanmoins, l'idée d'un meilleur contrôle de la vitesse et une attention considérable a été accordée à la résolution de ces inconvénients. Cela a donné lieu à une série de développements. En 1902, Lydall et Siemens ont présenté un modèle de machines asynchrones en cascade qui comprenait deux enroulements statoriques indépendants logés dans le stator dont la structure est représentée par la figure I.12 [9] le rotor aussi comporte deux bobinages rotoriques. La structure de cette machine ressemblait déjà à celle des machines asynchrones sans balais modernes [10].

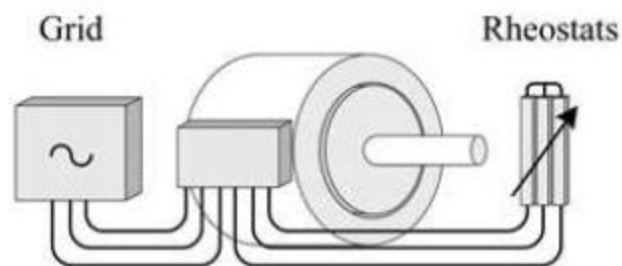


Figure I.12 Machines asynchrones en cascade : 1902 [9]

En 1907, Hunt a présenté une structure en cascade de machines asynchrones avec un enroulement statorique « spécial ». Au milieu des années 1980, les chercheurs ont réexaminé la possibilité de séparer les enroulements statoriques et grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'isolation électrique, une autre structure plus avantageuse que la construction « spéciale » introduite par Hunt. Le modèle de la machine qui en résulte est connue sous le nom de la machine asynchrone sans balais (brushless doubly fed induction machine) (figure I.13). Cependant, le terme DFIM sans balais a été introduit par Wallace et al. en 1989 [11].

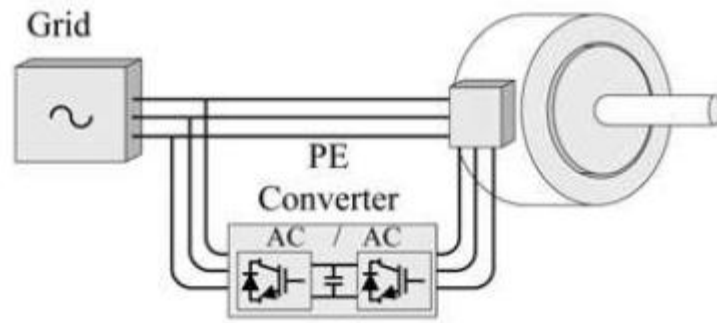


Figure I.13 Machine asynchrone sans balais : 1989 [9]

1.3.3 Types de couplages dans la cascade de MADAs

A. Couplage frontal

Les deux machines sont mise face à face, tel qu'il est représenté sur la figure I.14. Notons que pour ce genre de configuration le couplage des enroulements rotoriques peut se faire de deux manières, soit en couplage direct ou on respecte la succession des phases ou alors en couplage inverse ou deux des phases sont inter changées, ce changement est schématisé par un interrupteur `a deux positions [6].

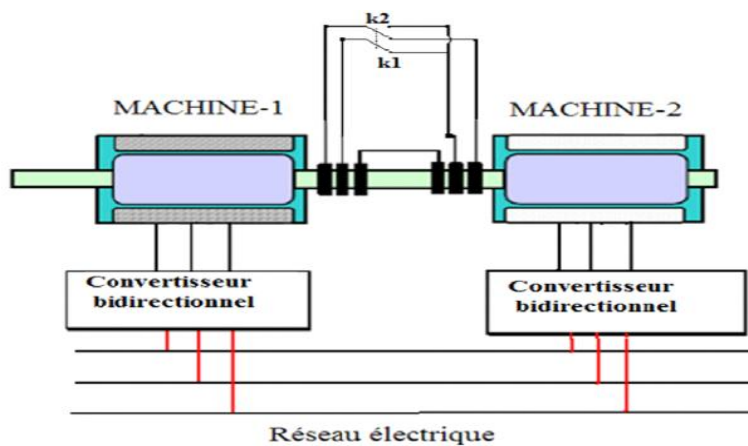


Figure I.14 Cascade de deux machines asynchrones (couplage frontal) [12]

B. Couplage par succession

Un couplage par succession, veut dire que les deux machines se succèdent l'une après l'autre, tel qu'il est représenté sur la figure 1.15. Là aussi l'inversion de phases est possible. On peut remarquer qu'une machine en cascade en couplage frontale avec un couplage direct est équivalente à une machine en succession en couplage inverse et vice-versa [6].

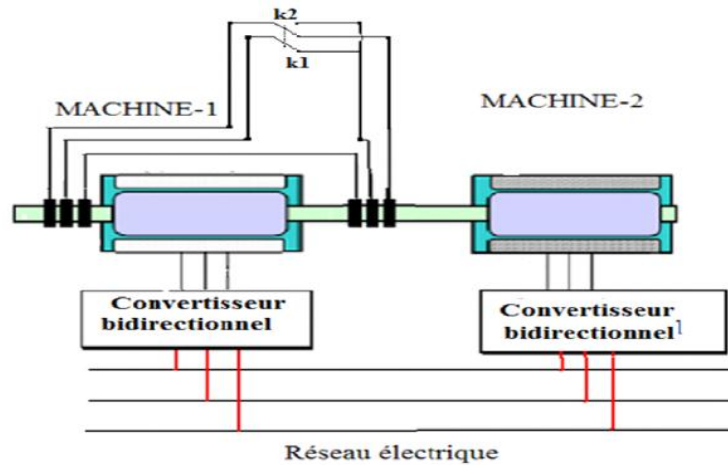


Figure I.15 Cascade de deux machines asynchrones (couplage en succession) [12]

1.3.4 Modes de fonctionnement de la cascade de MADAs

La présence d'un convertisseur de puissance bidirectionnel relié au bobinages statoriques de la machine de commande (Machine 2), la cascade de MADAs peut fonctionner en moteur ou en générateur aux vitesses hypo-synchrone et hyper-synchrone.

Les quatre (4) modes de fonctionnement possibles de la cascade de MADAs sont comme suit :

A. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone

Comme indiqué sur la figure I.16, dans ce mode de fonctionnement la puissance P_{s2} est injectée au réseau et la vitesse de rotation de la cascade est inférieure à la vitesse synchrone.

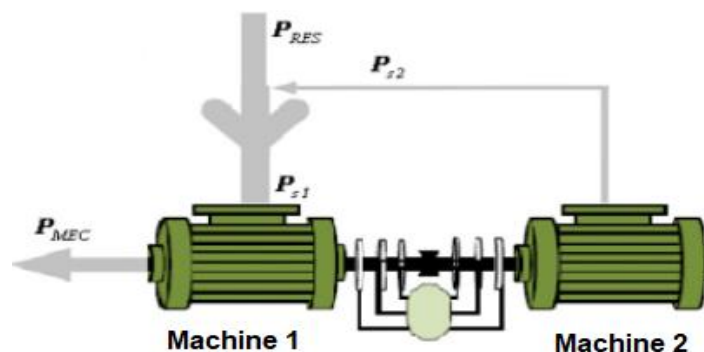


Figure I.16 Fonctionnement en moteur hypo-synchrone

B. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone

Dans ce cas les puissances P_{s1} et P_{s2} sont fournies par le réseau (figure 1.17) et la vitesse de rotor est supérieure de la vitesse de synchronisme.

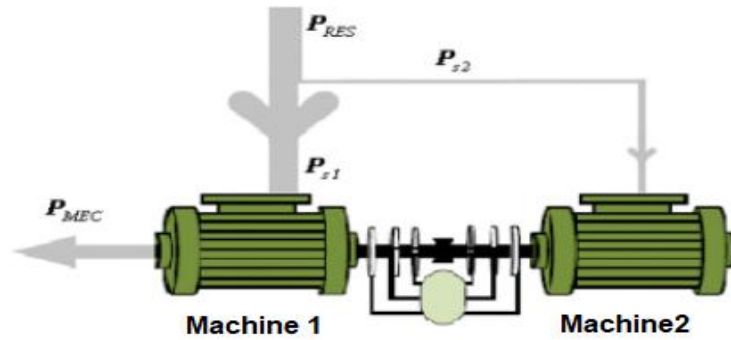


Figure I.17 Fonctionnement en moteur hyper-synchrone

C. Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone

Dans le mode de fonctionnement en génératrice hypo-synchrone caractérisé par la figure 1.18, la puissance P_{s1} est injecté au réseau et le stator de la machine 2 absorbe de la puissance P_{s2} du réseau. Donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

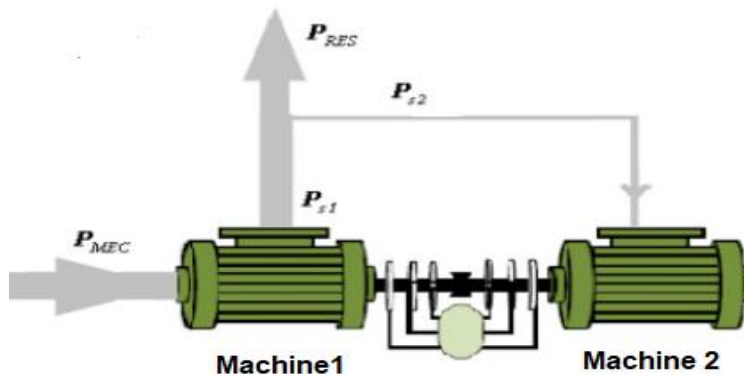


Figure I.18 Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone

D. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone

Dans le fonctionnement en génératrice hyper-synchrone les deux machines fournissent de l'énergie au réseau en injectant les puissances P_{s1} , P_{s2} , la vitesse de rotation dans ce cas est supérieure à la vitesse synchrone.

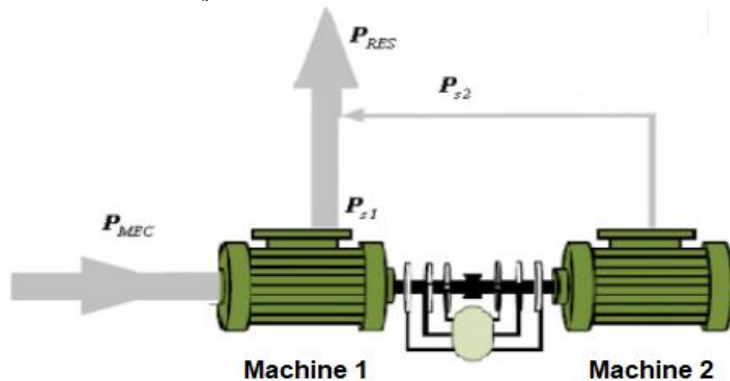


Figure I.19 Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone

1.3.5 Avantages de la cascade de MADAs

Comme la cascade de MADAs est une machine asynchrone sans balais, donc elle présente les mêmes avantages que celle-ci. Ces avantages sont :

- ☞ Réduction du coût de fabrication ;
- ☞ Facilité d'entretien ;
- ☞ Réduction des bruits ;
- ☞ Meilleur rendement ;
- ☞ Refroidissement plus facile ;
- ☞ Pas de limitation de vitesse.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions générales sur les types de machines asynchrone ainsi que sur la cascade de MADAs. La présentation de ces généralités nous permettra de prendre connaissance de la constitution, du fonctionnement ainsi que des avantages que présente cette structure en cascade de MADAs par rapport aux autres types de machines asynchrones et nous permettra aussi d'aborder l'étape de modélisation qui fera l'objet du chapitre II.

Chapitre II : Modélisation de la MADA et de la cascade de MADAs

II.1 Introduction

Après avoir donné un bref aperçu sur les machines asynchrones et sur la cascade de MADAs, nous allons dans ce présent chapitre procéder à la modélisation d'une MADA et d'une cascade de MADAs.

La modélisation consiste à représenter de manière mathématique un processus technique d'un système ; c'est une étape essentielle dans l'analyse des machines électriques.

La modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné dans le repère de Park (d-q) sera abordée dans la première partie, ce qui permettra de développer le modèle mathématique de la cascade de deux MADAs.

II.2 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation(MADA)

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. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court-circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Avant de commencer la modélisation de la machine, nous adoptons quelques hypothèses simplificatrices pour surmonter quelques difficultés concernant certains phénomènes difficiles à modéliser. Ces hypothèses se présentent comme suit :

- Entrefer constant ;
- Effet des encoches négligé ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- Influence de l'effet de peau de l'échauffement est non prise en compte ;
- Circuit magnétique non saturé et perméabilité constante ;
- Pertes ferromagnétique négligeables ;

II. 2.2 Modèle mathématique de la MADA

A. Equations électriques de la MADA

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

$$\begin{pmatrix} Var \\ Vbr \\ Vcr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Iar \\ Ibr \\ Icr \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi ar \\ \varphi br \\ \varphi cr \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

R_s, R_r : sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

B. Equations magnétiques :

$$\begin{pmatrix} \varphi as \\ \varphi bs \\ \varphi cs \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Ias \\ Ibs \\ Ics \end{pmatrix} + [Msr] \begin{pmatrix} Iar \\ Ibr \\ Icr \end{pmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{pmatrix} \varphi ar \\ \varphi br \\ \varphi cr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Iar \\ Ibr \\ Icr \end{pmatrix} + [Msr] \begin{pmatrix} Ias \\ Ibs \\ Ics \end{pmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec : L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques,

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{pmatrix} C \cos \theta & C \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & C \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ C \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & C \cos \theta & C \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ C \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & C \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & C \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{II.5})$$

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont alors alignés).

Il est clair que l'écriture de $[Vas]$ et $[Var]$ en fonction des courants conduit à un système d'équations dont les coefficients sont variables dans le temps : d'où la complexité de leur résolution pour résoudre ce problème, on a recours à la transformation de Park qui s'impose alors comme alternative dans le but d'obtenir un modèle équivalent plus simple à manipuler.

C. Equation du couple électromagnétique

A partir des bilans des puissances instantanées de la machine, nous pouvons exprimer le couple électromagnétique de la machine par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
 C_e &= p(\Phi_{qr}I_{dr} - \Phi_{dr}I_{qr}) \\
 C_e &= p(\Phi_{ds}I_{qs} - \Phi_{qs}I_{ds}) \\
 C_e &= pL_m(I_{dr}I_{qs} - I_{ds}I_{qr}) \\
 C_e &= p \cdot \frac{L_m}{L_r}(\Phi_{dr}I_{qs} - \Phi_{qr}I_{ds})
 \end{aligned} \tag{II.6}$$

II.3 Modélisation de la cascade de MADAs

Pour obtenir des équations aussi générales que possible, nous allons développer les équations de la cascade dans un repère (d-q) qui tourne à une vitesse électrique arbitraire ω_a par rapport au stator s1. Le rotor tourne à la vitesse $\omega_{r1} = p_1 \cdot \Omega$ par rapport au stator s1 MADA1. Le référentiel (d-q) tourne à la vitesse $\omega_a - p_1 \cdot \Omega$ par rapport au rotor. Le référentiel tourne par rapport au stator s2 de la MADA2 à la vitesse $\omega_a - (p_1 \cdot \Omega + C \cdot p_2 \cdot \Omega)$ [6].

$$\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \omega_a \tag{II.7}$$

$$\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \frac{d\theta_{r2}}{dt} = \omega_a - p_1 \cdot \Omega \tag{II.8}$$

$$\frac{d\theta_{s2}}{dt} = \omega_a - (p_1 \cdot \Omega + C \cdot p_2 \cdot \Omega) \tag{II.9}$$

Avec C coefficient de couplage qui détermine le type de connexion des deux rotors (C=1 pour la connexion directe et C=-1 pour la connexion inverse) [13].

II.3.1 Modélisation de la cascade de deux MADAs dans le repère (d,q)

A. Modélisation de la première machine

Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \frac{d\theta_{s1}}{dt} \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} - \frac{d\theta_{s1}}{dt} \varphi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1} \cdot i_{dr1} + \frac{d\varphi_{dr1}}{dt} - \frac{d\theta_{r1}}{dt} \varphi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1} \cdot i_{qr1} + \frac{d\varphi_{qr1}}{dt} - \frac{d\theta_{r1}}{dt} \varphi_{dr1} \end{cases} \quad 0$$

(II.10)

Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{m1} \cdot i_{dr1} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{m1} \cdot i_{qr1} \\ \varphi_{dr1} = L_{r1} \cdot i_{dr1} + L_{m1} \cdot i_{ds1} \\ \varphi_{qr1} = L_{r1} \cdot i_{qr1} + L_{m1} \cdot i_{qs1} \end{cases} \quad 0$$

(II.11)

B. Modélisation de la deuxième machine

Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \frac{d\theta_{s2}}{dt} \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + \frac{d\theta_{s2}}{dt} \varphi_{ds2} \\ v_{dr2} = R_{r2} \cdot i_{dr2} + \frac{d\varphi_{dr2}}{dt} - \frac{d\theta_{r2}}{dt} \varphi_{qr2} \\ v_{qr2} = R_{r2} \cdot i_{qr2} + \frac{d\varphi_{qr2}}{dt} + \frac{d\theta_{r2}}{dt} \varphi_{dr2} \end{cases} \quad 0$$

(II.12)

Equations magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = L_{s2} \cdot i_{ds2} + L_{m2} \cdot i_{dr2} \\ \varphi_{qs2} = L_{s2} \cdot i_{qs2} + L_{m2} \cdot i_{qr2} \\ \varphi_{dr2} = L_{r2} \cdot i_{dr2} + L_{m2} \cdot i_{ds2} \\ \varphi_{qr2} = L_{r2} \cdot i_{qr2} + L_{m2} \cdot i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Étant donné que les deux rotors des deux machines sont connectés électriquement et mécaniquement, le couplage électrique sera représenté de la manière suivante.

$$\begin{cases} V_{dr1} = C \cdot V_{dr2}; V_{qr1} = C \cdot V_{qr2} \\ i_{dr1} = -C \cdot i_{dr2} = i_{dr}; i_{qr1} = -C \cdot i_{qr2} = i_{qr}; i_{dr2} = -C \cdot i_{dr}; i_{dr1} = i_{qr}; i_{qr2} = -C \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

On pose :

$$\begin{cases} L_r = L_{r1} + L_{r2}; R_r = R_{r1} + R_{r2} \\ \frac{d\theta_{s1}}{dt} = \omega_a \\ \frac{d\theta_{r1}}{dt} = \frac{d\theta_{r2}}{dt} = \omega_a - p_1 \cdot \Omega \\ \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \omega_a - (p_1 \cdot \Omega + C \cdot p_2 \cdot \Omega) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

En remplaçant les équations magnétique (0-11) (0-3) dans les équations électriques (0-10)

(0-12) on aura le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{ds1} \cdot i_{ds1} + L_{s1} \frac{di_{ds1}}{dt} + L_{m1} \frac{di_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot L_{s1} \cdot i_{qs1} - \frac{d\theta_{s1}}{dt} L_{m1} \cdot i_{qr} \\ v_{qs1} = R_{qs1} \cdot i_{qs1} + L_{s1} \frac{di_{qs1}}{dt} + L_{m1} \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot L_{s1} \cdot i_{ds1} + \frac{d\theta_{s1}}{dt} L_{m1} \cdot i_{dr} \\ 0 = R_r i_{dr} + L_{m1} \frac{di_{ds1}}{dt} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} - C L_{m2} \frac{di_{ds2}}{dt} - \frac{d\theta_{r1}}{dt} L_{m1} \cdot i_{qs1} + \frac{d\theta_{r2}}{dt} C \cdot L_{m2} \cdot i_{qs2} - \left(\frac{d\theta_{r1}}{dt} L_{r1} + \frac{d\theta_{r2}}{dt} L_{r2} \right) i_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + L_{m1} \frac{di_{qs1}}{dt} - C L_{m2} \frac{di_{qs2}}{dt} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + L_{m1} \cdot \frac{d\theta_{r1}}{dt} i_{ds1} + \left(\frac{d\theta_{r1}}{dt} L_{r1} + \frac{d\theta_{r2}}{dt} L_{r2} \right) i_{dr} - \frac{d\theta_{r2}}{dt} C \cdot L_{m2} \cdot i_{ds2} \\ v_{ds2} = R_{ds2} \cdot i_{ds2} + L_{s2} \frac{di_{ds2}}{dt} - C L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_{s2}}{dt} L_{s2} \cdot i_{qs2} + \frac{d\theta_{s2}}{dt} C \cdot L_{m2} \cdot i_{qr} \\ v_{qs2} = R_{qs2} \cdot i_{qs2} + L_{s2} \frac{di_{qs2}}{dt} - C L_{m2} \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_{s2}}{dt} L_{s2} \cdot i_{ds2} - \frac{d\theta_{s2}}{dt} C \cdot L_{m2} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

La forme matricielle des équations électrique s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{qs1} \\ 0 \\ 0 \\ V_{ds2} \\ V_{qs2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 \\ L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -C.L_{m2} & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -C.L_{m2} \\ 0 & 0 & -C.L_{m2} & 0 & L_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C.L_{m2} & 0 & L_{s2} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R_{s1} & -\frac{d\theta_{s1}}{dt}.L_{s1} & 0 & -\frac{d\theta_{s1}}{dt}.L_{m1} & 0 & 0 \\ \frac{d\theta_{s1}}{dt}.L_{s1} & R_{s1} & \frac{d\theta_{s1}}{dt}.L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{d\theta_{r1}}{dt}.L_{m1} & R_r & -(\frac{d\theta_{r1}}{dt}.L_{r1} + \frac{d\theta_{r2}}{dt}.L_{r2}) & 0 & \frac{d\theta_{r2}}{dt}.C.L_{m2} \\ \frac{d\theta_{r1}}{dt}.L_{m1} & 0 & (\frac{d\theta_{r1}}{dt}.L_{r1} + \frac{d\theta_{r2}}{dt}.L_{r2}) & R_r & -\frac{d\theta_{r2}}{dt}.C.L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{d\theta_{s2}}{dt}.C.L_{m2} & R_{s2} & \frac{d\theta_{s2}}{dt}.L_{s2} \\ 0 & 0 & -\frac{d\theta_{s2}}{dt}.C.L_{m2} & 0 & \frac{d\theta_{s2}}{dt}.L_{s2} & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

Il est nécessaire d'inverser la matrice des inductances afin de créer le schéma Matlab/Simulink

de ce modèle. Les termes utilisés $\frac{d\theta_{s1}}{dt}$, $\frac{d\theta_{s2}}{dt}$, $\frac{d\theta_{r1}}{dt}$, $\frac{d\theta_{r2}}{dt}$ dépendent du référentiel sélectionné.

Il existe trois types de référentiels intéressants : le référentiel associé au stator, au rotor ou au champ tournant.

C. Equation du mouvement de la cascade

$$C_{em} - C_r - (f_1 + f_2\Omega) = (j_1 + j_2) \frac{d}{dt} \Omega \quad (II.18)$$

D. Equation du couple électromagnétique de la machine asynchrone en cascade

Le couple électromagnétique de la cascade et la somme des couples des deux machines

$$C_{em} = C_{em1} + C_{em2} \quad (II.19)$$

$$C_{em1} = p_1 (i_{qs1} \Phi_{ds1} - i_{ds1} \Phi_{qs1}) \quad (II.20)$$

$$C_{em2} = p_2 (i_{qs2} \Phi_{ds2} - i_{ds2} \Phi_{qs2}) \quad (II.20)$$

On obtient au final :

$$C_{em} = (p_1.L_{m1}.i_{qs1} - p_2.L_{m2}.C.i_{qs2}).i_{dr} - (p_1.L_{m1}.i_{ds1} - p_2.L_{m2}.C.i_{ds2}).i_{qr} \quad (II.21)$$

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué la modélisation de la machine MADA et de la cascade de MADAs en supposant certaines hypothèses simplificatrices. Les modèles ainsi construits sont régis par les équations électriques, magnétiques et mécaniques des machines en question.

Dans le prochain chapitre, nous allons utiliser le modèle de la structure en cascade pour élaborer un programme de simulation sous environnement Matlab/Simulink dans deux cas de fonctionnement, à vide et en charge et en supposant que celle-ci est alimentée par des sources de tensions purement sinusoïdales.

Chapitre III : Simulation du modèle de la cascade de MADAs

III.1 Introduction

Après avoir présenté dans le chapitre précédent la modélisation de la MADA et de la cascade de MADAs dans le domaine de Park, nous allons dans cette partie construire un programme de simulation sous environnement Matlab/Simulink du modèle de la cascade qui est supposé être alimenté par des sources de tension purement sinusoïdales.

Le programme de simulation élaboré nous permettra d'étudier le fonctionnement de la cascade à vide et en charge, et ce à travers l'analyse des résultats obtenus qui seront présentés et discutés.

III.2 Description de la structure étudiée de la cascade

La structure de la cascade de MADAs étudiée dans cette partie est composée de deux machines asynchrones à double alimentation de puissance 1,5 MW pour chaque machine. Ces deux MADAs sont connectées électriquement et mécaniquement via leurs rotors avec un couplage direct des phases rotoriques en premier lieu et un couplage inverse en second lieu comme indiqué respectivement par les figures figure III.1 et III.2:

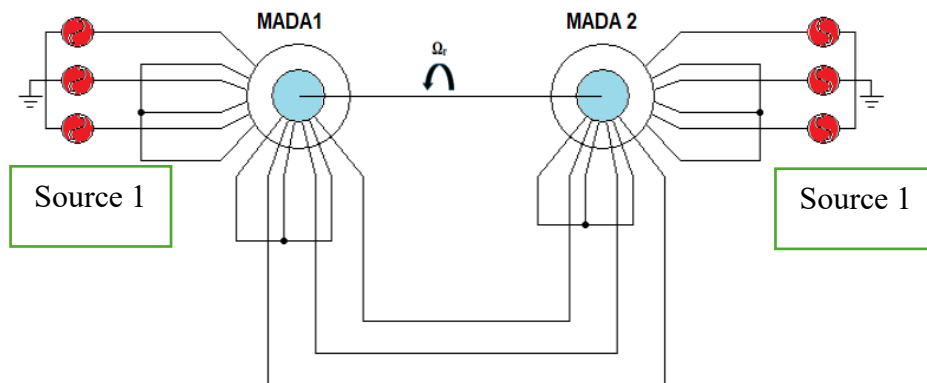


Figure III.1 Machines asynchrones en cascade (couplage direct)

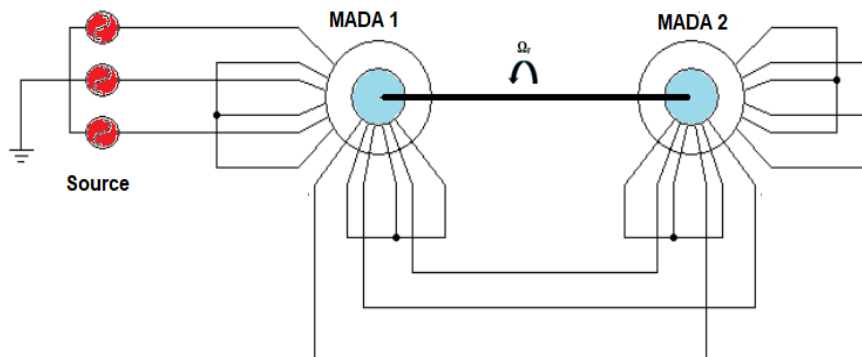


Figure III.2 Machines asynchrones en cascade (couplage inverse)

III.3 Equations des tensions d'alimentation de la cascade de MADAs

Les équations des tensions alimentant le bobinage statorique de la machine 1 :

$$v_{as1} = V_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad (III-1)$$

$$v_{bs1} = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (III-2)$$

$$v_{cs1} = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (III-3)$$

Les équations des tensions alimentant le bobinage statorique de la machine 2 :

$$v_{as2} = V_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad (III-4)$$

$$v_{bs2} = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (III-5)$$

$$v_{cs2} = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (III-6)$$

III.4 Construction du modèle de la cascade de MADAs sous Matlab/Simulink

A partir des équations électriques et mécaniques caractérisant la modélisation de la cascade de deux machines asynchrones à double alimentation, nous construisons un modèle de simulation sous environnement Matlab/Simulink dont le schéma bloc est donné par la figure III.3.

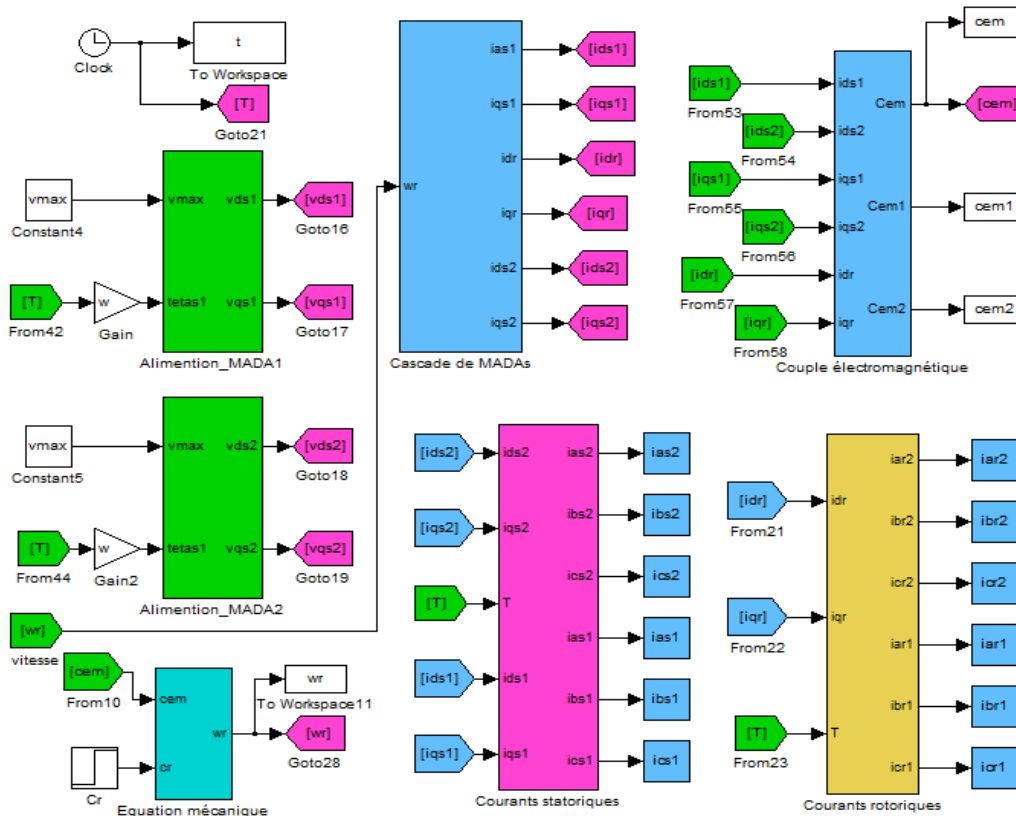


Figure III.3 Schéma de simulation de la cascade de MADAs

III.5 Résultats de simulation et interprétation

Les paramètres des deux MADAs montées en cascade sont donnés dans “Annexe ” elles sont identiques et alimentées par des sources purement sinusoïdales et équilibrées (tension de valeur efficace de 220V, $f=50\text{Hz}$), les résultats de simulation de son fonctionnement à vide et en charge et pour les deux cas de configurations (couplage inverse et direct) sont présentés comme suit :

III.5.1 Couplage direct des deux MADAs

Dans ce cas, on va alimenter les deux machines avec des systèmes de tension triphasés identiques et purement sinusoïdales et dont les leurs bobinages rotoriques sont connectés avec un branchement direct (couplage direct). On applique à la cascade des charges suivantes : $C_r = 2500\text{N.m}$ dans l’intervalle [6s, 9s] et $C_r = -2500\text{N.m}$ dans l’intervalle [12s-15s]. Les résultats de simulation obtenus sont présentés par les figures ci-après :

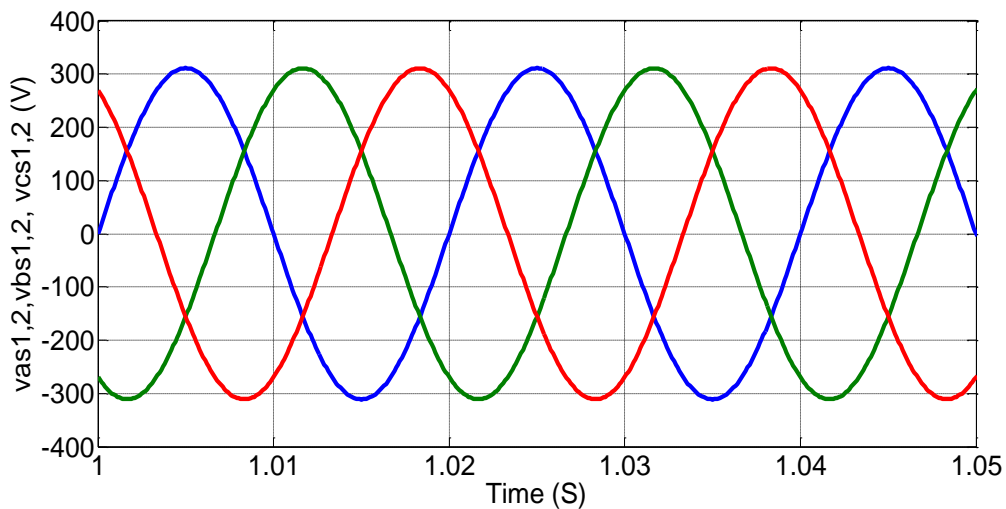


Figure III.4 Allure des tensions d'alimentation

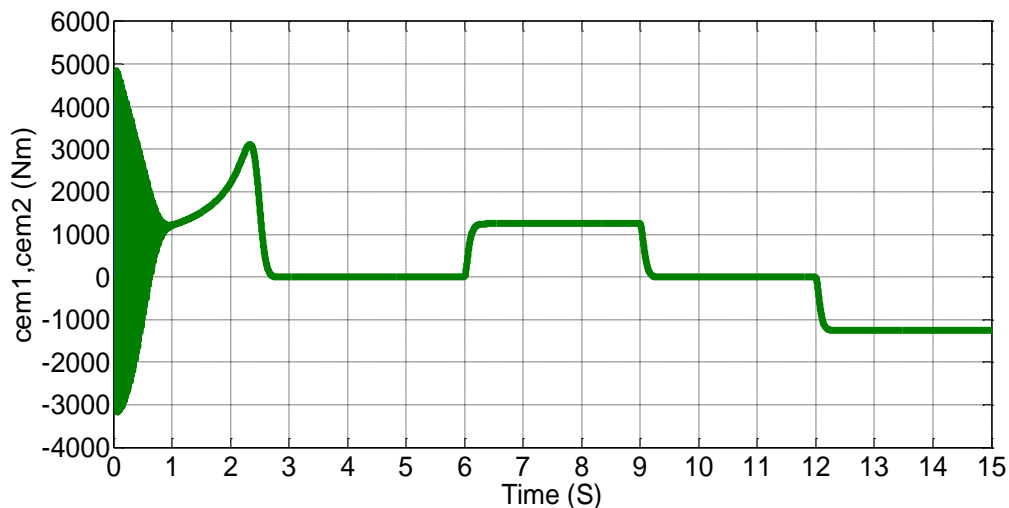


Figure III.5 Allure du couple électromagnétique des deux machines

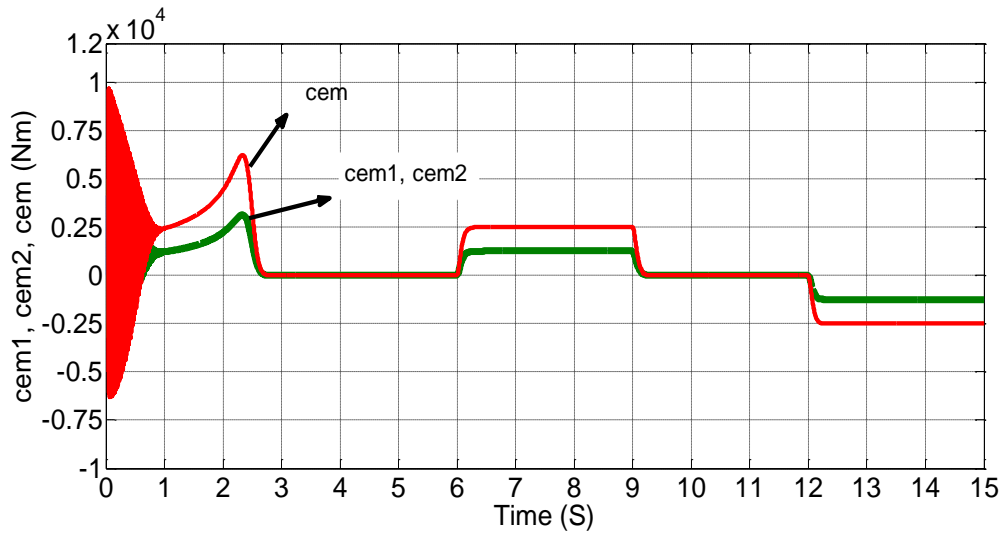


Figure III.6 Allure des couples électromagnétiques des deux machines (cem1 et cem2) et celui de la cascade (cem)

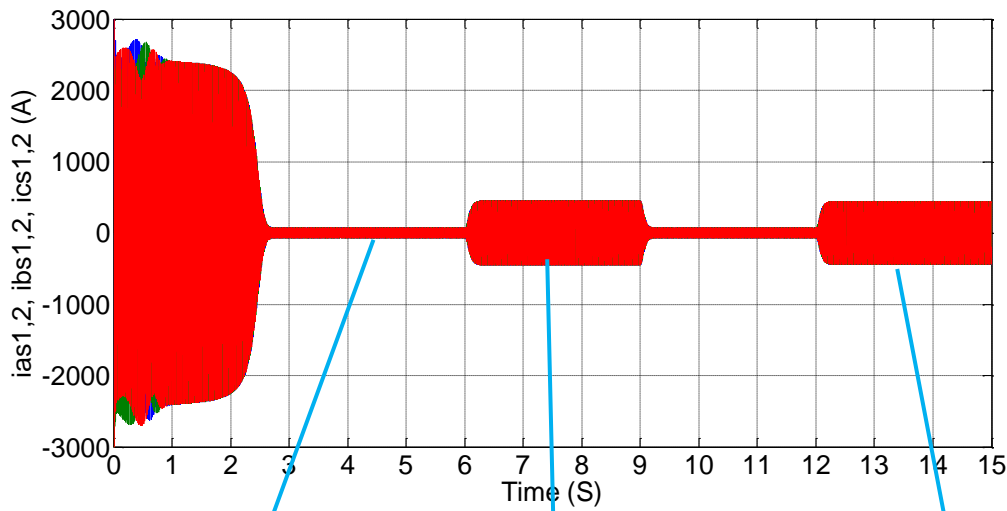


Figure III.7 Allure des courants des phases statoriques

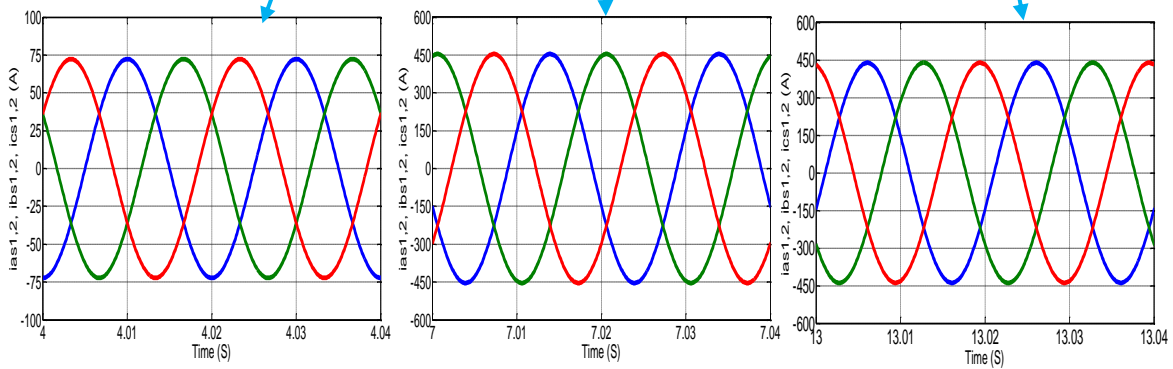


Figure III.8 Zooms des allures des courants des phases statoriques

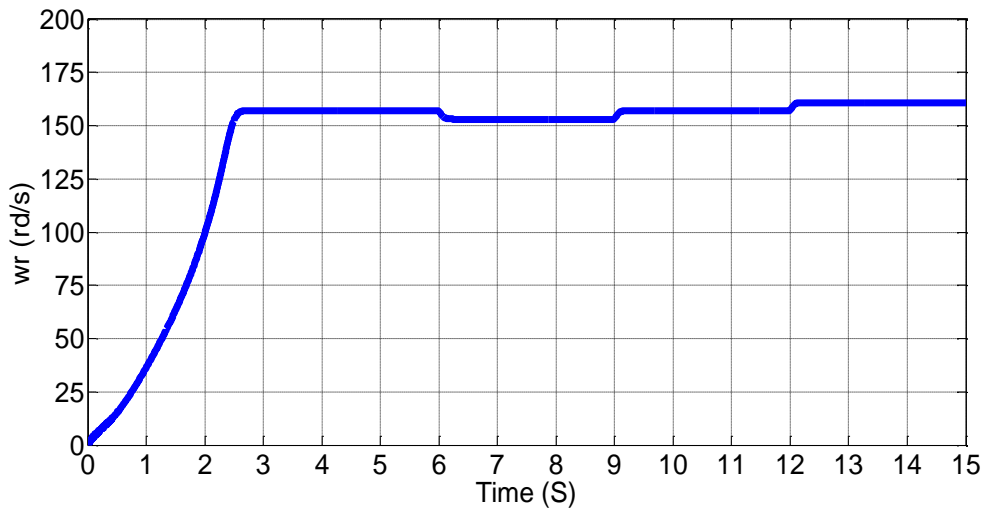


Figure III.9 Allure de la vitesse de rotation (rad/s)

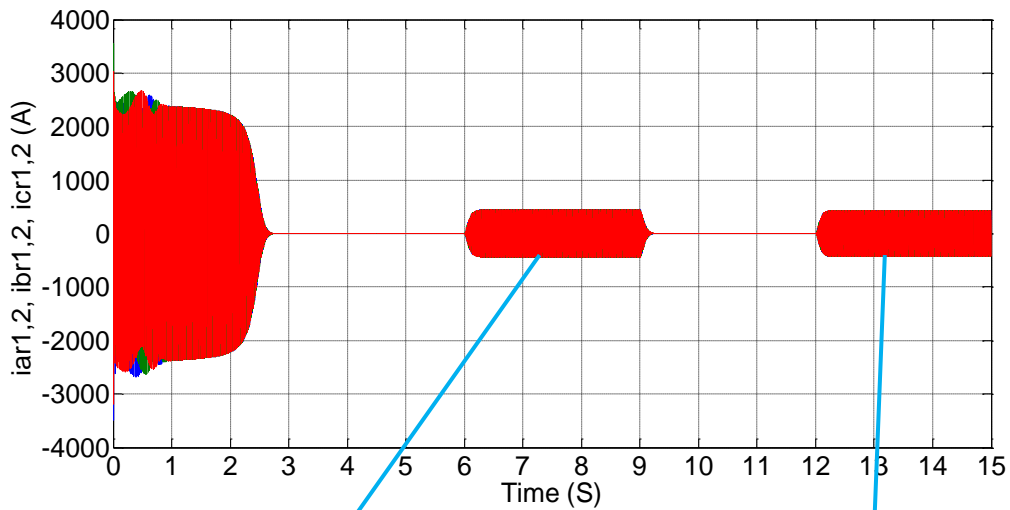


Figure III.10 Allure des courants rotoriques

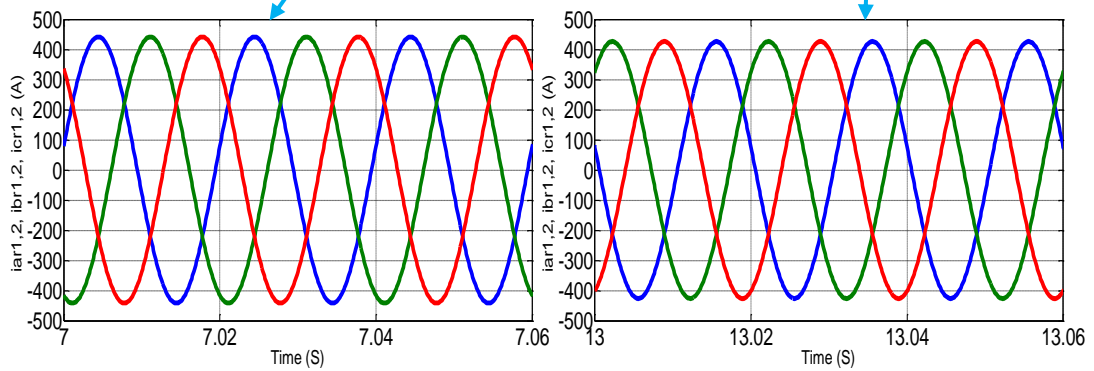


Figure III.11 Zooms des allures des courants des phases rotoriques

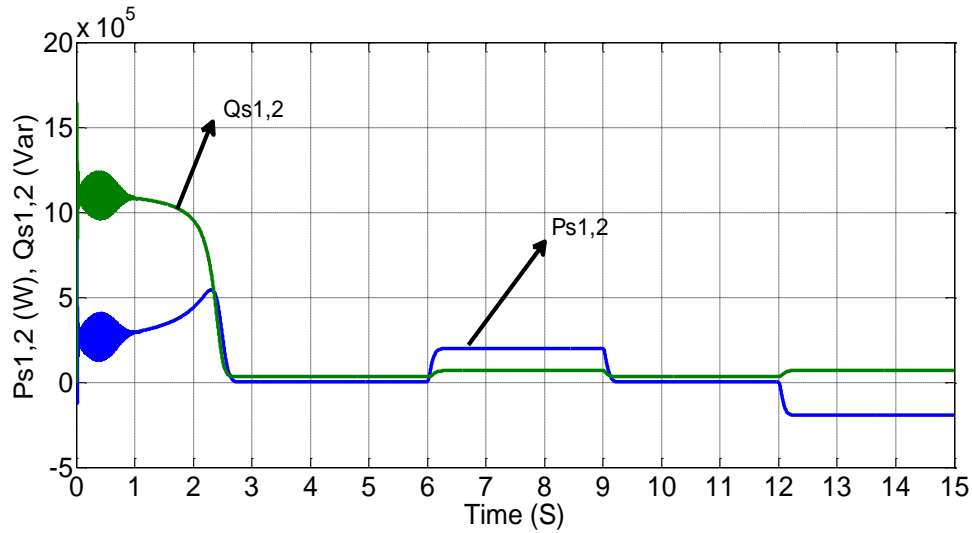


Figure III.12 Allure des puissances actives et réactives des deux machines

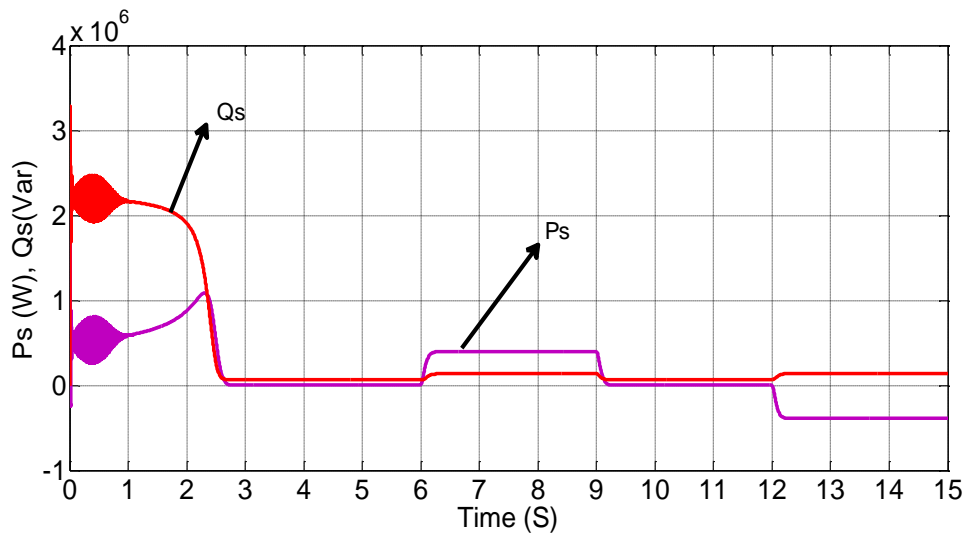


Figure III.13 Allure des puissances active et réactive de la cascade

Les figures précédentes représentent les résultats de simulation de la cascade de deux MADAs en couplage direct.

- La figure (IV.4) représente les tensions d'alimentation des trois phases de chaque stator des deux MADAs. Ces tensions des trois phases sont purement sinusoïdales et sont déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle de $2\pi/3$.
- Au démarrage, le couple électromagnétique présente un pic important et des oscillations comme indiqué sur la Figure (IV. 5), à vide il est presque nul mais il se stabilise à la valeur du couple résistant appliqué qui est de 2500 Nm dans l'intervalle [6s, 9s] et de -2500 Nm dans l'intervalle [12s-15s].

- Le couple électromagnétique total de la cascade est la somme des couples électromagnétiques des deux MADAs, comme indiqué dans la figure (IV. 6).
- La figure (IV. 7) et la figure (IV. 8) caractérisent respectivement les allures des courants statoriques et de leurs zooms. En régime transitoire ce courant atteint un pic de 2700 A ce qui signifie que les machines consomment des courants importants au démarrage. A travers les zooms de ces courants nous pouvons constater que le courant statoriques à vide est égal à 75 A, il atteint une valeur de 450 A durant les périodes de l'application des couples résistants.
- La figure (IV.9), nous renseigne sur la vitesse de rotation. Celle-ci augmente progressivement jusqu'à atteindre la vitesse synchrone qui avoisine 157 rd/s correspondant à 1500 tr/mn, elle correspond alors à la vitesse pour un nombre de pair de pôles $P=2$, dans ce cas, les deux machines tournent à la même vitesse. Durant l'intervalle [6s, 9s], elle descend pour atteindre 153 rd/s ce qui explique le fonctionnement de la machine en mode hypo-synchrone. Son mode de fonctionnement en régime hyper synchrone apparait au niveau de l'intervalle [12s-15s] où la vitesse de rotation dépasse la vitesse de synchronisme pour atteindre une valeur de 161 rd/s.
- Quant au courants rotoriques et leurs zooms ; ils sont représentés par la figure (IV.10) et figure (IV.11), ils atteignent une amplitude de 2600 A, leurs valeurs en régime permanent sont presque nulles (voisinage de zéro). Cette faible amplitude en régime permanent s'explique par le fait que le moteur tourne à vide, c'est-à-dire que le couple résistant se résume à celui des frottements. Durant les périodes d'applications des couples résistants les courants rotoriques atteignent la valeur de 425 A.
- Les puissances active et réactive de la cascade est la somme des puissances actives et réactives des deux MADAs constituant la cascade comme indiqué par les figures ((IV.12) et figure (IV.13)).

III.5.2 Couplage inverse des deux MADAs

Dans ce cas, on va alimenter le stator de l'une des machines avec un système de tensions triphasé équilibré et on court-circuite le stator de l'autre machine. Les bobinages rotoriques de ces machines sont connectés avec un branchement inverse (couplage inverse). Dans ce cas aussi on applique à la cascade les charges suivantes : $C_r = 2500\text{N.m}$ dans l'intervalle [6s, 9s] et $C_r = -2500\text{N.m}$ dans [12s-15s]. Les résultats de simulation obtenus sont présentés par les figures suivantes :

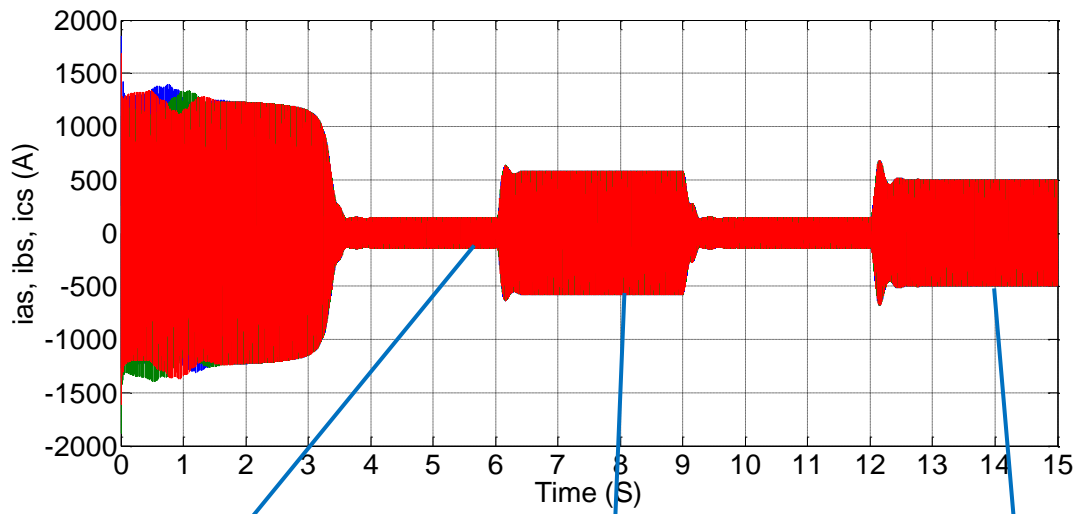


Figure III.14 Allure des courants des phases statoriques

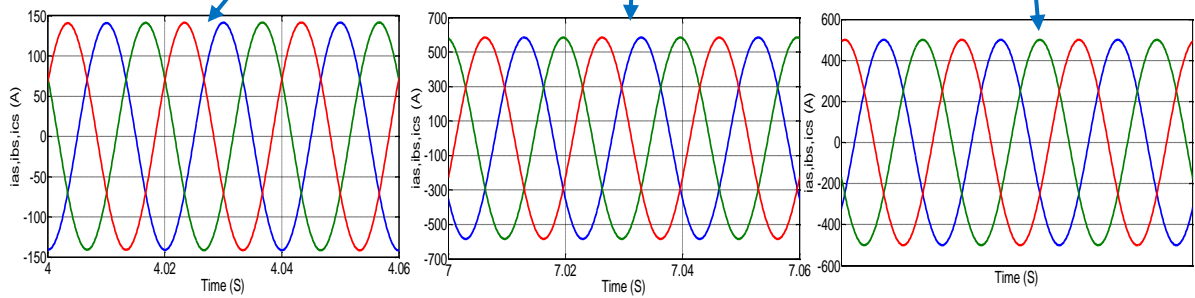


Figure III.15 Zooms des allures des courants des phases statoriques

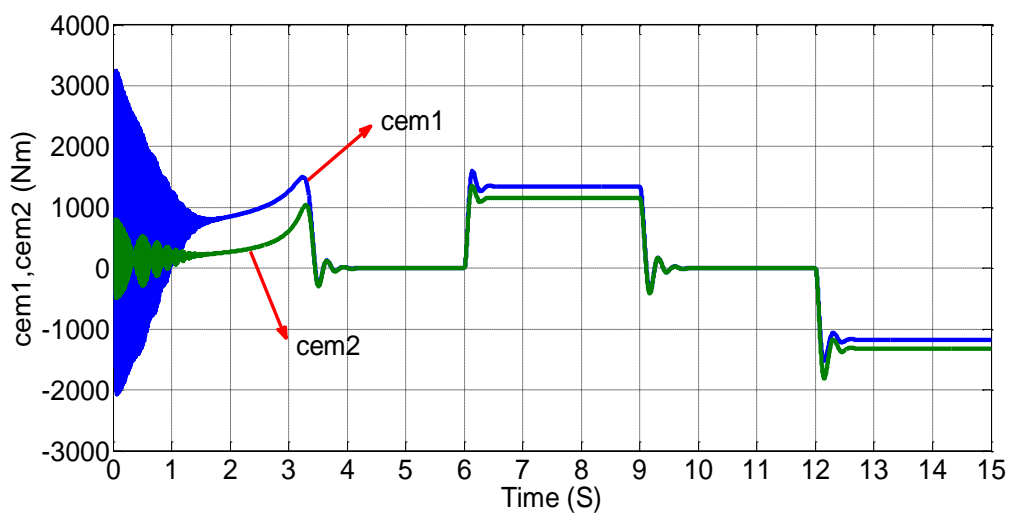


Figure III.16 Allure du couple électromagnétique des deux machines

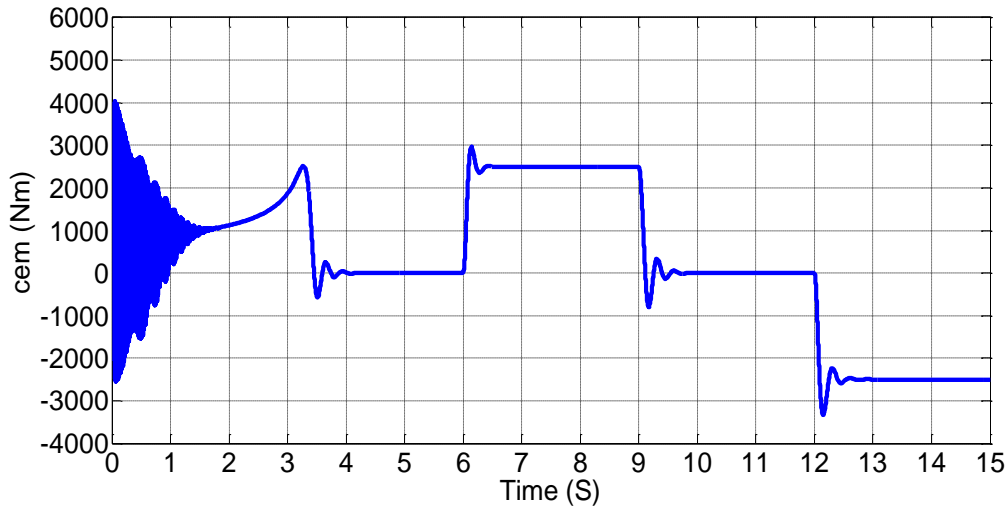


Figure III.17 Allure du couple électromagnétique de la cascade (cem)

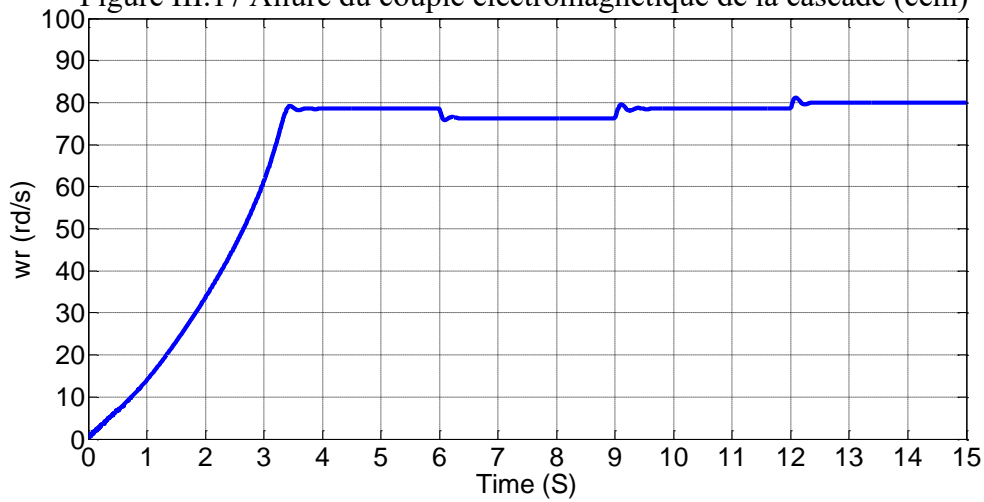


Figure III.18 Allure de la vitesse de rotation (rad/s)

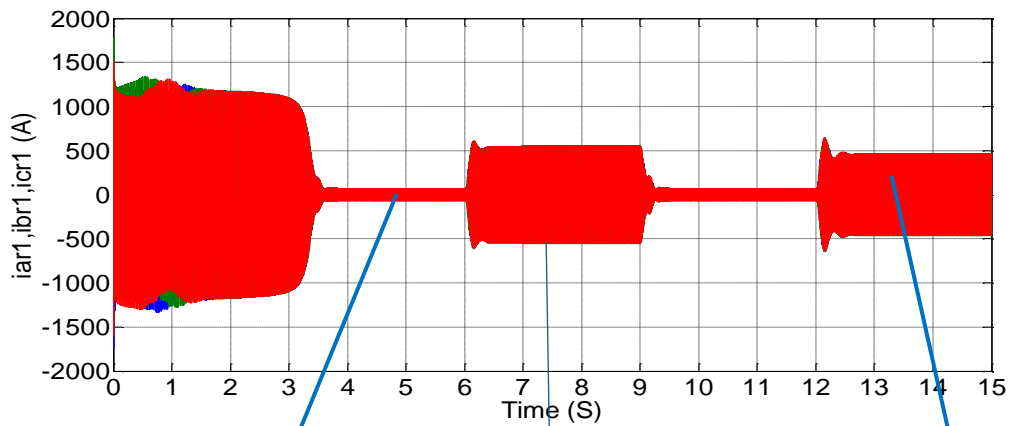


Figure III.19 Allure de des courants rotoriques de la machine 1

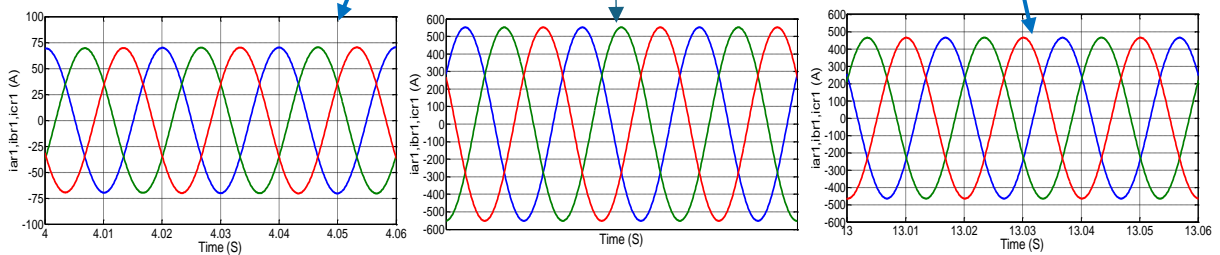


Figure III.20 Zoom des allures de des courants rotoriques de la machine 1

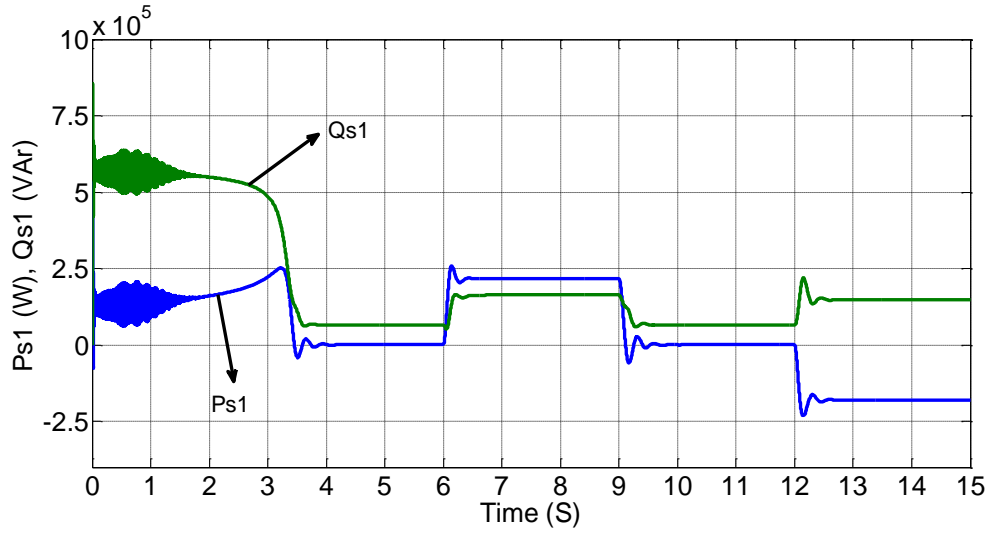


Figure III.21 Puissance active et réactive de la machine 1

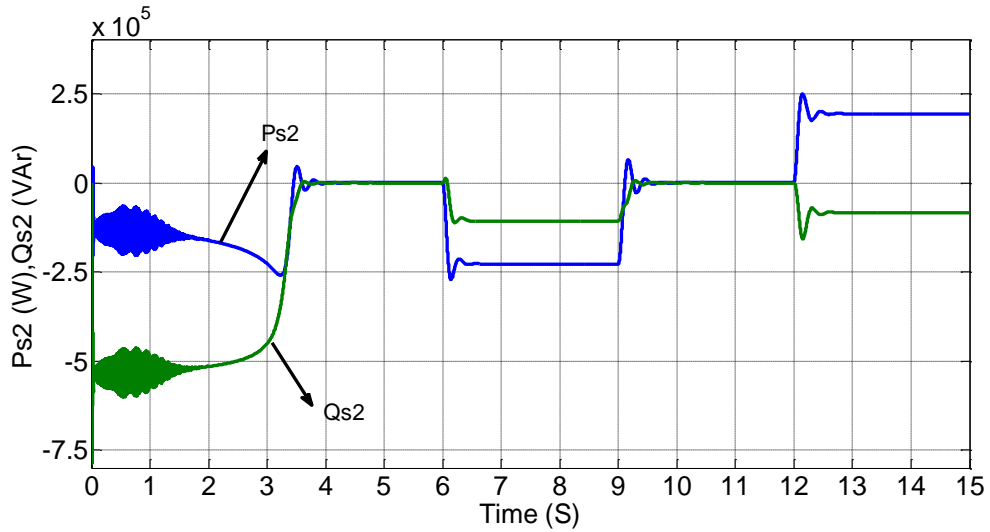


Figure III.22 Puissance active et réactive de la machine 2

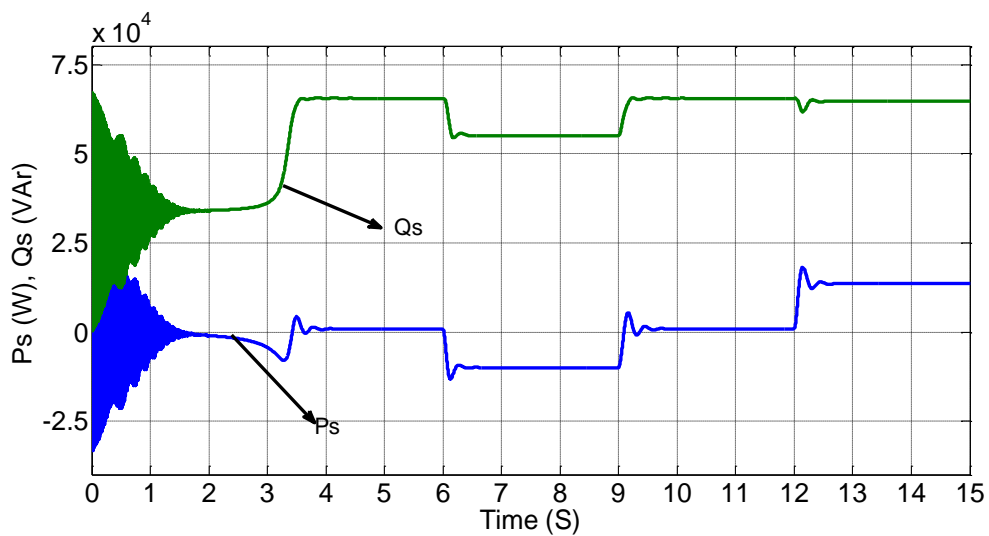


Figure III.23 Puissance active et réactive de la cascade

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de la cascade de deux MADAs en couplage inverse.

- La figure (III. 14) et la figure (III. 15) représentent respectivement les allures des courants statoriques et de leurs zooms. En régime transitoire ce courant atteint un pic de 1300 A ce qui signifie la consommation d'un courant importants au démarrage. A travers les zooms de ces coutants nous pouvons constater que les courants statoriques à vide est égal à 140 A, il atteint une valeur de 590 A durant l'intervalle [6s, 9s] et 500 A durant [12s, 15s].
- D'après la figure (III. 16), on peut constater que chaque machine d'enveloppe un couple 'électromagnétique, sauf que le couple de la deuxième machine est faible par rapport à la première machine la deuxième machine. Le couple de la cascade est la somme des couples des deux machines, il est donné par la figure (III. 17).
- La figure (III.18), nous renseigne sur la vitesse de rotation. Celle-ci augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur qui avoisine 78,5 rd/s correspondant à a une valeur de 750 tr/mn, elle correspond alors à la vitesse pour un nombre de pair de pôles $P = P_1 + P_2 = 2 + 2 = 4$, dans ce cas, les deux machines tournent à la même vitesse, et la cascade se comporte comme étant une machine ayant $P = 4$ paires de pôles. Durant l'intervalle [6s, 9s], elle descend pour atteindre 76 rd/s ce qui explique le fonctionnement de la machine en mode hypo-synchrone. Son mode de fonctionnement en régime hyper synchrone apparait au niveau de l'intervalle [12s-15s] où la vitesse de rotation dépasse la vitesse de synchronisme pour atteindre une valeur de 78,5 rd/s.
- Les courants rotoriques et leurs zooms sont donnés par les figures (III.19) et (III.20), ils atteignent au régime transitoire une amplitude de 1400 A, ils se stabilisent en régime permanent pour atteindre une valeur de 74 A. ils atteignent une valeur de 560 A durant l'intervalle [6s, 9s] et 470 A durant [12s, 15s].
- Comme indiqué sur les figures ((III.21), (III. 22) et (III. 23) les puissances active et réactive de la cascade est la somme des puissances actives et réactives des deux MADAs.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement de la cascade de deux MADAs lorsque celles-ci sont alimentées des sources de tension purement sinusoïdales. Deux cas de configurations de la cascade sont considérés (couplage direct et couplage inverse)

Pour ce faire, nous avons développé un programme de simulation sous environnement Matlab/Simulink de la cascade ainsi que de son alimentation.

Les résultats de simulation sont présentés et interprétés pour chaque type de couplage des bobinages rotoriques des MADAs de la cascade. A travers l'analyse de ces résultats nous avons constatés que les amplitudes des courants statoriques et rotoriques sont plus grandes dans le cas du couplage direct. Même remarques sont soulevées au niveau des couples électromagnétiques et des puissances active et réactive de la cascade.

Quant à la vitesse de rotation, en couplage direct la cascade de MADAs possède une vitesse correspondant à la un nombre de pair de pôle d'une seul machine ($P=2$) par contre dans le cas du couplage inverse sa vitesse correspond à la vitesse d'une machine de possédant 4 paires de pôle ($P=4$).

Dans le chapitre suivant, on va procéder à étudier le comportement de cette cascade de MADAs lorsqu'elle est alimentée par des onduleurs des tensions.

Chapitre IV : Simulation de l'association onduleurs de tension- cascade de MADAs

IV.1 Introduction

Après avoir étudié la simulation du modèle élaboré de la cascade de MADAs alimentée par des sources de tension purement sinusoïdales, nous allons dans cette partie examiner le même modèle de la cascade qui sera dans ce cas alimentée par des onduleurs de tension triphasés à commande à MLI.

Les résultats de simulation faisant apparaître l'influence de l'alimentation de la cascade par onduleurs seront présentés et discutés.

IV.2 Alimentation de la cascade de MADAs par des onduleurs de tensions

Après avoir présenté les résultats de simulation du modèle de la cascade de MADAs alimentée par des tensions triphasées équilibrés purement sinusoïdales, nous allons dans cette partie alimenter les deux machines par deux onduleurs de tension. Ces onduleurs sont de commande par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

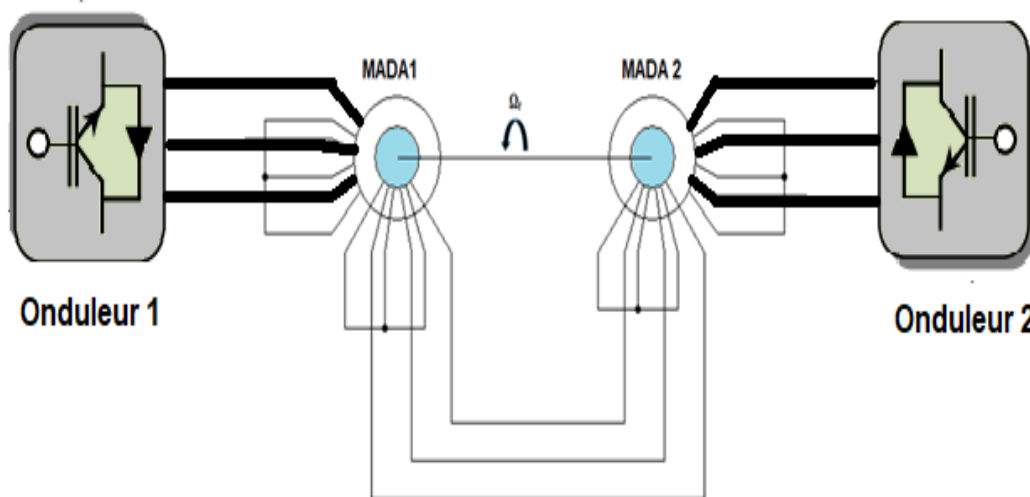


Figure IV.1 Association cascade de MADAs-onduleurs de tension à commande M.L.I

IV. 3 Modélisation de l'onduleur

Pour nous permettre d'élaborer le modèle de l'onduleur, nous avons considéré que les interrupteurs sont parfaits.

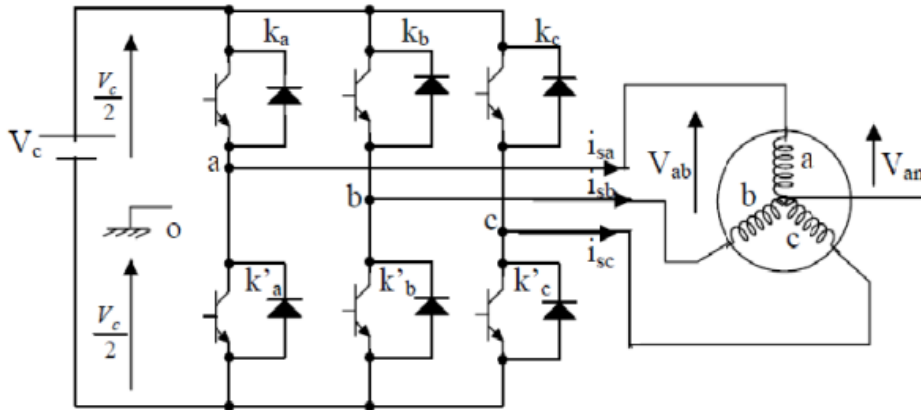


Figure IV. 2 Schéma de l'alimentation d'une machine asynchrone par un onduleur

Chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états d'édéfinis par la fonction de connexion logique suivante :

1 : l'interrupteur est ouvert.

0 : l'interrupteur est fermé.

Dans cette stratégie de commande les interrupteurs d'un même bras sont commandés de façon complémentaire.

Avec : $S_i + S'_i = 1$ et $i = 1...3$.

Les trois tensions composées v_{ab} , v_{bc} et v_{ca} , en prenant en considération le point fictif

”O” peuvent s'écrire :

$$v_{ab} = v_{ao} + v_{ob} = v_{ao} - v_{bo} \quad (IV-1)$$

$$v_{bc} = v_{bo} + v_{oc} = v_{bo} - v_{co} \quad (IV-2)$$

$$v_{ca} = v_{co} + v_{oa} = v_{co} - v_{ao} \quad (IV-3)$$

v_{ao} , v_{bo} et v_{co} Sont des tensions d'entrée de l'convertisseur c.à.d. des tensions continues.

Soit "n" l'indice du point neutre du coté alternatif (coté machine). On peut avoir aussi :

$$v_{ao} = v_{an} + v_{no} \quad (IV-4)$$

$$v_{bo} = v_{bn} + v_{no} \quad (IV-5)$$

$$v_{co} = v_{cn} + v_{no} \quad (IV-6)$$

Avec v_{no} la tension fictive entre le neutre de la machine et le point fictif d'indice "o".

Les tensions simples v_{an} , v_{bn} et v_{cn} (tension de sortie) forment un système triphasé équilibré., tel que : $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$ (IV-7)

La substitution de ((IV-4), (IV-5), (IV-6)) dans (IV-7) donne :

$$v_{no} = \frac{1}{3} \cdot (v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (IV-8)$$

En remplaçant respectivement l'équation (IV-7) dans les équations ((IV-4), (IV-5), (IV-6)), on obtient :

$$v_{an} = \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} - \frac{2}{3}v_{co} \quad (IV-9)$$

$$v_{bn} = \frac{1}{3}v_{ao} + \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \quad (IV-10)$$

$$v_{cn} = -\frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} + \frac{2}{3}v_{co} \quad (IV-11)$$

L'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu alternatif (DC → AC)

$$[v_{AC}] = [T] \cdot [v_{DC}] \quad (IV-12)$$

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{v_c}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \quad (IV-13)$$

$$[T] = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (IV-14)$$

Beaucoup de document ont traité la modélisation de l'onduleur, on trouve parmi ces derniers [14], [15], [16].

IV. 4 Technique de la commande MLI sinus-triangle

La modulation de largeur d'impulsion (en anglo-saxon Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. En utilisant un circuit analogique, on peut réaliser cette technique en comparant un signal triangulaire connu sous le nom de porteuse, à un signal sinusoïdal d'amplitude et de fréquence variable, connu sous le nom de référence (figure IV.3).

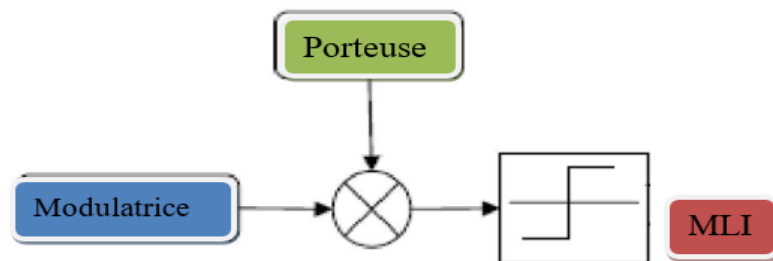


Figure IV.3 schéma du principe de la commande à M.L.I

L'essor de la MLI est lié aux progrès sur les semi-conducteurs de puissance ; l'augmentation du nombre des commutations entrainerait des pertes excessives si on n'avait pas réussi à réduire les pertes à chacune des commutations [11]. La MLI permet de :

- Repousser les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences élevées ;
- Faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie. Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tensions dont les valeurs moyenne forment elle aussi un système triphasé équilibré. On parle dans ce cas-ci d'une modulation sinus triangle. Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$v_{as1-ref} = V_m \cdot \sin(2\pi f) \quad (IV-15)$$

$$v_{bs1-ref} = V_m \cdot \sin\left(2\pi f - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (IV-16)$$

$$v_{cs1-ref} = V_m \cdot \sin\left(2\pi f + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (IV-17)$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left[4 \left(\frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{Si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left[-4 \left(\frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{Si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{IV-18})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

L'indice de modulation m égale au rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence du modulante f_o

$$m = \frac{f_p}{f_o} \quad (\text{IV-19})$$

L'indice de réglage r égal au rapport de l'amplitude de référence V_o sur l'amplitude de la

porteuse. $r = \frac{V_o}{V_p}$ (IV-20)

Les stators des deux MADAs de la cascade sont alimentés par deux systèmes triphasés de tension délivrés par deux onduleurs, dont le schéma Simulink est donné par la figure IV.4.

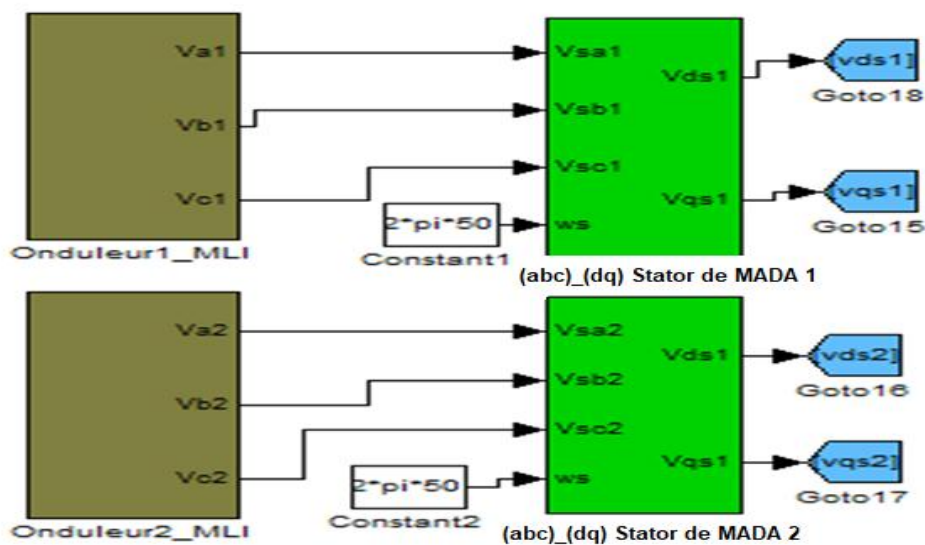


Figure IV.4 Blocs Simulink des onduleurs alimentant les stators des deux machines montées en cascade

IV. 5 Résultats de simulation et interprétation

Les résultats de simulation de la cascade des deux MADAs (couplage direct) alimentée par des onduleurs de tension caractérisant son fonctionnement à vide et en charge sont présentés par les figures ci-après :

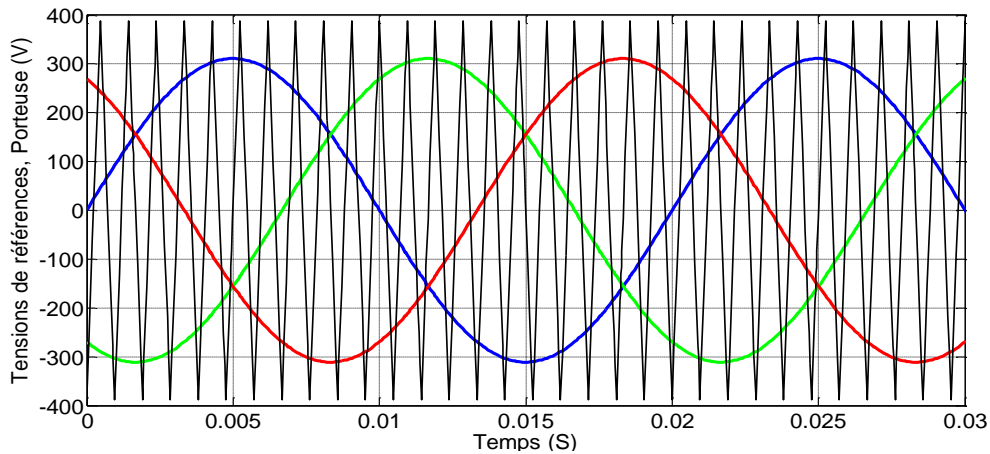


Figure IV.5 Allure des tensions de références et de la porteuse

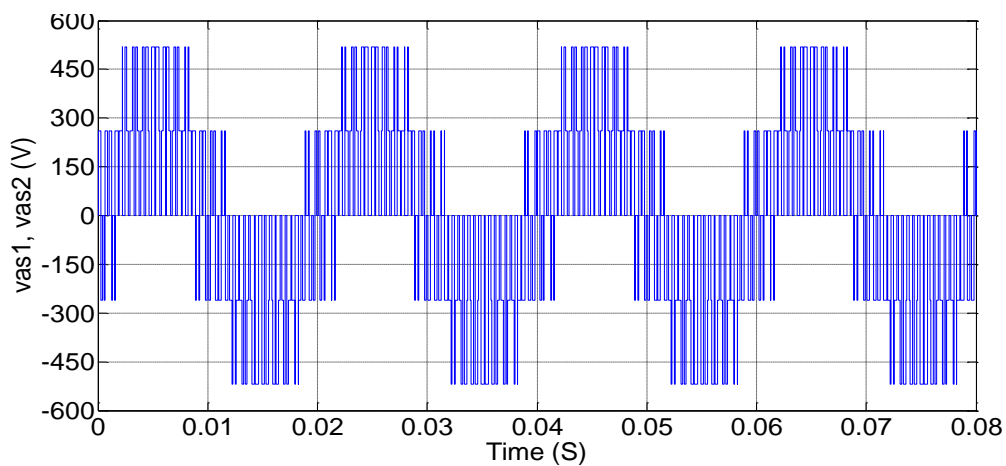


Figure IV.6 Allure de la tension de la phase (a) des stators des deux MADAs

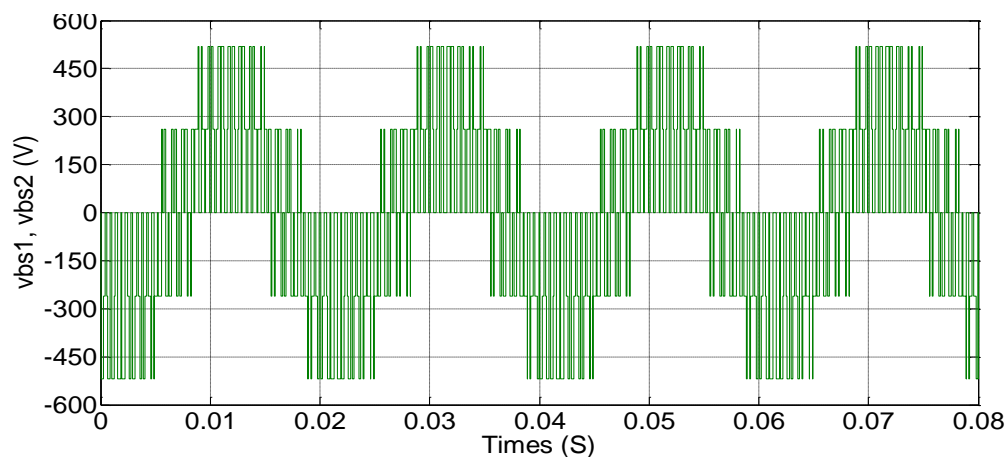


Figure IV.7 Allure de la tension de la phase (b) des stators des deux MADAs

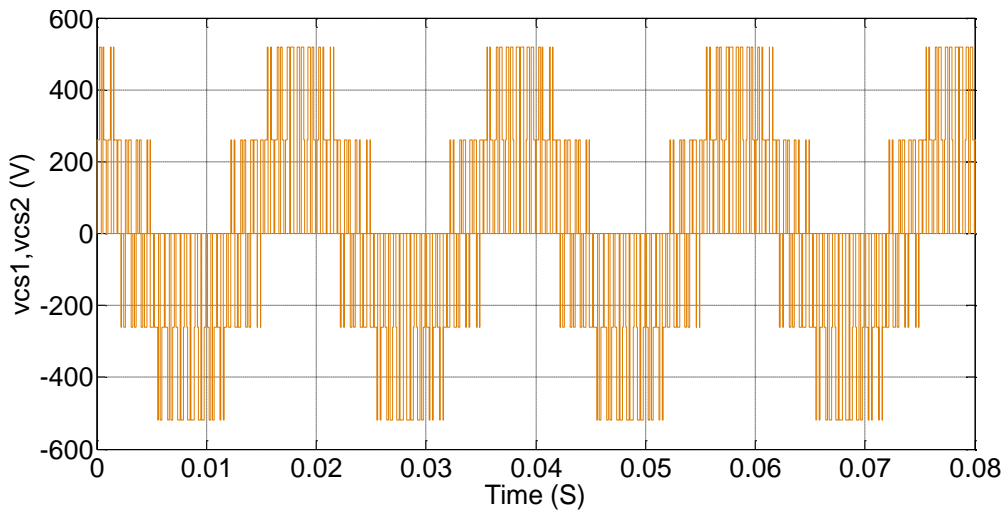


Figure IV.8 Allure de la tension de la phase (c) des stators des deux MADAs

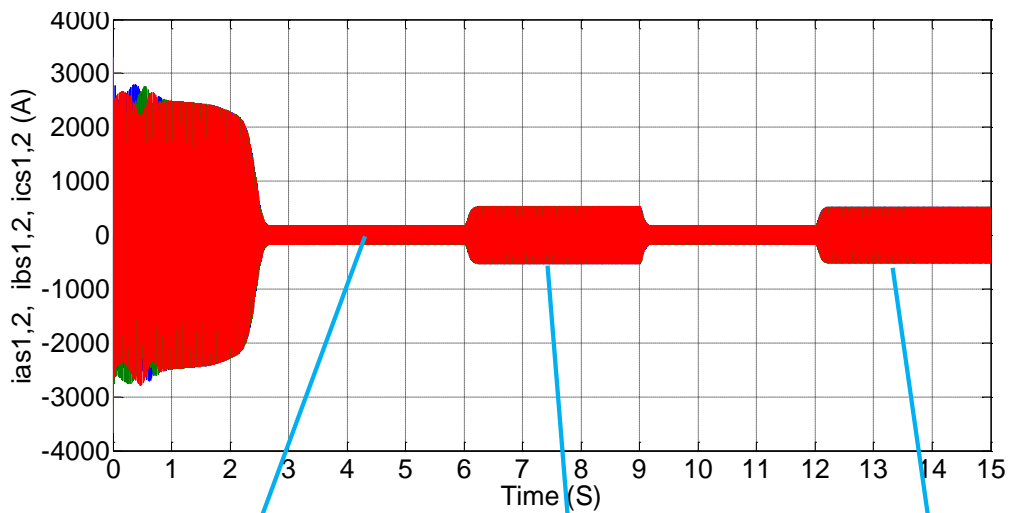


Figure IV.9 Allure des courants des phases statoriques des deux MADAs

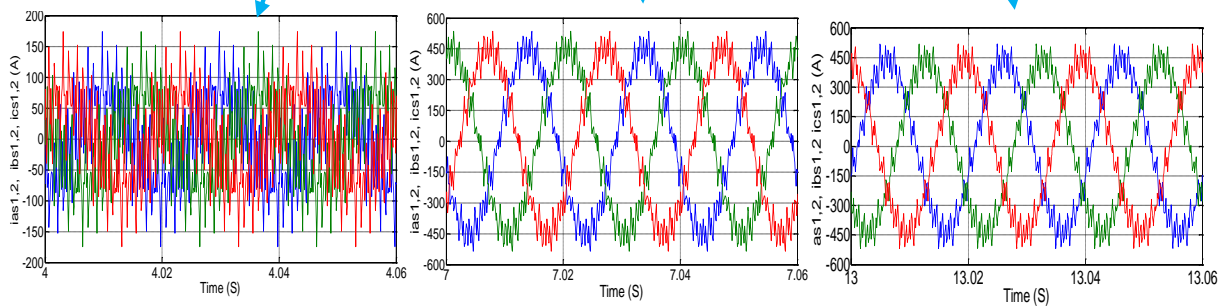


Figure IV.10 Zooms des courants des phases statoriques

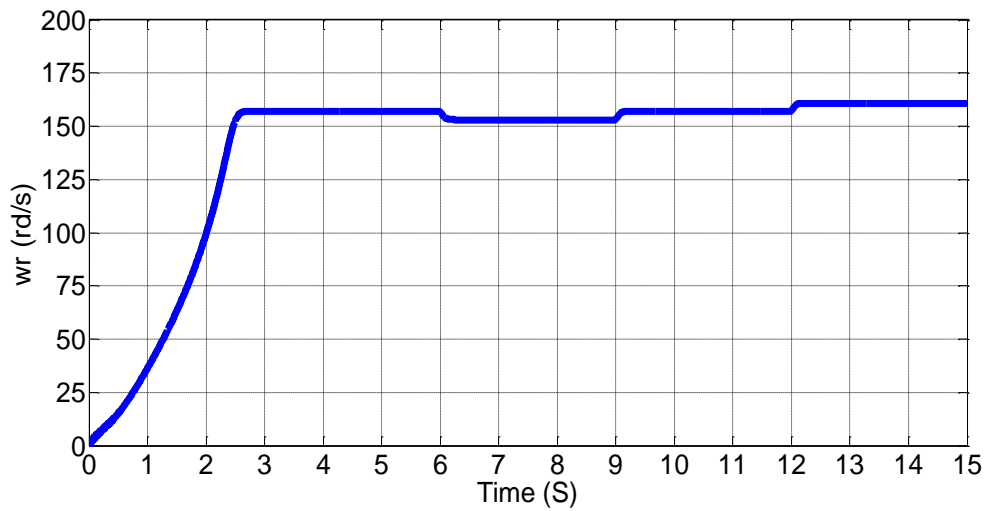


Figure IV.11 Allure de la vitesse de rotation (rad/s)

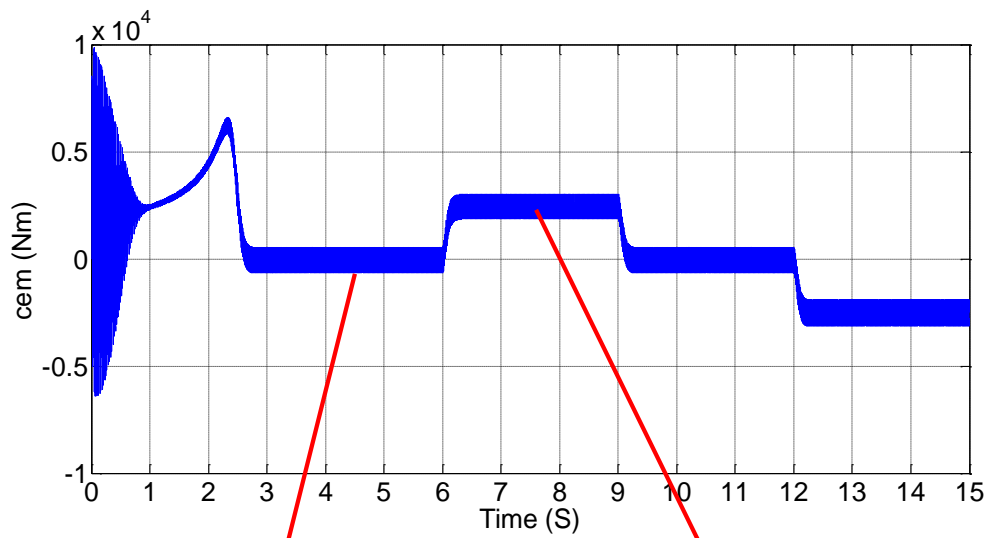


Figure IV.12 Allure du couple électromagnétique de la cascade

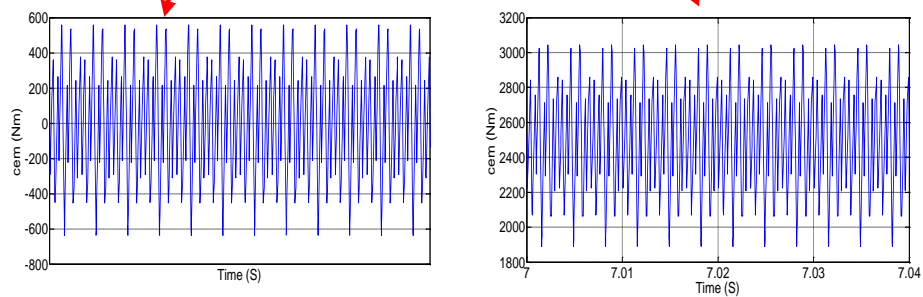


Figure IV.13 Zooms de l'allure du couple électromagnétique de la cascade

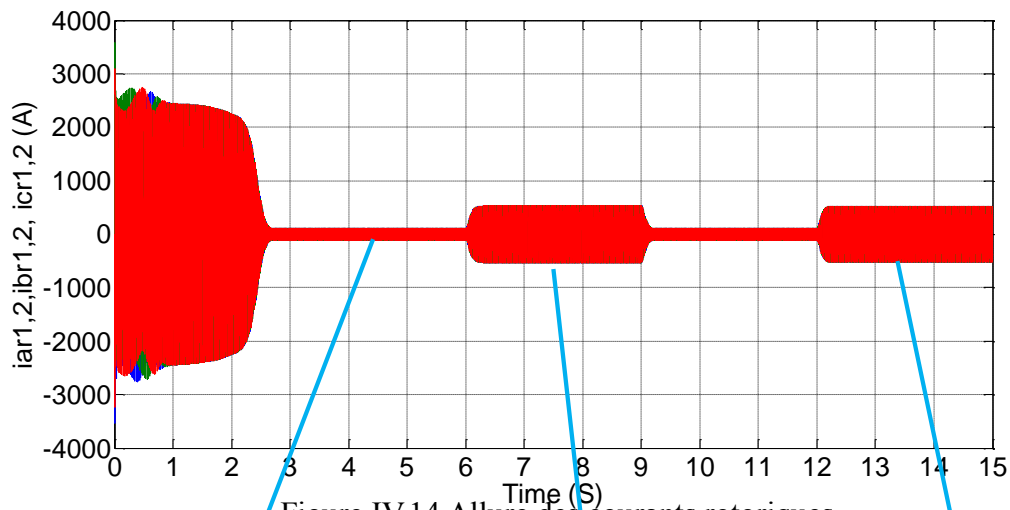


Figure IV.14 Allure des courants rotoriques

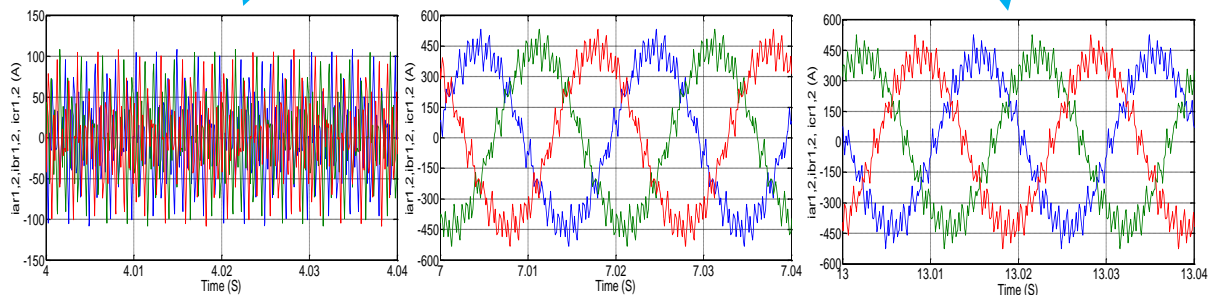


Figure IV.15 Zooms des allures des courants rotoriques

Les figures précédentes représentent les résultats de simulation de la cascade de MADAs alimentée par deux onduleurs de tension à commande à MLI Sinus-Triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$, suivi de l'application de couples de charge de 2500N.m et -2500N.m respectivement dans les intervalles $[6\text{s}, 9\text{s}]$ et $[12\text{s}, 15\text{s}]$.

- Les figures (IV.6), (IV.7) et (IV.8) représentent les tensions des phases à la sortie de l'onduleur à MLI. Ces figures montrent bien les deux niveaux des tensions à la sortie de l'onduleur simple niveau. Le déphasage angulaire entre ces tensions des trois phases de chaque bobinage statorique de chaque MADA est de $2\pi/3$.
- Les courants statoriques des deux MADAs en cascade et sont donc données par la figure (IV.9), nous remarquons qu'ils atteignent les mêmes valeurs que celles de l'alimentation de la machine par des sources de tensions purement sinusoïdales, mais dans ce cas elles présentent des fluctuations ou des ondulations très visibles (voir figure (IV.10)).
- A travers la figure (IV.11), nous constatons que les vitesses de rotation pour les deux cas

de l'alimentation de la machine sont presque similaires, ce qui prouve que la vitesse de rotation n'est pas affectée par le type d'alimentation adopté.

- La figure (IV.12) représente l'évolution du couple électromagnétique de la cascade qui est similaire à celle obtenue dans le cas de l'alimentation de la cascade par des sources purement sinusoïdales mais présentant des ondulations très apparentes (voir figure (IV.13). Celles-ci sont dues principalement aux harmoniques délivrés par les onduleurs qui se répercutent essentiellement sur le couple électromagnétique de la machine.
- L'examen de l'allure des courants rotoriques et de leurs zooms, donnés respectivement par les figures (IV.14) et (IV.15), montre bien les mêmes remarques constatées au niveau des courants statoriques sont présentes au niveau courants rotoriques.

IV. 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement de la cascade de MADAs lorsqu'elle est alimentée par des onduleurs de tension.

Pour ce faire, nous avons développé un programme de simulation sous environnement Matlab/Simulink de la cascade en prenant en considération la modélisation des onduleurs de tension avec la stratégie de commande à MLI qui servent à alimenter les bobinages statoriques des deux MADAs constituant cette cascade.

Les résultats de simulation sont présentés et interprétés pour ce type d'alimentation. A travers l'analyse de ces résultats nous avons constatés que la présence des ondulations ou des fluctuations qui sont très apparentes au niveau de la courbe du couple électromagnétique, des courants statoriques ainsi qu'au niveaux des courants rotoriques. Ceci est causé par la présences des onduleurs qui représentent des sources d'harmoniques.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire consistent à l'étude par modélisation et simulation numérique d'une cascade de deux machines asynchrones à double alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation possède plusieurs avantages qui lui permettent d'être utilisée dans pratiquement tous les secteurs industriels, notamment dans les systèmes de production de l'énergie éolienne. Malgré ces avantages, ce type de machines présentes quelques inconvénients, comme la réduction de sa fiabilité ainsi que l'augmentation des frais de maintenance, qui sont engendrés par la présence du système balais-bagues.

Dans le chapitre I, quelques rappels sur les machines asynchrones et sur la cascade de MADAs sont présentés.

Dans le chapitre II, nous avons effectué la modélisation de la MADA puis la modélisation de la cascade de MADAs. Les modèles établis sont caractérisés par les équations électriques et mécaniques de ces types de machines développés dans le domaine de Park.

Le chapitre III a été dédié à l'exploitation du modèle de la cascade de MADAs établi dans le chapitre II. En se basant sur les différentes équations caractérisant le modèle de la cascade, nous avons élaboré un programme de simulation sous environnement Matlab/Simulink. Puis nous avons procédé à la simulation du modèle en supposant que les que le modèle de la cascade alimenté par des sources de tension triphasées purement sinusoïdales. Les résultats de simulation obtenus pour les deux types de connexion des bobinages rotoriques de la cascade ont été présentés et discutés.

En examinant les résultats de simulation obtenus nous avons constaté que les allures des grandeurs électrique et mécanique de la cascade sont de formes similaires pour les deux types de couplages (direct et inverse) sauf que les amplitudes des courants statoriques et rotoriques sont plus grandes dans le cas du coulage direct. Même remarques sont soulevées au niveau des couples électromagnétiques et des puissances active et réactive de la cascade.

Quant à la vitesse de rotation, en couplage direct la cascade de MADAs possède une vitesse correspondant à un nombre de paires de pôles d'une seule machine ($P=2$) par contre dans le cas du couplage inverse sa vitesse correspond à la vitesse d'une machine de possédant 4 paires de pôles ($P=4$).

Dans chapitre IV, nous avons alimenter la cascade de MADAs avec des onduleurs de tension à commande à M.LI, nous avons procédé à la modélisation de ces onduleurs. Les

résultats de la simulation du programme du modèle de l'association onduleurs de tension-cascade de MADAs nous ont permis d'observer des ondulations ou des fluctuations très visibles au niveau de la courbe du couple électromagnétique, des courants statoriques ainsi qu'au niveau des courants rotoriques. Ceci est dû à la présence des onduleurs qui représentent des sources d'harmoniques.

Pour permettre l'exploitation du modèle de cette machine et dans le cadre de l'amélioration de ce présent travail nous proposons les perspectives suivantes :

1. Réalisation pratique de la structure de la cascade de MADAs pour la confirmation des résultats obtenus théoriquement.
2. Alimentation de la machine par d'autres convertisseurs qui permettront perfectionnement ou du moins l'amélioration des résultats obtenus dans ce travail.
3. Etude de l'intégration du modèle de la cascade de MADAs dans un système de conversion de l'énergie éolienne.

ANNEXE

Les paramètres des deux MADAs de la cascade sont donnés par le tableau suivant [6]:

Paramètre de la MASEC	Valeur
P_{s1}, P_{s2}	1.5 (MW)
R_{s1}, R_{s2}	0.012 (Ω)
R_{r1}, R_{r2}	0.021 (Ω)
L_{s1}, L_{s2}	0.0137 (H)
L_{r1}, L_{r2}	0.0137 (H)
M_1, M_2	0.0135 (H)
J_1, J_2	50 ($Kg.m^2$)
f_1, f_2	0.0071 ($Nm.s / rd$)
p_1, p_2	2

Bibliographie

-
- [1] S.Djediai A.Aboub, Conception, modélisation et COMMANDE d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil faible tension dans un système de pompage photovoltaïque,ouargla,Université Kasdi Merbah,2020-2021.
- [2] M.Mellal K.Ammar,"Dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil" ,Université Mouloud Mammeri, Tizi ousou 2013.
- [3] K.Nadir A.Mesai, "Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle", Université Djillali Liabes,Sidi-Bel-Abbes,2017.
- [4] Hakim Bennani, "Machine Asynchrone A Double Alimentation", Québec, Université Laval,2011.
- [5] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.
- [6] A. Maafa, "Etude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence", Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2011.
- [7] B. Hopfensperger, D.J. Atkinson and R.A. Lakin "Combined magnetising flux oriented control of the cascaded doubly-fed induction machine" IEE Proc, Elec Appl, Vol. 148, No, 4 July 2001, p 354-362.
- [8] Hunt, L.: "A new type of induction motor", J. Inst. Elect. Eng., 1907, 39, (186), pp. 648–667.
- [9] Strous, Tim D., Henk Polinder, and Jan A. Ferreira. "Brushless doubly fed induction machines for wind turbines: developments and research challenges." IET Electric Power Applications 11.6 (2017) : 991-1000.
- [10] Roberts, P.: "A study of brushless doubly-fed induction machine (BDFM)". Ph.D. dissertation, University of Cambridge, 2004.
- [11] Wallace, A., Spee, R., Lauw, H.: "Dynamic modeling of brushless doubly-fed machines". Conf. Rec. IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, 1989, pp. 329–334.
- [12] Y. Zadi, L. Ait Ouakli, "Etude et commande d'une machine asynchrone à double paquets statoriques," Mémoire d'Ingénieur. Université de Bejaia, Algérie, 2010.
- [13] M.Aziz K. Saidani, "Modélisation et étude par simulation numérique d'une cascade de MADAs," Mémoire d'Ingénieur, université de Tizi Ouzou, Algérie, (2019).
- [14] S. Khelfa, "Commande Vectorielle d'une Machine à Induction ; Impacts de : la Saturation de la Machine et la Modulation du Convertisseur," Mémoire de Magister. Université de Batna. Algérie, 2001.

- [15] G. SEGUIER, R. BAUSIERE, "Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance" la Conversion DC-AC," volume 04. pp 147-200 France, 1995.
- [16] G. SEGUIER, "Electronique de Puissance, les fonctions de Base et leurs principales applications," 7 Edition DUNOD, pp 275-349 France, 1999.