

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par :

AYOUN AISSAM SAYAH BEN AISSA SMAIL

Thème :

**Commande Vectorielle Indirect de la machine
asynchrone à cinq phases**

Soutenu publiquement Le : 16/06/2025

Devant les jurys :

M ^r Gadoum Abdelatif	MCA	Président	UKM Ouargla
M ^r Benyoussef Elakhdar	PR	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r Kouras Sid-Ali	MAA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la Santé et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces longues années.

*Nous souhaitons également exprimer nos vifs remerciements à notre promoteurs, **PR. Benyoussef Elakhdar**, pour avoir proposé ce thème, pour son suivi continu Tout au long de la réalisation de ce mémoire, et pour ses conseils et remarques précieux.*

Nous remercions les membres du jury d'examen pour l'honneur qu'ils nous font en participant à l'évaluation de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi que tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de Loin, à accomplir ce travail.

*Nous remercions aussi tous les enseignants et le chef de département d'électrotechnique, **Dr. El_Ouazzen Med Lakhdar**.*

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous nos amis et collègues Pour leur soutien moral et Matériel.

Ayoun Aissam Et Sayah Ben Aissa Smail

Dédicace

Le Dédie Ce Modeste Travail

➤ A Ma Mère Avec Toute Mon Affectation

➤ A Mon Père Avec Toute Ma Reconnaissance

➤ A Mes Frères Et Mes Sœurs

➤ A Mes Oncles Et Mes Tantes

➤ A Mes Cousins Et Cousines

➤ A Tous Mes Amis A Tous Mes Voisins

Ayoun Aissam Et Sayah Ben Aissa Smail

Résumé

Résumé

Ce mémoire porte sur la commande vectorielle d'une machine asynchrone pentaphasée (MASP), qui offre des performances dynamiques accrues par rapport aux machines triphasées. Notamment en termes de tolérance aux défauts et de densité de puissance.

Dans un premier temps, une modélisation mathématique complète de la MASP a été établie dans le repère direct-quadrature (dq) en utilisant la transformation de Park étendue aux systèmes multiphasés.

Ensuite, la stratégie d'alimentation via UN onduleur à cinq phases a été détaillée, en mettant l'accent sur la qualité de l'alimentation et la gestion des courants harmoniques.

Enfin, une commande vectorielle indirecte a été implémentée, intégrant un régulateur PI pour le contrôle du couple et du flux. Les performances du système ont été analysées à l'aide de simulations sous MATLAB/Simulink, mettant en évidence une bonne robustesse et une réponse dynamique satisfaisante dans diverses conditions de fonctionnement.

Ces résultats confirment l'efficacité de la commande proposée pour l'exploitation industrielle de machines multiphasées.

Mots clés: Machine Asynchrone pentaphasée (MASP), Transformation de Park, modèle dq, Commande vectorielle, simulation sous Matlab/Simulink

Abstract

This thesis focuses on the vector control of a five-phase induction machine (FPAM), which offers improved dynamic performance compared to three-phase machines, particularly in terms of fault tolerance and power density.

First, a complete mathematical model of the FPAM was established in the direct-quadrature (dq) frame using the Park transform extended to multi-phase systems.

Next, the power supply strategy via a five-phase inverter was detailed, with an emphasis on power quality and harmonic current management.

Finally, an indirect vector control system was implemented, integrating a PI regulator for torque and flux control. The system's performance was analyzed using MATLAB/Simulink simulations, demonstrating good robustness and satisfactory dynamic response under various operating conditions.

These results confirm the effectiveness of the proposed control system for the industrial operation of multi-phase machines.

Key words: Five-phase asynchronous machine (PSAM), Park transformation, vector control, dq model, simulation under Matlab/Simulink

ملخص

تركز هذه الأطروحة على التحكم المتجهي لآلة حثية خماسية الأطوار (FPAM)، والتي توفر أداءً ديناميكيًا محسنًا مقارنةً بالآلات ثلاثية الأطوار، لا سيما من حيث تحمل الأعطال وكثافة القدرة. أولاً، تم إنشاء نموذج رياضي كامل لآلة حثية خماسية الأطوار في إطار التربيع المباشر (dq) باستخدام تحويل بارك الموسع للأنظمة متعددة الأطوار.

بعد ذلك، تم تفصيل استراتيجية إمداد الطاقة عبر عاكس خماسي الأطوار، مع التركيز على جودة الطاقة وإدارة التيار التوافقي. وأخيراً، تم تنفيذ نظام تحكم متجه غير مباشر، يدمج منظم PI للتحكم في عزم الدوران والتدفق. تم تحليل أداء النظام باستخدام محاكاة MATLAB/Simulink، مما أظهر متانة جيدة واستجابة ديناميكية مرضية في ظل ظروف تشغيل مختلفة. تؤكد هذه النتائج فعالية نظام التحكم المقترح للتشغيل الصناعي للآلات متعددة الأطوار.

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة بخمس مراحل (PSAM)، تحويل بارك، التحكم في المتجهات، نموذج dq، المحاكاة باستخدام

Matlab/Simulink

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	2
DEDICACE	3
RESUME.....	4
SOMMAIRE.....	5
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES SYMBOLES	10
INTRODUCTION GENERAL.....	12
CHAPITRE I : Généralités, Modélisation de la Machine Asynchrone pentaphasée (à cinq Phases)	
I. Introduction.....	14
I.2 Généralités.....	14
I.2.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée.....	14
I.2.2 Avantages et Inconvénients des machines polyphasées.....	15
I.2.3 Domaines d'applications des machines polyphasées.....	16
I.3 Description de la MASP	16
I.3.1 hypothèses simplificatrices.....	17
I.3.2 Equations électriques.....	17
I.3.3 Puissance de la machine.....	18
I.3.4 Equations de flux statoriques et rotoriques	19
I.3.5 Equation mécanique.....	19
I.4 Modélisation de la MASP dans la base de découplage.....	20
I.4.1 Matrice de changement de base	20
I.4.2 Transformation de Park.....	21
I.4.3 Choix du référentiel.....	21
I.4.3.1 Référentiel lié au champ tournant (d-q).....	21
I.4.3.2 Equation du Flux.....	22
I.4.3.3 Equation de couple Electromagnétiques.....	22
I.4.3.4 Référentiel lié au rotor (x-y).....	23
I.4.3.5 Référentiel lié au stator (α - β).....	23

I.5	Modèle de la MAS sous forme de représentation d'état.....	23
I.6	simulation de la machine à cinq phases par Matlab.....	24
I.6.1	Résultats et interprétations.	25
I.6.2	La simulation a été réalisée pour un démarrage à vide.....	25
I.6.3	La simulation a été réalisée pour un démarrage en charge.....	26
I.6.4	Interprétation des résultats.....	27
I.7	Conclusion.....	27
CHAPITRE II : Modélisation de l'alimentation de la Machine Asynchrone pentaphasée (À cinq Phases)		
II.1	Introduction.....	29
II.2	Modélisation générale de l'alimentation de la MASP.....	29
II.2.1	Modélisation du Redresseur à cinq phases.....	30
II.2.2	Modélisation du filtre.....	32
II.2.3	Modélisation de l'Onduleur pentaphasée.....	34
II.2.3.1	Hypothèses.....	34
II.2.3.2	Tensions simples de l'onduleur.....	35
II.2.3.3	Principe des stratégies de commande.....	37
II.2.3.4	Commande en courant par hystérésis.....	38
II.3	Principe du contrôle par hystérésis.....	38
II.3.1	Avantages et inconvénients de la commande par hystérésis.....	39
II.3.2	Application de la commande par hystérésis à un onduleur associé à un MASP.....	39
II.4	l'alimentation de la Machine Asynchrone pentaphasée.....	41
II.4.2	Résultats de la simulation.....	42
II.4.3	Interprétation des résultats.....	43
II.5	Conclusion.....	44

CHAPITRE III : Commande vectorielle indirect de la Machine Asynchrone pentaphasée (À cinq Phases)

III.1 Introduction.....	46
III.2 Principe de la commande vectorielle à flux oriente	46
III.3 Types de la commande vectorielle.....	47
III.3.1 Commande vectorielle directe	48
III.3.2. Commande vectorielle indirecte	48
III.4 Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone à cinq phases.....	49
III.5. Calcul des coefficients des régulateurs	50
III.5.1 Régulateur de vitesse.....	50
III.6 Résultats et Interprétation de simulation	52
III.6.1 Essai à vide.....	52
III.6.2 Essai en charge	53
III.6.3 Interprétation des résultats.....	54
III.6.4 Essai en charge avec variation de vitesse.....	55
III.7 Conclusion	56
Conclusion générale.....	57
Référence Bibliographie	58
Annexe.....	60

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralités, Modélisation de la Machine Asynchrone pentaphasée (à cinq Phases)

Figure (I.1) : Représentation symbolique d'une machine asynchrone pentaphasée	17
Figure (I.2) : Représentation de la machine pentaphasée dans le repère (d,q)	22
Figure (I.3) : Le schéma bloc de la Machine asynchrone à cinq phases sou Matlab/Simulink.	24
Figure (I.4) : Résultat de simulation de la MASP pour un fonctionnement à vide	25
Figure (I.5):Résultat de simulation de la MASP pour un fonctionnement en charge.....	26

CHAPITRE II : Modélisation de l'alimentation de la Machine Asynchrone pentaphasée (À cinq Phases)

Figure (II.1) : Alimentation de la machine asynchrone à cinq phases.....	29
Figure (II.2) : Représentation du redresseur cinq phase à diodes.....	30
Figure (II.3) : Schéma bloc de simulation du redresseur à cinq phases.....	31
Figure (II.4) : Formes des tensions d'alimentation et redressée	31
Figure (II.5) : Représentation du filtre R.L.C passe-bas.	32
Figure (II.6) : Schéma bloc de simulation du filtre RLC.	33
Figure (II.7) : Tension filtrée	33
Figure (II.8): Schéma structurel de l'onduleur pentaphasée.....	34
Figure (II.9) un schéma de simulation de l'onduleur.....	36
Figure (II.10) Schéma bloc de simulation de l'onduleur cinq phases	37
Figure (II.11) Schéma d'illustration pour la commande par hystérésis.....	38
Figure (II.12) Principe de la commande par hystérésis.....	38
Figure (II.13) commande par hystérésis d'un onduleur.....	40
Figure (II.14): Alimentation d'une MASP.....	41
Figure (II.15): démarrage l'alimentant de la machine à vide suivi par une variation de charge à l'instant $t=1.5s$	42

CHAPITRE III : Commande vectorielle indirect Orientation du flux rotoriques

Figure (III.1) : Bloc simulink Orientation du flux rotoriques.....	47
Figure (III.2): Bloc simulink Orientation du flux rotoriques.....	50
Figure (III.3): Régulation de vitesse en boucle fermée.....	50
Figure (III.4): Schéma globale de la commande vectorielle indirecte appliquée à la MASP.....	53
Figure (III.5) Résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée au MAS pour un fonctionnement à vide.....	54
Figure (III.6) Résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée au MAS pour un fonctionnement en charge.....	55
Figure (III.7) Résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée au MAS pour un fonctionnement en charge avec variation de vitesse.....	56

Liste des symboles

(r):	indice grandeurs rotoriques
(s):	indice grandeurs statoriques
(α ; β):	Axes liée au stator.
(x; y):	Axes liée au rotor.
(d; q):	Axes liée par rapport au champ tournant.
p :	nombre de paires de pôles
R_s :	résistance statorique
L_s :	inductance statorique
R_r :	résistance rotoriques
L_r :	inductance rotoriques
V_{ds} :	tension statorique sur l'axe d
V_{qs} :	tension statorique sur l'axe q
I_{sd} :	courant statorique direct
I_{sq} :	courant statorique transversale
\emptyset_{sd} :	flux statorique direct
\emptyset_{sq} :	flux statorique transversale
J:	moment d'inertie des pièces tournantes
Ω :	vitesse angulaire du moteur
$X_{ref}(X^*)$:	référence de x
A^t :	Transposée de la matrice.
[Vs]:	Vecteur tension statorique
[Is]:	Vecteur courant statorique
[\emptyset_s]:	Vecteur flux statorique
[Rs]:	Matrice résistance du stator
[Ls]:	Matrice inductance du stator
[Ls]:	Matrice d'inductance statorique.
[Lr]:	Matrice d'inductance rotoriques.

$[M_{sr}] = [M_{rs}]$:	Matrice des inductances mutuelles du couplage entre stator-rotor.
$[R_s]$:	Résistance propre d'une phase statoriques.
$[R_r]$:	Résistance propre d'une phase rotoriques.
θ :	Angle de charge
ω :	Pulsation électrique
Ω_r :	La vitesse de rotor
P:	Nombre de paire de pole
C_{em} :	Couple électromagnétique
C_r :	Couple résistant
V_{eff} :	Valeur efficace des tensions d'alimentation.
K_p :	Facteur de proportionnalité.
K_i :	Facteur d'intégral.
T_s, T_r :	Constantes de temps statoriques et rotoriques

PI : Proportionnel- Intégrale

M.L.I : Modulation par Largeur d'Impulsion

MASP : Machine Asynchrone pentaphasée

Introduction générale

Les machines asynchrones occupent une place prédominante dans les applications industrielles, notamment dans les domaines nécessitant un contrôle précis de la vitesse et du couple. Leur robustesse, leur faible coût et leur facilité d'entretien en font une solution fiable et largement adoptée. Cependant, ces machines présentent certaines limites lorsqu'il s'agit de répondre à des exigences de performances accrues, notamment en termes de régulation dynamique, de tolérance aux défauts et de réduction des vibrations.

Dans ce contexte, les **machines polyphasées**, et en particulier les **machines asynchrones pentaphasées (MASP)**, suscitent un intérêt croissant. L'augmentation du nombre de phases permet de mieux répartir la puissance sur les différents enroulements, de réduire les pertes, de limiter les ondulations de couple et d'améliorer la continuité de fonctionnement en cas de défaillance partielle. Ces caractéristiques rendent la MASP particulièrement adaptée aux systèmes de traction, à l'aéronautique, et aux applications à hautes performances.

Cependant, la complexité accrue de ces machines rend leur **commande** plus délicate. Les techniques classiques de commande scalaire deviennent rapidement insuffisantes. Parmi les stratégies avancées, la **commande vectorielle indirecte** permet de découpler le contrôle du couple et du flux, en offrant une dynamique rapide et une meilleure précision. Ce type de commande nécessite toutefois une modélisation rigoureuse de la machine et une régulation efficace.

L'objectif principal de ce mémoire est de modéliser une **machine asynchrone à cinq phases**, de concevoir un système d'alimentation adapté, et de mettre en œuvre une **commande vectorielle indirecte** régulée par un **correcteur PI**, afin d'évaluer les performances dynamiques du système dans différents scénarios de fonctionnement.

Ce travail est structuré comme suit :

- **Chapitre 1** : Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée, avec une présentation du modèle mathématique dans le repère (α, β) puis dans le repère (d, q) via la transformation de Park généralisée.
- **Chapitre 2** : Étude du système d'alimentation de la machine, incluant la modélisation du redresseur, du filtre RLC et de l'onduleur à cinq bras commandé par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- **Chapitre 3** : Implémentation de la commande vectorielle indirecte, analyse des performances en régime statique et dynamique à l'aide de simulations sous MATLAB/Simulink.

Ce mémoire s'achève par une conclusion générale et des perspectives d'amélioration du système étudié.

**CHAPITRE I : Généralités,
Modélisation de la Machine
Asynchrone pentaphasée**

I.1 Introduction :

L'intérêt pour les machines comportant plus de trois phases ne date pas d'hier. Ces machines, souvent désignées sous les termes de *machines à grand nombre de phases* ou *machines polyphasées*, présentent l'avantage de pouvoir fonctionner même si certaines phases sont ouvertes, à condition qu'au moins trois d'entre elles restent actives. Ainsi, il est possible d'avoir jusqu'à $(q - 3)$ phases déconnectées sans nécessiter de liaison entre le neutre de la machine et le point milieu de la source continue.

L'augmentation du nombre de phases offre par ailleurs davantage de degrés de liberté pour le contrôle de la machine [2].

Ces machines sont couramment utilisées dans des domaines exigeant une forte puissance, tels que la marine, l'aéronautique et l'industrie automobile.

Cette étude porte spécifiquement sur la machine asynchrone pentaphasée (MAS pentaphasée), largement adoptée dans les applications industrielles en raison de sa robustesse électromagnétique, de son coût abordable et de sa grande standardisation [2]. Considérées comme une alternative prometteuse aux machines triphasées, les MAS pentaphasées se révèlent particulièrement adaptées aux applications de haute puissance nécessitant un contrôle précis de la vitesse, où elles peuvent être pilotées efficacement à l'aide d'onduleurs.

I.2 Généralités :

Les machines asynchrones polyphasées sont une classe de moteurs électriques qui se distinguent par un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines présentent plusieurs avantages importants, tels qu'une répartition améliorée des contraintes thermiques et mécaniques, les rendant idéales pour des applications industrielles exigeantes. Leur conception polyphasée offre également une plus grande flexibilité dans la gestion de la puissance et améliore la fiabilité en cas de défaillance d'une phase.

La modélisation et la commande de ces machines sont des domaines de recherche actifs, visant à optimiser leur performance et leur intégration dans des systèmes complexes.

I.2.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone polyphasée :

Dans une machine asynchrone, le champ magnétique évolue sous la forme d'un champ tournant généré dans le stator. Au démarrage, ce champ tournant parcourt les conducteurs à une vitesse angulaire connue sous le nom de vitesse de synchronisme. Le rotor, mis en rotation, tente de rattraper ce champ tournant. La vitesse du rotor est proportionnelle à la fréquence de

L'alimentation de la machine. Cette vitesse est calculée de la manière suivante:

$$\Omega_s[\text{rad /s}] = \mathbf{f s/p} \quad (\text{I.1})$$

Tels que :

- Ω_s : représente la vitesse du champ tournant (vitesse de synchronisme).
- f_s : est la fréquence de l'alimentation.
- p : est le nombre de paires de pôles.

Ce champ tournant créé par les enroulements du stator induit des courants dans les conducteurs du rotor. Ainsi ces derniers vont donner naissance à des forces électromotrices induisent une rotation du rotor à une vitesse Ω_r inférieure à la vitesse de synchronisme Ω_s . Dans ce cas-là ; on peut dire que le rotor va se glisser par rapport au champ tournant créé par le stator exprimé comme suit [2].

$$\mathbf{g} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (\text{I.2})$$

I.2.2 Avantages et Inconvénients des machines polyphasées :

A. Avantages

Les machines polyphasées ont par la suite fait un intérêt grandissant, qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines polyphasées. En effet, les variateurs polyphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées [3]. [4].

- densité de couple plus élevée.
- pulsations de couple réduites.
- plus grande tolérance aux pannes.
- réduction du calibre requis par jambe d'onduleur (et donc plus simple et plus fiable Équipement de conditionnement de puissance)
- meilleures caractéristiques de bruit, phase plus élevée, le nombre produit un couple plus lisse en raison de l'augmentation simultanée de la fréquence de la pulsation du couple et de la réduction de l'ondulation du couple.

B. Inconvénients

Il est vrai que les machines polyphasées présentent des avantages significatifs en termes de qualité de sortie et d'efficacité, mais elles ne sont pas sans inconvénients [2]. Voici quelques points à considérer :

- **Courants harmoniques avec onduleur de tension :** Lorsqu'elles sont alimentées par un onduleur de tension, les machines polyphasées peuvent générer des courants harmoniques. Cela peut poser des problèmes de qualité de l'alimentation électrique et nécessiter des filtres supplémentaires pour les atténuer.
- **Coût accru avec le nombre de phases :** Le nombre de semi-conducteurs nécessaires dans l'onduleur augmente avec le nombre de phases de la machine. Cela peut augmenter le coût global du système convertisseur-machine.
- **Non-linéarité et complexité de la commande :** La relation entre le couple et le flux dans les machines polyphasées est non linéaire, ce qui rend la commande plus complexe. De plus, la multiplication des semi-conducteurs avec une structure dynamique ajoute à cette complexité, rendant la conception et la mise en œuvre de la commande plus exigeantes.

I.2.3 Domaines d'applications des machines polyphasées :

En effet, les machines polyphasées sont particulièrement adaptées aux applications où la puissance, la fiabilité et la précision de contrôle sont primordiales, ce qui en fait un choix préférentiel pour les applications de puissances élevées dans divers secteurs industriels, par exemple on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins du ciment [2].

I.3 Description de la MASP:

La machine étudiée est une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil. Elle est composée par deux parties. Cette machine comprend un stator et un rotor, chacun formé de 5 enroulements identiques décalés de $2\pi/5$ radians dans l'espace. Ces derniers sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

Les cinq enroulements statoriques et rotoriques sont notés respectivement (A, B, C, D, E) et (a, b, c, d, e), l'angle θ est l'angle que fait le rotor en effectuant sa rotation par rapport au stator.

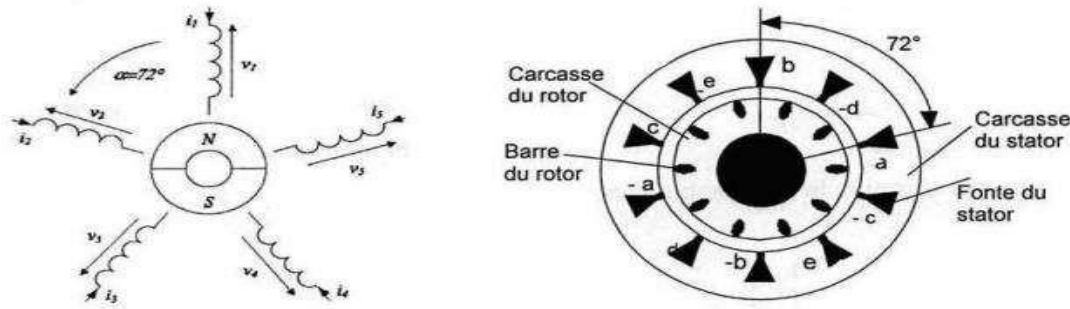


Figure (I.1) : Représentation symbolique d'une machine asynchrone pentaphasée

I.3.1 hypothèses simplificatrices :

Pour pouvoir élaborer le modèle électrique équivalent de la machine, il est nécessaire de considérer certaines hypothèses simplificatrices :

- L'effet de peau est négligeable.
- L'effet d'encoche est négligeable et l'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- Les courants de Foucault et la saturation du circuit magnétique et sont négligés.
- La F.M.M créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

I.3.2 Equations électriques :

En appliquant la loi de Faraday au niveau de chaque enroulement des deux armatures de la MASP ; on aura les équations vectorielles des tensions statoriques et rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} \vec{V}_s = [R]_s \vec{I}_s + \frac{d}{dt} \vec{\Phi}_s \\ \vec{V}_r = [R]_r \vec{I}_r + \frac{d}{dt} \vec{\Phi}_r \end{cases} \quad (\text{I. 3})$$

Tels que :

- \vec{V}_s et \vec{V}_r : sont respectivement les vecteurs tensions statoriques et rotoriques.
- \vec{I}_s et \vec{I}_r : sont respectivement les vecteurs courants statoriques et rotoriques.
- $\vec{\Phi}_s$ et $\vec{\Phi}_r$: sont respectivement les vecteurs flux statoriques et rotoriques.
- $[R_s]$ et $[R_r]$ sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques qui sont des matrices diagonales d'ordre 5.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{I. 4})$$

I.3.3 Puissance de la machine :

La puissance de la MASP est obtenue par le produit scalaire entre le vecteur tension et le vecteur courant :

$$P = \vec{V}_s \cdot \vec{I}_s \quad (\text{I. 5})$$

En remplaçant la tension \vec{V}_s par son expression (I. 3) on aura :

$$P = [R_s] (I_s)^2 + \left(\frac{d}{dt} \phi_s \right) I_s \quad (\text{I. 6})$$

Cette puissance est la somme entre les pertes par effet de Joule et la puissance magnétique

Tels que :

- $P = [R_s] (I_s)^2$: Représente les pertes par effet de joule.
- $\left(\frac{d}{dt} \phi_s \right) I_s$: Représente la puissance magnétique.

I.3.4 Equations de flux statoriques et rotoriques :

On a les équations suivantes :

$$\begin{cases} \vec{\Phi}_s = [L_{ss}] \vec{I}_s + [M_{sr}] \vec{I}_r \\ \vec{\Phi}_r = [L_{rr}] \vec{I}_r + [M_{rs}] \vec{I}_s \end{cases} \quad (\text{I. 7})$$

En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (I. 3) on obtient :

$$\begin{cases} \vec{V}_s = [R_s] \vec{I}_s + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \vec{I}_s + [M_{sr}] \vec{I}_r) \\ \vec{V}_r = 0 = [R_r] \vec{I}_r + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \vec{I}_r + [M_{rs}] \vec{I}_s) \end{cases} \quad (\text{I. 8})$$

Tels que :

$$\bullet [L_{ss}] = \begin{bmatrix} m_{s1s1} & m_{s1s2} & m_{s1s3} & m_{s1s4} & m_{s1s5} \\ m_{s2s1} & m_{s2s2} & m_{s2s3} & m_{s2s4} & m_{s2s5} \\ m_{s3s1} & m_{s3s2} & m_{s3s3} & m_{s3s4} & m_{s3s5} \\ m_{s4s1} & m_{s4s2} & m_{s4s3} & m_{s4s4} & m_{s4s5} \\ m_{s5s1} & m_{s5s2} & m_{s5s3} & m_{s5s4} & m_{s5s5} \end{bmatrix} \quad (\text{I. 9})$$

$$\bullet [L_{rr}] = \begin{bmatrix} m_{r1r1} & m_{r1r2} & m_{r1r3} & m_{r1r4} & m_{r1r5} \\ m_{r2r1} & m_{r2r2} & m_{r2r3} & m_{r2r4} & m_{r2r5} \\ m_{r3r1} & m_{r3r2} & m_{r3r3} & m_{r3r4} & m_{r3r5} \\ m_{r4r1} & m_{r4r2} & m_{r4r3} & m_{r4r4} & m_{r4r5} \\ m_{r5r1} & m_{r5r2} & m_{r5r3} & m_{r5r4} & m_{r5r5} \end{bmatrix} \quad (\text{I. 10})$$

$$\bullet [M_{sr}] = \begin{bmatrix} m_{s1r1} & m_{s1r2} & m_{s1r3} & m_{s1r4} & m_{s1r5} \\ m_{s2r1} & m_{s2r2} & m_{s2r3} & m_{s2r4} & m_{s2r5} \\ m_{s3r1} & m_{s3r2} & m_{s3r3} & m_{s3r4} & m_{s3r5} \\ m_{s4r1} & m_{s4r2} & m_{s4r3} & m_{s4r4} & m_{s4r5} \\ m_{s5r1} & m_{s5r2} & m_{s5r3} & m_{s5r4} & m_{s5r5} \end{bmatrix}, [M_{sr}] \quad (\text{I.11})$$

$$= [M_{sr}]$$

I.3.5 Equation mécanique :

L'équation mécanique est décrite par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - F\Omega \quad (\text{I. 12})$$

Tels que :

- C_r : désigne le couple résistant appliqué par une charge.
- J : désigne le moment d'inertie de la MASP.
- F : désigne le coefficient de frottement visqueux ou coefficient de friction.

Il est important de noter que la modélisation de la MASP dans la base naturelle devient complexe en présence d'un fort couplage entre les différents enroulements, ce qui rend nécessaire la transition vers une autre base où les contraintes de couplage sont absentes. Pour ce faire, nous utiliserons les matrices de changement de bases que nous avons obtenues [2].

I.4 Modélisation de la MASP dans la base de découplage :

Nous avons vu précédemment que les propriétés de circularité et de symétrie des matrices inductances nous ont permis de diagonaliser ces dernières dans l'espace euclidien en déterminant les valeurs propres et les vecteurs propres à coefficients réels ; ainsi la matrice de passage de la base naturelle vers la base de découplage qui est celle de la matrice de concordia d'ordre 5 [3].

I.4.1 Matrice de changement de base :

On rappelle que la matrice de passage de la base naturelle vers la base de découplage est La matrice de Concordia qui s'écrit de la manière suivante :

$$T = \sqrt{\frac{5}{2}} \begin{array}{c|ccccc|} | & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & | \\ | & 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \sin\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \sin\left(\frac{8\pi}{5}\right) & | \\ | & 1 & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{12\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{16\pi}{5}\right) & | \\ | & 0 & \sin\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \sin\left(\frac{8\pi}{5}\right) & \sin\left(\frac{12\pi}{5}\right) & \sin\left(\frac{16\pi}{5}\right) & | \\ | & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & | \end{array}$$

I.4.2 Transformation de Park :

La transformation de Park rend assez aisée de tous les régimes transitoires de la machine électrique polyphasée, Cette transformation facilite la conversion d'un système à cinq phases de composantes (a, b, c, d, e) vers un système équivalent à deux phases (d, q). Elle est réalisée à l'aide d'une matrice de transformation $T(\theta)$, où θ représente l'angle de rotation rotoriques par rapport aux axes de référence.

$$T(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{5}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{5}) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{5}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{5}) \\ \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{5}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{5}) & \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{5}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{5}) \end{bmatrix} \quad (I.14)$$

Tels que :

θ : Angle entre l'axe magnétique et l'axe longitudinale.

$\sqrt{\frac{2}{5}}$: est facteur pour conserver la puissance électrique instantanée.

L'application de la transformation de PARK aux modèles matriciels électrique et magnétique et permet d'obtenir les équations suivantes :

I.4.3 Choix du référentiel :

Il existe plusieurs possibilités pour le choix l'orientation de référentiel d'axe biphasé qui dépend de la vitesse de rotation de repère choisi [2].

Selon le choix de ω_{obs} on distingue :

I.4.3.1 Référentiel lié au champ tournant (d-q) : La vitesse du référentiel de Park est celle du champ tournant $\omega_{obs} = \omega_s$.

Dans ce repère, les grandeurs : tensions, courants et flux de la machine sont transformées du système pentaphasée au système biphasé (d-q) lié au champ magnétique tournant.

Ce référentiel car il présente l'avantage de transformer les grandeurs en constantes, c'est-à-dire des grandeurs continues, ce qui facilite leur régulation en cas de commande.

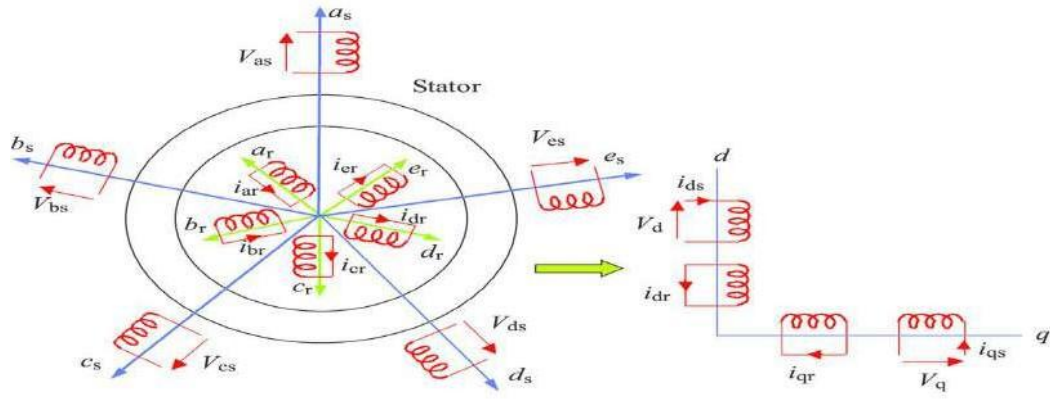


Figure (I.2) : Représentation de la machine pentaphasée dans le repère (d, q).

Les équations électriques de la machine dans le repère de Park deviennent [8]

Pour le stator :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{ds} &= [\mathbf{R}_s] \mathbf{I}_{ds} - \omega_s \phi_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} \\ \mathbf{V}_{qs} &= [\mathbf{R}_s] \mathbf{I}_{qs} - \omega_s \phi_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} \end{aligned} \tag{I.15}$$

Pour le rotor :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{dr} &= [\mathbf{R}_r] \mathbf{I}_{dr} - \omega_s \phi_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} \\ \mathbf{V}_{qr} &= [\mathbf{R}_r] \mathbf{I}_{qr} - \omega_s \phi_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} \end{aligned} \tag{I.16}$$

I.4.3.2 Equation de Flux:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = (L_s + L_m)I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \phi_{qs} = (L_s + L_m)I_{qs} + L_m I_{qr} \end{cases} \tag{I.17}$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = (L_r + L_m)I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \phi_{qr} = (L_r + L_m)I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \tag{I.18}$$

I.4.3.3 Equation du couple électromagnétique

$$C_{em} = 5/2 P (\phi_{ds} I_{qr} - \phi_{qs} I_{dr}) \tag{I.19}$$

I.4.3.4 Référentiel lié au rotor (x-y) : Il se traduit par la condition $\omega_{obs} = \omega_r$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sx} = R_s I_{sx} + \frac{d}{dt} \Phi_{sx} - \omega \Phi_{sy} \\ V_{sy} = R_s I_{sy} + \frac{d}{dt} \Phi_{sy} + \omega \Phi_{sx} \\ 0 = R_r I_{rx} + \frac{d}{dt} \Phi_{rx} \\ 0 = R_r I_{ry} + \frac{d}{dt} \Phi_{ry} \end{array} \right. \quad (I. 20)$$

Ce référentiel est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines asynchrones.

I.4.3.5 Référentiel lié au stator (α - β) : Tant que le stator est fixe, la vitesse du repère de Park est $\omega_{obs} = \omega_s = 0$.

Les équations du système prennent la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ 0 = R_r I_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega \Phi_{r\beta} \\ 0 = R_r I_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega \Phi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad (I. 21)$$

I.5 Modèle de la MAS sous forme de représentation d'état :

Peut écrire les équations électriques et les équations mécaniques sous forme d'état, en rassemblant les équations des courants et de la vitesse, on obtient le système d'état suivant :

$$[X] = [A][X] + [B][U] \quad (I. 22)$$

Avec :

$$[X] = [I_{sa} I_{s\beta} \Phi_{r\alpha} \Phi_{r\beta}]^t \quad \text{et} \quad [U] = [V_{sa} V_{s\beta}]^t$$

$$[A] = \begin{vmatrix} \frac{-Rt}{\delta Ls} & 0 & \frac{Lm}{\delta Ls Lr Tr} & \frac{Lm}{\delta Ls Lr} W \\ 0 & \frac{-Rt}{\delta Ls} & \frac{Lm}{\delta Ls Lr} W & \frac{Lm}{\delta Ls Lr Tr} \\ \frac{Lm}{Tr} & 0 & \frac{-1}{Tr} & -W \\ 0 & \frac{Lm}{Tr} & W & \frac{-1}{Tr} \end{vmatrix} \quad \text{Et} \quad [B] = \begin{vmatrix} \frac{1}{\delta Ls} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\delta Ls} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Ou:

$$\delta = -\frac{L_m^2}{\delta L_s L_r} : \text{Coefficient de dispersion total.}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotoriques.}$$

$$R_t = R_s + \frac{L_m^2}{L_s L_r} : \text{Résistance totale ramenée au stator.}$$

I.6 simulation de la machine à cinq phases par Matlab :

Les tensions d'alimentation sont supposées parfaitement sinusoïdales d'amplitudes Égales et constantes.

$$V1 = \sqrt{2} * V_{eff} \sin(\omega.t)$$

$$V2 = \sqrt{2} * V_{eff} \sin(\omega.t - \frac{2\pi}{5})$$

$$V3 = \sqrt{2} * V_{eff} \sin(\omega.t - \frac{4\pi}{5}) \tag{I.23}$$

$$V4 = \sqrt{2} * V_{eff} \sin(\omega.t - \frac{6\pi}{5})$$

$$V5 = \sqrt{2} * V_{eff} \sin(\omega.t - \frac{8\pi}{5})$$

La simulation de la MASP est réalisée à l'aide du logiciel Simulink sous Matlab. La machine dont les paramètres sont donnés en Annexe A, est alimentée directement par le réseau pentaphasée.

La simulation sera faite dans le référentiel (d, a) pour un essai en charge nominale après un démarrage à vide. La figure (I.3) représente le schéma de modélisation de la MASP.

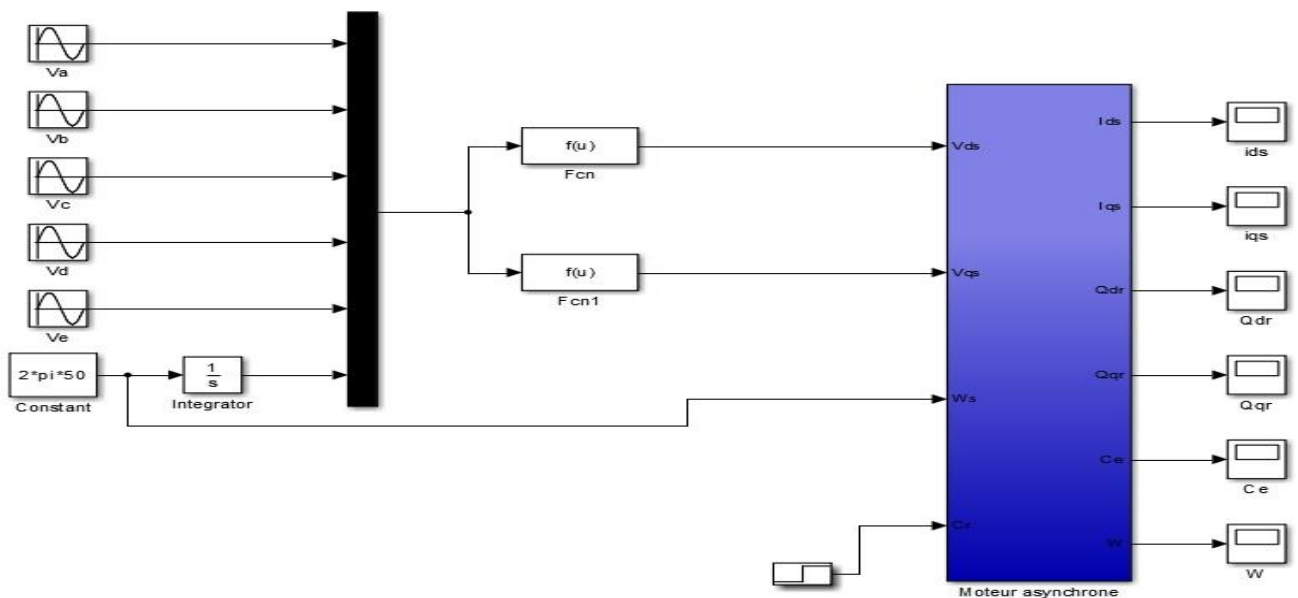


Figure (I.3) : Le schéma bloc de la Machine asynchrone à cinq phases sou Matlab/Simulink

I.6.1 Résultats et interprétations :

Les résultats de simulation donnés par la figure (I.4) illustrent l'évolution des principales grandeurs de la machine asynchrone, à savoir : la vitesse rotoriques, le couple électromagnétique, les courants statoriques et les courants rotoriques.

I.6.2 La simulation a été réalisée pour un démarrage à vide:

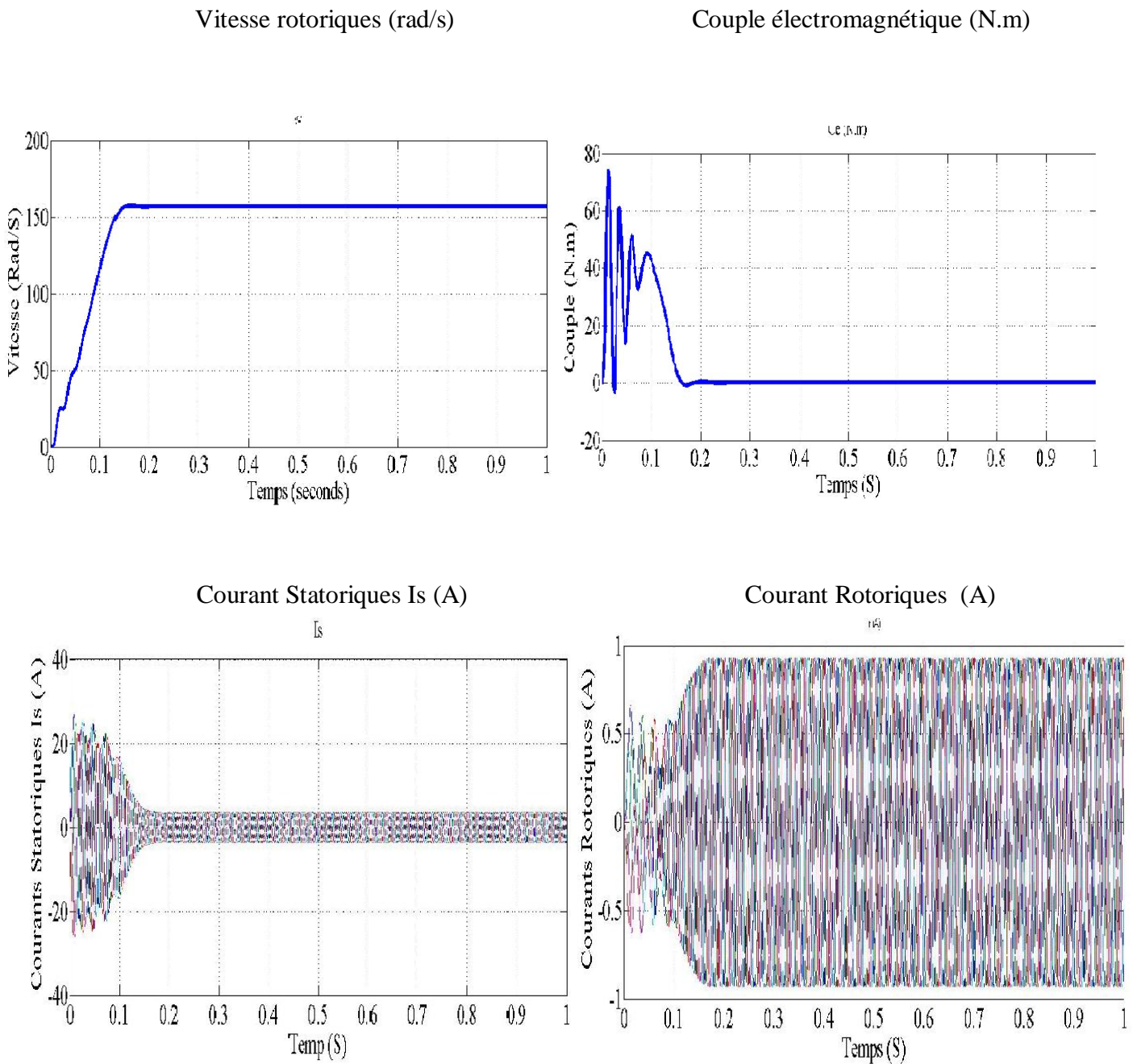


Figure (I.4) : Résultat de simulation de la MASP pour un fonctionnement à vide

I.6.3 La simulation réalisée pour un démarrage en charge:

Pour un fonctionnement en charge de 10 (Nm). À l'instant 0.5s

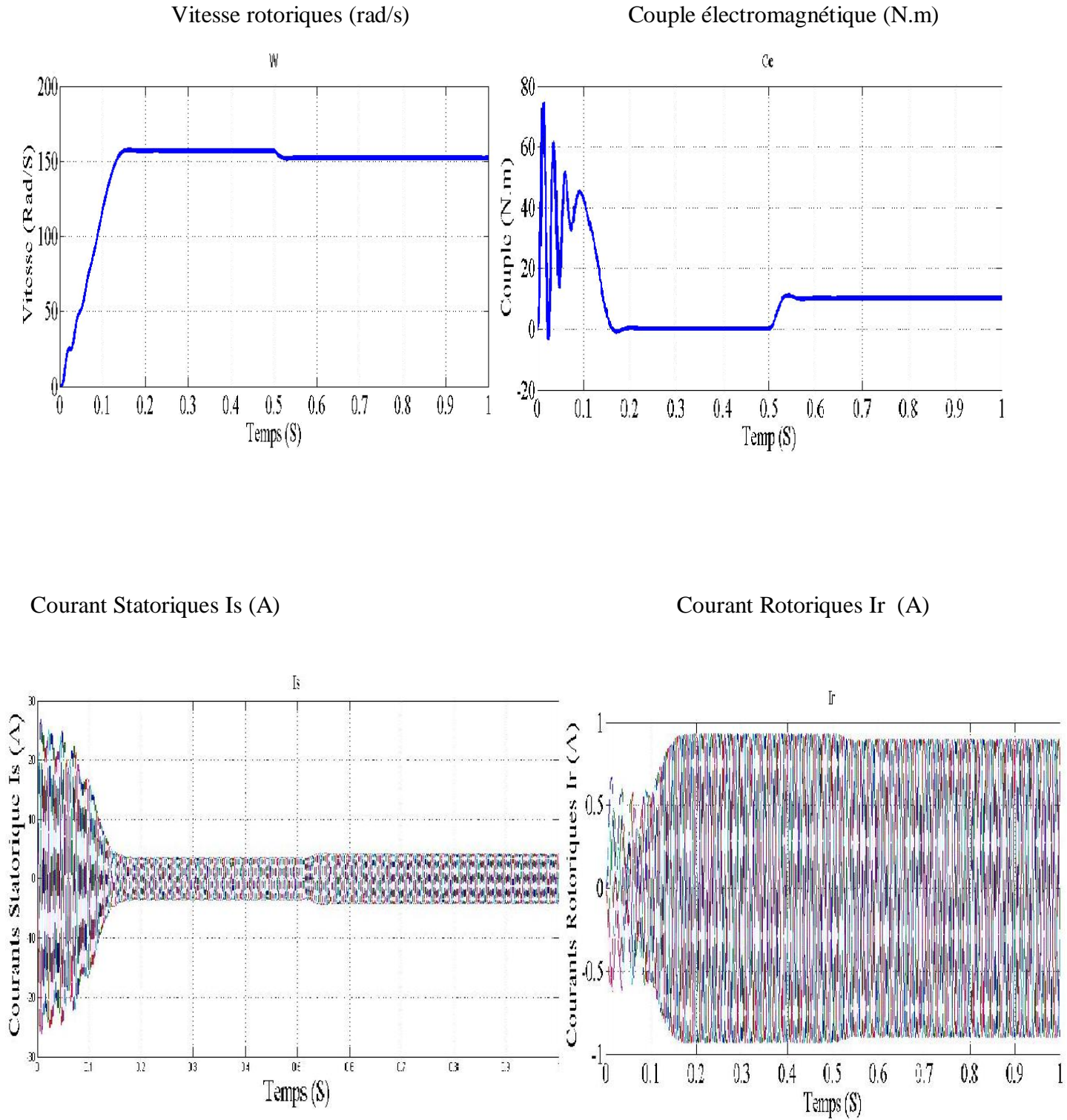


Figure (I.5):Résultat de simulation de la MASP pour un fonctionnement en charge

I.6.4 Interprétation des résultats:

Les résultats de la simulation montrent qu'au démarrage à vide, le couple électromagnétique atteint une valeur maximale au régime de démarrage qui entraîne un fort appel des courants il se stabilise ensuite à zéro (à vide), une fois qu'on a appliqué une charge à l'instant $t=0.5$ sec la valeur de ce dernier augmente et se stabilise à 10 N.m pour compenser le couple de charge et assurer l'équilibre mécanique de la machine.

Nous constatons également que la vitesse de la machine démarre de zéro et augmente d'une façon rapide et atteint sa valeur maximale (vitesse du champ tournant, qui égale à 1500 tr/min ($p=2$) après une durée de 0,15 second, elle reste constante jusqu'à l'application de la charge mécanique à la machine la vitesse diminue de sa valeur maximale.

D'autres parts on remarque que les courants I_s et I_r ne changent pas pendant toute la simulation en fonctionnement à vide et en charge.

I.7 Conclusion :

À l'issue de ce chapitre, deux modèles mathématiques de la machine asynchrone pentaphasée ont été développés : le premier dans la base naturelle, bien que complexe pour l'analyse des paramètres de la machine, et le second selon la transformation de Park, en tirant parti des propriétés de circularité et de Symétrie des matrices d'inductance.

Nous avons également examiné le comportement de la machine lorsqu'elle est alimentée par un réseau pentaphasé fictif, tant en régime à vide qu'en charge, en utilisant l'environnement de simulation Simulink/Matlab.

Le chapitre suivant portera sur l'étude d'autres sources d'alimentation couramment utilisées en industrie pour les machines polyphasées, notamment les machines pentaphasées [5].

CHAPITRE II :
Modélisation de
l'alimentation de la
Machine Asynchrone
pentaphasée (à cinq
Phases)

II.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la **modélisation de la chaîne d'alimentation électrique** de la Machine Asynchrone Pentaphasée (MASP). Dans un système polyphasé, l'alimentation joue un rôle crucial, car elle doit garantir une **distribution équilibrée, stable et performante** de l'énergie à chaque phase, tout en minimisant les pertes et les distorsions.

Nous nous intéressons ici à une architecture d'alimentation typique, composée d'un **redresseur**, d'un **filtre** et d'un **onduleur pentaphasé**, permettant de convertir l'énergie issue d'une source continue (p. ex. : batteries, panneaux photovoltaïques) ou alternative (réseau, alternateur) en une alimentation multiphasée adaptée à la commande de la MASP.

L'objectif est de développer un **modèle mathématique rigoureux** de chaque élément de cette chaîne, afin de simuler et analyser leur fonctionnement conjoint. Une attention particulière sera portée à la stratégie de commande de l'onduleur, notamment à la **commande en courant par hystérésis**, qui sera étudiée en détail.

Ce travail permettra de mieux comprendre les interactions entre les différents blocs d'alimentation et leurs effets sur le comportement global de la MASP.

II.2 Modélisation générale de l'alimentation de la MASP :

Un moteur asynchrone est généralement conçu pour fonctionner à une fréquence fixe (c'est-à-dire la fréquence du réseau) ; pour pouvoir fonctionner à une vitesse variable, il doit être alimenté à une fréquence variable.

Le schéma de la figure (II.1) illustre le principe de l'alimentation électrique à fréquence variable utilise un convertisseur statique dont le convertisseur est constitué d'un redresseur, d'un filtre passe-bas et d'un onduleur.

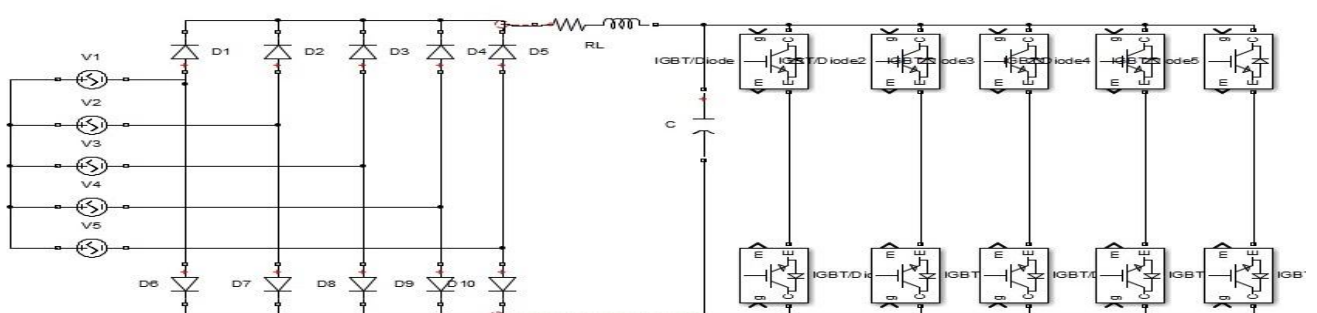


Figure (II.1) : Alimentation de la machine asynchrone à cinq phases

Les caractéristiques exigées de l'association convertisseur-machine dépendent à la fois de la machine, de son alimentation et de la commande de l'ensemble [2], pour assurer :

- Un couple présentant une ondulation minimale, tout en étant contrôlable à l'aide d'un nombre minimal de variables, à la fois en régime dynamique et en régime permanent.
- Une large plage de variation de vitesse.

II.2.1 Modélisation du Redresseur à cinq phases :

Un redresseur à cinq phases à diodes, aussi appelé redresseur à pont de diodes cinq phases, est un dispositif électronique crucial pour la conversion de l'énergie électrique. Il est largement utilisé dans divers domaines industriels pour convertir le courant alternatif (AC) pentaphasé en courant continu (DC).

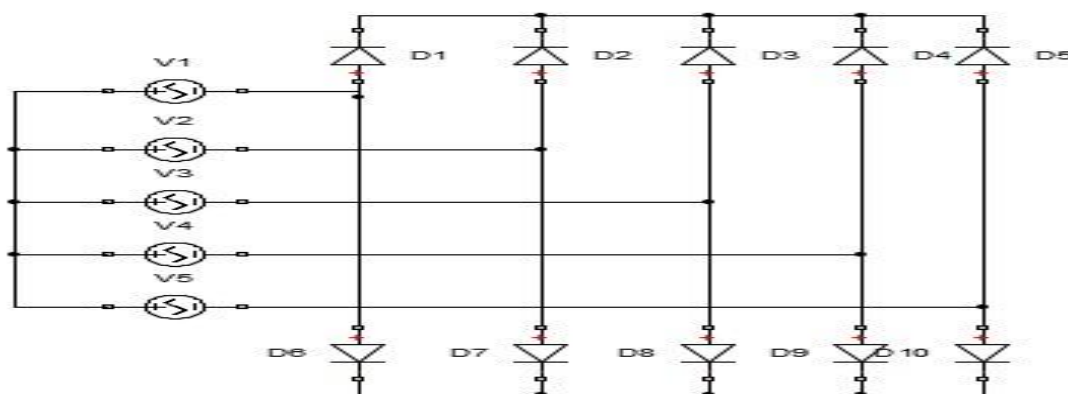


Figure (II.2) : Représentation du redresseur cinq phase à diodes.

Nous faisons l'hypothèse que la source d'alimentation pentaphasée est équilibrée, avec des tensions et une fréquence constante. Nous ignorons également les chutes de tension dues à l'empiètement anodique ainsi que les pertes dans les diodes. En conséquence, le redresseur est alimenté par le système pentaphasée suivant :

$$\begin{aligned}
 V1 &= \sqrt{2} * V_{eff} \sin (\omega.t) \\
 V2 &= \sqrt{2} * V_{eff} \sin (\omega.t - \frac{2\pi}{5}) \\
 V3 &= \sqrt{2} * V_{eff} \sin (\omega.t - \frac{4\pi}{5}) \\
 V4 &= \sqrt{2} * V_{eff} \sin (\omega.t - \frac{6\pi}{5}) \\
 V5 &= \sqrt{2} * V_{eff} \sin (\omega.t - \frac{8\pi}{5})
 \end{aligned}
 \tag{II.1}$$

Tels que :

- $\omega = 2 \pi f$: Pulsation du réseau.
- f : Fréquence du réseau.
- V_{eff} : Valeur efficace de la tension du réseau.

La tension redressée à la sortie de redresseur, est donnée par :

$$V_{red} = \max[V_1(t), V_2(t), V_3(t), V_4(t), V_5(t)] - \min[V_1(t), V_2(t), V_3(t), V_4(t), V_5(t)] \quad (II.2)$$

- La figure ci-dessous représente le schéma bloc de simulation du redresseur :

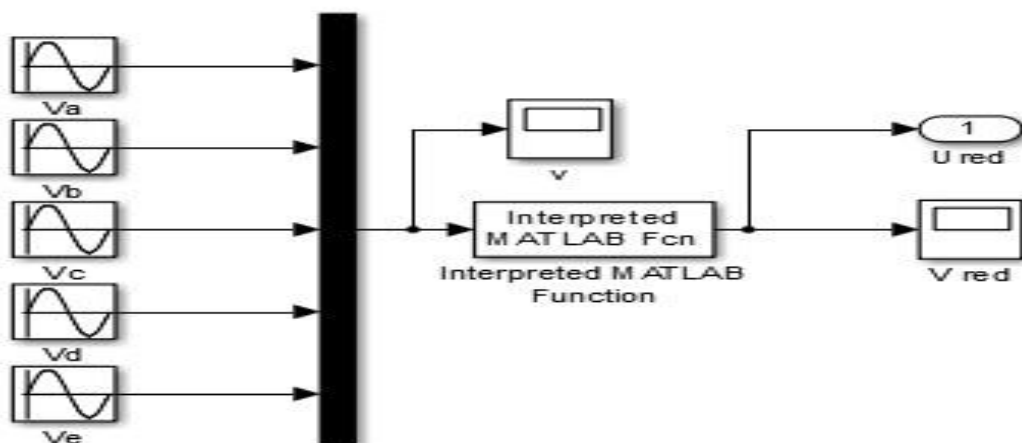


Figure (II.3) : Schéma bloc de simulation du redresseur à cinq phases

- Le résultat de simulation de la tension redressée est donné par la figure :

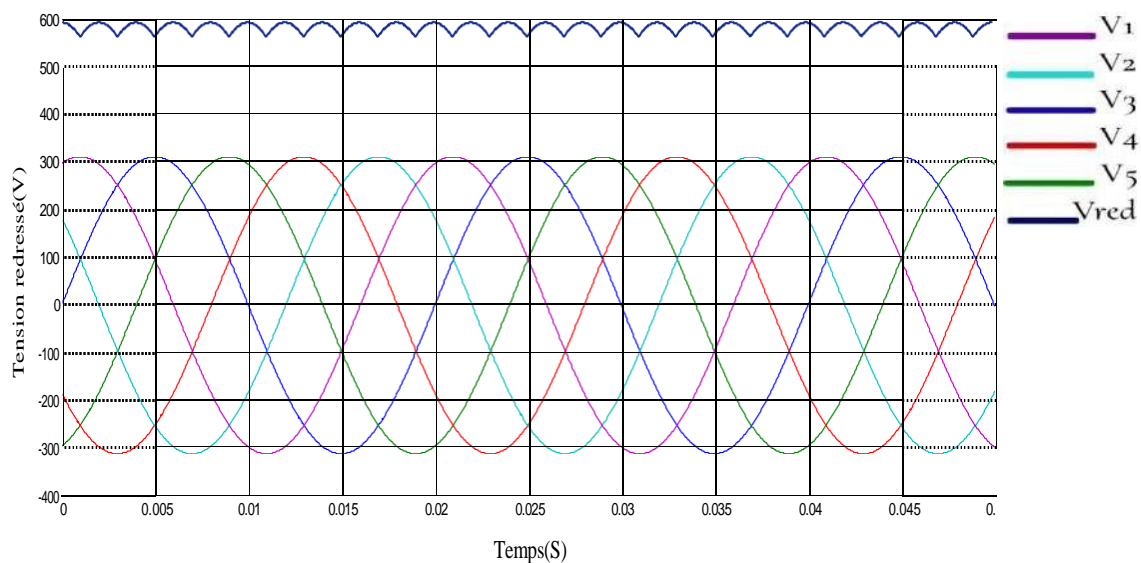


Figure (II.4) : Formes des tensions d'alimentation et redressée.

II.2.2 Modélisation du filtre :

Pour filtrer la tension redressée, un filtre passe-bas avec les paramètres R_f , L_f et C_f est inséré à l'entrée de l'onduleur. Ce filtre absorbe la différence entre le courant unidirectionnel I_{ch} et le courant I_d , éliminant ainsi les variations brusques de tension V_f lors de la commutation. D'autre part, pour réduire l'ondulation du courant I_d , on connecte l'inductance de lissage en série avec la résistance. L'ensemble constitue un filtre passe bas. Le schéma représentatif est donné par la figure:

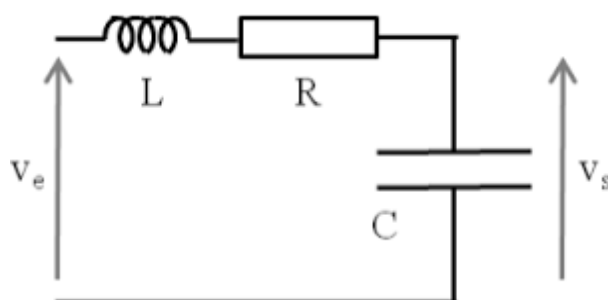


Figure (II.5) : Représentation du filtre R.L.C passe-bas.

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivant :

$$U_{red} = R_f I_f + L_f \frac{dI_f(t)}{dt} + U_{fil}(t) \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{dU_{fil}(t)}{dt} = (I_d(t) - U_{fil}(t)) \quad (\text{II.4})$$

En combinant les deux équations précédentes, nous obtenons la fonction de transfert du Filtre :

$$F(s) = \frac{U_{fil}}{U_{red}} = \frac{1}{LCS^2 + RCS + 1} \quad (\text{II.5})$$

On voit bien que c'est un filtre du second ordre dont la pulsation de coupure est la suivante :

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.6})$$

- La figure ci-dessous représente le schéma bloc de simulation du filtre :

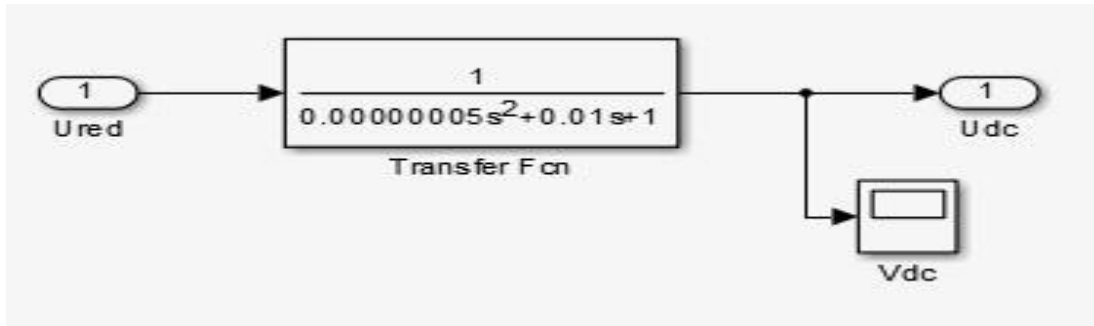


Figure (II.6) : Schéma bloc de simulation du filtre RLC.

- La figure représente la forme de tension filtrée :

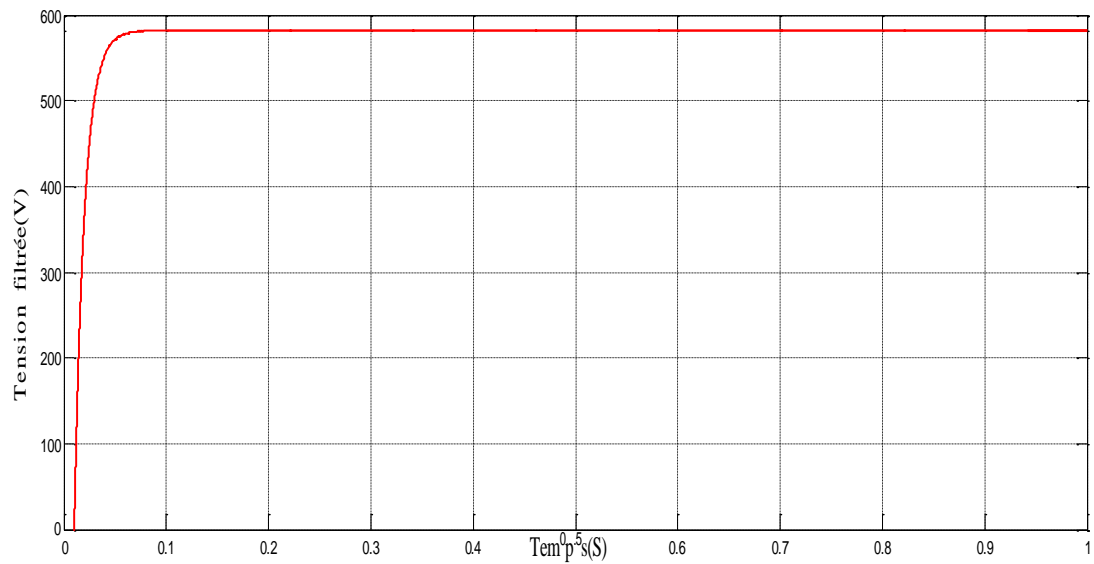


Figure (II.7): Tension filtrée

II.2.3 Modélisation de l'Onduleur pentaphasée :

Au cœur de notre machine à cinq phases, l'onduleur se déploie tel un ensemble de cinq bras, chacun équipé d'interrupteurs électroniques sélectionnés pour leur robustesse et leur capacité à opérer avec agilité au rythme des fréquences. Sur chaque bras, deux complices de puissance, la diode et son jumeau complémentaire, s'alignent en parallèle. Et dans ce monde de l'onduleur, deux héros se distinguent :

- Réflecteur de courant.
- Transformateurs de tension.

Ainsi ; l'onduleur utilisé dans notre travail ; est un onduleur à deux niveaux dont le Schéma structurel est présenté par la figure comme suit :

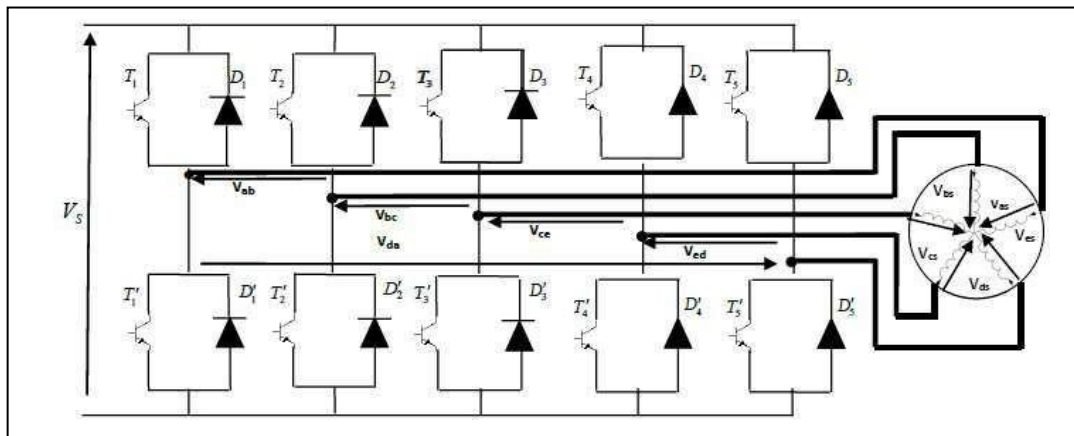


Figure (II.8): Schéma structurel de l'onduleur pentaphasée

Les interrupteurs de chaque bras doivent être commandés de façon complémentaire afin d'éviter le court-circuit de la source d'une part et d'assurer la continuité de l'alimentation de la charge en courant alternatif d'autre part.

II.2.3.1 Hypothèses :

En raison de symétrie des bras de l'onduleur ; on peut simplifier l'étude de ce dernier en Considérant les hypothèses suivantes [6] :

- On néglige la chute de tension aux bornes des interrupteurs.
- La commutation des interrupteurs est supposée instantanée.
- On considère une charge pentaphasée équilibrée couplée en étoile avec un neutre isolé.
- On considère que chaque couple transistor-diode est assimilé à un interrupteur bidirectionnel commandé.

Fonctions de connexion des interrupteurs :

$B_k = \bar{B}'_k$, si seulement l'un des deux est commandé à la fermeture, si non ils peuvent être commandés à l'ouverture au même temps

Avec B_k le signal de la commande du transistor T_k du bras k

Donc, on définit la fonction de connexion de chaque interrupteur TD_k comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci :

$$F_k = \begin{cases} 1 & \text{si } k_k \text{ est fermé et } k'_k \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } k_k \text{ est ouvert et } k'_k \text{ est fermé} \end{cases}$$

Avec : k est le numéro du bras de l'onduleur (k=1, 2, 3, 4, 5)

II.2.3.2 Tensions simples de l'onduleur :

Les tensions entre chaque bras de l'onduleur et le point fictif (O) sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} V_{AO} = V_{AN} + V_{NO} = F_1 \cdot U_{dc} & & V_{AN} = V_{AO} - V_{NO} \\ V_{BO} = V_{BN} + V_{NO} = F_2 \cdot U_{dc} & & V_{BN} = V_{BO} - V_{NO} \\ V_{CO} = V_{CN} + V_{NO} = F_3 \cdot U_{dc} & \longrightarrow & V_{CN} = V_{CO} - V_{NO} \\ V_{DO} = V_{DN} + V_{NO} = F_4 \cdot U_{dc} & & V_{DN} = V_{DO} - V_{NO} \\ V_{EO} = V_{EN} + V_{NO} = F_5 \cdot U_{dc} & & V_{EN} = V_{EO} - V_{NO} \end{aligned} \quad (II.7)$$

Les tensions $V, V_{BN}, V_{CN}, V_{DN}, V_{EN}$ forment un système de tensions pentaphasée équilibré :

$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} + V_{DN} + V_{EN} = 0$ donc:

$$V_{NO} = \frac{V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + V_{DO} + V_{EO}}{5} \quad (II.8)$$

$$V_{AN} = \frac{4V_{AO} - V_{BO} - V_{CO} - V_{DO} - V_{EO}}{5} \quad (II.9)$$

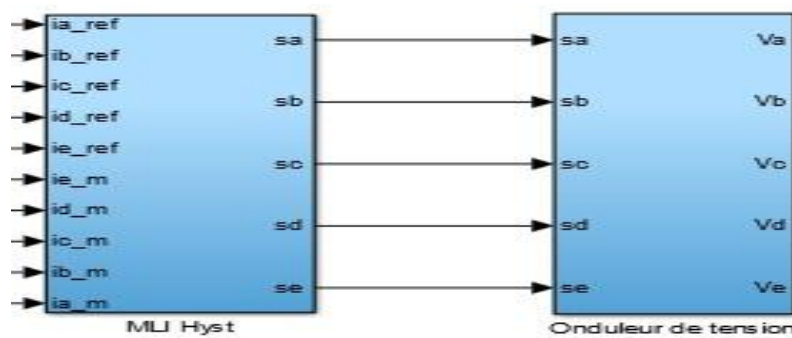
$$V_{BN} = \frac{-V_{AO} + 4V_{BO} - V_{CO} - V_{DO} - V_{EO}}{5} \quad (II.10)$$

$$VCN = \frac{-V_{AO} - V_{BO} + 4V_{CO} - V_{DO} + V_{EQ}}{5} \quad (\text{II.11})$$

$$VDN = \frac{-V_{AO} - V_{BO} - V_{CO} + 4V_{DO} + V_{EQ}}{5} \quad (\text{II.12})$$

$$VEN = \frac{-V_{AO} - V_{BO} - V_{CO} - V_{DO} + 4V_{EQ}}{5} \quad (\text{II.13})$$

Schéma de l'onduleur est présenté par la figure comme suit :



La figure (II.9) est un schéma de simulation de l'onduleur :



Figure (II.10) Schéma bloc de simulation de l'onduleur cinq phases

II.2.3.3 Principe des stratégies de commande :

Le principe de la stratégie de commande de l'onduleur est basé sur le réglage des durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs. Si les commandes sont des tensions, l'onduleur est commandé par la technique triangulo-sinusoidale.[1]

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A faibles fréquences, ils sont pilotés en pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur). A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode). [1]

Si les commandes sont des courants, on utilise un comparateur à hystérésis (stratégie delta).

II.2.3.4 Commande en courant par hystérésis:

C'est une technique très simple à implanter. Elle s'intéresse directement au contrôle du courant.

Le contrôle des courants par hystérésis se fait par la commande des interrupteurs de l'onduleur de sorte que les variations du courant dans chaque phase du moteur soit limité dans une bande d'hystérésis c'est à dire une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence. [1]

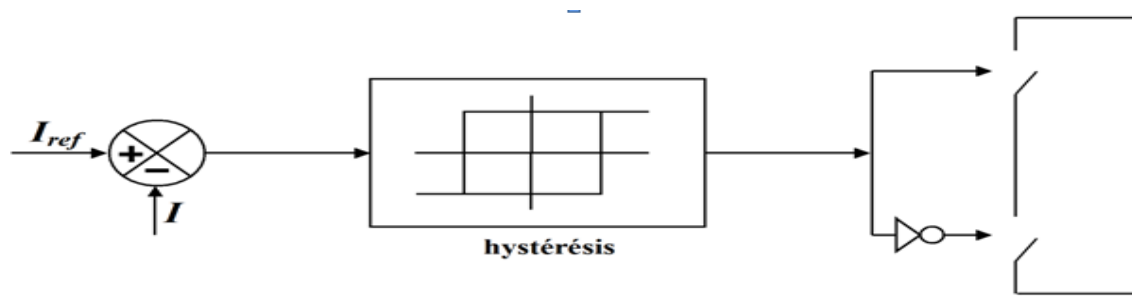


Figure (II.11) Schéma d'illustration pour la commande par hystérésis

II.3 Principe du contrôle par hystérésis:

La commande par hystérésis utilise cinq régulateurs à hystérésis indépendants, un pour chaque phase. Cette méthode consiste à maintenir le courant de chaque phase entre deux limites autour de la référence sinusoïdale.

Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les références des courants. La sortie des comparateurs est reliée à la logique de commande de l'onduleur de manière à imposer une commutation, lorsque le courant s'écarte de la valeur de référence.[1]

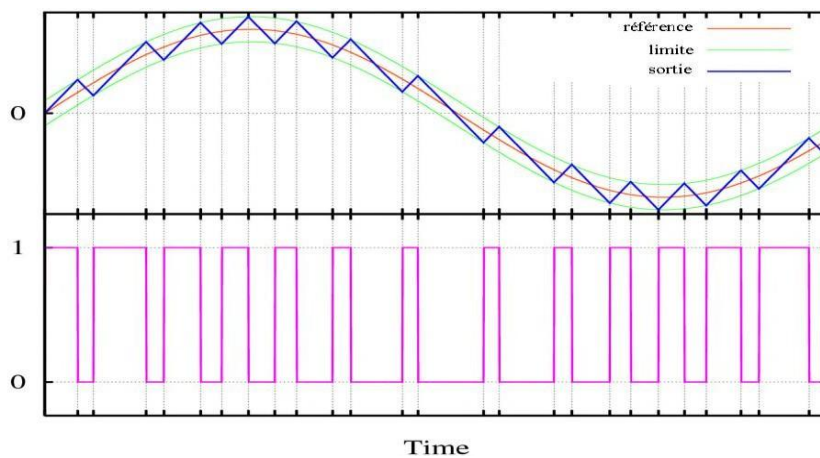


Figure (II.12) Principe de la commande par hystérésis

$$Si \mid I_{ref} - Im \mid < \Delta I \rightarrow S = 1$$

$$Si \mid I_{ref} - Im \mid > \Delta I \rightarrow S = 0$$

I_{ref} : courant de référence

Im : courant réel

Δi : la bande d'hystérésis

II.3.1 Avantages et inconvénients de la commande par hystérésis:

❖ **Avantage:**

- Cette méthode est facile à mettre en œuvre, elle ne dépend pas du type de charge et ne nécessite pas la connaissance des paramètres de la machine. [1]

❖ **Inconvénients:**

- Variation aléatoire de la fréquence de commutation, ce qui peut provoquer des pertes par commutation importantes.
- Cette méthode qui ne prend compte que de l'amplitude du courant, peut conduire à une perte de contrôle des courants réels lors des régimes transitoire, par déphasage de ce si par rapport à leurs références. [1]

II.3.2 Application de la commande par hystérésis à un onduleur associé à un MASP:

Dans cette partie on applique une commande par hystérésis à un onduleur associé à un moteur asynchrone pentaphasée.

De ce fait, les conditions de commutation des cinq commutateurs statiques S_i ($i=a,b,c,d,e$) de l'onduleur sont définies en terme d'états logiques correspondants de la façon suivante:

$$S_i=0 ; \quad si \quad I_i \geq I_{ref} + \Delta I \quad (II.6)$$

$$S_i=1 ; \quad si \quad I_i \leq I_{ref} - \Delta I$$

$$S_i = S_{i-1} ; \quad si \quad I_i = I_{ref}$$

Avec :

I_m ($i=1,2,3,4,5$) : sont les courants des phases statoriques (i_a, i_b, i_c, i_d, i_e).

I_{ref} ($i=1,2,3,4,5$) ; sont les courants de référence issus des circuits de commande des cinq bras de l'onduleur.

Δi : la bande d'hystérésis. Elle est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation

Admissible des semi conducteurs contrôlés et à minimiser suffisamment les Harmoniques des courants. [1]

La figure (II .13) montre comment cela est fait.

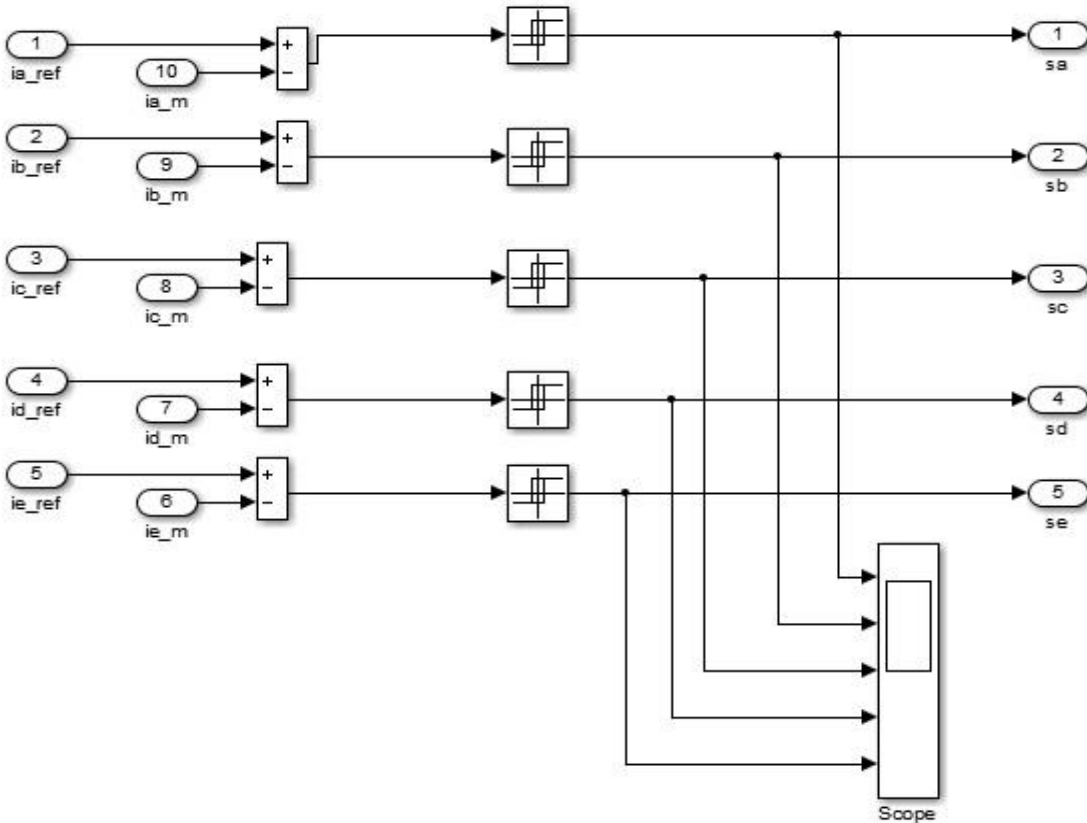


Figure (II.13) commande par hystérésis d'un onduleur

II.4 l'alimentation de la Machine Asynchrone pentaphasée :

II.4.1 Schéma de simulation :

Nous allons simuler l'association alimentation avec la machine asynchrone à cinq phases à vide puis en charge équilibré de fréquence $f = 50\text{Hz}$. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe A.

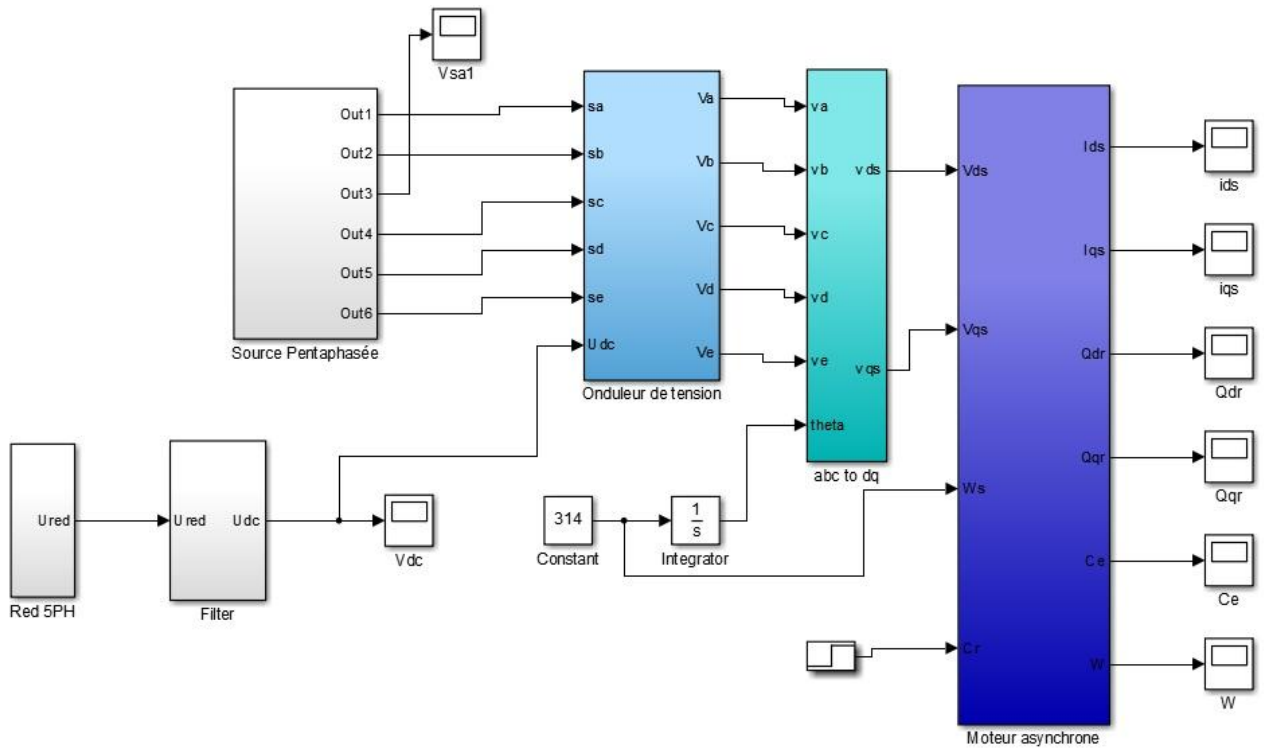


Figure (II.14): Alimentation d'une MASP

II.4.2 Résultats de la simulation:

Les résultats de simulation sont donnés en figure (II.14) , la première partie donne le démarrage l'alimentant de la machine à vide et la deuxième donne le démarrage l'alimentant de la machine en charge .

On insert un couple résistant de valeur nominale de 5N.m à l'instant ($t = 1.5s$).

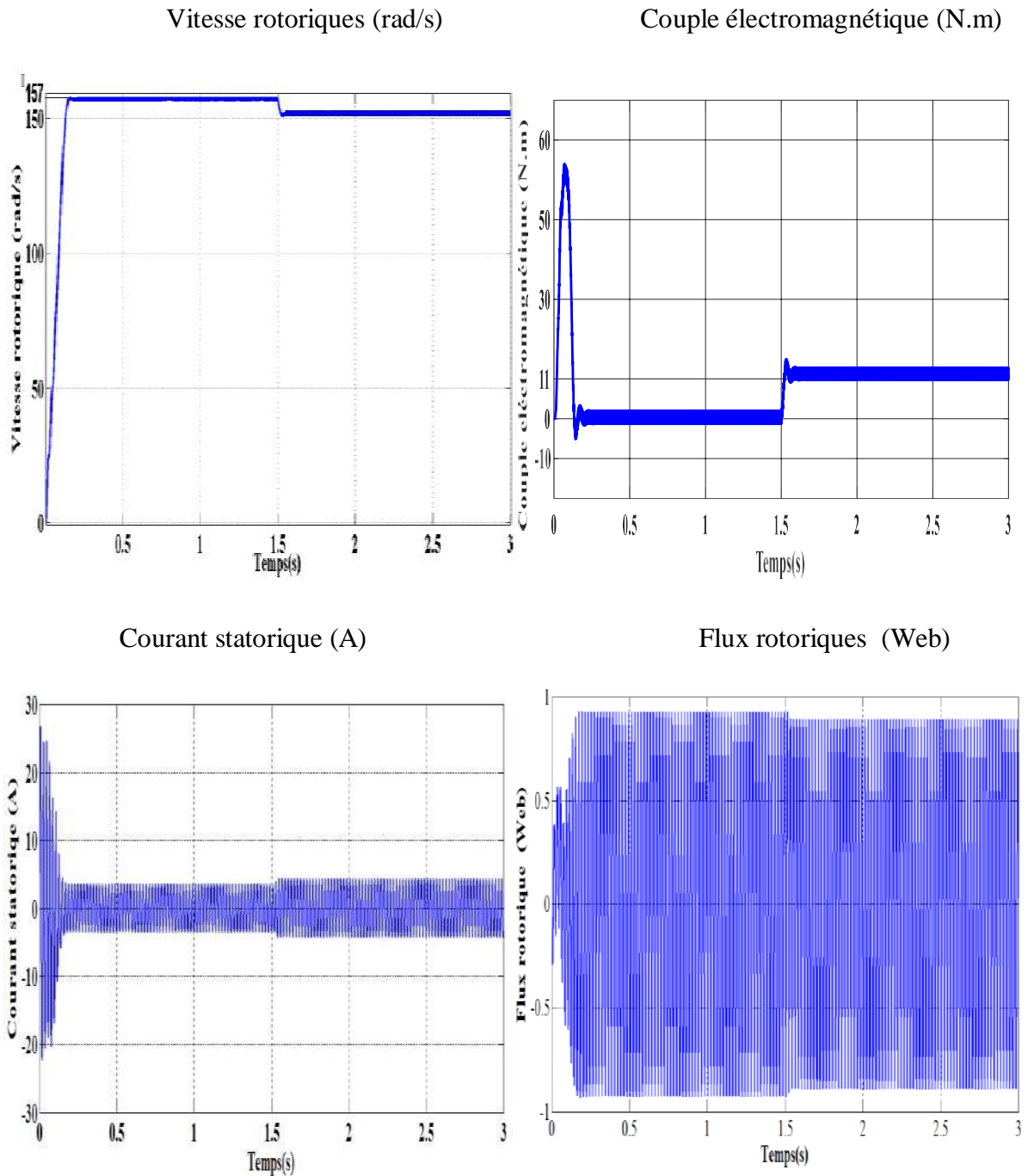


Figure (II.15): démarrage l'alimentant de la machine à vide suivi par une variation de charge à l'instant $t=1.5s$

II.4.3 Interprétation des résultats :

Lors du **démarrage à vide**, la vitesse de la MASP augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur proche de la vitesse de synchronisme (environ 157 rad/s). Ce comportement correspond à une accélération naturelle de la machine due à l'absence de couple résistant.

Le **couple électromagnétique** présente des oscillations pendant la phase transitoire, caractéristiques d'un régime non encore stabilisé, puis tend vers une valeur quasi nulle, cohérente avec l'absence de charge.

Les **flux statoriques et rotoriques** affichent des formes sinusoïdales avec des amplitudes stables, illustrant le bon fonctionnement magnétique de la machine. Les **courants statoriques** montrent des pics transitoires à l'initiation, qui s'atténuent au fur et à mesure que la vitesse se stabilise.

Lors de l'application d'un **couple résistant nominal** ($C_r = 5 \text{ N}\cdot\text{m}$) à $t = 1,5 \text{ s}$, une chute temporaire de la vitesse est observée, suivie d'un retour à une nouvelle valeur d'équilibre inférieure.

Le **couple électromagnétique** augmente pour compenser la charge, atteignant une valeur proche de C_r . Les courants statoriques voient leur amplitude augmenter, ce qui traduit une **augmentation de la consommation d'énergie** pour compenser l'effort mécanique.

Enfin, des **ondulations résiduelles** sur les courants et le couple sont observées. Elles résultent de la nature **hachée** de l'alimentation par l'onduleur MLI, qui introduit des **harmoniques d'ordre supérieur** affectant la qualité des signaux, un effet classique dans les systèmes PWM.

II.3 Conclusion :

Ce chapitre a présenté la **modélisation complète de la chaîne d'alimentation pentaphasée** de la MASP, incluant le redresseur, le filtre RLC et l'onduleur de tension. Chaque composant a été analysé individuellement, puis intégré dans un modèle global simulé sous Matlab/Simulink.

Nous avons ensuite appliqué différentes conditions de fonctionnement à la machine (à vide et en charge).

Les résultats obtenus ont confirmé la **cohérence dynamique** du modèle, mettant en évidence le rôle de chaque élément de l'alimentation dans la stabilité de la machine. La **commande MLI** a permis un contrôle efficace de la tension de sortie, mais a également révélé l'influence des harmoniques sur le couple et les courants.

Afin d'améliorer encore la **précision du contrôle de la MASP**, le prochain chapitre sera consacré à la **commande vectorielle indirecte**, une stratégie avancée permettant de découpler le contrôle du flux et de la vitesse, pour une performance optimale dans les régimes transitoires et stationnaires.

CHAPITRE III :
**Commande vectorielle
indirect de la machine
asynchrone
pentaphasée**

III.1 Introduction :

Ce chapitre a permis de valider la faisabilité et l'efficacité de la **commande vectorielle indirecte appliquée à la MASP**.

Les résultats de simulation montrent un bon suivi de la vitesse, un découplage clair flux/couple, et une réponse dynamique satisfaisante.

Toutefois, la **sensibilité aux paramètres rotoriques** reste une limitation notable. Pour renforcer la robustesse du système, l'intégration d'un **estimateur adaptatif de flux** ou d'une **commande prédictive** pourrait être envisagée dans des travaux futurs.

III.2 Principe de la commande vectorielle à flux orienté:

L'examen de l'expression du couple de la machine asynchrone montre qu'elle résulte d'une différence de produits de deux composantes en quadrature, des flux rotoriques et des courants statoriques qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine. L'objectif de la commande par orientation du flux est le découplage des grandeurs responsables de la magnétisation de la machine et de la production du couple.

La loi de la commande vise à transformer un système initial présentant un double non linéarité structurelle en un système linéaire, assurant ainsi une indépendance entre la génération du flux et la production du couple, similaire au fonctionnement d'une machine à courant continu à excitation séparée. La commande par orientation du flux implique le réglage du flux à l'aide d'une composante de courant et du couple à l'aide d'une autre composante. Ce processus nécessite l'adoption d'un système de coordonnées « d, q ».

Un choix judicieux de l'angle d'orientation du repère « d, q » entraîne l'alignement de l'axe « d » sur la résultante du flux, cet alignement permet l'annulation de la composante transversale du flux comme l'indique dans la figure (III.1).

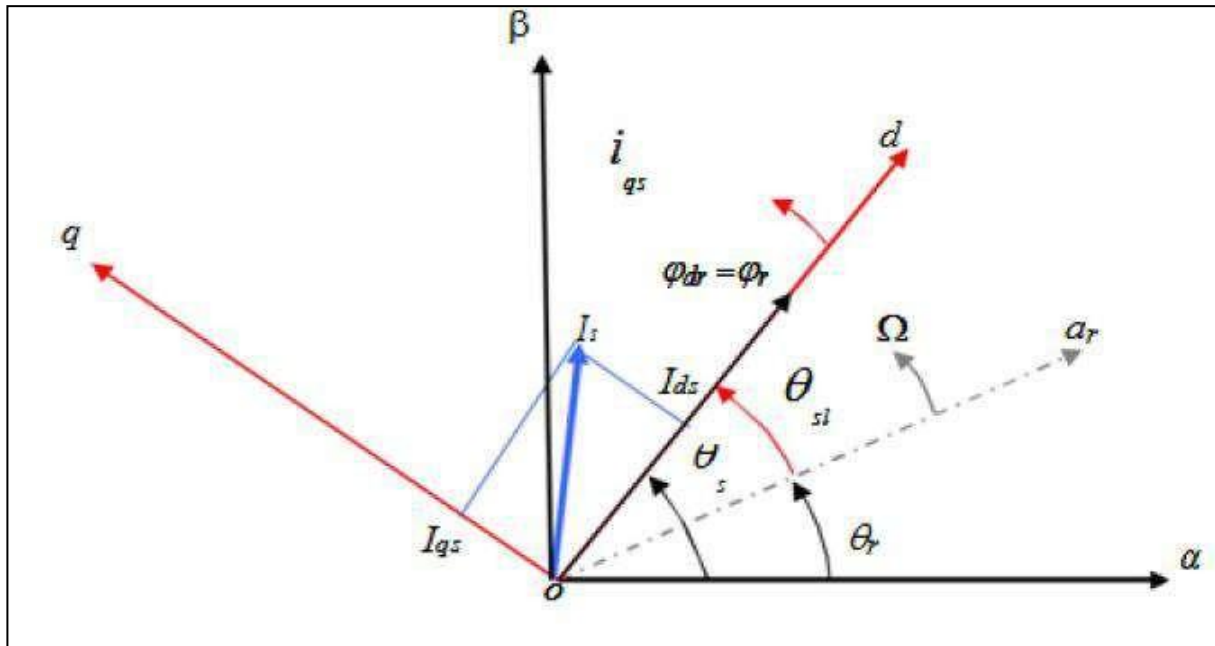


Figure (III.1) : Orientation du flux rotoriques.

Le choix des axes d'orientation peut être fait selon l'une des directions des flux de la machine à savoir le flux rotoriques, statoriques ou d'entrefer.

- Orientation du Flux rotoriques : $\phi_{dr}=\phi_r$ et $\phi_{qr}=0$
- Orientation du flux statoriques : $\phi_{ds}=\phi_r$ et $\phi_{qs}=0$
- Orientation du Flux d'entrefer : $\phi_{ed}=\phi_r$ et $\phi_{eq}=0$

Dans ces trois cas le couple électromagnétique est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statoriques en quadrature avec le flux. L'orientation du flux du rotor influe sur la génération d'un couple de démarrage significatif et requiert la compréhension des paramètres du rotor.

III.3 Types de la commande vectorielle:

Pour la réalisation de la commande vectorielle d'une machine asynchrone, il existe deux méthodes :

- Directe qui a été développé par F. Blaschke.
- Indirecte développée par k. Hasse.

III.3.1 Commande vectorielle directe:

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module de flux et de sa position.

Pour cela deux procédés sont utilisés :

- Mesurer le flux dans l'entrefer de la machine à l'aide d'un capteur.
- Estimer le flux à l'aide de méthodes mathématiques.

L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes :

- Le non fiabilité de la mesure du flux :
 - Difficulté à filtrer le signal mesuré.
 - Précision de la mesure altérée par les variations de température (échauffement de la machine) et de saturation.
- Le coût de production élevé (capteur + filtre).

III.3.2. Commande vectorielle indirecte:

Cette méthode n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotoriques mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor les deux groupes principaux :

- Le vecteur de flux rotoriques est déterminé de manière indirecte à partir des mesures des courants et des tensions au stator.
- Le vecteur de flux rotoriques est estimé en utilisant les mesures des courants statoriques et la vitesse du rotor, en appliquant les équations du circuit rotoriques d'un moteur asynchrone dans un système de référence tournant synchronisé avec le vecteur de flux rotoriques.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotoriques T_r . En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué [10].

Dans ce qui suit, nous appliquons la commande vectorielle indirecte à la machine asynchrone alimentée par l'onduleur à trois niveaux.

III.4 Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone à cinq phases:

A. Modèle linéaire MAS à cinq phases

L'équation (I.19) donne le couple électromagnétique en termes de liaisons de flux qui est similaire à l'équation pour les machines à courant continu. Supposons que le flux du rotor les liaisons dans le cadre de référence à rotation synchrone est entièrement dans l'axe de sorte que $\phi_{qr} = 0$ L'équation de couple (I.19) est alors réduite à :

$$T_e = \frac{5P}{2} \frac{L_m}{L_r + L_m} [\phi_r^s i_d^s] \tag{III.1}$$

Cette équation est similaire à l'équation d'une machine shunt à courant continu. Ainsi, le couple et le flux du rotor peuvent être contrôlés indépendamment en régulant les composantes d et q du courant du stator ainsi que la fréquence de glissement avec la contrainte de $\phi_{qr}^s = 0$. [7]

Les valeurs commandées de couple et de flux rotor sont obtenues à partir des équations suivantes :

$$I_{ds}^* = \frac{4}{5P} \frac{L_r}{L_m} \frac{T_e^*}{\phi_{ds}^*} \tag{III.2}$$

$$I_{ds}^* = \frac{1}{L_m} \phi_r^* \tag{III.3}$$

$$s_{ws} = \frac{4}{5P} R_r \frac{T_e}{\phi_{ds}^*} \tag{III.4}$$

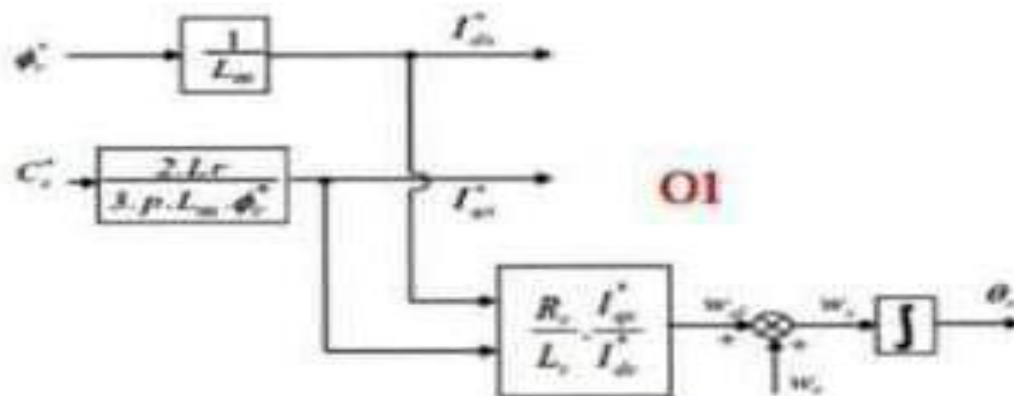


Schéma bloc de l'orientation du flux rotorique

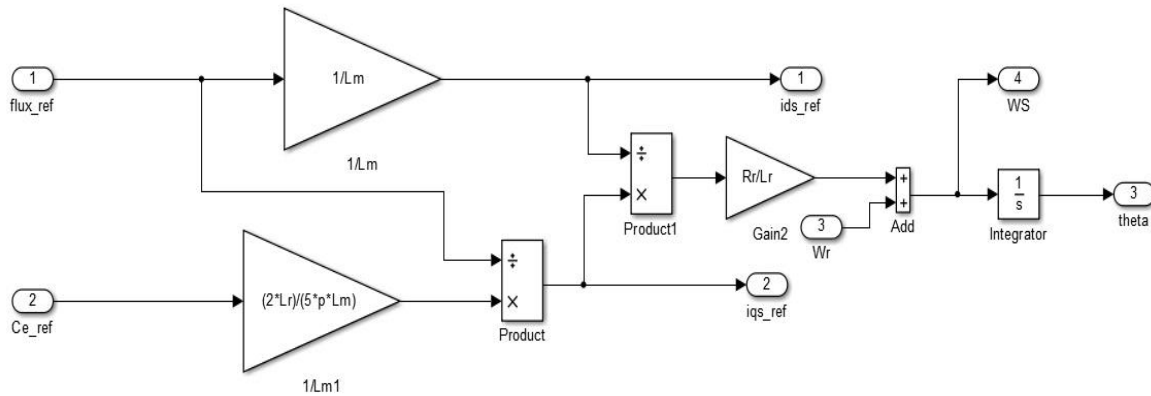


Figure (III.2) : Bloc Simulink Orientation du flux rotoriques.

III.5. Calcul des coefficients des régulateurs :

Le schéma bloc de la commande vectorielle présente Orientation du flux rotoriques, un régulateur de vitesse. Dans ce qui suit-on calculera le coefficient de la régulateur par la méthode de compensation de pôles ou par imposition de pôles [14].

III.5.1 Régulateur de vitesse

A partir de l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f.\Omega \tag{III.4}$$

On peut déduire la relation de la vitesse :

$$\Omega = \frac{C_{em} - C_r}{J.s + f} \tag{III.5}$$

La figure ci-dessous représente la boucle de régulation de la vitesse.

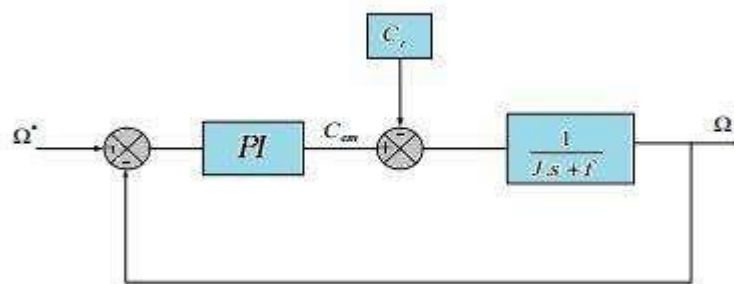


Figure (III.3): Régulation de vitesse en boucle fermée.

Lorsqu'on utilise le régulateur PI la vitesse peut être écrite :

$$\Omega = \frac{1}{J.s+f} \frac{K_p s K_i}{s} (\Omega^* - \Omega) - \frac{C_r}{J.s+f} \quad (\text{III.6})$$

Soit :

$$\Omega = \frac{\frac{K_p}{K_i s+1}}{\frac{J}{K_i s} + \frac{K_p+1}{K_i s+1}} \Omega^* - \frac{\frac{s}{K_i}}{\frac{J}{K_i s} + \frac{K_p+1}{K_i s+1}} C_r \quad (\text{III.7})$$

La relation de la vitesse est une fonction de transfert de 2^{ème} ordre.

Donc on peut écrire le dénominateur par la forme canonique suivante :

$$\frac{1}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1} \quad (\text{III.8})$$

On trouve :

$$\begin{cases} K_i = J \omega_n^2 \\ K_p = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot J - f \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Pour la simulation on choisit : l'amortissement critique $\zeta = 1$ et une pulsation $\omega_n = 17$ rad/s

On utilise le filtre $\frac{1}{1+\tau.s}$ Pour éliminer le dépassement dans la vitesse.

Le schéma de principe présenté dans la figure III.4 illustre la structure de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone pentaphasée.

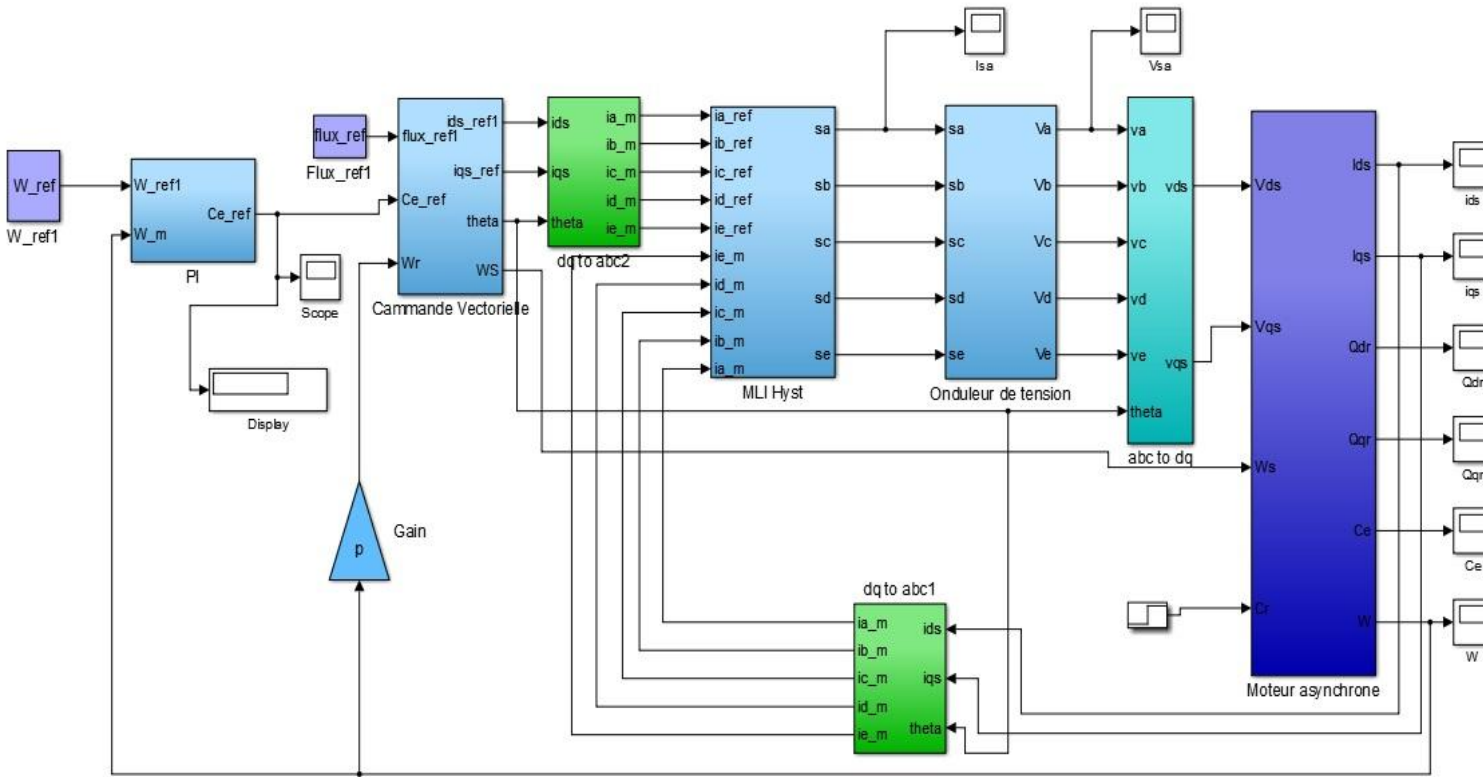


Figure (III.4): Schéma global de la commande vectorielle indirecte appliquée à la MASP.

III.6 Résultats et Interprétation de simulation :

Dans cette section, nous allons simuler la commande vectorielle directe d'un Moteur Asynchrone à Simple Puits (MASP) alimenté par un onduleur à deux niveaux. La simulation est réalisée avec les paramètres suivants : débit de référence de 1,2 Weber, vitesse de référence de 100 rad/s. Nous effectuerons les tests suivants :

III.6.1 Essai à vide:

Les résultats de simulation des changements de charge sont présentés dans la Figure

III.6. Au début du test, la vitesse de référence est égale à 100rad/s.

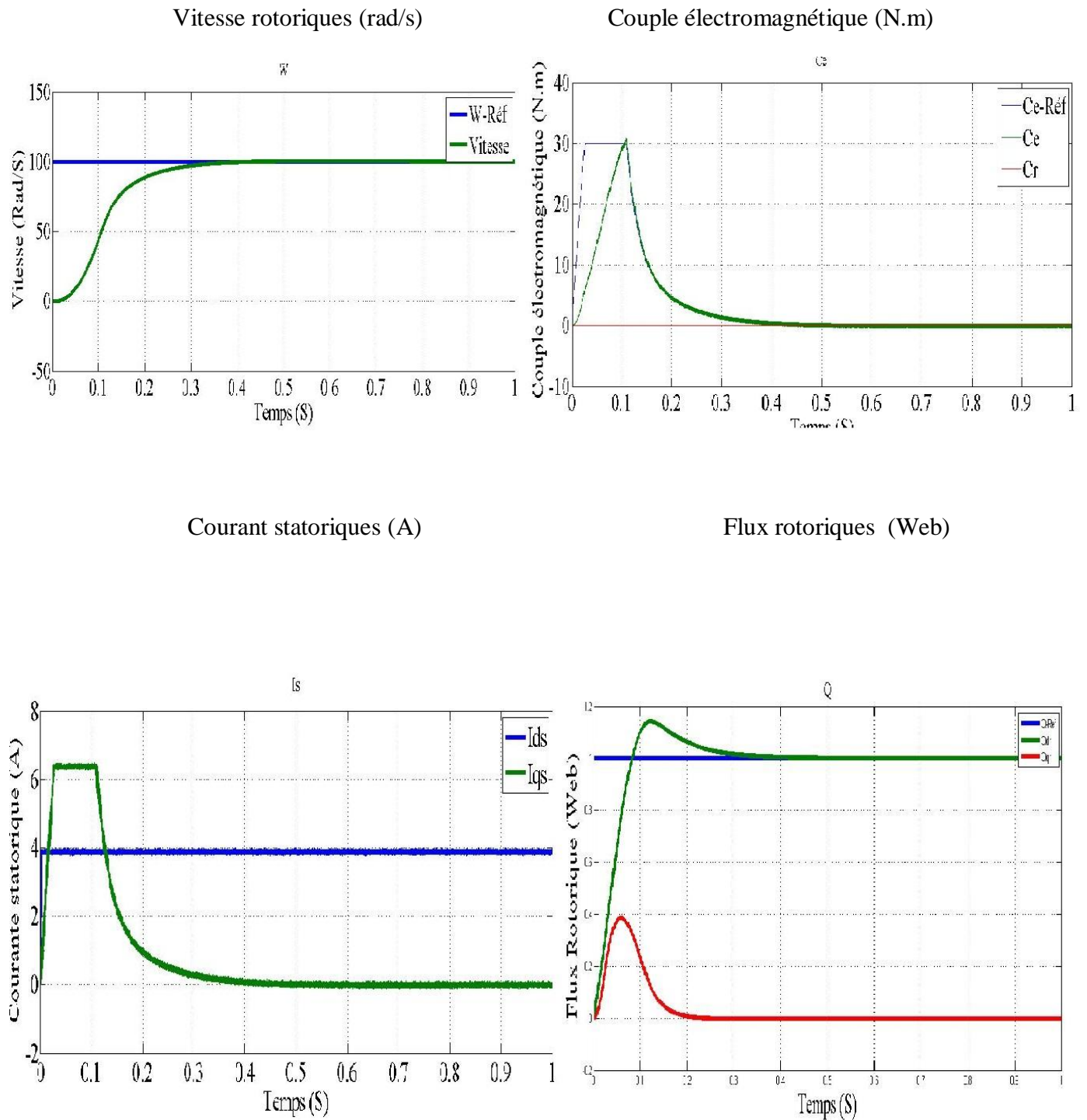


Figure (III.5) Résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée au MAS pour un fonctionnement a vide.

III.6.2 Essai en charge :

Les résultats de simulation des changements de charge sont présentés dans la Figure

III.7. Au début du test, la vitesse de référence est égale à 100rad/s et un couple de charge d'une valeur de 10Nm est appliqué à 0,5s.

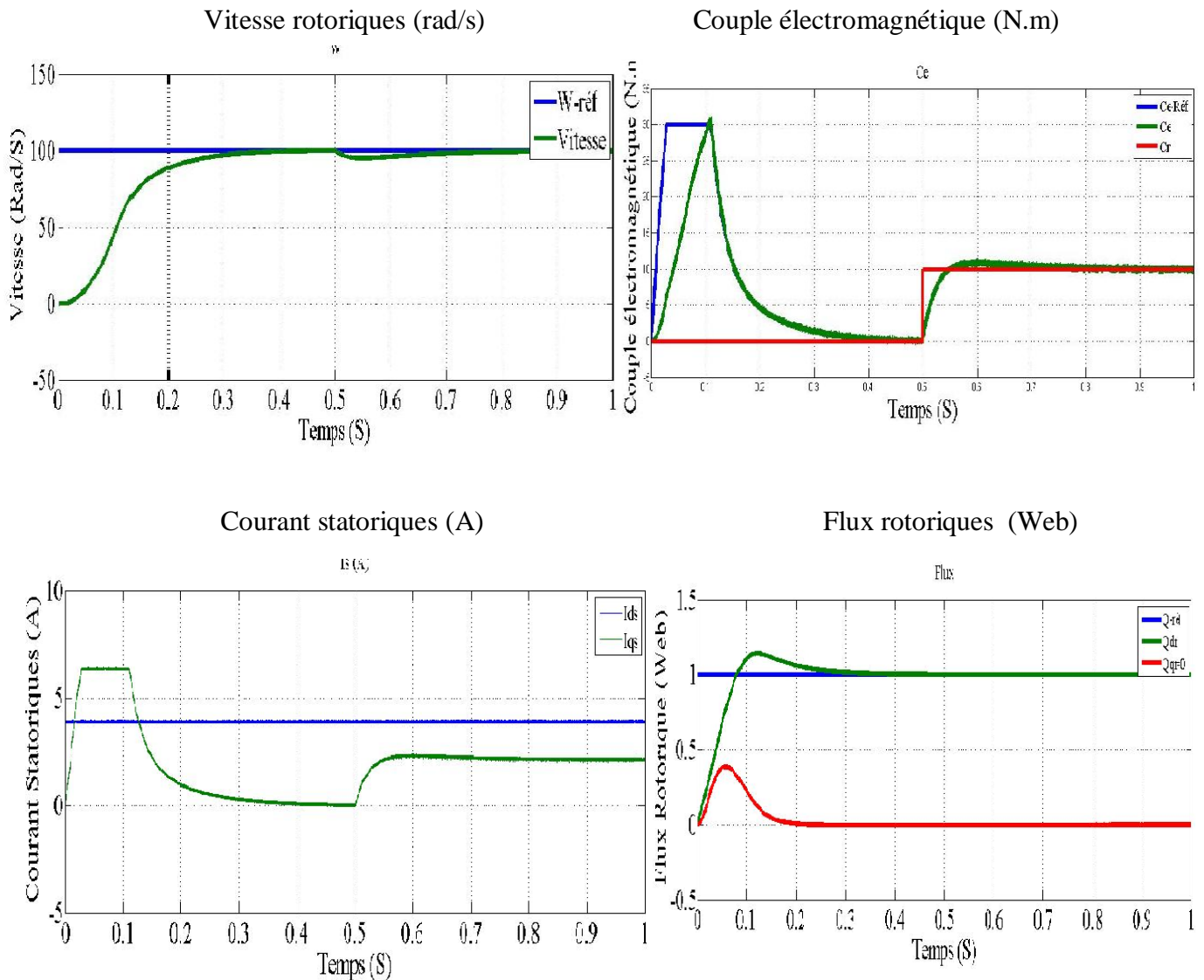


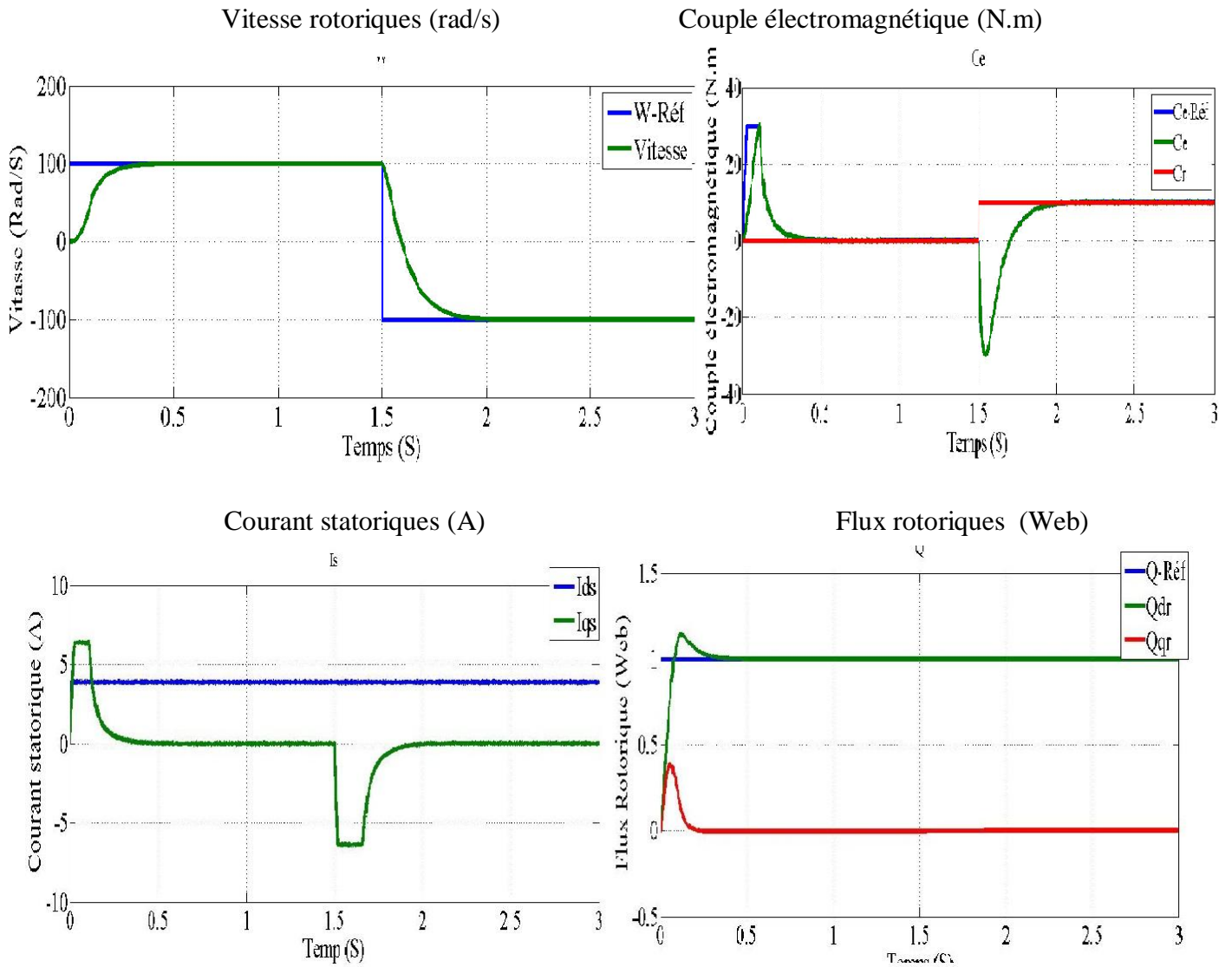
Figure (III.6) Résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée au MAS pour un fonctionnement en charge.

III.6.3 Interprétation des résultats:

Lors de l'application d'un couple de charge de 10 Nm à $t = 0,5$ s, on observe une chute temporaire de la vitesse, suivie d'une reprise rapide à la valeur de consigne (100 rad/s), traduisant l'efficacité du régulateur de vitesse. Le courant statorique quadrature augmente proportionnellement au couple, tandis que la composante directe reste stable, validant le **découplage entre flux et couple**. Le couple électromagnétique présente une réponse rapide avec un léger dépassement, caractéristique d'une **commande bien réglée**.

III.6.4 Essai en charge avec variation de vitesse

La figure III.8 présente les résultats de simulation obtenus pour la variation de la vitesse. Dans les premiers instants de ce test, la vitesse de référence est de 100rad/s pour un fonctionnement en charge. À l'instant 1.5s, on fait tourner la machine en sens inverse à -100rad/s, à l'instant $t=1.5s$.



(III.7) Résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée au MAS pour un fonctionnement en charge avec variation de vitesse

III.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser le comportement de la Machine Asynchrone à Cinq Phases (MASP) sous deux scénarios d'alimentation distincts : d'une part, via un réseau pentaphasé idéal, et d'autre part, à travers une chaîne de conversion statique comprenant un redresseur triphasé, un filtre RLC, et un onduleur pentaphasé commandé en MLI par hystérésis.

Les résultats de simulation ont montré que l'onduleur MLI est capable de fournir à la MASP des tensions de sortie **quasi sinusoïdales**, permettant une régulation correcte de la **vitesse**, du **couple électromagnétique** et des **flux**, avec des performances proches de celles obtenues avec une alimentation idéale. Les **légères distorsions** observées, dues aux **harmoniques générées par la modulation**, restent acceptables et n'ont pas d'impact significatif sur le fonctionnement global de la machine.

Ces résultats confirment la **validité du modèle de commande** et de la chaîne d'alimentation proposée, tout en ouvrant la voie à des optimisations futures : notamment en intégrant des **techniques de réduction d'harmoniques** (filtres actifs, modulation vectorielle...), ou en explorant des **méthodes de commande plus robustes** comme la commande prédictive ou adaptative pour améliorer la stabilité en régime variable.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'étudier en profondeur la **modélisation, l'alimentation et la commande vectorielle** d'une **machine asynchrone pentaphasée (MASP)**.

L'objectif principal était de démontrer l'intérêt de cette structure multiphasée dans des applications industrielles, en validant par simulation les performances dynamiques et électromagnétiques de la machine. Dans un premier temps, nous avons élaboré un **modèle mathématique complet** de la MASP, en partant de sa représentation dans la base naturelle, puis en la simplifiant à l'aide de **transformations de Park adaptées au système pentaphasé**. Cette modélisation a permis de mettre en évidence la structure du couple et des flux, ainsi que les avantages du découplage dans les axes (d-q).

Ensuite, nous avons développé la **chaîne d'alimentation électrique** complète de la MASP, incluant le **redresseur triphasé**, le **filtrage RLC** et l'**onduleur de tension pentaphasé** commandé en **MLI par hystérésis**. Les simulations ont confirmé la capacité de ce système à fournir une alimentation fiable et quasi sinusoïdale, tout en prenant en compte les contraintes pratiques liées aux harmoniques et aux ondulations.

Enfin, l'application d'une **commande vectorielle indirecte avec orientation du flux rotorique** a démontré l'efficacité de cette méthode pour **découpler le contrôle du couple et du flux**, assurant ainsi une régulation fine de la vitesse, même en présence de variations de charge. Les résultats obtenus montrent que la commande vectorielle permet de reproduire un comportement proche de celui d'une **machine à courant continu**, tout en profitant de la robustesse et du rendement d'un système asynchrone multiphasé.

Ce travail confirme le **potentiel industriel de la MASP**, notamment dans les systèmes exigeants en termes de fiabilité, redondance et performance dynamique. Toutefois, certaines limites ont été identifiées, notamment la **sensibilité aux variations de paramètres machine** (comme la constante de temps rotorique) et la **présence d'harmoniques** introduites par la MLI.

Parmi les perspectives de ce travail, on peut envisager :

- L'intégration d'**estimateurs adaptatifs de flux** ou de **techniques d'observation** plus robustes.
- L'exploration d'autres stratégies de commande : **commande prédictive**, **commande par logique floue** ou **intelligence artificielle**.
- L'étude expérimentale sur banc réel, pour valider les résultats obtenus en simulation.

En conclusion, la machine asynchrone pentaphasée, bien modélisée et convenablement commandée, représente une solution performante et fiable pour les applications industrielles modernes, et mérite d'être explorée plus largement en recherche et développement.

Référence Bibliographie

- [1] Commande de vitesse par backstepping d'une machine asynchrone à cinq phases Université d'Ouargla, 2024
- [2] M.F. BENKHORIS, M. MERABTENE, F. MEYBODY-TABAR, B. DAVAT, E.SEMAIL, «Approches de Modélisation de la Machine Synchrone Double Étoile Alimentée par des Onduleurs de Tension en Vue de la Commande», RIGE, pages 5-6, vol.6, 2003.
- [3] B. Nour el islam et B. Mimouna, «Commande par backstepping d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à trois niveaux.», Thèse de master académique, Université de Ouargla, 2017
- [4] Alia Salim, GueddaSmail- «Commande Vectorielle d'une Machine à Induction»Thèse de MASTER EN GENIE ELECTRIQUE, Université EchahidHamma Lakhdar d'El-Oued, Soutenu en Mai 2018
- [5] B. Boubakr, «Commande vectorielle d'une machine asynchrone polyphasée alimentée par onduleur à trois niveaux avec une application sur la Machine Heptaphasée » mémoire de Magister en automatique à l'école nationale polytechnique, Alger, Octobre 2010.
- [6] B. Walid H. Lamnaouar et H. Houari, «Commande de la machine a induction par technique MRAS », Mémoire d'ingénieur, Université Msila, 2007.
- [7] A. Bennaskeur « Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires », Thèse Ph.D, Univ Laval Quebec, Fevrier 2000.
- [8] F. Kadri, «Développement d'une commande intelligente d'un moteur à induction alimenté par un onduleur de tension PWM. »Thèse de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [9] P.Krishnamurthy, F.Khorrami, "Adaptative Partial-State Feedback Control for Induction Motors, American control conference, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.
- [10] Z. Mohamed et Z. Lounis. «Modélisation d'une machine asynchrone pentaphasée. »Mémoire de Master en génie électrique, université de Tizi-Ouzou. Octobre 2015.
- [11] Mehenni hicham ,Mouhoub addellatif Commande d'une machine asynchrone pentaphasée alimentée par un convertisseur matriciel indirect). Thèse de master Université A/Mira de Bejaia- 2017
- [12] NEKMOUCHE YOUNES, MOUSSAOUI BACHIR «Modélisation des moteurs asynchrones polyphasés, dédiée au diagnostic de courts-circuits inter- spires.Application aux moteurs pentaphasée et double étoile» Thèse de Magister ENGENIE ELECTRIQUE, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-

- [13] E. ROBERT-DEHAULT. « Modélisation Dynamique, Commande et Conception de Machines Pentaphasées Alimentées par des Onduleurs MLI », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Université de Nantes. Juin. 2005.

- [14] M.F. BENKHORIS, M. MERABTENE, F. MEYBODY-TABAR, B. DAVAT, E.SEMAIL, «Approches de Modélisation de la Machine Synchrone Double Étoile Alimentée par des Onduleurs de Tension en Vue de la Commande», RIGE, pages 5-6, vol.6, 2003.

- [15] H, Tamrabet, "Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une Machine Asynchrone." Thèse de magister, université de Batna 2006.

Annexe :

Paramètres de la Machine asynchrone pentaphasée :

❖ PARAMETRES ELECTRIQUES :

$R_s = 4.85\Omega$Résistance du stator

$R_r = 3.805\Omega$Résistance du rotor

$L_r = 0.274H$ Inductance du stator

$L_s = 0.274H$ Inductance du rotor

$L_m = 0.258H$ Inductance mutuelle

$P=1.08KW$ Puissance électrique

$v_s= 220 /380V$Tension du stator

❖ PARAMETRES MECANIQUES :

$J = 0.031Kgm^2$ Moment d'inertie

$f = 0.0014$Coefficient de frottement

❖ PARAMETRES ELECTOMAGNETIQUES :

$C_{em}=5Nm$Couple électromagnétique

$p= 2$Nombre de paire de pôles