

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE  
SPECIALITE : COMMANDE  
MACHINE TOURNANT



FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE  
NO D'ORDRE : CSE 251

# ***MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER***

*Présenté par :*

*LAARAF Sid Ahmed*

*AICHE Badreddine*

*Intitulé de :*

**Commande de deux moteurs  
asynchrones triphasés par  
onduleur à cinq bras**

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2021 / 2022

# شكر و تقدير

قال الله تعالى << وقالو الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله >>.

الحمد لله والشكر لله والصلاة والسلام على رسول الله، اما بعد ....

نشكر الله تعالى عما وصلنا اليه من نجاح وتوفيق بإنهاء هاته المذكرة، فهي ترمين لمجهودات سنوات من الدراسة و البحث.

نتقدم بالشكر لكل من ساهم في وصولنا الى هذه المرحلة وعلى رأسهم والدينا تيجان رؤوسنا أدامهم الله لنا بالصحة و العافية فهم أساس النجاح والتوفيق.

بداية نشكر الأستاذ القدير والمشرف علينا في هذه المذكرة الدكتور غضبان إسماعيل على وقوفه معنا و صبره علينا، كما نشكر الأستاذ بوزيدي رياض على كل ما قدمه لنا.

كما نشكر اللجنة العلمية التي بذلت الجهود من أجل تقييم هذه المذكرة.

كما أتوجه بالشكر لكل من ساهم في بحثنا هذا من قريب أو من بعيد، حتى بالكلمة الطيبة والتشجيع.

و من دون أن ننسى جهود طواقم الجامعة الذين ساهموا في رفع اسم جامعتنا جامعة محمد بوضياف المسيلة في ربوع الوطن.

شكرا لكم جميعا.

# إهداء

نهدي هذا العمل الى أعلى الناس على قلوبنا، والدينا الذين وقفوا بجانبنا في السراء والضراء، وساندونا في لحظات سقوطنا و ذرفوا دموع الفرح في نجاحنا. اللهم احفظهم لنا وارحمهم كما ربياني صغيرا.

ونتوجه بالإهداء الى عائلتنا، عائتي لعراف و عيش، لكل الأقارب و الأحاب. اللهم ارحم منهم الأموات وأسكنهم فسيح جناتك، و من هذا المنبر أتوجه بالإهداء الى عمي المتوفى لعراف عمار معلم و مربي الأجيال و جدي لعراف الدراجي دتمم أحياء في قلوبنا رحمكم الله وأسكنكم فسيح جناتك.

و أتوجه بالإهداء الى روح جدي المتوفى الحاج نقاز أحمد الانسان الغالي على قلبي، و الى صديقي المتوفى محمد لوعيل خاتم القرآن الكريم نسأل الله أن يلبسه تاج من تيجان النور ويسكنهم فسيح جناته.

وأوجه اهداء خاص لأخي الأصغر كمال لعراف رفيق الدرب و الحياة، متمنيا لك النجاح في الحياة الجامعية.

وأهدي هذا النجاح الى طلبة خريجي دفعة ماستر 2022، دفعة تعبت من أجل هذه اللحظات، مررنا بالكثير فمبارك لنا النجاح.

وأخصص هذا الإهداء الى خريجي تخصصنا التحكم في الماكينات الدوارة اخوتي الأفاضل و أخواتي الفضليات مبارك لنا التخرج و متمنيا لي و لكم قادم النجاحات بحول الله تعالى.

# SOMMAIRE :

<i>INTRODUCTION GENERALE</i> .....	1
<i>Chapitre I : modélisation et simulation de machine asynchrone.</i>	
<i>I.1 Introduction</i> .....	4
<i>I.2 Définition de machine asynchrone</i> .....	4
<i>I.3 Description de machine asynchrone</i> .....	5
<i>I.4 Avantages et inconvénients la machine asynchrone</i> .....	5
<i>I.5 Modélisation de machine asynchrone</i> .....	6
<i>I.5.1 Modélisation de MAS dans le plan triphasé abc</i> .....	6
<i>I.5.2 Equations générale de machine asynchrone triphasé</i> .....	7
<i>I.6 Transformation de PARK</i> .....	10
<i>I.7 Modélisation de MAS dans le plan biphasé dq</i> .....	10
<i>I.8 Simulation de modèle de machine asynchrone</i> .....	13
<i>I.9 Résultats de simulation</i> .....	14
<i>Conclusion</i> .....	19
<i>Chapitre II : L'association entre machine asynchrone et onduleur triphasé</i>	
<i>II.1 Introduction</i> .....	21
<i>II.2 L'association entre MAS-onduleur</i> .....	21
<i>II.3 Modélisation mathématique d'onduleur triphasé</i> .....	22
<i>II.4 Résultats de simulation</i> .....	26
<i>II.5 Simulation de l'association de machine asynchrone et onduleur triphasé...</i>	27
<i>II.6 Stratège de commande de l'association de machine asynchrone et onduleur triphasé</i> .....	31
<i>II.6.1 La commande scalaire</i> .....	31
1) <i>Principe de commande scalaire</i> .....	31
2) <i>Principe de commande scalaire en boucle ouverte</i> .....	32
3) <i>Principe de commande scalaire en boucle fermé</i> .....	33
4) <i>Résultats de simulation</i> .....	35
<i>II.7.2 La commande vectorielle</i> .....	42

<i>1) principe de la commande vectorielle</i> .....	42
<i>2) Orientation de flux rotorique</i> .....	42
<i>3) Commande vectorielle avec alimentation en tension</i> .....	43
<i>4) commande vectorielle indirect</i> .....	44
<i>5) Résultats de simulation</i> .....	47
<i>Conclusion</i> .....	50
<i>Chapitre III : L'association entre deux machine asynchrone et onduleur cinq bras</i>	
<i>III.1 Introduction</i> .....	52
<i>III.2 Onduleur cinq bras</i> .....	52
<i>III.2.1 Modélisation d'onduleur de tension à cinq bras</i> .....	52
<i>III.2.2 Commande MLI onduleur à cinq bras</i> .....	54
<i>III.3 L'association entre onduleur cinq bras et deux MAS</i> .....	56
<i>III.4 Application de commande scalaire sur l'association deux MAS avec onduleur cinq bras</i> .....	59
<i>III.4.1 En boucle ouverte</i> .....	59
<i>III.4.2 En boucle fermé</i> .....	61
<i>III.5 Application de commande vectorielle sur l'association deux MAS avec onduleur cinq bras</i> .....	63
<i>Conclusion</i> .....	66
<i>CONCLUSION GENERALE</i> .....	68
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE</i> .....	70

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction Générale

Avec le développement industriel, il est devenu une nécessité d'utiliser des systèmes d'entraînement de multi-moteurs, ces systèmes répondent aux demandes d'une commande dépendante ou indépendante des moteurs pour différente charge et vitesse. On trouve ce type des systèmes dans le processus de fabrication dans l'industrie de textile [1].

Afin d'améliorer les performances d'un système d'entraînement de multi-moteurs, des modifications de la structure de l'onduleur et des nouvelles stratégies de commande ont été développés. Plusieurs topologies des onduleurs sont proposées, telles que l'onduleur à cinq bras et à sept bras. Ce type des onduleurs présentent essentiellement deux avantages : il permet de réduire le nombre de composants de puissance d'une part, et d'autre part la diminution du coût global de système. Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre pour commander les onduleurs multi-bars, la plus utilisée est la modulation de largeurs d'impulsions (MLI). Ces techniques sont des extensions des stratégies MLI appliquées aux onduleurs triphasés à deux niveaux [2],[3],[4].

Les systèmes d'entraînements sont beaucoup plus occupés par les moteurs asynchrones triphasés (MAS) qui présentent l'avantage d'être robustes, de construction simple et peu coûteuses, mais leurs commandes sont plus complexes que celle d'un moteur à courant continu. Pour le MAS, il est difficile d'obtenir le découplage effectif entre les deux grandeurs de commande qui sont le flux magnétique et le couple électromagnétique. Plusieurs méthodes pour commander un MAS, on peut citer : la commande scalaire, la commande vectorielle et la commande directe de couple ; sont les plus utilisées jusqu'aujourd'hui [5], [6].

Le développement continu dans le domaine d'électronique de puissance qui offre des composants électroniques capables de supporter de forte tension inverse et de fort courant, permet d'utiliser un bras commun entre plusieurs moteurs [7].

Le contenu de ce mémoire est structuré en trois chapitres présentés comme suit :

Le première chapitre est contient la modélisation de machine asynchrone nous présenterons le modèle mathématique triphasé de MAS ainsi que sa transformation dans le système biphasé en utilisant la transformation de Park.

L'association de MAS et onduleur triphasé fait l'objectif de deuxième chapitre, on a démontré c'est quoi l'onduleur et fait sa modélisation, et commande la machine par quelque commande comma commande scalaire et vectorielle.

Et dans le troisième chapitre, nous étudions l'association de deux MAS et un onduleur cinq bras, on a modulé l'onduleur cinq bras et simuler avec deux MAS. Ensuite applique les commandes mentionné au-dessus

# **Chapitre I**

**Modélisation et simulation de  
la Machine asynchrone**

## I.1 Introduction:

Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS). Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois.

Dans un dernier lieu, on donnera la simulation numérique des différentes grandeurs de la MAS [8].

Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques. Le modèle mathématique d'une Machine Asynchrone (MAS) nous facilite largement son étude et permet sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent [9].

La représentation de la machine asynchrone par des équations selon le système triphasé donne un modèle, dont les équations sont à coefficients variables en fonction du temps [10].

Dans le but de faciliter leur résolution, on a recours à une modélisation dite «transformation de Park», qui consiste à transformer le système triphasé en système à deux axes orthogonaux. L'élaboration d'une telle modélisation est indispensable pour l'étude du régime de contrôle du flux, de couple, de régulation de tension et de vitesse[11].

## I.2 Définition de la machine asynchrone :

On appelle machine asynchrone toute machine, qui, ayant  $(2p)$  pôles et étant reliée à un réseau de fréquence  $f_s$ , ne tourne pas exactement à la vitesse synchrone  $(60f_s/p)$ . On parle généralement de moteurs asynchrones car ces machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique à partir du réseau électrique [12].

## I.3 Description de la machine asynchrone triphasée :

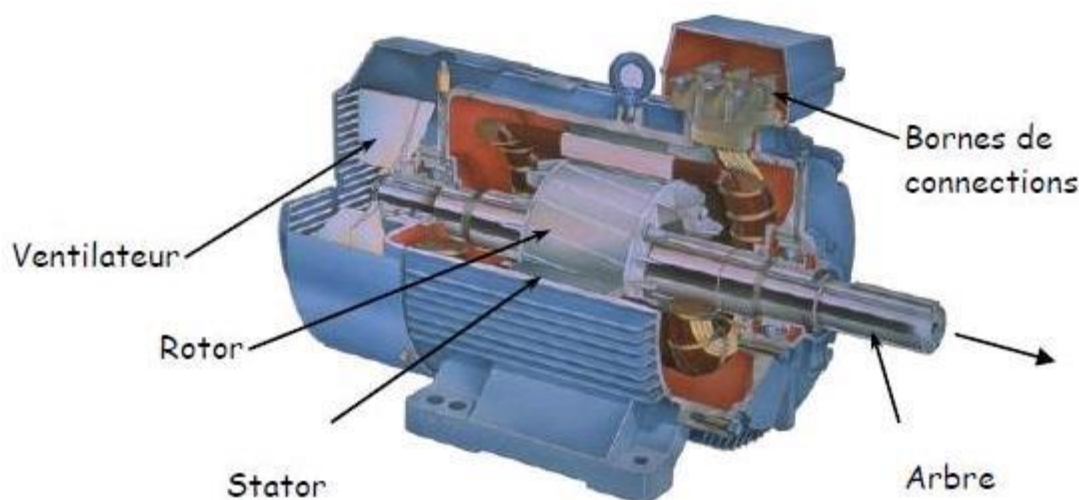


Figure I.1 : Constitution de La machine asynchrone.

Le moteur asynchrone est le plus couramment utilisé à cause de son faible coût et de sa robustesse ; il fonctionne grâce à une tension alternative 220V monophasé ou 380 V triphasé.

On peut difficilement faire varier sa vitesse de rotation en modifiant la fréquence de la tension (en Hertz). Il peut fournir des couples (en Nm) très importants mais possède des vitesses de rotation souvent inférieures à 3000 tr/min[13].

## **I-4 Avantages et inconvénients la machine asynchrone :**

Le moteur asynchrone est le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie; il est peu coûteux, on le fabrique en grande série, il est robuste, fiable et économique.

Il fonctionne directement sur le secteur alternatif, sans transformations préalables de l'énergie électrique qui l'alimente, c'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organes délicats comme le collecteur du moteur à courant continu et qui n'utilise pas de contacts glissants comme le moteur synchrone (pour l'excitation du rotor).

Les courants qui circulent dans le stator, constituent l'unique source externe du champ magnétique. Sa vitesse varie un peu quand on le charge, on dit qu'il glisse, mais ce glissement est en générale ne dépasse pas quelques centièmes de la vitesse à vide, il est négligeable le plus souvent. Le démarrage des moteurs asynchrones ne pose pas de problèmes pour les unités de petite puissance. Par contre, pour les moteurs de forte puissance, il faut démarrer sous tension réduite pour éviter un appel de courant trop élevé.

Par contre dans le moteur asynchrone les courants statoriques sont à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe pas. D'autre part on ne peut connaître les variables internes du rotor à cage qu'à travers le stator.

L'inaccessibilité du rotor nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator. La simplicité structurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle due aux caractéristiques qui viennent d'être évoquées mais également aux non linéarités, à la difficulté d'identification et aux variations des paramètres ( $R_r$  en particulier) [14].

## **I-5 Modélisation de la machine asynchrone:**

### **I.5.1 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc :**

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure I.2 et dont les phases sont repérées respectivement par SA, SB, SC. L'angle électrique  $\theta$  variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases SA et Ra choisis comme axes de référence [15].

$$\theta = (a, A)$$

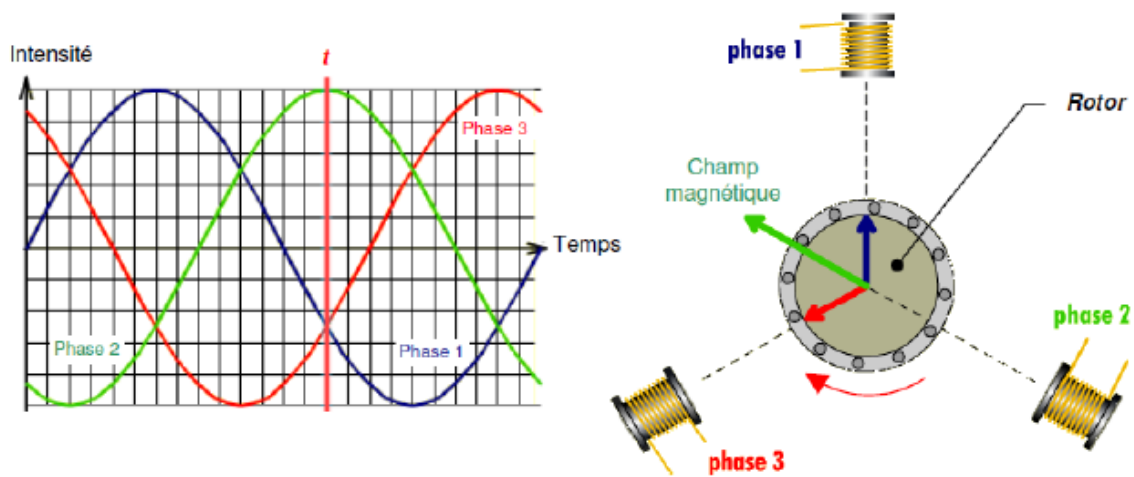
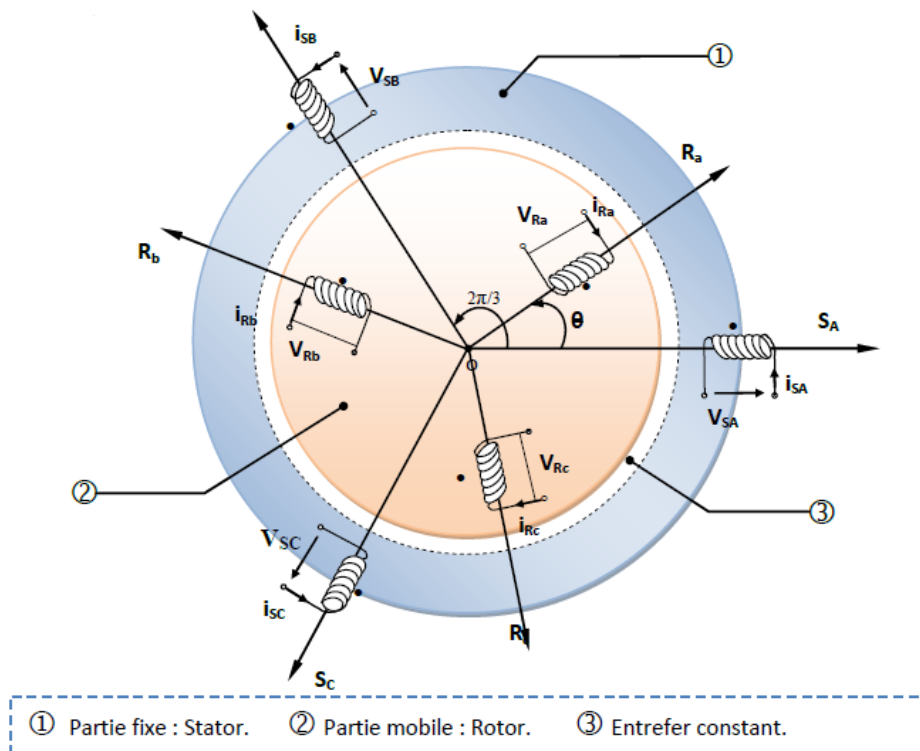


Figure.I.2 : Modèle d'une machine asynchrone triphasée.

### I.5.2 Équations générales de la machine asynchrone triphasée :

Dans ces conditions, si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et au rotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont[16]:

### a- Equations électriques :

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques Sont:

$$\left. \begin{aligned} V_{sa} &= R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ V_{sb} &= R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-1})$$

$$\left. \begin{aligned} V_{sc} &= R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \\ V_{ra} &= R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ V_{rb} &= R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ V_{rc} &= R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-2})$$

En désignant par:

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  : Flux totaux à travers ces enroulements.

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ : Tensions rotoriques

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ : Courants rotoriques

$\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  : Flux rotoriques

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique.

$R_r$ : Résistance d'une phase rotorique

Les équations (I2) et (I3) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante.

**Pour le stator :**

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{I-3})$$

**Pour le rotor :**

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{I-4})$$

## b-Equation magnétiques :

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matriciellement comme suit : [17].

**Pour le stator:**

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = [Ls] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [Msr] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{I-5})$$

**Pour le rotor:**

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [Lr] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [Msr] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{I-6})$$

$$\text{Tel que : } [Msr] = [Mrs]^T$$

**On désigne par:**

[Ls] : Matrice des inductances statoriques.

[Lr] : Matrice des inductances rotoriques.

[Msr] : Matrice des inductances mutuelles statoriques.

[Mrs]: Matrice des inductances mutuelles les rotoriques.

$$[Ls] = \begin{bmatrix} Ls & Ms & Ms \\ Ms & Ls & Ms \\ Ms & Ms & Ls \end{bmatrix} \quad (\text{I-7})$$

$$[Lr] = \begin{bmatrix} Lr & Mr & Mr \\ Mr & Lr & Mr \\ Mr & Mr & Lr \end{bmatrix} \quad (\text{I-8})$$

Ainsi:

$$[Msr] = [Mrs]^T = Mo \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{I-9})$$

Avec :

$I_s$ : Inductance propre d'une phase statorique.

$I_r$ : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$ : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$\theta$ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisi comme axes des références.

$M$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase  
Correspondent du rotor

### c-Equations mécaniques :

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) [18].

$$C_e = P[I_{s(abc)}]^T \frac{d}{dt} [Msr][I_{r(abc)}] \quad (\text{I-10})$$

Pour avoir un modèle complet de la machine il nécessite d'introduire l'équation du mouvement de la machine est exprimée comme suivant :

$$J \frac{d}{dt} \Omega r = C_e - C_r - f \Omega r \quad (\text{I-11})$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie des masses tournantes.

$C_r$ : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

$\Omega r$ : Vitesse rotorique.

$C_e$ : Couple électromagnétique.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

Les équations (I.2) ainsi obtenus sont à coefficients variables entraînant la complexité de résolution du modèle défini par (I.1). Cela conduira à l'usage de la transformation de Park qui permettra de rendre constant ces paramètres.

## I.6 Transformation de Park :

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en le ramenant à un modèle unique, Cette conversion est appelée souvent transformation des axes, fait correspondant aux deux enroulements de la machine originale suivie d'une rotation, les enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation [19].

## I.7 Modélisation de la MAS dans le plan biphasé dq:

Du fait de l'existence des termes trigonométriques continus dans la matrice des inductances mutuelles  $[M_{sr}]$ , les coefficients des équations différentielles sont variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables. Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en deux enroulements biphasés orthogonaux dq selon la transformation de PARK. La conversion implique la transformation des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. La figure (I-3) représente la transformation des enroulements réels abc en enroulements orthogonaux d-q [20].

- Direct selon l'axe (d).
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire (o).

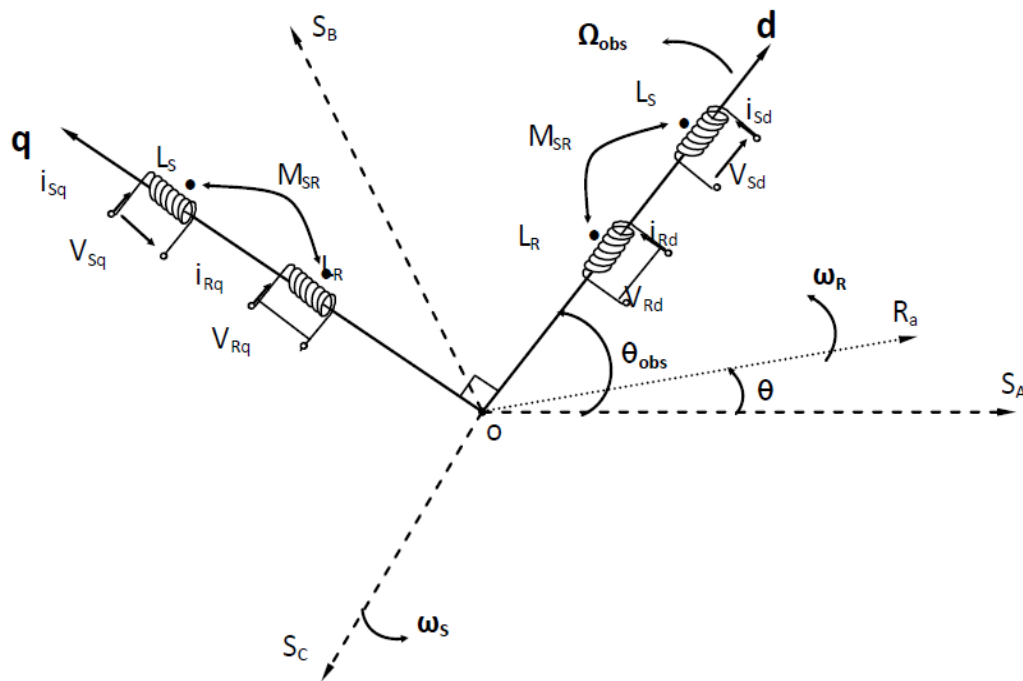


Figure I.3 : référentiel tournant d'axes dq.

Où :

$\theta_{obs} = \int \omega_{obs} dt$  : est une position quelconque d'observation entre les systèmes d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

La application de la transformation de Park à la machine asynchrone correspond à une transformation des trios bobine (statorique et rotorique) à deux bobine équivalente reprenant les mêmes considération ou aspects en terme, de flux, de couple, de courant ou du mois une image qui leur sera parfaitement proportionnelle [21].

Pour le passage du système triphasé vers le système biphasé, on a les équivalents suivants [22]:

- L'équivalent de tension :  $[V_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][V_{abc}]$
- L'équivalent de courant :  $[I_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][I_{abc}]$  **(I-12)**
- L'équivalent de flux :  $[\Phi_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][\Phi_{abc}]$

Ou :

$[P(\theta_{obs})]$  : est la matrice de Park

Dans le cas d'un passage inverse, on a :

$$\left[ \begin{array}{l} [V_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[V_{dqo}] \\ [I_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[I_{dqo}] \\ [\Phi_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[\Phi_{dqo}] \end{array} \right. \quad \text{(I-13)}$$

La matrice de transformation de Park modifiée directe et inverse s'écrit alors :

$$[P(\theta_{obs})]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & \cos(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{obs}) & -\sin(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(I-14)}$$

Le facteur  $(\sqrt{\frac{2}{3}})$  : est là pour conserver la puissance électrique instantanée.

$$[P(\theta_{obs})]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & -\sin(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(I-15)}$$

Lorsque l'angle est attribué à la valeur zéro, la transformation de Park est dite

Transformation de Clarke et la matrice de passage s'écrit comme suit:

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(I-16)}$$

L'application de la transformation de Park aux modèles matriciels électriques, (I-3) et (I-4), et magnétiques, (I-5), (I-6), permet d'obtenir les équations suivantes:

### a-Equation électrique:

#### Equations des tensions :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{I-17})$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ (\omega_s - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-18})$$

### b -Equation magnétique :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rq} \\ I_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{I-19})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sq} \\ I_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{I-20})$$

Avec:

$L_s = I_s - M$ ,  $L_r = I_r - M$  ; Inductance cyclique propre du stator et du rotor respectivement.

$M = \frac{3}{2}M_o$  : Inductance cyclique mutuelle stator-rotor

### c-Equation mécanique :

Le couple électromécanique représenté dans l'équation (I-10) devient :

$$C_{em} = p * \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} I_{sd} - \Phi_{rq} I_{sq}) \quad (\text{I-21})$$

L'équation de la vitesse mécanique est représentée par l'équation (I-11).

$$J \frac{d}{dt} \Omega r = C_{em} - C_r - f \Omega r \quad (\text{I-22})$$

## I-8 Simulation du modèle de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est normalement alimentée directement à partir du réseau industriel par un système de tensions triphasées équilibrées.

Dans certaines applications pour lesquelles la variation de la vitesse est nécessaire, le moteur sera alimenté par un système de tensions triphasées ou par un système de courants triphasés (injectés) dans les enroulements du stator, par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance placé entre le moteur et le réseau industriel électrique[23].

La simulation sera faite dans les deux référentielles (d ,q) et ( $\alpha,\beta$ ).pour un essai en charge nominale après un démarrage à vide.

Les tensions d'alimentation ont supposées parfaitement sinusoïdales d'amplitudes égales et constantes, elles peuvent présentées comme suite :

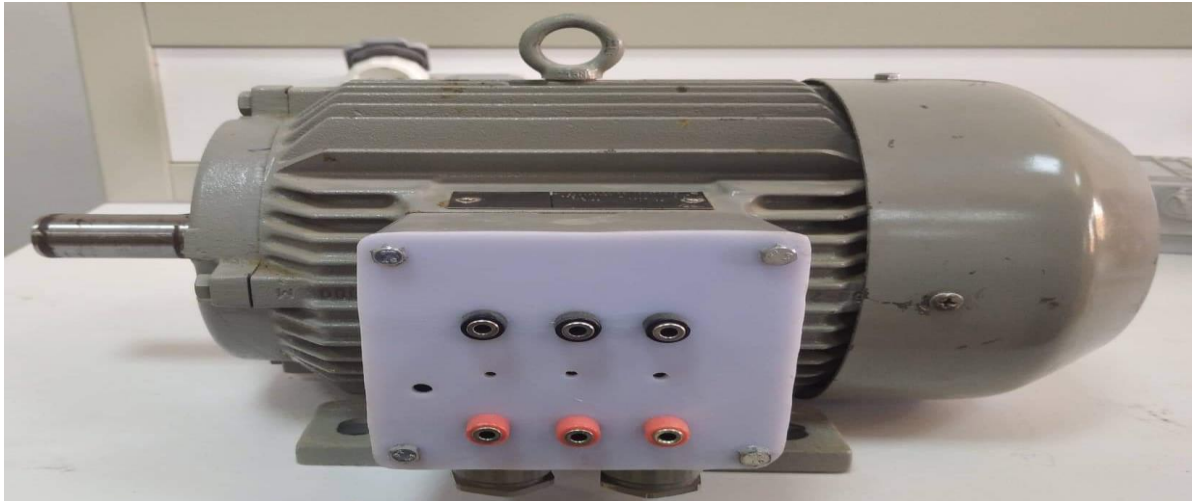
$$\left[ \begin{array}{l} V_{sa} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega st) \\ V_{sb} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega st - \frac{2\pi}{2}) \\ V_{sc} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega st - \frac{2\pi}{2}) \end{array} \right. \quad (\text{I-23})$$

$V_s$  : Valeur efficace de tension

$\omega_s$  : Pulsation d'alimentation

### I-9 Résultats de simulation :

Les paramètres de cette machine proviennent d'une machine dans laboratoire de recherche de l'université Mohammed BOUDIAF M'sila :



Les paramètres de cette machine sont :

paramètre	$R_s$	$R_r$	$L_s, L_r$	$M$	$J$	$P$	$F$	$f_s$	$f_p$
valeur	9.01 $\Omega$	6.693 $\Omega$	0,8154 H	0,785 H	0,031 Kg.N/m	2	0.012 N.m	50Hz	10kHz

Tableau I.1 : les paramètres de la machine asynchrone.

Pour la tension égale 380V et fréquence égale 50Hz :

- Démarrage à vide : ( $C_r = 0$  N.m)

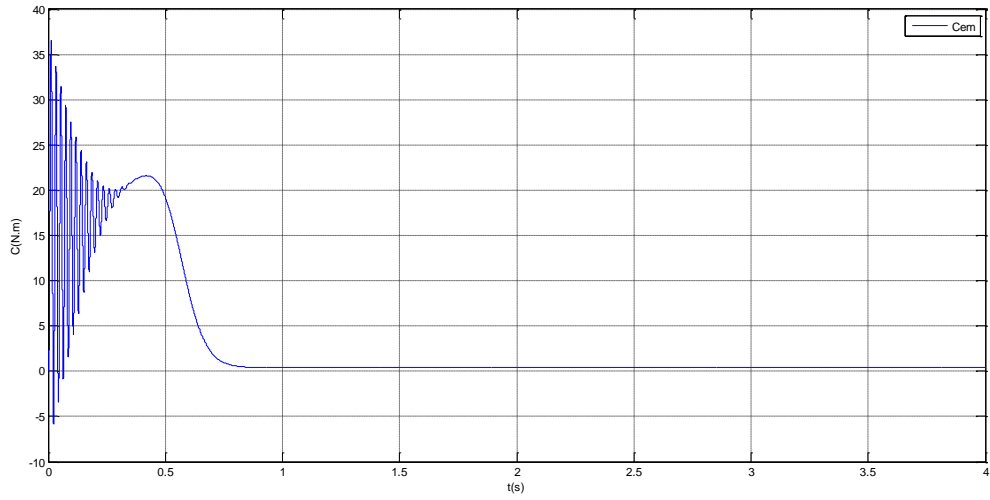


Figure I.4 : Le Couple mécanique de machine asynchrone.

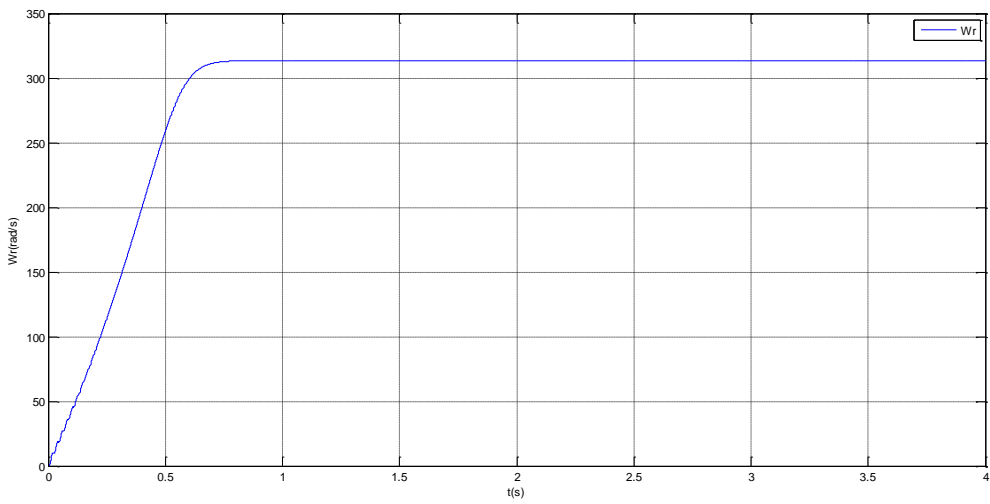


Figure I.5 : Vitesse rotorique de machine asynchrone.

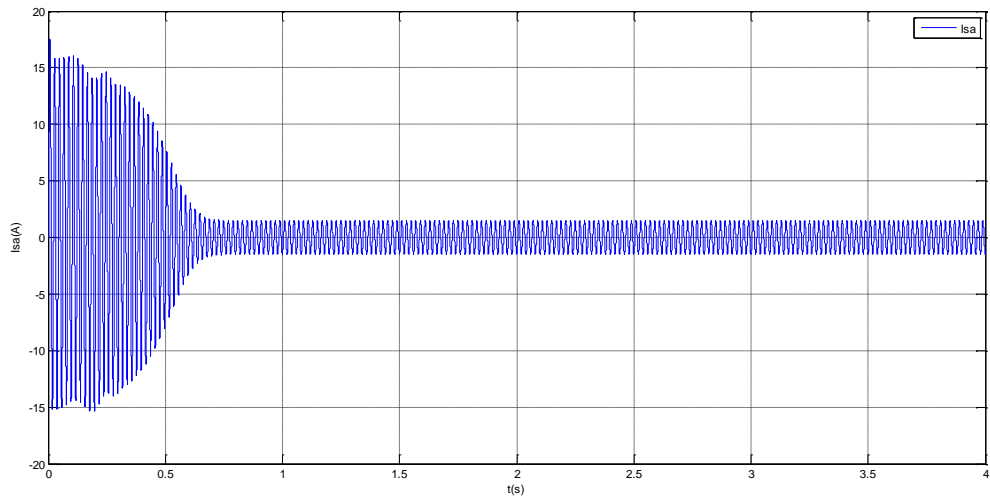


Figure I.6 : Courant statorique de phase a.

- En charge : ( $C_r=20$  N.m) :

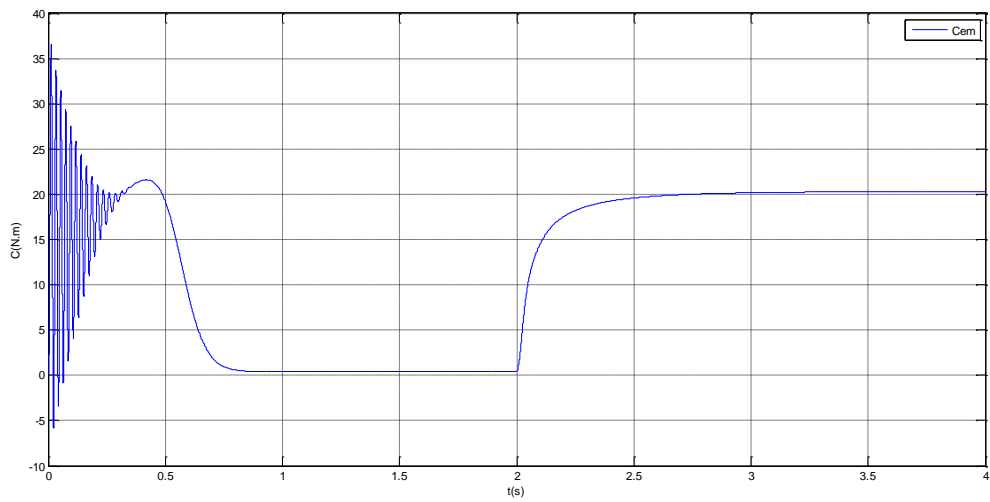


Figure I.7 : Couple mécanique de machine asynchrone.

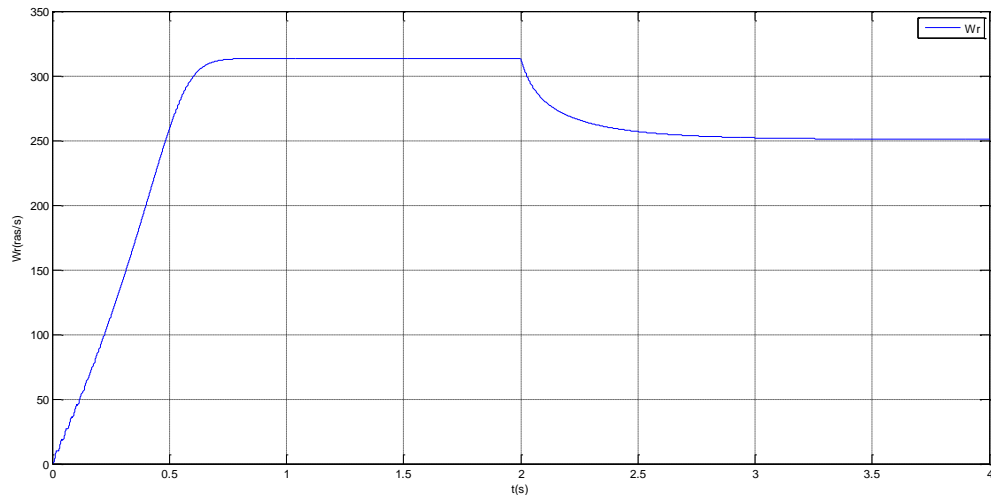


Figure I.8 : Vitesse rotorique de machine asynchrone.

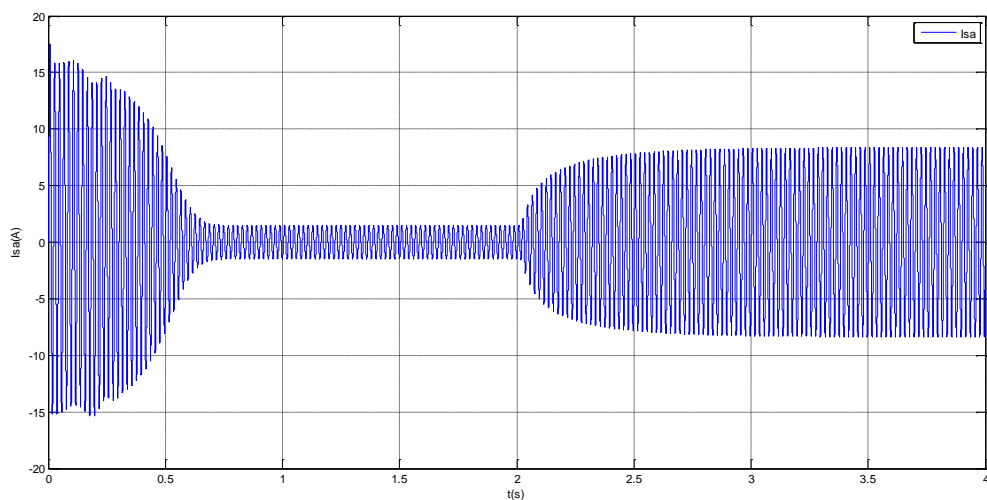


Figure I.9 : Courant statorique de phase a.

### Fonctionnement à vide :

La courbe de la vitesse présente des oscillations dans le premier instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire, après un temps d'environ 0.6 sec la vitesse de rotation stabilise à une valeur constant (157 rad/s) puisque le moteur possède 2 paires de pole.

La courbe de couple ce présente aux premiers instants du démarrage une pulsation très important, après 0.6 s le couple tend vers zéro.

Les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro avec une amplitude maximale de (17A) jusqu'à 0.6s, après ce temps l'amplitude de ces oscillations est diminuée jusqu'à 1.5A.

Au premier instant le flux rotorique présente des dépassements excessifs de faible amplitude mais ils disparaissent au bout de quelques alternances et obtient une forme sinusoïdale d'amplitude constante.

### **Fonctionnement en charge :**

Avec :  $t \in [2, 4]$ , nous avons appliqué à l'arbre de la machine asynchrone un couple résistant ( $C_r=20 \text{ N.m}$ ). Nous constatons que :

Le couple électromagnétique rejoint, après un régime transitoire, la valeur qui compense le couple résistant (20 N.m) appliqué.

La diminution de flux durant l'application de la charge ce que prouve le fort couplage entre le flux et le couple électromagnétique.

Les courants statoriques évoluent selon la charge appliquée à l'arbre du moteur.

### **Conclusion :**

Dans ce premier chapitre nous avons pu établir un modèle mathématique de la machine asynchrone triphasée dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

On a établi le modèle de la machine asynchrone en passant du système triphasé au système biphasé dans le cadre de la transformation de Park. Ce dernier a été simulé et validé dans les deux référentiels ; celui lié au stator et celui lié au synchronisme, ceci étant pour une alimentation en tension.

# Chapitre II

Commande de l'association machine  
asynchrone onduleur triphasé

## II.1 Introduction :

La machine asynchrone, de par sa construction, fait l'objet d'un intérêt accru dans le domaine de l'industrie et occupe une large plage d'applications au détriment des machines synchrones et à courant continu. Elle présente un système dynamique non linéaire. Par conséquent, sa commande nécessite la disponibilité d'un modèle représentant fidèlement son comportement au niveau de ses modes électriques, électromagnétiques et mécanique.

La progression technologique de la microélectronique et l'électronique de puissance a rendu possible l'implémentation des commandes performantes de cette machine faisant d'elle un concurrent redoutable dans les secteurs de la vitesse variable et le contrôle rapide du couple.

La conception d'une chaîne de commande passe par une phase de modélisation afin de dimensionner et valider les stratégies retenues. Mais, on ne peut parler de la commande de la machine asynchrone, sans qu'on parle du convertisseur qui lui est associé, de son alimentation et de sa commande.[24]

## II.2 L'association d'onduleur- MAS :

La machine asynchrone ont besoin un système triphasé alternatif, on peut relier directement la machine par une source de tension triphasé, ou utilise un onduleur de tension qui transforme une tension de source continue en tension alternatif.

Cette association a des avantages comme on peut contrôler la vitesse de la machine par la fréquence de tension, la fréquence de porteuse ou l'amplitude de tension. Mais les inconvénients représenter dans les harmoniques, car la commande MLI provoque lui et augmente pour les plus élevées fréquences.

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc. les système de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes.[25]

## II.3 Modélisation de l'onduleur triphasé :

L'onduleur de tension à MLI est toujours habituellement choisi pour sa réponse rapide et ses performances élevées. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitudes et fréquence variables à partir d'un réseau standard 220/380-50Hz.

Le fonctionnement de l'onduleur obéit à un séquençement de 180° de conduction par interrupteur d'un même bras. Les diodes de roue libres assurent la continuité du courant dans la MAS une fois que les interrupteurs sont ouverts. Il est à noter qu'un temps de retard doit pratiquement exister entre les interrupteurs haut et bas d'un même bras afin d'éviter le court-circuit de source continue.

Le principe de fonctionnement de cet onduleur est qu'il se compose de trois interrupteurs d'onduleur avec une seule phase. Dans lequel chaque interrupteur peut être connecté à la borne de charge. Trois commutateurs peuvent être synchronisés avec le fonctionnement du système de contrôle de base. Ainsi, un commutateur fonctionne pour créer une forme d'onde de sortie ligne/ligne, comprenant six étapes, à tous les 60 degrés de la forme d'onde de sortie de base.

Cette onde implique un étage de tension nulle entre deux sections comme le positif et le négatif d'une onde carrée. Une fois la technologie PWM basée sur les porteuses appliquée à cette onde. La forme originale de la vague peut alors être prise. De sorte que la troisième harmonique, y compris sa multiplication, sera annulée.[26]

**La commande MLI** (Modulation de Largeur d'Impulsion), en [anglais](#) :(*Pulse Width Modulation*, soit *PWM*), est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux pseudo analogiques à l'aide de [circuits numériques](#) (tout ou rien, 1 ou 0), ou plus généralement à états [discrets](#).

Elle sert à générer un signal pseudo [analogique](#) à partir d'un environnement numérique ou analogique pour permettre un traitement de ce signal par des composants en commutation (se comportant comme des interrupteurs ouverts ou fermés).

Le principe général est qu'en appliquant une succession rapide d'états [discrets](#) avec des ratios de durée bien choisis, on peut obtenir en ne regardant que la valeur moyenne du signal n'importe quelle valeur intermédiaire.

La commande MLI (**Modulation de Largeur d'Impulsion**), est le plus commande utilisable et plusieurs techniques de MLI ont été développées aux cours années.

On peut réaliser l'onduleur triphasé en associant 3 onduleurs monophasés et en contrôlant la commutation de chaque pont pour produire 3 phases décalées de 120 degré.[27]

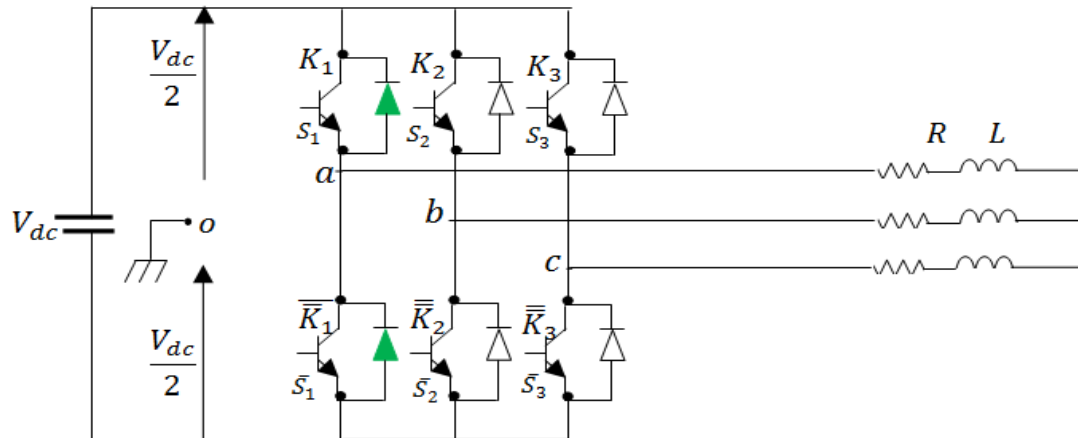


Fig.II.1 : onduleur triphasé

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état de trois signaux de commande (S1, S2, S3), définis ci-dessous :

$$S1 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_1 \text{ fermé et } K_1' \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } K_1 \text{ ouvert et } K_1' \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S2 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_2 \text{ fermé et } K_2' \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } K_2 \text{ ouvert et } K_2' \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S3 = \begin{cases} 1 & \text{si } K_3 \text{ fermé et } K_3' \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } K_3 \text{ ouvert et } K_3' \text{ fermé} \end{cases}$$

A partir de la figure 1.7, les tensions de l'onduleur en fonction des états des interrupteurs, les potentielles des nœuds a, b, et c de l'onduleur par rapport au point milieu imaginaire o sont données par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{ao} = U_c * (2S_1 - 1) \\ V_{bo} = U_c * (2S_2 - 1) \\ V_{co} = U_c * (2S_3 - 1) \end{cases} \quad \text{avec } U_c = \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{(II-1)}$$

Les tensions composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$  sont obtenues à partir de les relations suivantes:

$$\left[ \begin{array}{l} V_{ab}=V_{ao}-V_{bo}=2U_c*(S_1-S_2) \\ V_{bc}=V_{bo}-V_{co}=2U_c*(S_2-S_3) \\ V_{ca}=V_{co}-V_{ao}=2U_c*(S_3-S_1) \end{array} \right. \quad \text{(II-2)}$$

Telles que  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$  sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles, comme suit :

$$\left[ \begin{array}{l} V_{ao}=V_{an}+V_{no} \\ V_{bo}=V_{bn}+V_{no} \\ V_{co}=V_{cn}+V_{no} \end{array} \right. \quad \text{(II-3)}$$

Les tensions composées en fonction des tensions simples de l'onduleur sont :

$$\left[ \begin{array}{l} V_{ab}=V_{an}-V_{bn} \\ V_{bc}=V_{bn}-V_{cn} \\ V_{ca}=V_{cn}-V_{an} \end{array} \right. \quad \text{(II-4)}$$

Ce qui donne:

$$\left[ \begin{array}{l} V_{ab}-V_{ca}=V_{an}-(V_{bn}+V_{cn})+V_{an} \\ V_{bc}-V_{ab}=V_{bn}-(V_{cn}+V_{an})+V_{bn} \\ V_{ca}-V_{bc}=V_{cn}-(V_{an}+V_{bn})+V_{cn} \end{array} \right. \quad \text{(II-5)}$$

Dans un système de trois tensions équilibrées, la somme des tensions est nulle, alors:

$$V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0 \quad \text{(II-6)}$$

Le potentiel du point  $n$  de l'onduleur par rapport au point milieu imaginaire  $o$  est donné par l'équation:

$$V_{no}=\frac{1}{3}(V_{ao}+V_{bo}+V_{co}) \quad \text{(II-7)}$$

Les potentiels des nœuds  $a$ ,  $b$ , et  $c$  de l'onduleur par rapport au point  $n$  sont données par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{an} = -(V_{bn} + V_{cn}) = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -(V_{cn} + V_{an}) = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -(V_{an} + V_{bn}) = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{II-8})$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif.

$$[V_{AC}] = [T] * [V_{DC}]$$

Tel que :

$$[V_{AC}] = [V_{an} \quad V_{bn} \quad V_{cn}]^T \quad (\text{II-9})$$

$$[V_{DC}] = [V_{ao} \quad V_{bo} \quad V_{co}]^T$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale :  $S_i = (1 \text{ ou } 0) \{i=1, 2, 3\}$

La matrice de transfert est la suivante:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

$$\begin{cases} V_a = \frac{v_{dc}}{3} * (2S_1 - S_2 - S_3) \\ V_b = \frac{v_{dc}}{3} * (-S_1 + 2S_2 - S_3) \\ V_c = \frac{v_{dc}}{3} * (-S_1 - S_2 + 2S_3) \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} * \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

## II.4 Résultats de simulation :

Les paramètres de cette simulation sont :

Paramètre	Vdc	R <sub>s</sub>	L <sub>s</sub>	f <sub>s</sub>	V <sub>mréf</sub>	f <sub>p</sub>	V <sub>pm</sub>
-----------	-----	----------------	----------------	----------------	-------------------	----------------	-----------------

Valeur	514V	10Ω	0.01H	50Hz	0.9	5000Hz	1
--------	------	-----	-------	------	-----	--------	---

Tableau II.1 : les paramètres de simulation onduleur triphasé.

**Taux de modulation** au **coefficient de réglage de tension r** égale l'amplitude de tension de référence  $V_m$  sur l'amplitude de signal de porteuse  $V_{pm}$ .

$$r = \frac{V_m}{V_{pm}}$$

Dans ce cas  $r=0.9$ , on peut déterminer la valeur de  $V_m$  par le coefficient  $r$  comme ça :

$$V_m = r * V_{pm}$$

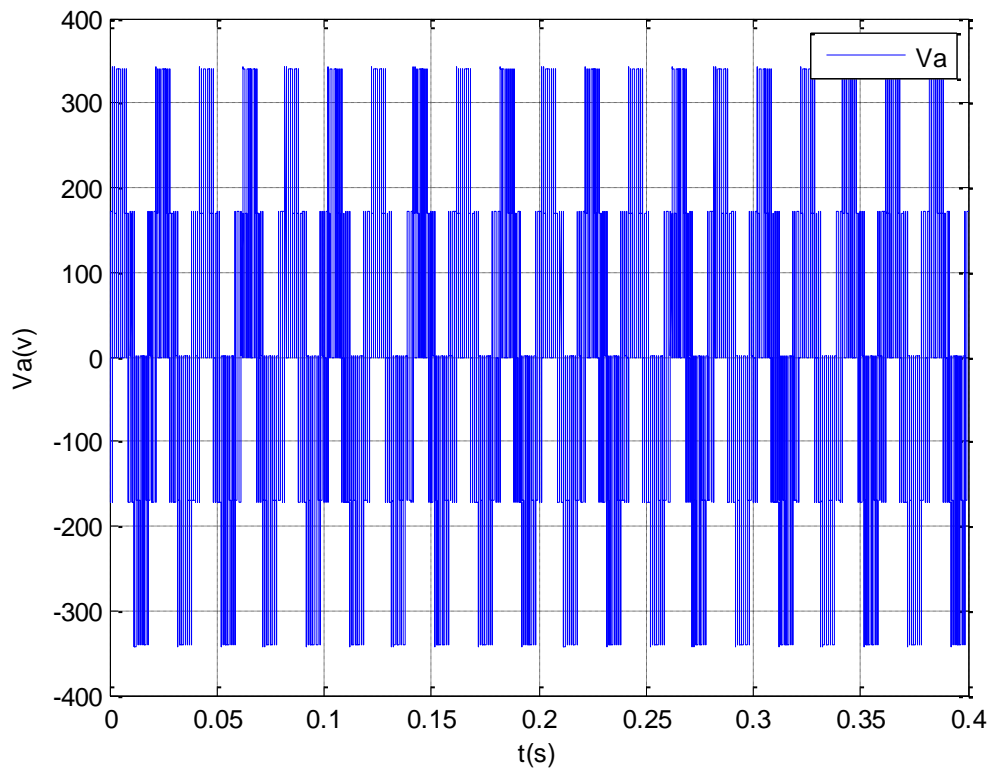


Figure II.2 : la tension simple de phase a.

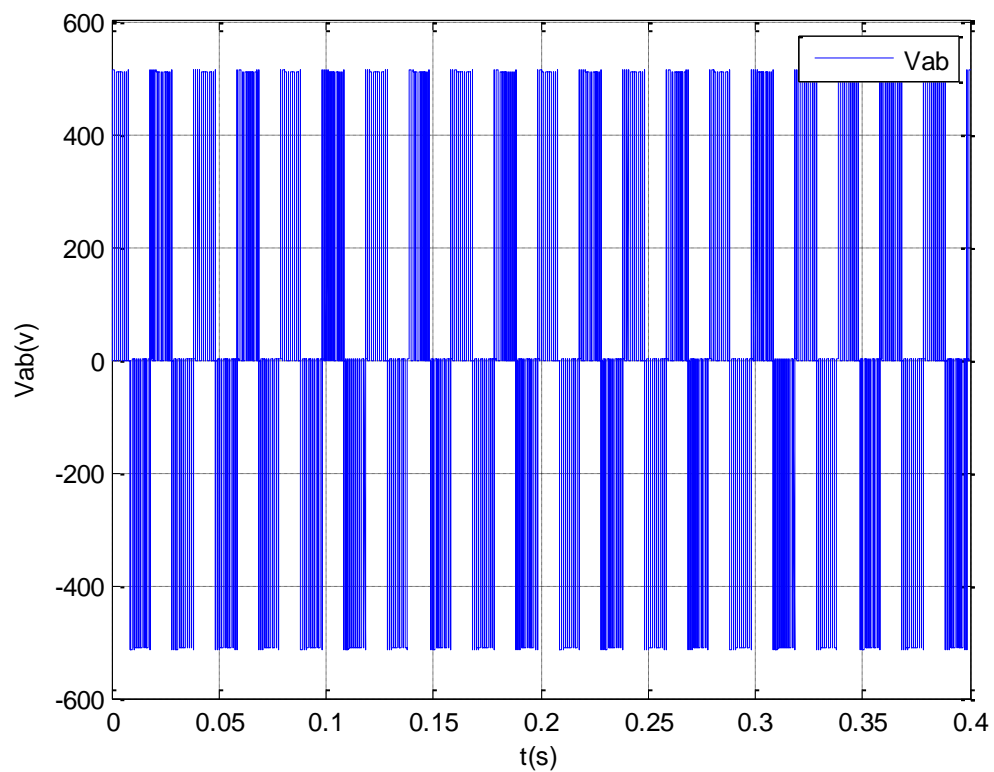


Figure II.3 : la tension composée de phase a.

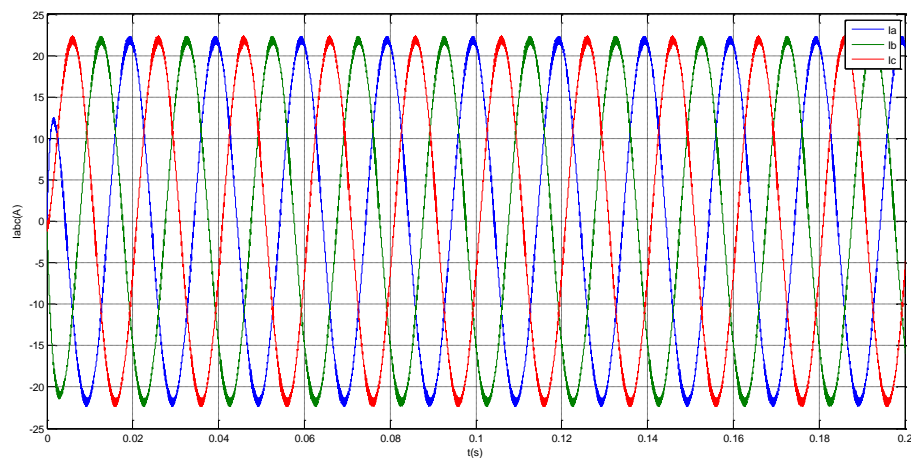


Fig. II.4 : les tensions et courants de sortie.

## II.5 Simulation de l'association de machine asynchrone et onduleur triphasé :

On va alimenter la machine par un onduleur triphasé avec fréquence de rotation  $\omega_s = 2\pi * 50 \text{ rad/s}$  et tension continue  $V_{dc}=514\text{V}$ .

paramètre	$V_m$	$V_{mp}$	$f_s$	$f_p$	$R_S$	$R_R$	$L_S, L_R$	$L_M$	P	J	f
valeur	0.9V	1V	50Hz	10kHz	9.01Ω	6.693Ω	0.8154H	0.785H	2	0.035Kg. N.m <sup>-1</sup>	0.012 N.m

Tableau II.2 : les paramètres de MAS.

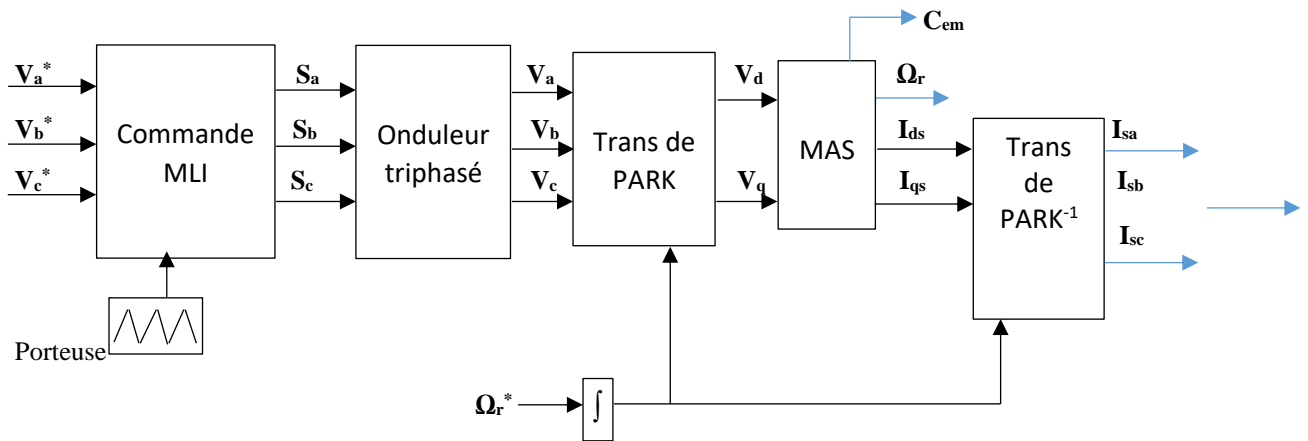


Figure II.5 : modélisation d'onduleur triphasé et MAS.

Pour les tensions de références :

$$V_{sa}^* = 514 \cdot \sin(2\pi 50 \cdot t)$$

$$V_{sb}^* = 514 \cdot \sin(2\pi 50 \cdot t - 2\pi/3)$$

$$V_{sc}^* = 514 \cdot \sin(2\pi 50 \cdot t + 2\pi/3)$$

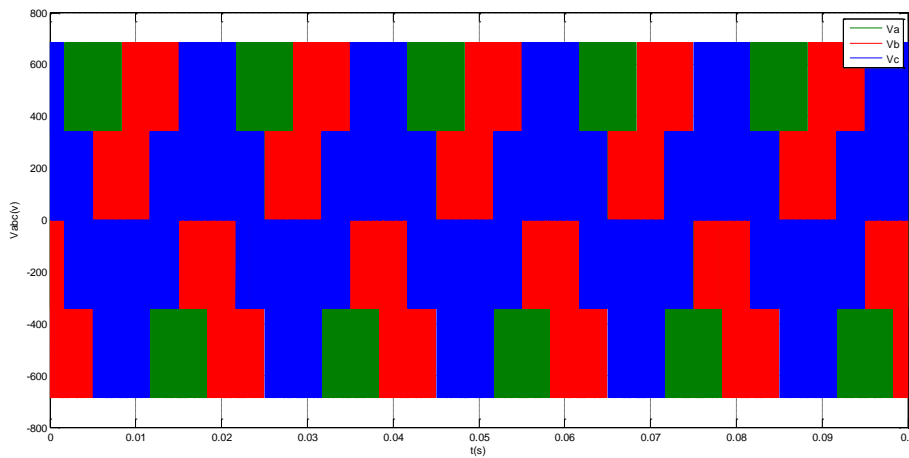


Figure II.6 : la tension de sortie d'onduleur.

Premièrement, on va simuler à vide,  $C_r=0$  :

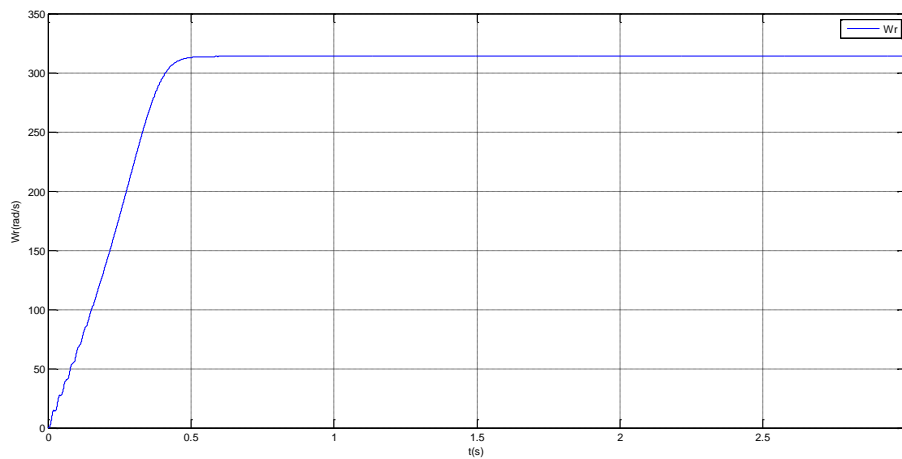


Figure II.7 : la vitesse rotorique de MAS.

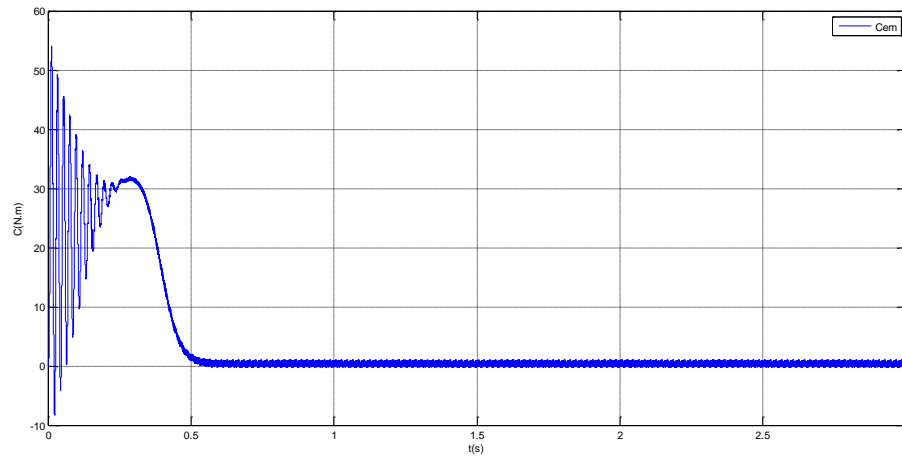


Figure II.8 : le couple de MAS.

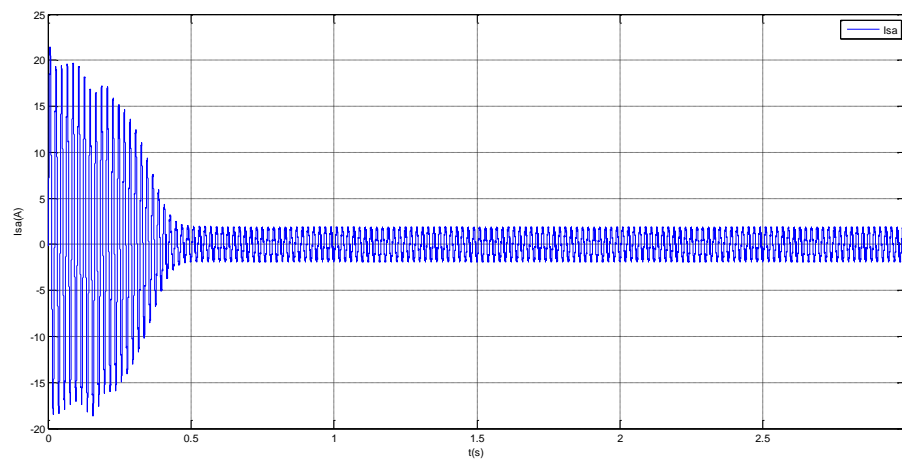


Figure II.9 : le courant statorique  $I_{sa}$ .

On a maintenant simulé en charge ( $C_r=20\text{N.m}$ ) à  $t=2\text{s}$  :

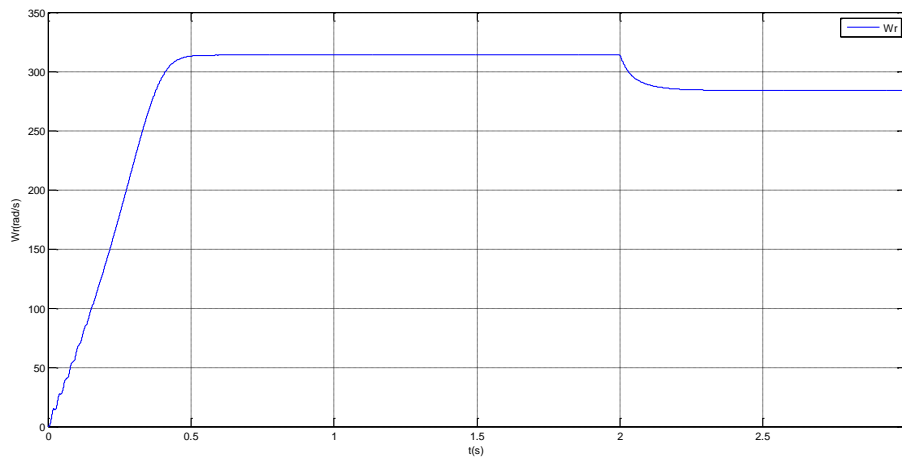


Figure II.10 : la vitesse rotorique de MAS.

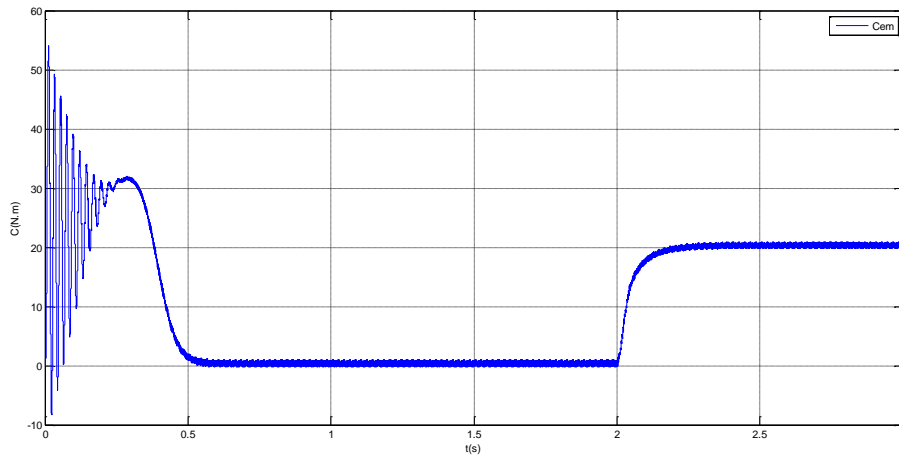


Figure II.11 : le couple de MAS.

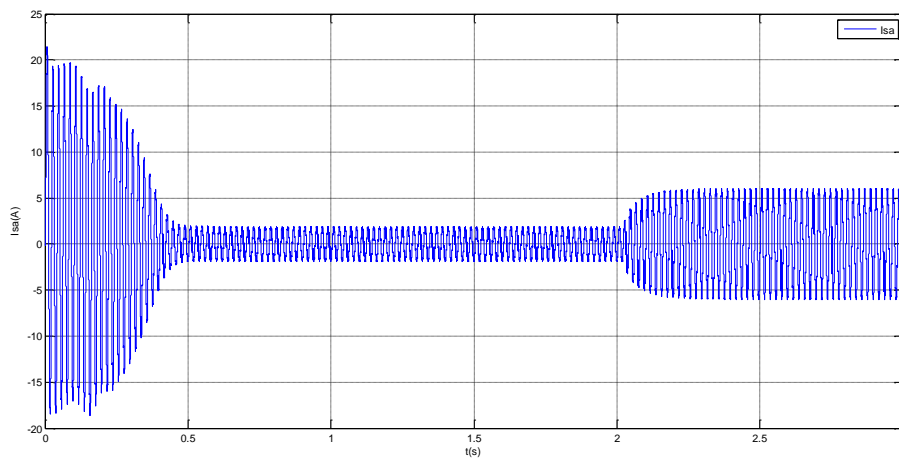


Figure II.12 : le courant statorique  $I_{sa}$ .

## II.6 Stratège de commande de l'association machine asynchrone onduleur :

Il existe deux types de commande de la machine asynchrone :

La commande scalaire où l'on s'intéresse au contrôle des grandeurs physique de la MAS en module uniquement (exemple : flux, courant...). Et la commande vectorielle où le contrôle est plutôt porté sur le module et la phase de ces grandeurs .A ce titre, la voie de la commande vectorielle, offre les meilleures performances dynamiques et statiques des variateurs de vitesse.

Plusieurs commandes scalaires existent selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension. Elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant).

L'onduleur de tension étant maintenant le plus utilisé en petite et moyenne puissance, c'est la commande en  $V/f$  ( $V$  sur  $f$ ) qui est la plus utilisée.

Et pour la commande vectorielle :

La machine à courant continu présente l'avantage d'être facilement commandable et ce grâce au découplage naturel qui existe entre le flux et le couple, cependant elle est coûteuse aussi bien à la construction qu'à sa maintenance et cela est du à la présence du système balais collecteur. Donc l'emploi de la machine asynchrone commandée par la technique de flux orienté se présente Comme une solution universelle.

Le but de la commande vectorielle et d'assimiler le comportement de la machine asynchrone à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, en découplant la commande du couple et du flux. Grâce à cette nouvelle technique de commande et au développement des microprocesseurs qui répondent aux exigences demandées en terme de quantité de calcul traité et de rapidité, on arrive à obtenir des commandes de vitesse, ou de couple de la machine asynchrone avec des performances comparable à celles des machines à courant-continu.[28]

### II.6.1 La commande scalaire :

#### 1) Principe de commande scalaire

Dans la machine asynchrone les champs stator et rotor restent synchronisés du fait que, par induction, la fréquence des courants rotorique varie automatiquement avec la vitesse du rotor pour compenser cette variation.

Le champ rotorique est mobile par rapport au stator à pulsation  $\omega_s$ , contrairement au cas des machines synchrones où la fréquence du courant d'excitation reste constante et nulle quelle que soit la vitesse du rotor et où, par conséquence, le champ rotorique est fixe par rapport à celui-ci.

Dans les machines asynchrones il n'y a donc pas de risque de décrochage par couple moyen nul mais seulement de blocage par couple résistant excessif, supérieur au couple maximal, qui provoque un arrêt et un fonctionnement en court-circuit puisqu'il n'y a plus de f.e.m. de rotation pour s'opposer à la tension statorique.

Les machines asynchrones présentent des instabilités en régime transitoire.

C'est le cas lors d'une alimentation directe en tension lorsque le filtre d'entrée présente des valeurs d'inductance et de capacité élevées.

C'est aussi le cas lors d'une alimentation directe en courant avec fréquence statorique imposée [30].

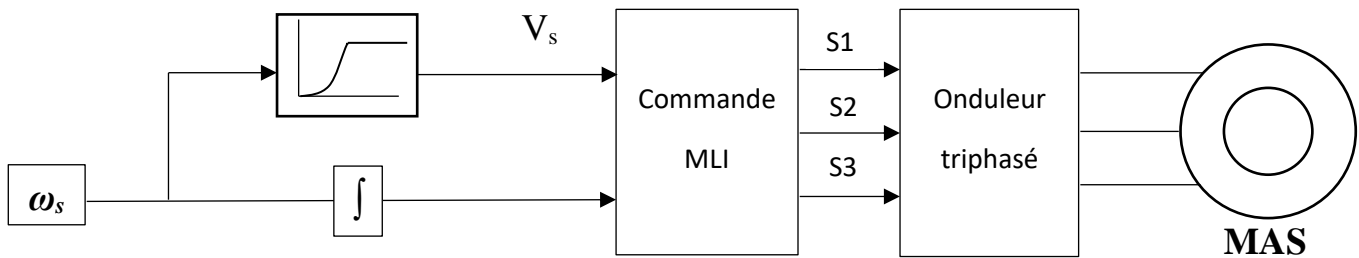


Figure II.13 : commande scalaire en boucle ouverte.

## 2) Principe de commande scalaire en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte par onduleur du moteur asynchrone s'effectue par la pulsation, et la valeur efficace de la tension  $V_s$  phase-neutre du stator pour un onduleur de tension [31].

On note que la tension  $V_s$  est la même que soit la référence considérée :

$$V_s = R_s I_s + j\omega_s \varphi_s \quad (\text{II-15})$$

Pour les très grandes vitesses :  $\omega_s \varphi_s \gg R_s I_s$

Donc :  $V_s = \omega_s \varphi_s$

$$\frac{V_s}{\omega_s} = \varphi_s = \text{cte} \quad \text{Avec } \omega_s = 2\pi f_s$$

$$\frac{V_s}{f_s} = \text{cte}$$

Et ce ca la commande de  $(V/f)$  qui regarde la tension  $V_s$  par rapport la fréquence référence.

### Expression du couple :

A flux constant, le couple électromagnétique de la machine asynchrone ne dépend que de la pulsation  $\omega_r$  et des différentes valeurs de la pulsation statorique  $\omega_s$  vu que  $\omega = \omega_s - \omega_r$  [32].

$$C_{em} = 3p\varphi_s^2 \frac{(R/Wr)}{[(R/Wr)^2 + N^2]} \quad (\text{II-16})$$

Avec:

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\sqrt{\left(\frac{R_s}{L_s \omega_s}\right)^2 + \left(1 + \frac{gR_s}{R}\right)^2}} \quad (\text{II-17})$$

$$N = \left(L - \frac{M^2}{L_S}\right) \left(\frac{L_S}{M}\right)^2 = \sigma L r \left(\frac{L_S}{M}\right)^2 \quad (\text{II-18})$$

$$R = R_S \left(\frac{L_S}{M}\right)^2 \quad (\text{II-19})$$

### Commande en vitesse :

Lorsque le moteur est alimenté par un onduleur de tension cependant, on note une différence concernant la valeur de pour laquelle le couple est maximale.

On obtient  $\omega r = \frac{R}{N}$

Le couple maximale du moteur vaut :

$$C_e = \frac{3}{2N} P \varphi_s^2 \quad (\text{II-20})$$

D'autres parts, lorsque la pulsation rotorique est faible l'expression du couple devient :

$$C_e = 3p\varphi_s^2 \frac{\omega r}{R} \quad (\text{II-21})$$

Le moteur est alimenté au stator par un onduleur de tension  $\frac{V_{sn}}{\omega_{sn}}$

Avec :

- ✓  $V_{sn}$  : La tension nominale au stator du moteur.
- ✓  $\omega_{sn}$  : La pulsation nominale au stator du moteur.

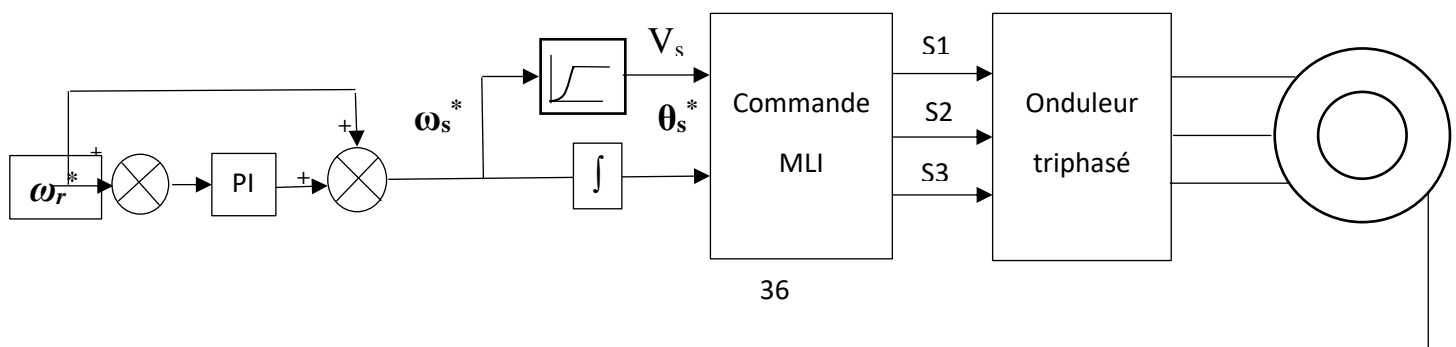
Le réglage de la vitesse s'effectue en agissant sur la pulsation. La vitesse réellement obtenue dépend en définitive de :

- ✓ De la valeur de la tension  $V_s$ .
- ✓ De la valeur de pulsation.
- ✓ Du couple résistant  $C_r$  de la charge mécanique du moteur.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle admet que le flux statorique reste constant, quel que soit le couple à fournir et la vitesse du moteur. Or cette condition est difficile à vérifier pour les basses vitesses, à cause de l'influence de la résistance  $R_s$  du stator, qui provoque une chute de tension [32].

### 3) Principe de commande scalaire en boucle fermée :

Afin d'asservir la vitesse de rotation, on rajoute une boucle externe qui, à partir de l'erreur de vitesse, permet d'augmenter la fréquence des tensions statoriques de façon à l'erreur de vitesse due au glissement.



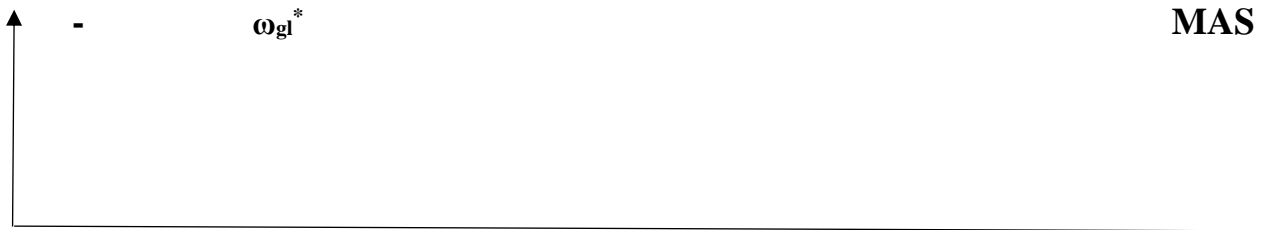


Figure II.14 : commande scalaire en boucle fermée.

Le correcteur, généralement de type PI, permet d'estimer la pulsation rétorque. La tension de sortie du correcteur notée  $\omega_{gl}$  est additionnée à la tension image de la vitesse de rotation  $\omega_r$  et ceci de façon à obtenir la valeur adéquate pour la pulsation statorique. La pulsation statorique est calculée par la relation :  $\omega_s = \omega_{gl} + \omega_r$ . C'est l'autopilotage fréquentiel. Cette relation est nécessaire à l'existence d'un couple électromagnétique à valeur moyenne non nulle. La sortie du correcteur PI est munie d'un dispositif écrête de façon à limiter la valeur de  $\omega_r$ . Ainsi l'amplitude des courants statoriques est indirectement limitée.

### Synthèse du régulateur :

Le but d'utilisation des régulateurs est d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes. Les régulateurs les plus utilisés, sont des correcteurs à action proportionnelle-intégrale (PI).

### Régulateur de vitesse

Le schéma de régulation de la vitesse est présenté sur la figure suivante :

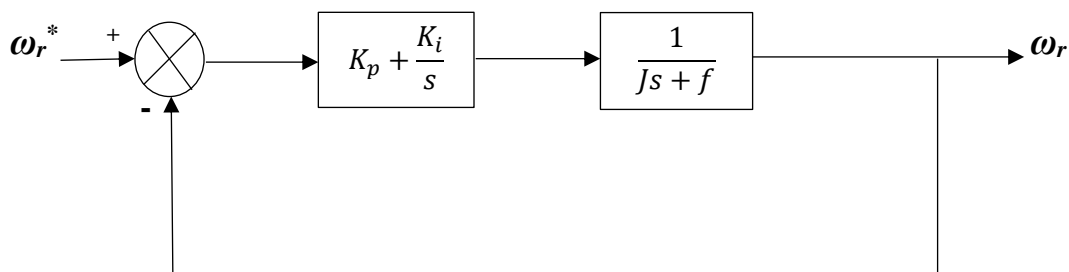


Figure II.15 : Schéma réduit de régulation de vitesse.

### Calcul des paramètres du régulateur PI :

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$\frac{\omega_{rn}}{\omega_{rref}} = \frac{K_i + K_p s}{J s^2 + (f + K_p) s + K_i} \quad (\text{II-22})$$

En imposant une paire de pôles complexe conjugués  $S_{1,2} = \rho\omega + j\rho\omega$  le polynôme caractéristique désiré en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$P(S) = S^2 + 2\zeta \omega_{sn} S + 2\omega_{sn}^2$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} Kp = 2\zeta \omega snJ - f \\ Ki = 2\omega sn2J \end{cases}$$

#### 4) Résultats de simulation :

##### Démarrage à vide :

Dans ce stratégie, on a associé la machine avec l'onduleur à MLI où nous avons démarré la machine à vide avec une vitesse références de  $314 \text{ rad/s}$ , nous avons les résultats de simulation du système globale en boucle ouverte.

Premièrement, on va simuler à vide :

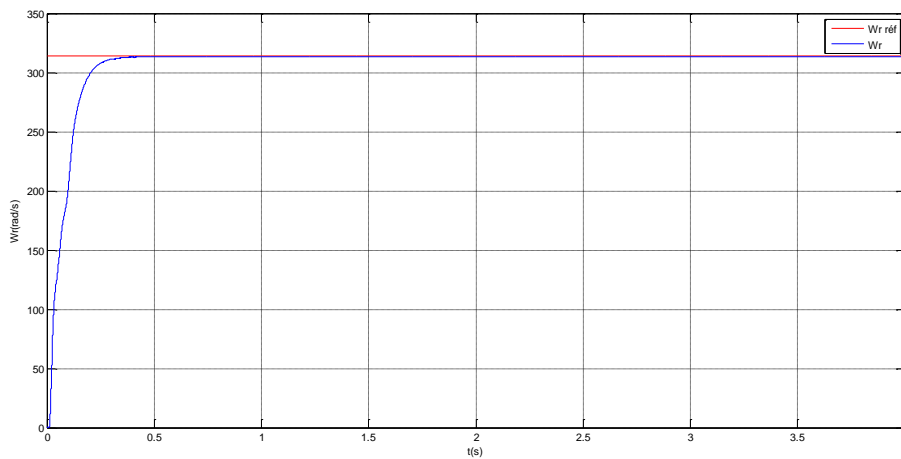


Figure II.16 : Résultat de simulation de vitesse.

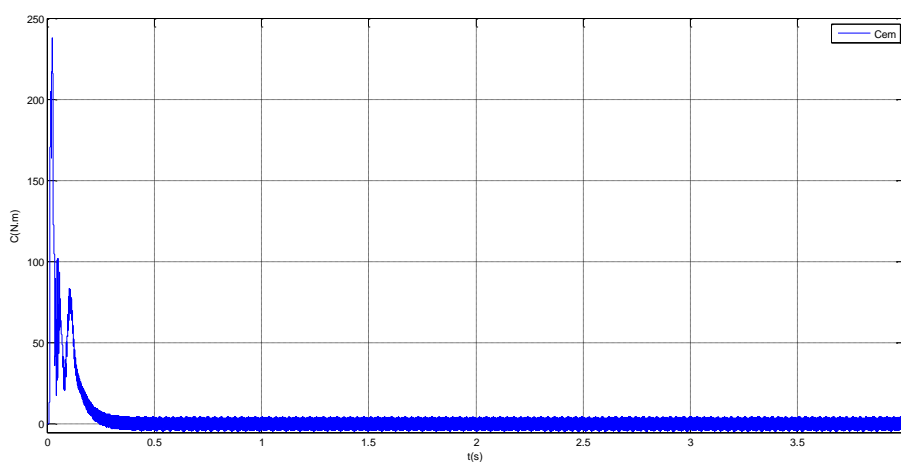


Figure II.17 : Résultat de simulation de couple.

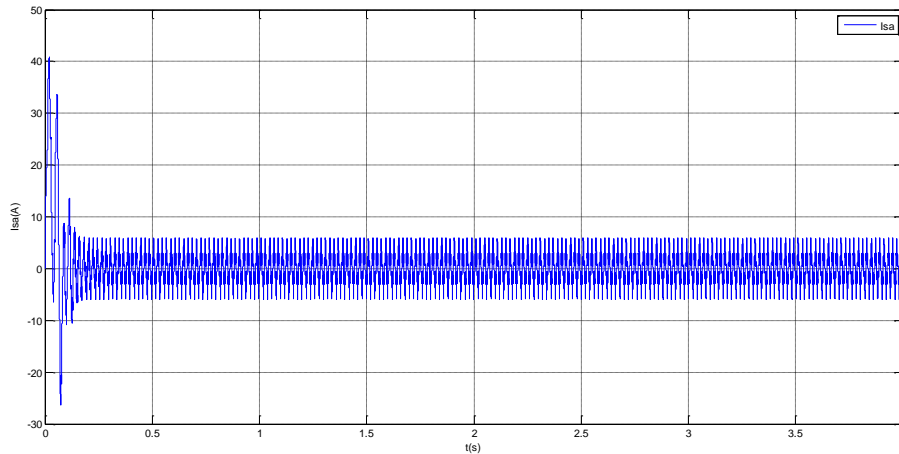


Figure II.18 : Résultat de simulation de courant.

La figure II.16 illustre l'allure de la vitesse suivant le profil imposé. On remarque que la vitesse atteint la référence (profil).

La figure II.17 et II.18 nous présentent respectivement l'allure du courant statorique et le couple électromagnétique. Pour ces deux dernières on remarque que, ils subissent à des grands pics due aux variations brusques de la vitesse.

### **Application de couple de charge :**

A  $t=2s$  ; on applique un couple de charge  $C_r=50N.m$

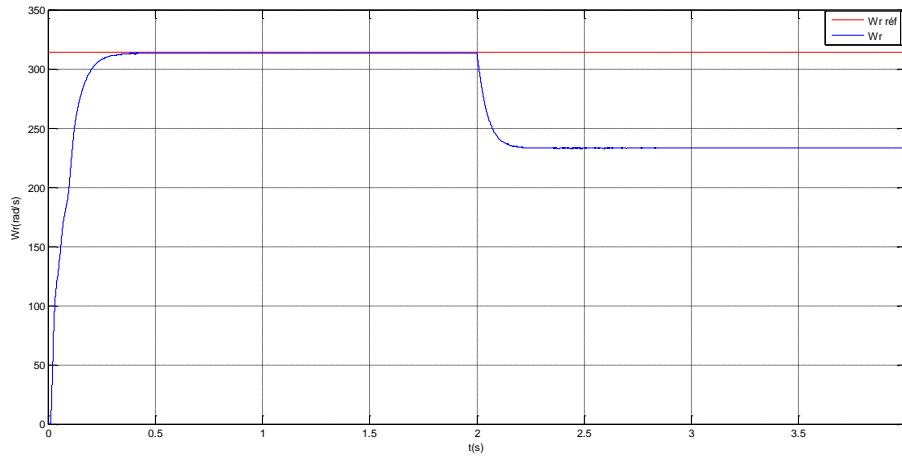


Figure II.19 : Résultat de simulation de vitesse.

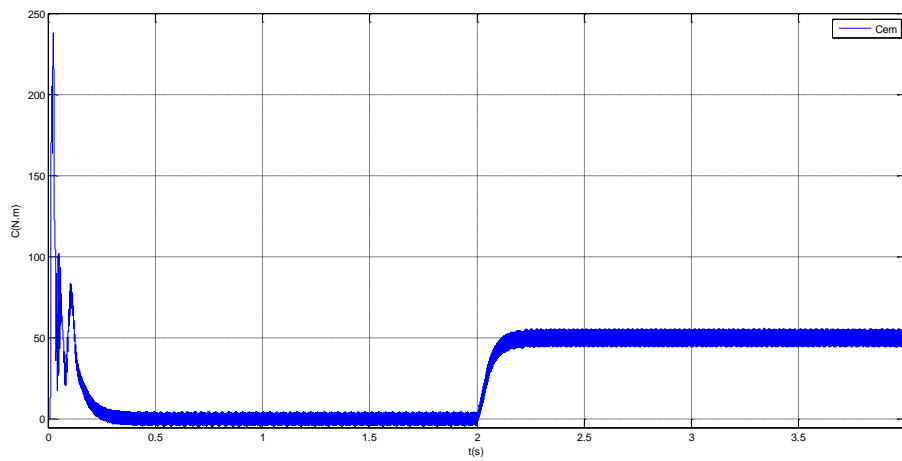


Figure II.20 : Résultat de simulation de couple.

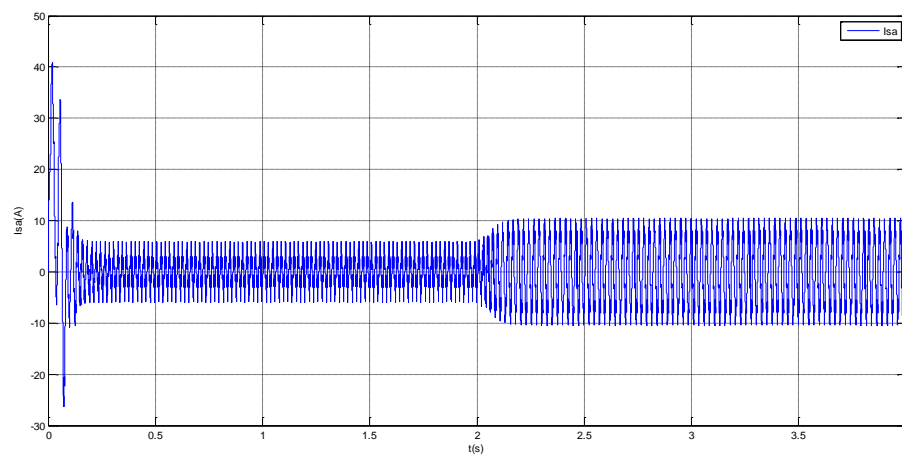


Figure II.21 : Résultat de simulation de courant.

Pour cet essai, on a présenté les mêmes grandeurs que le test précédent avec un couple  $C_r = 50\text{N.m}$ , et on remarque que la vitesse n'atteint pas sa référence imposé (présence de l'erreur statique) comme le montre la figure II.19.

Le courant  $I_{as}$  et le couple  $C_{em}$  respectivement présentés dans les figures II.20 et II.21 sont plus grands et subissent à des pics plus importants que le test à vide, et cela est due au fait que la machine est chargée.

### Variation de vitesse :

Dans ce stratégie, on va donner la pulsation statorique référence comme ça :  
A démarrage, on donne  $\omega_{s1} = 314 \text{ rad/s}$ , après  $t = 2\text{s}$  ; on donne  $\omega_{s2} = 189 \text{ rad/s}$ .

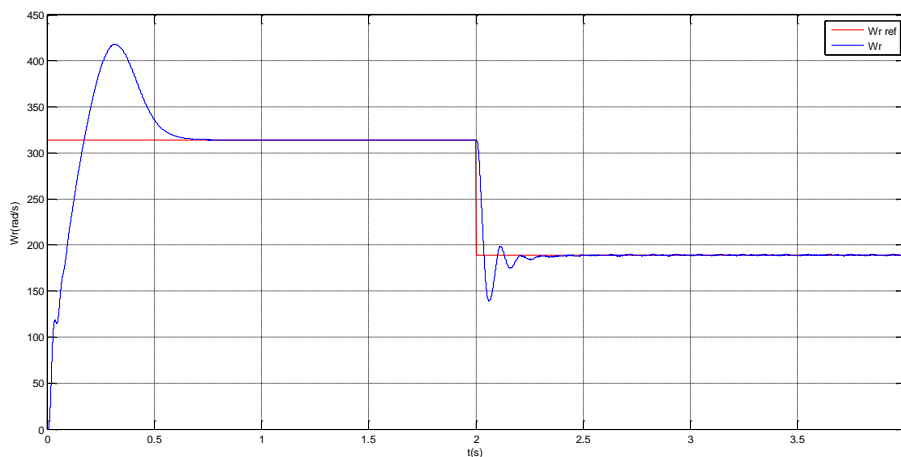


Figure II.22 : Résultat de simulation de vitesse.

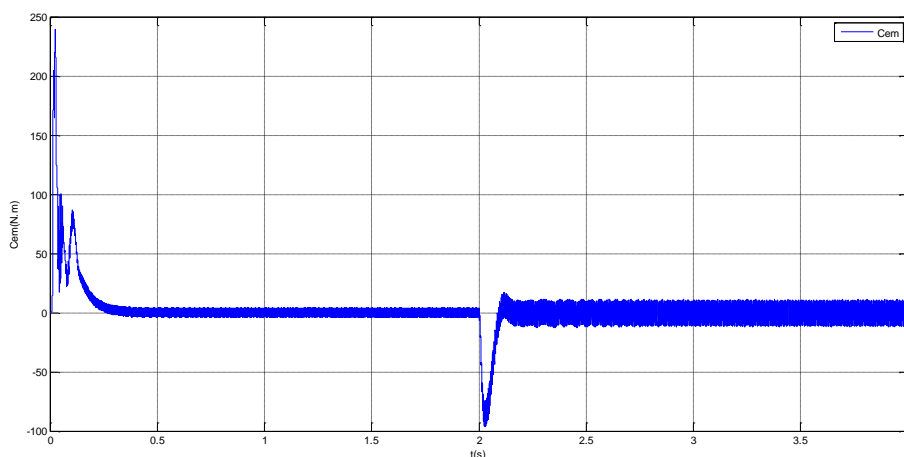


Figure II.23 : Résultat de simulation de couple.

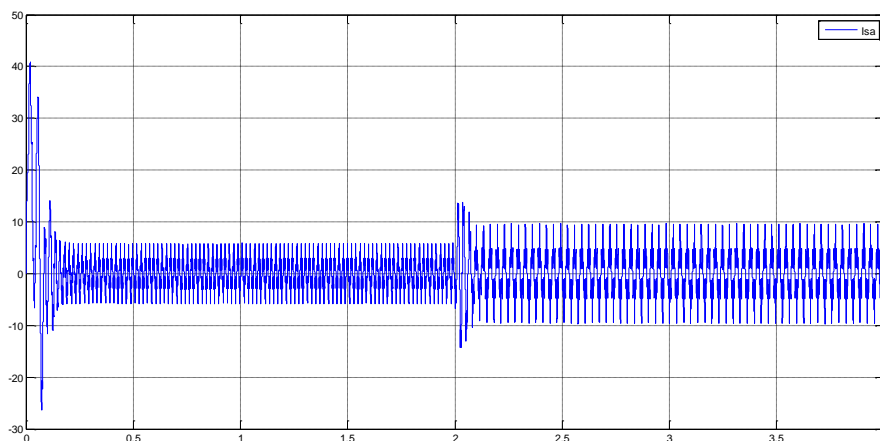


Figure II.24 : Résultat de simulation de courant.

Dans la figure II.22, on observe que la vitesse toujours atteint sa référence avec  $\omega s1$  et  $\omega s2$ . Le couple qui représente dans la figure II.23, après baisse la pulsation statorique de référence à  $t=2s$ , il diminue beaucoup mais retourne directement à 0 dans 0.1s des ondes. L'amplitude de courant augmente de 6A à 10A après le changement dans la figure II.24.

### Simulation on boucle fermé :

On a simulé la même simulation de boucle ouverte avec un chine de retour de mesure, démarre à vide avec une fréquence de 50Hz.

On a départ avec charge à vide :

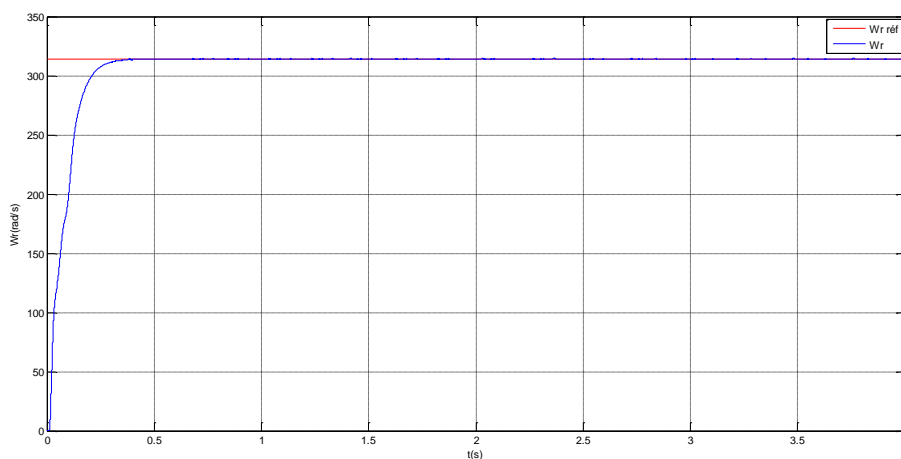


Figure II.25 : Résultat de simulation de vitesse.

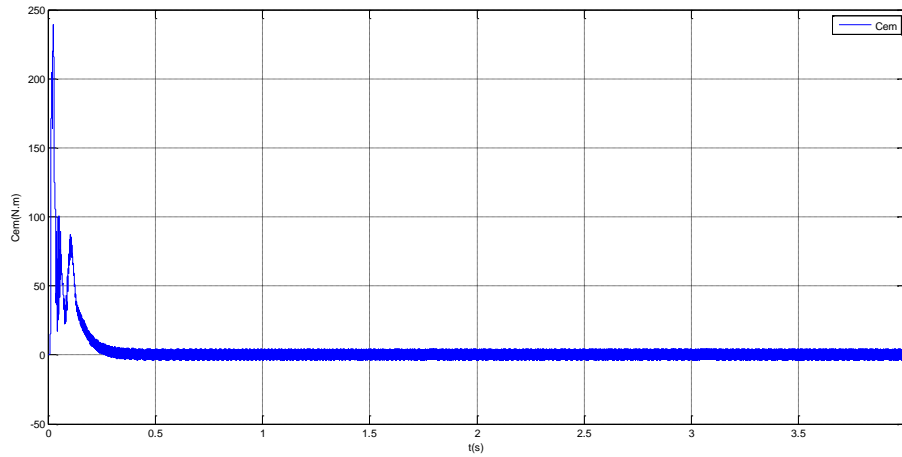


Figure II.26 : Résultat de simulation de couple.

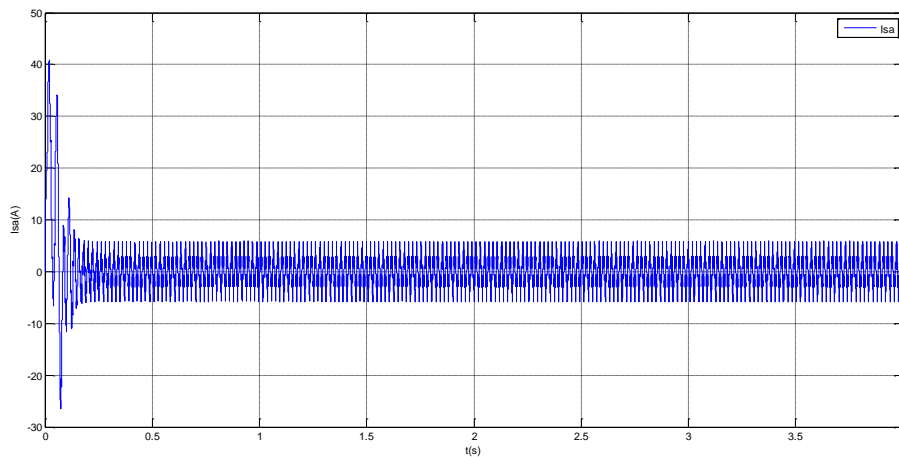


Figure II.27 : Résultat de simulation de courant.

La commande scalaire en boucle fermée fait presque plus de stabilité à régime transitoire avec moins de vibrations, comme Figure II.25 la vitesse va à sa référence, Figure II.26 et Figure II.27.

### 2<sup>ème</sup> stratégie :

Dans cette stratégie, on va donner la pulsation statorique de référence comme ça :  
 Au démarrage, on donne  $\omega_{s1} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ rad/s}$ , après  $t = 2 \text{ s}$  ; on donne  $\omega_{s2} = 2 \cdot \pi \cdot 30 \text{ rad/s}$

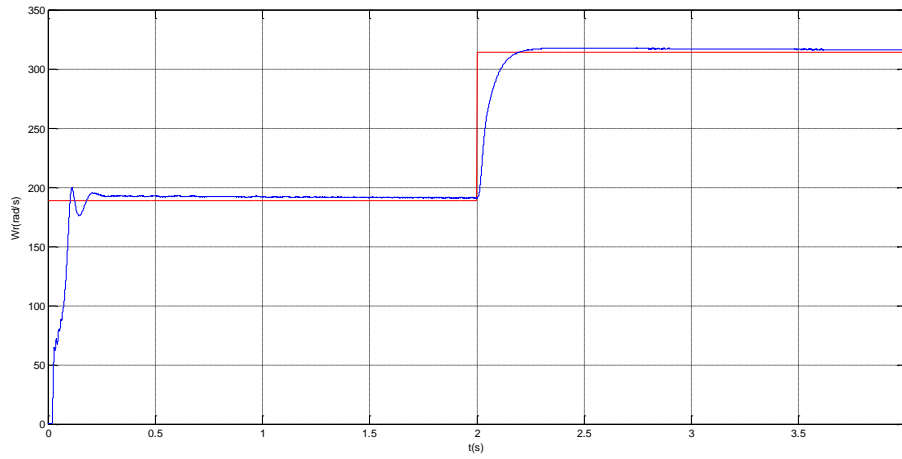


Figure II.28 : Résultat de simulation de vitesse.

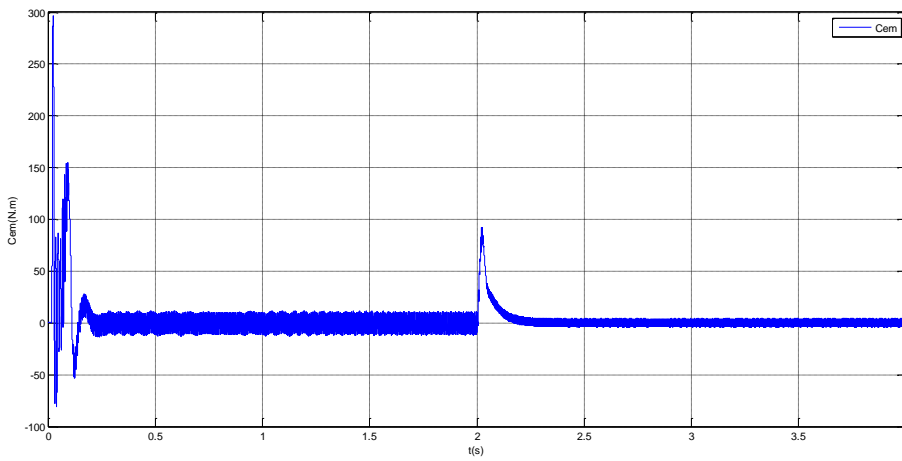


Figure II.29 : Résultat de simulation de couple.

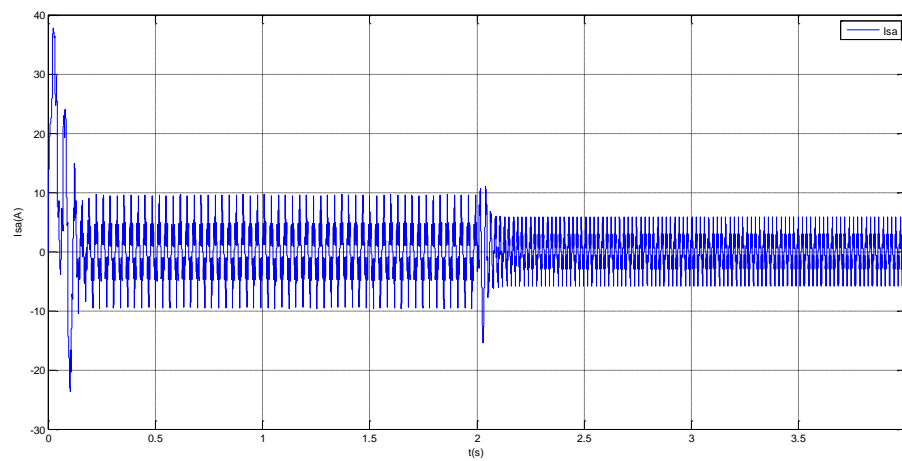


Figure II.30 : Résultat de simulation de courant.

Après le changement de fréquence, les signaux au-dessus stables plus rapides, avec moins des vibrations.

## II.6.2 la commande vectorielle :

### 1) Principe de la commande vectoriel :

Le contrôle du flux statorique ou du flux d'entrefer n'assure pas un découplage total entre le couple et celui du flux. Nous nous limitons à étudier le principe de la commande vectorielle avec orientation de l'axe 'd' suivant l'axe du flux rotorique voir figure IV.1. Elle présente de meilleures performances par rapport aux autres techniques d'orientation.

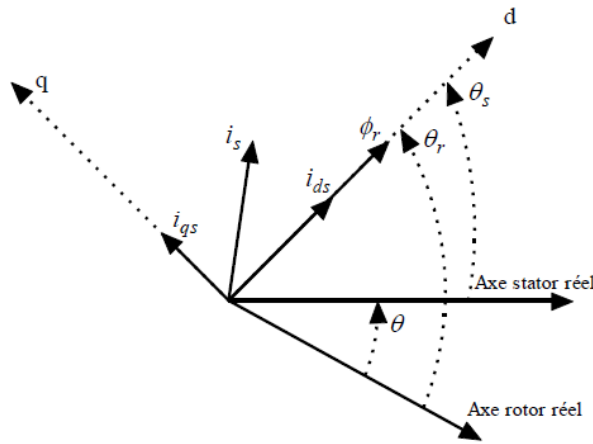


Figure II.31 : Principe de la commande vectorielle à orientation du flux rotorique.

### 2) Orientation de flux rotorique :

On va décrire ici une commande à flux rotorique orienté, c'est-à-dire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{rd} = \Phi_r = \Phi_r^* (\text{flux de référence}) \\ \Phi_{qr} = 0 \\ \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = 0 \end{array} \right.$$

Reprenons l'expression du couple électromagnétique faisant intervenir les flux rotoriques.

$$C_{em} = \frac{pL_m}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (IV.8)$$

Si on applique l'orientation du flux rotorique au modèle de la MAS. Ceci simplifie ce modèle (obtenons les lois de la commande vectorielle). L'avantage d'utiliser ce repère est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé de faire la régulation. Dans ces conditions, les lois de commande s'écrivent :

$$C_{em} = \frac{pL_m}{L_r} \Phi_r i_{qs} \quad (IV.9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{ds}}{dt} &= -\lambda i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{k_s}{T_r} \Phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} & (IV.10-a) \\ \frac{di_{qs}}{dt} &= -\omega_s i_{ds} + \lambda i_{qs} + k_s \omega_r \Phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} & (IV.10-b) \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} &= \frac{L_m}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \Phi_{dr} & (IV.10-c) \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} &= \frac{L_m}{T_r} i_{qs} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} & (IV.10-d) \\ \frac{d\Omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} (C_{em} - K_f \Omega_r - C_r) & (IV.10-e) \end{aligned} \right.$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} ; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} ; k_s = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} ; \lambda = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}$$

On ne contrôle pas le flux rotorique  $\Phi_{dr}$ , on a donné comme un constant, donc :

$$\frac{d\Phi_{qr}}{dt} = 0 ; \text{ Avec l'éq (IV.10-c) :}$$

$$I_{ds} = \frac{1}{L_m} \Phi_{dr}$$

### 3) Commande vectorielle avec alimentation en tension :

D'après les équations (IV.10.a) et (IV.10.b), les tensions de référence dans le repère  $d, q$  pour l'onduleur de tension sont :

$$V_{ds}^* = \lambda \sigma L_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{qs} - \frac{k_s}{T_r} \sigma L_s \Phi_{dr} \quad (IV.11.a)$$

$$V_{qs}^* = \lambda \sigma L_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{ds} - \frac{k_s}{T_r} \sigma L_s \Phi_{dr} \quad (IV.11.b)$$

Pour un découplage parfait, on ajoute les boucles de régulation des courants statoriques ( $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ) pour la partie linéaire des expressions des tensions (IV.11.a) et (IV.11.b), on obtient à leurs sorties les tensions statoriques ( $V_{ds}^*$ ,  $V_{qs}^*$ ).

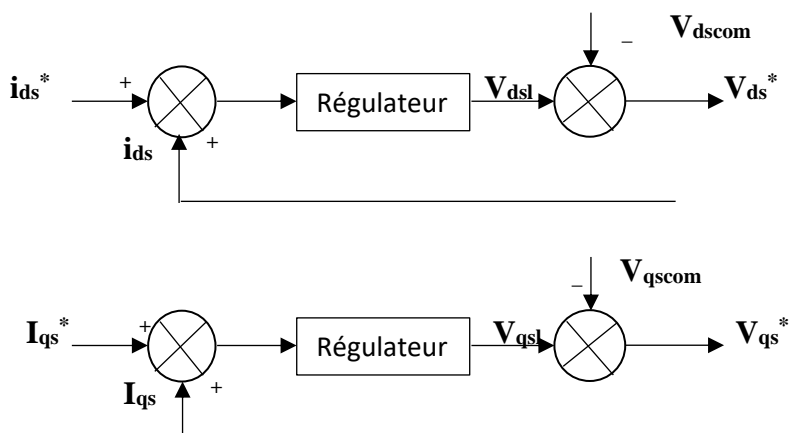


Figure II.32: Régulation de découplage.

Avec :

$$V_{dscom} = \omega_s \sigma L_s i_{qs} + \frac{k_s}{T_r} \sigma L_s \Phi_{dr} \quad (IV.12.a)$$

$$V_{qscom} = \omega_s \sigma L_s i_{ds} + \frac{k_s}{T_r} \sigma L_s \Phi_{dr} \quad (IV.12.b)$$

On obtient un nouveau système d'équations linéaire parfaitement découplé :

$$V_{dsl}^* = \lambda \sigma L_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} \quad (IV.13.a)$$

$$V_{dsl}^* = \lambda \sigma L_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} \quad (IV.13.b)$$

#### 4) Commande vectorielle indirecte :

Dans le cas d'une commande indirecte, l'angle  $\theta_s$  est calculé à partir de l'expression de la vitesse de glissement suivant :

$$\omega_s = \omega_{gl} + \omega_r \quad (IV.14)$$

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} ; \omega_{gl} = \frac{L_m i_{qs}^*}{T_r \Phi_r^*}$$

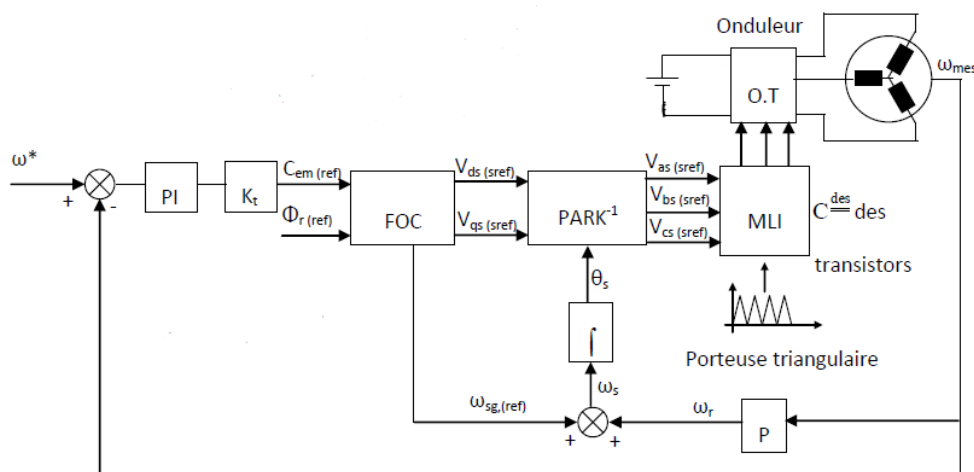


Figure II.33 : Régulation de vitesse par la méthode indirecte avec le régulateur (PI).

#### Les gains de régulateur de vitesse PI :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence capable de maintenir la vitesse correspondante.

L'équation mécanique est :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (IV.15)$$

En appliquant la transformée de Laplace, on obtient :

$$(Js + f)\Omega(s) = C_{em}(s)$$

Ce qui en résulte la fonction de transfert suivante :

$$G_s(s) = \frac{\Omega(s)}{C_{em}(s)} = \frac{1}{Js+f} \quad (IV.16)$$

En utilisant un régulateur PI, le schéma de régulation de la vitesse est celui donné par la figure ci-dessous :

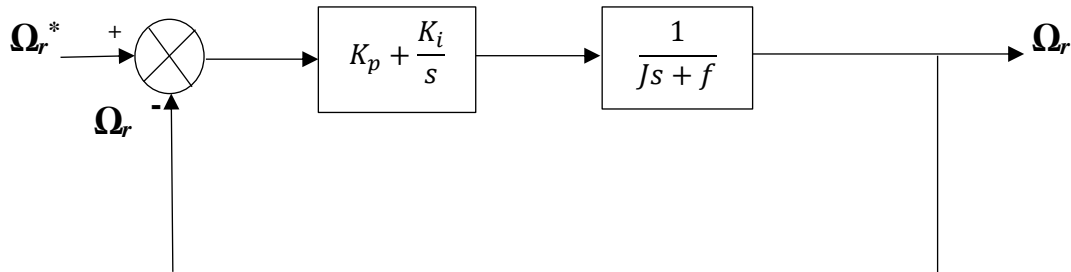


Figure IV.34 : schéma de régulation de la vitesse.

$$\begin{aligned} \Omega(s) &= \frac{1}{Js+f} C_{em}(s) \\ \Omega(s) &= \frac{1}{Js+f} (k_p + \frac{k_i}{s})(\Omega^* - \Omega) \\ \Omega(s) &= \frac{1}{Js+f} (k_p + \frac{k_i}{s})\Omega^* - \frac{1}{Js+f} (k_p + \frac{k_i}{s})\Omega \\ (1 + \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{Js+f})\Omega(s) &= \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{Js+f} \Omega^*(s) \\ G_{\Omega}^{BF}(s) &= \frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{\frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{Js+f}}{1 + \frac{k_p + \frac{k_i}{s}}{Js+f}} = \frac{\frac{k_p s + k_i}{s(Js+f)}}{1 + \frac{k_p s + k_i}{s(Js+f)}} \\ G_{\Omega}^{BF}(s) &= \frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{k_p s + k_i}{Js^2 + (f + k_p)s + k_i} \\ G_{\Omega}^{BF}(s) &= \frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + (\frac{f+k_p}{J})s + \frac{k_i}{J}} \end{aligned} \quad (IV.17)$$

En identifiant le dénominateur de  $G_{\Omega}^{BF}(s)$  avec celui d'un système de la forme canonique suivante :

$$H(s) = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

On trouve :



$$\frac{f+k_p}{J} = 2\zeta\omega_n \qquad k_p = 2\zeta\omega_n J - f$$

$$\frac{k_i}{J} = \omega_n^2 \qquad k_i = J\omega_n^2$$

**Calcul des gains des régulateurs des courants**

Après compensation, on obtient un schéma de réglage identique pour les deux axes (d) et (q). Le schéma de réglage des courants direct et en quadrature à l'aide de régulateurs PI est représenté sur la figure ci-dessous.

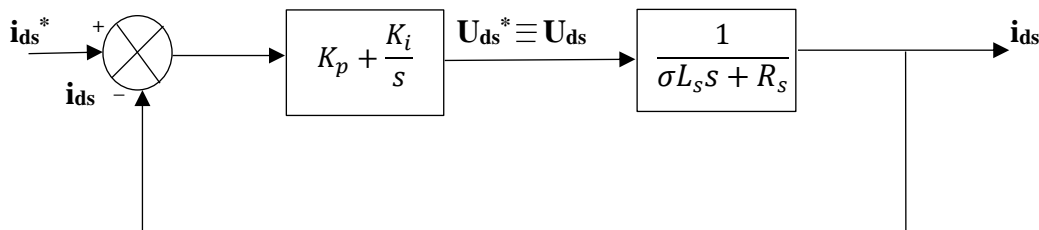


Figure II.35 : schéma de régulation du courant.

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_i^{BF}(s) = \frac{i_{dqs}(s)}{i_{dqs}^*(s)} = \frac{\frac{k_p s + k_i}{s(\sigma L_s s + R_s)}}{1 + \frac{k_p s + k_i}{s(\sigma L_s s + R_s)}} = \frac{k_p s + k_i}{\sigma L_s s^2 + (k_p + R_s)s + k_i}$$

$$= \frac{\frac{k_p s + k_i}{\sigma L_s}}{s^2 + \left(\frac{k_p + R_s}{\sigma L_s}\right)s + \frac{k_i}{\sigma L_s}}$$

Par identification de  $G_i^{BF}(s)$  avec la forme canonique d'un système de deuxième ordre, on obtient :

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{k_p + R_s}{\sigma L_s} = 2\zeta\omega_n \\ \frac{k_i}{\sigma L_s} = \omega_n^2 \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad \left[ \begin{array}{l} k_p = 2\zeta\omega_n \sigma L_s + R_s \\ k_i = \sigma L_s \omega_n^2 \end{array} \right.$$

**Bloc FOC: Field Oriented Control**

L'objectif de ce bloc est le calcul des courants et de la pulsation rotorique de référence en fonction des valeurs souhaitées du flux et du couple. Les grandeurs de références  $I_{ds}^*$   $I_{qs}^*$   $\omega_r^*$  sont obtenues par inversion directe du modèle  $\Phi_{qr}=0$  en courant à selon la relation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{ds}^* = \frac{\Phi_r^*}{L_m} \end{array} \right.$$

$$\text{FOC : } i_{qs}^* = \frac{L_r}{pL_m\Phi_r^*} C_{em}$$

$$\omega_r^* = \frac{L_m}{T_r\Phi_r^*} i_{qs}^*$$

### 5) Résultats de simulation :

On va simuler et commander par commande vectorielle indirect (  $\Phi_r$  est donné ) :

$$\Phi_r = 0.7$$

Les gains	$k_p$	$k_i$
de vitesse	8	6
de courant	2000	0.06

Tableau II.3 : les gains des régulateurs.

#### 1<sup>er</sup> stratège :

On va démarrer la machine à vide avec une vitesse de rotation  $\omega_r = 210 \text{ rad/s}$ , à  $t = 4\text{s}$  la vitesse de rotation devient  $\omega_r = 314 \text{ rad/s}$ :

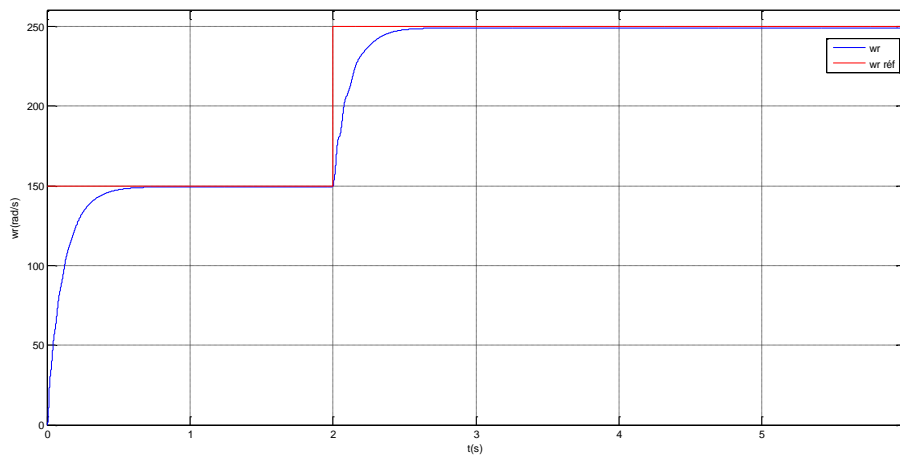


Figure II.36 : la vitesse de MAS par commande vectorielle.

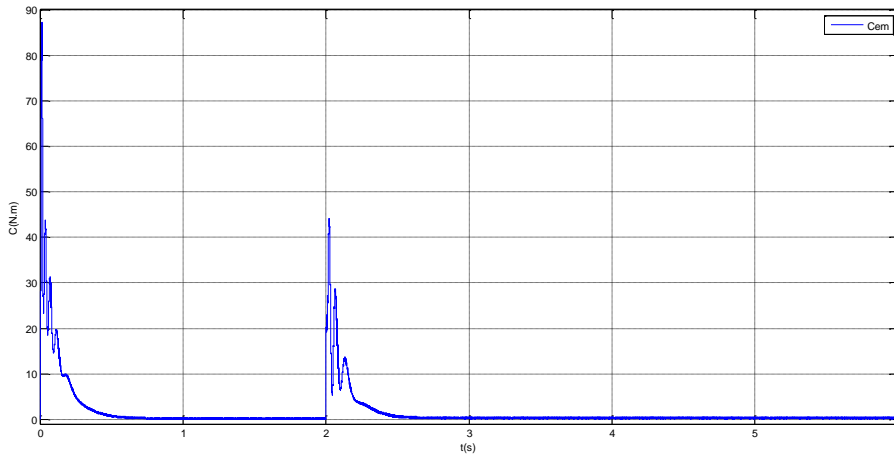
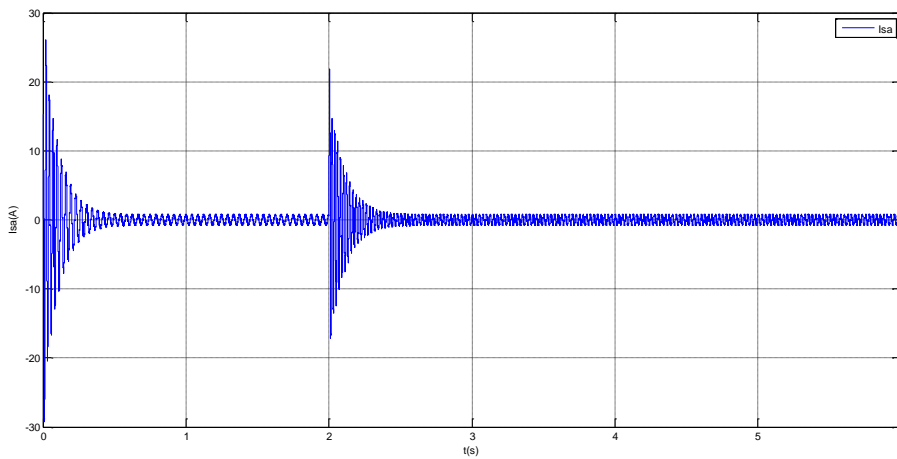


Figure II.37 : le couple de MAS par commande vectorielle.



**2<sup>ème</sup> stratégie :**

On va roter la machine dans le sens inverse à  $\omega_r=210 \text{ rad/s}$ , à  $t=2s$  la machine retâte à  $\omega_r=210 \text{ rad/s}$  dans le sens nominal.

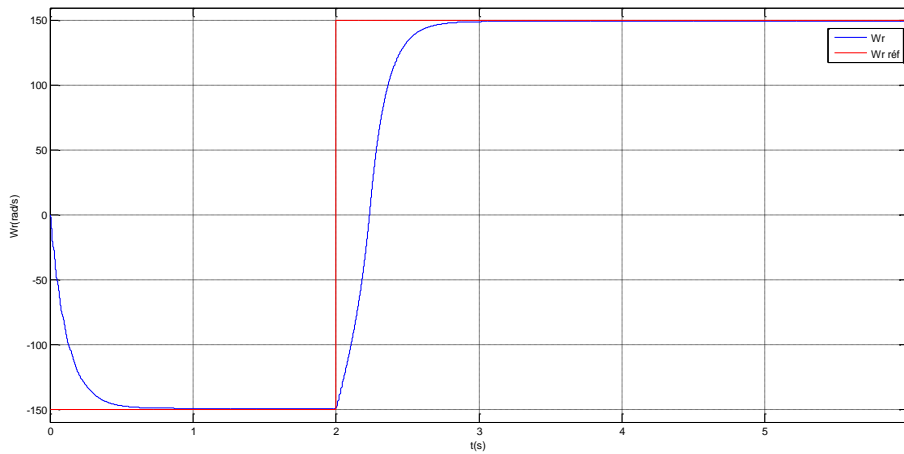


Figure II.38 : la vitesse de MAS par commande vectorielle.

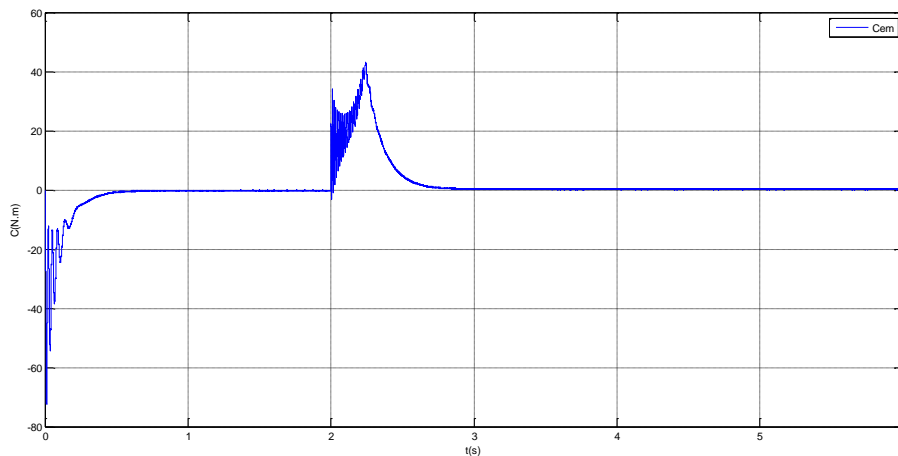
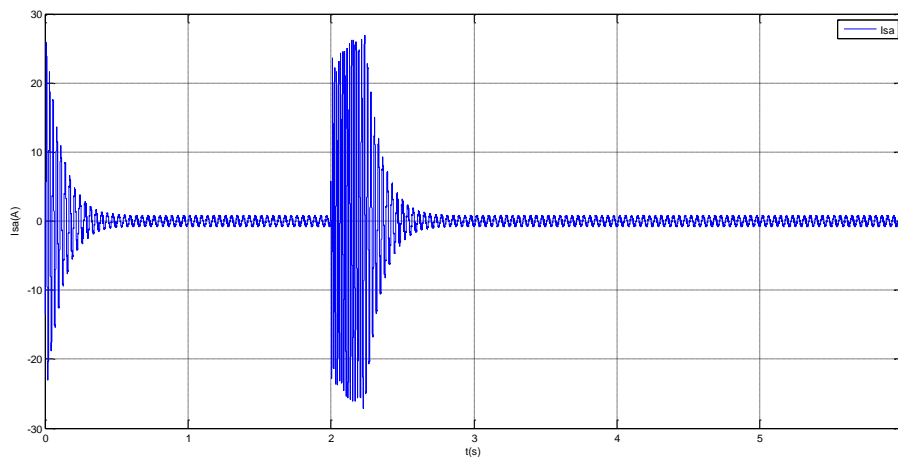


Figure II.39 : le couple de MAS par commande vectorielle.



La vitesse de la machine toujours poursuite sa référence, et après applique une charge sur la machine la vitesse diminue et presque retourne à la référence.

### ***Conclusion :***

Dans ce chapitre on a représenté :

- L'association entre la machine asynchrone et l'onduleur de tension, l'onduleur génère les tensions presque sinusoïdales qui tournent la machine avec des perturbations à la courbe de vitesse.
- Quelques techniques de commande de machine asynchrone (commande scalaire et commande vectorielle).
- La commande scalaire qui base en la commande  $V_s/f$  ou  $V_s/\omega$  ( $\omega=2\pi f$ ), ce rapport donne l'amplitude juste pour chaque pulsation référence  $\omega_r$ .
- La commande vectorielle ou FOC (flux oriented control) qui dépend l'orientation de flux, et l'amélioration de cette commande dans la variation de vitesse, et stable la vitesse dans les charges appliquées sur la machine.

- 
- 
- 

- **Chapitre III**

- L'association entre deux machine asynchrone et onduleur cinq bras

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

•

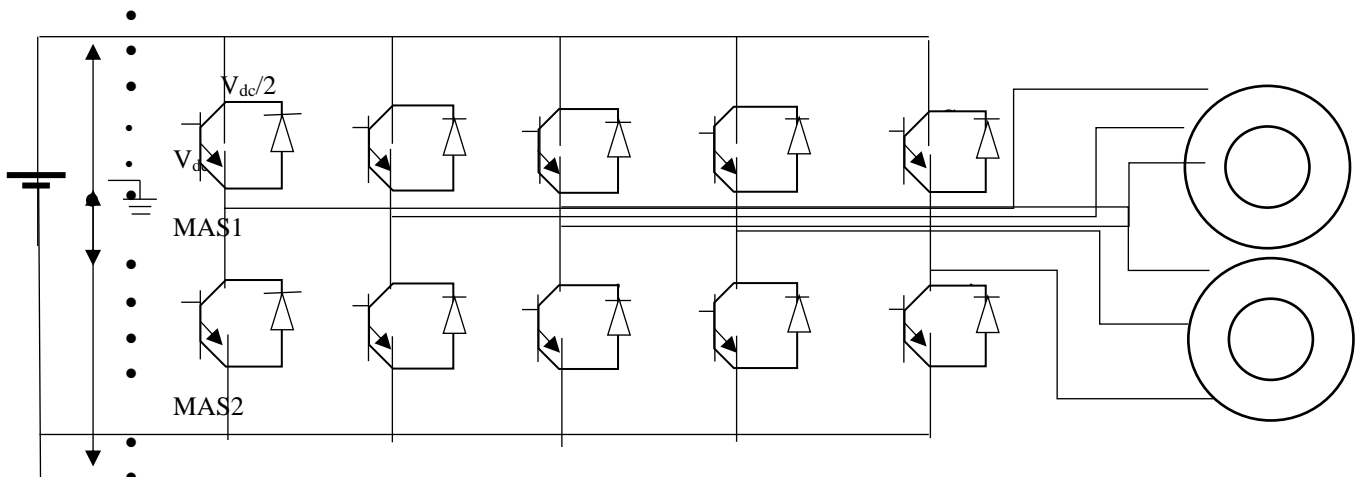
### III.1 Introduction :

- Un certain nombre d'application industrielle exigent l'utilisation des systèmes d'entraînement multi-moteurs à vitesse variable. La majorité des cas, chaque moteur est associé à un onduleur. On trouve ce type des systèmes dans l'industriel : minière, textile, papetière et sidérurgique. Avec le développement de l'électronique de puissance un nouvel axe de recherche reconnu sous le nom convertisseur multi-bras, le but de ce développement est d'optimiser la structure de convertisseur donc la minimisation du nombre de composant de puissance, par conséquent un gagne du volume et de câblage.[31]
- La conception d'une chaîne de commande passe par une phase de modélisation afin de dimensionner et valider les stratégies retenues. Mais, on ne peut parler de la commande de la machine asynchrone, sans qu'on parle du convertisseur qui lui est associé, de son alimentation et de sa commande. [32]
- Dans ce chapitre, on a étudié comment réaliser l'onduleur cinq bras et applique lui sur le système deux moteurs asynchrones.

### III.2 Onduleur cinq bras

#### III.2.1 Modélisation de l'onduleur de tension à cinq bras

- L'onduleur cinq bras contient cinq phases avec deux interrupteur pour chaque bras, cet onduleur a un unique commande qui permet génère deux différent tension de deux différent fréquence.



• Figure III.1 : Onduleur cinq bras.

- Pour modéliser l'onduleur de tension, on considère son alimentation comme une source parfaite, générée par de deux générateurs de F.E.M égale :

- $V_{dc} = \frac{U_0}{2}$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ . [33]

- On admet que l'onduleur alimente une charge pentaphasée équilibrée dont les tensions simples sont notées par  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}, V_{dn}, V_{en}$ . L'onduleur est commandé à l'aide des grandeurs logiques  $S_i$  ( $i=a, b, c, d, e$ ). On appelle par  $T_i$  et

- $T_i'$  les transistors (supposés des interrupteurs idéaux), on a :
- 
- - Si  $S_i = 1$  alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert
- - Si  $S_i = 0$  alors est  $T_i$  passant et  $T_i'$  est ouvert
- 
- Dans ces conditions on peut écrire les tensions  $V_{in}$  en fonction des signaux de commande  $S_i$  ( $i = a, b, c, d, e$ ) et en tenant compte du point fictif  $n_0$  représenté on figure III.1.

$$\bullet \quad V_{io} = S_i * v_{dc} \quad (\text{III.1})$$

- Les tensions de phase neutre de la charge sont écrites comme suit :
- 

$$\left. \begin{aligned} \bullet \quad V_{an} &= V_{ao} - V_{no} \\ \bullet \quad V_{bn} &= V_{bo} - V_{no} \\ \bullet \quad V_{cn} &= V_{co} - V_{no} \\ \bullet \quad V_{dn} &= V_{do} - V_{no} \\ \bullet \quad V_{en} &= V_{eo} - V_{no} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.2})$$

- On peut déduire le potentiel entre les points  $n$  et  $n_0$  comme:

$$\bullet \quad V_{no} = \frac{1}{5} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + V_{do} + V_{eo}) \quad (\text{III.3})$$

- En remplaçant (III.2) dans (III.3) on obtient :

$$\bullet \quad \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \\ V_{dn} \\ V_{en} \end{bmatrix} = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 4 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \\ V_{do} \\ V_{eo} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

- L'utilisation de l'expression (III.1) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande comme suit :

$$\bullet \quad \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \\ V_{dn} \\ V_{en} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{5} \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 4 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \\ S_d \\ S_e \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

### • III.2.2 Commande MLI de l'onduleur cinq bras

- Dans la commande MLI de cet onduleur il y a 6 tension disponible ( $v_{a1}, v_{b1}, v_{c1}$ ) et ( $v_{a2}, v_{b2}, v_{c2}$ ), on a soustrait la tension  $v_{c1}$  de les tensions références générée par la commande de machine 1, le même que les tensions références générée par la commande de machine 2 et  $v_{c2}$ . les cinq tensions de références sont calculés comme :

$$\left. \begin{aligned} \bullet \quad V_a^* &= v_{a1} - v_{c1} \\ \bullet \quad V_b^* &= v_{b1} - v_{c1} \\ \bullet \quad V_c^* &= v_{c1} - v_{c1} = v_{c2} - v_{c2} = 0 \\ \bullet \quad V_d^* &= v_{a2} - v_{c2} \\ \bullet \quad V_e^* &= v_{b2} - v_{c2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.6})$$

- L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie des tensions le plus sinusoïdale possible, à cet effet différentes stratégies de commande permettant de déterminer les fonctions logiques  $S_i$  ( $i = a, b, c, d, e$ ) sont proposées dans la littérature. Dans le présent travail, la technique MLI sinus-triangle (PWM) est adoptée pour commander l'onduleur.[34]
- 
- La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure (III.2).[35]
- 
- 

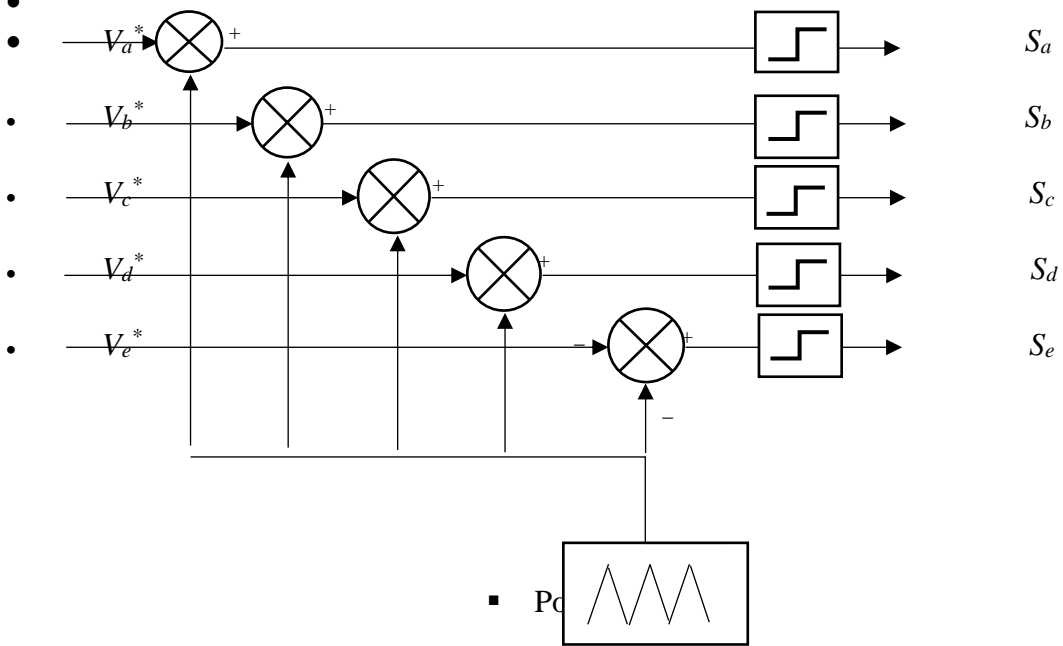


Fig. III.2 : commande MLI d'onduleur cinq bras.

Donc, le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

$$\text{Si } V_i^* \geq V_p \quad S_i=1 \quad \text{Sinon } S_i=0 ; \quad (i=a, b, c, d, e)$$

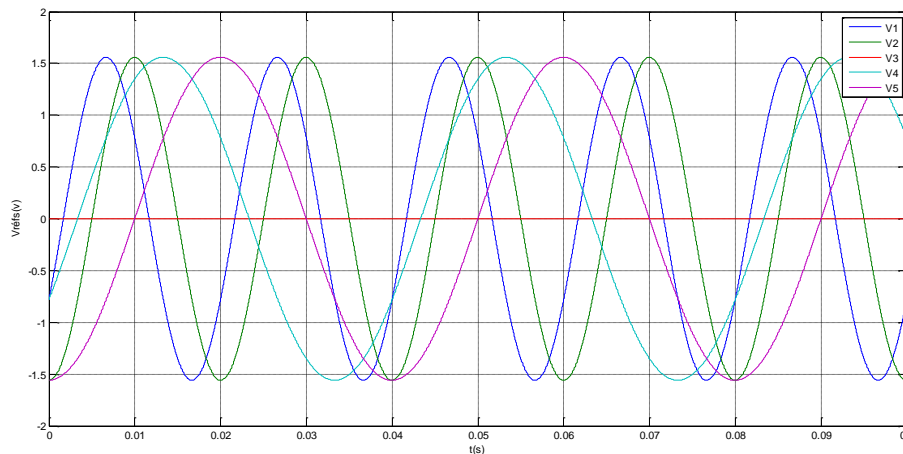
L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left( \frac{4T}{T_p} - 1 \right) & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left( \frac{4T}{T_p} + 3 \right) & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases}$$

Parameter	$V_{dc}$	$R_s$	$L_s$	$V_{pm}$	$f_p$	$f_{s1}$	$f_{s2}$
Valeur	220V	10Ω	0.01H	10V	1000Hz	50Hz	25Hz

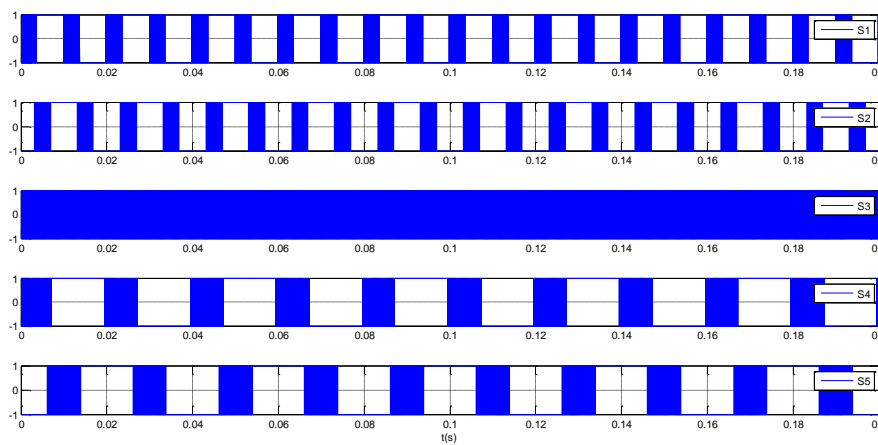
• Tableau III.1: paramètre d'onduleur cinq bras.

- 
- Après que nous départ la simulation, ce sont les résultats que nous trouvons :



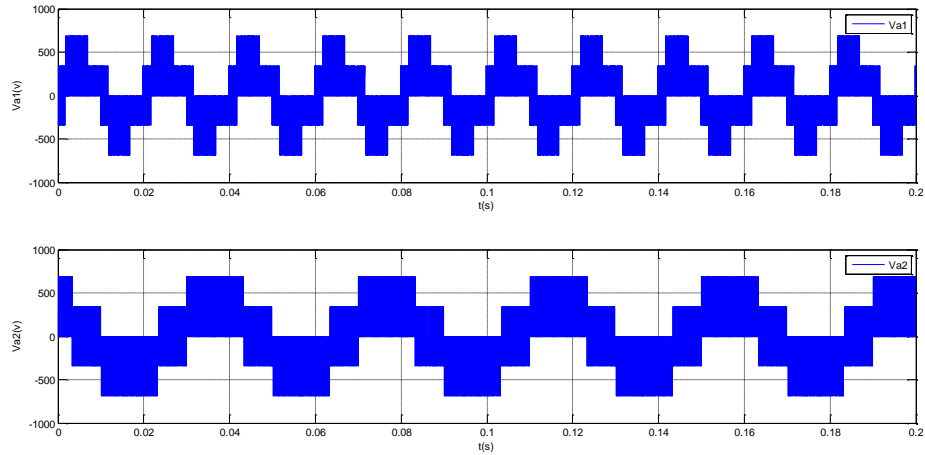
• Fig. III.3 : les tensions références.

- 
- 
- 
- La tension  $V_3=0$  c'est la tension de bras commun à zéro.



• Fig. III.4 : les signaux de commande MLI.

Les signaux de coupure de 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> bras différents en les fréquences références que les signaux de coupure de 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> bras (S1,S2 en 50Hz et S4,S5 en 25Hz, et le 3<sup>ème</sup> bras est le bras commun.



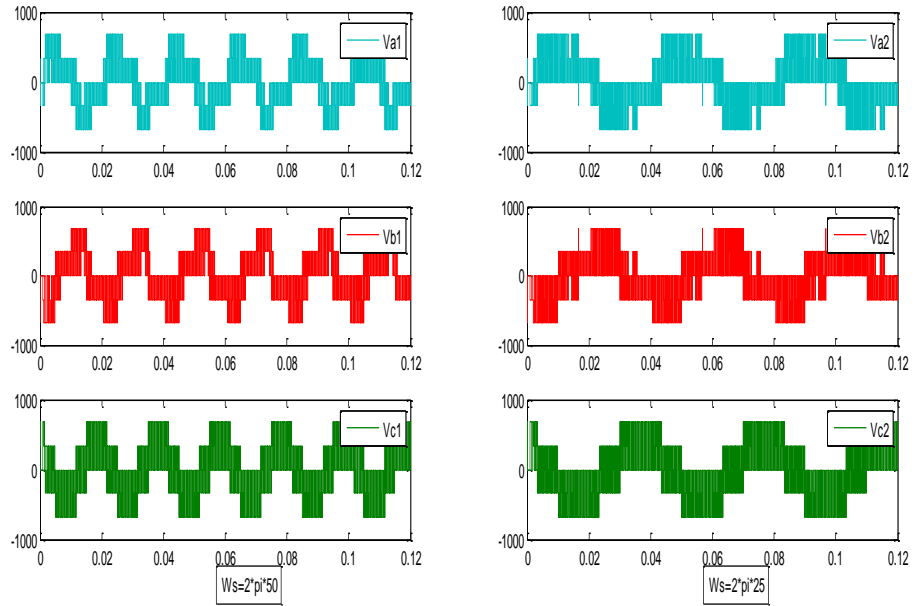
- Fig. III.5 : les tensions des phases a1 et a2.

L'onduleur cinq bras peut générer deux tension de deux différent fréquences, c'est-à-dire cet onduleur peut marcher deux machine asynchrone de deux différent vitesse de rotation.

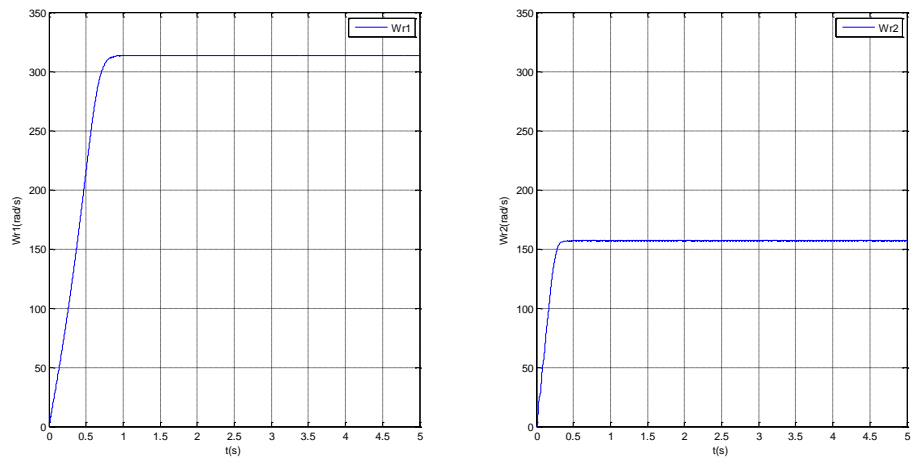
### III.3 L'association entre onduleur cinq bras et deux MAS :

L'onduleur cinq bras est comme deux onduleurs triphasé avec un bras commun entre les deux avec deux commande MLI de chaque onduleur, il peut générer six tensions chaque trois avec une valeur de fréquence, donc les deux machine tournent avec deux différent vitesses, que nous vous montrons dans la simulation suivant :

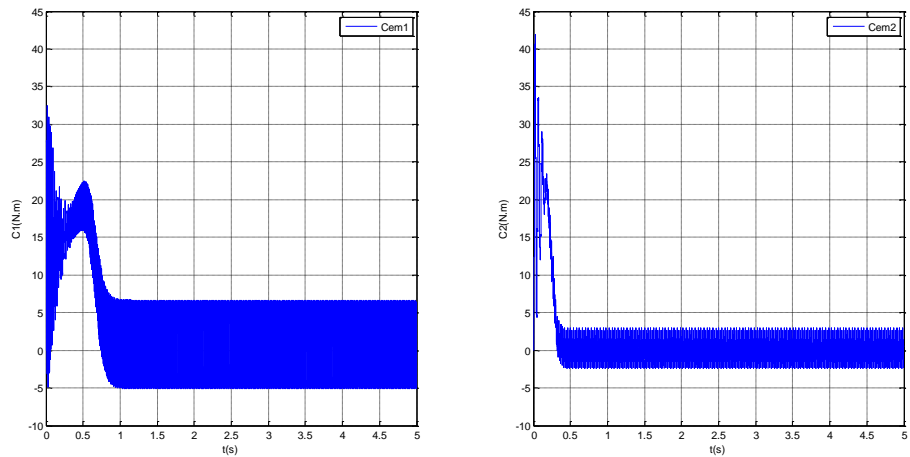
On va simuler les deux MAS avec un onduleur cinq bras, la 1<sup>ère</sup> machine fonctionne avec une fréquence de rotation  $\omega_s = 2\pi * 50 \text{ rad/s}$  et la 2<sup>ème</sup> machine fonctionne avec une fréquence de rotation  $\omega_s = 2\pi * 25 \text{ rad/s}$ .



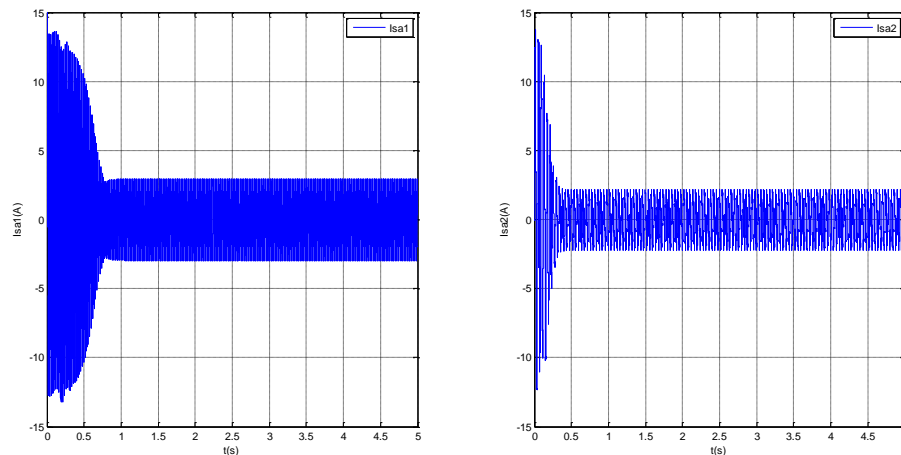
•  
•  
• Figure III.6 : les tensions de sortie d'onduleur cinq bras.



• Figure III.7 : les vitesses des MAS1 et MAS2.



• Figure III.8 : les couples des MAS1 et MAS2.



• Figure III.9 : les courants Isa de MAS1 et MAS2.

L'onduleur cinq bras. Que on a vu, peut fonctionner deux machines asynchrone avec deux différent vitesses, mais on note que le 2<sup>ème</sup> machine nous a donné pas bon courbes dans le régime permanent comme la courbe de courant, il n'y a pas un signal sinusoïdal. Car ce machine fonctionne par fréquence  $f_s=25Hz$ , et l'amplitude de tension référence d'onduleur  $V_m=0.9V$  qui correspondent avec la fréquence de  $50Hz$ .

La solution de cette situation on a clarifié dans les prochains titres.

### III.4 Application de commande scalaire sur l'association deux MAS avec onduleur cinq bras :

#### III.4.1 On boucle ouverte :

##### 1<sup>er</sup> stratégie :

Dans ce stratégie, en va simuler deux MAS avec un onduleur cinq bras, et en utilise la commande scalaire. En alimente l'onduleur avec deux pulsations statoriques de référence  $\omega_{s1}=314 \text{ rad/s}$  et  $\omega_{s2}=157 \text{ rad/s}$ , et l'amplitude de tension  $V_{sm}$  détermine comme :

$$V_{sm1} = \omega_{s1} * \Phi_{s1} \quad ; \quad V_{s2} = \omega_{s2} * \Phi_{s2}$$

$$V_{sm} = \frac{V_{s1} + V_{s2}}{2}$$

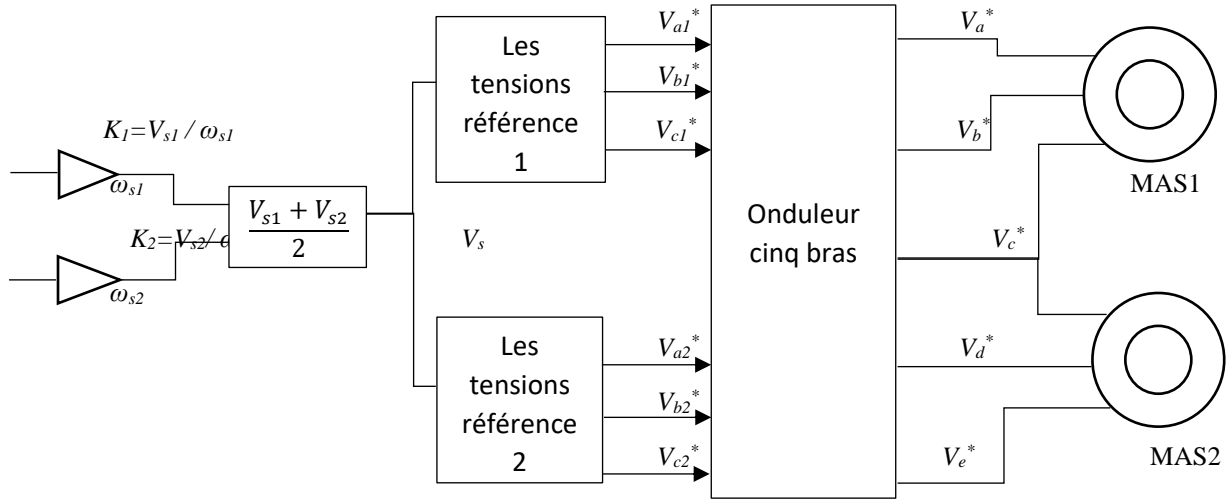


Figure III.10 : commande scalaire en boucle ouverte avec association de 2MAS-Onduleur cinq bras.

Pour commande deux MAS on a besoin deux fréquences références  $f_1$  et  $f_2$  (ou pulsations références  $\omega_{s1}$  et  $\omega_{s2}$ ), on va calculer  $V_s$  la tension moyen de  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  et générer les tensions références pour l'onduleur cinq bras ( $V_{a1}^*, V_{b1}^*, V_{c1}^*, V_{a2}^*, V_{b2}^*, V_{c2}^*$ ).

Pour créer les cinq tensions de références ( $V_a^*, V_b^*, V_c^*, V_d^*, V_e^*$ ), on va calculer comme ça :

$$\begin{aligned}
 V_a^* &= v_{a1} - v_{c1} \\
 V_b^* &= v_{b1} - v_{c1} \\
 V_c^* &= v_{c1} - v_{c1} = v_{c2} - v_{c2} = 0 \\
 V_d^* &= v_{a2} - v_{c2} \\
 V_e^* &= v_{b2} - v_{c2}
 \end{aligned}
 \tag{III.7}$$

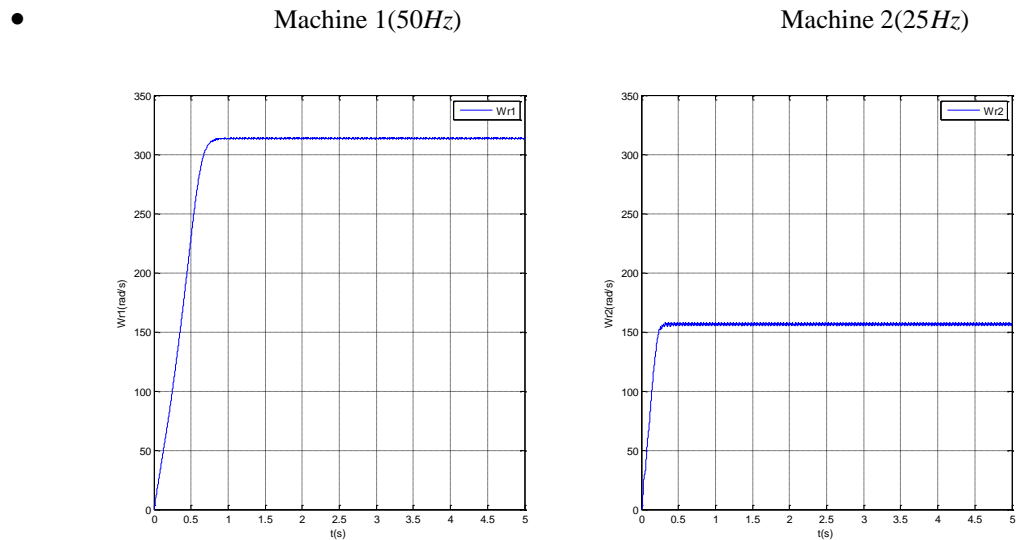


Figure III.11 : Résultat de simulation de vitesse.

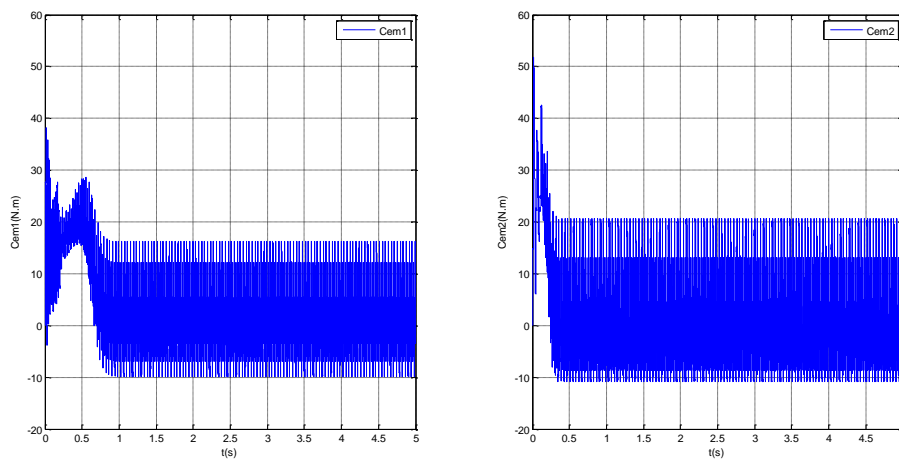


Figure III.12 : Résultat de simulation de couple.

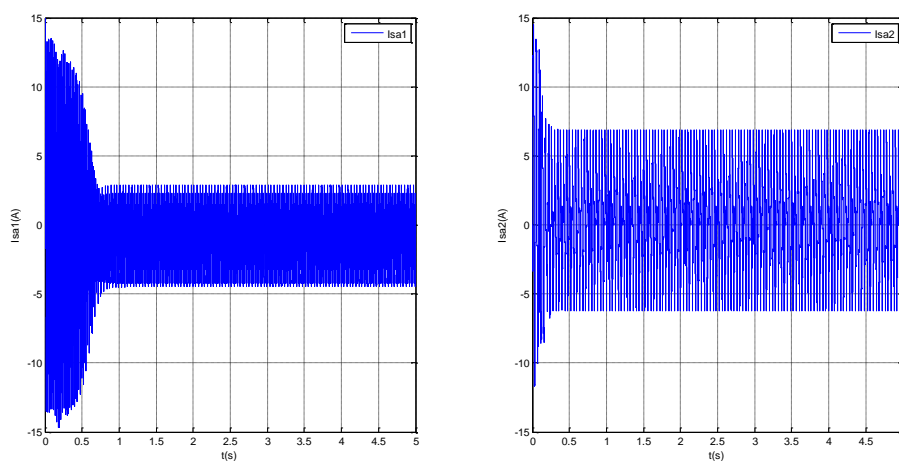


Figure III.13 : Résultat de simulation de courant.

Pour la courbe de vitesse, chaque machine tourne par la vitesse qui on propose, MAS 1 tourne le double de MAS 2, et le temps de réponse de MAS 1 égale 1s et pour MAS 2 égale 0.3s comme on regarde dans Figure III.11.

Pour la courbe de couple, chaque machine génère un couple mécanique qui corresponde à la vitesse propose, 10N.m pour MAS 1 et 30N.m pour MAS 2 comme on regarde dans III.12.

Pour la courbe de courant, le courant de MAS 1 fixe à  $t=1s$  avec en amplitude de 3A. et pour MAS 2 le courant fixe à  $t=0.3s$  avec une amplitude de 5A comme on regarde dans Figure III.13.

III.4.2 On boucle fermé :

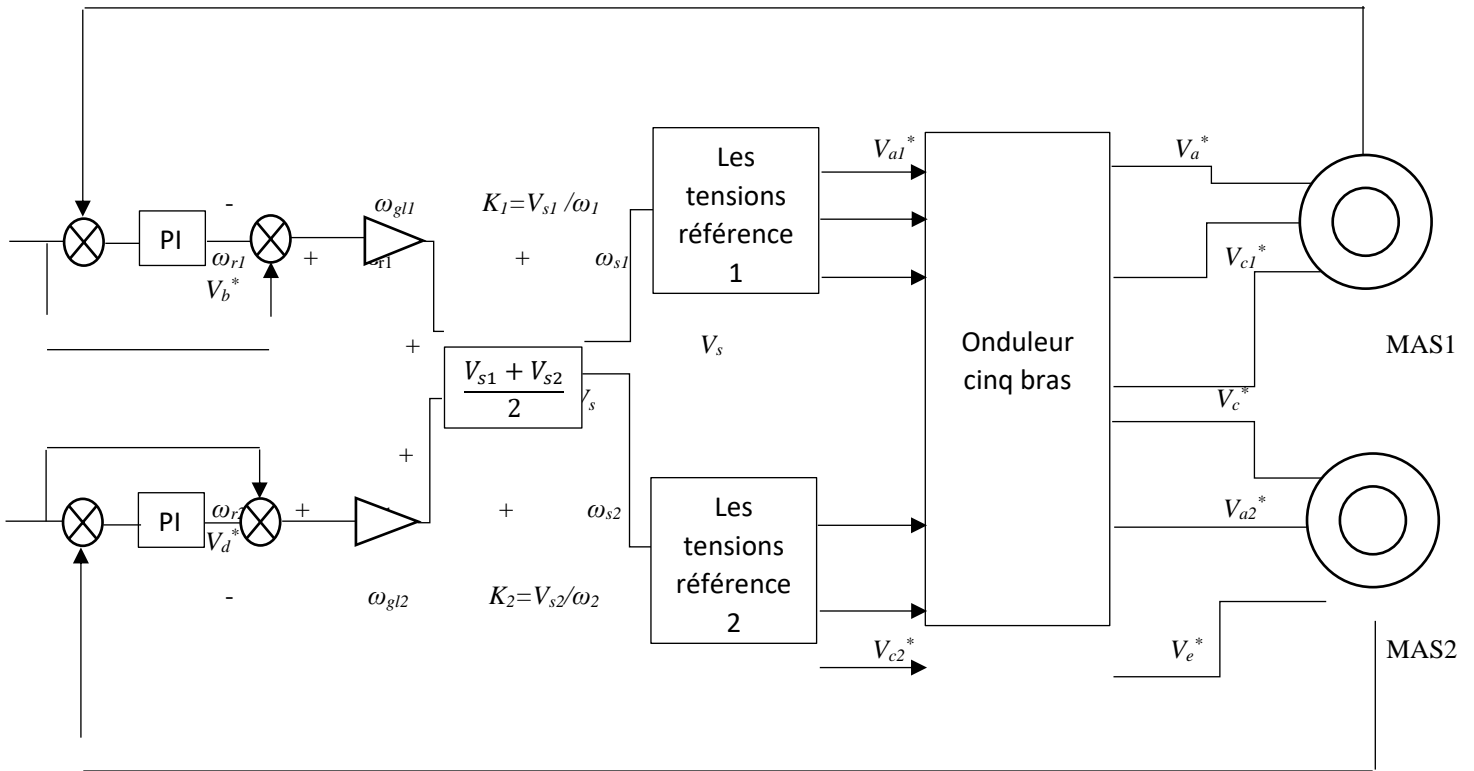


Figure III.14 : commande scalaire en boucle fermée avec association de 2MAS-Onduleur cinq bras.

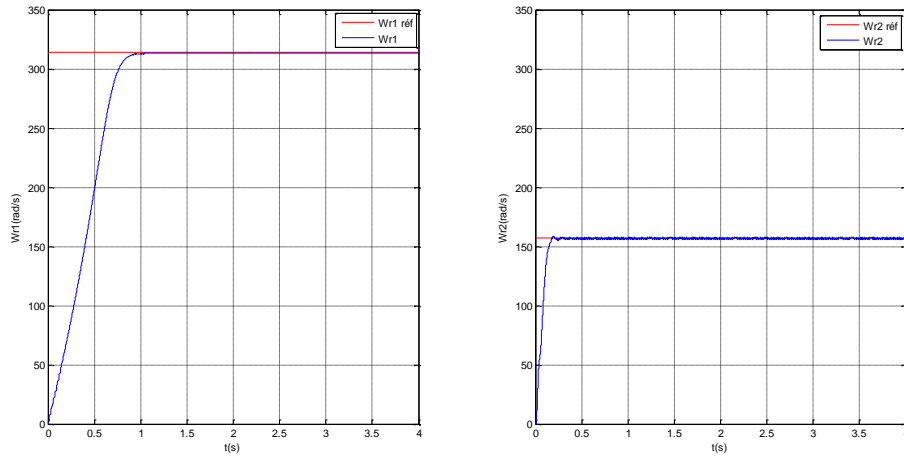


Figure III.15 : Résultat de simulation de vitesse.

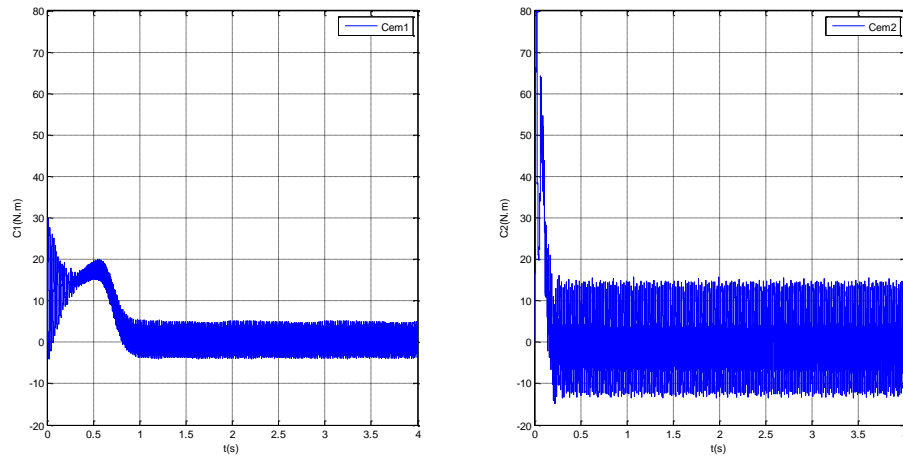


Figure III.16 : Résultat de simulation de couple.

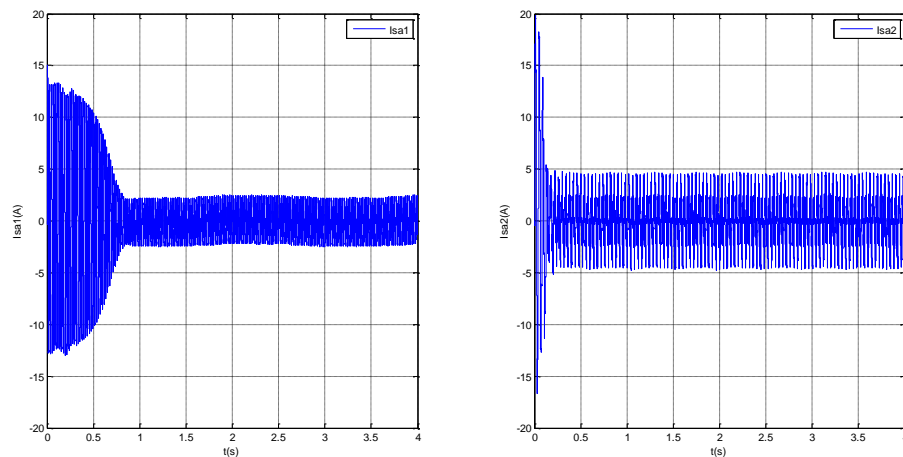


Figure III.17 : Résultat de simulation de courant.

Pour la courbe de vitesse, chaque machine tourne par la vitesse qui on propose, MAS 1 tourne le double de MAS 2, et le temps de réponse de MAS 1 égale 1s et pour MAS 2 égale 0.3s comme on regarde dans Figure III.15.

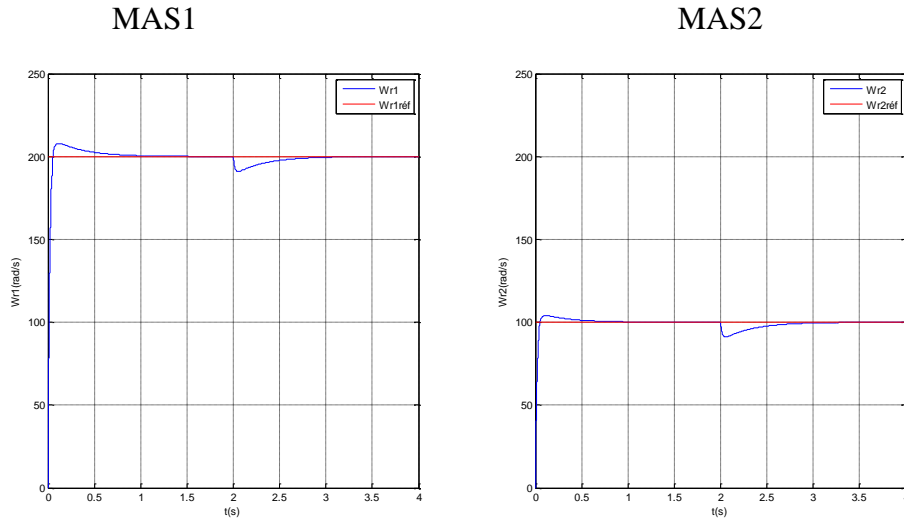
Pour la courbe de couple, chaque machine génère un couple mécanique qui corresponde à la vitesse propose, 20N.m pour MAS 1 et 40N.m pour MAS 2 comme on regarde dans III.16.

Pour la courbe de courant, le courant de MAS 1 fixe à  $t=1s$  avec en amplitude de 2A. et pour MAS 2 le courant fixe à  $t=0.3s$  avec une amplitude de 4A comme la Figure III.17.

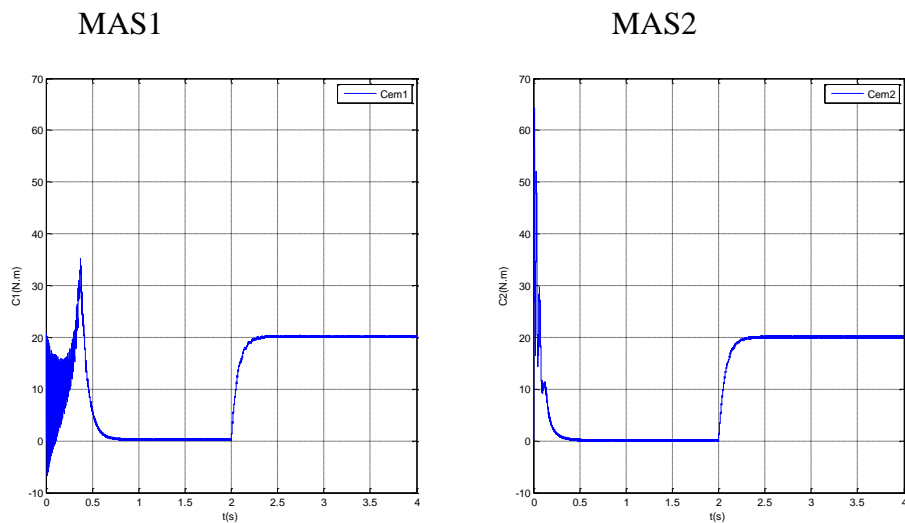
### III.5 Application commande vectorielle sur l'association deux MAS avec onduleur cinq bras :

**1<sup>er</sup> stratégie :**

On va simuler deux machines avec un onduleur cinq bras, le 1<sup>er</sup> machine tourne avec une vitesse de rotation 200 *rad/s* et le 2<sup>ème</sup> machine tourne avec 100 *rad/s*. on applique un charge de 30 N.m sur les deux machines à t=2s.



- Figure III.18 : Résultant de simulation de vitesse.



- 
- 

- Figure III.19 : Résultant de simulation de couple.

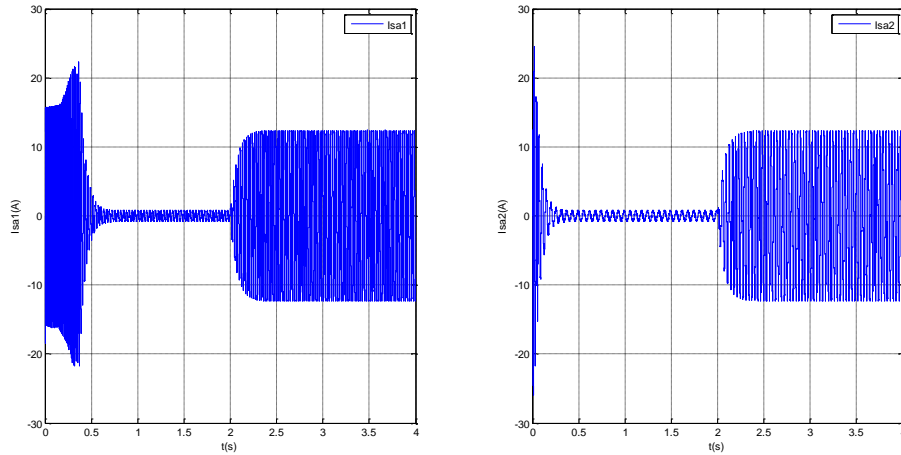


Figure III.20 : Résultat de simulation de courant.

Les deux machines fonctionnant en ensemble par l'onduleur cinq bras.

La 1<sup>er</sup> machine et 2<sup>ème</sup> machine toujours tournant à la vitesse de référence, et malgré l'exercice de la charge la vitesse retourne à sa référence comme on regarde dans la Figure III.19. Et le couple de MAS1 est grand que le couple de MAS2 en démarrage, mais après ça les deux le même.

**2<sup>ème</sup> stratégie :**

Pour MAS1, la machine démarre à 150 rad/s, après t=2s la machine tourne à 200 rad/s et applique une charge de 30 N.m à t=4s.

Pour MAS2, la machine démarre en charge de 30 N.m et vitesse de 200 rad/s, après t=2s la machine tourne à 150 rad/s et tourne à vide à t=4s.

MAS1

MAS2

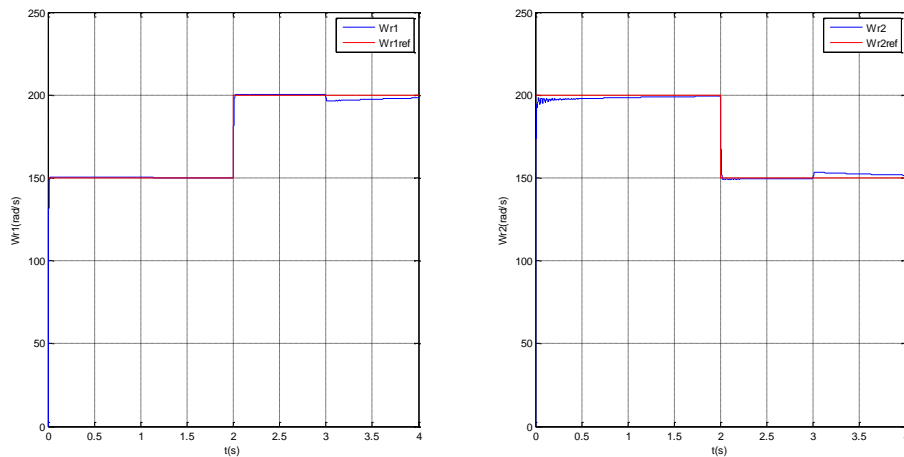
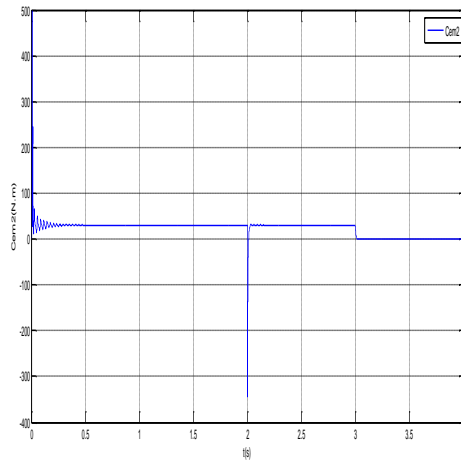
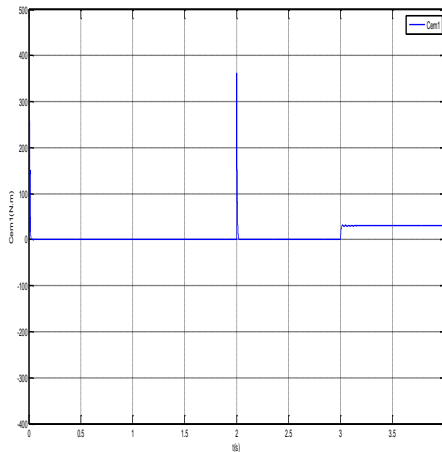


Figure III.21 : Résultat de simulation de vitesse.

MAS1

MAS2



• Figure III.22 : Résultant de simulation de couple.

- 
- Dans les courbes de vitesse, pour MAS1, il tourne à vide avec une vitesse de rotation  $150 \text{ rad/s}$ , on augmente la vitesse à  $200 \text{ rad/s}$ , malgré il existe un charge à  $t=4\text{s}$  la vitesse retourne à sa référence.
- 
- Pour MAS2, on a démarré en charge avec une fréquence de rotation  $200 \text{ rad/s}$ , on observe que la machine démarre à vitesse légèrement plus bas de référence et retour à lui, après  $t=2\text{s}$  la machine tourne à  $150 \text{ rad/s}$ , à  $t=4\text{s}$  la charge est disponible et la vitesse augmente un peu et retour à sa référence.
- 
- Dans les courbes de couple, MAS1 démarre à vide donc le couple va à 0, dans le changement de vitesse à  $t=2\text{s}$  le couple fait un augmente pic instantané et retour à 0, le couple augmente et fixe à  $30\text{N.m}$  après l'application de charge.
- 
- MAS2 démarrer en charge de  $30\text{N.m}$ , à  $t=2\text{s}$  le couple fait un diminue pic instantané et retour à  $30\text{N.m}$ . après disponible la charge à  $t=4\text{s}$ , le couple va à 0

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a représenté l'onduleur cinq bras et sa modélisation, et démontre la commande de cet onduleur.

On a associé l'onduleur cinq bras avec deux machines asynchrones et déduire comment fonctionne l'ensemble.

L'onduleur cinq bras peut marcher deux machines asynchrone chaque machine par son fonctionnement.

On a appliqué la commande scalaire sur l'ensemble de MAS-Onduleur cinq bras soit en boucle ouverte ou en boucle fermée.

En boucle ouverte, on a calculé  $V_{s1}$  de  $\omega_{s1}$  et  $V_{s2}$  de  $\omega_{s2}$  par le rapport  $V_s/f$ . Et en boucle fermée on a calculé l'erreur statique de vitesse  $\varepsilon_v = \omega_r^* - \omega_r$  et utilise un régulateur de vitesse PI. Et calcule  $\omega_{s1}$  et  $\omega_{s2}$  et ainsi de suite.

On a appliqué la commande vectorielle FOC (flux oriented control) par orientation de flux rotorique, et on a appliqué cette commande sur l'ensemble de MAS-Onduleur cinq bras.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier la commande de l'association onduleur à cinq bras - deux MAS. Notre objectif était de remplacer deux onduleurs triphasés à deux niveaux par un seul onduleur à cinq bras pour alimenter et commander deux MAS.

Dans le premier chapitre nous avons étudié la machine asynchrone, nous représentons la modélisation de la machine, et étudions lui dans le système triphasé abc, et le système biphasé dq par la transformation de PARK pour simplifier le système. Nous simulons la machine et discutons les résultats.

Et dans le deuxième chapitre nous avons étudié l'association entre la machine asynchrone et un onduleur triphasé, nous définissons l'onduleur et étudions sa modélisation et déclarons sa commande (commande MLI), après nous simulons MAS avec l'onduleur. Ensuite nous ajoutons la commande scalaire, nous démontrons son principe et utilisons le régulateur PI, nous calculons ses gains et simulons en boucle ouverte et fermée et discutons les résultats. Puis, nous avons présenté la commande vectorielle avec l'orientation du flux rotorique. On peut conclure, dans tous les résultats présentés que le découplage est maintenu dans tout le régime de fonctionnement de MAS.

A travers le troisième chapitre, nous avons représenté l'onduleur à cinq bras et étudié l'ensemble de deux MAS-onduleur à cinq bras, et nous avons appliqué la commande scalaire de ce système. En plus nous avons présenté la commande vectorielle de la cascade onduleur à cinq bras - deux MAS. Les résultats de simulation montrent bien l'indépendance de fonctionnement entre les deux moteurs, ce qui confirme le découplage entre les phases connectées au bras commun.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] Charlemagne. S, « *Modélisation et commande d'un système de transport de bande textile, application des concepts multimachines* », Thèse de doctorat, université d'EL-Manar à Tunis, 2003.
- [2] Kimura. Y, Hizumz. M, Matsuse. K, « *Independent vector control of PM motors with five-leg inverter by expanded two arm modulation method* », Power Electronics and Applications, 2005 European Conference.
- [3] Martin. J, Slobodan. N V, Drazen. D, Emil. L, Wright. P, « *Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant power applications* », Electric Power Applications, IET , 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 275–287.
- [4] Drazen. D, Martin. J, Slobodan. N V, Emil. L, « *A general PWM methode for a (2n+1)-leg inverter supplying n three-phase machines* », Industrial Electronics, IEEE Transactions 2009.
- [5] Bouhoune .K, « *Application de nouvelles techniques de commandes aux machines asynchrones : monophasée et triphasé* », Thèse de magister, université Houari Boumediene, Alger 2005.
- [6] Belhadef. R et Boutaya. B, « *Commande vectorielle et par logique floue de la machine asynchrone sans capteur* » Mémoire d'ingénieur d'état, ENP, Alger 2008.
- [7] Infineon Technologies AG « *Explanation discrete IGBTs ' datasheets* », V1.0, 2015.
- [8] Bouakaz Ouahid "contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux " Thèse de magistère, Batna année 2005].
- [9] Akkouchi Kamel," *Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone* ", Thèse de magister, Université Annaba].
- [10] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de LF, RN,AG". Thèse de doctorat, université Henri poicaré, Nancy-1,1999].
- [11] G. Brahim," *Commande non linéaire de la machine à induction* ",Thèse de master, Université de Batna,2012].
- [12] Abdelli, R " *Perturbations singulières appliquées au modèle de machine asynchrone avec défauts au stator et au rotor* ", mémoire de magister, école nationale polytechnique d'Alger, 2007].
- [13] D-AMIROUCHE et S- ABDELBASSIT," *commande non linéaire adaptative avec observateur d'état d'une machine alimenté en courant* ".Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2005.].
- [14] Abed Khoudir, "Techniques de commande avancées appliquées aux machines de type asynchrone", Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 22/06/2010. DSP". Ellipses, Mars 2000].

- [15] Tamrabet Hanene " Robustesse d'un Control Vectoriel de Structure Minimal d'une Machine Asynchrone " Thèse de magistère, Batna, 20.05.2006].
- [16] Tchiali Fouad, Maghraoui Noura " Modélisation et Commande des Onduleurs Multi niveaux Asymétriques ", PFE. Dép. d'électrotechnique, U.S.T.H.B 2004].
- [17] Benyahia. M, "commande non linéaire et prédictive application à la machine asynchrone " thèse de magister, Université de Batna 2001].
- [18] R.Mohamed, "Simulation et réalisation d'un onduleur de tension monophasé à trois niveau". Mémoire de fin d'étude, institut d'électrotechnique, université de Batna 2002].
- [19] Application de la technique de linéarisation par retour d'état à la commande d'une machine asynchrone ". PFE, Université M'sila, 2003].
- [20] Tchiali Fouad, Maghraoui Noura " Modélisation et Commande des Onduleurs Multi niveaux Asymétriques ", PFE. Dép. d'électrotechnique, U.S.T.H.B 2004].
- [21] G. Brahim," Commande non linéaire de la machine à induction ", Thèse de master, Université de Batna, 2012].
- [22] Lamine M, Traoré .A, "Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab /Simulink «, msas\_pp038\_45].
- [23] Paul-Etienne Vidal, "Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004].
- [24] univ Biskra, Chapitre I : modélisation de l'ensemble MAS-Convertisseur statique ; page4].
- [25] [www.automationsense.com](http://www.automationsense.com), Dans électronique à 27/06/2015].
- [26] Ahfouda Abd Elkarim, Alimentation d'une machine asynchrone par un onduleur de tension multi-niveaux à MLI optimisée, Master électrotechnique industriel, Université OUARGLA, 2017].
- [27] [fr.m.wikipedia.org-onduleur](http://fr.m.wikipedia.org-onduleur)
- [28] M. **PERRON** : conception d'une stratégie de commande vectorielle énergétiquement optimale de la machine asynchrone basée sur un modèle de perte neuronal sur FPGA. Thèse de doctorat, faculté des études supérieurs de l'université Laval, Québec 2009].
- [29] **M. Pinard** : commande électronique des moteurs électrique. DUNOD, Paris, 2004].
- [30] **CHEE-MUN.O**: Dynamic simulation of Electric Machinery, prentice-Hal I Inc. 1998].
- [31] Martin. J, Slobodan. N V, Drazen. D, Emil. L, Wright. P, « *Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant power applications* », Electric Power Applications, IET , 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 275–287.].

[32] Chapitre I: Modélisation de l'ensemble MAS -Convertisseur Statique, Université BISKERA, 2012].

[33] Ahmed Boucherit "Conception d'un convertisseur de puissance pour véhicules électriques multisources", thèse de doctorat ,Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2011].

[34] P. Delarue, A. Bouscayrol, and B. Francois, "Control implementation of a five-leg voltage-source-inverter supplying two three-phase induction machines," in IEEE International Conference on Electric Machines and Drives 2003, IEMDC'03, Madison, USA, 1-4 June 2003]

[35] MESSAOUDI Ismail, MOHAMED MAHMOUD El Mahjoub, commande par mode glissant de deux MSAP alimenté par un seul onduleur, Université MSILA 2017].

## الملخص:

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة التحكم بنظام متعدد المحركات (في هذه المذكرة استعملنا محركين لا تزامنيين) باستعمال محول خماسي الطور. يتم التحكم بهذا المحول عن طريق تقنية تعديل عرض النبض وهو تحكم يستعمل غالبا للتحكم في المحول ثلاثي الطور. استعملنا بضع استراتيجيات للتحكم في النظام الذي يجري عليه الدراسة منها التحكم والعددي التحكم الموجه، طبقنا بالتحكم العددي في حلقة مغلقة والذي يعتمد على منظم السرعة PI وعلى ثابت التحكم  $V_s/f$ . طبقنا بالتحكم الموجه الغير مباشر الذي يعتمد بشكل أساسي على اتجاه تدفق الدوار الذي يتحكم بالمحرك اللا تزامني. استعنا ببرنامج *MATLAB* لنحاكي التجارب السابقة من أجل رؤية النتائج وكذا ابداء بعض الملاحظات.

## Résumé :

L'objectif de ce mémoire est d'étude le contrôle d'un système multi-moteur (dans ce mémoire deux machines asynchrones) par un onduleur cinq bras. L'onduleur cinq bras est commandé par la technique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI), cette technique est appliquée sur les onduleurs triphasé à deux niveaux. On a utilisé quelque technique pour commande le système on a étudié comme la commande scalaire et la commande vectorielle, on a appliqué la commande scalaire en boucle fermé qui corresponde sur la régulateur de vitesse PI et le constant de commande  $V_s/f$ . on a appliqué la commande vectorielle indirecte qui fondamentalement corresponde sur l'orientation de flux rotorique qui commande la machine asynchrone. On a utilisé logiciel *MATLAB* pour simuler des précédents expériences pour l'observation les résultats et prenez des notes.

## Mots de clés :

Onduleur cinq bras, Machine asynchrone, Multi-moteur, Commande scalaire  
Commande vectorielle, Commande MLI.

## Summary:

The goal of this work is study the control of a multi-motor system (in this work two induction machine) by a five-leg inverter. The five-leg inverter is ordered by the technic of pulse width modulation (PWM). We used some technic for control the system that we study like scalar control and vector control, we applied scalar control closed loop that depends on speed control PI and the control constant  $V_s/f$ . We applied indirect vector control that depends on rotor flux orientation that control the induction motor. We used *MATLAB* software for simulate previous experiences for results observation and make some notes.

