

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présente par :

Dabouz Idris

Djebali Abdessalam

Thème :

**Commande optimale d'une machine  
asynchrone polyphasée**

Soumis au jury composé de :

Mr. Bouhafs Ali	Président	UKM Ouargla
Mr. Zahir Ider	Encadreur	UKM Ouargla
Mr. Djamel Taibi	Co-Encadreur	UKM Ouargla
Mr. Bourek Yacine	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2023

---

## REMERCIEMENT

*Ce travail. Nous remercions avant tout Allah tout  
Puissant, pour m'avoir donné la santé et la force pour  
Accomplir*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de*

*Mémoire, monsieur Zahir Ider et monsieur Djamel Taibi*

*Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs,*

*Intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits,*

*Leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de*

*Me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.*

---

---

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à  
Mes très chers parents, pour leurs sacrifices,  
Et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Allah nous  
les garde.

Ma grand-mère qui Allah le garde

Mes très chers frères

Mes très chères sœurs

Toute ma famille

Tous mes amis de l'Université

Et tous mes amis de vue

Et tous chacune par son nom

Abdessalam & Idris

---

### Résumé

Les machines asynchrones polyphasées, dotées d'un nombre de phases supérieur à trois, présentent une alternative attrayante pour réduire les contraintes exercées sur les interrupteurs et les bobinages de la machine. Cette augmentation du nombre de phases permet une répartition plus équilibrée de la puissance, ce qui entraîne une réduction des tensions commutées pour un courant donné. De plus, ces machines permettent de diminuer l'amplitude et d'augmenter la fréquence des ondulations de couple. Cette caractéristique offre l'avantage d'une filtration plus facile des ondulations de couple par la charge mécanique, améliorant ainsi les performances globales de la machine. En exploitant un plus grand nombre de phases, les machines asynchrones polyphasées offrent donc une meilleure efficacité, une réduction des contraintes et une qualité de sortie améliorée.

Dans cette étude, nous aborderons la modélisation d'une machine asynchrone à cinq phases, puis nous appliquerons la commande vectorielle et optimiserons les résultats à l'aide de la commande prédictive MPC afin d'obtenir une performance optimale de la machine.

### Abstract

Polyphase asynchronous machines, with a number of phases greater than three, present an attractive alternative for reducing the stresses exerted on the switches and windings of the machine. This increase in the number of phases allows for a more balanced distribution of power, which results in reduced switched voltages for a given current. In addition, these machines make it possible to reduce the amplitude and increase the frequency of the torque ripples. This feature provides the benefit of easier filtration of torque ripples by the mechanical load, improving overall machine performance. By exploiting a larger number of phases, multiphase asynchronous machines therefore offer better efficiency, reduced stress and improve output quality.

In this study, we will approach the modeling of a five-phase asynchronous machine, then we will apply vector control and optimize the results using the predictive control MPC in order to obtain an optimal performance of the machine.

**Key word:** asynchronous machine, Field oriented control, predictive control .

---

SOMMAIRE

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée</b>	
<b>I.1. Généralités sur les machines polyphasée .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.1 Types des machines polyphasée .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1.2. Caractéristiques des machines asynchrones polyphasées .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1.3. Description de la MAS polyphasée .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1.4. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2. Modèle général de la machine asynchrone pentaphasée .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1. Hypothèses simplificatrices .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.2. Equations électriques .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3. Equations de flux statorique et rotorique .....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.4. Equation mécanique .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.5. Transformation de Park .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3. Application de la transformation de Park à la MASP .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.1. Equations de tension .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.2. Equations de flux .....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3. Equation du couple électromagnétique .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.1. Onduleur pentaphasée .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.2. Modélisation de l'onduleur de tension .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5. Commande des onduleurs .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.1. Principe des stratégies de commande .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.2. Commande en courant par hystérésis .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.3. Principe de la commande par hystérésis .....</b>	<b>12</b>
<b>I.5.4. Avantages et inconvénients de la commande par hystérésis .....</b>	<b>12</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>13</b>

---

**Chapitre II :**  
**Commande avancée pour des performances optimales de la machine asynchrone à cinq phases**

<b>II.1. Commande vectorielle par orientation du flux.....</b>	<b>15</b>
<b>II.1.1. Choix d'orientation de flux .....</b>	<b>16</b>
<b>II.1.2. Commande vectorielle à flux rotorique orienté.....</b>	<b>16</b>
<b>II.1.3. Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone à 5 phases .....</b>	<b>17</b>
<b>II.2. Commande optimale .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.1. Généralité sur la commande optimale .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.2. Définition de la commande optimale .....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.3. La commande optimale dans le domaine des machines électriques .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.4. Avantages et inconvénients de la commande optimale .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.5. Type de la commande optimale .....</b>	<b>20</b>
<b>II.3. MPC : Model Prédictive Control.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3.1. Avantages et inconvénients de la commande MPC .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.2. Applications de MPC.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.3. Philosophie et la stratégie de la commande prédictive.....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.4. Schéma la commande prédictive MPC à MAS .....</b>	<b>24</b>
<b>II.4. Les équations de la commande MPC et le critère d'optimisation .....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.1. Calcul des signaux de la commande de tension .....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.2. Calcul des composantes alpha et bêta du vecteur de tension.....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.3. Estimation du flux statorique (Fs) .....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.4. Prédiction du flux statorique .....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.5. Prédiction du courant statorique .....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.6. Prédiction du couple.....</b>	<b>26</b>

---

II.4.7. Calcul du critère d'optimisation .....	26
II.4.8. Le critère d'optimisation .....	26
II.5. L'algorithme de la commande MPC .....	27
Conclusion .....	29

**Chapitre III :**  
**Commandes optimales d'une machine asynchrone polyphasée (cinq phases)**

III.1. Alimentation de la MASP par un réseau pentaphasée .....	31
III.1.1. Schémas d'une MASP alimenté par un réseau pentaphasée.....	31
III.1.2. Résultats de la simulation .....	32
III.1.3. Interprétation des résultats .....	33
III.2. Application de la commande vectorielle à MAS pentaphasée .....	33
III.2.1. Schéma de simulation de la commande vectorielle.....	34
III.2.2. Résultats de la simulation .....	34
III.2.3. Interprétation des résultats .....	35
III.3. Application de la commande prédictive MPC à MAS pentaphasée .....	35
III.3.1. Simulation de la commande prédictive MPC à MAS pentaphasée.....	36
III.3.2. Résultats de la simulation .....	36
III.3.3. Interprétation des résultats .....	37
III.4. Comparaison entre la commande vectorielle et la commande MPC .....	37
III.4.1. Simulation de la commande prédictive MPC à MAS pentaphasée.....	37
III.4.2. Résultats de la simulation .....	38
III.4.3. Interprétation des résultats.....	39
Conclusion.....	40
Conclusion générale.....	41

---

**Listes De Figures**

**Figures du chapitre I**

<b>Figure (I.1)</b> : Schéma d'une machine asynchrone pentaphasée.....	5
<b>Figure (I.2)</b> : Schéma de principe de l'onduleur de tension pentaphasée .....	10
<b>Figure (I.3)</b> : Schéma d'illustration pour la commande par hystérésis.....	12

**Figures du chapitre II**

<b>Figure (II.1)</b> : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer) .....	16
<b>Figure (II.2)</b> : schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation $\omega$ .....	18
<b>Figure (II.3)</b> : Philosophie de la commande prédictive.....	24
<b>Figure (II.4)</b> : schéma de la commande prédictive de MASP.....	24
<b>Figure (II.5)</b> : L'algorithme de la commande MPC.....	27

**Figures du chapitre III**

<b>Figure (III.1)</b> : Alimentation d'une MASP par un réseau pentaphasée .....	31
<b>Figure (III.2)</b> : Résultats de la simulation de la MASP à vide.....	32
<b>Figure (III.3)</b> : Résultats de la simulation de la MASP en charge .....	32
<b>Figure (III.4)</b> : Schéma de simulation de commande vectorielle de MAS pentaphasée...	34

---



## Listes de figures

---

<b>Figure (III.5) :</b> Résultats de la simulation de commande vectorielle de MAS pentaphasée suivie d'une application d'un couple résistant ( $C_r=8.33\text{N.m}$ ) à l'instant $t= (1\text{s})$ .....	34
<b>Figure (III.6) :</b> Schéma de simulation de commande prédictive de MAS pentaphasée....	36
<b>Figure (III.7) :</b> Résultats de la simulation de commande prédictive de MAS pentaphasée suivie d'une application d'un couple résistant ( $C_r=8.33\text{N.m}$ ) à l'instant $t= (1\text{s})$ .....	36
<b>Figure (III.8) :</b> Résultats de la simulation de la vitesse <b><math>W_m</math></b> sur la commande MPC et la commande vectorielle. ....	37
<b>Figure (III.9) :</b> Résultats de la simulation du couple électromagnétique <b><math>C_{em}</math></b> sur la commande MPC et la commande vectorielle.....	38
<b>Figure (III.10) :</b> Résultats de la simulation du courant <b><math>I_a</math></b> sur la commande MPC et la commande vectorielle .....	38
<b>Figure (III.11) :</b> Résultats de la simulation du courant statorique <b><math>I_s</math></b> sur la commande MPC et la commande vectorielle.....	39

---

### Liste des notations et abréviations

MASP : Machine asynchrone pentaphasée.

MPC : Model prédictive control.

$\Omega_s$  : La vitesse de synchronisme en [rad/s]

$P$  : Le nombre de pôles.

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}, V_{sd}$ , et  $V_{se}$  : Tensions des phases statoriques en [V].

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : des tensions de phases rotoriques en [V].

$R_s$  : La résistance statorique en [ $\Omega$ ].

$R_r$  : L résistance rotorique en [ $\Omega$ ].

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}, \phi_{sd}, \phi_{se}$  : Flux des phases statoriques en [Wb].

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$  : Flux des phases rotoriques en [Wb].

$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, I_{sd}, I_{se}$  : Courants des phases statoriques en [A].

$L_{ss}, L_{rr}$  : Représentent respectivement les matrices d'inductance (propres, mutuelles) statoriques et rotoriques en [H].

$L_{sr}, L_{rs}$  : Les inductances de couplage entre le stator et le rotor en [H].

$L_s$  : L'inductance propre d'une phase statorique en [H].

$L_m$  : L'inductance de magnétisante en [H].

$L_r$  : L'inductance propre d'une phase rotorique en [H].

$J$  : Le moment d'inertie de la machine en [Kg.m<sup>2</sup>].

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique en [N.m].

$C_r$  : Le couple résistant en [[N.m]].

$\Omega$  : La vitesse angulaire [rad/s].

$V_{ds}, V_{dr}$  Les tensions statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe d en [V].

$V_{qs}, V_{qr}$  : Les tensions statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe q en [V].

$\phi_{ds}, \phi_{dr}$  : Les flux statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe d en [Wb].

$\phi_{qs}, \phi_{qr}$  : Les flux statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe q en [Wb].

$I_{ds}, I_{dr}$  : Les courants statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe d en [A].

$I_{qs}, I_{qr}$  : Les courants statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe q en [A].

$\omega_s$  : La vitesse de rotation du champ statorique en [tr/min].

$\omega_r$  : La vitesse de rotation du champ rotorique en [tr/min].

$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}, (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})$  : Tensions composées à la sortie de l'onduleur.

---

## Liste des notations et abréviations

---

$F$  : La fréquence d'alimentation en [Hz]

$\Phi_{rq}^*$ ,  $\Phi_{rd}$  : flux rotorique est orienté.

$\Phi_{sd}^*$ ,  $\Phi_{sq}$  : le flux statorique est orienté.

$\Phi_{mq}^*$ ,  $\Phi_{md}$  : le flux d'entrefer est orienté.

$V_{inva}$ ,  $V_{invb}$ ,  $V_{invc}$ ,  $V_{invd}$ ,  $V_{inve}$  : signaux de la commande de tension.

$V_{alpha}$ ,  $V_{beta}$  = Vecteur de tension.

$F_s$  = Flux statorique.

$F_{s_p}$  = Flux statorique prédit.

$I_{s_p}$  = Courant statorique prédit.

$T_p$  = Couple prédit.

$\lambda$  : coefficient de pondération

$M$  : Indice de modulation.

FOC : Field Oriented Control

---

### Introduction Générale :

Dans notre temps aujourd'hui, la machine asynchrone prend une place essentielle dans le domaine industriel à cause de la simplicité de sa fabrication et son faible coût par rapport à d'autres machines électriques, la machine asynchrone est la plus utilisée dans les applications industrielles et domestiques. Certains problèmes de fonctionnement apparaissent dans des gammes à forte puissance au niveau du convertisseur ; l'onduleur ; pour les systèmes triphasés. En effet ; le fonctionnement à puissances élevées impose aux interrupteurs de l'onduleur de supporter des courants importants lors de la commutation. Donc une augmentation de tension est nécessaire pour régler ce problème ; cependant la tension élevée cause un vieillissement accéléré des isolants.[1]

Donc pour éviter ces deux problèmes ; on présente dans notre mémoire comme solution des machines asynchrones polyphasées dont le nombre de phases est supérieur à trois. Offrent une alternative intéressante à la réduction des contraintes appliquées aux interrupteurs comme aux bobinages de la machine, ce type de machines nous permet une segmentation de puissance avec la réduction des courants de phases sans changer les tensions d'alimentation. La fiabilité de ces systèmes offre un mode dégradé dans le cas d'un dysfonctionnement d'un ou plusieurs bras du convertisseur. Cependant le problème des machines triphasées réside la perte de contrôle lors du dysfonctionnement de l'un des bras de l'onduleur. Pour toutes ces raisons ; l'augmentation du nombre de phases permet ainsi une réduction de l'amplitude et l'augmentation de la fréquence des ondulations du couple électromagnétique qui sont dûes aux harmoniques générées par l'onduleur.[7][4][1]

L'optimisation de la commande est un domaine essentiel de l'ingénierie de contrôle qui vise à améliorer les performances des systèmes dynamiques. Parmi les approches de commande avancées, le contrôle prédictif basé sur le modèle (MPC -Model predictive control) a gagné en popularité en raison de ses capacités d'optimisation et de sa flexibilité le MPC utilise un modèle mathématique du système pour prédire son comportement futur ,permettant ainsi de générer une séquence de commandes optimales qui maximisent les performances tout en respectant les contraintes du système contrairement aux méthodes de commande traditionnelles, le MPC intégré en temps réel les mesures réelles du système, ce qui lui permet d'ajuster les commandes en fonction des variations

## **Introduction Générale**

---

et des perturbations. En conséquence, le MPC offre une commande précise, robuste et adaptable pour une large gamme d'applications industrielles.

Ce manuscrit est subdivisé en trois chapitres. Le premier présente des généralités sur les machines asynchrones polyphasées leur principe de fonctionnement ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients et la modélisation de la machine asynchrone pentaphasée MASP. Le second chapitre consiste à la commande optimale et la méthode MPC. Le dernier chapitre est consacré aux résultats de la simulation de la MASP sous le logiciel MATLAB (Simulink).

A la fin de ce mémoire nous terminerons par une conclusion générale.

---

# **CHAPITRE I**

## **Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée**

---

## I.1. Généralités sur les machines polyphasées

Les machines triphasées à courant alternatif dominent assez largement le domaine des machines électriques, mais depuis longtemps déjà on s'intéresse aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines sont souvent appelées machines polyphasées ou « machines multiphasées ». Ces machines portent plusieurs appellations (machines à grand nombre de phases) ou (machines polyphasées) et cette contrainte peut être évitée tant qu'au moins trois phases restent actives. Il peut y avoir jusqu'à  $(q-3)$  phases ouvertes. Plus on augmente le nombre de phases plus on a de degrés de liberté pour commander la machine. Ces machines sont présentes dans les domaines de grandes puissances tels que la marine, l'avionique ou encore l'automobile. [6] [4]

L'objet de ce chapitre est de présenter et modéliser l'onduleur à cinq phases et sa commande qui sera associé à une MAS pentaphasée alimentée en courant et calcul des régulateurs. [1]

### I.1.1. Types des machines polyphasées

On distingue habituellement deux types de machines polyphasées, suivant le nombre de phases statoriques qui est ou non un multiple de trois. On peut ainsi les classer en deux groupes, que l'on nommera « machines polyphasées de type 1 » et « machines polyphasées de type 2 ». De plus, on considère rarement les cas où le nombre de phases est un nombre pair, sauf si celui-ci est un multiple de trois. [8]

#### *A. Machines asynchrones polyphasées de type I*

Ce type de machine est appelé multi-étoile car le nombre de phases statoriques est un multiple de trois. Ainsi ; la machine est représentée comme un groupement de plusieurs enroulements triphasés. Dans ce cas :  $n_{ph} = 3n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  [2] [3]

A cet effet on peut classer plusieurs types de machines asynchrones de type I comme suit : [2]

- Les machines asynchrones triphasées
- Les machines asynchrones hexa phases (machines double-étoile)
- Les machines asynchrones tétraphasées
- Les machines asynchrones à quinze phases

#### *B. Machines asynchrones polyphasées de type II*

Ces machines sont caractérisées par un nombre de phases  $n$  non multiple de trois, le nombre de phases statoriques est un nombre impair, d'où l'on a :  $n_{ph} = 2n + 1$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  [2] [3]

Elles conservent une distribution de flux uniforme grâce à la symétrie entre les

enroulements.[2]

- La machine asynchrone pentaphasée (5 phases)
- La machine asynchrone hepta-phasée (sept phases)

### **I.1.2. Caractéristiques des machines asynchrones polyphasées**

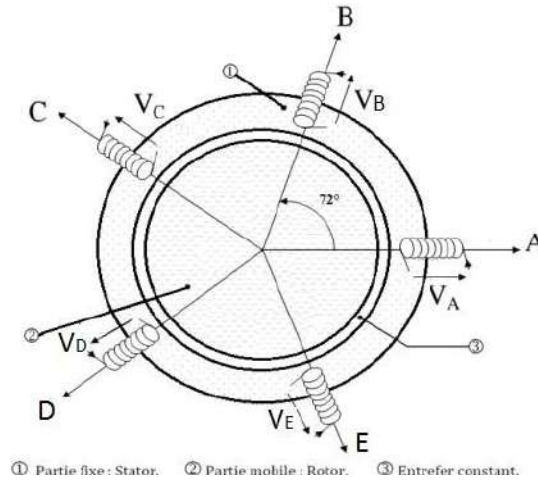
Les machines asynchrones polyphasées, dont le nombre de phases est supérieur à trois, présentent des caractéristiques particulièrement attractives et une meilleure fiabilité pour l'ensemble convertisseur-machine [3] :

- Elles permettent l'augmentation du nombre de phases
- En préservant une qualité de couple acceptable qui représente une caractéristique fondamentale pour les applications devant garantir une excellente continuité de service.
- Offrant une réduction des ondulations du couple électromagnétique et un fractionnement de la puissance ; ce qui diminue les contraintes de dimensionnement sur les composants d'électronique de puissance alimentant chaque phase.

### **I.1.3. Description de la MAS pentaphasée**

La machine étudiée est une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil. Elle est composée par deux parties. Le premier fixe est nommée stator ; formée de 5 enroulements identiques décalés de  $\frac{2\pi}{5}$  dans l'espace et la deuxième partie est nommée rotor. La machine asynchrone pentaphasée représente une bonne alternative aux machines asynchrones conventionnelles dont le nombre de phases est trois, et ce, spécialement dans les applications industrielles nécessitant une plus grande densité de couple. Une des caractéristiques de cette machine c'est qu'elle peut fonctionner en mode dégradé dans le cas de défaillance d'une ou plusieurs phases [2] [3].





**Figure (I.1) :** Schéma d'une machine asynchrone pentaphasée [2].

#### I.1.4. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Dans une machine asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator Grâce à l'interaction électromagnétique des champs tournants créés par le système de tension fournie au stator et par les courants induits dans de rotor, ce dernier tourne dans le même sens que le champ tournant, mais à vitesse inférieure de celle de synchronisme ; car, dans le cas contraire, le champ serait immobile par rapport au rotor, et aucun courant ne serait induit. Cette vitesse est calculée de la manière suivante [2] [6] :

$$\Omega s [rad/s] = \frac{\omega}{p} \quad (\text{I.1})$$

### I.2. Modèle général de la machine asynchrone pentaphasée

#### I.2.1. Hypothèses simplificatrices

Toutes les hypothèses usuellement adoptées dans la théorie des machines électriques restent applicables, Pour la modélisation des machines asynchrones triphasée, polyphasée, pentaphasée et double étoile (MASDE), nous posons les hypothèses suivantes [6] [3] :

- Les n phases sont identiques et décalées d'un angle :  $\alpha = \frac{2\pi}{5}$ .
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault

sont négligeable.

- L'entrefer uniforme.

### I.2.2. Equations électriques

L'application de la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine, nous donne l'équation vectorielle en tension statorique ainsi que rotorique. Par ailleurs, comme les enroulements rotoriques sont en court-circuit, le vecteur tension rotorique appliqué est nul [4] :

$$\begin{cases} \vec{V}_S = [R_S] I_S + \frac{d}{dt} \vec{\varphi}_S \\ \vec{V}_R = [R_r] \vec{I}_r + \frac{d}{dt} \vec{\varphi}_r \end{cases} \quad (I.2)$$

On pose :

$$\mathbf{R}_{Sa} = \mathbf{R}_{Sb} = \mathbf{R}_{Sc} = \mathbf{R}_{Sd} = \mathbf{R}_{Se} = \mathbf{R}_S \text{ (} R_S \text{ résistance d'une phase du stator.)}$$

$$\mathbf{R}_{ra} = \mathbf{R}_{rb} = \mathbf{R}_{rc} = \mathbf{R}_r \text{ (} R_r \text{ résistance d'une phase du rotor.)}$$

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

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{Sa} = R_S I_{Sa} + \frac{d\varphi_{Sa}}{dt} \\ V_{Sb} = R_S I_{Sb} + \frac{d\varphi_{Sb}}{dt} \\ V_{Sc} = R_S I_{Sc} + \frac{d\varphi_{Sc}}{dt} \\ V_{Sd} = R_S I_{Sd} + \frac{d\varphi_{Sd}}{dt} \\ V_{Se} = R_S I_{Se} + \frac{d\varphi_{Se}}{dt} \end{cases} \quad (I.3)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (I.4)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \\ V_{Sd} \\ V_{Se} \end{bmatrix} = [RS] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \\ I_{Sd} \\ I_{Se} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{Sa} \\ \varphi_{Sb} \\ \varphi_{Sc} \\ \varphi_{Sd} \\ \varphi_{Se} \end{bmatrix} \quad (\text{I.5})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = [Rr] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.6})$$

### I.2.3. Equations de flux statorique et rotorique

Les flux sont exprimés en fonction des courants par :

$$\begin{bmatrix} [\varphi_{S,abcde}] \\ [\varphi_{r,abc}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{SS}] & [L_{Sr}] \\ [L_{rS}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{S,abcde}] \\ [I_{r,abc}] \end{bmatrix} \quad (\text{I.7})$$

$$[L_{SS}] = L_S \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{5}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{5}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.8})$$

$$[L_{rr}] = L_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.9})$$

$$[L_{Sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{5}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{5}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{5}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{5}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

#### I.2.4. Equation mécanique

Pour étudier les caractéristiques dynamiques, on introduit l'équation mécanique suivante [5][1] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - F\Omega$$

$J$  : Le moment d'inertie de la machine.

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple résistant (couple de la charge).

$\Omega$  : La vitesse angulaire de rotation.

$F$  : Coefficient de frottements.

#### I.2.5. Transformation de Park

La transformation de Park rend assez aisée de tous les régimes transitoires de la machine électrique polyphasée, Cette transformation permet le passage d'un système pentaphasée de composantes (a, b, c, d, e) à un autre système diphasé (d, q) équivalent. Elle est donnée par une matrice de transformation  $T(\theta)$ , ou  $\theta$  est l'angle de rotation rotorique respectant les axes de référence. [4]

$$T(\theta) = \sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{5}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{5}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{5}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{5}\right) & \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{5}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{5}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{I.11})$$

### I.3. Application de la transformation de Park à la MASP

Les équations électriques de la machine dans le repère de Park deviennent :[1]

#### I.3.1. Equations de tension

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (I.12)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - \omega_s \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} - \omega_s \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (I.13)$$

#### I.3.2. Equations de flux

Pour le stator :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = (L_s + L_m) I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \varphi_{qs} = (L_s + L_m) I_{qs} + L_m I_{qr} \end{cases} \quad (I.14)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = (L_r + L_m) I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \varphi_{qr} = (L_r + L_m) I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \quad (I.15)$$

#### I.3.3. Equation du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{5P}{2} (\varphi_{ds} I_{qr} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (I.16)$$

#### I.4.1. Onduleur pentaphasée

L'onduleur est un convertisseur continue-alternative permettant de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. Il est constitué de cinq bras identiques dont chaque bras est constitué de deux interrupteurs montés en série.[5] [4]

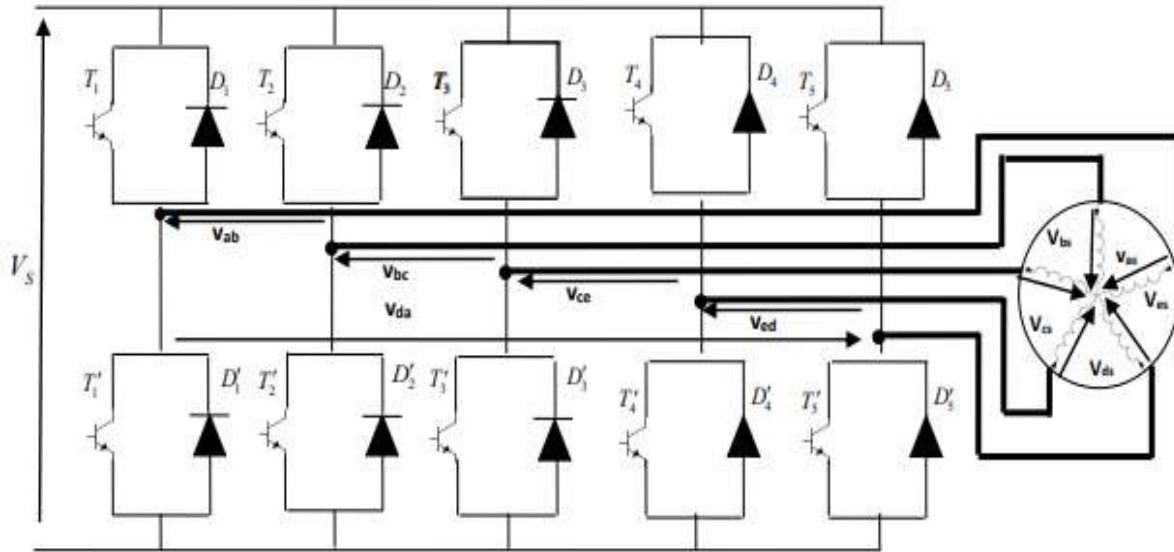


Figure (I .2) : Schéma de principe de l'onduleur de tension pentaphasée [4].

### I.4.2. Modélisation de l'onduleur de tension

En raison de symétrie des bras de l'onduleur ; on peut simplifier l'étude de ce dernier en considérant les hypothèses suivantes [2] :

- On néglige la chute de tension aux bornes des interrupteurs.
- La commutation des interrupteurs est supposée instantanée.

Chaque bras de deux interrupteurs de commande supplémentaires définis par la fonction de connexion comme suit [1] :

$$f_{c1} + f_{c2} = 1 \tag{I.17}$$

Ce convertisseur se caractérise par un modèle ne possédant que quatre tensions modulées (la cinquième étant implicitement déterminée par connaissance des autres) [4]

$$U_{ab} = (f_{11} + f_{15})V_S \tag{I.18}$$

$$U_{bc} = (f_{12} + f_{15})V_S$$

$$U_{cd} = (f_{13} + f_{15})V_S$$

$$U_{de} = (f_{14} + f_{15})V_S$$

Les enroulements du stator étant isolés du neutre, les tensions de phase satisfont à la relation :

$$V_{as} + V_{bs} + V_{cs} + V_{ds} + V_{es} = 0 \quad (I.19)$$

Suivant ces équations on obtient les tensions simples comme suit :

$$\begin{cases} V_{as} = V_s \left( \frac{4f_{11} - f_{12} - f_{13} - f_{14} - f_{15}}{5} \right) \\ V_{bs} = V_s \left( \frac{-f_{11} - 4f_{12} - f_{13} - f_{14} - f_{15}}{5} \right) \\ V_{cs} = V_s \left( \frac{-f_{11} - f_{12} + 4f_{13} - f_{14} - f_{15}}{5} \right) \\ V_{ds} = V_s \left( \frac{-f_{11} - f_{12} - f_{13} + 4f_{14} - f_{15}}{5} \right) \\ V_{es} = V_s \left( \frac{-f_{11} - f_{12} - f_{13} - f_{14} + 4f_{15}}{5} \right) \end{cases} \quad (I.20)$$

$V_s$ : la tension d'alimentation continue de l'onduleur.

## I.5. Commande des onduleurs

### I.5.1. 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.[4]

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).[4]

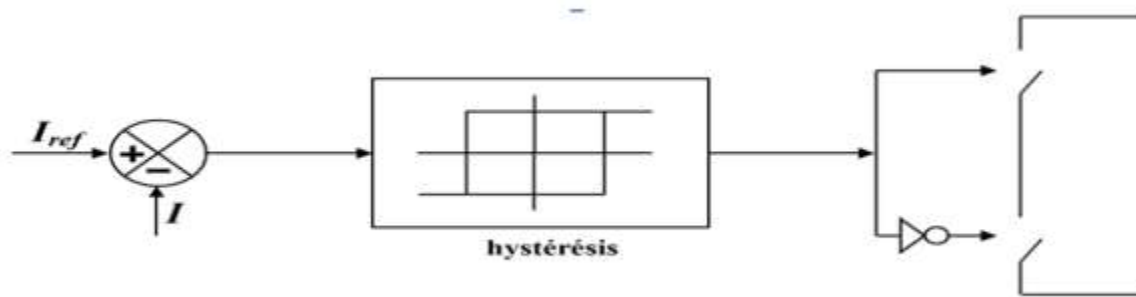
Si les commandes sont des courants, on utilise un comparateur à hystérésis (stratégie delta).

### I.5.2. 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 (I.3)** : Schéma d'illustration pour la commande par hystérésis [4].

### I.5.3. Principe de la commande 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.[4]

### I.5.4. Avantages et inconvénients de la commande par hystérésis

#### A. Parmi les avantages

- 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.[4]

#### B. Parmi les 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 des régimes transitoires, par déphasage de ce si par rapport à leurs références.[4]



**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé de manière générale la MAS pentaphasée, ce qui nous a permis de développer un modèle de Park réduisant les équations électriques de la machine de cinq à deux équations. Ensuite, nous avons appliqué la commande en courant par hystérésis à notre onduleur.

Le prochain chapitre se concentrera sur deux approches de commande pour la machine asynchrone à cinq phases : la commande vectorielle et la commande prédictive. Nous examinerons en détail ces deux techniques et étudierons leurs avantages, leurs limitations et leurs performances dans le contexte de la machine asynchrone à cinq phases.

---

**CHAPITRE**  
**II**  
**Commande optimale d'une**  
**machine asynchrone**  
**polyphasée (cinq phases)**

---

Les machines électriques jouent un rôle important dans les systèmes de conversion électromagnétique, principalement dans les processus industriels tels que la robotique. L'exploitation de ces machines exige un fonctionnement optimal (vitesse maximale, accélérations meilleures...) pour qu'elles restent compétitives et rentables. L'objectif de pouvoir définir la meilleure commande, tenant compte de ces exigences [9].

Nous examinerons la commande vectorielle à flux rotorique orienté, qui est couramment utilisée, dans le prochain chapitre. Cette approche de commande est largement répandue en raison de ses nombreux avantages et de son efficacité dans le contrôle des machines électriques

L'objectif de la commande optimale contient deux principales orientations. La première orientation vise une énergie minimale tandis que la deuxième cherche à réduire le temps de convergence du système. L'objectif général est de trouver une commande optimale qui minimise un critère qui varie selon l'orientation adoptée [10].

### II.1. Commande vectorielle par orientation du flux

La machine asynchrone génère un couple qui résulte de la différence de deux produits de composantes en quadrature, à savoir les flux rotoriques et les courants statoriques. Ce phénomène met en lumière un couplage complexe entre les différentes grandeurs de la machine.

L'objectif de la commande par orientation du flux réside dans le découplage des grandeurs intrinsèquement liées à la magnétisation de la machine et à la production de couple. Ce dessein est atteint par l'établissement d'une loi de commande qui, sur le plan mathématique, consiste en une série de transformations visant à linéariser un système initialement caractérisé par une double non-linéarité structurelle. Cette approche permet d'assurer l'indépendance fonctionnelle entre la création de flux et la production de couple, conformément au fonctionnement d'une machine à courant continu à excitation séparée. En définitive, l'objectif de cette opération est de supprimer la non-linéarité structurelle de la machine afin d'en améliorer la performance et la fiabilité.

Commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe « 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 (II. 1).**[1]

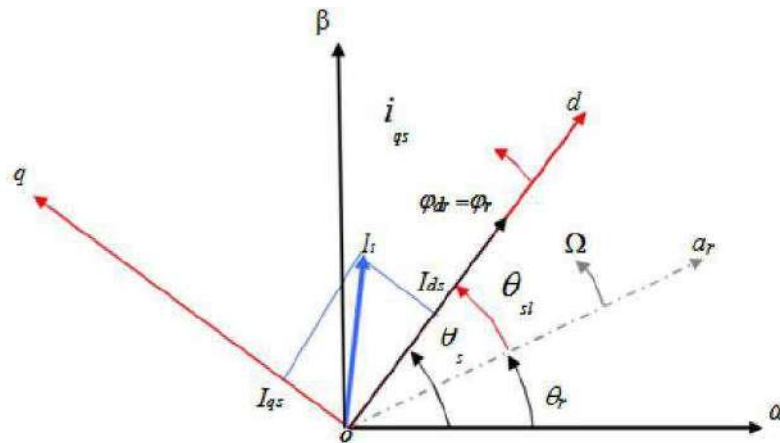


Figure (II.1) Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer) [1].

### II.1.1. Choix d'orientation de flux

Le choix des axes d'orientation peut être réalisé en fonction de la direction du flux généré par la machine. Il est ainsi possible d'opter pour l'une des trois orientations suivantes : le flux rotorique, le flux statorique ou le flux d'entrefer.

$\Phi_{rq}^* = \mathbf{0}$  et  $\Phi_r = \Phi_{rd}$  : le flux rotorique est orienté.

$\Phi_{sd}^* = \mathbf{0}$  et  $\Phi_s = \Phi_{sq}$  : le flux statorique est orienté.

$\Phi_{mq}^* = \mathbf{0}$  et  $\Phi_m = \Phi_{md}$  : le flux d'entrefer est orienté.

### II.1.2. Commande vectorielle à flux rotorique orienté

La commande par orientation du flux rotorique exige une connaissance précise de la position du flux en tout temps, ainsi qu'une synchronisation avec l'axe direct  $d$  pour garantir un découplage correct entre le flux et le couple, quel que soit le point de fonctionnement. Cette approche requiert une grande précision et une maîtrise élevée pour obtenir les performances optimales de la machine. Le modèle de contrôle de la direction du flux rotatif est donné par l'équation suivante [1] :

$$\Phi_{rd} = \Phi_r, \Phi_{rq} = \mathbf{0}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = - \left( R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \right) i_{sd} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sd} - \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \frac{M}{T_r L_r} \phi_{rd} \\ V_{sq} = \left( R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \right) i_{sq} - \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + \sigma L_s \omega_s i_{sd} - \frac{M}{T_r L_r} \phi_{rd} \\ \frac{d\phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \phi_r \\ \omega_s - \omega_r = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sd}}{\phi_r} \\ C_{em} = P \frac{M}{T_r} \phi_{rd} i_{sd} \\ J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - F \Omega_r \end{array} \right. \quad (II.1)$$

Les expressions données par l'équation (I.21) peuvent être exploitées telles quelles pour réaliser la commande vectorielle à flux orienté des machines asynchrones alimentées en tension mais  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  influent au flux sur  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$  donc sur le flux et le couple, il faut donc réaliser un découplage qui nous permet de simplifier le modèle de la machine comme suit [1] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sd}}{dt} = - \left( \frac{1}{T_r - \sigma} + \frac{1}{T_r} \frac{1 - \sigma}{\sigma} \right) i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{1 + \sigma}{\sigma} \frac{1}{M T_r} \phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = - \omega_s i_{sd} - \left( \frac{1}{T_r - \sigma} + \frac{1}{T_r} \frac{1 - \sigma}{\sigma} \right) i_{sq} - \frac{1 - \sigma}{\sigma} \frac{1}{M} \cdot \omega_r \cdot \phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \\ \frac{d\phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \phi_r \\ C_e = P \frac{M}{L_r} \phi_r i_{sd} \\ \omega_r = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{\phi_r} \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - F \Omega \end{array} \right. \quad (II.2)$$

### II.1.3. Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone à 5 phases

#### A. Modèle linéaire MAS à 5 phases

En se basant sur l'équation (I.16), le couple électromagnétique peut être exprimé en termes de liaisons de flux, ce qui est similaire à l'équation pour les machines à courant continu. Dans le cas où le flux des liaisons rotoriques est entièrement dans l'axe dans le cadre de référence de rotation synchrone, soit  $\phi_{qr}^s = 0$ , l'équation de couple (I.16) peut être simplifiée :

$$C_{em} = \frac{5P}{2} \frac{L_m}{L_{lr} + L_m} [\phi_{rd}^r i_s^q] \quad (II.3)$$

En ajustant les composantes d et q du courant du stator ainsi que la fréquence de glissement, il est possible de contrôler indépendamment le couple et le flux du rotor tout en respectant la contrainte que  $\Phi_{qr} s$  doit être égal à zéro. Cette équation présente des similitudes avec celle d'une machine à courant continu à excitation shunt.

Les valeurs commandées de couple et de flux rotor peuvent être obtenues en utilisant les équations correspondantes :

$$i_{qs}^* = \frac{4}{5P} \frac{L_r}{L_{lr} + L_m} \frac{T_e^*}{\Phi_{ds}^*} \tag{II.4}$$

$$i_{ds}^* = \frac{1}{L_m} \Phi_{ds}^* \frac{L_r}{R_r L_m} \frac{d}{dt} \Phi_{ds}^* \tag{II.5}$$

$$s\omega_s = \frac{4}{5P} R_r \frac{T_e^*}{(\Phi_{dr}^*)}$$

**B. Calcul des paramètres des régulateurs PI**

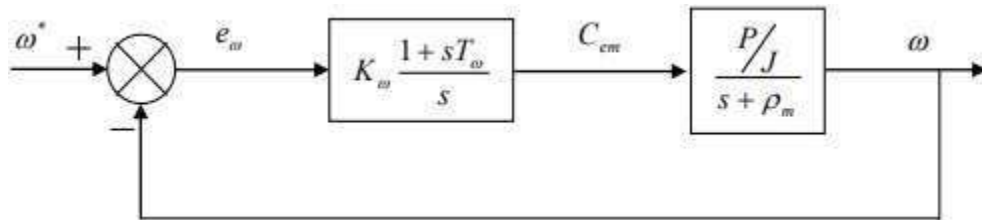
**B.1. Régulateur de vitesse**

Les pôles imposés pour cette boucle sont donc plus proches de l'origine du plan des racines que les pôles de la boucle interne. D'après l'équation mécanique :

$$\frac{\omega}{C_{em}} = \frac{P/J}{s + \rho_m} \tag{II.13}$$

Avec :

$$\rho_m = \frac{F}{J} \tag{II.14}$$



**Figure (II.2) : schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation ω.**

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{\omega_s}{\omega_s^*} = \frac{K_\omega(1+sT_\omega)P/J}{s^2 + s\left(\rho_m + K_\omega \frac{T_\omega}{\sigma L_s}\right) + \frac{K_\omega P}{Jr}} \tag{II.15}$$

Les paramètres du correcteur :

$$\begin{cases} K_{\omega} = 2\rho^2 J/P \\ T_{\omega} = \frac{2\rho - \rho_m}{2P^2} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

## II.2. Commande optimale

### II.2.1. Généralité sur la commande optimale

Les exigences du contrôle optimal :

Pour la commande optimale, il y a trois fonctions importantes à considérer [11] :

- Le critère à minimiser (ou à maximiser) ; il est considéré comme l'objectif général de la commande.
- Les degrés de liberté pour l'optimisation.
- Les restrictions du système et de la commande.

### II.2.2. Définition de la commande optimale

La commande optimale consiste à chercher une commande admissible  $\mathbf{t}$  qui permet de transférer le système d'un état initial à l'état final tout en respectant des contraintes physiques et en minimisant des fonctions objectifs (critères ou indices de performances). Le problème de la commande optimale d'un système est formulé en précisant les éléments suivants [12] :

- Modèle du système à commander.
- Condition terminal (états initiales et états finales).
- Contraintes.
- Critère de performance à optimiser (minimiser ou maximiser).

Pour un système dynamique, on cherche une commande permettant de transférer le système d'un état initial vers un état final. La commande optimale est en général soumise à diverses contraintes liées à sa réalisation (accélération limitée, vitesse de montée en puissance bornée) [12].

### II.2.3. La commande optimale dans le domaine des machines électriques

Dans le domaine des machines électriques, la théorie du contrôle optimal est utilisée pour optimiser les techniques de commande des machines. Cette théorie a plusieurs applications dans ce domaine, comme le développement de systèmes d'entraînement optimaux, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'optimisation des techniques de contrôle. L'un des principaux avantages de la théorie

du contrôle optimal est qu'elle permet d'imposer un déplacement avec une consommation d'énergie minimale. Une méthode d'optimisation populaire utilisée dans le domaine des machines électriques est le principe du maximum de Pontryagin. Dans l'ensemble, la théorie du contrôle optimal est un outil précieux pour optimiser le contrôle des machines électriques, avec un large éventail d'applications dans ce domaine.

### II.2.4. Avantages et inconvénients de la commande optimale

Dans sa forme la plus générale, la commande optimale permet de prendre en compte explicitement les objectifs ultimes de la commande (optimisation économique), les contraintes, les non-linéarités et l'aspect dynamique, ce qui est particulièrement intéressant pour les procédés discontinus. La formulation du problème est assez intuitive, ce qui facilite l'acceptation et la formulation des objectifs par des non spécialistes [13].

Les principales limites de la commande optimale sont la difficulté de la mise en œuvre, l'applicabilité aux procédés lents uniquement et la nécessité de disposer d'un modèle dynamique du procédé suffisamment précis et rapide à simuler, pour rendre l'optimisation en temps réel efficace [12].

### II.2.5. Types de la commande optimale

Il existe plusieurs types de commandes optimales. Les principaux sont les suivants :

#### A. *Commande optimale en boucle ouverte*

Cette commande utilise une stratégie prédéfinie pour générer les signaux de commande sans tenir compte des rétroactions du système. Elle est généralement utilisée lorsque le modèle du système est bien connu et que les perturbations sont négligeables.

#### B. *Commande optimale en boucle fermée*

Cette commande utilise les informations de rétroaction pour ajuster les signaux de commande en temps réel. Elle permet de compenser les perturbations et les variations du système, et d'optimiser les performances du système en fonction de critères spécifiques tels que la robustesse, la précision, la rapidité de réponse, etc.

#### C. *Commande optimale linéaire quadratique (LQR)*

Cette méthode de commande optimale est basée sur la minimisation d'un critère de performance quadratique en utilisant des équations d'état linéaires. Elle est largement utilisée dans les systèmes linéaires et offre des performances optimales en termes de stabilité et de suivi de référence.



### ***D. Commande optimale prédictive (MPC)***

Cette commande optimale utilise un modèle prédictif du système pour optimiser les signaux de commande en fonction d'un horizon de prédiction. Elle prend en compte les contraintes dynamiques et les objectifs à long terme, ce qui la rend adaptée aux systèmes à temps de réponse lent ou à contraintes fortes.

Ces différentes méthodes de commande optimale sont utilisées en fonction des caractéristiques du système, des objectifs de performance et des contraintes spécifiques à prendre en compte.

## **II.3. MPC (Model Predictive Control)**

La commande prédictive par modèle (MPC) est une méthode avancée de commande des processus qui est utilisée pour contrôler un processus tout en satisfaisant un ensemble de contraintes. La MPC utilise un modèle du système pour faire des prédictions sur le comportement futur du système. Il résout un problème d'optimisation à chaque pas de temps pour trouver l'action de commande optimale qui conduit la sortie prédite de l'usine aussi près que possible de la référence souhaitée. Le MPC est un contrôleur multivariable qui contrôle les sorties simultanément en tenant compte de toutes les interactions entre les variables du système. Un autre point fort du MPC est qu'il peut gérer des contraintes. Les contraintes sont importantes car leur violation peut avoir des conséquences indésirables. Le MPC est un moyen largement utilisé pour traiter les grands problèmes de commande multivariable sous contrainte dans l'industrie. L'objectif principal du MPC est de minimiser un critère de performance dans le futur qui serait éventuellement soumis à des contraintes sur les entrées et les sorties manipulées, où le comportement futur est calculé.

### **II.3.1 Avantages et inconvénients de la commande MPC**

#### ***A. Parmi les avantages***

- La MPC peut gérer des contraintes, ce qui est important car leur violation peut entraîner des conséquences indésirables.
- Le MPC peut gérer des systèmes à entrées et sorties multiples qui peuvent avoir des interactions entre leurs entrées et leurs sorties.

#### ***B. Parmi les inconvénients***

- Le MPC a un algorithme complexe qui nécessite plus de temps que les autres contrôleurs.

### II.3.2. Applications de MPC dans la vie réel

MPC est couramment utilisé dans les systèmes de contrôle complexes et contraints. Systèmes rapides, systèmes à faible coût et systèmes non linéaires sont de nouvelles tendances dans le développement des domaines de recherche et d'application des MPC. Ces dernières années, dans de nombreux domaines tels que la fabrication de pointe, l'énergie et l'aérospatiale, etc., MPC a été adopté pour résoudre des problèmes de contrôle d'optimisation des contraintes par exemple : la gestion de la chaîne d'approvisionnement pour la production de semi-conducteurs et la fabrication de matériaux, traitement des eaux usées urbaines, contrôle de vol, contrôle d'attitude des satellites, etc.

La liste suivante répertorie plusieurs applications principales de MPC :

- **Industrie chimique** : Le succès du MPC dans les procédés chimiques complexes au cours des trente dernières années a pleinement démontré son énorme potentiel pour gérer une optimisation contrainte complexe.
- **Système de climatisation** : C'est devenu une tendance que l'algorithme MPC est utilisé pour améliorer l'effet de refroidissement dans le système de climatisation et aider à développer des systèmes plus économes en énergie et plus efficaces.
- **Industrie automobile** : En raison du seuil technique élevé et de la puissance de calcul relativement limitée et des ressources de stockage des puces utilisées par les contrôleurs produits en série en raison du coût, l'application de MPC dans le domaine automobile est encore à ses débuts étapes. En 2018, General Motors (GM) a appliqué avec succès la technologie MPC aux GM des contrôleurs pour le contrôle du couple moteur et le contrôle du rapport de boîte de vitesses et obtenir de bons effets d'économie de carburant [17].

### II.3.3. Philosophie et la stratégie de la commande prédictive :

La commande prédictive, également appelée contrôle prédictif, est une méthode utilisée pour contrôler un système en anticipant son comportement futur et en minimisant l'écart entre les prédictions et une trajectoire de référence prédéfinie. L'objectif est de prendre des décisions basées sur la prédiction du système tout en respectant les contraintes de fonctionnement.

Prenons l'exemple d'un conducteur de véhicule. Avant de commencer son trajet, le conducteur connaît la trajectoire de référence qu'il souhaite suivre, c'est-à-dire la route à emprunter. Il dispose également d'un horizon de commande fini, correspondant à ce qu'il peut voir devant lui (Son champ visuel). En utilisant un modèle mental du comportement du véhicule, le conducteur décide des actions spécifiques à réaliser pour suivre la trajectoire désirée, telles que l'accélération, le freinage ou la rotation du volant.

Cependant, dans la commande prédictive, seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant. Une fois cette action réalisée, la procédure est répétée pour les prochaines actions, en prenant en compte les nouvelles informations disponibles sur le système. Ainsi, le conducteur ajuste continuellement ses actions en fonction des prédictions et des contraintes pour maintenir le véhicule sur la trajectoire souhaitée.

La commande prédictive permet donc de créer un effet anticipatif en utilisant des prédictions sur le comportement futur du système à commander. En minimisant l'écart entre ces prédictions et la trajectoire de référence, cette approche offre un contrôle précis et réactif tout en respectant les contraintes spécifiques du système[19].

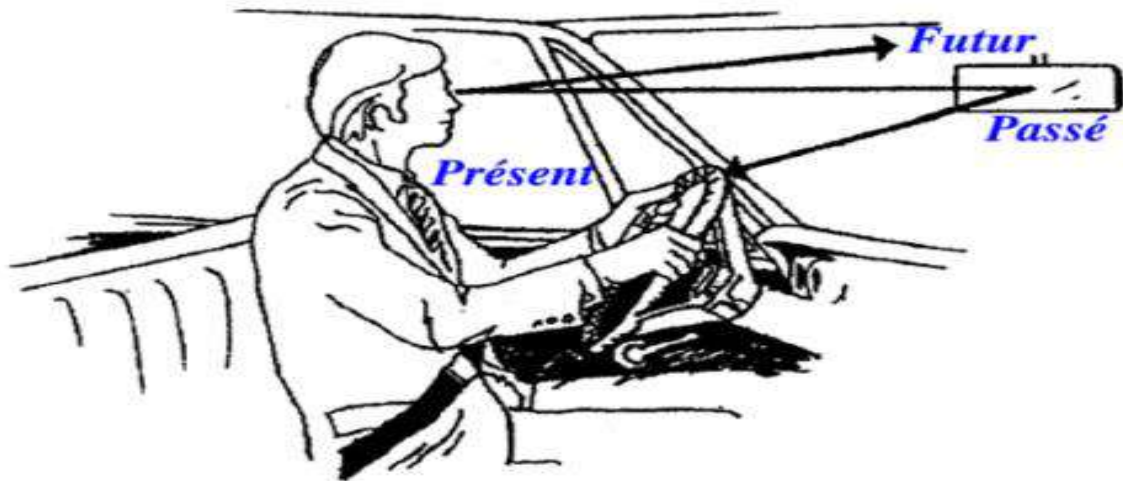


Figure (II.3) : Philosophie de la commande prédictive [19].

### II.3.4. Schéma la commande prédictive MPC à MAS :

La figure montre le modèle MATLAB®/Simulink® utilisé pour la simulation de la commande prédictive (MPC) d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur. Le diagramme de simulation contient six

éléments principaux : génération de la vitesse de référence, régulateur de vitesse PI, algorithme de commande prédictive, onduleur, transformation de coordonnées et modèle de machine asynchrone. La vitesse de référence (bloc 1) dans le schéma de simulation peut être une constante, un bloc de pas, ou tout autre signal en fonction des besoins de la simulation. Pour le suivi de la vitesse de référence, un contrôleur PI (bloc 2) est utilisé. Contrôleur PI (bloc 2) est utilisé pour le suivi de la vitesse de référence. Le contrôleur PI reçoit le signal d'erreur et calcule le couple de référence pour le contrôleur prédictif [19].

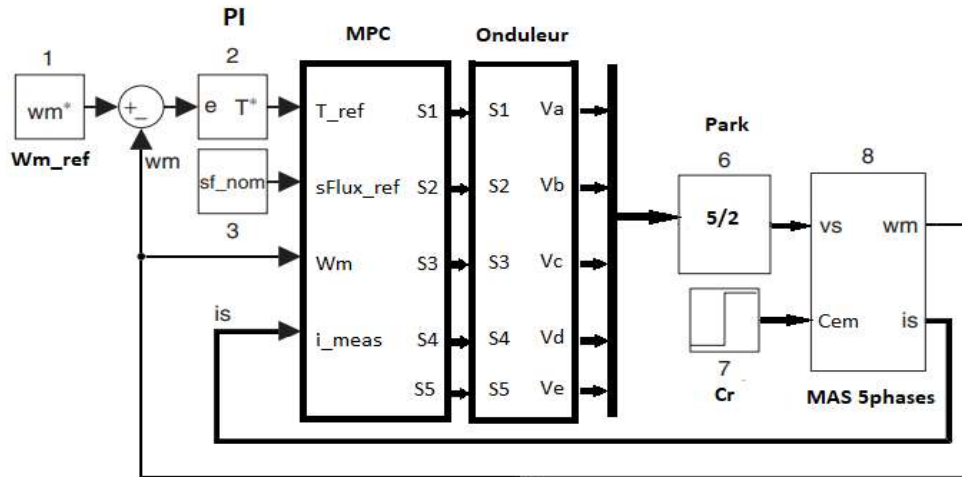


Figure (II.4) : schéma de la commande prédictive de MASP.

## II.4. Les équations de la commande MPC et le critère d'optimisation

### II.4.1. Calcul des signaux de la commande de tension

$$V_{inva} = \frac{(V_{dc} * (4 * S_a - S_b - S_c - S_d - S_e))}{5} \quad (II.17)$$

$$V_{invb} = \frac{(V_{dc} * (4 * S_b - S_a - S_c - S_d - S_e))}{5}$$

$$V_{invc} = \frac{(V_{dc} * (4 * S_c - S_a - S_b - S_d - S_e))}{5}$$

$$V_{invd} = \frac{(V_{dc} * (4 * S_d - S_a - S_b - S_c - S_e))}{5}$$

$$V_{inve} = \frac{(V_{dc} * (4 * S_e - S_a - S_b - S_c - S_d))}{5}$$

**II.4.2. Calcul des composantes alpha et bêta du vecteur de tension**

$$V_{S\alpha} = \left(\frac{2}{5}\right) * \left( (V_{inva} * \cos(0)) + V_{invb} * \cos\left(0 - \left(2 * \frac{\pi}{5}\right)\right) \right) + \left( V_{invc} * \cos\left(0 - \left(4 * \frac{\pi}{5}\right)\right) \right) + \left( V_{invd} * \cos\left(0 - \left(6 * \frac{\pi}{5}\right)\right) \right) + \left( V_{inve} * \cos\left(0 - \left(8 * \frac{\pi}{5}\right)\right) \right) \quad (\text{II.18})$$

$$V_{S\beta} = -\left(\frac{2}{5}\right) * \left( (V_{inva} * \sin(0)) + \left( V_{invb} * \sin\left(0 - \left(2 * \frac{\pi}{5}\right)\right) \right) + \left( V_{invc} * \sin\left(0 - \left(4 * \frac{\pi}{5}\right)\right) \right) + \left( V_{invd} * \sin\left(0 - \left(6 * \frac{\pi}{5}\right)\right) \right) + \left( V_{inve} * \sin\left(0 - \left(8 * \frac{\pi}{5}\right)\right) \right) \right) \quad (\text{II.19})$$

**II.4.3. Estimation du flux statorique (Fs)**

$$F_s = \left(\frac{L_m}{L_r}\right) * \left( F_{r\text{meas}} - i_{\text{meas}} * \left( L_m - L_r * \frac{L_s}{L_m} \right) \right) \quad (\text{II.20})$$

**II.4.4. Prédiction du flux statorique à l'instant k+1 (Fsp1)**

$$F_{sp1} = F_s + T_s * v - R_s * T_s * i_{\text{meas}} \quad (\text{II.21})$$

**II.4.5. Prédiction du courant statorique à l'instant k+1 (Isp1)**

$$I_{sp1} = \left( 1 + \frac{T_s}{t_{\text{sigma}}} \right) * i_{\text{meas}} + \frac{T_s}{t_{\text{sigma}} + T_s} * \left( \frac{1}{r_{\text{sigma}}} * \left( \left( \frac{k_r}{t_r} - k_r * 1i * \omega_m \right) * F_{r\text{meas}} + v \right) \right) \quad (\text{II.22})$$

**II.4.6. Prédiction du couple à l'instant k+1 (Tp1)**

$$T_{p1} = \left(\frac{5}{2}\right) * p * \text{imag}(\text{conj}(F_{sp1}) * I_{sp1}) \quad (\text{II.23})$$

**II.4.7. Calcul du critère d'optimisation (cost)**

$$\text{cost}(i, 1) = \text{abs}(T_{\text{ref}} - T_{p1}) + \text{lambda} * \text{abs}(s\text{flux}_{\text{ref}} - \text{abs}(F_{sp1})) \quad (\text{II.24})$$

Ces équations permettent de décrire le comportement de la machine asynchrone à 5 phases et sont utilisées dans l'algorithme de commande MPC pour optimiser le contrôle de la machine en fonction de la consigne de couple et de l'écart de flux statorique.

**II.4.8. Le critère d'optimisation**

$$\text{cost}(i, 1) = \text{abs}(T_{\text{ref}} - Tp1) + \text{lambda} * \text{abs}(s\text{flux}_{\text{ref}} - \text{abs}(Fsp1)) \quad (\text{II. 25})$$

Ce critère est une combinaison de deux termes :

Suivi de la consigne : Le premier terme,  $\text{abs}(T_{\text{ref}} - Tp1)$ , mesure l'écart entre la valeur de référence du couple ( $T_{\text{ref}}$ ) et la valeur prédite du couple à l'instant  $k + 1$  ( $Tp1$ ). L'objectif est de minimiser cet écart pour assurer un suivi précis de la consigne de couple.

Minimisation de l'écart de flux : Le deuxième terme,  $\text{abs}(s\text{flux}_{\text{ref}} - \text{abs}(Fsp1))$ , mesure l'écart entre la valeur de référence du flux statorique ( $s\text{flux}_{\text{ref}}$ ) et la valeur absolue du flux statorique prédit à l'instant  $k + 1$  ( $Fsp1$ ). L'objectif est de minimiser cet écart pour garantir un fonctionnement optimal du système.

Le paramètre ( $\text{lambda}$ ) est un coefficient de pondération qui permet d'ajuster l'importance relative des deux termes dans le critère d'optimisation. En fonction des besoins spécifiques de l'application, la valeur de ( $\text{lambda}$ ) peut être ajustée pour donner plus de poids à l'un ou l'autre des termes.

L'objectif global de la commande MPC est donc de trouver les commutations des interrupteurs ( $S1, S2, S3, S4, S5$ ) qui minimisent ce critère d'optimisation, c'est-à-dire qui permettent de suivre au mieux la consigne de couple et de maintenir le flux statorique aussi proche que possible de sa référence.

II.5. L'algorithme de la commande MPC

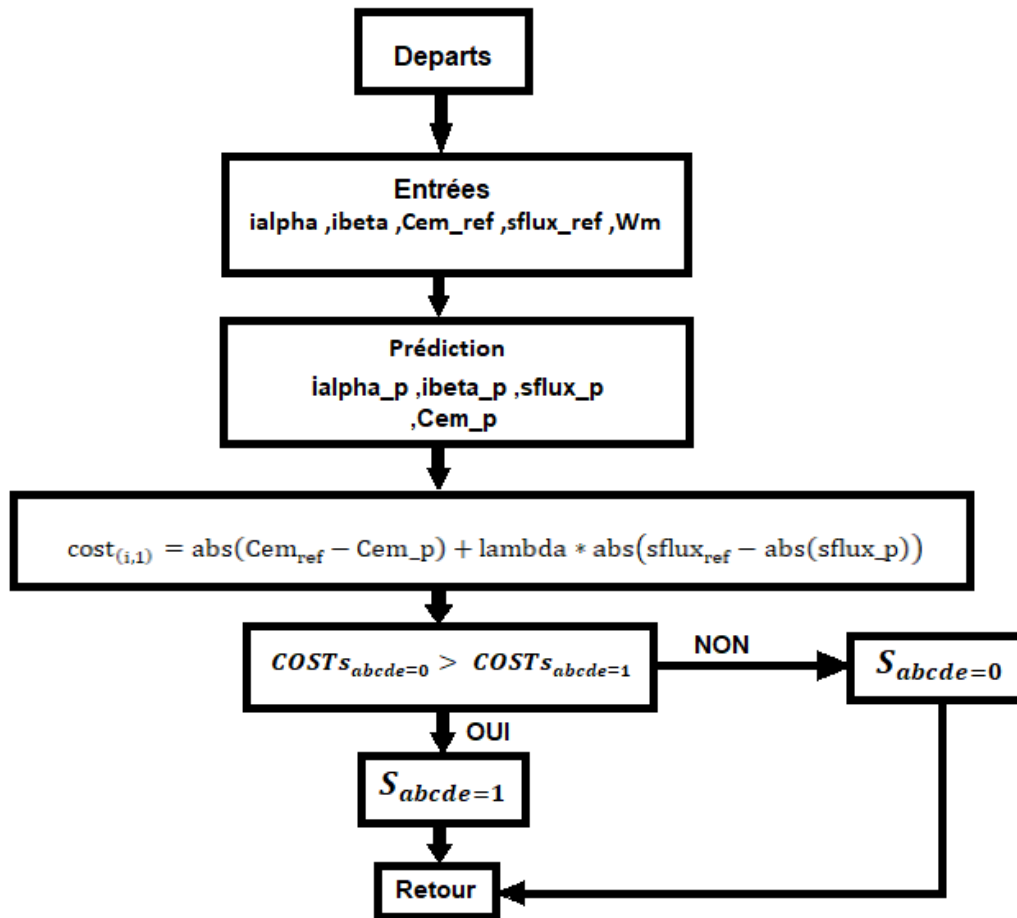


Figure (II.5) : L'algorithme de la commande MPC

L'algorithme implémenté dans le code fourni est un algorithme de commande prédictive de modèle (MPC) pour une machine asynchrone à 5 phases. Voici une explication étape par étape de l'algorithme :

- Définition des paramètres et des constantes : Les différentes constantes et paramètres du système, tels que la période d'échantillonnage ('Ts'), les résistances ('Rs', 'Rr'), les inductances ('Ls', 'Lr', 'Lm'), la tension de source (Vdc), etc., sont définis au début du code.

- Calcul des signaux de commande de tension : Les signaux de commande de tension ( $V_{inva}, V_{invb}, V_{invc}, V_{invd}, V_{inve}$ ) sont calculés en fonction des états de commutation ('Sa', 'Sb', 'Sc', 'Sd', 'Se') et de la tension de source ( $V_{dc}$ ).
- Calcul des composantes alpha et bêta du vecteur de tension : Les composantes alpha ( $V_{salpha}$ ) et bêta ( $V_{sbeta}$ ) du vecteur de tension sont calculées à partir des signaux de commande de tension en utilisant des relations trigonométriques.
- Estimation du flux statorique ( $F_{sp}$ ) : Le flux statorique ( $F_{sp}$ ) est estimé en utilisant la mesure de courant ('i\_meas'), la force électromotrice ('Fr\_meas') et les paramètres du système.
- Prédiction du flux statorique à l'instant k+1 ('Fsp1') : Le flux statorique à l'instant k+1 ( $F_{sp1}$ ) est prédit en utilisant le flux statorique actuel ('Fsp'), la tension de commande ('v'), la résistance statorique ('Rs') et la période d'échantillonnage ('Ts').
- Prédiction du courant statorique à l'instant k+1 ('Isp1') : Le courant statorique à l'instant k+1 ( $I_{sp1}$ ) est prédit en utilisant le courant statorique actuel ('i\_meas'), la tension de commande ('v'), les paramètres du système et des formules dérivées des équations électriques de la machine.
- Prédiction du couple à l'instant k+1 ('Tp1') : Le couple à l'instant k+1 ('Tp1') est prédit en utilisant le flux statorique prédit ( $F_{sp1}$ ), le courant statorique prédit ( $I_{sp1}$ ) et les paramètres du système.
- Calcul du critère d'optimisation (*cost*) : Le critère d'optimisation (*cost*) est calculé en fonction de l'écart entre le couple de référence ( $T_{ref}$ ) et le couple prédit à l'instant k+1 ('Tp1'), ainsi que l'écart entre le flux statorique de référence ( $sflux_{ref}$ ) et le flux statorique prédit à l'instant k+1 ('Fsp1'). Un poids ('lambda') est utilisé pour pondérer l'importance relative des deux écarts.
- Sélection du meilleur commutateur ('index') : Le commutateur de tension optimal est sélectionné en identifiant l'index correspondant au coût d'optimisation minimal.
- Attribution des signaux de commande de tension : Les signaux de commande de tension ('Sa', 'Sb', 'Sc', 'Sd', 'Se') sont mis à jour en fonction du commutateur optimal sélectionné.
- Mise à jour des états de la machine : Les états de la machine, tels que le flux statorique ( $F_s$ ), le courant statorique ( $i_{meas}$ ), etc., sont mis à jour en utilisant les valeurs prédites ( $F_{sp1}, I_{sp1}$ ) et les mesures réelles.



L'algorithme de commande MPC utilise la prédiction du comportement futur de la machine pour optimiser les signaux de commande de tension, afin de suivre une consigne de couple donnée et de maintenir le flux statorique à une valeur de référence.

### **Conclusion**

Ce chapitre, nous avons effectué une analyse approfondie de la technique de commande vectorielle à flux rotorique orienté, qui est fréquemment utilisée dans l'industrie. Nous avons également examiné les aspects positifs et négatifs de la commande optimale, qui présente des améliorations de performance dans divers domaines industriels. De plus, nous avons exploré les applications et les opportunités offertes par la commande prédictive.

---

# **CHAPITRE III**

Simulation de la Commande  
vectorielle et optimisation par la  
commande prédictive

---

La simulation numérique est devenue à l’heure actuelle le moyen favorisé pour les systèmes complexes. Il s’agit d’un outil puissant pour vérifier la validité de la conception durant ces premières étapes.[2]

Dans ce chapitre, nous appliquerons la commande vectorielle indirecte à une machine 5 phases connectée à une tension 5 phases avec un onduleur commandé hystérise.[1]

### III.1. Alimentation de la MASP par un réseau pentaphasée

#### III.1.1. Schémas d’une MASP alimenté par un réseau pentaphasée

Les équations obtenues après la modélisation de la machine asynchrone pentaphasée, peuvent être employées afin d’établir un modèle de simulation sous Matlab selon les paramètres qu’on a choisi. La simulation de ce modèle nous a permis d’obtenir les caractéristiques, du couple électromagnétique, de la vitesse de rotation, et du courant statorique. Pour ce faire, la machine sera modélisée dans la base propre, de Park qui transforme un repère à cinq phases en un repère à deux phases. La **figure (III.1)** présente l’alimentation d’une MASP par un réseau pentaphasée comme suit [2] [4].

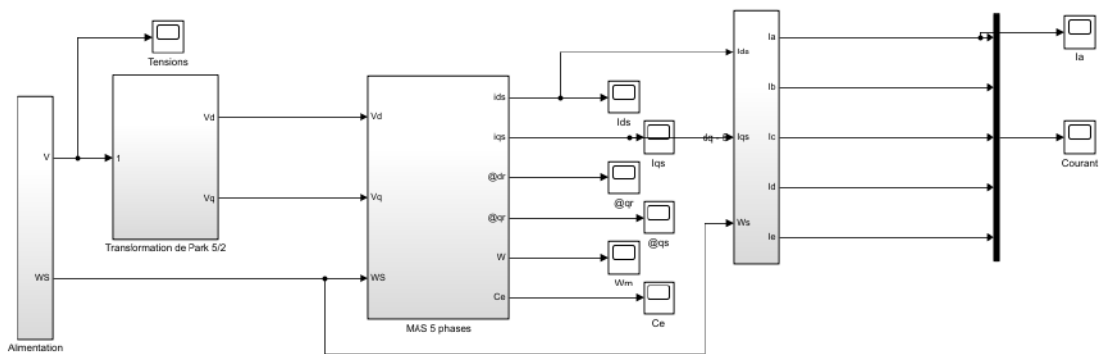
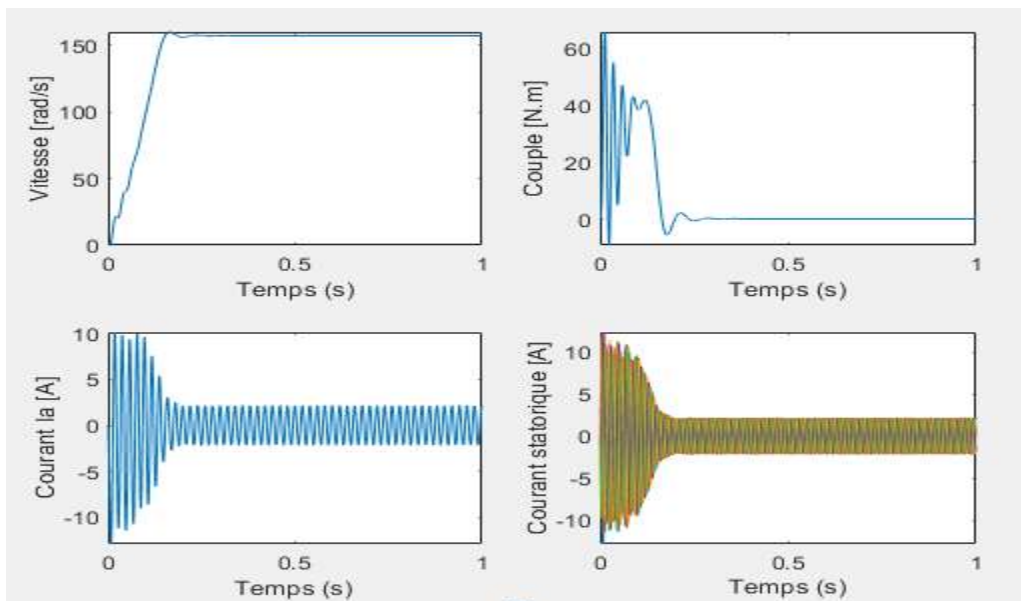


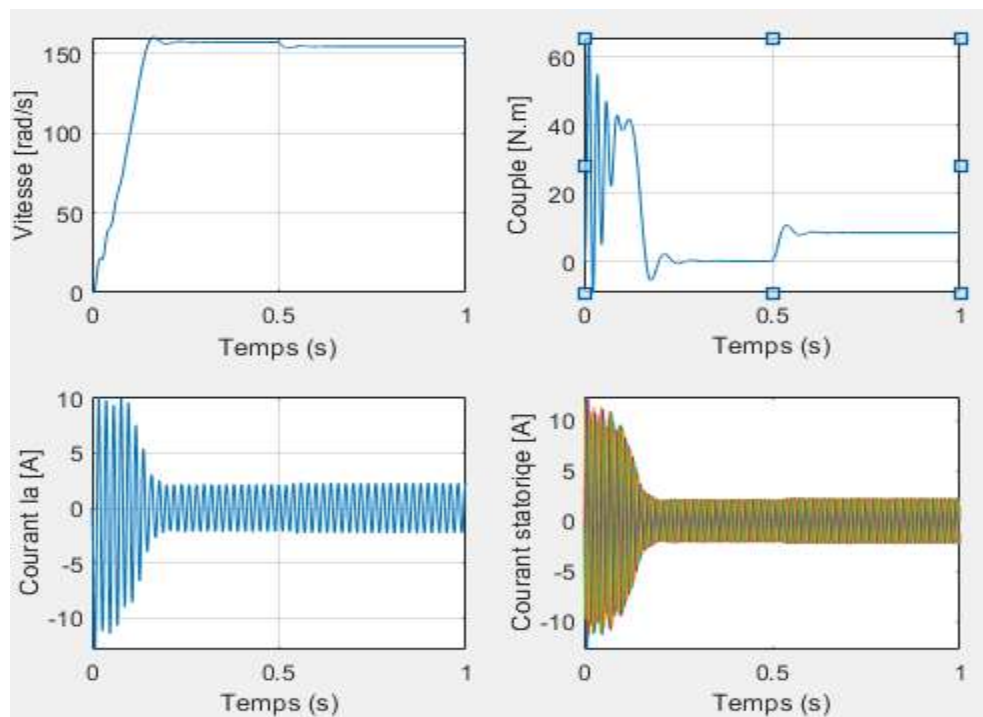
Figure (III.1) : Alimentation d’une MASP par un réseau pentaphasée.

III.1.2. Résultats de la simulation

La simulation du bloc de la **Figure (III.1)** permet d’obtenir les figures suivantes :



**Figure (III.2)** : Résultats de la simulation de la MASP à vide.



**Figure (III.3)** : Résultats de la simulation de la MASP en charge.

### III.1.3. Interprétation des résultats

Lors du démarrage de la machine, l'allure de la vitesse est croissante, atteignant une valeur proche de la vitesse de synchronisme après environ 0,1 seconde. Cependant avec l'application du couple résistant, la vitesse connaît une légère baisse à  $t=0.5$ , comme le montre la **Figure (III.3)** Cette variation de vitesse s'explique par les effets du régime transitoire, où des ajustements et des échanges d'énergie se produisent pour établir un nouvel équilibre entre le couple moteur et le couple résistant.

En analysant la **Figure (III.3)**, on peut observer que le couple électromagnétique présente des pulsations importantes au début du démarrage. Ces pulsations sont attribuées au régime transitoire et à l'adaptation progressive du couple moteur pour surmonter les inerties et les frictions initiales. Une fois que le régime permanent est atteint, le couple se stabilise et se conforme parfaitement à l'échelon de consigne qui lui a été appliqué.

En ce qui concerne les courants statoriques, une caractéristique notable est l'augmentation du courant au moment de l'application du couple résistant. Cela est dû à l'effort supplémentaire requis pour surmonter la charge et maintenir le mouvement de rotation contre le couple résistant appliqué. Cette augmentation du courant est temporaire et disparaît progressivement à mesure que la machine s'adapte et atteint son régime permanent de fonctionnement.

### III.2. Application de la commande vectorielle à MAS pentaphasée

Afin de démontrer et d'étudier la commande vectorielle, nous avons simulé un moteur cinq phases avec cette commande, ce qui nous permet d'obtenir les résultats de changement de vitesse, de couple et de courant avec l'application d'un couple de charge dans le temps ( $t=1s$ ) et d'une bonne vitesse de référence 157 rad/s [7].

III.2.1. Schéma de simulation

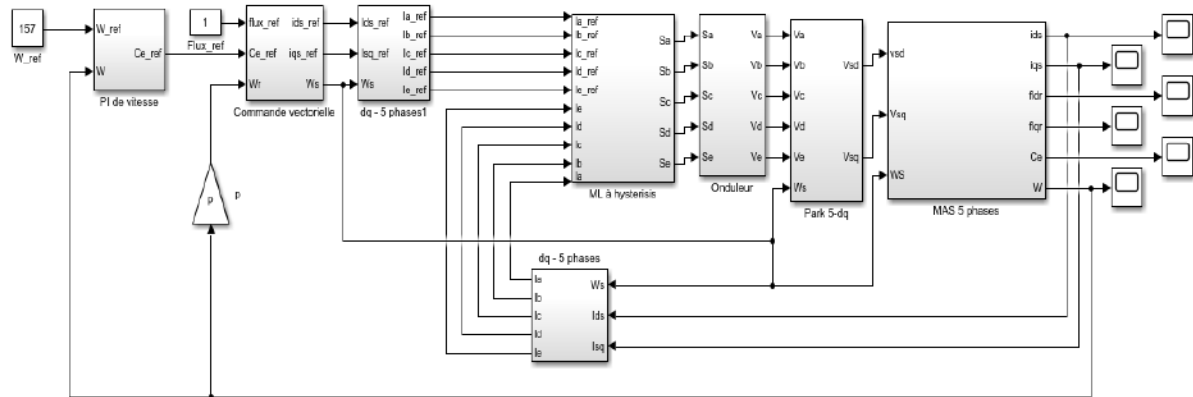
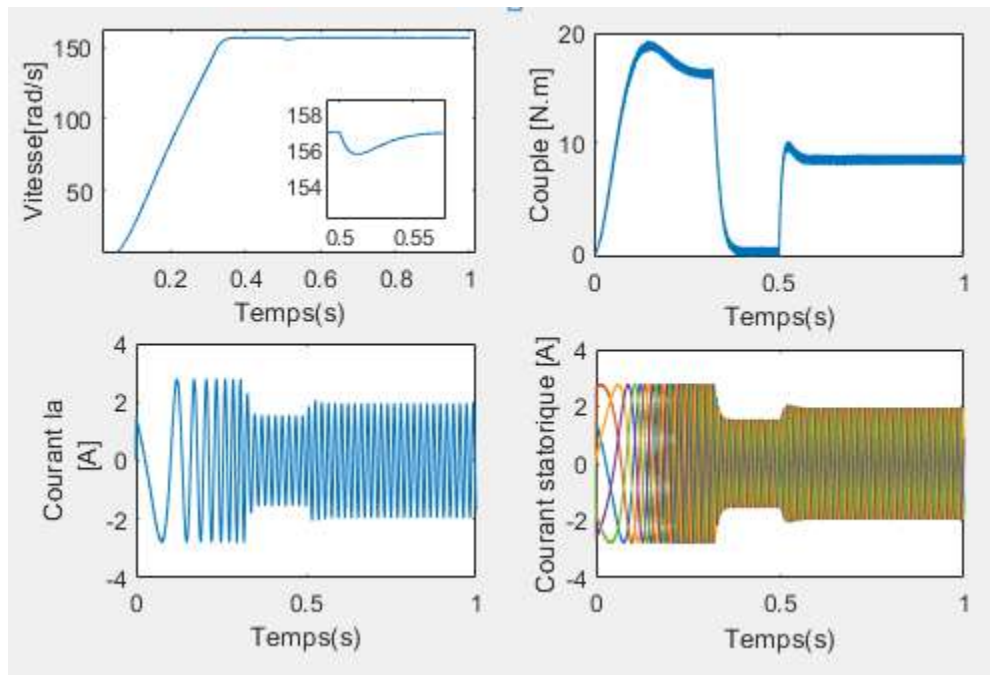
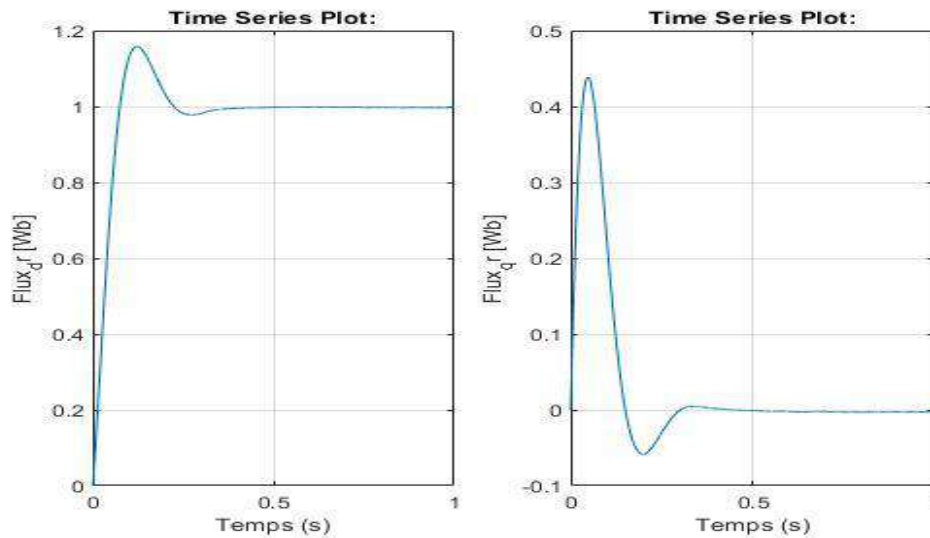


Figure (III.4) : Schéma de simulation de commande vectorielle de MAS pentaphasée.

III.2.2. Résultats de la simulation

La simulation du bloc de la Figure (III.4) permet d’obtenir les figures suivantes :





**Figure (III.5) :** Résultats de la simulation de commande vectorielle de MAS pentaphasée suivie d'une application d'un couple résistant ( $C_r=8.33\text{N.m}$ ) à l'instant  $t= (0.5\text{s})$ .

### III.2.3. Interprétation des résultats

Au cours du démarrage et du fonctionnement à vide de la machine, plusieurs observations significatives ont été faites.

- Initialement, la vitesse du moteur converge vers sa valeur de consigne, démontrant une réponse précise du système. De même, le couple électromagnétique atteint un pic de  $19.3\text{N.m}$  à  $t = 0.1\text{s}$  avant de présenter des oscillations autour de zéro.
- Le courant statorique noté  $I_s$  atteint une valeur maximale de  $2.8\text{ A}$ . Lorsqu'une charge de  $8.33\text{ N.m}$  est appliquée à  $t= 0.5\text{s}$ , le courant  $I_a$  augmente et atteint un pic de  $2.1\text{ A}$ .
- Durant cette période, la vitesse angulaire du système demeure stable à  $157\text{ rad/s}$ , avec une légère perturbation observée lors de l'application du couple résistif à  $t = 0.5\text{s}$ . Cette perturbation induit changement dans la vitesse pendant une durée de  $0,02\text{s}$ . après remonte à la valeur de vitesse de référence souhaitée.

Le couple électromagnétique joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de la machine. Il compense la charge de  $8.33\text{ N.m}$  et oscille autour de cette valeur de référence, conformément à la consigne établie. Dans l'ensemble, ces observations soulignent la capacité de la machine à atteindre et à maintenir ses performances nominales, y compris la vitesse, le couple électromagnétique et la régulation des courants, tout en s'adaptant aux variations de charge et en minimisant les perturbations.

III.3. Application de la commande prédictive MPC à MAS pentaphasée

Dans le cadre de notre étude sur la commande prédictive MPC, nous avons effectué une simulation sur un moteur à cinq phases en utilisant cette technique. Cette approche nous a permis d'analyser les variations de vitesse, de couple et de courant lorsque nous appliquons un couple de charge à un instant donné ( $t=0.5s$ ), tout en maintenant une vitesse de référence stable de 157 rad/s. Ces simulations nous ont fourni des informations précieuses sur les performances de la commande prédictive et son efficacité dans la régulation de ces grandeurs physiques essentielles.

III.3.1. Schéma de simulation

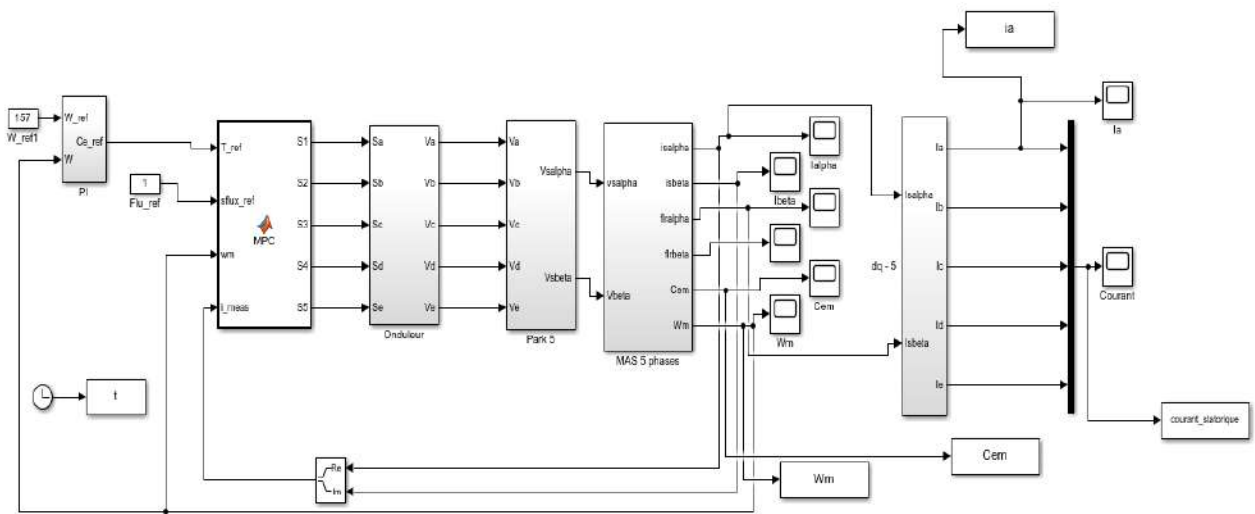
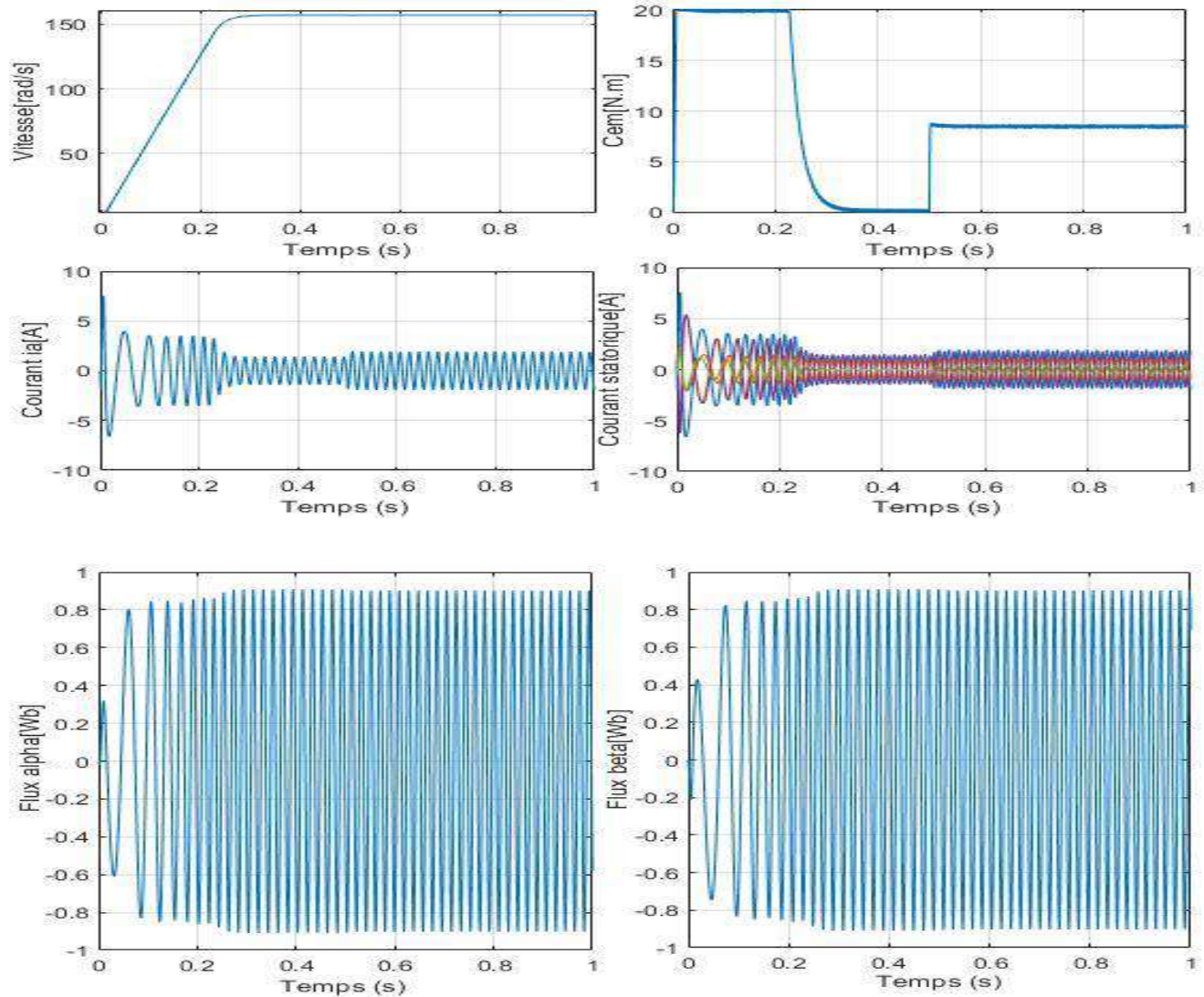


Figure (III.6) : Schéma de simulation de commande prédictive de MAS pentaphasée.



### III.3.2. Résultats de la simulation

La simulation du bloc de la **Figure (III.5)** permet d'obtenir les figures suivantes :



**Figure (III.7) :** Résultats de la simulation de commande prédictive de MAS pentaphasée suivie d'une application d'un couple résistant ( $C_r=8.33\text{N.m}$ ) à l'instant  $t= (0.5\text{s})$ .

### III.3.3. Interprétation des résultats

Lors du démarrage et du fonctionnement à vide il est observé que

- La vitesse du système atteint progressivement sa valeur de consigne. De plus, le couple électromagnétique atteint son maximum de 30 N.m à un instant précis,  $t=0.01\text{s}$ . Après avoir

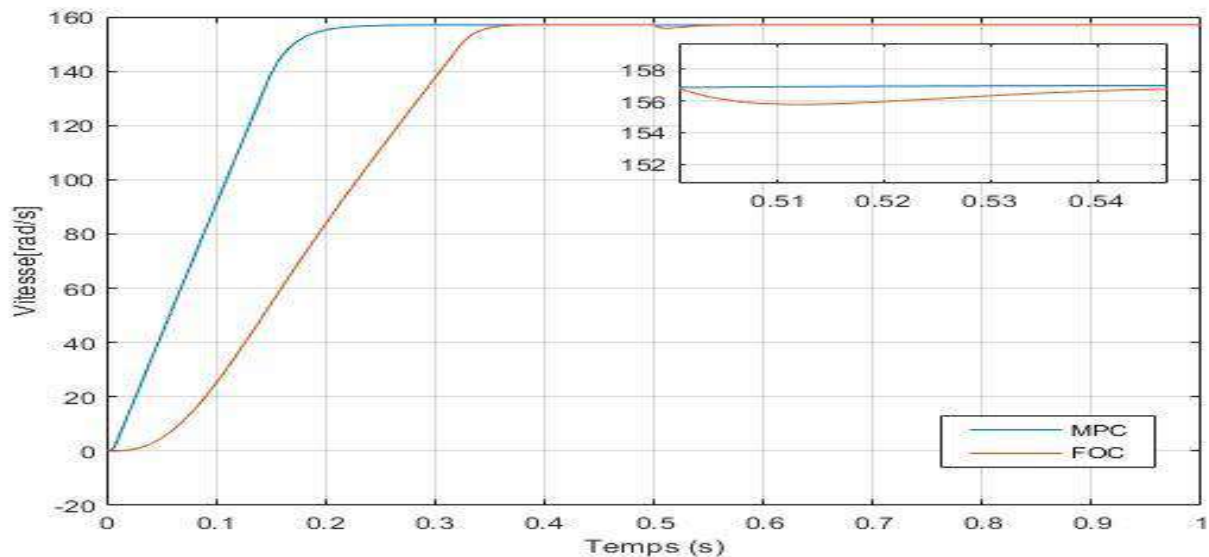
atteint cette valeur maximale, le couple oscille autour de zéro

- Le courant, désigné par  $I_S$ , atteint une valeur maximale de 7.6 A. Lorsqu'une charge de 8,33 N.m est appliquée au temps  $t=0.5s$ , le courant  $I_S$  augmente et atteint un pic de 1.9 A. Pendant cette période.
- La vitesse de rotation reste stable à 157 rad/s, ce qui correspond à la vitesse de référence souhaitée.

### III.4.1. Comparaison entre la commande vectorielle et la commande MPC

Afin de mieux évaluer les résultats obtenus, il est important de procéder à une comparaison entre les deux commandes utilisées. Cette comparaison permettra d'analyser les variations de vitesse, de couple et de courant pour chaque approche, en particulier lors de l'application d'un couple de charge et de la stabilisation de la vitesse de référence. Par ailleurs, cette analyse comparative permettra de mettre en évidence les points forts et les limitations de chaque méthode de commande une telle comparaison offre donc une perspective précieuse pour choisir la méthode de commande la plus adaptée et optimiser ainsi le fonctionnement de la machine électrique.

### III.4.2. Résultats de la simulation



**Figure (III.8) :** Résultats de la simulation de la vitesse  $W_m$  sur la commande MPC et la commande vectorielle.

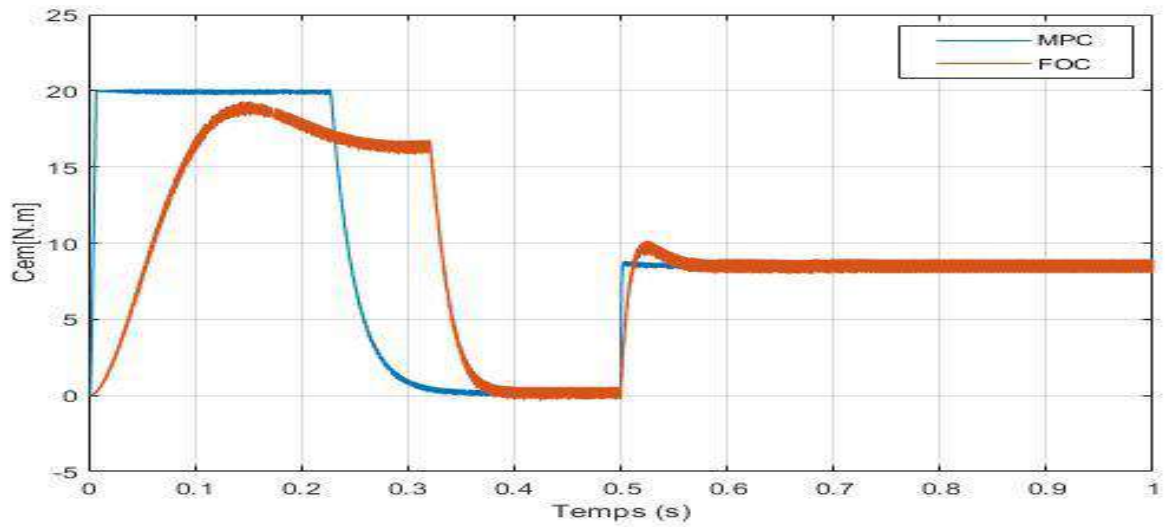


Figure (III.9) : Résultats de la simulation du couple électromagnétique  $C_{em}$  sur la commande MPC et la commande vectorielle.

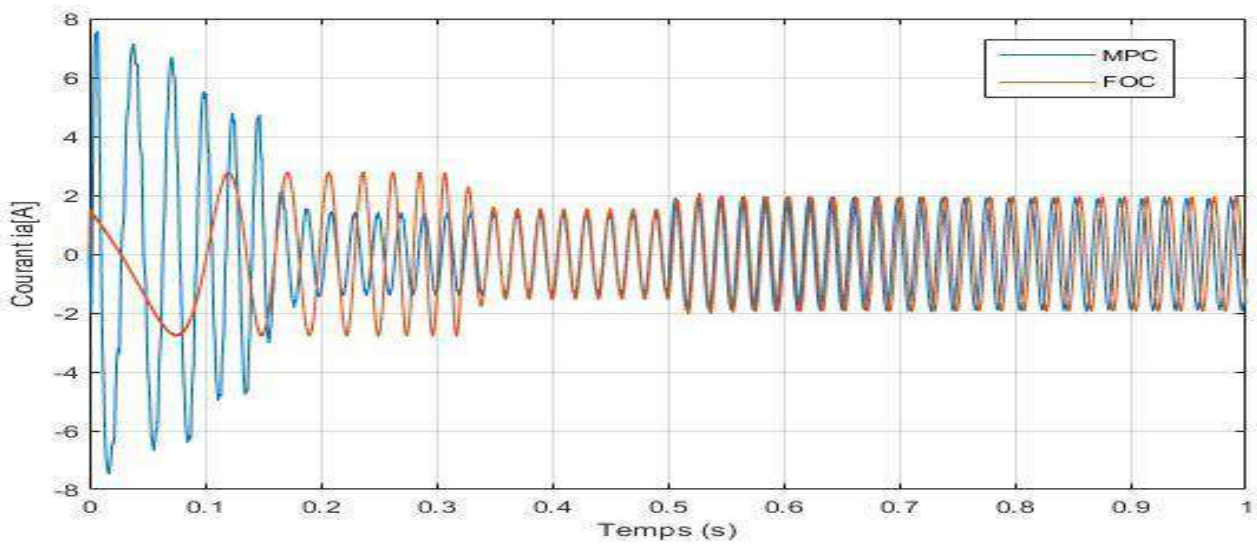
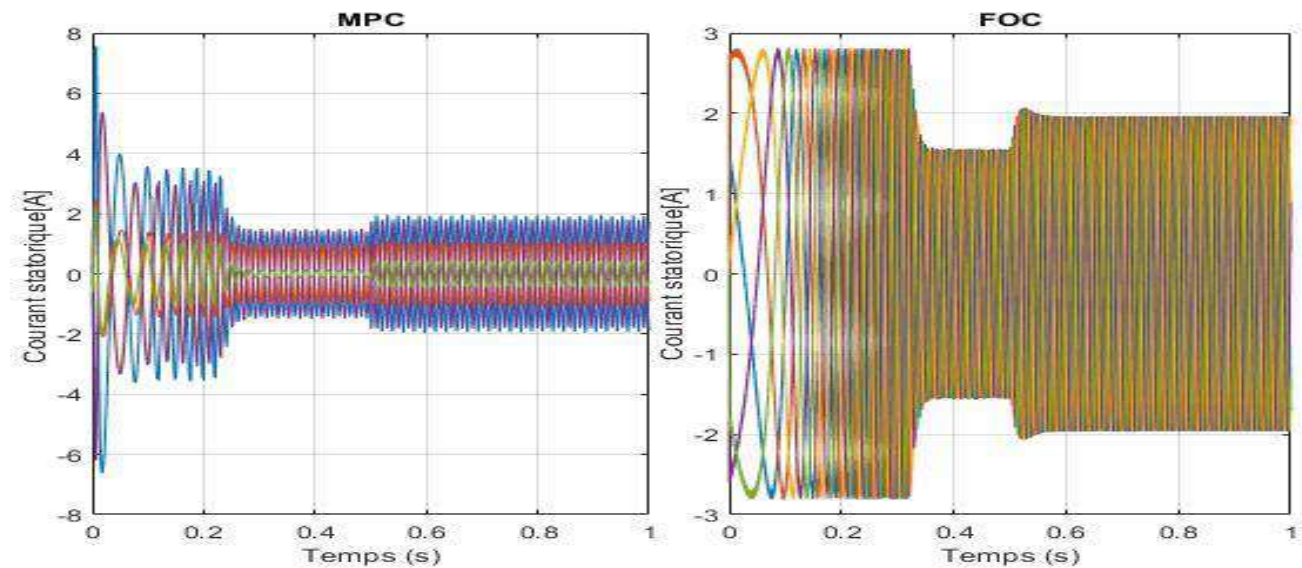


Figure (III.10) : Résultats de la simulation du courant  $I_a$  sur la commande MPC et la commande vectorielle.



**Figure (III.11) :** Résultats de la simulation du courant statorique  $I_s$  sur la commande MPC et la commande vectorielle.

### III.4.3. Interprétation des résultats

En comparant les deux résultats, on peut noter quelques différences :

- Les résultats du couple électromagnétique au démarrage avant l'application du couple résistif est apparait plus faible 19.3 N.m dans la commande vectorielle par rapport au résultat de la commande prédictive 30 N.m.
- Le résultat de courant statorique  $I_s$  maximale au démarrage avant l'application du couple résistif dans la commande vectorielle 2.8 A est inférieure du courant  $I_s$  durant la même période sur la commande prédictive 7.6 A.
- La réponse aux charges de 8.33 N.m diffère également, avec un pic de courant  $I_s$  de 2.1 A dans le résultat de  $I_s$  commande vectorielle et un pic de courant  $I_s$  de 1.9 A dans le résultat de la commande prédictive.
- Les deux résultats parviennent à maintenir une vitesse de rotation stable à 157 rad/s, correspondant à la vitesse de référence souhaitée mais dans la commande vectorielle dans 1s il y a une petite perturbation par contre la commande prédictive est stable.
- Les deux résultats mettent en évidence la capacité des machines à atteindre et à maintenir leurs performances nominales, ainsi qu'à s'adapter aux variations de charge et à minimiser les perturbations.

**Conclusion**

Ce chapitre est initialement pour les résultats de simulation des commandes ont a fait dans la mémoire, premièrement ont à donner le schéma de simulation de l'association de MASP au réseau pentaphasée puis les commentaires sur les résultats des courbes ont a suivi les mêmes étapes pour la commande vectorielle et la commande prédictive

Finalement on a fait comparaison entre les résultats de la commande vectorielle et la commande prédictive

### Conclusion générale

Dans le cadre de nos objectifs, nous avons débuté une étude sur les machines polyphasées en examinant leurs caractéristiques générales. Nous avons identifié deux types de machines polyphasées, à savoir le type 1 et le type 2. Ensuite, nous avons procédé à la modélisation mathématique de la MASP, ce qui nous a permis de développer un modèle de Park réduisant le système d'état électrique de la machine à seulement deux équations, au lieu des cinq initiales.

Nous avons décidé d'étudier le fonctionnement des moteurs cinq phases avec la commande vectoriel indirect du flux orienté du rotor en raison des avantages qu'ils offrent. Notre objectif est d'améliorer les performances de cette machine. Nous portons une attention particulière au contrôle vectoriel par orientation des flux rotoriques des moteurs asynchrones cinq phases, qui permet d'obtenir des performances comparables à celles des moteurs à courant continu à excitation séparée.

Nous avons examiné la commande optimale de manière générale, en définissant ses concepts clés et en explorant les différents types de commandes optimales. Nous avons également étudié les avantages et les inconvénients associés à cette approche. Nous avons commencé par définir la commande optimale comme une stratégie de commande qui vise à minimiser un critère de performance prédéfini, en prenant en compte les contraintes du système.

Nous avons abordé la commande prédictive comme une méthode de commande qui anticipe le comportement futur du système et prend des décisions en fonction de prédictions réalisées par un modèle mathématique. Cette approche permet d'optimiser les performances du système en minimisant les écarts entre les valeurs prédites et les valeurs de référence. Dans notre étude, nous avons considéré la commande prédictive comme une deuxième commande pour optimiser la MASP. Cela signifie que nous avons utilisé cette approche en complément du modèle de Park que nous avons développé précédemment. En intégrant la commande prédictive, nous avons cherché à améliorer davantage les performances de la MASP en tenant compte des prédictions du modèle mathématique.

## Conclusion générale

---

En conclusion, la comparaison des résultats de simulation entre la commande vectorielle et la commande prédictive a révélé des différences significatives. La commande prédictive a démontré un démarrage plus rapide et plus fluide de la machine, ainsi qu'une stabilité de vitesse améliorée en régime permanent. Cela souligne les avantages de la commande prédictive en termes de performances dynamiques et de précision de contrôle. Cependant, la mise en œuvre de la commande prédictive peut être plus complexe et exigeante en termes de ressources de calcul. Il est donc important de considérer attentivement les objectifs et les contraintes spécifiques du système avant de choisir la méthode de contrôle appropriée.

---

## Référence Bibliographique

- [1] Kachi Abdessalam et Defrour Mohammed Achraf (**COMMANDE VECTORIELLE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE POLYPHASEE**) mémoire de Electrotechnique Industrielle, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA :(2021/2022).
- [2] DELLYS Abdelhak et BAHADJ Mustapha « **Etude et modélisation d'une machine asynchrone à 5 phases** » mémoire d'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen :(2020).
- [3] BESSEDIK Toumia (**Identification paramétrique d'une machine asynchrone Pentaphasée**) mémoire de École Nationale Polytechnique d'Alger Soutenu à 2010.
- [4] MECHIKI ABDELMOUNAIME, (**commande de la machine asynchrone polyphasée**) mémoire de Génie ELECTRONIQUE, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA (Année universitaire : 2018 /2019).
- [5] M. Laamayad Tahar (**Commande Optimale d'une Machine Asynchrone Apport de La Logique Floue**) mémoire en Electrotechnique, Université de Batna Faculté des Sciences de l'Ingénieur (Soutenu 2008).
- [6] NEKMOUCHE YOUNES, MOUSSAOUI BACHIR « **Modélisation des moteurs asynchrones polyphasés, dédiée au diagnostic de courts-circuits inter-spires. Application aux moteurs pentaphasée et double étoile** » mémoire EN GENIE ELECTRIQUE, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou(2008).
- [7] Mohamed ZENDI et Lounis ZOULIM (**Modélisation d'une machine asynchrone Pentaphasée**) mémoire en Machines Electriques, UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU :(2015).
- [8] M. Bernard, « **Historique des machines électromagnétiques et plus particulières des machines a réluctance variable** » Revue 3E. In°3. pp. 3–8, Juin 1995.
- [9] N. Habani, "**Commande optimale appliquée à un entraînement à base du moteur synchrone à réluctance variable**", mémoire de Université Mouloud Maameri, Tizi - Ouzou, 2008.
- [10] M. Mechergui, "**Commande optimale minimisant la consommation d'énergie d'un drone utilisée comme relai de communication**", Mémoire, l'école technologie supérieur, Université du QUÉBEC, 2014.
-



- 
- [11] José Miguel. Ramirez, "**Contribution à la commande optimale des machines asynchrone**", Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Automatique de Grenoble, 1998.
- [12] C. Tebbiche et M. Toubouche, "**Résolution d'un problème de commande optimale en utilisant l'identité de Beltrami : Application au remplissage d'un bac de stockage**", mémoire, Université Mouloud Maameri, Tizi-Ouzou, 2016.
- [13] Ioan Cristian Trelea, "**Commande prédictive optimale sous contraintes des procédés discontinus non linéaire utilisés dans l'industrie alimentaire**", Thèse de l'école nationale supérieure des industries agricoles alimentaire, 1997.
- [14] S. Driss, S. Farhangi, M. R. Nikzad, "**Low switching frequency model predictive control of PMSM drives for traction applications**," 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), (Tehran, 2018), pp. 300–305.
- [15] W. Hu, H. Nian, D. Sun, "**Zero-sequence current suppression strategy with reduced switching frequency for open-end winding PMSM drives with common DC bus**. IEEE Trans. Industr. Electron. 66(10), 7613–7623 (Oct. 2019).
- [16] Haitham Abu-Rub/ Atif Iqbal/ Jaroslaw Guzinski (**HIGH PERFORMANCE CONTROL OF AC DRIVES WITH MATLAB®/ SIMULINK (2021)**).
- [17] A. Bezzini, « **Commande Prédictive Non Linéaire En Utilisant Les Systèmes Neuro-Flous Et Les Algorithmes Génétiques** », Mémoire, Université Mohamed Khider De Biskra, 2013.
- [18] Yaofei Han Chao Gong Jinqiu Gao Editors '**Model Predictive Control for AC Motors**' (2022).
- [19] **Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives**, First Edition. Jose Rodriguez and Patricio Cortes. © 2012 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2012 by John Wiley & Sons, Ltd.
-

---

## **Annexe : Paramètres de la machine pentaphasée**

- **Nombre de phases** : 5 (Moteur pentaphasée)
  - **Nombre de pair de pole** : 2
  - **Fréquence** : 50 Hz
  - **Tension statorique** : 220V
  - **Courant nominal** : 2.1 A
  - **Résistance statorique** : 10  $\Omega$
  - **Résistance rotorique** : 6.3  $\Omega$
  - **Inductance de fuites statorique** : 0.46 H
  - **Inductance de fuites rotorique** : 0.46 H
  - **Inductance magnétisante** : 0.42 H
  - **Moment d'inertie** : 0.0032 kg.m<sup>2</sup>
  - **Coefficient de frottement** : 0.00114
-