

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées
Département de génie électrique



MÉMOIRE DE MASTER ACADÉMIQUE

Domaine: Sciences et technologies

Filière: Electro technique

Spécialité: Electro technique Industriel

THÈME

**Etude et Modélisation des performances
D'un système de pompage Photovoltaïque**

Présenté Par :

- ☐ Mr. Zakarya FEROUHAT.
- ☐ Mr. Abderrahmane Othmane BENOTHTMANE.

Défendu publiquement le : 06 juin 2024.

Devant le jury:

☐ Mr. BENAOUADJ Mahdi	MCB	Président	UKM OUARGLA
☐ Mr. KHETTACHE Laid	MCA	Encadreur	UKM OUARGLA
☐ Mr. TAIBI Djamel	MAA	Examineur	UKM OUARGLA

Année universitaire: 2023/2024



REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions **DIEU**

Qui nous a aidés et nous a fourni patience et courage pendant ces années d'études.

Je voudrais remercier mon distingué **Dr. Khettache laid**

Qui supervise gentiment ce thème étaient dévoués et ne nous ont pas épargné ses précieux conseils et orientation. Pour sa patience, ses efforts et sa contribution au développement de cette recherche et à l'obtention de bons résultats dans notre étude, ainsi que la réussite de cette belle année académique.

Nous tenons à remercier les membres du jury, **Dr. BENAOUADJ Mahdi Et, Dr. TAIBI Djamel**, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre modeste travail. et à tous mes professeurs pour tous leurs conseils pendant ces années académiques. Nous aimerions également profiter de cette occasion pour exprimer notre gratitude à tous nos enseignants pour leur coopération, leur disponibilité et leur empathie dans l'enseignement.





DÉDICACES

Nous dédions ce modeste ouvrage comme un témoignage d'affection, d'admiration :

À Ma Famille

Avec plaisir, le cœur ouvert et avec une grande joie, je dédie mon travail à mes chers père et mère : "Il m'a donné la vie, la tendresse et le courage de réussir. Tout ce que je peux donner vous ne pouvez pas exprimer l'amour Et ma gratitude envers vous. Dans mon témoignage, je vous offre cet humble remerciement pour votre travail, les sacrifices et la passion avec lesquels il a toujours été m'a entouré. Je dédie ce travail à : mon cher frère Abdel mounaim, et aux stars de la maison, ma chère sœur Safa, Ikram et Issra, et à tous mes cousins, sans exception.

Mon encadreur monsieur, **KHETTACHE Laid** qui m'a été d'une grande aide durant la réalisation de ce mémoire

Les dédicaces A mon binôme ***Abderrahmane*** et vont également à mes collègues

Chers amis

Qui m'a aidé à construire des idées et à corriger mes nombreuses erreurs, me motivant en partageant des mots, des conseils et des encouragements constants avec le mélange parfait de perspicacité et d'humour tout au long de mes années d'études et tout au long du processus de recherche et d'écriture
Ce traité réussi et agréable. À tous mes amis qui m'ont accompagné dans ma vie.



Zakarya '



Je dédie ce modeste travail à :

A mon binôme ***Zakarya*** qui a toujours été présents et qui n'a
ménagé aucun effort pour la réalisation de ce modeste travail

Mon PERE symbole de force et de confiance.

Ma MERE symbole de sacrifice, Douceur et Courage.

Mon encadreur monsieur, **KHETTACHE Laid** qui m'a été

d'une grande aide durant la réalisation de ce mémoire

A MES cher Frère, Sœurs et à toute la famille.

A mes collègues et à tous mes Amis sans exceptions

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.



Abderrahmane '

TABLE DES MATIERES

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
TABLE DES MATIERES.....	IV
LISTES DES FIGURES.....	VII
Symbole.....	IX
Abréviation.....	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : MODELISATION DU MOTEUR A INDUCTION LINEAIRE (LIM)	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Modélisation du moteur linéaire asynchrone	3
I.2.1 Les équations	4
I.3 Transformation de Park	5
I.3.1 Choix du référentiel	7
I.3.2 Equations de la machine dans le repère (d, q)	7
I.4 Modélisation en modèle d'état.....	9
I.5 Simulation du moteur à induction	9
I.6 Résultats de simulation.....	10
I.7 Interprétation des résultats.....	11
I.8 Conclusion	11
CHAPITRE II COMMANDE VECTORIELLE DU MOTEUR A INDUCTION LINEAIRE (LIM)	
II.1 Introduction	13
II.2 La Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF)	13

II.3	Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté	14
II.3.1	Expression de la commande a flux orienté (FOC), [15].....	14
II.3.2	Estimation de la force électromagnétique	15
II.4	Découplage entrée-sortie (par compensation).....	16
II.5	Régulation	17
II.5.1	Régulateur de vitesse	18
II.5.2	Régulateur de courant	19
II.5.3	Régulateur de flux ϕ_r	20
II.6	Schéma bloc de la commande vectorielle directe	21
II.7	Résultats de la simulation.....	22
II.8	Interprétation des résultats.....	23
II.9	Conclusion	23
 CHAPITRE III : GENERALITE ET ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE		
III.1	Introduction.....	25
III.2	la cellule photovoltaïque	25
III.2.1	L'effet photovoltaïque.....	25
III.3	Influence de la température.....	27
III.4	Influence de l'éclairement.....	27
III.5	Commande MPPT.....	28
III.6	Principe de la commande MPPT.....	28
III.7	Différents commandes MPPT (commande perturb & observe (P&O)).....	28
III.8	La pompe centrifuge	30
III.8.1	Présentation de la pompe centrifuge	30
III.8.2	Constitution de la pompe centrifuge	30

III.8.3 Fonctionnement de la pompe centrifuge.....	31
III.9 Modélisation de la pompe centrifuge.....	31
III.9.1 Équations caractéristiques	31
III.10 Schéma de pompage Photovoltaïque	32
III.11 Résultats de simulation	33
III.12 Interprétation des résultats	33
III.13 Conclusion	33
Conclusion générale	35
BIBLOGHRAPHIE	37
ANNEX	40
Résumé.....	43

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I: MODELISATION DU MOTEUR A INDUCTION LINEAIRE (LIM)

Figure I-1 représentation de la machine asynchrone triphasée et biphasée équivalente [9]	6
Figure I-2 Circuit équivalent électrique LIM	7
Figure I-3 Schéma de simulation d'un moteur à induction linéaire alimentée en tension	10
Figure I-4 Résultats de simulation d'un moteur linéaire asynchrone (LIM).	10

CHAPITRE II : COMMANDE VECTORIELLE DU MOTEUR A INDUCTION LINEAIRE (LIM)

Figure II-1 Orientation du flux rotorique	14
Figure II-2 Reconstitution des tensions	17
Figure II-3 Boucle de régulation de la vitesse	18
Figure II-4 Boucle de régulation de courant i_{ds}	19
Figure II-5 Schéma bloc de régulation de flux	20
Figure II-6 Schéma fonctionnel de commande vectorielle proposé pour LIM.	21
Figure II-7 Résultats de simulation de la DFOC du (LIM).	22

CHAPITRE III : GENERALITE ET ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Figure III.1 Schéma d'une cellule photovoltaïque	26
Figure III.2 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	26
Figure III.3 Caractéristiques (I-V), (P-V) en fonction de la température	27
Figure III.4 Caractéristiques (I-V), (P-V) en fonction de l'éclairement	27
Figure III.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O)	29
Figure III.6 Algorithme d'une commande MPPT (P&O)	29
Figure III.7 vues en face d'une pompe centrifuge.	30

Figure III.8	Schéma bloc de la pompe centrifuge.	32
Figure III.9	Il est proposé un schéma fonctionnel de pompage Photovoltaïque	32
Figure III.10	Courbe de Puissance et débit en fonction du temps	33
Figure III.11	Courbe de Force et vitesse en fonction de la hauteur	33

Symbole

Symbole	Nomenclature
Φ	Flux magnétique
H	Champ magnétique
F	Force électro magnétique
N	Nombre de spires
E	Entrefer
a, b, c	Indices correspondants aux trois phases
s, r	Indices relatif au stator et rotor respectivement
d, q	Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant
α, β	Axes correspondant au référentiel lié au stator
V_s	tension statorique
V_r	tension rotorique
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Les tensions appliquées aux trois phases statoriques
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Les courants qui traversent les trois phases statoriques.
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$	Les flux totaux à travers ces enroulements
R_s	Résistance d'une phase statorique
R_r	Résistance d'une phase rotorique
L_s	Inductance propre d'une phase statorique
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique
L_{ss}	Matrice des inductances statoriques
L_{rr}	Matrice des inductances rotoriques
M_s	Inductance mutuelle entre phases statoriques.
M_r	Inductance mutuelle entre phases rotoriques
Q	facteur associé à la longueur de linéaire
D	longueur du rotor
M_{sr}	Matrice des inductances mutuelles statoriques.
M_{rs}	Matrice des inductances mutuelles rotoriques
ϕ_s	Flux statorique
ϕ_r	Flux rotorique
F_{em}	force électromagnétique
M	masse du moteur
V	vitesse linéaire
ζ	coefficient d'amortissement
L_m	inductance mutuelle cyclique

ω_r	représente la vitesse angulaire linéaire
r, τ_p	le pas polaire
θ_r	angle entre les vecteurs flux stator et rotor
N_{sq}	Vitesse spécifique du rotor
N_{ep}	Nombre d'étages de la pom
H	Hauteur de charge effective
ω	Vitesse de l'arbre
Q	Débit de la pompe
D_f	Diamètre du forage (ou du puits)
N	vitesse de l'arbre du rotor
C_r	Couple résistant

Abréviation

Abréviation	Nomenclature
LIM	Moteur à Induction Linéaire
(CV-OF)	Commande vectorielle par orientation du flux
MPPT	Maximum power point tracking / Poursuite du Point de Puissance Maximale
(P&O)	Perturb and Observe
(PV)	Photovoltaïque

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire photovoltaïque est devenue une solution prometteuse et largement adoptée dans de nombreux pays développés, où elle est souvent utilisée en complément de l'électricité urbaine. Malgré un coût initial élevé, elle reste compétitive en raison de ses avantages écologiques et de sa disponibilité constante. Elle est utilisée dans diverses applications telles que l'éclairage, les télécommunications et le pompage. Dans les zones rurales et isolées, les générateurs photovoltaïques alimentent des groupes motopompes, offrant ainsi une solution économique aux problèmes d'accès à l'eau. Les avantages incluent la décentralisation de la production d'énergie, l'autonomie du système et son efficacité, faisant de l'énergie solaire une ressource précieuse pour répondre aux besoins énergétiques tout en préservant l'environnement [1].

A cet effet, notre travail a été devisé en trois chapitres dont le contenu est résumé ci-dessous :

Le premier chapitre présente un modèle proposé du moteur asynchrone linéaire (LIM) utilisant la transformation de Park (triphase/biphasé) dans l'environnement Matlab/Simulink. Ce modèle prend en compte l'effet final.

Le chapitre deux présente un modèle pour la mise en œuvre du contrôle vectoriel de la machine asynchrone linéaire.

Le troisième chapitre, concerne la simulation du système de pompage et solaire.

Une conclusion générale clôture notre travail.

Chapitre I :

Modélisation du moteur à induction linéaire (LIM)

I.1 Introduction :

Les moteurs à induction linéaire sont généralement utilisés dans diverses applications nécessitant un mouvement linéaire, telles que les ascenseurs, les machines-outils et les systèmes de manutention. Ils offrent l'avantage d'une haute vitesse de déplacement, d'une accélération rapide, d'un entretien peu coûteux, d'une longue durée de vie et d'aucune friction entre le rotor et le stator. Toutefois, leur prix est souvent plus élevé que celui des moteurs à induction traditionnels [2-4].

Ce modèle peut être obtenu en appliquant la méthode de transformation de Park au modèle triphasé réel, ou en utilisant la notation complexe (représentation vectorielle). Cela permet de concevoir un modèle simple expliquant clairement le fonctionnement du moteur à induction.

Ce chapitre sera divisé en deux parties. Dans la première partie, nous introduirons un modèle mathématique d'un moteur linéaire asynchrone dans un système triphasé puis monophasé basé sur la transformation de Park. La seconde partie sera consacrée à la validation de notre modèle de moteur à travers une simulation Matlab (Simulink). Les détails des paramètres sont fournis en annexe.

I.2 Modélisation du moteur linéaire asynchrone :

La modélisation des moteurs linéaires asynchrones repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [5] [6] [7] [8] :

- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.
- L'effet d'entaille est négligeable.
- La répartition spatiale de la force magnétomotrice de l'entrefer est sinusoïdale.
- Circuit magnétique insaturé à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables.
- La résistance du bobinage ne change pas avec la température de fonctionnement et l'effet cutané est négligeable.

Attendu que le stator et le rotor d'un moteur à induction sont triphasés, des équations électriques, magnétiques et mécanisme sont pratiqué comme expliquer la réaction du moteur.

I.2.1 Les equations :

a) Les equations électriques:

$$\begin{cases} [Vs] = [Rs][Is] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \\ [Vr] = [Rr][Ir] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \end{cases} \quad (I-1)$$

Et :

$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$: Vecteur tension statorique.

$[I_s] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$: Vecteur courants statorique.

$[V_r] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$: Vecteur tension rotorique

$[I_r] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$: Vecteur courants rotorique

$[\phi_s] = [\phi_a \ \phi_b \ \phi_c]^T$: Vecteur flux statorique

$[\phi_r] = [\phi_a \ \phi_b \ \phi_c]^T$: Vecteur flux rotorique

$$\text{Avec: } R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (I-2)$$

b) Equations magnétiques :

Sous forme matricielle, les relations entre flux et courants sont exprimées sous forme d'équations linéaires de la manière suivante :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\phi_r] = [L_{rs}][I_s] + [M_{rs}][I_r] \end{cases} \quad (I-3)$$

Comme :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (I-4)$$

$$\text{Et : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix} [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (I-5)$$

Pour le stator :

$$[\phi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (I-6)$$

Pour le rotor :

$$[\phi_{rabc}] = [L_{rs}][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{rabc}] \quad (I-7)$$

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (I-8)$$

M_0 : La plus grande valeur des inductances mutuelles entre les phases statorique et rotor.

θ : L'angle du rotor par rapport au stator.

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductions statoriques.

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotorique.

$[M_{sr}]$: Matrices des inductances stator-rotor mutualisées.

c) Equation mécanique:

$$Fe - Fr = \frac{mdv}{dt} \quad (I-9)$$

Fe : Force électromagnétique.

Fr : Force résistance.

m : Masse du moteur.

V : Vitesse.

La vitesse mécanique des équations précédentes pose des problèmes pour la résolution analytique car les composants trigonométriques de la matrice d'induction changent en fonction de l'emplacement. Cela a conduit à l'utilisation de la transformation de Park, qui permet à ces mots de prendre des positions distinctes.

I.3 Transformation de Park :

La transformation de Park utilise deux phases au lieu des trois phases d'axes fixes du stator (**a**, **b**, **c**) ou du rotor (**A**, **B**, **C**). En effet, on prend en considération l'enroulement équivalent constitué de deux bobinages d'axes perpendiculaires (**d**, **q**) tournant respectivement à la vitesse ω_a par rapport au stator et à la vitesse ω par rapport au rotor. La transformation de Park consiste à remplacer la représentation équilibrée du moteur triphasé par une représentation biphasée équivalente définie par deux axes **d**, **q** transformer un système triphasé [**abc**] en un système biphasé [**d**, **q**] avec une composante homopolaire comme indiqué dans l'équation suivante :

$$\begin{cases} V_{dq0} = [A][V_{RST}] \\ I_{dq0} = [A][I_{RST}] \\ \phi_{dq0} = [A][\phi_{RST}] \end{cases} \quad (I-10)$$

Où $[A]$ est la matrice de PARK définie par :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I-11)$$

La matrice inverse $[A]^{-1}$ est donnée par :

$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I-12)$$

θ : angle de rotation du repère (d, q).

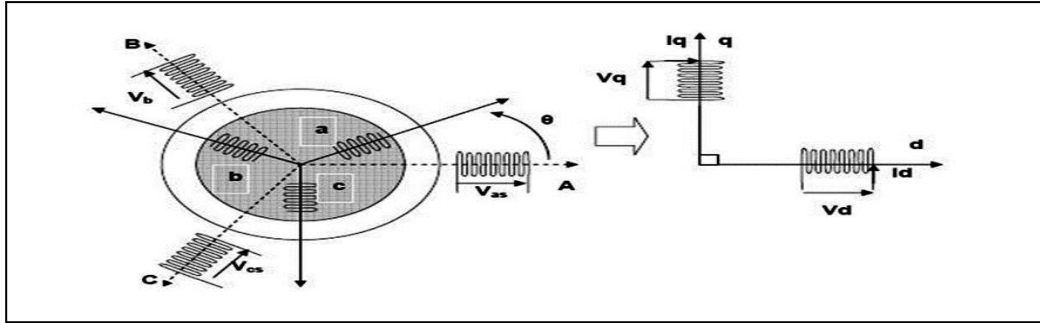


Figure I.1 Représentation de la transformation triphasé-biphasé, [9]

On peut appliquer la transformation de Park :

Pour le stator :

$$[H_{sdq0}] = [A_s][H_{sRST}] \quad (I-13)$$

Où H_s est une grandeur statorique (tension, courant ou flux) :

$$[A_s] = [A(\theta = \theta_s)]$$

De même Pour le rotor on a :

$$[H_{rdq0}] = [A_r][H_{rRST}] \quad (I-14)$$

Où H_r est une grandeur rotorique (tension, courant ou flux) :

$$[A_r] = [A(\theta = \theta_r)]$$

I.3.1 Choix du référentiel :

Selon le repère choisi, la position des deux axes (d, q) peut être située selon :

- Référentiel lié au stator d'axe (α, β) lorsque $\omega_a = 0$.
- Référentiel lié au rotor d'axe (x, y) lorsque $\omega_a = \omega_r$.
- Référentiel lié au champ tournant d'axe (d, q) lorsque $\omega_a = \omega_s$.

I.3.2 Equations de la machine dans le repère (d, q) :

Il s'agit du repère le plus approprié pour manipuler les grandeurs et pour étudier les conditions de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

Lorsqu'on applique la transformation de Park dans ce repère, les équations électriques et magnétiques qui représentent le moteur à induction sont les suivantes [10] :

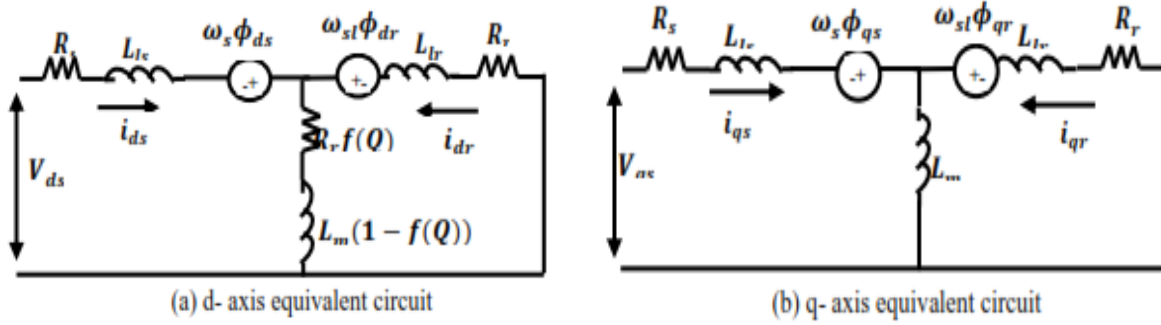


Figure I-2 : Circuit équivalent électrique LIM

a) Les formules électriques :

Les équations des tensions statoriques et rotoriques dans le système d'axe (d,q)s'écrivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + R_r f(Q)(i_{ds} + i_{dr}) + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + R_r f(Q)(i_{ds} + i_{dr}) + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (I-15)$$

b) Les formules magnétiques :

En outre, on peut représenter les différentes composantes des flux statoriques et rotoriques par:

Avec :

$$\omega_{sl} = (\omega_s - \omega_r)$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = Llsids + Lm(1 - f(Q))(ids + idr) \\ \phi_{qs} = Llsiqs + Lm(iqs + iqr) \\ \phi_{dr} = Llridr + Lm(1 - f(Q))(ids + idr) \\ \phi_{qr} = Llrigr + Lm(iqs + iqr) \end{cases} \quad (I -16)$$

c) Le formule mécanique :

$$Q = \frac{DRr}{(Lm + Llr)v} \quad (I -17)$$

La vitesse linéaire du LIM est convertie en vitesse angulaire en utilisant :

$$\omega r = \frac{\pi}{\tau p} v \quad (I -18)$$

La vitesse angulaire linéaire est représentée par ωr , tandis que le pas polaire est r :

$$\hat{L}_m = Lm[1 - f(Q)] \quad (I -19)$$

Avec :

$$f(Q) = \frac{1 - e^Q}{Q} \quad (I -20)$$

$$Rr = Rr f(Q) \quad (I -21)$$

$$\begin{cases} Ls = Lls + \hat{L}_m \\ Lr = Llr + \hat{L}_m \end{cases} \quad (I -22)$$

$$\sigma = \frac{LsLr - \hat{L}_m}{Lr} \quad (I -23)$$

$$\sigma' = (Lls + Lm) - \frac{Lm^2}{(Llr + Lm)} \quad (I -24)$$

Avec :

m est directement lié à la distance entre le stator et le rotor.

Ls , : Inductance cyclique statorique.

Lr , : Inductance cyclique rotorique.

Lm , : Inductance cyclique mutuelle entre stator et rotor.

Note : les équations précédemment citées pour le modèle Simulink de LIM en (10) sont également utilisées pour exprimer l'effet final sur le facteur de magnétisation de LIM dans le modèle Simulink via $f(Q)$.

L'équation dynamique de LIM est exprimée par :

$$Mv + Dv + T_L \quad (I-25)$$

d) Expression de la force électromagnétique :

Une représentation de la force électromagnétique dans l'équation mécanique de la machine :

$$F_e = \frac{3\pi P}{2\tau p^2} (\phi ds I qs - \phi qs ids) \quad (I-26)$$

e) Expression de la force mécanique :

$$F_e = \frac{3\pi P Lm(1-f(Q))}{2\tau p^2 Lr - lmf(Q)} (\phi ds I qs - \phi qs ids) = Mv + Dv + TL \quad (I-27)$$

τp : est le pas polaire

I.4 Modélisation en modèle d'état :

Les variables d'état sélectionnées déterminent la façon dont la machine à induction est représentée, ce qui est influencé par les objectifs de la commande et de l'observation. En règle générale, les variables d'état choisies comprennent la vitesse, qui est régulée, le courant statorique, qui peut être mesuré, et le flux rotorique, dont on cherche à établir la norme en l'estimant :

$$X = [is \ \varphi r]$$

L'équation d'état pour le modèle d'alimentation en tension de la machine (onduleur de tension) est la suivante :

$$X' = AX + BU, X = [isd \ isq \ \varphi rd \ \varphi rq]^T, U = [Vsd \ Vsq]^T \quad (I-28)$$

I.5 Simulation du moteur à induction :

On a réalisé la simulation en utilisant le logiciel « Simulink » sous « Matlab ». La simulation numérique d'une machine à induction sera exposée dans cette section, ce schéma étant développé à partir des équations suivantes :

- L'équation d'état
- L'équation de la force électromagnétique.
- L'équation du mouvement.

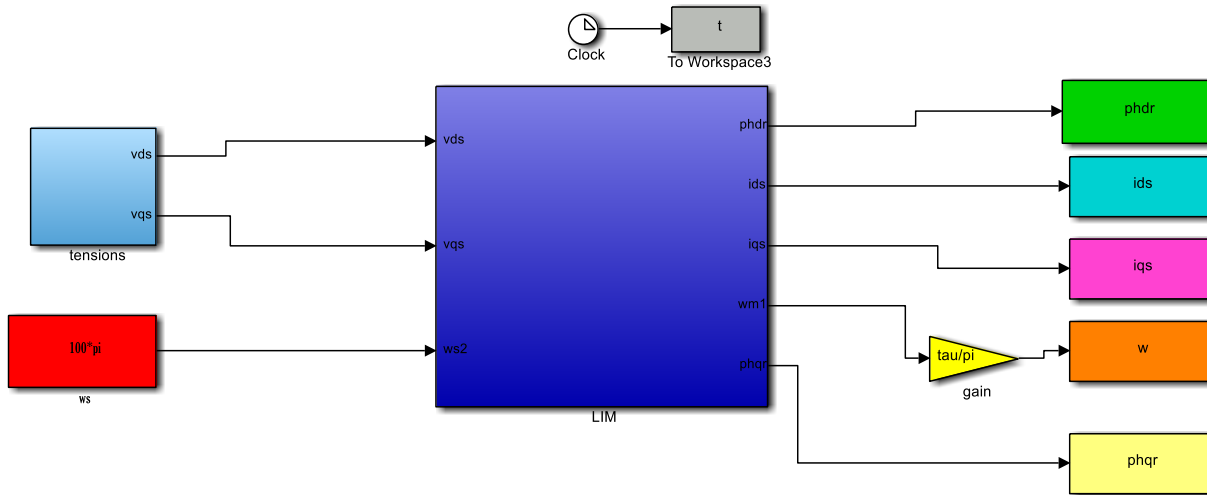


Figure I-3 Schéma de simulation d'un moteur à induction linéaire alimentée en tension.

I.6 Résultats de simulation

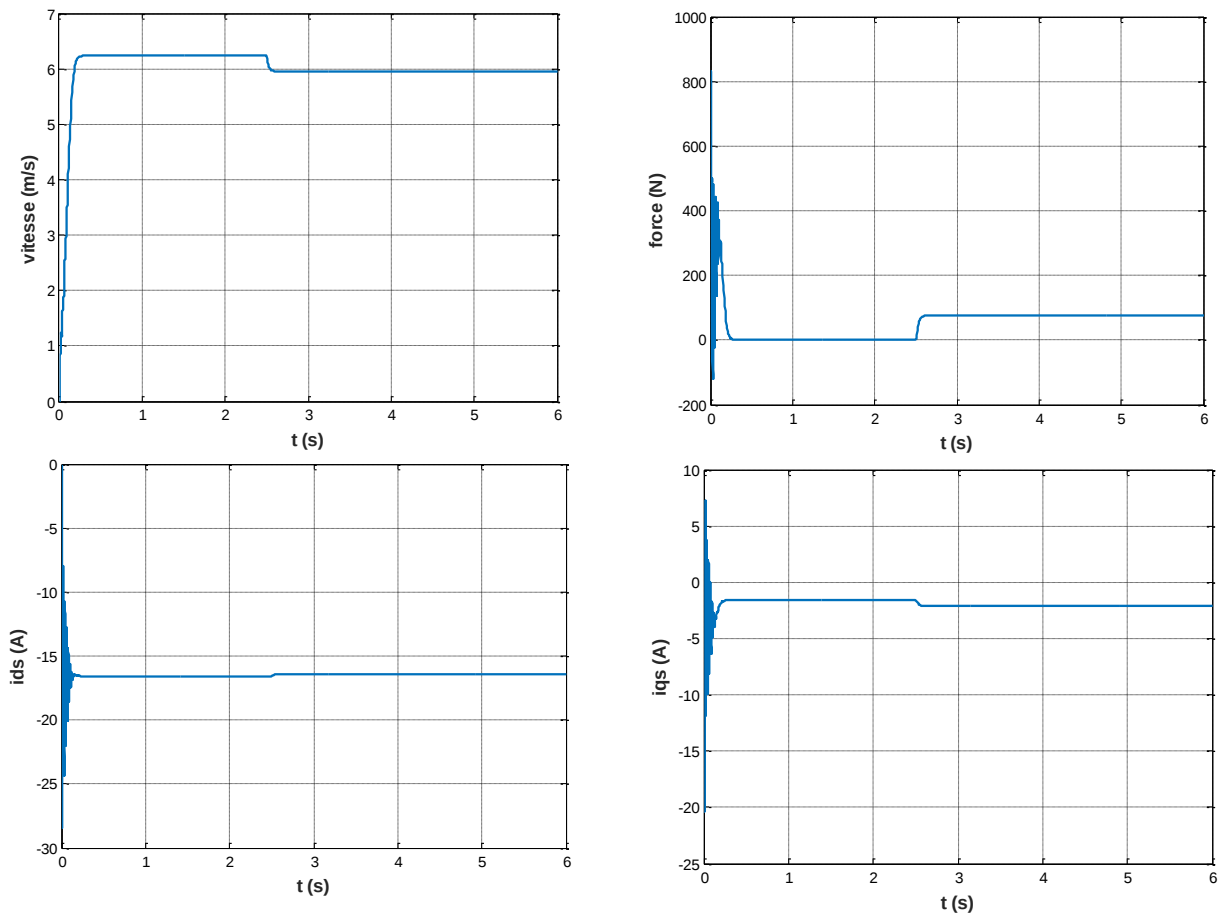


Figure I-4 Résultats de simulation d'un moteur linéaire asynchrone (LIM).

I.7 Interprétation des résultats :

La figure (I-4) présente les résultats de simulation qui illustrent comment les grandeurs fondamentales du moteur à induction linéaire ont évolué : la vitesse (Ω), la Force électromagnétique (Fem) et les courants statoriques Isd, Isq :

Les simulations présentées dans les figures précédentes illustrent le fonctionnement de la machine lorsqu'elle démarre à vide avec une vitesse de 6.5 (m/s). Ensuite, nous appliquons une force de charge nominale de 50 N.m à $t=2,5s$.

Le démarrage à vide entraîne une forte pulsation de la force (comparable au couple d'un moteur asynchrone à cage). Sa valeur maximale est d'environ trois fois la force nominale, puis elle tend vers zéro.

On atteint le régime permanent et le courant reste égal au comportement inductif du moteur à vide.

En ce qui concerne les courants, il est important d'utiliser des courants forts, bien que brefs, au démarrage, représentant environ 5 fois le courant nominal.

I.8 Conclusion :

Les résultats de simulation obtenus dans ce chapitre nous ont permis de mettre en évidence le comportement du moteur en présence des phénomènes d'effets d'extrémité et des perturbations (telles que les variations de charge). Ces résultats nous permettent de valider le modèle établi en tenant compte des hypothèses simplificatrices. Pour atténuer les effets externes dans la modélisation de notre moteur, plusieurs approches et techniques de contrôle peuvent être adoptées. L'utilisation de techniques de commande vectorielle peut aider à atténuer les effets externes en ajustant dynamiquement les paramètres de commande en fonction des conditions environnementales et de charge.

Chapitre II :

Commande vectorielle du Moteur à induction linéaire (LIM)

II.1 Introduction

Ce chapitre présentera les principes de la méthode de contrôle vectoriel. Cette technique qui est largement utilisée dans divers domaines tels que la régulation de la vitesse et du couple des moteurs à induction.

II.2 Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF) :

La commande vectorielle par orientation de flux appelée (FOC), introduite par Kovacs en 1959 et reprise par Blaschke en 1972, [11] est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones, [12].

La commande de champ orienté (FOC) est une méthode utilisée pour réguler la vitesse et le couple des moteurs électriques en ajustant les courants statoriques.

La FOC vise principalement à maintenir un flux magnétique constant dans l'axe du moteur et à réduire le flux dans l'axe q à zéro, dans le but de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité du moteur.

Deux méthodes principales peuvent être employées pour mettre en place la FOC : la méthode indirecte (feed-forward) ou la méthode directe (feedback). Le FOC direct utilise des mesures de capteurs tels que des capteurs à effet hall, des bobines de recherche ou d'autres techniques de mesure pour déterminer l'orientation du flux d'entrefer.

Trois méthodes de contrôle vectoriel utilisent le référentiel pour transformer les courants statoriques :

- La régulation du flux stator.
- La régulation du flux magnétisant.
- La régulation du flux rotor.

Lorsque le flux du rotor est orienté, il est aligné sur l'axe d du cadre orienté du flux du rotor d-q. Les équations du flux du rotor peuvent être écrites de la manière suivante :

$$\phi_{qr} = 0 \quad \phi_r = \phi_{dr} = \text{constant}$$

$$i_{dr} = \frac{\phi_r - \hat{L}_m \cdot i_{ds}}{L_r} \quad (\text{II-1})$$

$$i_{qr} = \frac{-L_m \cdot i_{qs}}{L_{lr} + L_m} \quad (\text{II-2})$$

$$L_r = L_{lr} + L_m [1 - f(Q)] \quad (\text{II-3})$$

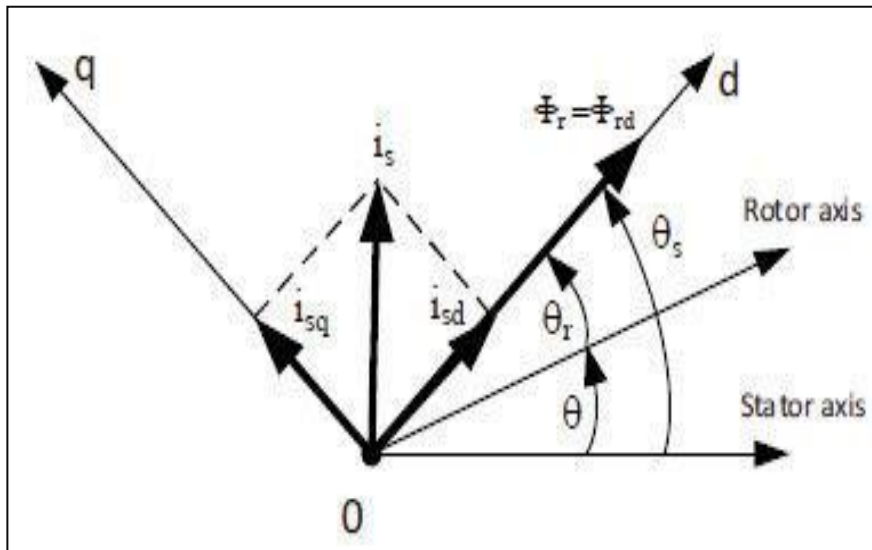


Figure II-1 Orientation du flux rotorique.

II.3 Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté :

Il est essentiel d'avoir une connaissance constante du module et de la phase de flux pour cette forme de contrôle. (Rotorique en situation). La méthode initiale implique de mesurer et d'évaluer directement l'amplitude et la phase du flux de la machine en utilisant des capteurs installés dans l'entrefer. Les capteurs sont soumis à différentes conditions (température, vibrations, etc.) et la mesure est accompagnée d'un bruit qui dépend du rythme des pinces. Peu importe le lieu de fonctionnement. ce mode de contrôle assure la déconnexion appropriée du flux et du couple, [13].

II.3.1 Expression de la commande a flux orienté (FOC) :

Pour article, [14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = \left(R_s + \hat{R}_r - \frac{\hat{R}_r \cdot \hat{L}_m}{L_r} \right) i_{ds} + \frac{\hat{R}_r}{L_r} \phi_r + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s \sigma' i_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma' \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} + \omega_s \frac{\hat{L}_m}{L_r} \phi_r \end{array} \right. \quad (II-4)$$

$$L_s = L_{ls} + \hat{L}_m \quad (II-5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 1 - \frac{\hat{L}_m^2}{L_s L_m} \\ \sigma' = (L_{ls} + L_m) - \frac{L_m^2}{(L_{lr} + L_m)} \end{array} \right. \quad (II-6)$$

La principale distinction entre un LIM et un RIM dans le domaine du moteur à induction conventionnel réside dans la caractéristique transitoire de ψ_{dr}^e . Il est obtenu de :

$$\Psi_{dr}^e = \frac{(L_m - L_r f(Q)) R_r}{(L_r - L_m f(Q)) p + R_r (1 + f(Q))} i_{ds}^e \quad (\text{II-7})$$

Comme :

$$I_{ds}' = \frac{1}{L_m} (1 + T_r P) \lambda_{dr}' \quad (\text{II-8})$$

$$I_{qs}' = \frac{4\tau}{3p\pi} \frac{f' L_r - L_m f(Q)}{\lambda_{dr}' L_m (1 + f(Q))} \quad (\text{II-9})$$

Les valeurs de référence des composantes de courant du stator, représentées dans le cadre de référence orienté flux du rotor, permettent de calculer la fréquence de glissement.

$$\omega_{sl} = \frac{R_r i_{qr}^e}{\Psi_{dr}^e} = \frac{1}{T_r} \frac{L_m}{\Psi_{dr}^e} i_{qs}^e \quad (\text{II-10})$$

On peut évaluer la fréquence angulaire primaire en analysant la vitesse angulaire linéaire ou angulaire en utilisant la fréquence de glissement. Cela se traduira par :

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl} \quad (\text{II-11})$$

La vitesse linéaire de la LIM est convertie en une vitesse angulaire en utilisant :

$$\Omega_r = \frac{\pi}{\tau} v \quad (\text{II-12})$$

La vitesse angulaire de Lino est représentée par ω_r et le pas polaire est τ .

On peut déterminer l'angle de position du flux en relation avec le primaire en utilisant :

$$\theta_e = \int \omega_r dt + \int \omega_{sl} dt \quad (\text{II-13})$$

II.3.2 Estimation de la force électromagnétique :

La force électromagnétique sera directement proportionnelle à l'extrémité du courant principal si l'axe de courant primaire est maintenu constant.

En se basant sur l'approche de commande vectorielle indirecte, on peut utiliser les équations suivantes pour décrire la variation, [14] :

$$F_e^* = k_f i_{qs}^* \quad (\text{II-14})$$

$$K_f = \frac{3\pi}{2\tau P} \frac{P L_m (1-f(Q))}{2 L_r - L_m f(Q)} \phi_{dr}^* \quad (\text{II-15})$$

$$i_{qs}^* = \frac{4\tau_p}{3\pi p} \frac{L_r - L_m f(Q)}{L_m (1-f(Q))} \frac{F_e^*}{\phi_{dr}^*} \quad (\text{II-16})$$

$$i_{ds}^* = \frac{1}{L_m} (1 + T_r P) \phi_{dr}^* \quad (\text{II-17})$$

Ou coefficient de force

La force de déplacement est représentée par :

$$F_e = \frac{3\pi P L_m (1-f(Q))}{2\tau_p 2 L_r - 1 m f(Q)} (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) = M v + D v + T_L \quad (\text{II-18})$$

$$F_e = k i_q \quad (\text{II-19})$$

$$F_e = M \frac{dv}{dt} + D v + F_l \quad (\text{II-20})$$

Ou encore la force électromagnétique. F_e est caractérisé par.

$$F_e = \frac{3n P \pi \widehat{L_m}}{2h L_r} (I_{s\beta} \psi_{r\alpha} - I_{s\alpha} \psi_{r\beta}) \quad (\text{II-21})$$

Selon la description de la force de poussée :

$$F_e = k (\lambda_{ds} I_{qs} - \lambda_{qs} I_{ds}) = M \frac{dv}{dt} + D v + F_l \quad (\text{II-22})$$

Où:

$$k = 3P\pi/4\tau$$

II.4 Découplage entré-sortie (par compensation) :

Il s'agit de réduire autant que possible l'effet d'une seule entrée à une seule sortie. Par la suite, il est possible de représenter le processus comme une série de systèmes monovariab les qui se déplacent simultanément. Les ordres ne peuvent plus être modifiés.

Différentes méthodes de déconnexion utilisent un régulateur, dont l'une est la connaissance compensatoire.

Deux nouvelles variables de commande v_{ds}' et v_{qs}' sont définies comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = v_{ds}' - E_{ds} \\ v_{qs} = v_{qs}' - E_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

$$\begin{cases} E_d = -\frac{\hat{R}_r}{L_r} \phi_r + \omega_s \sigma' i_{ds} \\ E_q = -\omega_s \sigma L_s i_{ds} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \phi_r \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

Les tensions v_{ds} et v_{qs} sont ensuite reconstruites à partir des tensions V_{ds}' et V_{qs}' .

$$\begin{cases} V_{ds}' = \left(R_s + \hat{R}_r - \frac{R_r \cdot L_m}{L_r} \right) i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} \\ V_{qs}' = R_s i_{qs} + \sigma' \frac{di_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

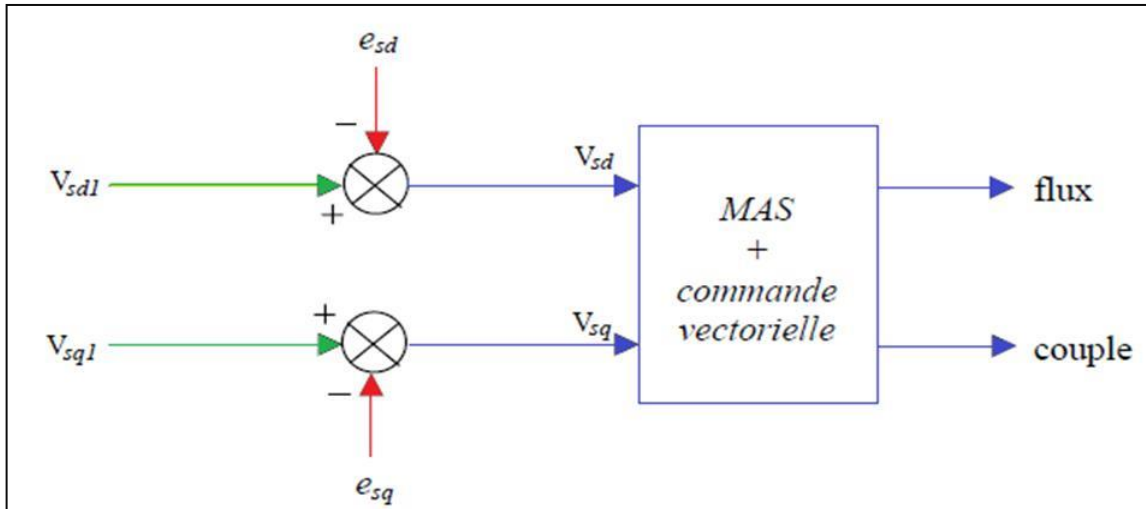


Figure II-2 Reconstitution des tensions

II.5 Régulation :

Quatre catégories différentes de contrôleurs font partie de la famille des contrôleurs PID :

Le contrôleur proportionnel (P), le contrôleur proportionnel plus intégrés (PI), les contrôles proportionnels plus dérivés (PD) et les contrôleurs de la proportionnelle plus intégrée et dérivée (PID), [15].

II.5.1 Régulateur de vitesse :

La figure II-3 présente la boucle de régulation externe de la vitesse. La force F_e (parfois appelée F_e , F_L force résistant) est la variable de contrôle :

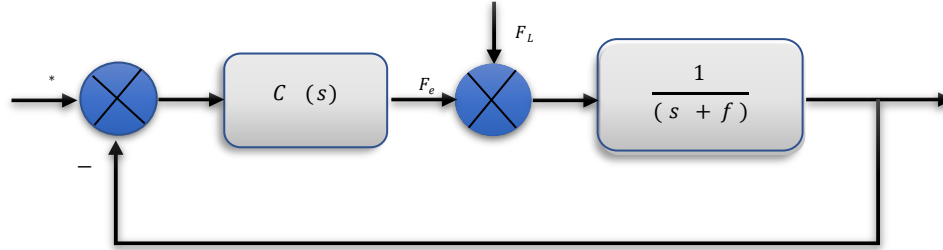


Figure II-3 Boucle de régulation de la vitesse.

Le régulateur PI a la fonction de transfert de la vitesse suivante :

$$C_{\Omega}(S) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{II-26})$$

La FTBO(S) correspond à la nullité de la perturbation F_L lors du calcul de la commande :

$$\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \frac{1}{(ms)} \quad (\text{II-27})$$

La FTBF(S) en boucle fermée est :

$$\frac{\Omega}{\Omega'} = \frac{\frac{K_p}{k_i}s + 1}{\left(\frac{m}{K_i}\right)s^2 + \left(\frac{K_p}{K_i}\right)s + 1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)s^2 + \left(\frac{2\zeta}{K_i}\right)s + 1} \quad (\text{II-28})$$

La forme canonique standard du système du second ordre est comparé à la réponse indicielle de ce système par :

$$\begin{aligned} \frac{m}{K_i} &= \frac{1}{\omega_n^2} \\ \frac{K_p}{k_i} &= \frac{2\zeta}{\omega_n} \end{aligned} \quad (\text{II-29})$$

En optant pour un coefficient d'amortissement (ζ) selon le tableau ci-dessous et en ajustant le temps de réponse, on obtient les valeurs du K_p et du K_i suivantes :

$$\begin{cases} K_i = m\omega_n^2 \\ K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_n} \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

$$\zeta = 0.7 \text{ et } \omega_n t_{\text{rep}} (5\%) = 3$$

II.5.2 Régulateur de courant :

La figure II-4 présente la boucle de régulation interne du courant i_{ds}' . La variable de régulation est la tension v_{ds}' . Il en va de même pour l'autre composante i_{sq} .

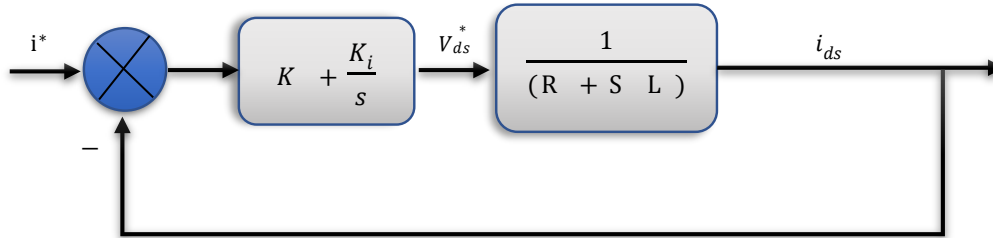


Figure II-4 Boucle de régulation de courant i_{ds}

En employant la méthode de compensation pole-zéro, la FTBO(S) est initialement calculée :

$$FTBO(S) = K_p \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{s} \frac{1}{\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + s \right)} \quad (II-31)$$

Le zéro du régulateur est compensé par le pôle du système :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_s}{\sigma L_s} \quad (II-32)$$

La FTBO(S) se transforme en :

$$\frac{K_p}{s} \frac{1}{\sigma L_s} \quad (II-33)$$

La FTBF(S) se transforme en un système de premier ordre en boucle fermée :

$$\frac{\frac{kp}{S\sigma L_s}}{1 + \frac{Kp + 1}{S\sigma L_s}} = \frac{1}{\frac{\sigma L_s}{kp} s + 1} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (II-34)$$

$$\tau = \frac{\sigma L_s}{Kp} \quad (II-35)$$

En optant pour une valeur, les paramètres du régulateur sont calculés de la manière suivante :

$$\begin{cases} kp = \frac{\sigma L_s}{\tau} \\ ki = \frac{R_s}{\sigma L_s} kp \end{cases} \quad (II-36)$$

II.5.3 Régulateur du flux ϕ_r :

La boucle externe est consacrée pour la régulation du flux rotorique (La grandeur ayant la dynamique la plus lente). Pour avoir un bon fonctionnement de la machine, le flux est maintenu constant à sa valeur nominale. [16]

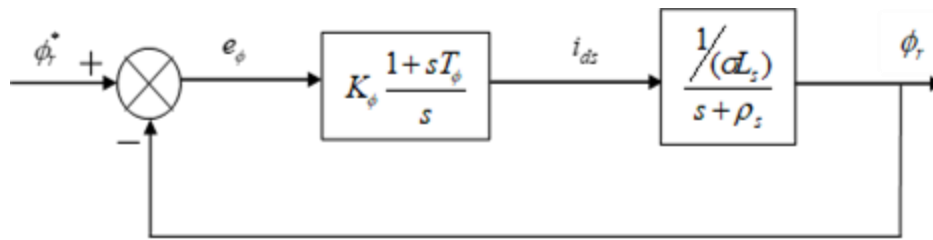
D'après l'équation (II-05), nous avons :

$$\frac{\Phi_r}{I_{ds}} = \frac{(L_m/T_r)}{s + \rho_r} \quad (\text{II-37})$$

Avec:

$$\rho_r = 1/T_r$$

D'où le schéma bloc de régulation du flux rotorique représenté par la figure (II-5) :



Fiuger II-5 : schéma bloc de régulation de flux

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suite :

$$\frac{\Phi_r}{\Phi_r^*} = \frac{K_\phi (1 + sT_\phi) L_m / T_r}{s^2 + s \left(\rho_s + K_\phi \frac{T_\phi L_m}{T_r} \right) + \frac{K_\phi L_m}{T_r}} \quad (\text{II-38})$$

De la même manière, pour dimensionner le correcteur, nous faisons appel au principe d'imposition des pôles.

En imposant deux pôles ($S_{1,2} = -\rho \pm j\rho$), les paramétrés de régulateur seront :

$$\begin{cases} K_{\Phi} = 2\rho^2 T_r / L_m \\ T_{\Phi} = \frac{2\rho - \rho_s}{2\rho^2} \end{cases} \quad (\text{II-39})$$

L'estimateur du module de vecteur flux rotorique et sa position est obtenue par les équation suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \phi_r^* = -\frac{1}{T_r} \phi_r^* + \frac{L_m}{T_r} i_{ds} \\ \frac{d}{dt} \theta = \omega_s = \omega + \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{qs}}{\phi_r^*} \end{cases} \quad (\text{II-40})$$

Note :

D'autres approches existent pour évaluer la taille du régulateur PI pour le LIM, comme la méthode de l'optimum symétrique.

II.6 Schéma bloc de la commande vectorielle directe :

Dans le cas d'un LIM, il est nécessaire de modifier le système de référence fixe en utilisant l'angle de position instantanée de flux, qui doit également être inversé lors de la mise en place de la commande orientée de champ (CV), comme le donne la figure II-1 :

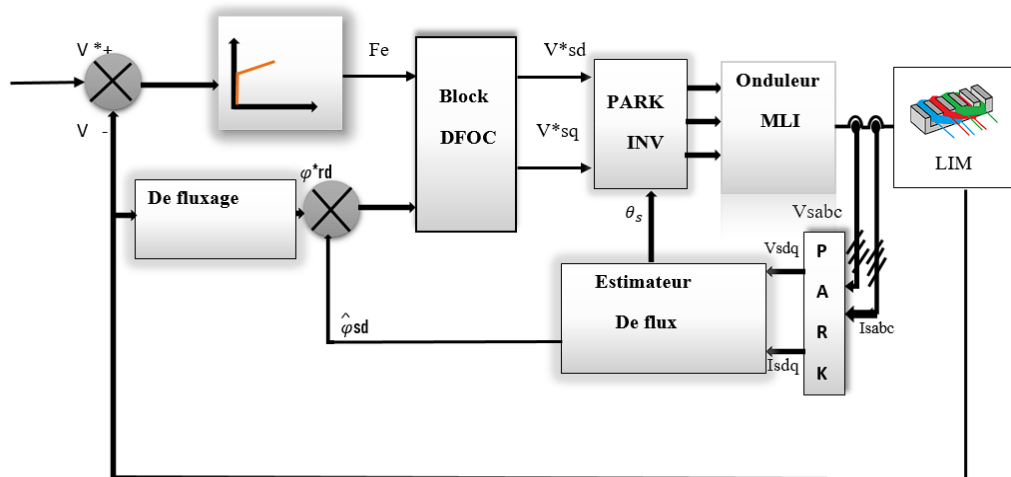


Figure II-6 Il est proposé un schéma fonctionnel de commande vectorielle pour LIM.

II.7 Résultats de simulation :

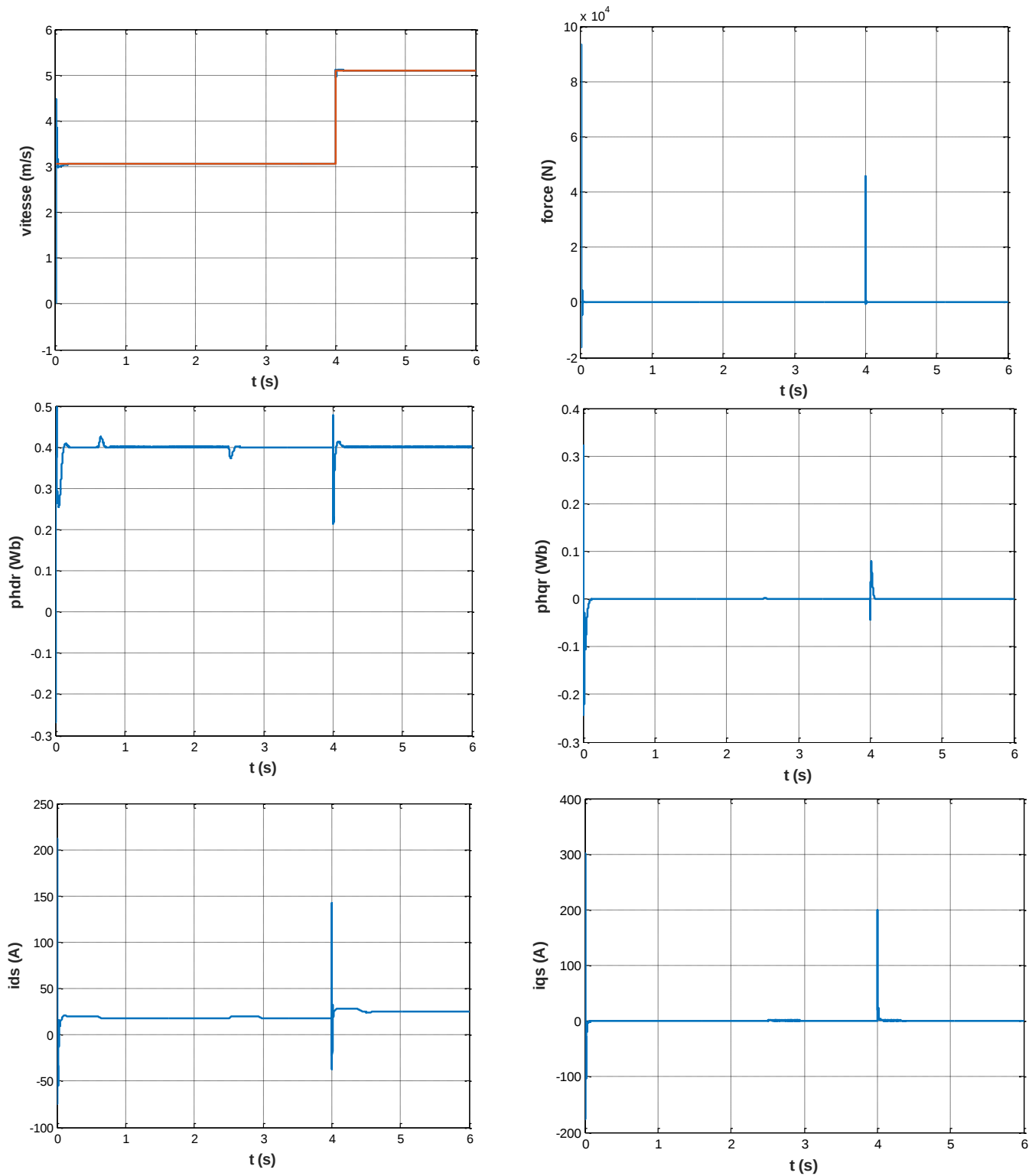


Figure II-7 Résultats de simulation de la DFOC du (LIM).

II.8 Interprétation des résultats :

La figure (II-6) présente les résultats de cette simulation en SIMULINK sous MATLAB, où on peut constater que :

Les simulations reportées sur les figures précédents montrent le comportement de la machine, lors d'un démarrage à vide avec une vitesse de 4.5(m/s) de référence, ensuite, nous procédons à un changement de la vitesse de référence vers 5.2 (m/s) à l'instant $t=4s$.

Les figures montrent que le réglage donne des résultats satisfaisants :

- La vitesse de rotation suit la vitesse de référence.
- Le courant est bien limité à sa valeur admissible.
- Le découplage est obtenu entre le courant I_{ds} et le couple électromagnétique.

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié la commande vectorielle directe LIM, et on a présenté quelques résultats de simulation qui nous permettent de constater l'évolution de la vitesse et la force, etc.

Grâce à cette approche, nous avons réussi à maintenir un équilibre optimal entre la force et le flux, et à rendre le moteur semblable à une machine à courant continu, ce qui facilite la gestion de la vitesse.

Chapitre III :

Généralité et étude d'un
système photovoltaïque

III.1 Introduction :

Ce chapitre débute en définissant cette énergie renouvelable en exposant le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ensuite, nous exposons la cellule photovoltaïque en décrivant les différentes méthodes de regroupement. Enfin, nous exposons les modèles mathématiques des cellules et du panneau. Nous examinons également l'impact de la température et de l'éclairage sur le rendement. Enfin, nous concluons par une conclusion.

III.2 la cellule photovoltaïque :

III.2.1 L'effet photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie Rayonnement en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau Semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque [17].

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement L'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport Dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de La lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre Un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la Première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P [18].

La zone dopée initialement n devient positivement chargée, tandis que la zone dopée Initialement p est négativement chargée. Ainsi, un champ électrique se forme entre elles qui cherche à repousser les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p. Une union (appelée p-n) a été créée. On obtient une diode en ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p. Quand on éclaire la jonction, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite transmettent leur énergie aux atomes. Chaque photon fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction, laissant également un trou capable de se déplacer, créant ainsi une paire électron-trou. En appliquant une charge aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n se connectent aux trous de la zone p par le biais de la connexion

extérieure, ce qui crée une différence de potentiel et entraîne la circulation du courant électrique, comme illustré dans la figure (III.1).

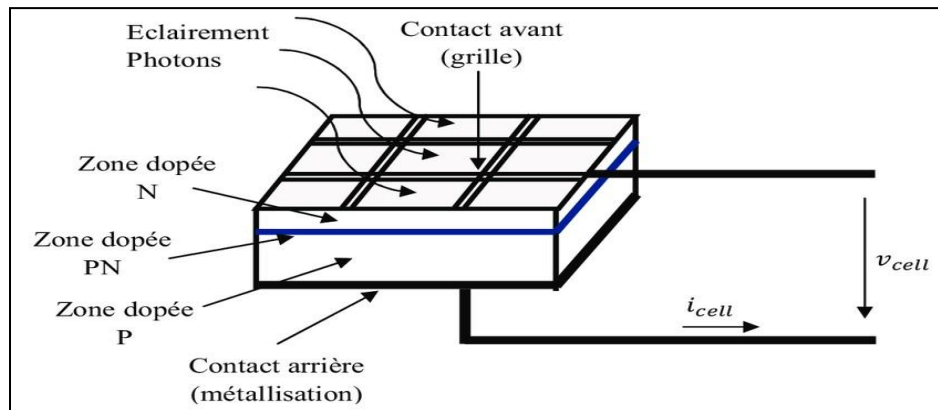


Figure III.1 Schéma d'une cellule photovoltaïque.

Les cellules peuvent avoir une taille allant de quelques centimètres carrés à 100 cm^2 ou plus, et elles peuvent avoir une forme circulaire, carrée ou dérivée des deux formes.

Les cellules sont connectées en série, permettant ainsi aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. L'objectif est d'obtenir une différence de potentiel généralement comprise entre 6 et 24 V. La figure (III.2) ci-dessous illustre le schéma électrique d'une cellule révolutionnaire.

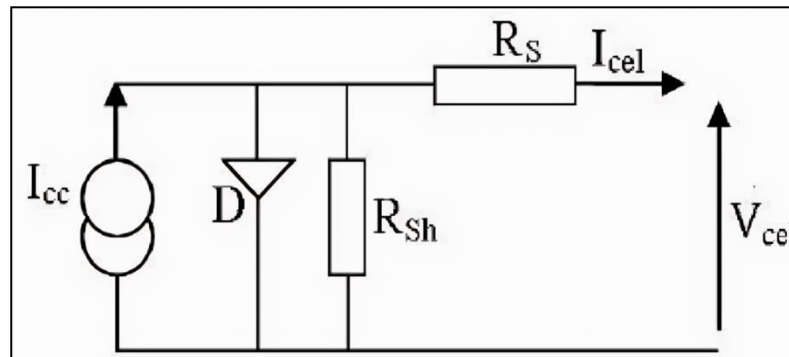


Figure III.2 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances R_s et R_{sh} sont utilisées pour prendre en considération les pertes causées par les défauts de fabrication. Les différentes résistances de contact et de connexion sont représentées par R_s , tandis que R_{sh} définit les courants de fuite causés par la diode et les effets de bord de la jonction.

III.3 Influence de la température :

Afin d'analyser comment la température affecte les paramètres de sorties d'un panneau photovoltaïque, nous avons établi une valeur d'éclairement de ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et tracé les courbes pour différentes températures.

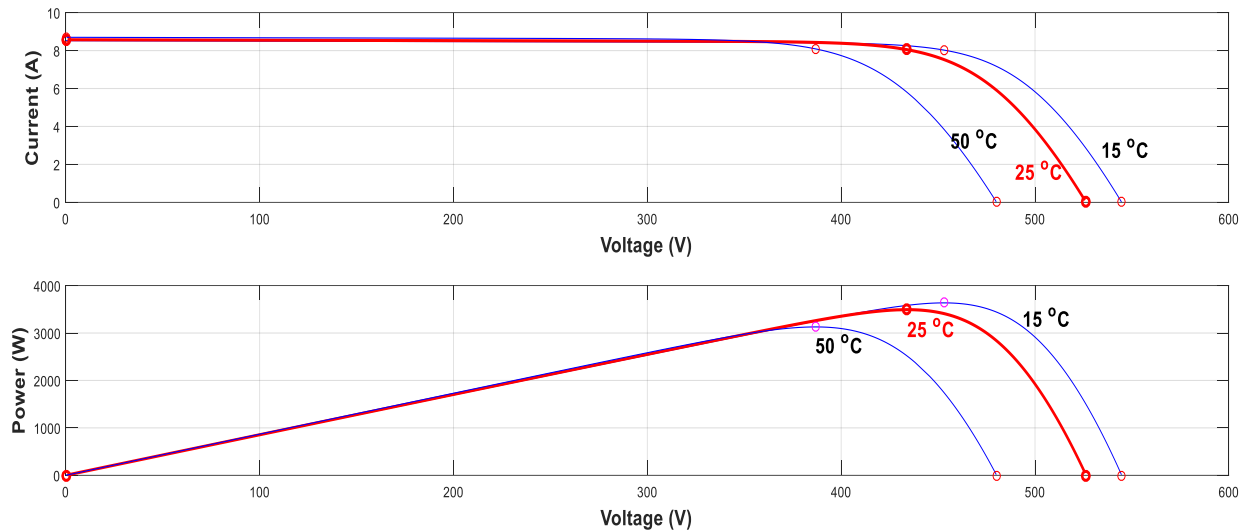


Figure III.3 Caractéristiques (I-V), (P-V) en fonction de la température

Selon la figure (III.3), il est observé que la puissance maximale du générateur diminue avec l'augmentation de la température.

III.4 Influence de l'éclairement :

Cette fois, la température est fixée à 25 degrés Celsius et des graphiques sont créés pour différentes intensités lumineuses.

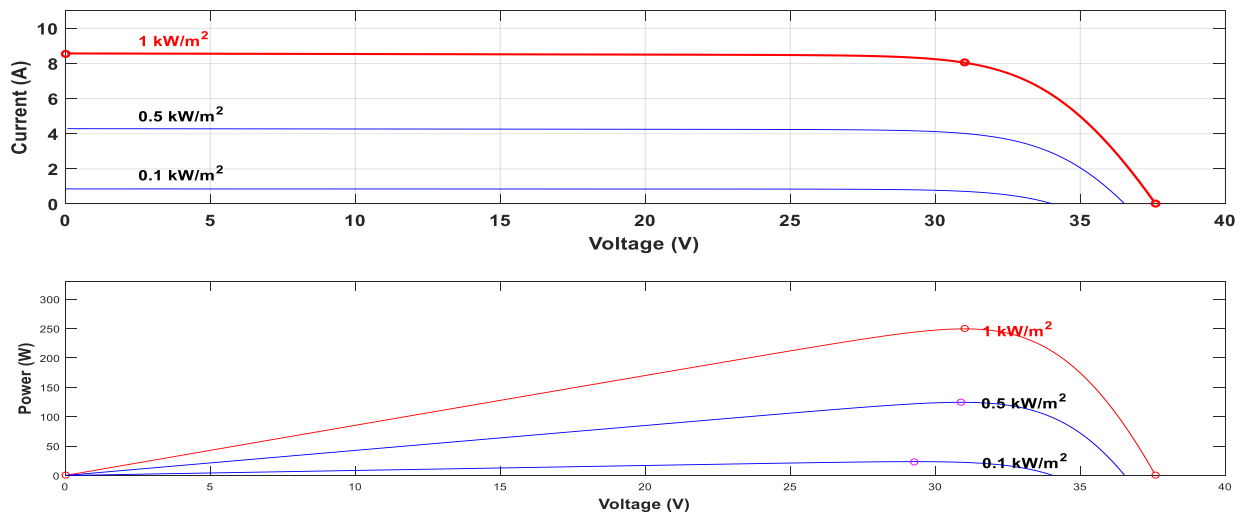


Figure III.4 Caractéristiques (I-V), (P-V) en fonction de l'éclairement

Il est clair que le flux montre une variation notable. À mesure que l'éclairement diminue, le courant diminue également. Comme la puissance est directement proportionnelle au courant, il est évident que plus le courant diminue, plus l'éclairement baisse. Cependant, on note une légère fluctuation de la tension.

III.5 Commande MPPT :

La technique MPPT, plus communément connue sous le nom de Suivi du Point de Puissance Maximale, est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Son but principal est d'ajuster automatiquement le rapport cyclique α afin d'optimiser la production d'énergie des panneaux solaires. Ainsi, nous allons maintenant vous présenter et étudier les algorithmes de commande les plus populaires dans ce domaine.

III.6 Principe de la commande MPPT :

Plusieurs méthodes ont été développées pour rechercher le point de puissance maximale (MPPT) dans le but d'optimiser l'extraction de la puissance maximale des panneaux solaires. Ces approches consistent à ajuster le point de fonctionnement en augmentant V_{pv} , lorsque $\frac{dp_{pv}}{V_{pv}}$ est positif ou en réduisant V_{pv} , lorsque $\frac{dp_{pv}}{V_{pv}}$ est négatif. Ces stratégies doivent comparer la puissance actuelle avec celle précédente, que ce soit en régime transitoire ou permanent. Leur efficacité dépend de la rapidité d'atteinte du point MPP, de leur stabilité autour de ce point et de leur capacité à éviter les divergences lors des variations soudaines d'ensoleillement ou de charge.

III.7 Différents commandes MPPT : (commande perturb & observe (P&O))

En général, la méthode P&O est la plus couramment employée en raison de sa simplicité et de sa facilité d'exécution. Les valeurs de tension V_{pv} et de courant I_{pv} sont utilisées comme entrées par cet Algorithme, et comme sortie la valeur de rapport cyclique α , [10].

Comme son nom l'indique et comme illustré dans la figure III-5, le principe de cet algorithme consiste à perturber la tension V_{pv} tout en modifiant le rapport cyclique α . Ensuite, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau $P(k)$ et la compare à la précédente $P(k-1)$, [20] : Si la puissance augmente, on s'approche du (MPP) et la variation.

Du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire si la puissance diminue, on s'éloigne du MPP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique. Comme illustre La figure III-6, [21].

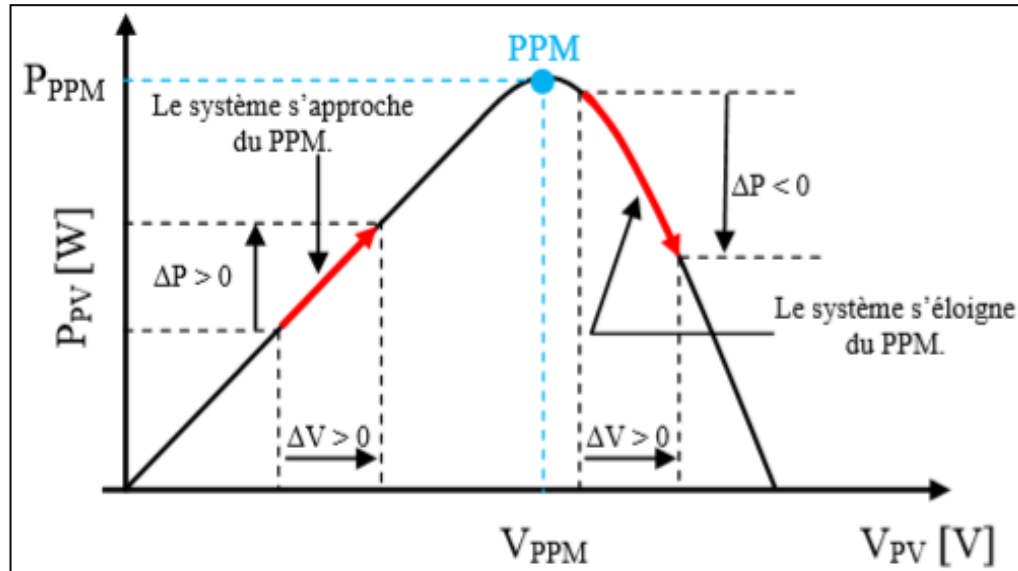


Figure III.5 Recherche du PPM par la méthode (P&O).

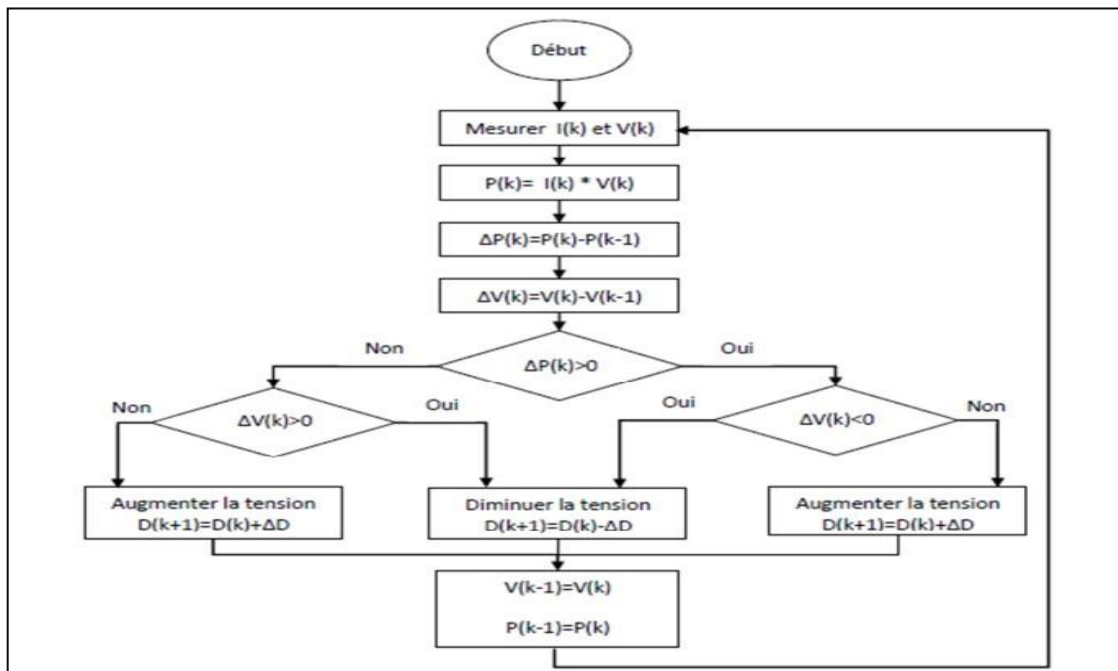


Figure III.6 Algorithme d'une commande MPPT (P&O).

III.8 La pompe centrifuge :

III.8.1 Présentation de la pompe centrifuge :

Le design de la pompe centrifuge vise à maintenir une hauteur manométrique totale (HMT) relativement constante.

Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à $Q \cdot HMT$, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). [pompe]

III.8.2 Constitution de la pompe centrifuge :

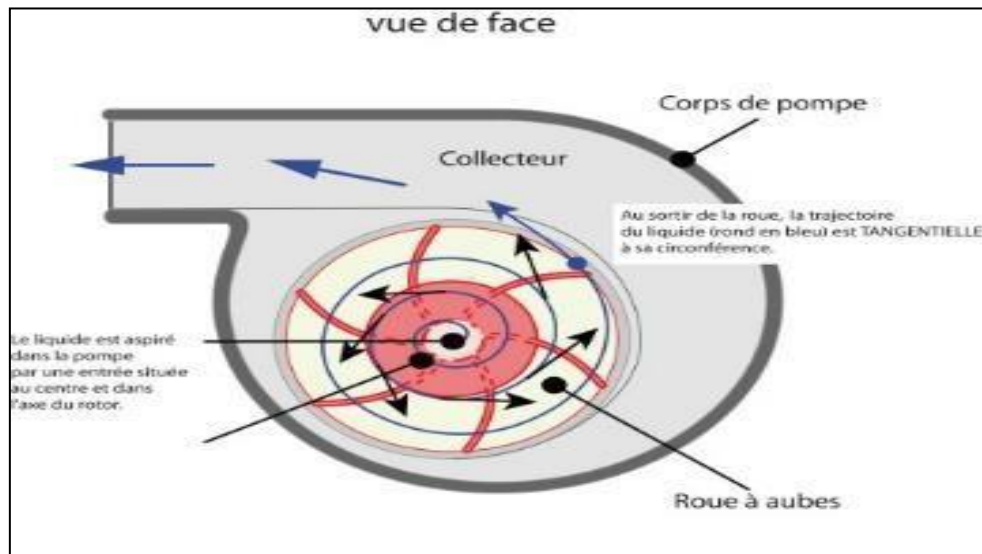


Figure III.7 vues en face d'une pompe centrifuge.

La pompe est constituée de deux composants indispensables :

Une roue qui entraîne une rotation du liquide. Elle repose sur un arbre alimenté par des paliers et propulsé par un moteur.

Un dispositif de pompe qui oriente le flux vers la roue et l'en éloigne à nouveau sous une pression accrue. La structure de la pompe est constituée d'une tubulure d'aspiration et d'une tubulure de refoulement, qui assure le support des paliers et de l'ensemble du rotor. [Constitution]

III.8.3 Fonctionnement de la pompe centrifuge :

Selon la théorie des pompes centrifuges, l'augmentation de l'énergie mécanique totale de la veine fluide entre l'entrée et la sortie de la roue est due à deux facteurs : l'augmentation de l'énergie de pression et l'augmentation de l'énergie cinétique. Cette dernière est convertie en énergie de pression par ralentissement progressif, ce qui est obtenu dans une pièce située à l'intérieur de la roue appelée limaçon, qui se termine par une concavité divergente.

III.9 Modélisation de la pompe centrifuge :

La pompe centrifuge fonctionne en utilisant trois paramètres : la hauteur, le débit et la vitesse.

III.9.1 Équations caractéristiques :

En général, les fabricants de pompes ne communiquent pas les caractéristiques physiques de la pompe. Le constructeur ne fournit que la caractéristique de performance $H = f(Q)$. De cette manière, en ayant connaissance des valeurs de la vitesse, de la hauteur de charge et du débit de référence, il est envisageable de calculer celles du système en utilisant les formules empiriques suivantes :

$$N_{sq} = \frac{1000 \left(\frac{N}{60} \right) \sqrt{Q}}{\left(\frac{gH}{N_{ep}} \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (\text{III -1})$$

$$Q = K_{sp} N (D_f)^3 \quad (\text{III -2})$$

$$C_r = K_{sp} \cdot \omega^2 \quad (\text{III -3})$$

Avec :

$$K_{sp} = \frac{p_m}{\omega^3} \quad (\text{III -4})$$

N_{sq} : Vitesse spécifique du rotor. **ω** : vitesse de l'arbre en rad/s.

N_{ep} : Nombre d'étages de la pompe. **Q** : débit de la pompe en l/s.

H : hauteur de charge effective en m. **N** : vitesse de l'arbre du rotor en tr/min.

III.11 Résultats de simulation :

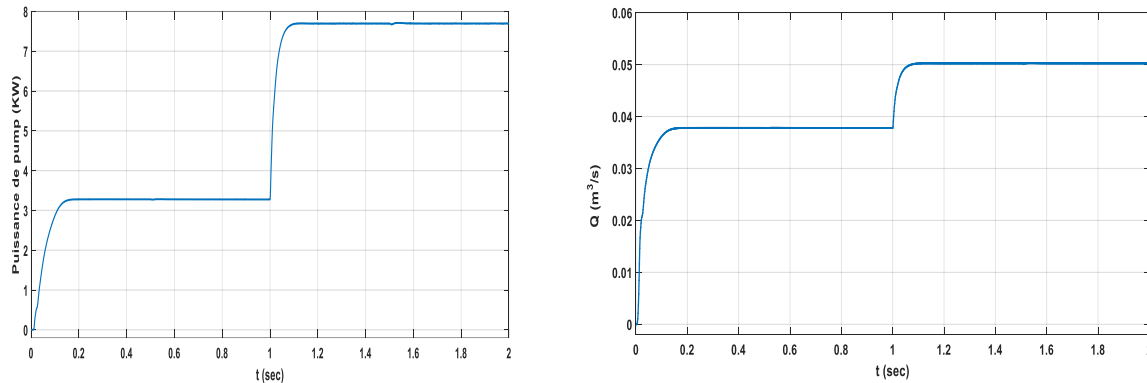


Figure III.10 Courbe de Puissance et débit en fonction du temps.

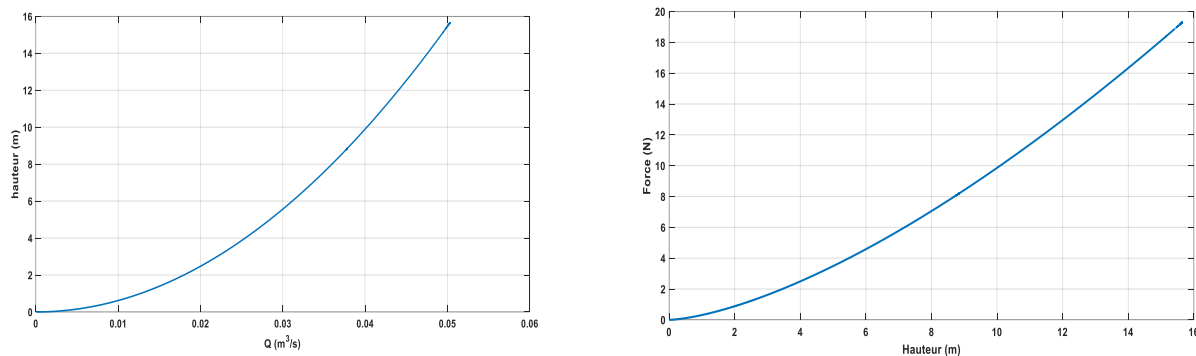


Figure III.11 Courbe de Force et débit en fonction de la hauteur.

III.12 Interprétation des résultats :

La figure (III-10) représente l'évolution du débit et puissance en fonction du temps, on voit que l'allure démarre par un débit de valeur $0.038 \text{ (m}^3/\text{h)}$ pour une puissance de 3.2 (Kw) , puis une augmentation atteindre $0.05 \text{ (m}^3/\text{h)}$ et 7.8 (Kw) .

L'allure figure (III-11) du débit et force en fonction de la hauteur augmente lentement pour des valeurs entre $[0-16]$.

III.13 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons réalisé la simulation des différents blocs du système de pompage photovoltaïque sous Matlab. Nous avons débuté par le module solaire de type Sun Power SPR-305E-WHT-D, dont nous avons obtenu les différentes courbes de simulation telles que $I=f(V)$ et $P=f(V)$. Ensuite, nous avons simulé le système solaire en analysant l'influence des variations de l'éclairement sur ses caractéristiques électriques. Enfin, nous avons terminé par l'obtention des différentes courbes relatives au moteur et à la pompe centrifuge.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire vise à concevoir un système de pompage solaire efficace en utilisant la commande vectorielle appliquée aux moteurs linéaires à induction. Cette approche novatrice cherche à optimiser le pompage d'eau dans les zones éloignées et hors réseau électrique, offrant ainsi une solution énergétique durable et économique. Pour ce faire, nous avons débuté par la modélisation des moteurs asynchrones linéaires ainsi que leur commande vectorielle. En parallèle, une étude approfondie sur la conversion photovoltaïque a été menée, suivie par l'élaboration d'un modèle mathématique pour les panneaux solaires en se basant sur un circuit équivalent à une diode. L'objectif était de simuler le fonctionnement du générateur et d'étudier l'impact de la température et de l'irradiation sur ses caractéristiques courant-tension et puissance-tension. Pour maximiser la puissance disponible du générateur et la transférer efficacement à la charge, nous avons utilisé un étage d'adaptation composé d'un hacheur contrôlé par un algorithme de poursuite de puissance maximale (P&O). L'objectif de cette adaptation était d'optimiser le transfert de puissance afin qu'il soit le plus proche possible de la puissance maximale du générateur. Les améliorations proposées dans ce travail sont simples et faciles à mettre en œuvre, tout en offrant des rendements remarquables. Les résultats des simulations démontrent que cette approche mérite une exploration plus approfondie et une concrétisation par une mise en œuvre pratique.

BIBLOGHRAPHIE

- [1] Dupont, J. (2023). *L'énergie solaire photovoltaïque et ses applications dans les zones rurales*. Éditions TechSol.
- [2] Zehden, A., "Travelling wave electric traction equipment," French patent 321692, applied for June 2, 1902.
- [3] T. Nireekshana and V. Ramesh Babu, "Design and Fabrication of linear induction motor for traction application," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEET)*, vol. 6, no. 6, pp. 1–18, 2017.
- [4] V. Rafalko, A. Rimmele, Q. Dong, and S. Biswas, "Dynamic Model Based Vector Control of Linear Induction Motor," NAVAL AIR WARFARE CENTER AIRCRAFT DIV LAKEHURST NJ, 2012.
- [5] Zelenay, Rosenfeld, and Dulait, "Travelling wave applied to electric railways," French patent 318 634, Feb. 12, 1902.
- [6] Rosenfeld and Zelenay, "Tangential traction," Bull. Ass. Ing. Mantefiore, Vol. 3, pp. 214–238, 1903.
- [7] Birkeland, K., Norwegian Patents 11 228, Apr. 22, 1902, and 13 052, Apr. 23, 1903.
- [8] Jones, M.F, "Three phase linear motor catapult system," U.S. Patent 2 404 984, July 30, 1946.
- [9] Ahmed Serier Redha & Bouhris Billel Mémoire De Master "Estimation Des Paramètres D'une machine Asynchrone A Cage" 2016/2017.
- [10] L. Khetache and R. Abdessemed, "A New Speed Control Approach of Linear Induction Motor Based on Robust RST Controller and Model Reference Adaptive System Estimator," *International Journal of Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 630–639, 2023.
- [11] F. BLASCHKE, « The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating-field
- [12] S. Meziane and H. Benalla, "Commandes adaptative et prédictive de la machine asynchrone," Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2009
- [13] N. E. ABBAS, "Etude comparative de la commande vectorielle directe et indirecte," Directeur: Mme. S. BOURI, 2022.

- [14] L. Khettache and R. Abdessemed, "A New Speed Control Approach of Linear Induction Motor Based on Robust RST Controller and Model Reference Adaptive System Estimator," *International Journal of Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 630–639, 2023
- [15] J. Crowe *et al.*, *PID control: new identification and design methods*. Springer, 2005.
- [16] L. Khettache and R. Abdessemed, "A New Speed Control Approach of Linear Induction Motor Based on Robust RST Controller and Model Reference Adaptive System Estimator," *International Journal of Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 630–639, 2023
- [17] B. Salaheddine , effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, setif: universite ferhat abbas, setif, 2011.
- [18] N. Debili, Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque, Constantine: université Constantine, 2015.
- [19] A. Talha, Développement d'une Méthode MPPT pour un Système Photovoltaïque, Premier Séminaire International sur les Energies Nouvelles 60 Références Renouvelables, Ghardaïa, Algeria: SIENR'2010, Ghardaïa, Algeria, 2010
- [20] F. BENADEL, Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV, mémoire de Master Académique, M'SILLA: département de génie électrique: université de Mohamed Boudiaf - M'SILLA, 2016.
- [21] H. Abbes, H. Abid et A. Toumi, «Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Tunisie,» 2013.

ANNEXE

➤ Paramètres du (LIM) :

Vitesse nominale	V_n	1450	m/s
Force nominal	F_e	50	N
Nombre de paires de pôles	p	4	/
Résistance statorique	R_s	1,25	Ω
Résistance rotorique	R_r	2,7	Ω
Inductance statorique	L_s	$40,1e-3$	H
Inductance rotorique	L_r	$33,1e-3$	H
Inductance mutuelle	L_m	$32,6e-3$	H
La longueur	D	0,286	m
La masse	m	8	Kg

➤ Paramètres du panneau solaire : (Module : Sun Power SPR-305E-WHT-D) :

Maximum Power (W)	305.226
Open circuit voltage Voc (V)	64.2
Voltage at maximum power point Vmp (V)	54.7
Temperature coefficient of Voc (% /deg.C)	-0.27269
Cells per module (Ncell)	96
Short -circuit current Isc (A)	5.96
Current at maximum power point Imp (A)	5.58
Temperature coefficient of Isc (% /deg.C)	0.061745

Onduleur MLI :

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire (Comme illustré sur la figure A-1).

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdales déphasées de 120° à la même fréquence [5]

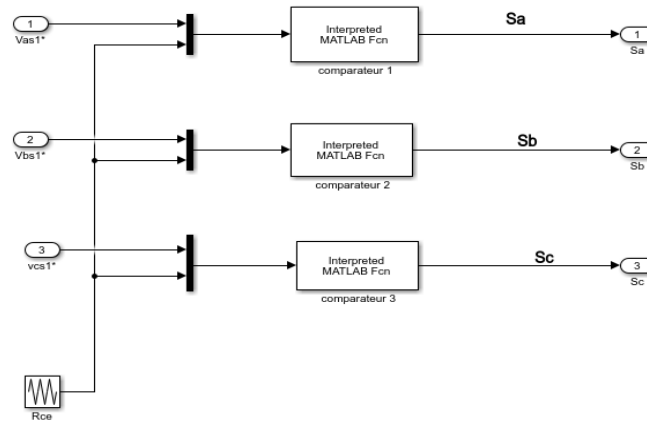


Figure A -1 : schéma bloc de la MLI sinus-triangle

Les deux principaux paramètres qui définissent cette technique est [6]:

- L'indice de modulation noté "m", exprime le rapport entre la fréquence de modulation et la fréquence de référence : $m = \frac{f_p}{f}$
- Le coefficient de réglage en tension, représenté par "r", indique le rapport entre l'amplitude de la tension de référence et la valeur crête de l'onde de modulation $r = \frac{V_m}{V_p}$

Le principe de la MLI sinus-triangle peut être illustré à l'aide du graphique suivant :

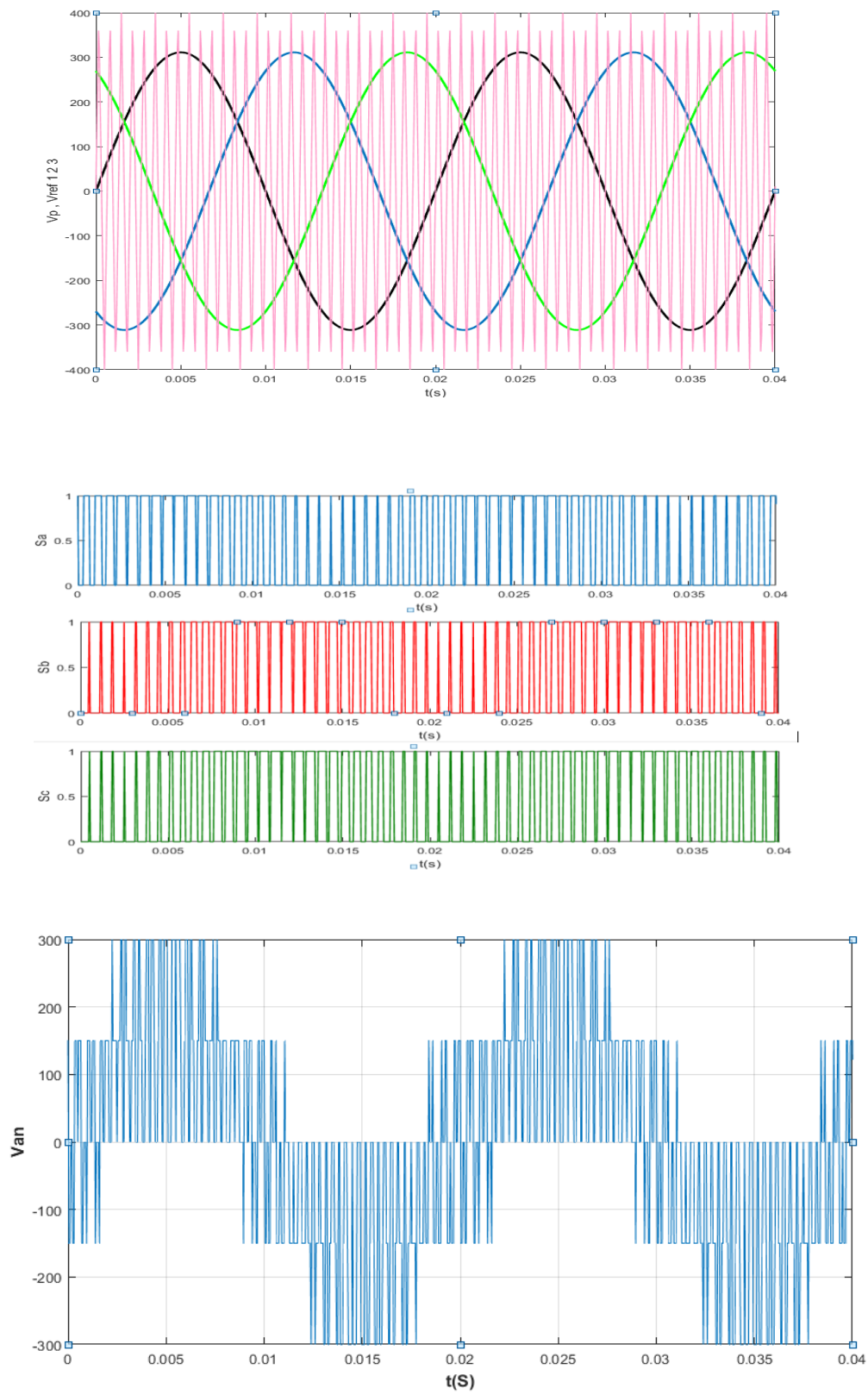


Figure A-2: Principe de la commande M.L.I sinus-triangle

Abstract:

This work presents modeling of photovoltaic (PV)-water pumping systems by integrating linear induction motor. Therefore, the implementation of the Perturb and Observe (P&O) Maximum Power Point Tracking (MPPT) method is presented to maximize the output power of the PV system. The main objective of this study is to investigate and analyze the combination of the linear induction motor and the centrifuge pump integrated into a solar water pumping system. LIM is highly nonlinear, which increasing its complexity and making control difficult. To overcome this issue, a Field-Oriented Control (FOC) technique. The accuracy of the proposed model is checked and validated using the MATLAB/Simulink environment software tool. Simulation results demonstrate that the combination of linear induction motors with centrifugal pumps. This confirms that it is a beneficial solution for cost-effective, eco-friendly, and efficient irrigation.

Keywords—: linear induction motor, Field-Oriented Control (FOC), Maximum Power Point Tracking (MPPT), Perturb and Observe (P&O), photovoltaic (PV)-water pumping, MATLAB/Simulink

Résumé :

Ce travail présente la modélisation des systèmes de pompage d'eau photovoltaïque (PV) en intégrant un moteur linéaire à induction (LIM). Pour maximiser la puissance de sortie du système PV, la méthode de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) Perturb and Observe (P&O) est mise en œuvre. L'objectif principal de cette étude est d'investiguer et d'analyser la combinaison du moteur linéaire à induction et de la pompe centrifuge intégrée dans un système de pompage solaire. Les LIM sont très non linéaires, ce qui augmente leur complexité et rend leur contrôle difficile. Pour résoudre ce problème, une technique de commande vectorielle (FOC) est appliquée. L'exactitude du modèle proposé est vérifiée et validée à l'aide de l'outil logiciel Matlab/Simulink. Les résultats de simulation démontrent que la combinaison des moteurs linéaires à induction avec des pompes centrifuges constitue une solution bénéfique pour une irrigation rentable, écologique et efficace.

- Mots-clés : Moteur linéaire à induction (LIM), commande vectorielle (FOC), la méthode de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT), Perturb and Observe (P&O), pompage d'eau photovoltaïque (PV), Matlab/Simulink.

المخلص:

يقدم هذا العمل نمذجة لأنظمة ضخ المياه الفوتوفولتية (PV) من خلال دمج محرك تحريضي خطي (LIM). ولزيادة القدرة الخارجة من نظام PV إلى أقصى حد، يتم تنفيذ طريقة تعقب نقطة القدرة القصوى

(MPPT) باستخدام طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو التحقيق وتحليل دمج المحرك التحريضي الخطي مع المضخة المركزية في نظام ضخ المياه الشمسي. تتميز المحركات التحريضية الخطية بغير خطية عالية، مما يزيد من تعقيدها ويجعل التحكم بها صعبًا. للتغلب على هذه المشكلة، يتم تطبيق تقنية التحكم الموجه بالحقول (FOC). يتم التحقق من دقة النموذج المقترح وتأكيده باستخدام أداة برنامج MATLAB/Simulink. تظهر نتائج المحاكاة أن الجمع بين المحركات التحريضية الخطية والمضخات المركزية هو حل مفيد للري الاقتصادي والصديق للبيئة والفعال.

الكلمات المفتاحية: --- محرك تحريضي خطي (LIM) ، التحكم الموجه بالحقول (FOC) ، تعقب نقطة القدرة القصوى (MPPT) ، الاضطراب والمراقبة (P&O) ، ضخ المياه الشمسي ، برنامج MATLAB/Simulink
