

Année universitaire : Choisissez une année



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande des machines électrique

Présenté et soutenu par :
Brarka Ahmed Radhouane

Le : mercredi 1er janvier 2025

Optimisation des paramètres d'un régulateur PI par la méthode PSO pour une commande vectorielle d'une machine asynchrone

Jury :

Dr.	Megherbi Ahmed Chaouki	Pr	UNIVERSITE DE BISKRA	Examineur
Dr.	Anouar BOUKHLOUF	MCB	UNIVERSITE DE BISKRA	Président
Dr.	DENDOUGA Abdelhakim	Pr	UNIVERSITE DE BISKRA	Rapporteur

Année universitaire : 2024 - 2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Commande des machineeélectrique

Réf. : Entrez la référence du document

Optimisation des paramètres d'un régulateur PI par la méthode PSO pour une commande vectorielle d'une machine asynchrone

Le : 2025

Présenté par :Brarka Ahmed RadhouaneAvis favorable de l'encadreur :**Pr.
DENDOUGA Abdelhakim**

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

DEDICASE

*Je dédie cet humble et modeste travail
avec grand amour, sincérité et fierté:*

*A mes chers parents, source de tendresse,
de noblesse et d'affectation. Puisse cette
étape constituer pour vous un motif de
satisfaction.*

*A mon frère et mes sœurs, en témoignage
de la fraternité, avec mes souhaits de
bonheur, de santé et de succès.*

Et à tous les membres de Ma famille.

*A tous mes amis, tous mes camarades, et
collègues tous mes professeurs Et à tout
qui compulse ce modeste travail.*

Brarka Ahmed Radhouane



Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir accordé le souffle de vie et donné le courage, la patience et la force de poursuivre mes études.

Je remercie mes parents de m'avoir accompagné dans mes études.

Mes vifs et sincères remerciements à Mon directeur de mémoire **Pr. DENDOUGA Abdelhakim**. Vous m'avez bien guidé dans ce travail de recherche, me donnant inlassablement beaucoup de votre temps, votre enthousiasme à partager vos connaissances tout comme votre sens chaleureux du contact resteront à jamais gravé dans ma mémoire.

SOYEZ assurée de ma plus sincère gratitude et de mon profond respect.

Aux membres de jury : Vous me faite un grand honneur en acceptant de juger ce modeste travail ; je vous en remercie et vous témoigne ma profonde et respectueuse gratitude. A tous les professeurs qui ont participés dans mon cursus et surtout à l'ensemble des enseignant du département d'Electrotechnique pour la qualité des cours qu'ils nous ont prodigués, et qui m'ont ont servi pour accomplir ce travail, je vous remercie et je vous témoigne mes sentiments les plus déferents



ملخص:

تهدف هذه المذكرة إلى تحسين أداء التحكم في الآلة غير المتزامنة باستخدام التحكم الشعاعي المباشر الذي يُمكن من فصل التحكم بين التدفق والعزم، مما يجعل سلوك الآلة شبيهًا بسلوك محرك التيار المستمر إلا أن أداء هذا المنظم يعتمد بشكل كبير على اختيار قيم المنظم لذلك، تم اعتماد خوارزمية (تحسين سرب الجسيمات PSO) لإيجاد القيم المثلى لهذه المعاملات

أظهرت المحاكاة عبر برنامج (matlab/Simulink) الطريقة المقترحة تؤدي إلى تحسين واضح في استجابة النظام، من حيث تقليل التجاوز، وتحقيق الاستقرار بسرعة، وتحسين تتبع السرعة والعزم، مقارنةً بالطريقة التقليدية

الكلمات المفتاحية:

تحسين الأداء PSO، خوارزمية PI الآلة غير المتزامنة، الشعاعي المباشر، منظم

Abstract:

This thesis pertains to the optimization of the PI controller parameters in the vector control of an induction motor. This type of motor is common in industries owing to its low-cost mechanical construction. However, the control of this type of motor is quite complicated due to its non-linear characteristics. Vector control provides a good method of control as it separates the control of flux and torque. Nevertheless, the efficacy of this approach is largely confined to how well the gains of the PI controller are set.

With the objective of automating the process, we made use of the Particle Swarm Optimization algorithm (PSO) based on bird flocking. The algorithm performs optimization of the K_p and K_i values by minimizing an objective function such as the ITAE. A model was developed in Simulink/MATLAB to prove the effectiveness of the proposed model. The model demonstrated that the dynamic response of the motor improved in speed, stability, and tracking accuracy.

Keywords: Induction motor, vector control, PI controller, optimization, PSO, Simulink

Remerciement	I
Résumé	II
Abstract	III
Sommaire	IV
liste des figures	VII
	I

Chapitre I : Mmodélisation d'un Machine Asynchrones

Introduction general.....	1
I.1.généralitéssurmachine asynchronies.....	2
I.1.1.Historique.....	2
I.1.2.Définition	2
I.1.3. Constitution.....	3
I.1.4. fonctionnement du MAS	6
I.1.5. Les avantages et les inconvenient.....	8
I.1.6. Bilant de puissance.....	8
I.1.7. Rendement du moteur.....	10
I.2. Simulation d'un moteur asynchrone alimenté en tension.....	10
I.2. 1.Schéma vectoriel de la machine asynchrone.....	10
I.2. 1.1Expressions du couple.....	11
I.2. 1.2Equations de Park.....	11
I.2. 2.La simulation de MAS sur simulink.....	12
I.2. 3.La simulation et les Resultats.....	12

I.2.4.Interpretation.....	15
I.3 Conclusion.....	16
Chapitre II: commande vectorielle direct en tension	
II. 1/La commande vectorielle direct en tension de MAS.....	17
II. 2/Fonctionnement de commande vectorielle.....	18
II. 3/Modèle de la machine.....	18
II. 4/Commande vectorielle direct.....	18
II. 4-1/Méthodedirect.....	19
II. 4.2. /Le decouplage.....	19
II. 5/Les regulateur.....	21
II. 5.1/Régulateur du courant (Ids).....	21
II. 5.2/Régulateur de vitesse.....	22
II. 5.3/Régulateurs de flux.....	23
II. 6/Command vectorielle directd'une MAS.....	24
II. 6.1/Schéma Simulink.....	24
II.7/Résultats.....	25
II.7.1/Interpretation.....	28
II.8/Conclusion.....	29

Chapitre 3 : optimisation des paramètres de régulateur PI par

PSO	30
III. 1/Définition de l'optimisation.....	30
III. 2/Présentation de l'Algorithme PSO –‘Particule Swarm Optimisation’	31
III. 3/Principe du PSO.....	31
III. 3.1/Conception de PSO.....	31
III.3.2/technique de PSO.....	31
III. 4/Formalisation de l'algorithme PSO.....	32
III. 5/Configuration de la method.....	33
III. 5.1/Topologie du voisinage.....	33
III. 5.2/Les coefficients de confiance.....	34
III.5.3/Vitesse maximal et coefficient de resserrement.....	34
III. 5.4/Facteur d'inertie.....	35
III. 5.5/Initialisation de l'essaim.....	36
III. 5.6/Critères d'arrêt.....	36
III. 6/Synthèse de l'algorithme PSO.....	36
III.7/Organigramme de fonctionnement de PSO.....	37
III.8/Application de l'optimisation.....	37
III.9.Resultats avec des paramètres optimises par PSO.....	38
III.10.Les avantages et les inconvénients.....	42

SOMMAIRE

III. 10/Interpretation.....	43
11/Conclusion.....	43
Conclusion general.....	44
REFERENCE BIBLIOGRAPHIR	50

➤ **Liste des figures**

Figure 1 : Machine asynchrone	03
FigureI. 2 : Construction d'un stator	04
FigureI. 3 : construction d'un Rotor	05
Figure I.4 : orientation de flux	07
Figure I.5 : tableau représente nombres de pair de pôles et la vitesse	07
FigureI.6 : bilan de puissance	09
Figure I.7 : schéma bloc de MAS sue Simulink	12
Figure I.9 :vitesse (rad/s)	12
Figure I.10 :Couple electromagnetique(N.m)	13
Figure I.11 : $\text{flux}\phi_{rd}$ (wb)	13
Figure I.12 : $\text{flux}\phi_{rq}$ (wb)	14
Figure I.13 : Courantisd(A)	14
Figure I.14 : Courantisq(A)	15
Figure II.1 : boucle de découplage	20
FigureII.2 : méthode de découplage	21
Figure II.3 : Boucle de régulateur de courant	22
Figure II.4.:Boucle de régulateur de vitesse	23
Figure II. 5 : Boucle de régulateur de flux	23
Figure II.6 : simulation de commande vectorielle de MAS	25
Figure II.7:Vitesse (rad/s)	25
Figure II.8: Couple électromagnétique (N.m)	26
Figure II.9: $\text{flux}\phi_{rd}$ (wb)	26
Figure II 10 : $\text{flux}\phi_{rq}$ (wb)	27
Figure II.11 : courantisd(A)	27
Figure II.12 : Courant isq(A)	28
FigureIII.1 : Déplacement d'une particule	32
Figure III.2 : les trois types de topologie du voisinage : (a) anneau	34

(avec $n=2$), (b) rayon et (c) étoile

Figure III. 3 : Organigramme de fonctionnement de PSO	37
Figure III. 4 : comparaison entre pso et methode standard	37
Figure III. 5 : développement de fonction objective par itérations	38
Figure III.6: La vitesse	39
Figure III. 7 : courant isd	39
Figure III. 8 : courant isq	40
Figure III.9 : flux ϕ_{rd}	40
Figure III.10 : couple électromagnétique	41
figure III.11 : flux ϕ_{rq}	41
Figure III.12 : courant isa	42

➤ **Notation et Symboles :**

s, r : Indice relatif au stator et rotor respectivement

d : Indice de l'axe direct

q : Indice de l'axe en quadrature

(d, q) : Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.

$[V_s]$: Vecteur de tension de stator

$[I_s]$: Vecteur de courant de stator

$[I_R]$: Vecteur de courant de rotor

$[\varphi_s]$: Vecteur de flux de stator

$[\varphi_R]$: Vecteur de flux de rotor

$[R_s]$: Matrice résistance de stator

$[R_L]$: Matrice résistance de rotor

$[P(\theta)]$: Matrice de Park

P : Nombre de paires de pôles

θ_s : L'angle entre l'axe d'une phase de stator et l'axe d

θ_s : L'angle entre l'axe d'une phase de rotor et l'axe q

ω_s : Pulsation électrique stator

ω_g : Pulsation de glissement

Ω : Vitesse angulaire de rotation

f_s : Fréquence de la vitesse statorique

f_r : Fréquence de la vitesse rotorique.

G: Glissement

Ce: Couple électromagnétique

La machine asynchrone est l'une des plus utilisées dans l'industrie en raison de sa construction robuste, peu coûteuse et facile à entretenir. Cependant, pour obtenir des performances rapides, cohérentes et précises, les commandes de réactivité nécessitent une agilité qui est intrinsèquement complexe en raison de la nature multi-variable et non linéaire de la machine asynchrone. Pour faire face à ces limitations, une technique puissante connue sous le nom de contrôle vectoriel a émergé, permettant la déconnexion du contrôle de flux et de couple, similaire à ce qui est fait dans une machine à courant continu.

Le système de commande repose fortement sur les contrôleurs PI (Proportionnel-Intégral) qui ont la responsabilité principale de suivre les points de consigne de courant ou de vitesse. Cependant, les performances globales du système dépendent de la sélection correcte des gains K_p et K_i . Un mauvais réglage peut entraîner un comportement lent, oscillatoire et même instable. Il ne fait donc aucun doute sur la nécessité de méthodes fiables pour optimiser ces paramètres du système.

À cet égard, au-delà de l'utilisation des méthodes de réglage conventionnelles, les algorithmes d'optimisation méta heuristiques comme l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO ou OEP) offrent une solution prometteuse. En comparaison avec le comportement collectif des oiseaux et des poissons, le PSO est efficace pour chercher des gains optimaux d'un contrôleur PI où les mesures de performance (telles que l'intégrale de l'erreur) doivent être réduites.

Chapitre I

Modélisation d'un Machine

Asynchrones

I.1.généralités sur machine asynchrones :

I.1.1.Historique :

Le dix-neuvième siècle a été une période marquante de grandes avancées en électrotechnique, avec l'établissement des principes fondamentaux entre 1820 et 1830 par des scientifiques comme OERSTED, AMPERE, BIOT, SAVART, LAPLACE, OHM et FARADAY. Plus tard, en 1873, MAXWELL a systématisé les lois de l'électromagnétisme moderne dans son livre : « Traité sur l'électricité et le magnétisme ». [3]

L'électrotechnique industrielle ne commence à prendre son essor qu'à partir de 1870, en particulier grâce à la génération d'énergie électrique via les moteurs à courant continu (dynamos) de Gramme et Siemens. Puis, à la fin de cours de 17eme ciecle, les alternateurs et transformateurs multi phases ont été élaborés. Les premiers efforts étaient destinés à rivaliser et à remplacer les dynamos dans la production d'électricité. Par ailleurs, les études de Y. TESLA et du ferrarien italien ont contribué à l'achèvement des systèmes polyphasés à courant alternatif grâce à l'élaboration et à la réalisation de machines d'induction ou asynchrones en 1888(1).

Le but principal de ce type de moteur, c'est de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique ; ils sont généralement utilisés dans les procédés industriels. L'étude de ces machines acquit donc une importance considérable.

I.1.2.Définition :

Une moteur a induction désigne une machine à courant alternatif où la vitesse du rotor n'est pas identique à celle du champ magnétique tournant. Le rotor accuse toujours un décalage temporel par rapport à la vitesse du champ magnétique statorique.

Le rôle de la moteur asynchrone est de TRANSFORMER l'énergie électrique provenant du courant alternatif en énergie mécanique de rotation. [2]

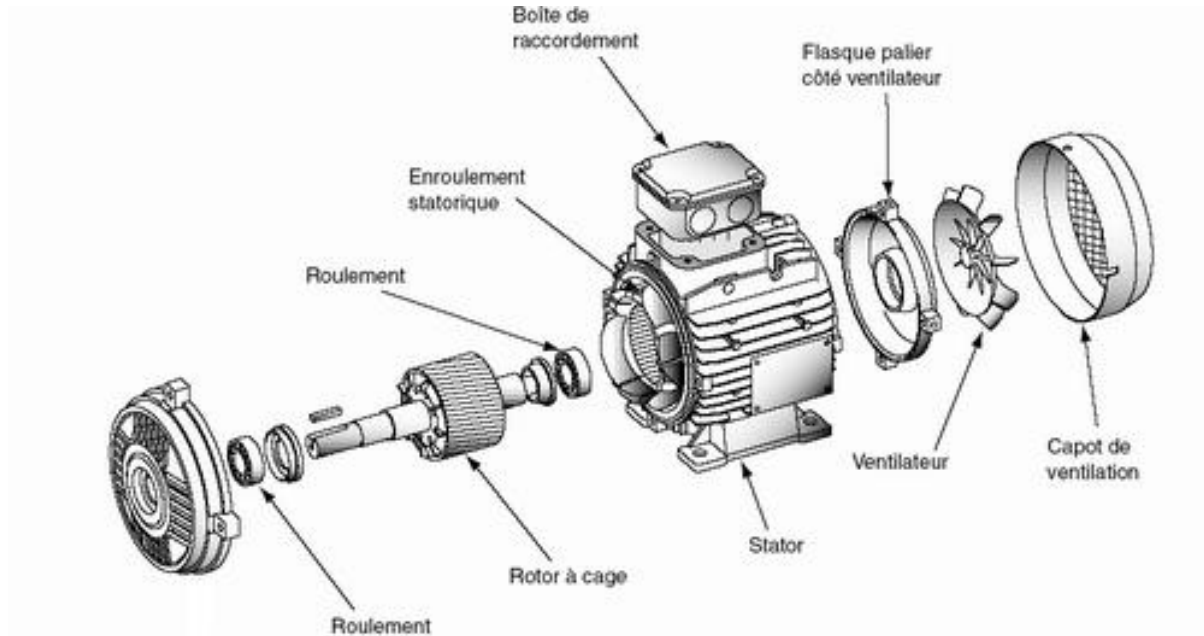


Figure I. 1 : construction de Machine asynchrone [2]

I.1.3. Constitution:

- STATOR:

Le stator contient un noyau en fer stratifié pour orienter le champ magnétique, ainsi que les bobinages des trois phases qui remplissent les cavités du milieu.



Figure I. 2 : Construction d'un stator

L'intérieur du stator comprend :

Dans un moteur triphasé, il est indispensable d'avoir au moins trois enroulements, qui doivent être placés de manière décalée à 120 degrés. Quand un courant triphasé traverse les bobinages du stator, ils génèrent un champ magnétique qui tourne à la vitesse de synchronisme. La fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et le nombre de paires de pôles déterminent la vitesse de synchronisme. quand la fréquence est constante, la vitesse de rotation du champ magnétique tournant du machinene peut changer qu'en fonction du nombre de paires de pôles. [3]

paires des pôles	1	2	3	4	6
Nombre de pole	2	4	6	8	12
Vitesse nominal	3000	1500	1000	750	500

Figure I.3 : tableau représentes nombres de pair de pôles et sa vitesse nominal

-ROTOR :

Le rotor constitue l'élément en mouvement du moteur asynchrone.

Mécaniquement couplé, il va engendrer un couple moteur capable d'effectuer le mouvement. Il est constitué de:

- Un assemblage de disques minces séparés les uns des autres et fixés sur le rotor pour diriger et simplifier le flux magnétique.
- il existe une cage en aluminium moulé dont les barreaux ont une forme trapézoïdale, et qui est fermée de chaque côté par deux « flasques » conductrices. [3]

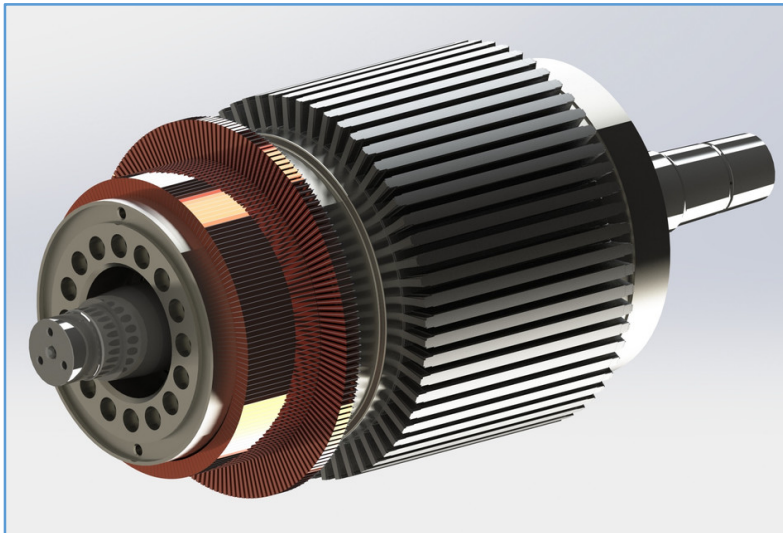


Figure I. 4 : construction d'un Rotor

- Les flasques :

Ils ferment le carter moteur aux deux extrémités et sont réalisés en fonte grise ou en aluminium injecté. Les flasques sont centrés sur le carter et réunis entre eux par des tirants ou tiges d'assemblage [3]

- La plaque à bornes :

Située sur le châssis, elle possède un groupe de 6 bornes qui facilitent la connexion des bobines statoriques à l'alimentation électrique en réalisant le couplage[10].

L'arbre du rotor :

Un arbre en acier supporte le rotor. À une extrémité se trouve le ventilateur et éventuellement le frein, tandis qu'à l'autre extrémité, on a l'arbre de sortie avec une gorge de clavetage pour l'installation du pignon d'entraînement

- Le ventilateur :

Positionné à l'arrière du moteur, il facilite le refroidissement de ce dernier. Le capot dirige le courant d'air vers les ailettes du carter

- Les roulements:

Sur le moteur proposé, l'arbre est guidé en rotation par deux roulements à billes intégrés dans les flasques

I.1.4. fonctionnement de MAS:

Comment fonction la MAS :

- D'un côté, il s'agit de la génération d'un courant électrique induit dans un conducteur soumis à un champ magnétique en rotation. Le conducteur mentionné est l'un des segments de la cage d'écureuil visible en bas qui constitue le rotor du machine a induction.

La génération de courant n'est possible que si le conducteur présente un court-circuit [2].

- Par ailleurs, en ce qui concerne la génération d'une force motrice sur le conducteur examiné (traversé par un courant et positionné dans un champ magnétique en rotation ou changeant),

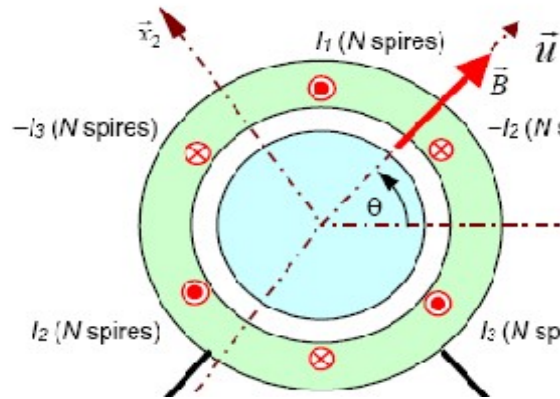


Figure I.5 : orientation de flux

➤ Glissement

Dans des conditions d'opération normales, le rotor de moteura induction tourne à une vitesse Ω mesurée en radians par seconde. Parallèlement, la force magnétomotrice générée par les courants du stator tourne à la vitesse synchronisée, exprimée également en rad/s par seconde. Cependant, il est courant que la vitesse Ω soit inférieure à Ω_s . où :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} = \frac{2\pi f_s}{P} [\text{rad/s}] \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$$\omega_s = \omega_r + \omega \quad (\text{I.2})$$

ω_s : Pulsation statorique

P : Nombre de paire de pôle

f_s : Fréquence de la vitesse statorique.

➤ Vitesse

Fréquence (Vitesse) de synchronisme n'egalé pas la fréquence du champ tournant :

$$ns = \frac{fs}{P} \text{ Avec : } \begin{cases} ns: \text{ vitesse desynchronisme} & (tr/min) \\ fs: \text{ frequence du courant d'alimentation} & (HZ) \\ P: \text{ nombre de paires de poles} \end{cases} \quad (I.3)$$

➤ Le Couple Du Machine Asynchrone :

Le couple développé par le moteur est donné par :

$$C_{em} = \frac{P_m}{\omega} [N \cdot m] \quad (I.4)$$

I.1.5. Les avantages et les inconvénients :

➤ **Avantage:**

Ilya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone comme :

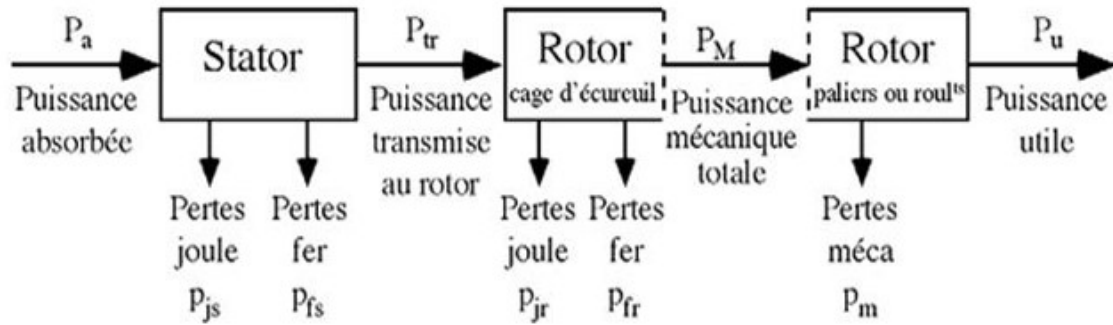
- Coût de fabrication et d'achat inférieur aux moteurs synchrones ou à courant continu.
- Conception simple et robuste, nécessitant peu de maintenance.
- Grande durabilité, adaptée aux environnements poussiéreux ou humides
- Démarrage autonome sans équipements supplémentaires.
- Bon rendement énergétique à charge nominale.
- Contrôle de vitesse efficace grâce aux variateurs de fréquence modernes.

Inconvénients :

Permis les inconvénients de la machine asynchrone :

- Couple de démarrage généralement plus faible que MCC et moteur synchrone
- Moins efficaces à faible charge, ce qui peut entraîner des pertes d'énergie.
- Systèmes de contrôle plus complexes
- Pas de possibilité d'affaiblissement du champ magnétique, ce qui limite les performances à haute vitesse. [4]

I.1.6. Bilant de puissance



FigureI.6 : bilan de puissance

La machine absorbe au réseau la puissance :

$$P_a = \sqrt{3}VI \cos \theta \quad (I.5)$$

V : Tension simple.

U : Tension compose

I : Courant

θ : Coefficient caractéristique du matériau

Le rotor exploite cette énergie pour deux objectifs : une part est perdue par l'effet Joule dans les bobinages du rotor (résistance interne si elle n'est pas en court-circuit), tandis que l'autre portion se transforme en puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre de machine [4]:

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} - P_{fs}) \quad (I.6)$$

Le rotor exploite cette énergie pour deux objectifs : une portion est perdue à travers l'effet Joule.

dans les enroulements du rotor (résistance propre rhéostat extérieur si celui-ci n'est pas en court-circuit), l'autre partie se trouve en puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre de moteur

I.1.7. Rendement du moteur

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par, d'où :

$$\eta = P_u / P_{abs}$$

η) : Rendement du moteur [sans unités]

P_u : La puissance utile en watts [W]

P : La puissance absorbée en watts [W]

I.2. Schéma de simulation d'une machine asynchrone alimentée en tension.

I.2. 1. Schéma vectoriel de la machine asynchrone

Les équations des tensions dans les différents référentiels

On peut écrire les équations de tension statorique et rotorique exprimées dans les différents repères, en représentation vectorielle telles que :

L'expression des tensions dans le référentiel (S), lié au stator :

$$\begin{cases} \bar{V}_{S(S)} = R_S \bar{I}_{S(S)} + \frac{d\bar{\varphi}_{S(S)}}{dt} \\ \bar{V}_{R(S)} = 0 = R_R \bar{I}_{R(S)} + \frac{d\bar{\varphi}_{R(S)}}{dt} - j\omega \bar{\varphi}_{R(S)} \end{cases} \quad (I.7)$$

L'expression des tensions dans le référentiel (R), lié au rotor :

$$\begin{cases} \bar{V}_{S(R)} = R_S \bar{I}_{S(R)} + \frac{d\bar{\varphi}_{S(R)}}{dt} + j\omega \bar{\varphi}_{S(R)} \\ \bar{V}_{R(R)} = 0 = R_R \bar{I}_{R(R)} + \frac{d\bar{\varphi}_{R(R)}}{dt} \end{cases} \quad (I.8)$$

L'expression des tensions dans le référentiel (T), lié au champ tournant :

$$\begin{cases} \bar{V}_{S(T)} = R_S \bar{I}_{S(T)} + \frac{d\bar{\varphi}_{S(T)}}{dt} + j\omega_s \bar{\varphi}_{S(T)} \\ \bar{V}_{R(T)} = \bar{0} = R_R \bar{I}_{R(T)} + \frac{d\bar{\varphi}_{R(T)}}{dt} + j\omega_r \bar{\varphi}_{R(T)} \end{cases} \quad (I.9)$$

Avec

$$\omega s = \omega r + \omega (1.10)$$

I.2. 1.1 Expressions du couple

$$\begin{cases} C_e = p L_m \text{Im} [\bar{I}_s \bar{I}_r^*] \\ C_e = p \text{Im} [\bar{I}_s \bar{\varphi}_s^*] \\ C_e = p \frac{L_m}{L_r} \text{Im} [\bar{I}_s \bar{\varphi}_r^*] \\ C_e = p \frac{L_m}{L_s L_r} \text{Im} [\bar{\varphi}_s \bar{\varphi}_r^*] \end{cases} \quad (I.11)$$

I.2. 1.2 Equations de Park

Pour dériver les équations de Park, on effectue la projection des équations du modèle vectoriel sur le cadre de référence tournant (T) sur les deux axes (d,q) pour chaque vecteur x, tel que

$$\bar{x}_{(1)} = x_d + j x_q \quad (I.12)$$

On aura les équations de Park de la machine asynchrone suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ 0 = V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ 0 = V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (I.13)$$

- Expressions des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (I.14)$$

- Expression du couple :

$$C_e = p \frac{L_m}{L_r} [I_{sq} \phi_{rd} - I_{sd} \phi_{rq}] \quad (I.15)$$

I.2. 3.La simulation de MAS sur simulink

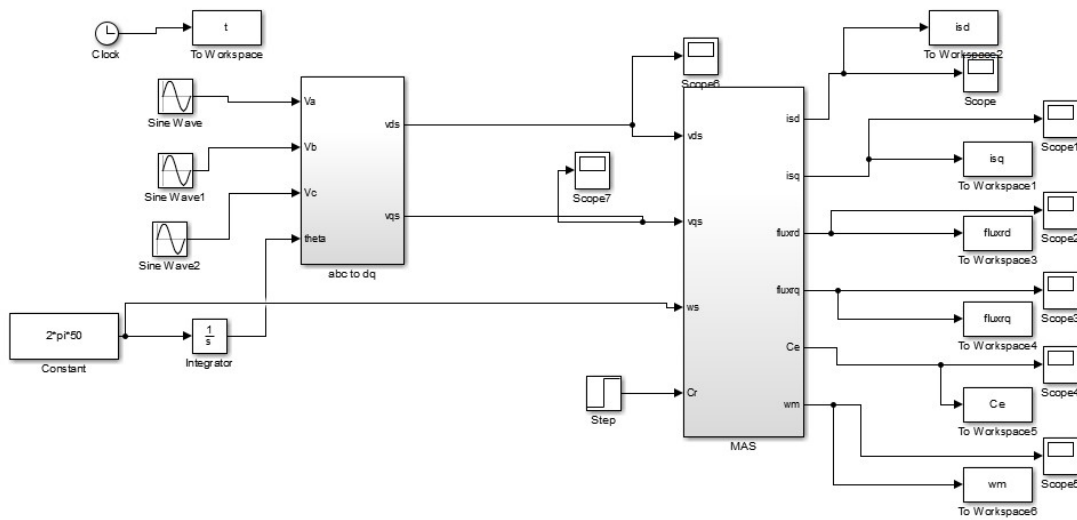


Figure I.7 : Schéma bloc de MAS sur Simulink

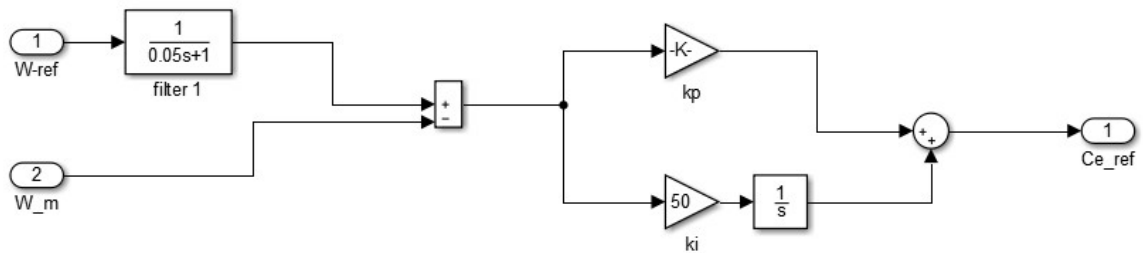


Figure I.8 : Schéma bloc de régulateur PI

I.2. 4.Résultats de simulation

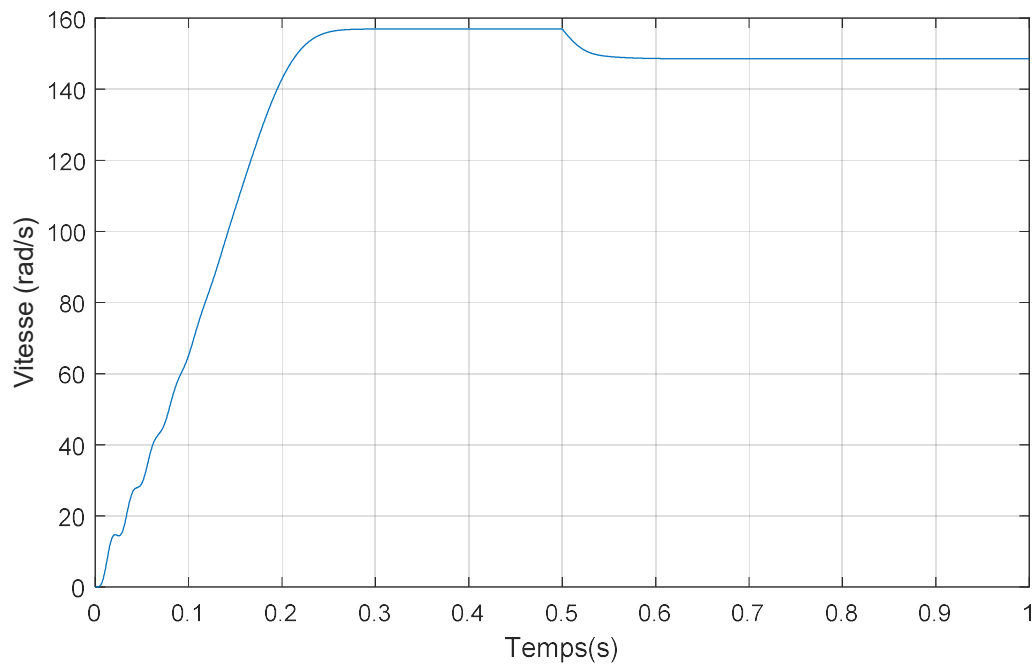


Figure I.9 : Vitesse (rad/s)

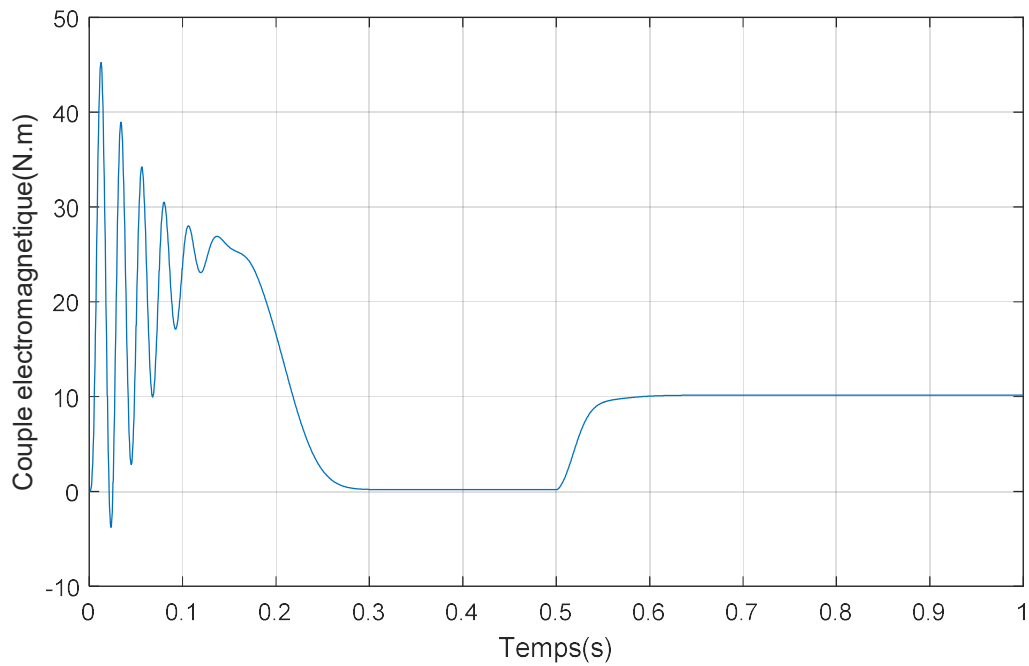


Figure I.10 : Couple electromagnetique(N.m)

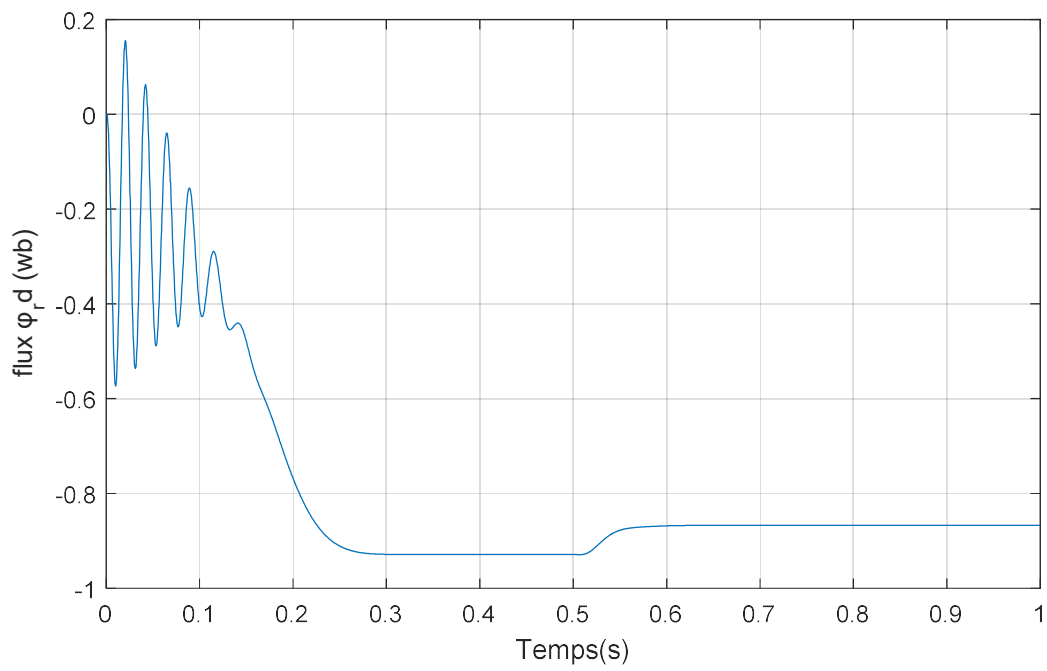


Figure I.11:flux ϕ_{rd} (wb)

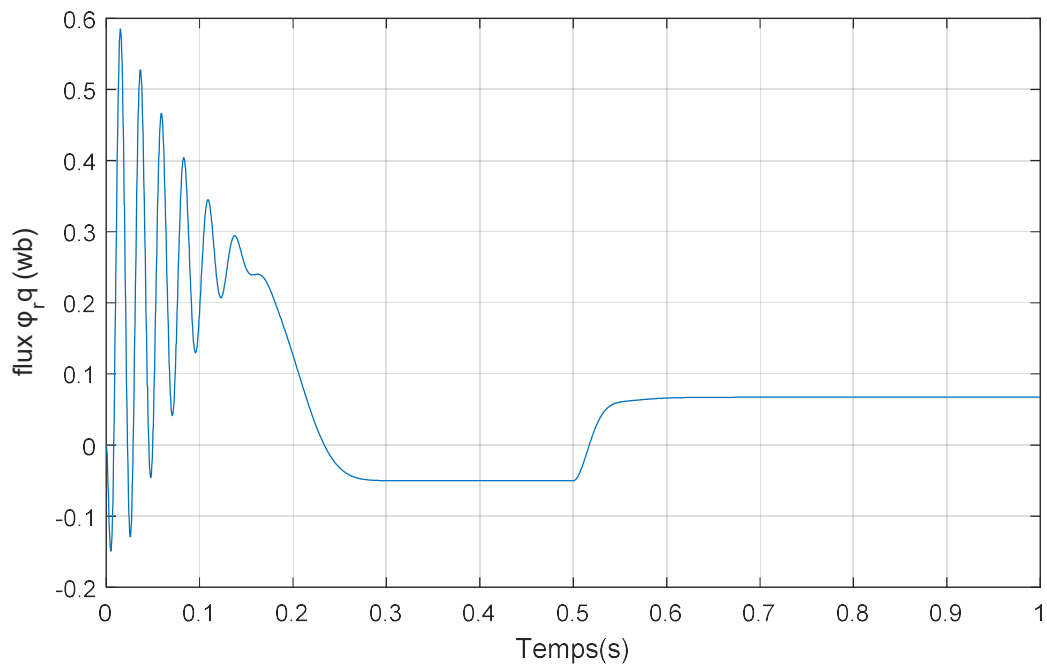


Figure I.12 :flux ϕ_{rq} (wb)

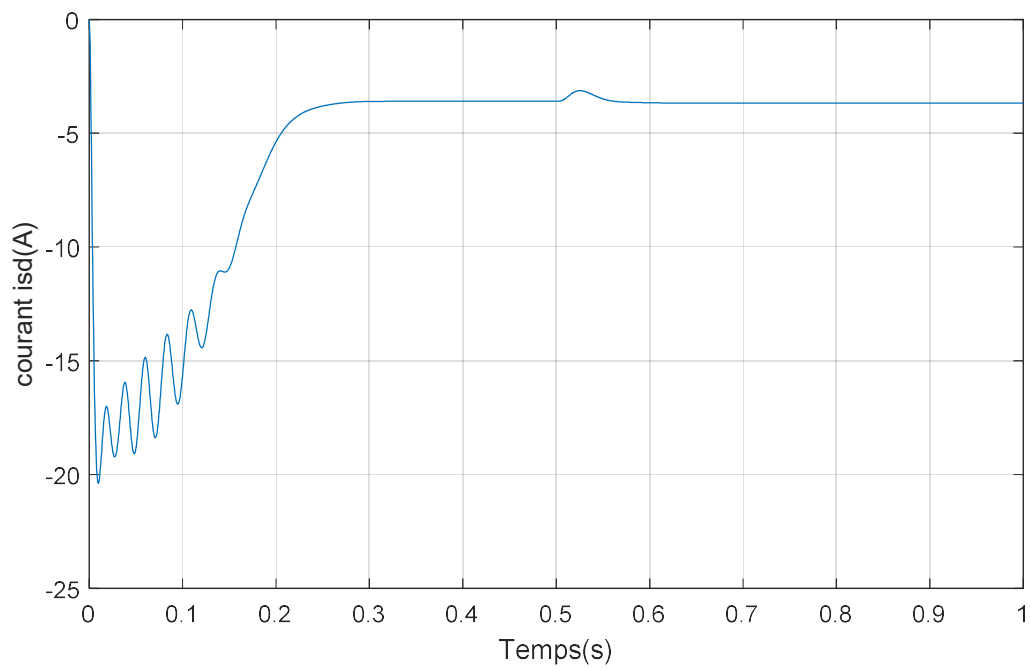


Figure I.13 : Courant isd

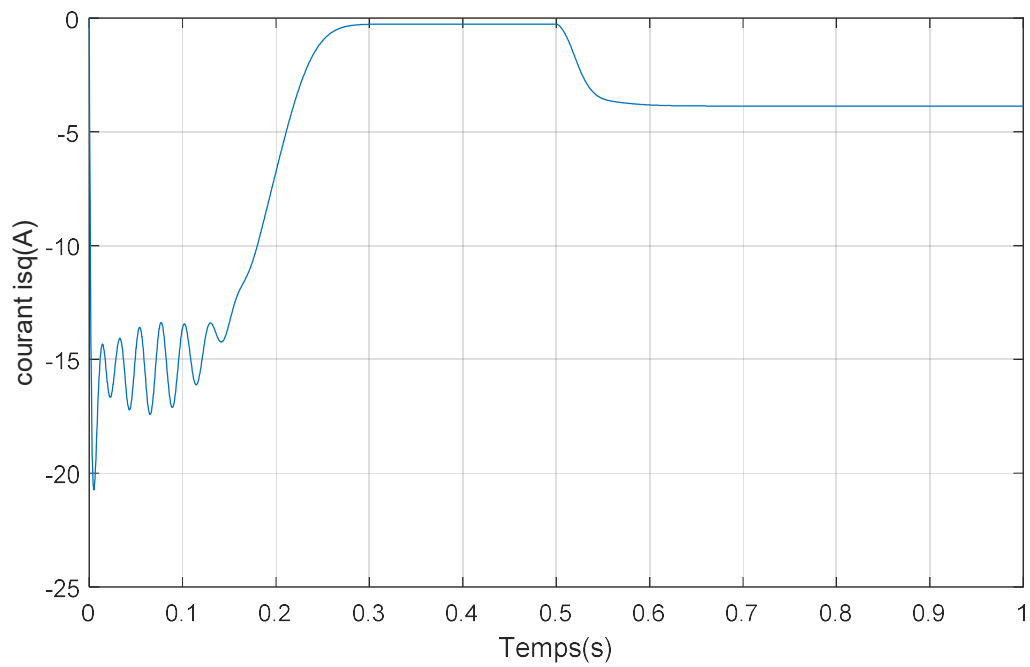


Figure I.14 : Courant isq

I.2.4.Interpretation

Le modèle de la machine asynchrone a été simulé dans le référentiel (d,q), associé au champ tournant, afin de bénéficier du découplage naturel entre les composantes du flux et du couple. Lors de la phase de démarrage, sans charge appliquée, la machine atteint une vitesse asynchrone de 148 rad/s, sans aucun dépassement, et se stabilise en régime permanent à environ 0,25 seconde. Ce comportement traduit une bonne réponse dynamique et une stabilité satisfaisante du système. À l'instant $t = 0,5$ s, un couple de charge de 10 N·m est appliqué, provoquant une chute momentanée de la vitesse en dessous de sa valeur nominale. Cette perturbation est rapidement compensée grâce à l'action du régulateur PI, permettant à la vitesse de retrouver progressivement sa valeur de consigne. Parallèlement, le couple électromagnétique réagit en présentant un dépassement transitoire, puis se stabilise précisément à la valeur du couple de charge

I.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit un modèle mathématique qui illustre la construction dynamique de la machine a induit. Ce modèle a été validé et testé dans diverses conditions d'opération. Ce modèle est utilisé pour examiner et établir les diverses fonctions des commandes. Les résultats sont concluants et illustrent le comportement typique de la machine asynchrone.

Chapitre II

Commande Vectorielle

direct en tension

II. 1/La commande vectorielledirect en tension :

Le but de cette methode est d'atteindre des performances comparables à celles de la commande d'un moteur à courant continu avec excitation séparée.

Effectivement, dans cette dernière, le découplage entre le flux et le couple s'effectue de manière naturelle.

Pour obtenir des conditions d'opération ressemblant à celles de lamoteur à courant continu, un système de contrôle externe à la MAS est nécessaire. Ce système effectuera une séparation du flux et du couple, évitant ainsi l'interaction entre les transitoires du flux et ceux du couple. On peut le faire grâce à la commande orientée champ (en anglais, Field Oriented Control).[10]

II. 2/Principe de fonctionnement :

Le principe de la commande par orientation de flux (foc : Field Oriented Control) ou la commande vectorielle est basé sur l'alignement du vecteur de référence en coordonnées dynamiques (d-q) avec l'un des vecteurs de flux possibles de la machine à induction :

•Le flux rotorique : $\varphi_{rd} = \varphi_r$; $\varphi_{rq} = 0$

•Le flux statorique, $\varphi_{sq} = 0$; $\varphi_{sd} = \varphi_s$

•Le flux dans l'entrefer $\varphi_{rg} = 0$; $\varphi_{rg} = \varphi_g$

Ces techniques assurent de bonnes performances en fournissant un contrôle autonome du couple et du débit. [6]

Dans une commande par orientation de flux rotorique ou vectorielle le réglage des courants isd1 et isd2 permis de magnétiser la machine tant que la régulation des courants isq1 et isq2 assure le contrôle du couple [8]

II. 3/Modèle de la machine

L'équation de tension statorique :

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{R}_s \times \mathbf{I}_s \times \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Les équations des tensions rotoriques :

$$\varphi_{dr} = \text{cst}; \varphi_{qr} = 0 \quad (\text{II.2})$$

$$\varphi_{dr} = \mathbf{L}_r \times \mathbf{I}_{dr} + \mathbf{M} \mathbf{I}_{ds}$$

donc

$$\varphi_{qr} = 0 = L_r \times I_{qr} + M I_{qs}; I_{qr} = -\frac{M I_{qs}}{L_r}$$

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r \times I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} &= R_r \times I_{qr} + W_r \varphi_{dr} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

$$V_{ds} = R_s \times I_{ds} + \delta \frac{dI_{ds}}{dt} - W_s \delta \times I_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s \times I_{qs} + \delta \frac{dI_{qs}}{dt} + W_s \delta \times I_{ds} + W_s M \varphi_{ds}$$

Et :

$$\mathbf{e}_d = -\mathbf{w}_s \delta \times \mathbf{I}_{qs}$$

$$\mathbf{e}_q = +\mathbf{w}_s \delta \times \mathbf{I}_{ds} \quad (\text{II.4})$$

$$\mathbf{e}_\varphi = +\mathbf{w}_s \mathbf{M} \varphi_{ds}$$

$$\rho_s = \frac{1}{\sigma T_r} \text{ et } T_s = \frac{L_s}{R_r}$$

$$\delta = L_s \times \frac{M^2}{L_r}$$

II. 4/Commande vectorielle direct

Cette technique requiert une compréhension de l'amplitude du flux et de sa phase. Une première option consiste à installer des capteurs de flux dans l'espace interstice et à mesurer directement les composantes ψ_r afin d'en déduire le module et la phase. Les capteurs qui sont mécaniquement délicats

sont exposés à des conditions extrêmes en raison des vibrations et de la chaleur. Les signaux recueillis sont soumis à des bruits et nécessitent l'utilisation de filtres réglables. La méthode directe offre la possibilité de déterminer la position du flux, cependant elle exige l'usage d'un moteur doté de détecteurs de flux, ce qui augmente considérablement le coût de sa fabrication et rend plus fragile son utilisation [7]

II. 4-1/Méthode directe:

Cette approche vise à établir la localisation et l'intensité du flux, indépendamment du mode de fonctionnement. Deux méthodes sont employées pour ce faire :

L'évaluation du flux dans l'espace entre les parties de la machine grâce à un capteur présente une faiblesse majeure :

1/la fragilité mécanique élevée des capteurs de flux.

2/L'évaluation du flux par le biais de techniques mathématiques. Cette technique est sensible aux fluctuations des paramètres de la machine.[7]

II. 4.2./Le découplage :

■Découplage entrée-sortie

Le but de ce découplage est de minimiser autant que possible l'impact d'une entrée sur une seule sortie. Dans ce scénario, nous tentons de représenter le processus à travers un groupe de systèmes univariés qui évoluent en parallèle. Les commandes sont donc non interactives.[11]

Parmi les méthodes de découplage on a :

■ Découplage par compensation:

Ce découplage permet surtout d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et facile, de définir ainsi deux nouvelles variables de commande V_{sd1} et V_{sq1} :

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd1} - e_{sd} \\ V_{sq} = V_{sq1} - e_{sq} \end{cases}$$

Avec
$$\begin{cases} e_{sd} = -W_s \sigma L_s I_{sq} - R_r \frac{M}{L_r^2} \phi_r \\ e_{sq} = W_s \sigma L_s + R_r \frac{M}{L_r} \phi_r W_r \end{cases} \quad (II.5)$$

Les tensions V_{sd1} et V_{sq1} vont reconstruire les tensions V_{sd} et V_{sq}

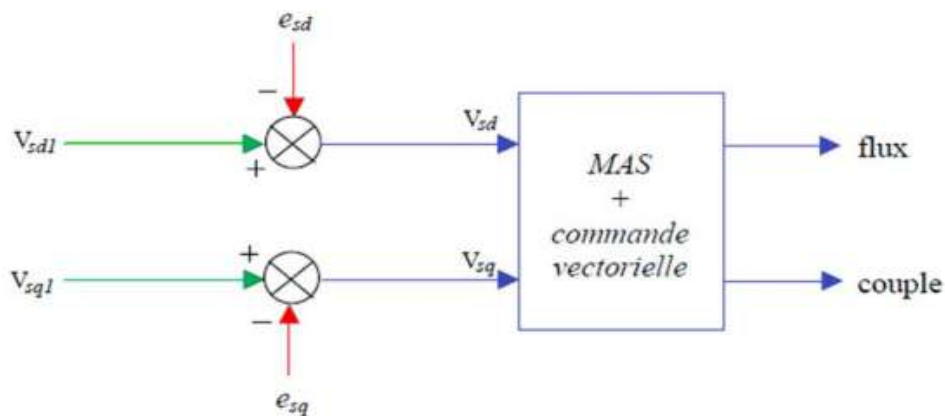


Figure II.1 : boucle de découplage

Nous définissons ainsi un nouveau système :

$$\begin{cases} V_{sd1} = \sigma L_s \frac{dsd}{dt} + \left(R_s + \frac{L_s^2}{L_r^2} \right) I_{sd} \\ V_{sq1} = \sigma L_s \frac{dsq}{dt} + \left(R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} \right) I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

A partir de là, Les actions sur les axes (d, q) sont donc découplées. En faisant apparaître de manière explicite le flux et le couple, nous obtenons :

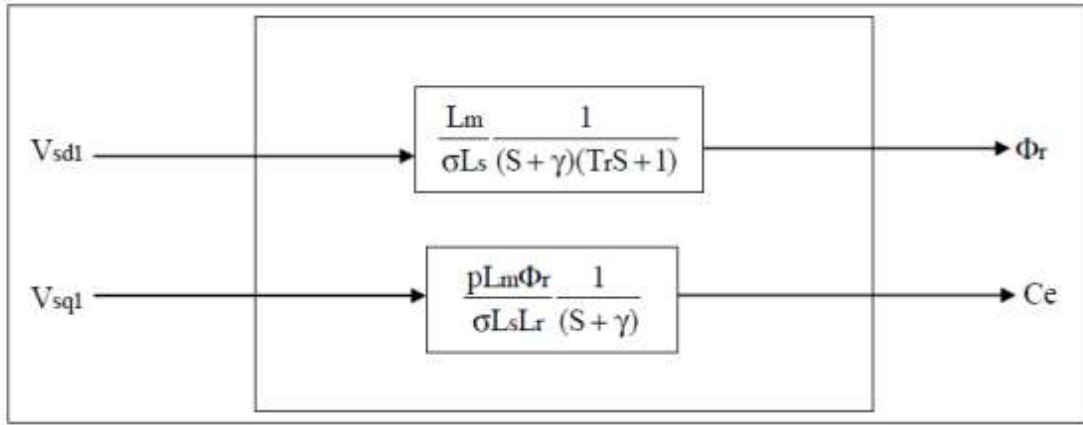


Figure II.2 : méthode de découplage

$$\text{Avec : } \gamma = \frac{R_s + R_r \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2}{\sigma L_s} \quad (\text{II.7})$$

II. 5/Les régulateur

II. 5.1/Régulateur du courant (Ids)

Le régulateur du courant direct fournit la tension r Vds nécessaire pour maintenir le flux à sa valeur de référence.

La fonction de transfert $\frac{I_{ds}}{V'_{ds}}$ est donnée par :

$$\frac{I_{ds}}{V'_{ds}} = \frac{(1/\sigma L_s)}{s + \rho_s} \quad (\text{II.8})$$

$$\rho_s = \frac{1}{\sigma T_r} \text{ et } T_s = \frac{L_s}{R_r} \quad (\text{II.9})$$

Donc on a la boucle représente sous déçu :

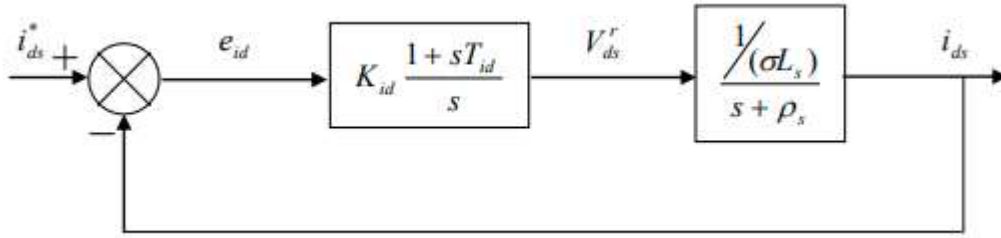


Figure II.3 : Boucle de régulateur de courant

FTBF est donnée comme suit :

$$\frac{I_{ds}}{I_{ds}^*} = \frac{K_{id}(1+sT_{id})/(\sigma L_s)}{s^2 + s(\rho_s + K_{id}\frac{T_{id}}{\sigma L_s}) + \frac{K_{id}}{\sigma L_s}} \quad (\text{II.10})$$

. En imposant les poles:

$$S_{L,2} = -\rho \pm j\rho \quad (\text{II.11})$$

L'équation caractéristique s'écrit comme suite :

$$P(s) = s^2 + 2\rho s + 2\rho^2 \quad (\text{II.12})$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} K_{id} = 2\rho^2 L_s \sigma \\ T_{id} = \frac{2\rho - \rho_s}{2\rho^2} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

II. 5.2/Régulateur de vitesse

La chaîne de régulation de vitesse peut être représentée par le schéma fonctionnel suivant :

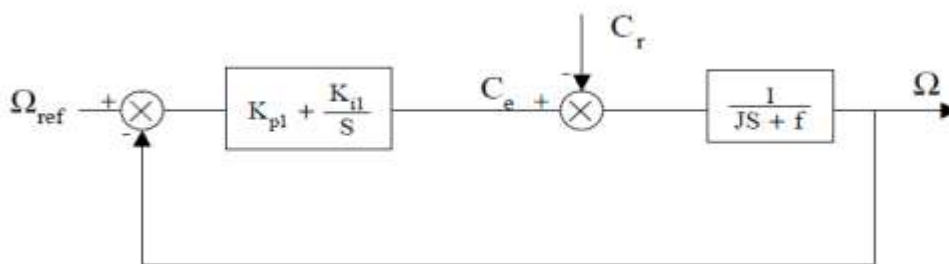


Figure II.4.:Boucle de régulateur de vitesse

Nous avons à partir du schéma fonctionnel :

$$\Omega = \frac{1}{Js+1} (C_e - C_r) \quad (\text{II.14})$$

Avec l'utilisation du régulateur PI classique, Ω s'écrit :

$$\Omega = \frac{1}{Js+1} \left(\frac{K_{p1}s+K_{i1}}{s} \right) (\Omega_{ref} - \Omega) - \frac{1}{Js+f} C_r \quad (\text{II.15})$$

La fonction de transfert en boucle fermé du schéma

$$\frac{\Omega}{\Omega_{ref}} = \frac{\frac{K_{p1}}{K_{i1}}s+1}{\frac{J}{K_{i1}}s^2 + \left(\frac{K_{p1}}{K_{i1}} + \frac{f}{K_{i1}} \right) s} \quad (\text{II.16})$$

L'identification du dénominateur à la forme canonique, donne :

$$\begin{cases} \frac{f}{K_{i1}} = \frac{1}{W_n^2} \\ \frac{K_{p1}}{K_{i1}} + \frac{f}{K_{i1}} = \tau_1 + \frac{f}{K_{i1}} = \frac{2\xi}{W_n} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

II. 5.3/Régulateurs de flux:

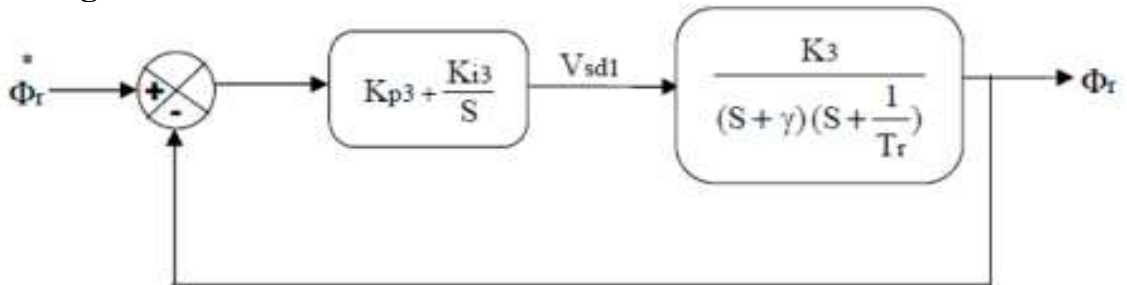


Figure II. 5 : Boucle de régulateur de flux

La boucle externe est dédiée à la régulation du flux rotatif. Pour assurer un fonctionnement optimal de l'appareil, le flux est gardé à sa valeur nominale.

On a l'équation :

$$\phi_r = \frac{K_3}{(s+r)\left(s+\frac{1}{T_r}\right)} V_{sd1} \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Avec : } K_3 = \frac{L_m}{\sigma L_s T_r}$$

La fonction du transfert du système en boucle fermé est donnée par :

$$\frac{1}{K_{p3}K_3} s^2 + \frac{\gamma}{K_{p3}K_3} s + 1 = 0 \quad (\text{II.19})$$

Avec la comparaison par rapport à la forme canonique du 2^{ème} ordre nous obtenant alors :

$$\begin{cases} \frac{1}{K_{p3}K_3} = \frac{1}{W_n^2} \\ \frac{\gamma}{K_{p3}K_3} = \frac{2\xi}{W_n} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

On obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} K_{p3} = \frac{r^2}{K_3(2\xi)^2} \\ K_{i3} = \frac{K_{p3}}{T_r} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II. 6/Commande vectorielle direct de MAS:

II. 6.1/Schéma Simulink

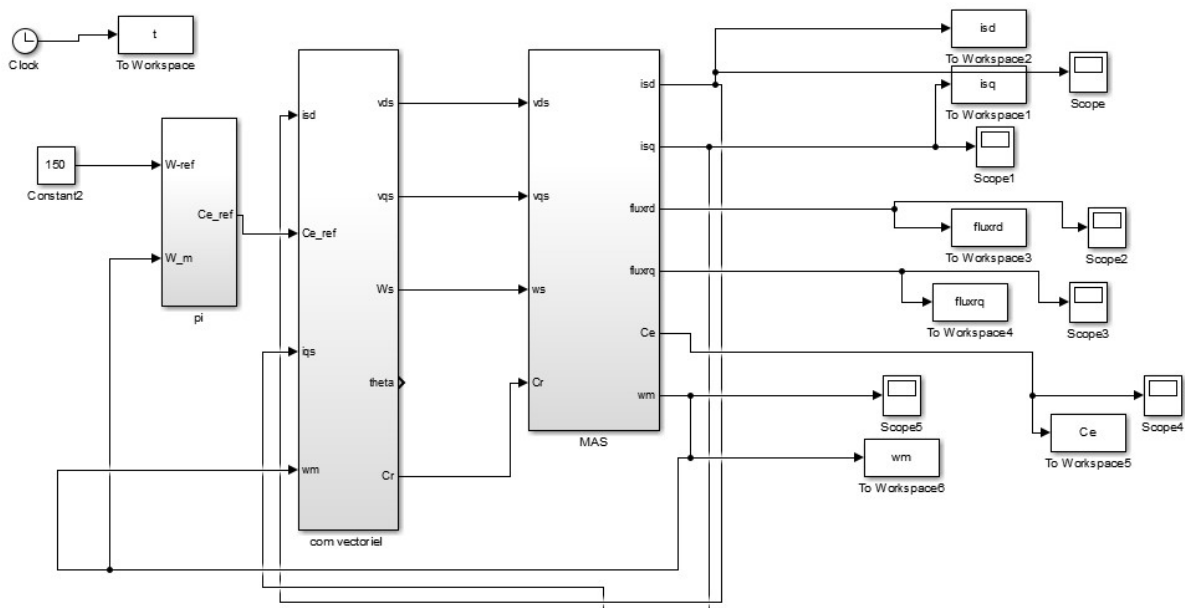


Figure II.6 : simulation de commande vectorielle de mas

II.7/Résultats:

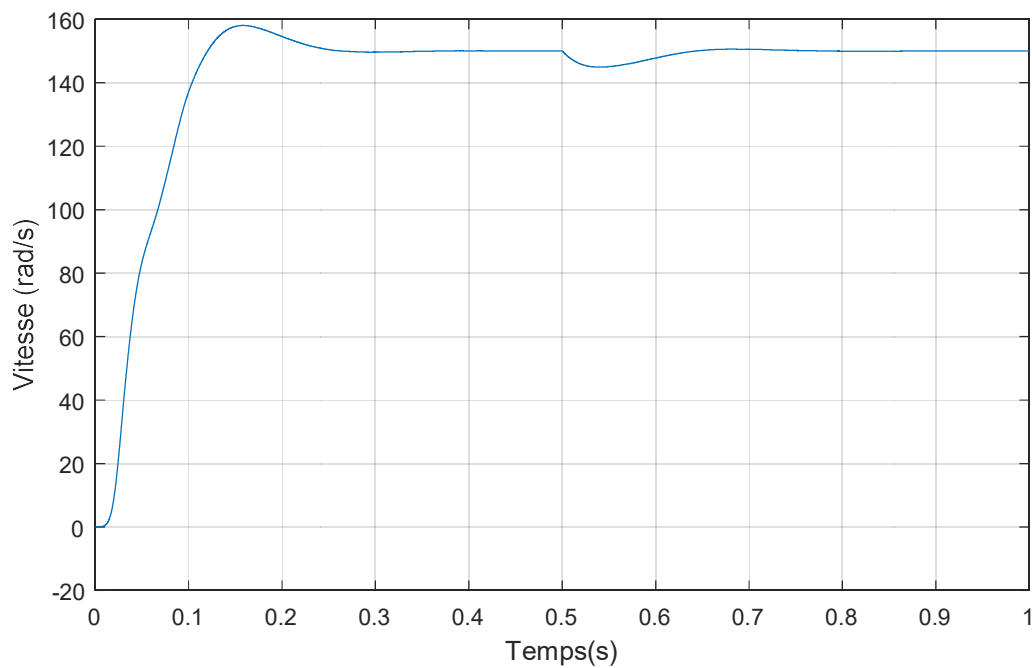


Figure II.7: Vitesse (rad/s)

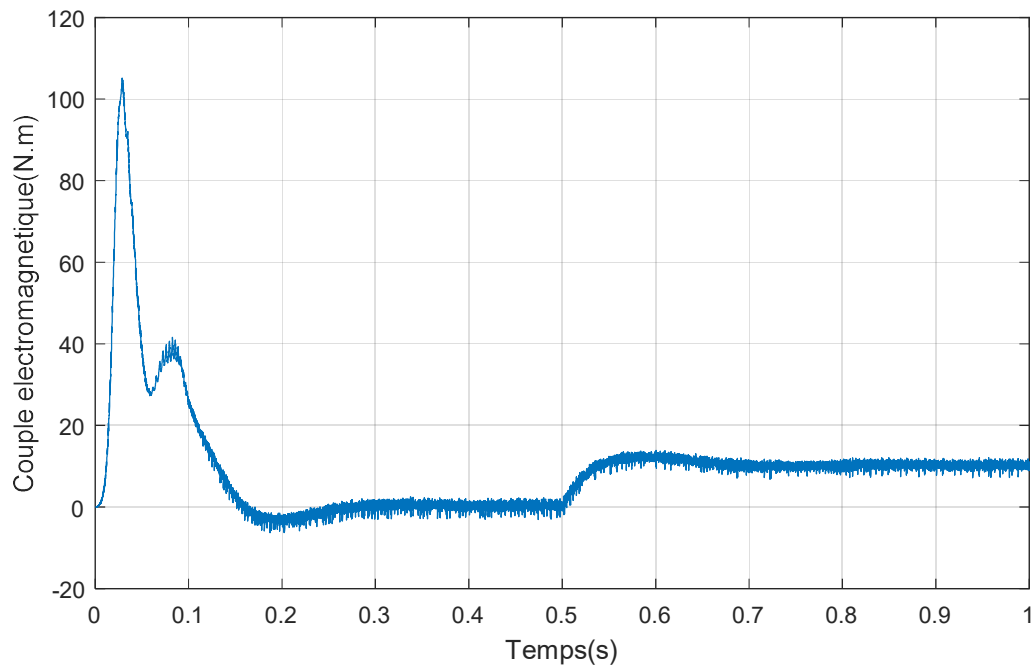


Figure II.8:Couple électromagnétique (N.m)

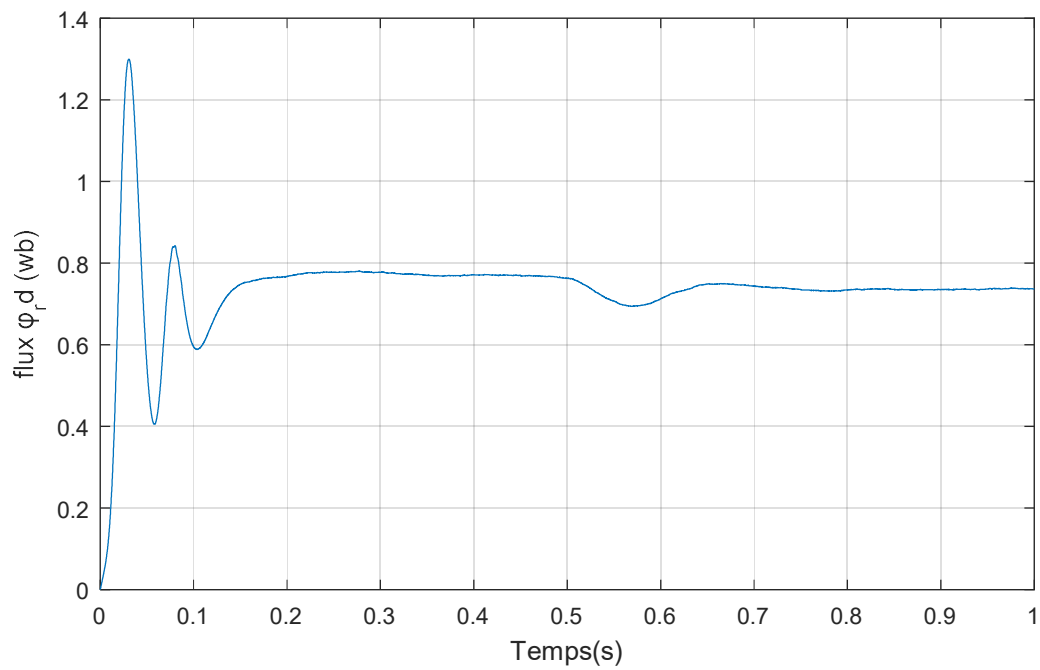


Figure II 9 :flux ϕ_{rd} (wb)

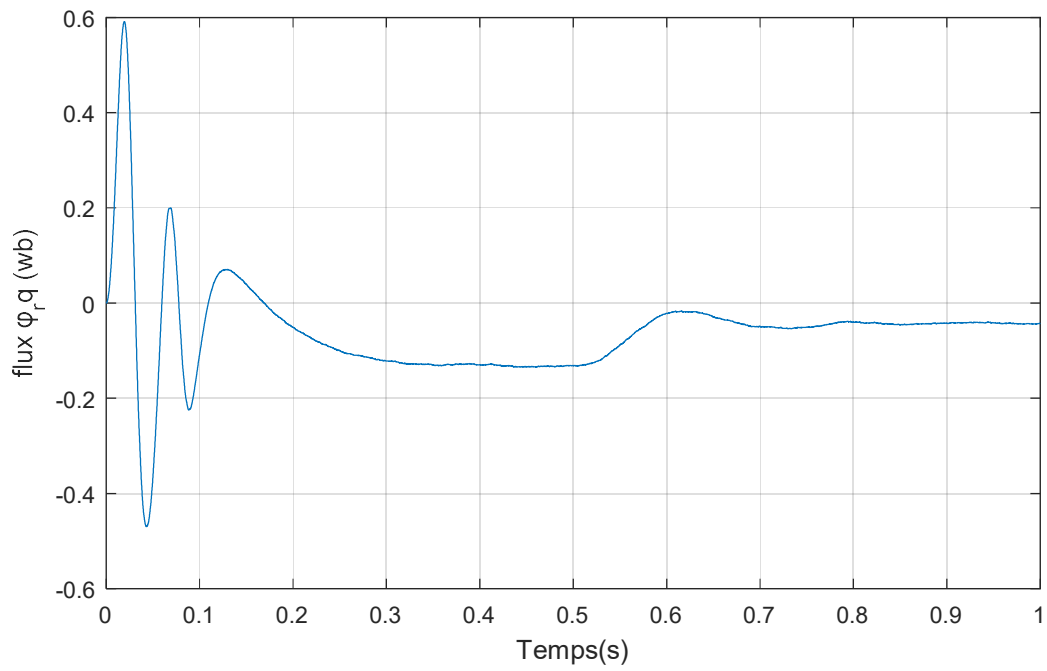


Figure II.10 : $\text{flux}\phi_{rq}$ (wb)

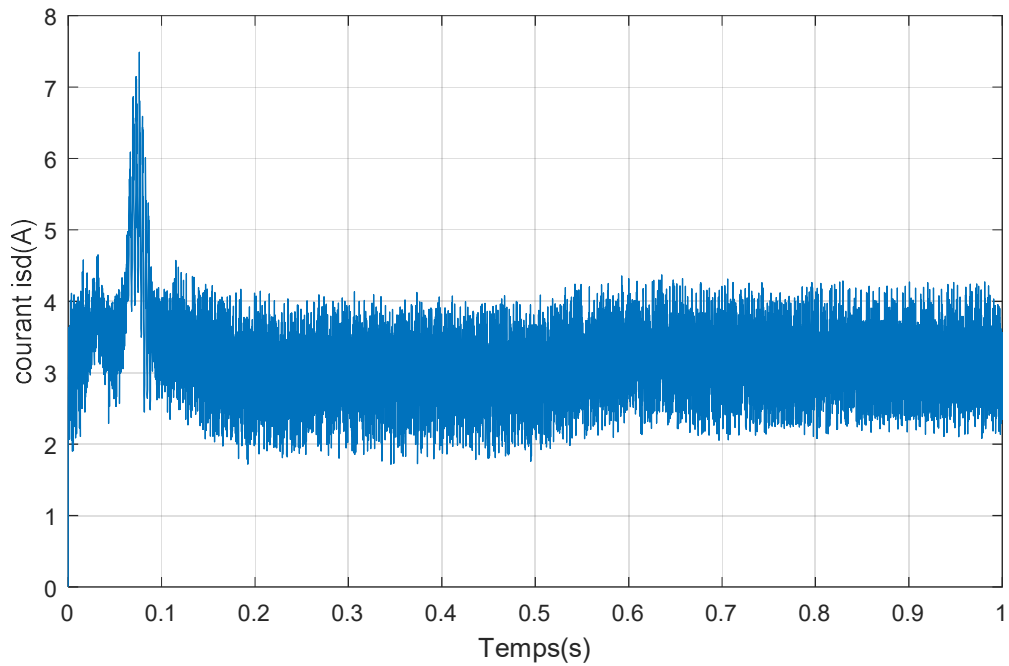
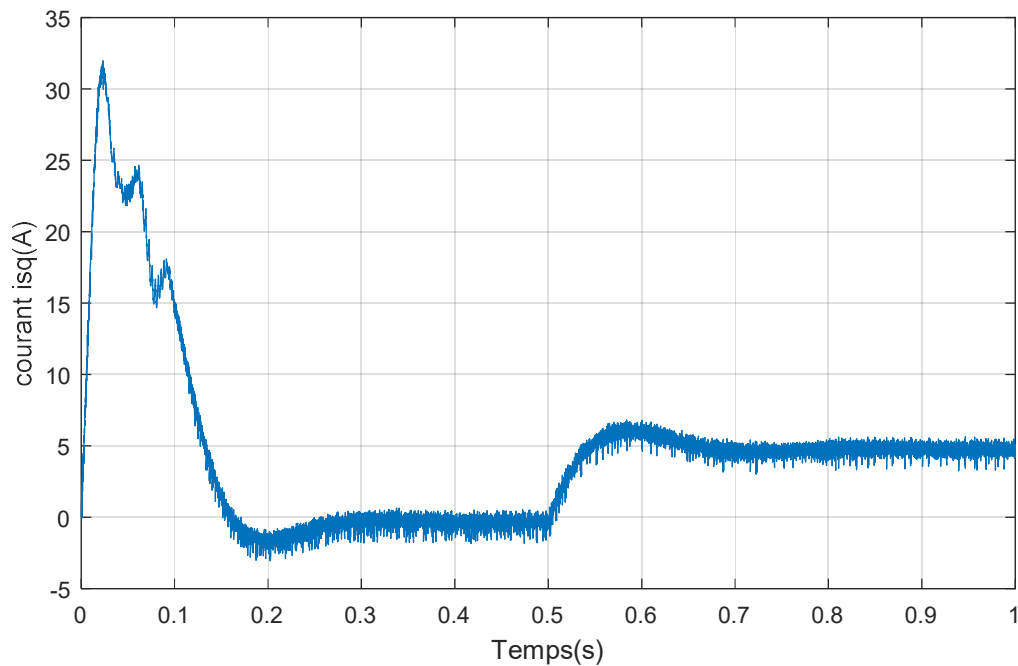


Figure II.11 : $\text{courant}i_{sd}$ (A)

Figure II. 12 : Courant i_{sq} (A)

II.7.1/Interprétation

Lors du démarrage à vide, la machine asynchrone présente un comportement stable : la vitesse augmente progressivement et atteint la valeur nominale de 150 rad/s sans provoquer de dépassement notable ni d'oscillations. Cela indique une excellente régulation à l'état transitoire et confirme que le système de commande est bien dimensionné pour ce type de sollicitation initiale.

À l'instant $t = 0,5$ s, un couple de charge $C_r = 10$ N·m est appliqué brutalement. En réaction à cette perturbation mécanique, la vitesse chute temporairement, atteignant une valeur réduite d'environ 3,3 % en dessous de la vitesse nominale, ce qui correspond à une baisse attendue dans un système soumis à une sollicitation soudaine. Cette chute est toutefois rapidement compensée grâce

à l'action du régulateur PI, permettant à la vitesse de retrouver progressivement sa consigne de 150 rad/s. Cela met en évidence la capacité de la commande vectorielle à maintenir une dynamique stable même en présence de perturbations externes. Parallèlement, le courant statorique enregistre un dépassement transitoire significatif, atteignant un pic de 31 A au moment de l'application de la charge. Ce pic est typique lors de la compensation d'un couple brusquement introduit. Ensuite, le courant se stabilise en régime permanent à une valeur de 5 A, correspondant au fonctionnement normal sous charge constante.

Le couple électromagnétique, de son côté, présente une réaction rapide et marquée. Il atteint une valeur maximale de 105 N·m immédiatement après l'application de la charge, ce qui est bien supérieur à la consigne. Cette réponse élevée est nécessaire pour rétablir l'équilibre dynamique du système. Après ce dépassement, le couple se stabilise précisément à la valeur de la charge appliquée (10 N·m), confirmant l'efficacité du contrôle.

Enfin, les composantes du courant dans le référentiel (d,q) confirment le découplage correct assuré par la commande vectorielle :

- La composante i_{sd} , liée au flux, reste relativement constante, indiquant que le champ magnétique est maintenu stable.
- La composante i_{sq} , associée au couple, varie en fonction des efforts mécaniques requis, augmentant lors de la charge et se stabilisant ensuite.

II.8/Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre la technique de conception du commande vectoriel pour une machine asynchrone alimentée par tension,

considérant aussi bien l'approche directe qu'indirecte avec orientation du flux rotorique. Cette approche s'est avérée à la fois facile à appliquer et particulièrement performante en matière de contrôle.

Les données obtenues illustrent de manière évidente l'efficacité élevée de cette commande, particulièrement en termes de précision et de rapidité de réponse, ce qui la rend parfaitement adaptée au positionnement des machines asynchrones.

Chapitre III

Optimisation des paramètres de régulateur PI par PSO

III. 1/Définition de l'optimisation

Un problème d'optimisation est défini comme la quête du minimum ou du maximum (de l'optimal) d'une fonction spécifiée. Il est également possible de rencontrer des problèmes d'optimisation où les variables de la fonction à optimiser doivent se limiter à une certaine zone de l'espace de recherche. Dans ce cas, nous avons une spécificité de ce que l'on nomme un problème d'optimisation avec des contraintes.[16]

III. 2/Présentation de l'Algorithme PSO –‘Particule Swarm Optimisation’

L'optimisation par essaim de particules, ou Particule Swarm Optimisation (PSO), est une technique évolutionnaire qui utilise 'une population' de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème d'optimisation. Le degré d'optimalité est mesuré par une fonction fitness définie par l'utilisateur. Il s'agit d'une méthode fondée sur la notion de coopération des agents, appelés ici "particules". Inventée par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995[19]. Cette technique trouve son origine dans les observations réalisées lors des simulations informatiques de vols en groupe d'oiseaux et de bancs de poissons [18]

Ces simulations ont démontré la capacité des membres d'un groupe en mouvement à conserver une séparation optimale les uns avec les autres et à orchestrer un déplacement collectif plutôt qu'individuel. De plus, ces modélisations ont également souligné le rôle crucial du mimétisme dans la compétition alimentaire entre les individus. En effet, les individus recherchent des ressources alimentaires qui sont dispersées de façon aléatoire dans une zone de recherche. Dès qu'un individu identifie une source de nourriture, les autres individus ont tendance à s'y diriger..

Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des

tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécus.[15]

III. 3/Principe du PSO

III. 3.1/Conception de PSO :

Optimisation par essaim de particules repose sur un groupe d'individus initialement disposés de manière aléatoire et homogène, que nous désignerons désormais comme des particules. Ces particules se déplacent dans l'hyper-espace de recherche, chacune représentant une solution potentielle. Chaque particule possède une mémoire de sa meilleure solution rencontrée ainsi que la capacité d'interagir avec les particules de son entourage. En se basant sur ces informations, la particule va suivre une tendance. Cette tendance est, d'une part, dictée par son désir de retourner vers sa solution optimale et, d'autre part, influencée par son mimétisme vis-à-vis des solutions découvertes dans son voisinage. À partir d'optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules tend normalement à converger vers la solution optimale globale du problème en question.

20]

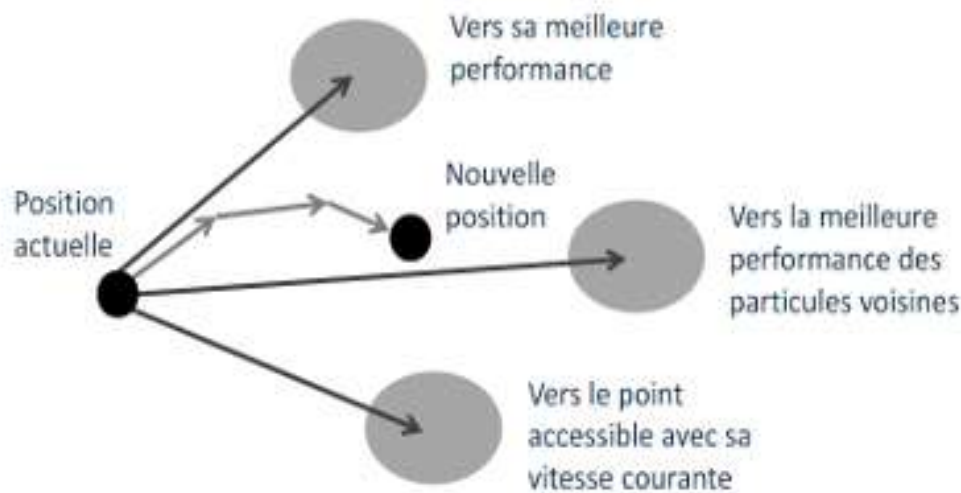
III.3.2/Technique de PSO

Un essaim de particules, représentant des solutions potentielles au problème d'optimisation, l'espace de recherche en quête de l'optimum global. Le mouvement d'une particule est affecté par les trois éléments suivants:

1. Une composante d'inertie : La particule a tendance à poursuivre sa trajectoire actuelle.
2. Une composante cognitive : La particule a tendance à se mouvoir vers l'endroit qu'elle a déjà traversé.

3. Une composante sociale : La particule a tendance à se baser sur l'expérience de ses pairs et, par conséquent, à se déplacer vers le meilleur emplacement déjà atteint par ses voisins.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure(III.1)



FigureIII.1 : Déplacement d'une particule

III. 4/Formalisation de l'algorithme PSO

Chaque particule conserve un enregistrement des coordonnées dans l'hyperespace de recherche correspondant à la meilleure solution (fitness) qu'elle a atteinte jusqu'à présent. Cette valeur est appelée pbest (particule best). Une autre meilleure valeur est donnée par les autres particules, cette dernière est appelée gbest (global best) [16]

Une particule est caractérisée, à l'instant t , par :

1. x_i : la position de particule dans l'espace de recherche.
2. v_i : la vitesse de particule
3. pbest : la position de particule de sa meilleure solution visitée.
4. gbest : la position de particule de la meilleure solution connue de son voisinage

Au cours du processus, chaque particule garde sa meilleure position visitée $pbest$ dans sa mémoire et la meilleure position globale $gbest$ de toutes les autres particules. Les mises à jour de la vitesse et de la position sont effectuées par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} v_i(t+1) &= \alpha v_i(t) + c_1 r_1 (pbest(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (gbest(t) - x_i(t)) \\ x_i(t+1) &= x_i(t) + v_i(t+1) \end{aligned} \quad (III.1)$$

L'algorithme PSO emploie divers points de recherche qui tendent graduellement vers l'optimum.

III. 5/Configuration de la méthode

Nombre de particules

La quantité de particules allouées à la résolution du problème dépend de deux facteurs :

1) La taille de l'espace de recherche, 2) la rapidité de convergence vers l'optimum

III. 5.1/Topologie du voisinage

La topologie du voisinage détermine les particules avec lesquelles chaque particule peut interagir. Il existe une multitude de combinaisons, parmi lesquelles les suivantes sont les plus couramment employées.

a) Topologie en étoile : chaque particule est reliée à toutes les autres, c'est-à-dire, l'optimum du voisinage est l'optimum global.

b) Topologie en anneau : chaque particule est reliée à nombre de particule

c) Topologie en rayon : Seule une particule centrale communique avec les autres particules. La figure III.2 présente les trois types de topologie du voisinage

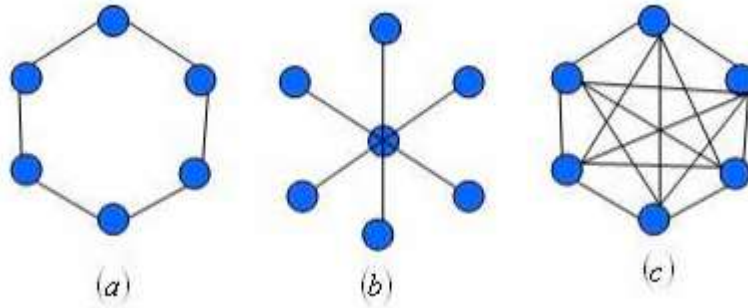


Figure III.2 : les trois types de topologie du voisinage

III. 5.2/Les coefficients de confiance :

ρ_1 et ρ_2 , qui modèrent, d'un côté, le comportement conservateur « l'inclination à revenir vers la solution optimale rencontrée » et, de l'autre, la propension à imiter les voisins

$$\rho_1 = c_1 * r_1 \quad (\text{II.2})$$

$$\rho_2 = c_2 * r_2 \quad (\text{II.3})$$

c_1 et c_2 sont des constantes positives ou : $c_1 + c_2 \leq 4$

III. 5.3/Vitesse maximale et coefficient de constriction

Pour éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement dans l'espace de recherche, risquant ainsi de manquer l'optimum, il peut s'avérer nécessaire de définir une vitesse maximale afin d'optimiser la convergence de l'algorithme.. Cependant, on peut s'en passer si on utilise un coefficient de constriction k qui permet de resserrer l'hyperespace de recherche. K est donné par l'équation 16

$$k = 1 - \frac{1}{\rho} + \frac{\sqrt{\rho^2 - 4\rho}}{2} \quad (\text{II.4})$$

Avec $\rho = \rho_1 + \rho_2 > 4$

L'équation de la vitesse devient :

$$v_i = k(\alpha \cdot v_i(t-1) + \rho_1(pbest - x_i(t)) + \rho_2(gbest - x_j(t))) \quad (II.5)$$

Les recherches de Shi et Eberhart montrent que l'emploi d'un coefficient de constriction tend à offrir un meilleur taux de convergence sans nécessiter la détermination d'une vitesse maximale. Toutefois, le seul usage du coefficient de constriction dans certains scénarios ne conduit pas à une convergence vers la solution optimale pour un nombre spécifique d'itérations. Pour remédier à ce problème, il pourrait être judicieux de définir $v_{max} = x_{max}$ en complément du coefficient de contrainte, ce qui contribuerait à optimiser les performances générales de l'algorithme.

III. 5.4/Facteur d'inertie

Le paramètre d'inertie introduit par SHI et EBERHAR sert à déterminer la capacité d'exploration de chaque particule dans le but d'affiner la convergence de la méthode. Un grand nombre ($\alpha > 1$) est synonyme d'une amplitude de mouvement importante et, en fin de compte, d'exploration exhaustive. Au contraire, une valeur basse ($\alpha < 1$) indique un mouvement de faible amplitude et donc, une exploration locale. Fixer ce facteur, il faut donc trouver un équilibre entre l'exploration locale et l'exploration globale.

Une meilleure convergence est obtenue pour $\alpha^*[0.8, 1.2]$. Au-delà de 1.2, l'algorithme tend à avoir certaines difficultés à converger. De bons résultats ont été trouvés pour une valeur décroissant linéairement de 0.9 à 0.4 [20]

III. 5.5/Initialisation de l'essaim

Il faut définir les positions et vitesses initiales des particules de façon aléatoire en respectant une distribution uniforme sur l'intervalle $[0,1]$. Il est nécessaire de fractionner l'hyperespace d'analyse en sous-hyperespaces et de disposer

les particules de façon uniforme pour assurer une dispersion équilibrée des particules dans tout l'hyperespace.[17]

III. 5.6/Critères d'arrêt

La convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas. L'algorithme ne s'arrêtera jamais tant qu'il n'aura pas atteint l'un de ces critères:

1. Nombre maximal d'itération
2. La vitesse est proche a 0
3. Le fitness de la solution est suffisant

III. 6/Synthèse de l'algorithme PSO

L'algorithme de PSO traverse sur ce loop :

1er étape : donner la dimension de l'espace de recherche, nombre de particules nb et la taille de groupe informées k, et définir l'intervalle de recherche.

2eme étape :Dispersion aléatoire des particules dans l'espace de recherche.

3eme étape : Apprécier l'adéquation de chaque particule.

4eme étape : trouver **pbest** et **gbest**.

5eme étape : Déplacement de chaque particule vers la nouvelle position.

6eme étape : Passer à l'étape 3 et repeter le processus jusqu'à ce que l'algorithme converge ou que la condition d'arrêt soit remplie

III. 7/Organigramme de la fonction de PSO

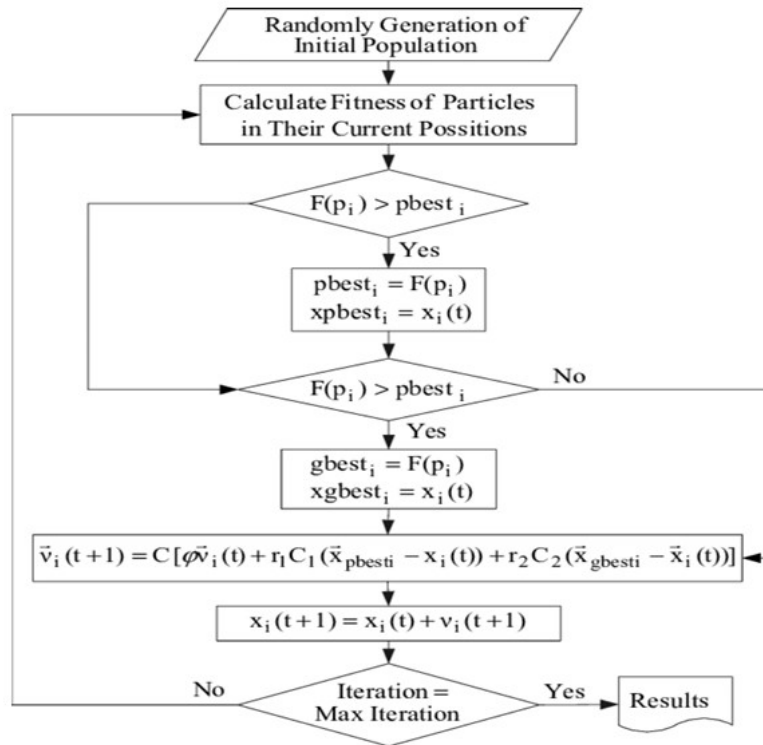


Figure III. 3 : Organigramme de fonctionnement de PSO

III.8. Résultats :

Après avoir lancé l'algorithme, on obtient les résultats suivants :

	Kp	ki
Methode standard	1.36	30.6
Methode PSO	2.3116	44.0225

Figure III. 4 :comparaison entre PSO et methode standard

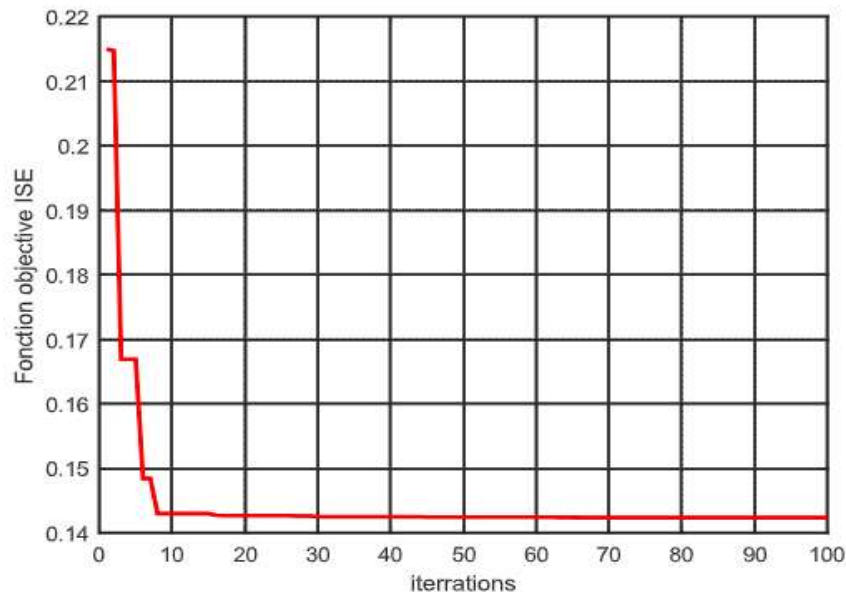


Figure.III.5 : évolution de la fonction objective en fonction du nombre d'itération.

D'après la figure III.5, on constate que la fonction objective décroît rapidement en fonction du nombre d'itérations et atteint presque son minimum dès la huitième itération, ce qui signifie de la convergence rapide de l'algorithme PSO

III.9/Résultats avec des paramètres optimisés par PSO du régulateur PI

Dans les figures suivantes on a appliqué la méthode d'optimisation sur la commande vectorielle et sa donne ces résultats :

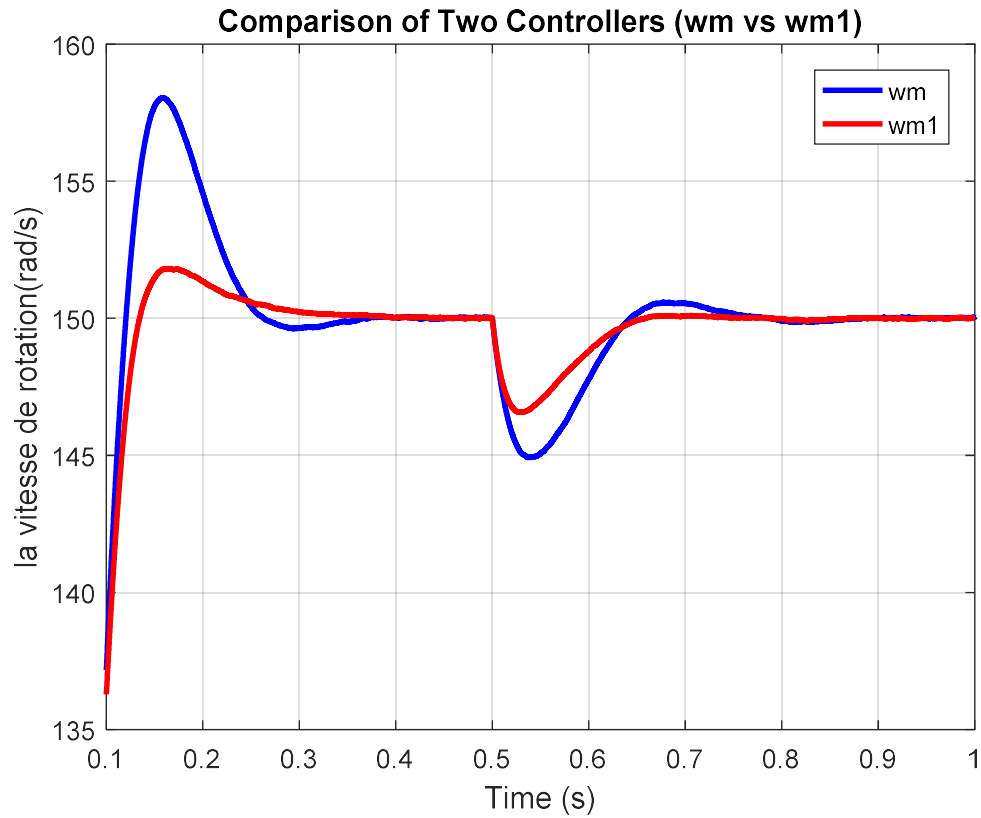


Figure III.6: La vitesse

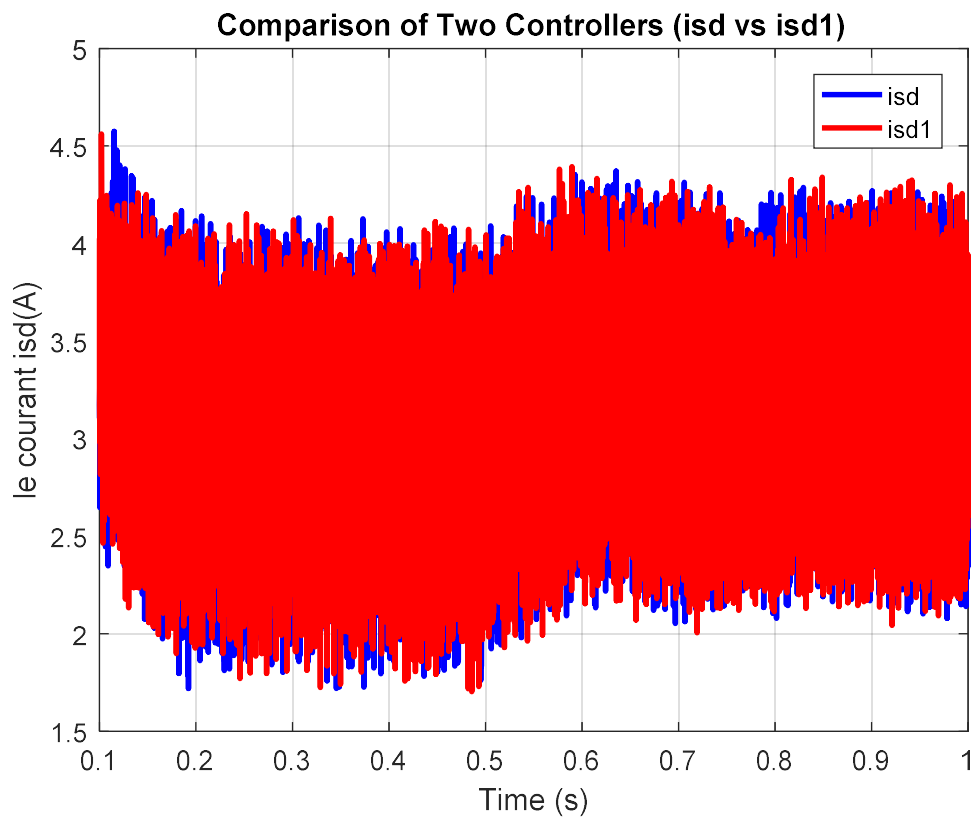


Figure III.7 : courant isd

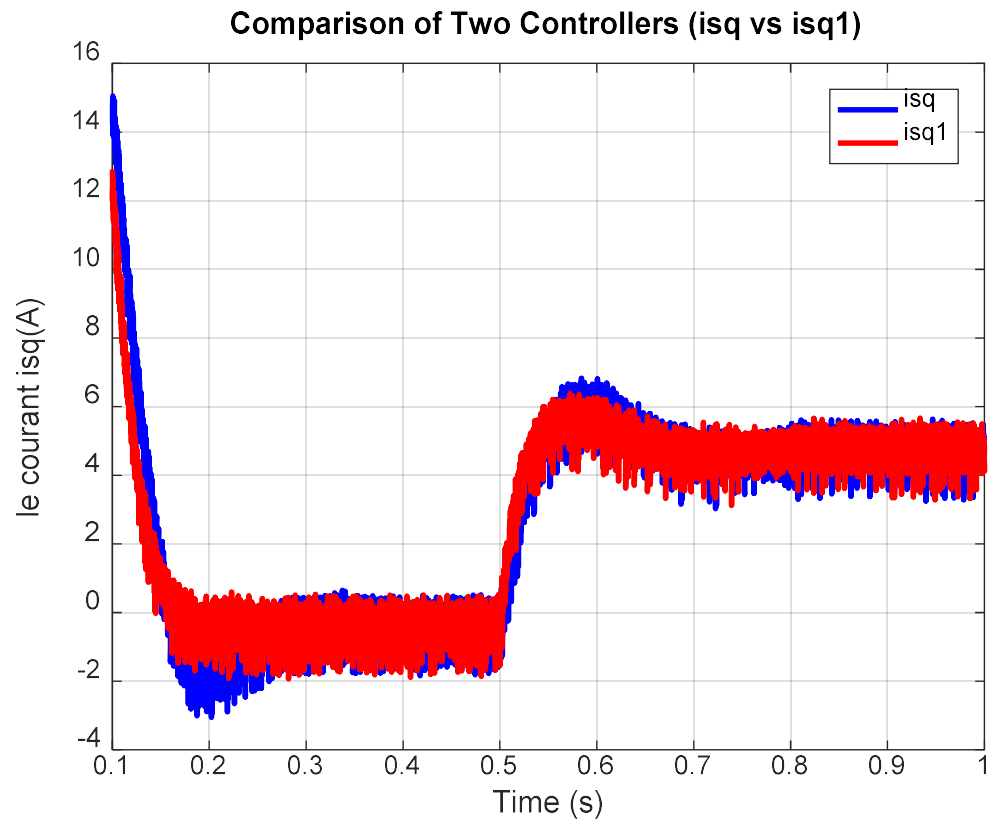


Figure III. 8 : courant i_{sq}

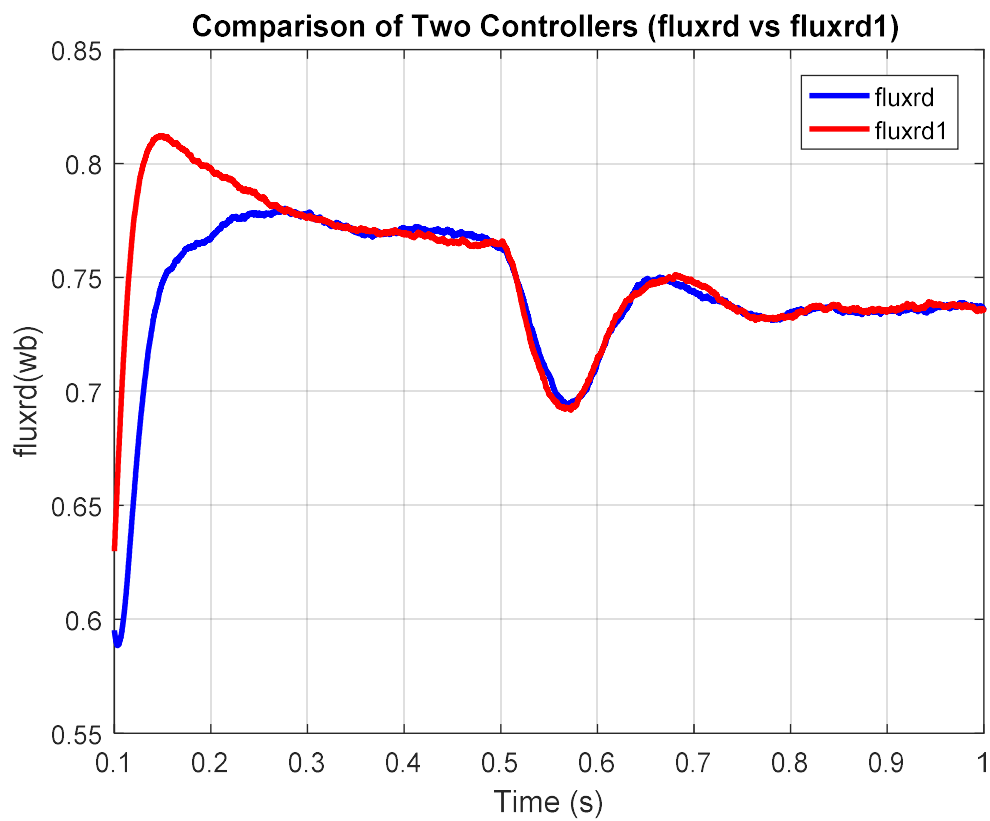


Figure III.9 : flux ϕ_{rd}

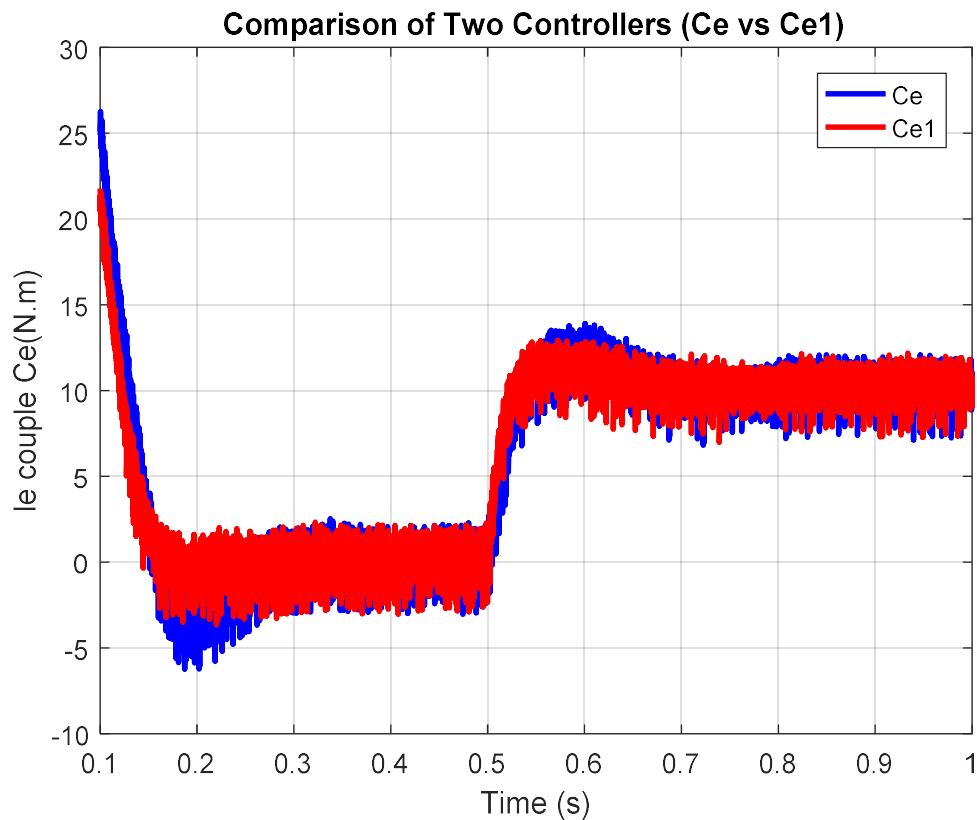


Figure III.10 : coupleelectromagnetique

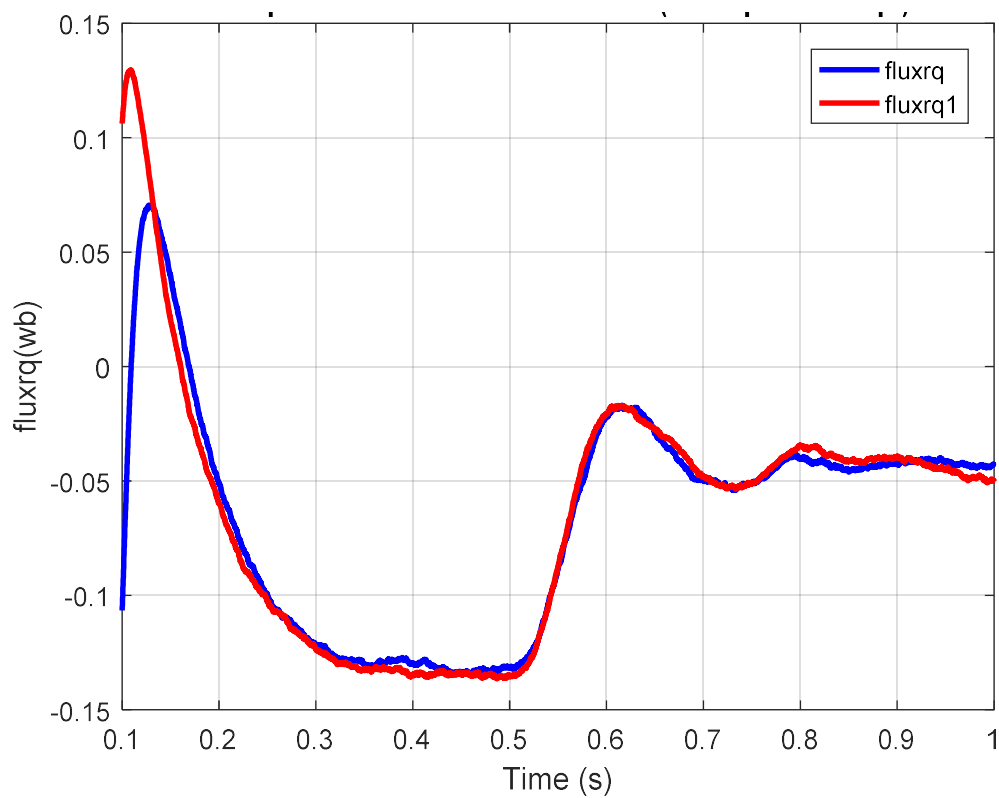


Figure III.11 : flux ϕ _rq

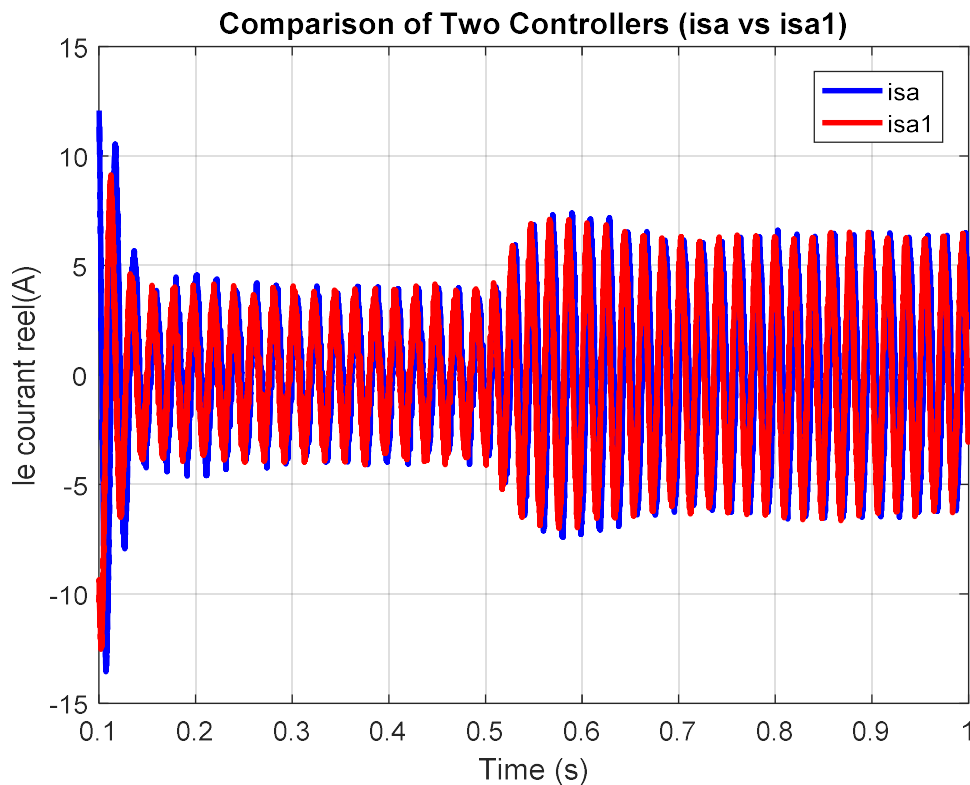


Figure III.1 : couranteelisa

III.9. Avantages et inconvénients de PSO

L'algorithme du PSO présente des avantages certains sur les méthodes classiques dans le sens de :

Moins de paramètres de réglage

Contrainte simple

Idéal pour l'optimisation multi-objective

L'algorithme de PSO a deux inconvénients principaux :

Solution de faible qualité

Nécessite de la mémoire pour mettre à jour la vitesse

Convergence précoce

III. 10/Interprétation

L'application de l'algorithme PSO (ParticleSwarmOptimization) a permis d'optimiser les paramètres du régulateur PI (K_p et K_i) utilisé dans la commande vectorielle de la machine asynchrone. L'analyse des courbes issues de la simulation met en évidence plusieurs améliorations significatives en termes de dynamique du système.

Tout d'abord, la vitesse de la machine présente une réponse beaucoup plus rapide et précise. Le temps de montée est réduit, et la vitesse atteint sa valeur de consigne sans dépassement notable, ce qui confirme une bonne maîtrise du régime transitoire. Lors de l'application d'un couple de charge à $t = 0,5$ s, la chute de vitesse est plus faible et le retour à la valeur nominale est plus rapide qu'en régime classique, indiquant une meilleure robustesse de la commande.

En ce qui concerne le courant statorique, l'optimisation par PSO permet de limiter les pics de courant observés lors du démarrage et de l'application de la charge. Le courant atteint rapidement un régime permanent avec des valeurs stables et inférieures à celles enregistrées avant optimisation, ce qui contribue à réduire les pertes énergétiques et à améliorer la durée de vie de la machine.

Le couple électromagnétique, quant à lui, présente également un meilleur comportement dynamique. Le dépassement initial est contrôlé et rapidement amorti, et la stabilisation à la valeur de charge est plus précise. Cela prouve que les gains PI obtenus par PSO assurent une régulation efficace du couple, en minimisant les erreurs et en accélérant la convergence vers le régime permanent.

Enfin, les composantes i_{sd} (flux) et i_{sq} (couple) montrent des profils plus lisses et mieux adaptés à la dynamique de la machine. Le flux est maintenu constant via i_{sd} , tandis qu' i_{sq} réagit efficacement aux variations de charge, traduisant une séparation nette et contrôlée entre les deux fonctions.

Ces résultats confirment que l'optimisation des gains du régulateur PI par PSO améliore non seulement la stabilité et la précision, mais aussi la robustesse du système face aux perturbations, tout en maintenant une excellente qualité de suivi.

11/Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'optimisation, en fournissant une brève définition et en nous concentrant spécifiquement sur la méthode PSO. Nous avons expliqué son principe de fonctionnement, sa formulation et comment la configurer pour une utilisation pratique. Enfin, nous avons appliqué la méthode sur notre machine et analysé les résultats.

Conclusion général

A l'issue de ce travail, nous avons réussi à étudier, modéliser, commander et optimiser le fonctionnement d'une machine asynchrone en suivant une démarche méthodique, structurée et progressive.

Dans le premier chapitre, une modélisation rigoureuse de la machine asynchrone a été réalisée, permettant de comprendre en profondeur son comportement dynamique ainsi que ses paramètres fondamentaux. Cette étape a constitué une base solide pour les phases ultérieures de simulation et d'analyse.

Le deuxième chapitre a été consacré à la mise en œuvre de la commande vectorielle (FOC), dans le but d'améliorer les performances du système en assurant un découplage efficace entre flux et le couple. Cette technique a permis d'obtenir une réponse dynamique proche de celle d'une machine à courant continu, tout en conservant la robustesse et la fiabilité propres aux machines asynchrones.

Enfin, dans le troisième chapitre, l'optimisation des paramètres de régulation à l'aide de l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) a permis d'améliorer sensiblement les performances du système, notamment en termes de stabilité, de rapidité de convergence et de réduction des dépassements. Inspirée du comportement collectif des essaims, cette méthode s'est révélée à la fois simple à implémenter et particulièrement efficace.

Les résultats obtenus confirment la pertinence des choix méthodologiques adoptés tout au long de ce travail. Ils ouvrent également des perspectives intéressantes pour des développements futurs, en particulier dans des environnements industriels complexes ou en temps réel, où les exigences de performance et de robustesse sont encore plus élevées.

References bibliographiques

- [1] L. Baghli, "Démarrage de la machine asynchrone, régimes transitoires", www.baghli.com, s.d.
- [2] Dymatec Industries, "Comment fonctionne un moteur asynchrone ?", www.dymatec-industries.com
- [3] Énergie+, "Moteur asynchrone", <https://energieplus-lesite.be>, .
- [4] Abdou Youcef, Ben Saidi Abdelkader, "Commande sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone", Mémoire Master académique, Électromécanique, Université Ibn-Khaldoun de Tiaret, 2016.
- [5] DiedhioeTidjini, "Estimation de la vitesse et des résistances statorique et rotorique pour la commande par orientation du flux d'une machine asynchrone", Mémoire de fin d'études, Électromécanique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- [6] Brahim Kiyyour, "Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile", Thèse de doctorat, 2020.
- [7] Betkaaachour, "Cours de 1er Master", Université Mohammed Khider
- [8] Abdou Youcef, Ben Saidi Abdelkader, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone associée à un observateur adaptatif", Mémoire Master académique, Électromécanique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [9] J. Povinelli, F. Bangura, "Diagnostics of eccentricities and bar/end-ring connector breakages in polyphase induction motors through a combination of time-series data mining and time-stepping coupled FE–state-space techniques", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 4, juillet/août 2003.
- [10] B. Boubakr, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone polyphasée alimentée par onduleur à trois niveaux – application sur la machine heptaphasée", Mémoire de Magister, 2010.
- [11] B. Farid, "Étude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone", Mémoire de Magister, 2006.
- [12] Bencheikh Bilal, Benatallah Bachir, "Commande vectorielle d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur MLI vectorielle", Mémoire de Master, 2018.
- [13] Patrick Brunet, "Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrones", Lycée Benjamin Franklin, Orléans, Cours en ligne.
- [14] BaroudiFethi, Boulabbas Zineb, "Modélisation et commande de vitesse d'un alternateur basé sur des régulateurs innovants", Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2021.

- [15] Ali Taieb, "Optimisation des régulateurs flou et classique par essaim de particules (PSO). Application à la commande vectorielle de la machine asynchrone", Mémoire de Magister, Université Saad Dahlab de Blida, 2009.
- [16] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques", Thèse de doctorat, Département de Génie Électrique, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 1999.
- [17] Van den Bergh F., "An analysis of particle swarm optimizers", these de doctorate, Department of Computer Science, University of Pretoria, 2002.
- [18] J. Kennedy, R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", Proceedings of the IEEE Conference on Neural Networks, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948.
- [19] ChagraBassem, "L'optimisation par essais de particules", <https://www.slideshare.net/chbassem>, 16 novembre 2016.
- [20] Guillaume CALAS, "Optimisation par essaim particulaire", EPITA, Le Kremlin-Bicêtre, France.