

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique

جامعة كاسدي مرباح ورقلة



Université Kasdi Merbah Ouargla

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par :

Haffaf Manel

Kadri Radia

Thème:

Optimisation et Simulation du Moteur à Induction linéaire (LIM)

Soutenu publiquement

Le :.../.../....

Devant le jury :

M^r **TAIBI Djamel**

MCB

Président

UKM Ouargla

M^r **Khettache Laid**

MCB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r **BOUREK Yacine**

MAA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre Créateur pour m'avoir donné la force pour accomplir ce travail

Nous exprimons toutes mes reconnaissances et gratitude à l'administration et à l'ensemble du corps enseignant de l'Université Kasdi Merbah-Ouargla pour leurs efforts à nous garantir la continuité et l'aboutissement de ce programme de Master.

Nos remerciements à l'encadreur Mr. KHETTACHE Laïd pour nous avoir guidées de ce travail, pour son aide, ses orientations, ses conseils et ses encouragements

Mon profond remerciement et ma gratitude vont aussi aux Membres du jury, pour leur accord de juger mon travail

Enfin, tous nos remerciements, nos reconnaissances et notre gratitude vont à nos très chers parents et à notre précieuse famille pour leurs soutiens indéfectibles, sans

Oublier nos amis (es).

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À celui qui m'a encouragé à persévérer tout au long de ma vie, à
l'homme le plus éminent de ma vie (mon cher père)*

*À celui avec qui je m'élève et dont je dépends du cœur qui donne (mon
cher mère), que Dieu les protège et bénisse leur vie*

Je dédie cet humble travail à mes sœurs "Chahinez et Nour",

Et mes frères "Bilal et Fares et Khaled"

*À ma famille, À mes amis et collègues en deuxième année de Master
"Machines Electriques"*

Et une dévotion spéciale à mon frère "Khair El-Din et Abdel Nour"

*Et à tous ceux qui ont contribué ne serait-ce qu'une lettre à ma vie
scolaire .*

Haffaf manel

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral

A quelqu'un qui me tient à cœur

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible

Merci d'être toujours là pour moi.

Radia kadri

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Introduction générale

01

Chapitre I: Etat de l'art du moteur a induction lineaire (LIM)

I.1.introduction	02
I.2.présentation du moteur linéaire	02
I.2.1.types de base de moteurs linéaires	02
I.3.structure et classement des moteurs linéaire	03
I.4.moteur à induction linéaire (LIM).....	05
I.4.1.principe de base d'un LIM	07
I.4.2.paramètres de construction d'un LIM	07
I.4.2.1.paramètres géométriques d'un LIM simple	08
I.5.particularités du moteur à induction linéaire (LIM).....	08
I.6.la force de déplacement.....	10
I.6.1.la force électromagnétique de laplace	10
I.6.2.la force normal F_z	11
I.6.3.la force de détente	11
I.7.domaines d'application	11
I.8.avantages et inconvénients des LIM	12
I.9.les recherches actuelles sur les moteurs linéaires.....	12
I.10.conclusion	14

Chapitre II:modelisation du moteur a induction linéaire

II.1.introduction.....	15
II.2.modélisation du moteur à induction.....	15

II.2.1.equations électriques.....	16
II.2.2.equations magnétiques.....	17
II.2.3.equations mécanique.....	18
II.3.transformation de park.....	19
II.3.1.choix du référentiel.....	20
II.3.2.equations de la machine dans le repère (d,q).....	21
II.4. modélisation en modèle d'état.....	24
II.5.simulation du moteur à induction.....	24
II.6.résultats de simulation.....	26
II.7.inerprétation des résultats.....	28
II.8.conclusion.....	28

Chapitre III:commande vectorielle directe du moteur a induction (LIM)

III.1.introduction.....	29
III.2.controle vectoriel orienté de champ.....	29
III.3.estimation de la force électromagnétique.....	34
III.4.découplage entré-sortie.....	35
III.4.1 Découplage par compensation.....	35
III.5 Calcul des régulateurs.....	36
III.5.1 Régulateur de vitesse.....	36
III.5.2 Régulateur de courant.....	38
III.6.shéma bloc de la commande vectorielle directe.....	40
III.7.shéma de simulation.....	41
III.8.résultats de la simulation.....	42
III.9.interprétation des résultats.....	44
III.10.conclusion.....	44

Conclusion générale **45**

Annexe

Bibliographie

Résumé

Listes des Figures

Chapitre I: Etat de l'art du moteur a induction lineaire (LIM)

Figure I.1. Géométrie linéaire plate en u et tubulaire.....	03
Figure I.2. Classement des moteur linéaires selon leur géométrie.....	04
Figure I.3. Classement des moteurs linéaires selon leur circuit magnétique.....	05
Figure I.4. Moteurs à induction linéaire (primaire simple).....	06
Figure I.5. Moteur à induction linéaire (primaire double).....	06
Figure I.6. Transformation d'un moteur rotatif à un moteur linéaire.....	07
Figure I.7. Géométrie d'un LIM (simple primaire).....	08
Figure I.8. Effets d'extrémité du LIM.....	10

Chapitre II: Modélisation du moteur à induction linéaire

Figure II.1. Schéma de simulation d'un moteur à induction linéaire alimentée en tension.	25
Figure II.2. Résultats de simulation d'un moteur à induction linéaire (MLI).....	27

Chapitre III:commande vectorielle directe du moteur a induction (LIM)

Figure III.1 Les nouvelles commandes obtenues	35
Figure III.2 Reconstitution des tensions	36

Figure III.3 Boucle de régulation de la vitesse36

Figure III.4 Boucle de régulation de courant i_{sd}38

Figure III.5. Schéma fonctionnel du contrôle orienté champ proposé pour LIM.....40

Figure III.6. Schéma de simulation de la CV du LIM.....41

Figure III.7. Résultats de simulation de la CV du LIM.....43

Nomenclature

LIM	Moteur à Induction Linéaire
DTC	Commande Direct de Couple
B	Induction magnétique
Φ	Flux magnétique
H	Champ magnétique
F	Force électro magnétique
N	Nombre de spires
E	Entrefer
T	Pas polaire
a, b, c	Indices correspondants aux trois phases
s, r	Indices relatif au stator et rotor respectivement
d, q	Axes correspondant au référentiel lie au champ tournant
α, β	Axes correspondant au référentiel lie au stator
V_s	tension statorique [V]
V_r	tension rotorique [V]
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)
M_{sr}	Matrice des inductances mutuelles statoriques.
M_{rs}	Matrice des inductances mutuelles rotoriques

ϕ_s	Flux statorique [Wb]
ϕ_r	Flux rotorique [Wb]
Fem	force électromagnétique [N]
M	masse du moteur
V	vitesse linéaire
Σ	coefficient de dispersion
L_m	inductance mutuelle cyclique
ωr	représente la vitesse angulaire linéaire
r, τ_p	le pas polaire
θ_r	angle entre les vecteurs flux stator et rotor

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Grâce au développement de l'électronique de puissance et de l'électronique de commande, il est désormais possible d'obtenir des machines asynchrones performantes telles que les machines à courant continu. Les moteurs à induction linéaires (LIM) sont des moteurs à courant alternatif qui fonctionnent selon les mêmes principes généraux que les autres moteurs à induction, mais sont généralement conçus pour produire un mouvement direct en ligne droite.

Les moteurs à induction linéaires ont généralement une longueur primaire ou secondaire spécifique, qui génère les effets finaux, alors qu'un moteur à induction classique est disposé en boucle sans fin.

Malgré leur nom, tous les moteurs à induction linéaires ne produisent pas de mouvement linéaire ; Certains moteurs à induction linéaire sont utilisés pour générer des régimes de grand diamètre là où l'utilisation d'un moteur primaire continu est trop coûteux.

Dans le but de développer des machines aux caractéristiques et performances élevées, un rendement important et une meilleure contrôlabilité, cette étude est intéressée à la modélisation et commande de la Machine Asynchrone linéaire (LIM).

Ce travail de mémoire est structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre, un état de l'art de moteur asynchrone linéaire, son principe de fonctionnement et ces caractéristiques sont présenté.

Dans le deuxième chapitre nous proposons une modélisation sous l'environnement Matlab /Simulink du moteur asynchrone linéaire (LIM) en utilisant la transformation de Park (triphasee / biphasée), ainsi l'effet d'extrémité qui prend en considération.

Le troisième chapitre met en œuvre une modélisation de la commande vectorielle de la machine asynchrone linéaire.

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont analysés et interprétés dans le but de montrer l'efficacité du modèle proposé de la MAS linéaire.

Finalement, ce mémoire sera achevé par une **conclusion générale** sur la commande proposée de la machine asynchrone linéaire, et les travaux qui peuvent être envisagés en perspectives.

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART DU MOTEUR A INDUCTION LINEAIRE (LIM)

I.1. Introduction

Avant d'aborder l'étude un état d'art sur l'historique des moteurs linéaires dans plusieurs domaines sera présenté puis une liste des différents types de moteurs linéaires et leur domaine d'application sera établi. Par la suite, le champ d'études au moteur linéaire à doubles primaires qui représentera l'objet de notre analyse sera choisi.

I.2. Présentation du Moteur Linéaire

Les moteurs linéaires sont de plus en plus utilisés, mais sont encore peu répandus. Ces moteurs ont un comportement proche des moteurs rotatifs traditionnels, mais ont certaines spécificités qui les rendent complexe à mettre au point. Ce paragraphe aborde les types de base et les différentes structures du moteur linéaire. [1]

I.2.1. Types de base de moteurs linéaires

Ces moteurs se divisent en deux grands groupes :

a) Les moteurs linéaires à accélération faible :

Ils sont généralement utilisés pour les applications dans lesquelles l'endurance (ou la résistance) est favorisée par rapport à la puissance ou l'énergie. [2]

b) Les moteurs linéaires à accélération rapide :

Ces types de moteurs linéaires sont conçus pour le transport (trains à lévitation magnétique) et les systèmes automatisés. Les moteurs linéaires à accélération rapide sont des moteurs qui peuvent produire des vitesses plus élevées pour des courtes périodes de temps, tels que ceux utilisés dans les équipements militaires (torpilles, lanceur, etc), d'engins spatiaux de propulsion, etc. [3]

I.3. Structure et classement des moteurs linéaire

Les moteurs linéaires sont caractérisés par plusieurs topologies avec des géométries de type plat ou tubulaire. Ces différentes variantes offrent une multitude de possibilités

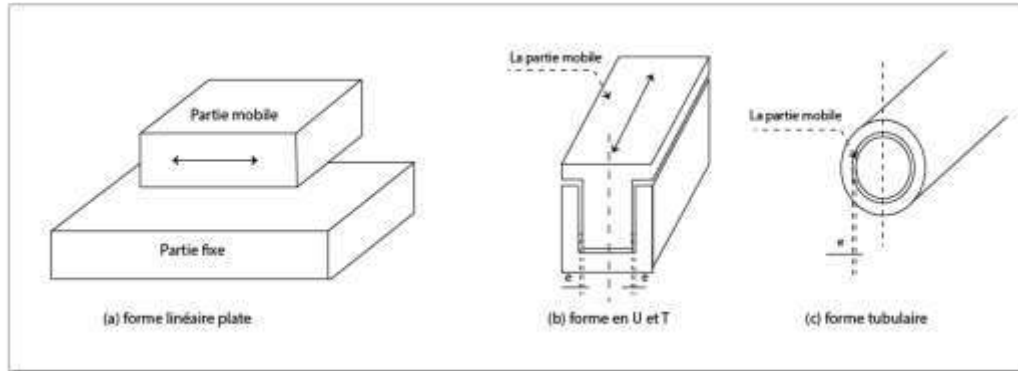


Figure I.1. Géométrie linéaire plate en u et tubulaire

A chaque type de moteur linéaire correspond un type de moteur rotatif. Cela permet d'avoir le même classement que les moteurs rotatifs. Mais les moteurs linéaires peuvent aussi être classés suivant leur géométrie.

Le classement selon la géométrie implique deux grandes familles du moteur linéaires : le moteur linéaire à géométrie plate et à géométrie tubulaire. Ils peuvent être divisés encore en deux parties selon la géométrie du primaire : long ou court. Les moteurs linéaires à géométrie plate peuvent être encore sous-divisés selon le nombre de primaires : à primaire double et à primaire simple.

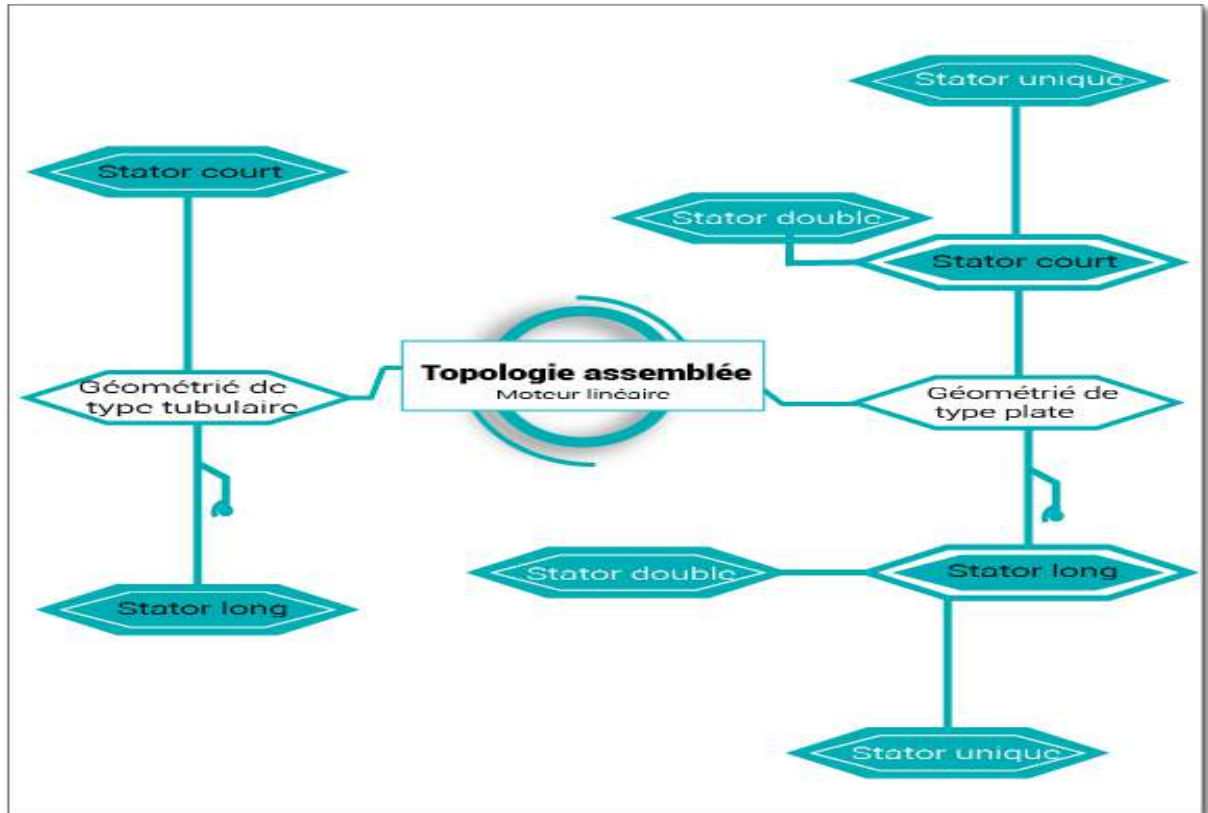


Figure I.2. Classement des moteurs linéaires selon leur géométrie

Les moteurs linéaires électromagnétiques sont les plus utilisés et peuvent être divisés en trois parties : les moteurs à inductions linéaires, les moteurs linéaires synchrones et les moteurs linéaires à courant continu.

Le moteur étudié dans notre travail est un moteur à induction linéaire à géométrie plate à double primaire.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous sommes limités à la description du moteur à induction linéaire plat. [4].

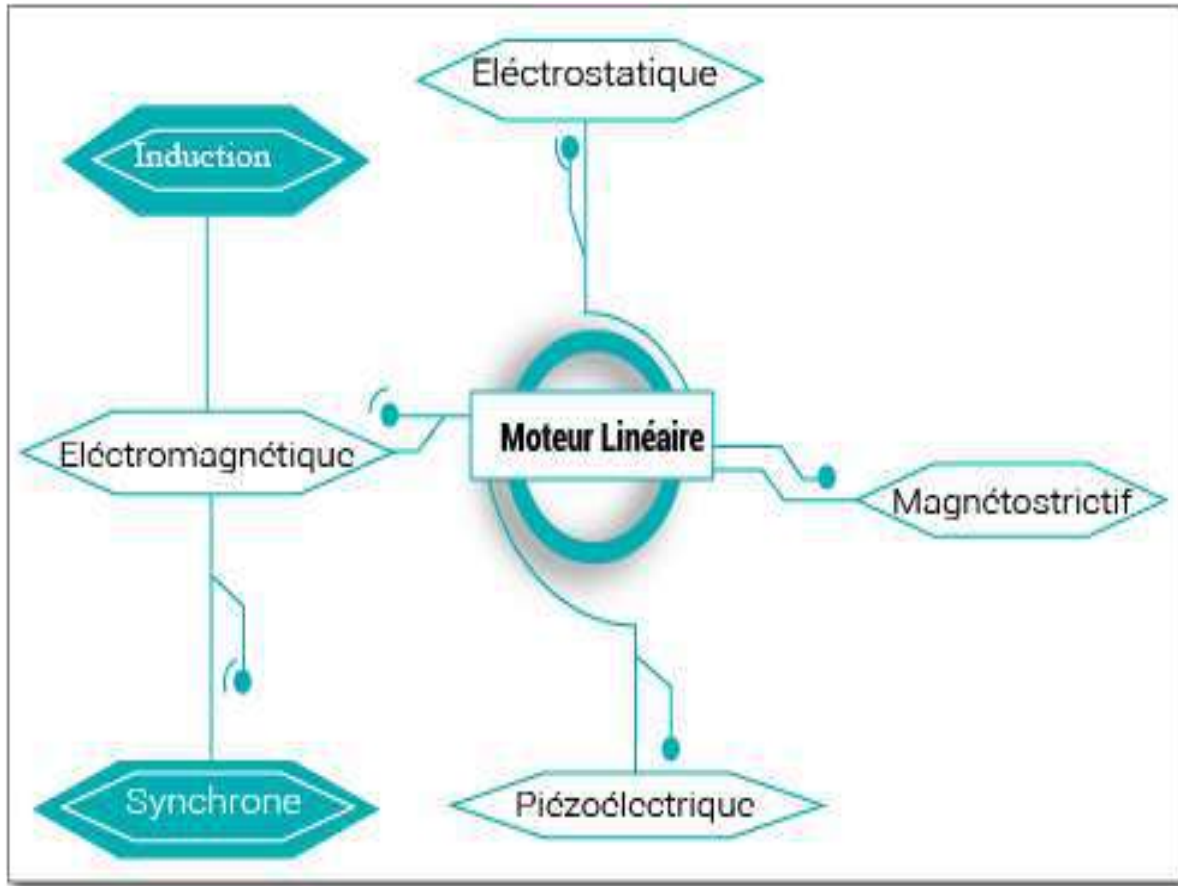


Figure I.3. Classement des moteurs linéaires selon leur circuit magnétique

I.4. Moteur à Induction Linéaire (LIM)

Ces moteurs sont les moins chers par rapport aux autres types linéaires, leur grand avantage c'est sa robustesse venant de la simplicité de la construction.

Les structures plates peuvent être classées selon le nombre de primaires :

Primaire unique (stator unique) : Cette structure est la plus utilisée, car elle s'intègre facilement dans la majorité des applications (Figure I.4).

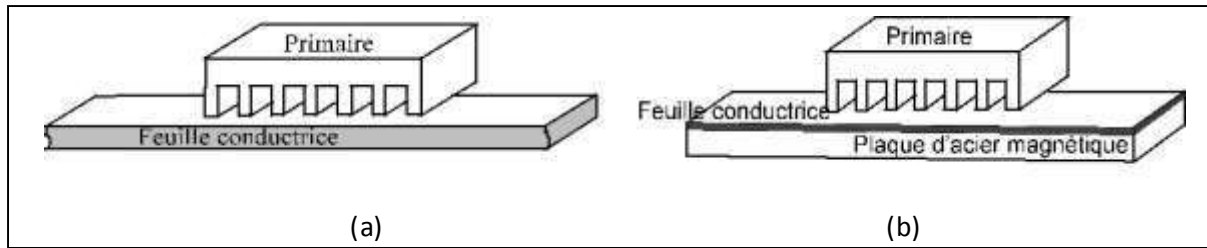


Figure I.4. Moteurs à induction linéaire (primaire simple)

La figure I.4(a) présente un moteur a primaire simple sans circuit magnétique de retour, les lignes d'induction se ferment dans l'air.

La figure I.4(b) présente un moteur linéaire a induit composite constitué d'une feuille conductrice appliquée sur une plaque d'acier magnétique assurant le retour du flux.

Primaire double (stator double) : Il permet d'obtenir, d'une part des forces de poussées plus élevées que pour la structure a stator unique et d'autre part d'alléger la partie mobile, car si cette dernière est bien centrée.

Ils sont les plus utilisés dans l'industrie, et peuvent être divisés en trois parties : les moteurs linéaires à inductions, les moteurs synchrones linéaires et les moteurs linéaires à courant continu.

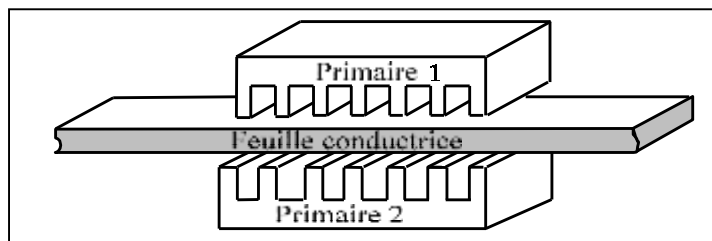


Figure I.5. Moteur à induction linéaire (primaire double) [5]

La figure I.5 présente un moteur linéaire à double primaires avec une partie secondaire conductrice.

Cette dernière structure a été retenue comme structure de base dans le cadre de notre travail.

I.4.1. Principe de base d'un LIM

Le principe de base d'un LIM est le même que celui d'un moteur à induction rotatif. Le moteur à induction linéaire peut être considéré comme un moteur relatif qui a été coupé selon la direction radiale et déroulé à plat (figure I.6).

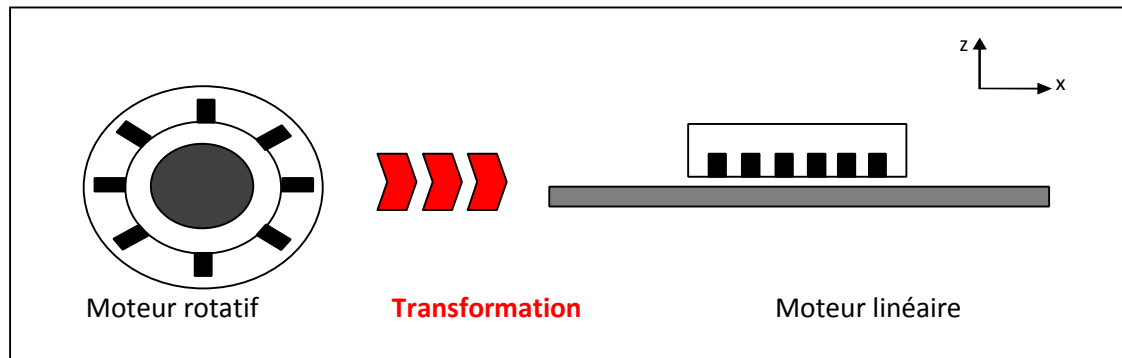


Figure I.6. Transformation d'un moteur rotatif à un moteur linéaire.

Le primaire (stator) se compose des enroulements équilibrés qui sont uniformément placés dans les encoches. Le secondaire (rotor) est construit par une plaque conductrice.

Quand les enroulements de primaire sont alimentés par un système triphasé de tension alternatif \square un champ magnétique de traction apparaît sur la longueur du primaire. Ce champ tourne à une vitesse synchrone dans l'entrefer et par conséquent, il induit des courants de Foucault dans la plaque secondaire. L'interaction du champ magnétique primaire avec le champ magnétique des courants de Foucault donne naissance à la force de poussée qui déplace et crée le mouvement du moteur.

I.4.2. Paramètres de construction d'un LIM

La construction d'un moteur à induction linéaire implique de nombreux paramètres qui peuvent être modifiés pour affecter les performances de la machine [6]. Les performances LIM à déterminer sont la poussée et l'efficacité.

I.4.2.1. Paramètres géométriques d'un LIM Simple

L'intervalle d'entrefer effectif e_e de cartes du LIM est différent de l'entrefer physique e , à cause des ouvertures d'encoches du primaire, comme le montre la (figure I.7) et Selon Gieras [1].

$$e_e = K_c \cdot e$$

Où k_c est le coefficient de carter.

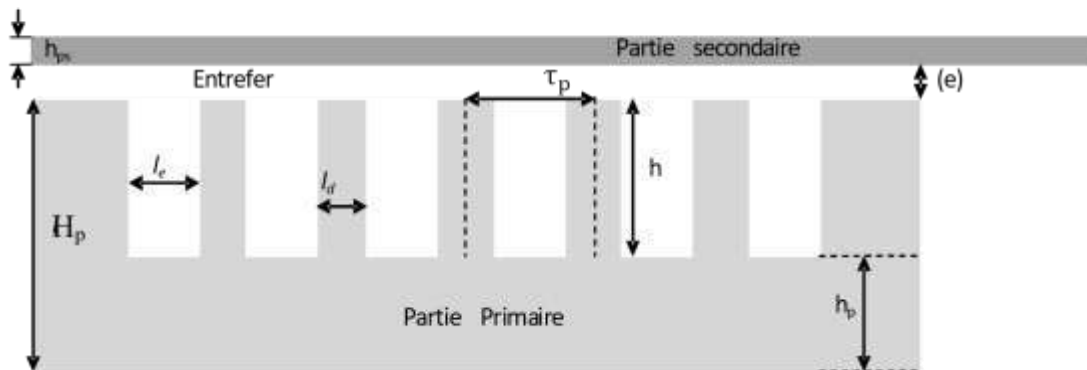


Figure I.7. Géométrie d'un LIM (simple primaire).

I.5. Particularités du moteur à induction linéaire (LIM)

Suite à leur fonctionnement, le LIM présente des spécificités dues à la disposition de leur partie mobile par rapport à leur partie fixe, ou s'introduisent des effets spéciaux, généralement parasites, et qui interviennent peu dans les machines rotatives. Notamment des systèmes de guidage particuliers, entraînant de nouvelles contraintes au niveau de l'entrefer magnétique. De de leur structure géométrique. Ces différences technologiques par rapport aux moteurs rotatifs doivent être prises en compte au moment de la conception et de la réalisation pratique. [7]

a) Entrefer

Le choix de l'entrefer est une partie très importante dans la conception des machines électriques, pour une vitesse synchrone linéaire donnée, on remarque que le facteur de qualité est inversement proportionnel à l'entrefer. Donc, l'élargissement d'entrefer rend le facteur de qualité plus faible et augmente les pertes des extrémités.

b) Guidage

Le centrage d'un rotor dans une structure rotative est beaucoup plus simple et efficace que le guidage sur une structure linéaire pour laquelle la résultante d'attraction peut être importante et difficile à maîtriser à cause de la distance entre les primaires. Les efforts d'extrémités dépendent de la surface active d'entrefer. Si cette dernière est plate et unique, les efforts d'extrémités sont loin d'être négligeables et créent des contraintes très fortes sur le guidage. La meilleure solution pour minimiser ces efforts est d'essayer d'adopter des structures symétriques, par exemple, avec des stators doubles. Les efforts normaux ont alors une résultante nulle si le centrage est précis, mais l'équilibre obtenu est instable et il subsiste toujours un effort résiduel de décentrement. Il est donc nécessaire de réaliser un guidage mécanique très précis.

C) Effets d'extrémités

Comme il a été présenté ci-dessus, le moteur linéaire est caractérisé par des extrémités ouvertes (une entrée et une sortie). À cause de ces ouvertures, le circuit magnétique du moteur linéaire a toujours d'importants effets d'extrémités, les effets d'extrémités de longueur et de largeur finie. Les effets d'extrémités de longueur finie sont représentés longitudinalement par des ondes supplémentaires de champ magnétique qui se développent à l'entrée et à la sortie du moteur (figure I.8 en bleu). Ces effets s'appellent les effets d'extrémités de longueur finie ou effets longitudinaux. Dans le secondaire (en Aluminium ou en Cuivre) des courants horizontaux de forme circulaire, vont apparaître à cause de l'effet des lignes de champs d'extrémité traversant le secondaire (figure I.8 en Rouge). Les courants induits au secondaire sont des courants de Foucault qui expliquent l'effet d'extrémité de largeur finie ou des effets transversaux. [8]

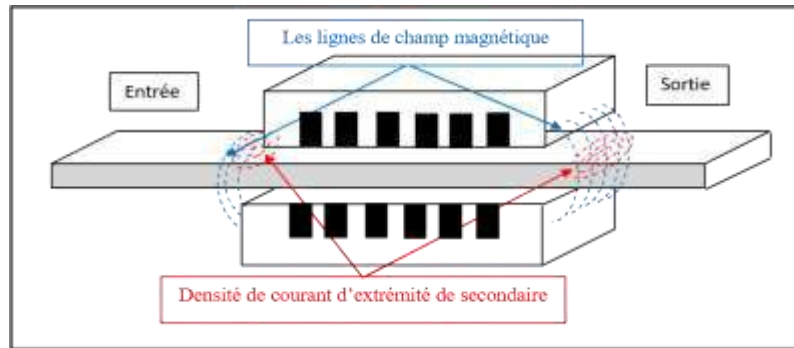


Figure I.8. Effets d'extrémité du LIM. [9]

I.6. La force de déplacement

Un moteur linéaire est un moteur électrique dont le « rotor » et le « stator » ont été « mis à plat ». Alors qu'un moteur rotatif classique produit un couple (rotation), et le moteur linéaire produit une force (translation) qui est proportionnelle à l'induction magnétique et permettant le déplacement d'objets ou de véhicules. La principale force de déplacement est une force tangentielle. Elle peut se calculer par la loi de Laplace.

I.6.1. La force électromagnétique de Laplace

La force de Lorentz se réduit à la force de Laplace en absence de charge électrostatique. La force électromagnétique \vec{F} s'exprime alors :

$$\vec{F} = I \times \vec{lB} \quad (I.1)$$

La force magnétique \vec{F} n'agit donc que sur un conducteur traversé par un courant I .

Pour N conducteur (nombre de spires de la bobine) traversant l'encoche de longueur active l soumis à une induction magnétique (de module B), la force vaut :

$$F = N \cdot l \cdot l \cdot B$$

(I.2)

Les autres forces sont perturbatrices. Elles peuvent être déterminées numériquement, par l'évaluation du tenseur de Maxwell ou de la force de Lorentz.

I.6.2. La force normal Fz

Dans les actionneurs linéaires synchrones à aimants permanents, la force normale (c'est-à-dire perpendiculaire au déplacement) est la source des contraintes mécaniques sur la structure.

I.6.3. La force de détente

Par définition, la force de détente est la force issue. En présence de courant, ces phénomènes d'interaction aimant / fer sont toujours présents mais ne correspondent plus à la définition de la force de détente. On parlera donc d'ondulations de force, la force de poussée n'étant alors que la composante utile de la force électromagnétique. L'interaction aimant / fer participe aux ondulations de force qui sont indésirables pour le bon fonctionnement de l'actionneur. Dans la littérature, les forces de denture (cogging) et les forces d'extrémités sont regroupées sous le nom de force de détente :

$$Forcededétente = Forcesdecogging + Forcesd^0extrémités$$

I.7. Domaines d'application

Les moteurs à inductions linéaires sont principalement développés pour dépasser les limites d'applications et remplacer des moteurs tournants. Les applications du moteur à induction linéaire sont très variées, ils sont destinés aux plusieurs domaines principalement pour associés aux systèmes de transformation de mouvement ou pour des applications dynamiques, de grande précision de positionnement :

- Les applications machines-outils, orientées.
- Les applications pilotées au moyen d'un PC.

- Les semi-conducteurs et les circuits imprimés (montage et contrôle final des composants en microélectronique), la machine textile, la manutention, l'emballage, les machines de découpe au laser, les lecteurs de disque dur.
- Les techniques médicales.
- La traction ferroviaire exemple : Transrapid (Allemagne) et Maglev (Japo).
-

I.8. Avantages et inconvénients des LIM

Les avantages apportés par le LIM sont principalement les suivants :

- Grande dynamique de mouvement (vitesse maximale ou accélération).
- Grande précision ou résolution de positionnement.
- Accroissement de la durée de vie, grande fiabilité.
- Réduction du nombre de composants pour réaliser un axe motorisé.
- Flexibilité et souplesse avec, entre autres, la possibilité de monter plusieurs parties mobiles indépendantes sur un seul axe.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Perturber le processus en cours par les échauffements produits par le moteur dans la zone de travail.
- Le circuit magnétique du moteur peut attirer des particules magnétiques (i.e. copeaux d'usinage) avec un risque d'accumulation locale problématique.
- Un moteur placé dans un environnement agressif (i.e. certaines huiles, eau) doit être protégé de manière adéquate.

Dans ces divers cas, un moteur rotatif combiné à une transmission mécanique peut être déporté plus facilement. La plupart du temps, ces problèmes sont néanmoins gérables avec un entraînement direct.

I.9. Les recherches actuelles sur les moteurs linéaires

Au Japon, le *Maglev* à grande vitesse (Tokyo Nagoya - Osaka) représente la prochaine évolution. Environ 450 kilomètres de rail seront placés entre Tokyo et Osaka pour une vitesse

maximale de 600 km/h. Le voyage prendra un peu moins d'une heure. Le projet *Swissmetro* est un projet national Suisse. La recherche a commencé en 1970.

Le *Swissmetro* est un train qui voyage dans des tunnels sous faible pression, et peut atteindre une Vitesse de 500 km/h. L'entreprise *Swissmetro SA* s'occupe de coordonner le projet depuis 1992.

Environ 50 millions de francs suisses ont été investis. Bien que des simulations aient été effectuées, le projet n'est pas encore susceptible d'être lancé dans l'immédiat. Au Royaume-Uni, le projet de ligne *Ultraspeed* est une ligne *Maglev*, entre Londres et Glasgow, liant également les villes d'Edimbourg, Birmingham, Manchester, Newcastle, et Liverpool. Le projet est basé sur la technologie du Transrapid. Les trains voyageaient à une vitesse de 500 km/h réduisant ainsi de manière significative le temps de déplacement entre les grandes villes du Royaume-Uni.

Les progrès du moteur linéaire se font sur les applications à faible course et le positionnement. Les études actuelles concernent surtout :

- Les systèmes motorisés multidirectionnels.
- Les méthodes d'analyse systématique de systèmes à moteurs linéaires.
- Les méthodes de mesure et d'évaluation des moteurs industriels.
- La promotion des moteurs linéaires dans l'industrie médicale (IRM).

Actuellement, les activités de recherche pour les moteurs linéaires s'articulent autour des axes suivants :

- La méthodologie de conception pour optimiser et standardiser la réalisation de ces machines.
- Commandes permettant de réduire les perturbations extérieures.
- Commandes limitant les variations des paramètres (évolution et répartition de la masse, etc.).
- Commande et structures de machines réduisant les effets d'ondulation de force et de force de détente.
- Commandes et optimisations de la force de poussée du moteur linéaire.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art des moteurs à inductions linéaires a été réalisé, puis le principe de base du moteur linéaire et le processus de transformation virtuelle d'un moteur rotatif à un moteur linéaire ont été montrés. Par la suite, le classement des moteurs linéaires selon la géométrie et le principe de fonctionnement a été expliqué.

Les différents types de moteurs linéaires à induction de forme plate sont présentés. Finalement, les avantages et les inconvénients des moteurs linéaires ont été montrés.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à la modélisation et simulation de moteur à induction linéaire.

CHAPITRE II

MODELISATION DU MOTEUR A INDUCTION LINEAIRE (LIM)

II.1. Introduction

Un moteur à induction linéaire ou moteur asynchrone est un moteur électrique dont le principal avantage est l'absence de contacts électriques glissants de sorte qu'il a été largement utilisé dans l'industrie, résultant en une structure simple, solide et facile à construire. Le modèle devient nécessaire pour l'étude du système d'exploitation transitoire et permanent. Le choix d'un modèle de représentation, qu'il soit formel ou résultat d'une sélection, se fait toujours en fonction du type de commande à réaliser [10] [11].

Ce modèle peut être obtenu par l'application de la transformation de Park sur le modèle triphasé réel, ou bien par l'utilisation de la notation complexe (modélisation vectorielle). Pour établir un modèle simple qui décrit bien le fonctionnement du moteur à induction.

II.2. Modélisation du moteur à induction

La modélisation du moteur à induction s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, en général [12],[13],[14],[15] :

- L'entrefer du moteur est d'épaisseur uniforme, négligeant ainsi l'effet des encoches.
- Le circuit magnétique non saturé et à une perméabilité constante, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température, en négligeant l'effet de peau et les pertes fer.
- Le bobinage triphasé est symétrique et la répartition de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale.

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

- Les équations électriques.
- Les équations magnétiques.
- L'équation mécanique.

II.2.1. Equations électriques

En appliquant la loi d'Ohm généralisée à chaque phase, les équations de tension des trois phases statoriques et rotoriques s'écrivent pour le stator avec l'indice "s" et le rotor avec l'indice "r" comme suit :[13],[14],[16]

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T \quad : \text{Vecteur tensions statorique.}$$

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

$$[V_r] = [V_A \ V_B \ V_C]^T \quad : \text{Vecteur tensions rotorique.}$$

$$[I_r] = [I_A \ I_B \ I_C]^T \quad : \text{Vecteur courants rotorique.}$$

$$[\Phi_s] = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^T \quad : \text{Vecteur flux statorique.}$$

$$[\Phi_r] = [\Phi_A \ \Phi_B \ \Phi_C]^T \quad : \text{Vecteur flux rotorique.}$$

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

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$\text{Pour le stator :} \quad [V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II-3})$$

$$\text{Pour le rotor :} \quad [V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II-4})$$

II.2.2. Equations magnétiques

Les relations linéaires entre les flux et les courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [M_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

Tel que :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (\text{II-6})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (\text{II-7})$$

Avec :

- L_s : Inductance propre d'une phase statorique.
- L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.
- M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques.
- M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

Pour le stator :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (\text{II-8})$$

Pour le rotor :

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \quad (\text{II-9})$$

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

M_0 : Valeur maximale des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

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

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statorique.

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

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle stator-rotor.

II.2.3. Equation mécanique

L'équation du mouvement est donnée par :

$$F_e - F_r = m \frac{dv}{dt} \quad (\text{II-11})$$

$$\omega_t = (\pi v) / \tau$$

F_e : Force électromagnétique.

F_r : Force résistance.

m : Masse du moteur

V : Vitesse

Vitesse mécanique des équations précédentes font apparaître des difficultés pour la résolution analytique du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position. Cela conduit à l'usage de la transformation de Park, qui permettra de rendre ces termes indépendants de la position.

II.3. Transformation de Park

La transformation de Park, repose sur l'utilisation de deux phases au lieu des trois phases d'axes fixes du stator (a,b,c) ou du rotor (A,B,C). En effet, on considère l'enroulement équivalent formé de deux bobinages d'axes perpendiculaires (d, q) tournant à la vitesse ω_a par rapport au stator et à la vitesse Ω par rapport au rotor. La transformation de Park consiste à transformer la représentation du moteur triphasée équilibrée à une représentation biphasée équivalente caractérisée par deux axes d, q .

Pour transformer un système triphasé $[abc]$ en un système biphasé $[d, q]$ avec une composante homopolaire comme indiqué dans l'équation suivante :

$$\begin{cases} [Vdq0] = [A][VRST] \\ [idq0] = [A][iRST] \\ [\Phi dq0] = [A][\Phi RST] \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

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

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta_a & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

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

$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -\sin \theta_a & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

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

On peut appliquer la transformation de Park :

Pour le stator

$$[H_{sdq0}] = [A_s][H_{sRST}] \quad (\text{II-15})$$

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

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

De même Pour le rotor on a :

$$[H_{rdq0}] = [A_r][H_rRST] \quad (\text{II-16})$$

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

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

II.3.1. Choix du référentiel

Selon le repère choisi, la position des deux axes (d, a) peut être fixée par rapport aux trois référentiels suivants :

- Référentiel lié au stator ($\theta_a = 0$), ou système d'axes (α, β) .
- Référentiel lié au rotor ($\theta_a = \theta_r$), ou système d'axes (x, y) .
- Référentiel lié au champ tournant ($\theta_a = \theta_s$), ou système d'axes (d, q) .
-

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

C'est le repère le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

Dans ce repère, l'application de la transformation de Park, les équations électriques et magnétiques modélisant le moteur à induction sont alors les suivantes :

a) Equations électriques

Les équations des tensions statoriques et rotoriques dans le système d'axe (d, q) s'écrivent : [11],[15]

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + R_r f(Q)(i_{ds} + i_{dr}) + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{qs} \\ 0 = R_r i_{dr} + R_r f(Q)(i_{ds} + i_{dr}) + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II-17})$$

b) Equations magnétiques

De plus les composantes des flux statoriques et rotoriques sont exprimées par :

Avec :

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (1 - f(Q))(i_{ds} + i_{dr}) \\ \phi_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \phi_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (1 - f(Q))(i_{ds} + i_{dr}) \\ \phi_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \end{array} \right. \quad (\text{II-18})$$

$$Q = \frac{D.R_r}{(L_m + L_{lr})v} \quad (\text{II-19})$$

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

$$\omega_r = \frac{\pi}{\tau_p} v \quad (\text{II-20})$$

La transformation de la vitesse linéaire du LIM en vitesse angulaire est donnée par :

$$\omega_r = \frac{\pi}{\tau_p} v \quad (\text{II-21})$$

Ou $\mathcal{D}r$, représente la vitesse angulaire linéaire et r est le pas polaire.

$$\hat{L}_m = L_m[1 - f(Q)] \quad (\text{II-22})$$

Avec :

$$f(Q) = \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \quad (\text{II-23})$$

$$\hat{L}_m = L_m[1 - f(Q)] \quad (\text{II-24})$$

$$\hat{R}_r = R_r f(Q) \quad (\text{II-25})$$

$$\begin{cases} L_s = L_{ls} + \hat{L}_m \\ L_r = L_{lr} + \hat{L}_m \end{cases} \quad (\text{II-26})$$

$$\sigma = \frac{L_s L_r - \hat{L}_m^2}{L_r}$$

$$\sigma' = (L_{ls} + L_m) - \frac{L_m^2}{(L_{lr} + L_m)} \quad (\text{II-27})$$

Avec :

m est directement proportionnelle au mutuel stator-rotor.

L_s , : Inductance cyclique statorique.

L_r , : Inductance cyclique rotorique.

L_m : Inductance cyclique mutuelle entre stator et rotor.

Compte tenu des pertes par courants de foucault il y a une résistance apparait dans la branche transversale la résistance \hat{R}_r est :

$$\hat{R}_r = R_r f(Q) \quad (\text{II-28})$$

Remarque : équations mentionnées ci-dessus utilisées pour la modèle Simulink de LIM en (10) également $f(Q)$ est utilisé pour exprimer l'effet final sur le facteur de magnétisation de LIM dans le modèle Simulink

L'équation dynamique de LIM est exprimée par :

$$F_e = Mv + D\dot{v} + T_L \quad (\text{II-29})$$

c) Expression de la force électromagnétique

Une expression du force électromagnétique de l'équation mécanique de la machine :

$$F_e = \frac{3\pi P}{2\tau_p} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II-30})$$

d) Expression de la force mécanique

$$F_e = \frac{3\pi P L_m(1-f(Q))}{2\tau_p L_r - L_m f(Q)} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) = Mv + D\dot{v} + T_L \quad (\text{II-31})$$

τ_p : est le pas polaire

II.4. Modélisation en modèle d'état

La représentation d'état de la machine à induction dépend des variables d'état choisis et qui sont fonctions des objectifs liés à la commande et à l'observation. Le plus souvent, ces variables d'états choisis sont la vitesse dont on veut contrôler l'évolution, le courant statorique puisque il est mesurable, et le flux rotorique estimable dont on cherche à assurer la régulation de sa norme. :

$$X = [i_s \ \varphi_r \ \omega]$$

Pour le modèle d'alimentation en tension de la machine (onduleur de tension), l'équation d'état s'écrit:

$$X' = AX + BU, \quad X = [i_{sd} \ i_{sq} \ \varphi_{rd} \ \varphi_{rq} \ \omega]^T, \quad U = [V_{sd} \ V_{sq}]^T \quad (\text{II-32})$$

II.5. Simulation du moteur à induction

La simulation a été effectuée par le logiciel « Simulink » sous « Matlab ». Dans cette partie on présentera la simulation numérique d'une machine à induction, ce schéma élaboré à partir des équations suivantes :

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

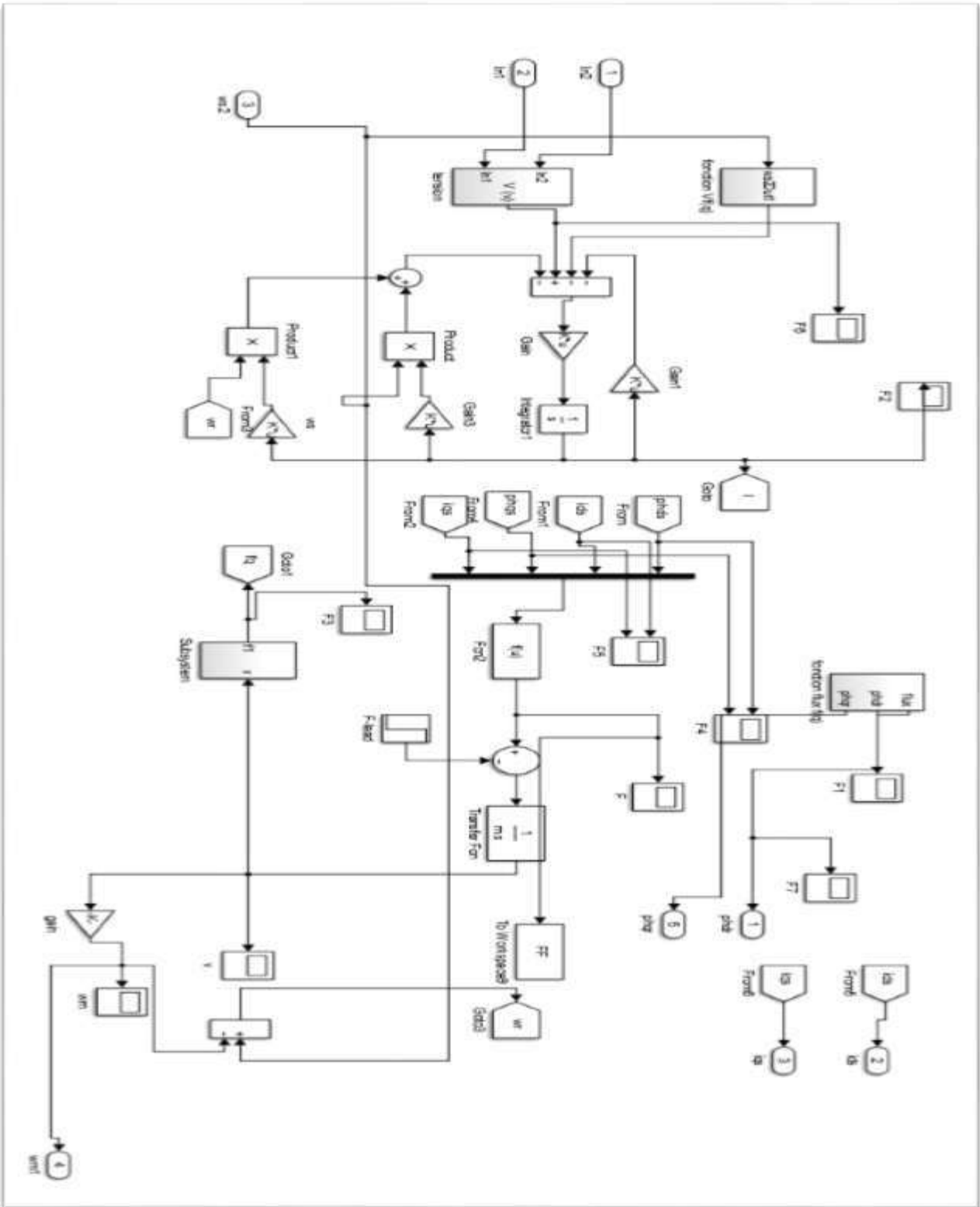
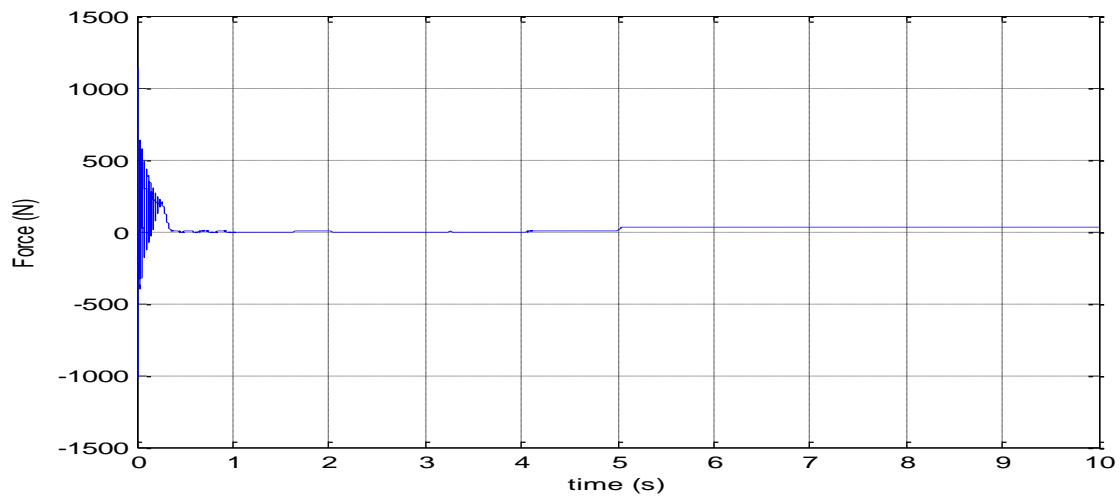
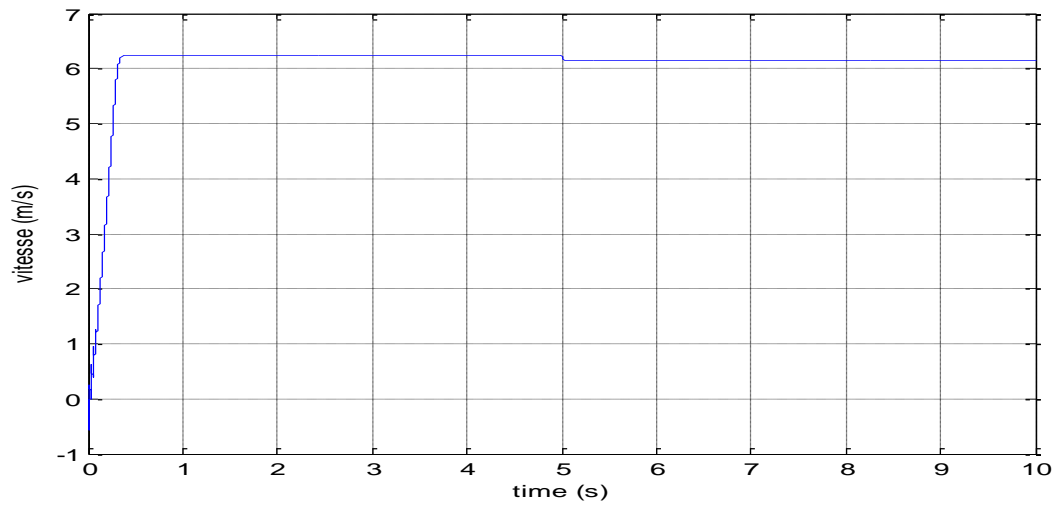
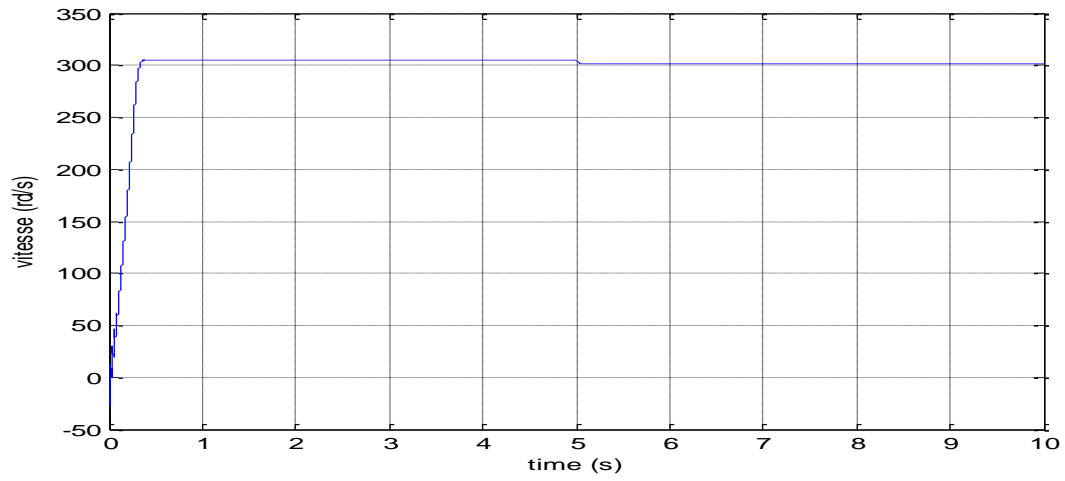


Figure II.1. Schéma de simulation d'un moteur à induction linéaire alimentée en tension.

II.6. Résultats de simulation



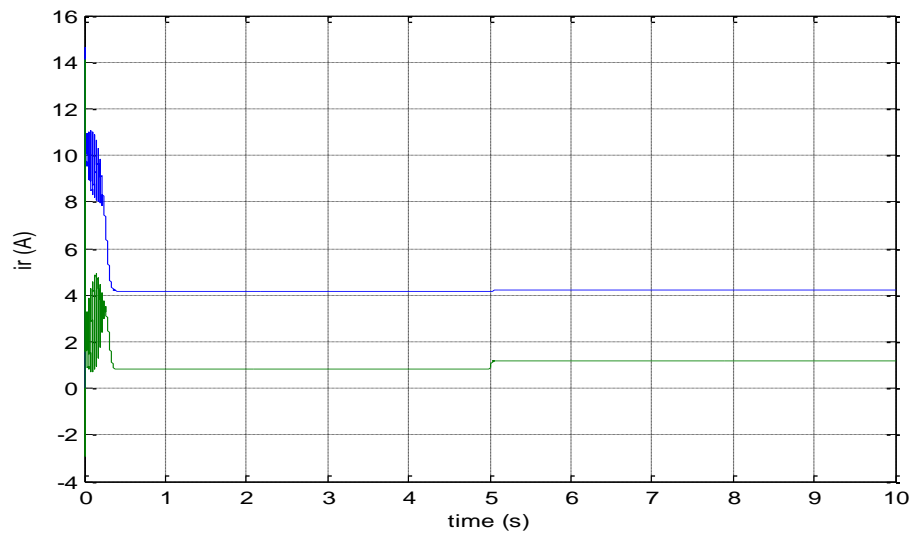
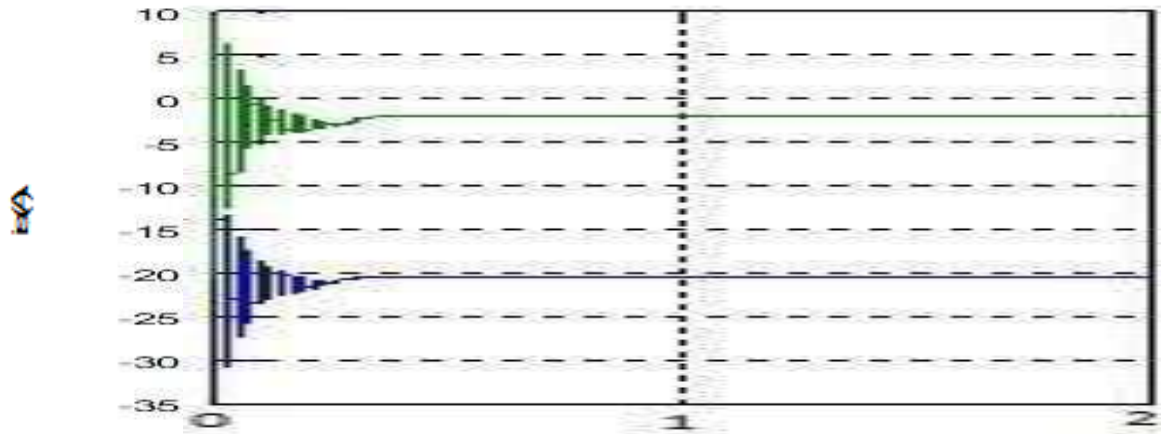


Figure II.2. Résultats de simulation d'un moteur à induction linéaire (MLI)

II.7. Interprétation des résultats

Les courbes de la figure (II.5) représentent les résultats de simulation pour un d'un moteur linéaire à induction.

A vide :

- De 0 s à 0.2 s la valeur de la vitesse pass à 6.2 m/s , la force et les courants startorique et rotorique sont tré pulsatoires
- De 0,2 s à 5 s la valeur de la vitesse est stable à 6,2 m/s et aussi la force à 0 alors que le courant startorique dans les deux références (d , q) , le courant rotorique descend jusqu'à une valeur limite fixe

En charge :

- De 5 s nous applique la charge de 50 N , la vitesse diminue à 6,1 m/s puis reste à la même valeur , tandis que le courant startorique est constant et le courant rotorique augmente d'une petite valeur puis se stabilise ensuite

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le moteur à induction linéaire (LIM) basé sur la théorie de Park, les résultats que nous simulons montrent la validité du moteur à induction linéaire car le souci principal est de simplifier le problème.

Ce dernier répond à la description de l'évolution du démarrage direct sur un réseau standard, afin d'obtenir des performances élevées dans le système dynamique, une technologie de contrôle appelée la commande vectorielle est introduite, et cette méthode fera l'objet du dernier chapitre.

CHAPITRE III

COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE DU MOTEUR A INDUCTION (LIM)

III.1. Introduction

Ce type de machine est apparu dans sont apparues dans la deuxième moitié des années 1980 comme concurrentielles des méthodes classiques. Elles sont basées sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsion (LIM) et sur un découplage du flux et du couple moteur par orientation du champ magnétique [3].

Par opposition aux lois de commande en durée (LIM), ces stratégies de commande directe appartiennent à la catégorie des lois de commande en amplitude et ont été initialement conçues pour un onduleur à deux niveaux.

Elles présentent des avantages déjà bien connus par rapport aux techniques conventionnelles [1], notamment en ce qui concerne la réduction du temps de réponse du couple, la robustesse par rapport aux variations des paramètres de la machine et de l'alimentation, l'absence des transformations de Park. De par leur nature, elles peuvent être fonctionnelles sans capteur de vitesse.

Beaucoup de travaux ont vu le jour sur ce sujet depuis que les principes furent énoncés par Takahashi, ce qui a donné lieu à emploi de diverses stratégies.

Dans ce chapitre on exposera les principes des contrôles directs de couple d'un moteur asynchrone que l'on comparera aux commandes par orientation du flux rotorique.

III.2. Contrôle vectoriel orienté de champ

Le but de la commande de champ orientée est de maintenir constant le flux linéaire de l'axe d et de rendre nul l'axe q .

Généralement, le FOC peut être mis en œuvre de manière indirecte (feed-forward) ou directe (feedback) selon la méthode utilisée pour l'identification du flux du rotor. Pour le FOC direct, il détermine l'orientation du flux d'entrefer à l'aide d'un capteur à effet hall, d'une bobine de

recherche ou d'autres techniques de mesure ; Il existe trois modes de contrôle vectoriel basés sur le référentiel dans lequel les courants statoriques sont transformés. Ce sont :

- Commande orientée flux stator.
- Contrôle orienté flux magnétisant.
- Commande orientée flux rotor.

Dans les conditions d'orientation du flux du rotor, le flux du rotor est aligné sur l'axe d du cadre orienté du flux du rotor d-q et les équations du flux du rotor peuvent être écrites comme suit :

$$\phi_{qr} = 0$$

$$\phi_{qr} = \phi_{dr} = \text{constant}$$

$$\begin{cases} v_{ds} = v'_{ds} - E_d \\ v_{qs} = v'_{qs} - E_q \end{cases} \quad (\text{III -1})$$

$$v'_{ds} = \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt}$$

$$v_{qs} = v'_{qs} - E_q \quad (\text{III -2})$$

On remarque que les tension (V_{ds} , V_{qs}) agissant à la fois sur les courants (I_{ds} , I_{qs}) et par conséquent à la fois sur le flux et sur le couple. Dans ce cas, un découplage par compensation sur utilisé.

Ou E_d et E_q représentent les termes de compensation .

On obtient alors un nouveau système d'équation complètement découplé :

$$\begin{cases} v'_{ds} = \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \lambda \sigma L_s i_{ds} \\ v'_{qs} = \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \lambda \sigma L_s i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

La méthode de commande de découplage avec compensation choisit les tensions telles que

$$v'_{ds} = \left(k_p + K_i \frac{1}{s} \right) (i'_{ds} - i_{ds}) - \frac{\pi}{h} v_e L_\sigma(Q) i'_{qs} \quad (\text{III-4})$$

$$v'_{qs} = \left(k_p + k_i \frac{1}{s} \right) (i'_{qs} - i_{qs}) + \frac{\pi}{h} v_e L_\sigma(Q) i'_{ds} + \frac{p \cdot L_m \pi}{L_r h} v_v \phi_{dr} \quad (\text{III-5})$$

La référence de courant d'axe direct du stator est obtenue à partir de l'entrée de référence de flux du rotor.

a) Expression de la commande a flux orienté (FOC)

$$F_e^* = k_f * i_{qs}^* \quad (\text{III} - 6)$$

$$k_f = \frac{3\pi P L_m (1 - f(Q))}{2\tau_p 2 L_r - L_m f(Q)} \phi_{dr}^* \quad (\text{III} - 7)$$

$$i_{qs}^* = \frac{4\tau_p L_r - L_m f(Q)}{3\pi P L_m (1 - f(Q))} \frac{F_e^*}{\phi_{dr}^*} \quad (\text{III} - 8)$$

$$i_{ds}^* = \frac{1}{L_m} (1 + T r P) \phi_{dr}^* \quad (\text{III} - 9)$$

Ou K_f et la constante de force.

La force de poussée est exprimée par :

$$F_e = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{h} \frac{L_m(1-f(Q))}{L_r - L_m f(Q)} (\phi_{dr} I_{qs} - \phi_{qr} I_{ds}) = M \cdot \dot{v}_r + D \cdot v_r + F_L \quad (\text{III-10})$$

Ou :

- $V_s = V_{ds} + J V_{qs}$: est la tension primaire.
- $V_r = V_{dr} + J V_{qr}$: est la tension linéaire.
- $L_s = L_{ls} + L_m$: est l'inductance primaire.
- $L_r = L_{lr} + L_m$: est l'inductance linéaire .
- L_{ls} : est l'inductance de fuite primaire.
- L_{lr} : est l'inductance de fuite linéaire.
- L_m : est la magnétisation.

Moteur à induction conventionnel, la principale différence entre un LIM et un RIM est la caractéristique transitoire de ψ_{dr}^e . On obtient de

$$\psi_{dr}^e = \frac{[L_m - L_r f(Q)] R_r}{[L_r - L_m f(Q)] p + R_r (1 + f(Q))} i_{ds}^e \quad (\text{III-11})$$

D'après l'analyse ci-dessus, on obtint un régulateur de flux et un régulateur de vitesse de (1) à (8) tels que :

$$i_{ds}' = \frac{1}{L_m} (1 + T_r P) \lambda_{dr}' \quad (\text{III-12})$$

$$I'_{qs} = \frac{4\tau}{3p\pi} \frac{f'}{\lambda'_{dr}} \frac{L_r - L_m f(Q)}{L_m (1 - f(Q))} \quad (\text{III-13})$$

La fréquence de glissement peut être calculée à partir des valeurs de référence des composantes de courant du stator représentées dans le cadre de référence orienté flux du rotor comme suit :

$$\omega_{sl} = \frac{R_r i_{qr}^e}{\psi_{dr}^e} = \frac{1}{T_r} \frac{L_m}{\psi_{dr}^e} i_{qs}^e \quad (\text{III-14})$$

La fréquence angulaire primaire peut être déterminée en aidant la vitesse angulaire linéaire ou angulaire avec la fréquence de glissement.

Cela donnera comme :

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl} \quad (\text{III-15})$$

La transformation de la vitesse linéaire de la LIM en une vitesse angulaire est donnée par :

$$\omega_r = \frac{\pi}{\tau} v \quad (\text{III-16})$$

Où ω_r représente la vitesse angulaire de Lino et τ est le pas polaire

L'angle de position de flux de en rapport avec le primaire peut être déterminé par :

$$\theta_e = \int \omega_r dt + \int \omega_{sl} dt \quad (\text{III-17})$$

III.3 Estimation de la force électromagnétique

Si d- l'axe de courant primaire (composants de courant de flux) est maintenue constante, de sorte que la force électromagnétique est directement proportionnelle à q- l'axe courant.

En utilisant la technique indirecte de commande vectorielle, la poussée peut être décrit par les équations suivantes :

$$F_e = k \cdot i_{qs} \quad (\text{III-18})$$

$$F_e = M \frac{dv}{dt} + Dv + F_L \quad (\text{III-19})$$

Où la poussée électromagnétique F_e est définie comme. [16]

$$F_e = \frac{3n_p \pi \hat{L}_m}{2h \hat{L}_r} (I_{s\beta} \psi_{r\alpha} - I_{s\alpha} \psi_{r\beta}) \quad (\text{III-20})$$

La force de poussée est décrite comme :

$$F_e = k(\lambda_{dr} I_{qs} - \lambda_{qr} I_{ds}) = M \frac{dv}{dt} + DV + F_L \quad (\text{III-21})$$

Où :

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

III.4 Découplage entré-sortie

L'objectif est, dans la mesure du possible, de limiter l'effet d'une entrée à une seule sortie. Nous pouvons alors modéliser le processus sous la forme d'un ensemble de systèmes mono-variables évoluant en parallèle. Les commandes sont alors non interactives.

Différentes techniques existent découplage utilisant un régulateur, parmi de ces techniques le découplage par compensation.

III.4.1 Découplage par compensation

Définissons deux nouvelles variables de commande v'_{ds} et v'_{qs} telles que :

$$\begin{cases} v_{ds} = v'_{ds} - e_{ds} \\ v_{qs} = v'_{qs} - e_{qs} \end{cases} \quad (\text{III-22})$$

$$\begin{cases} e_{ds} = \omega_s \sigma L_s I_{qs} + \frac{M}{L_r^2} R_r \phi_r \\ e_{qs} = -\omega_s \sigma L_s I_{ds} - \frac{M}{L_r^2} P \Omega \phi_r \end{cases} \quad (\text{III-23})$$

Les actions sur les axes d , q sont découplés comme illustrés par la figure 8 suivante :

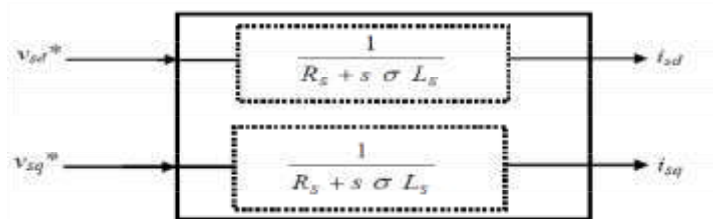


Figure III.1 Les nouvelles commandes obtenues.

Les tensions v_{ds} et v_{qs} sont alors reconstitué à partir des tensions v'_{ds} et v'_{qs} (Figure III.2)

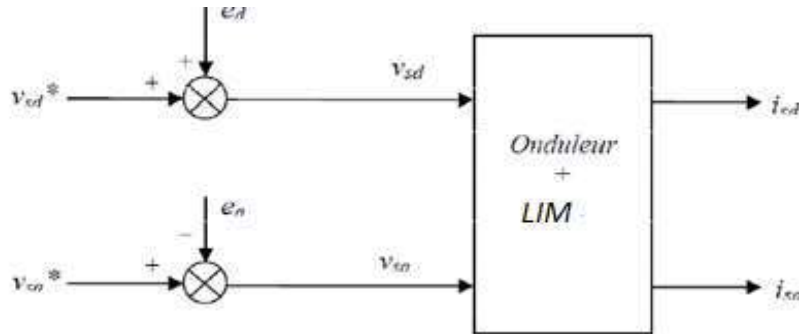


Figure III.2 Reconstitution des tensions

III.5 Calcul des régulateurs

III.5.1 Régulateur de vitesse

La boucle de régulation externe de la vitesse est donnée par la figure III.3 La variable de commande est la force F_e (parfois noté F_e , F_L force résistant).

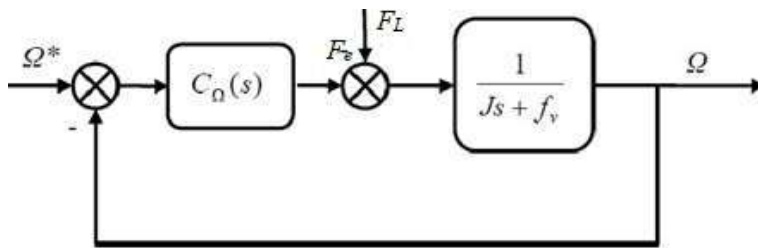


Figure III.3 Boucle de régulation de la vitesse

La fonction de transfert du régulateur PI de la vitesse est

$$C_{\Omega}(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \tag{III-24}$$

La FTBO(S) est (la perturbation F_L est considérée nulle lors du calcul de la commande) :

$$\left(K_p + \frac{K_i}{S}\right) \frac{1}{(js+f)} \tag{III-25}$$

En boucle fermée, la FTBF(S) est :

$$\frac{\Omega}{\Omega'} = \frac{\frac{k_p}{k_i}s+1}{\left(\frac{J}{k_i}\right)s^2 + \left(\frac{k_p+f}{k_i}\right)s+1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)s^2 + \left(\frac{2\zeta}{k_i}\right)s+1} \quad (\text{III-26})$$

Que l'on compare à la forme canonique standard du système du second ordre (puisque on connaît la réponse indicielle de ce système) par :

$$\begin{aligned} \frac{J}{k_i} &= \frac{1}{\omega_n^2} \\ \frac{k_p+f}{k_i} &= \frac{2\zeta}{\omega_n} \end{aligned} \quad (\text{III-27})$$

En choisissant un coefficient d'amortissement ζ selon le tableau suivant et le temps de réponse on aura les valeurs du K_p et K_i comme suit :

$$\begin{cases} K_i = J \omega_n^2 \\ K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_n} - f \end{cases} \quad (\text{III-28})$$

ζ	$\omega_n t_{\text{rep}}(5\%)$
0.4	7.7
0.5	5.3
0.6	5.2
0.7	3
1	4.75

III.5.2 Régulateur de courant

La boucle de régulation interne du courant i'_{sd} est donnée par la figure III.4. La variable de commande est la tension v'_{ds} . La procédure est la même pour l'autre composante i_{sq} .

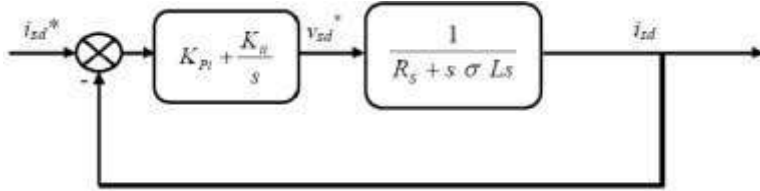


Figure III.4 Boucle de régulation de courant i_{sd} .

En utilisant la technique de compensation pole-zéro, on calcule d'abord la FTBO(S) :

$$FTBO(S) = kp \left(s + \frac{ki}{kp} \right) \frac{1}{s} \frac{\frac{1}{\sigma L_s}}{\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + s \right)} \tag{III-29}$$

En compensant le zéro du régulateur par le pole du système :

$$\frac{ki}{kp} = \frac{R_s}{\sigma L_s} \tag{III-30}$$

La FTBO(S) devient :

$$\frac{kp}{s} \frac{1}{\sigma L_s} \tag{III-31}$$

En boucle fermée, la FTBF(S) devient un système du premier ordre:

$$\frac{\frac{kp}{s \sigma L_s}}{1 + \frac{kp+1}{s \sigma L_s}} = \frac{1}{\frac{\sigma L_s}{kp} s + 1} = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{III-32}$$

$$\tau = \frac{\sigma L_s}{kp} \quad (\text{III-33})$$

En choisissant une valeur pour, les paramètres du régulateur se calcule comme suit

$$\begin{aligned} kp &= \frac{\sigma L_s}{\tau} \\ ki &= \frac{R_s}{\sigma L_s} kp \end{aligned} \quad (\text{III-34})$$

Remarque

D'autres méthodes peuvent être utilisées pour le dimensionnement du régulateur PI comme la méthode de l'optimum symétrique..

III.6. Schéma bloc de la commande vectorielle directe

L'angle de position instantanée de flux doit être utilisée dans la transformation du système de référence fixe LIM et vice versa, comme on le voit dans le schéma de principe de la commande orientée de champ (CV) dans la (figure III-1).

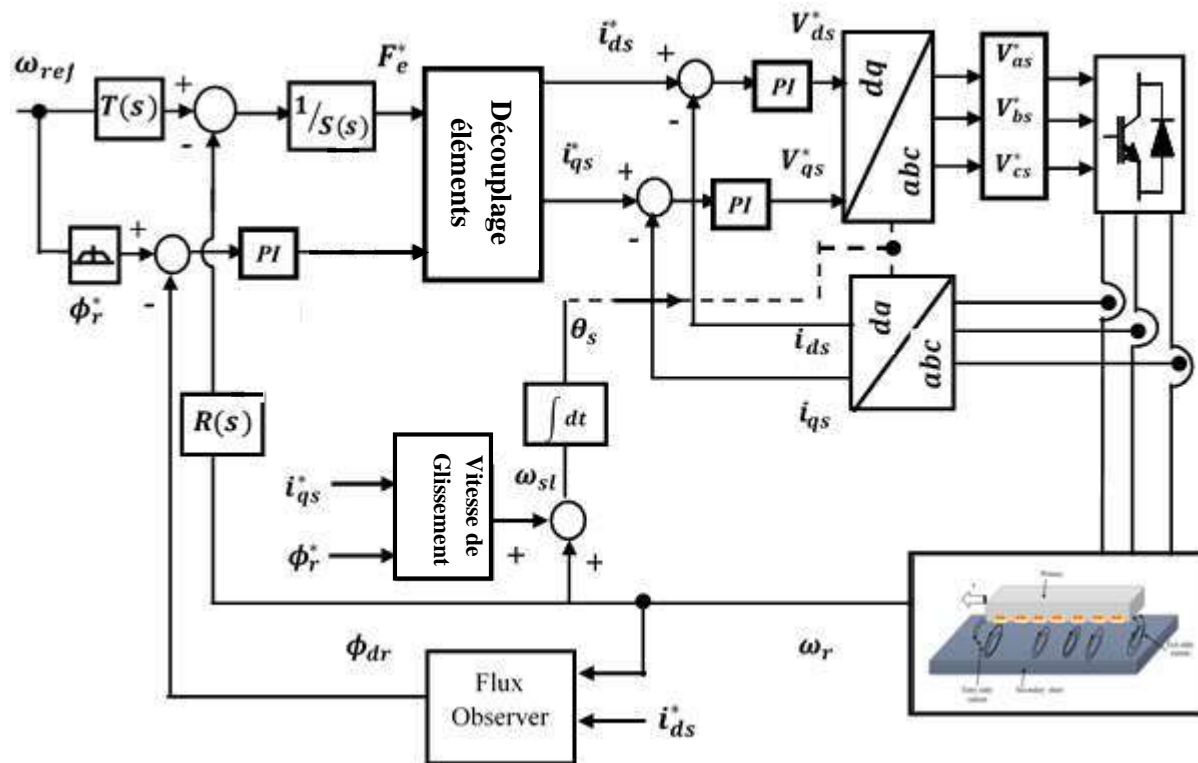
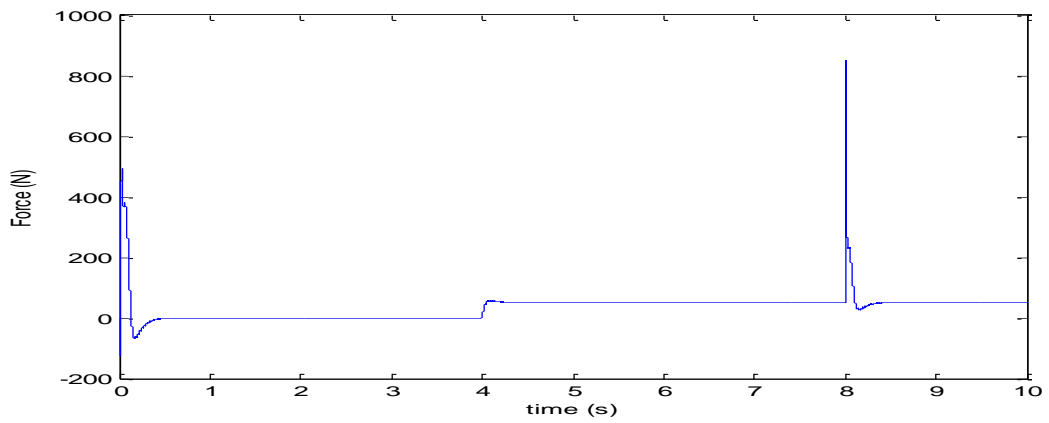
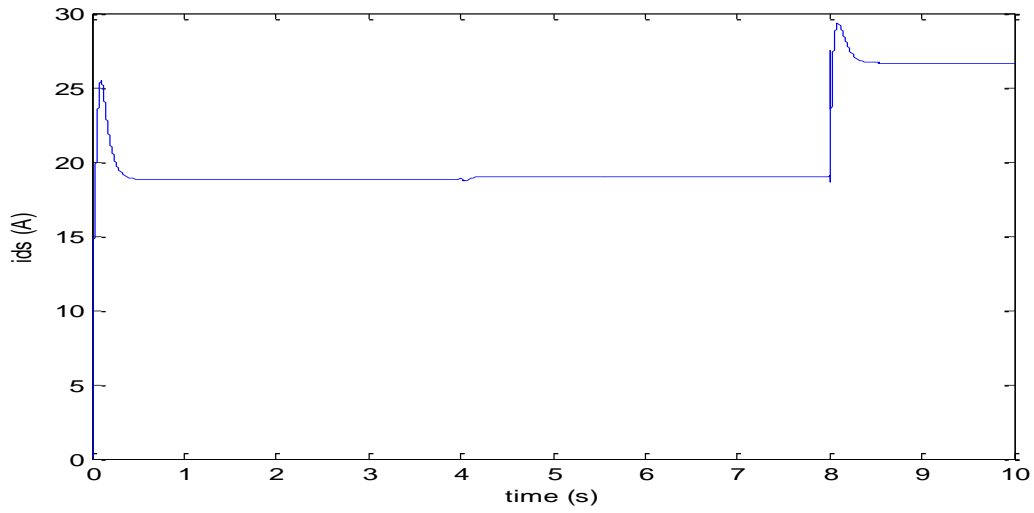
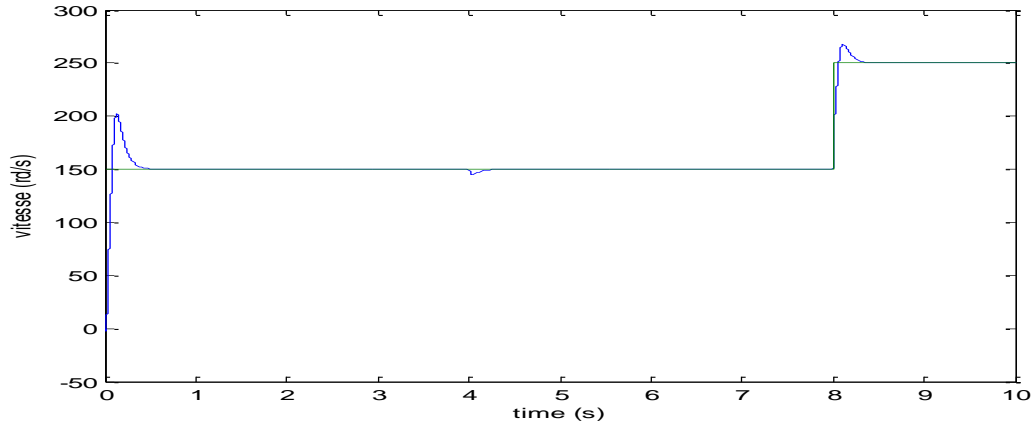


Figure III.5. Schéma fonctionnel de commande vectorielle proposé pour LIM.

III-7 Schéma de simulation



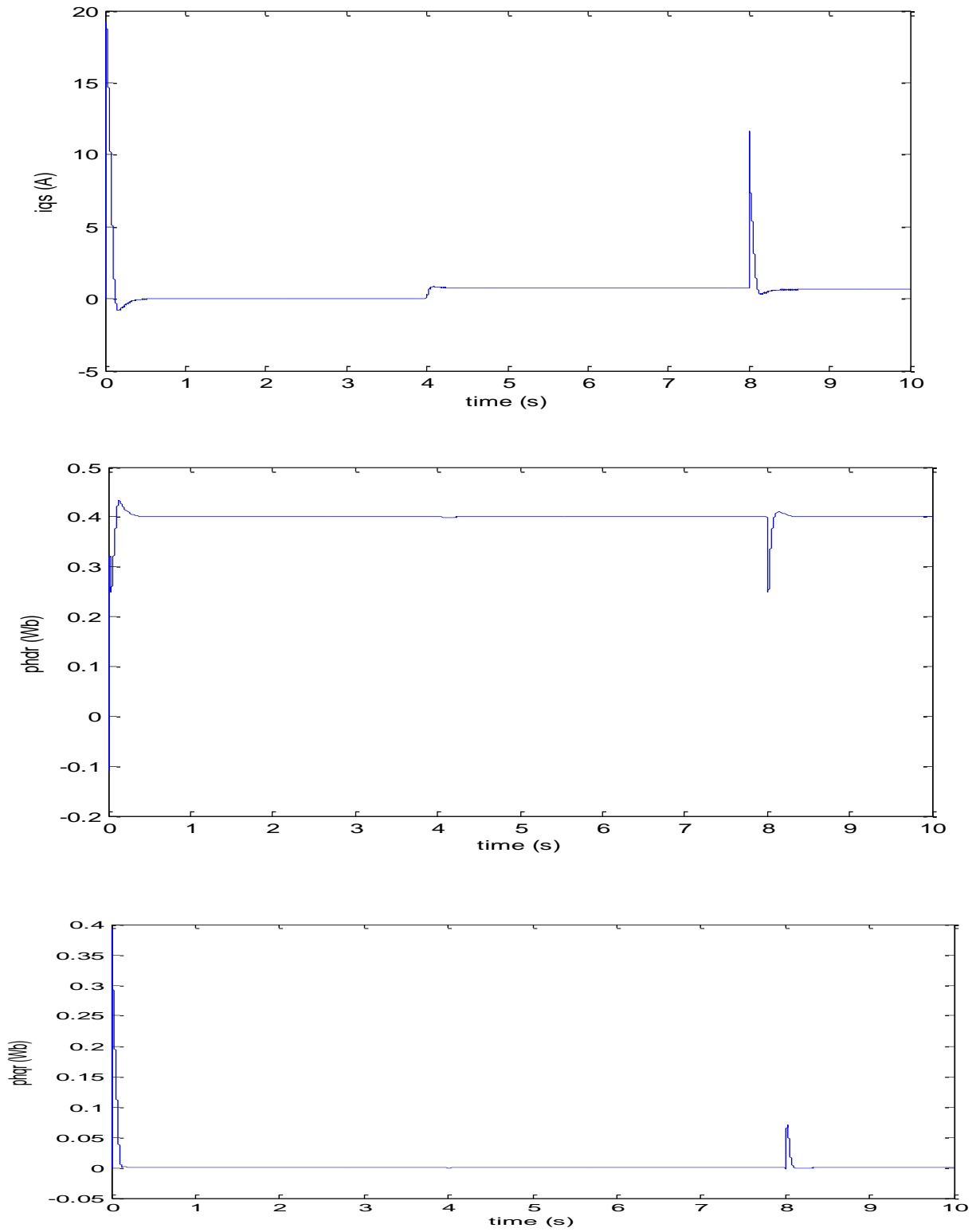


Figure III.7. Résultats de simulation de la CV du LIM

III.9. Interprétation des résultats

Dans cette section, on utilise le schéma de simulation de la figure (III-6). Pendant une durée de simulation de (3s). On a réalisé un essai d'application brusque d'une charge nominale ($F_e = 50N$) à l'instant $t = 0,2s$.

Les résultats de cette simulation en SIMULINK sous MATLAB, sont donnés par la figure (III-3), on peut remarquer que :

- Le flux est piégé dans une bande d'hystérésis la figure (III-7) montre la trajectoire de flux dans cette bande.
- La force électromagnétique et le courant I_{qs} , en régime transitoire, atteint une valeur maximum puis presque il s'annule pendant une durée très courte, enfin il se stabilise à la valeur de force résistante nominale (charge) en plus la force résultante est suivi sa force référence. Les oscillations de cette force sont effectuées par l'effet de régulateurs à hystérésis
- La vitesse et le courant I_{ds} , elle se stabilis puis augmente lors de l'application de la charge, mais elle n'atteint pas sa référence, ce qui est expliquer par l'effet de la commande sur la charge.

III.10. 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.

Cette étude peut être réalisée en BF (ou la vitesse est régulée avec un PI), mais la détermination de la valeur du gain et de la constante de temps du régulateur devient plus difficile.

CONCLUSION GENE

Conclusion générale

Le travail de cette thèse se concentre principalement sur l'étude, la modélisation et la simulation du moteur à induction linéaire, qui est considéré à l'avenir comme l'une des applications les plus importantes applicables dans de nombreux domaines tels que le transport, en particulier dans la traction ferroviaire, où le moteur à induction linéaire est un modèle efficace dans ce domaine.

Ce type de moteur se caractérise par de nombreuses spécifications qui le classent dans la première catégorie, parmi lesquelles nous mentionnons la simplicité de sa conception, son faible coût de fabrication, l'absence d'un système de transmission intermédiaire et d'autres avantages qui font de ce moteur un choix alternatif dans le domaine des machines électriques afin de répondre aux exigences du marché.

Nous avons également remarqué qu'il s'agit d'un axe dynamique très important au cours des dernières années afin d'améliorer ses performances car il présente plusieurs problèmes qui ne peuvent être résolus uniquement par des programmes numériques.

Dans ce mémoire, Nous avons également présenté les différentes structures et classifications des moteurs linéaires.

Cependant, nous avons modélisé le moteur à induction linéaire, et pour faciliter son étude, nous avons appliqué un ensemble d'hypothèses puis créé un modèle avec le théorème de Park pour rendre la machine plus simple à modélisé.

Ensuite nous avons donné les principes de bases la commande vectorielle directe par orientation de flux rotorique, qui permet d'imposer à notre machine (LIM) un comportement semblable à celle de la machine à courant continu a excitation séparée là où le flux n'est pas affecté par la variation du couple électromagnétique.

Finalement, nous recommandons la poursuite des recherches sur la machine asynchrone linéaire , où plusieurs améliorations peuvent être apportées à ce travail, à savoir :

- L'application de cette machine sur d'autres systèmes comme les robots, etc ;
- L'étude de cette machine en fonctionnement génératrice, et son intégration dans un système de production d'énergie;
- Modélisé d'autre type des commande avancées sur cette machine.
- L'introduction des onduleurs multi-niveaux.

ANNEXE

Les principaux paramètres du moteur à induction linéaire

Tr = Lr / Rr			
Vitesse nominale	Ω_n	1450	tr/min
Force nominal	Fe	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	Lm	32,6e-3	H
La longueur	D	0,286	m
La masse	m	8	Kg



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y. Ould kaddour and N. Bounaceur, “Modélisation d’un moteur à induction linéaire (MIL) par la méthode de réseaux des reluctances (MRR).”
- [2] V. Lionel, “Étude d’actionneurs électriques à double excitation destinés au transport. dimensionnement de structures synchrones,” p. 222.
- [3] A. Takorabet, “Dimensionnement d’une machine à double excitation de structure innovante pour une application alternateur automobile : comparaison à des structures classiques,” p. 189
- [4] S. CHEVAILLER, “comparative study and selection criteria of linear motors.”
- [6] *Mirsalim, M.; Doroudi, A.; Moghani, J.S.* ”Obtaining the operating characteristics of linear induction motors: a new approach *Magnetics*” *IEEE Transactions on, Volume: 38, Issue: 2, March 2002 Pages: 1365 – 1370*
- [7] H. DJEMAI and A. DROUCHE, “Moteur linéaire pour train à lévitation magnétique.”
- [8] N. Boules, “Design optimization of permanent magnet DC motors,” vol. 26, no. 4, pp. 786–792
- [9] M. BEKADDOUR BENATIA, “Méthodologie de la conception et de la commande d’un moteur à induction linéaire (MIL).”
- [10] Still, A. and Sisikind, C.S., “Elements of Electrical Machine Design”, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1954.
- [11] Zehden, A., “Travelling wave electric traction equipment,” French patent 321692, applied for June 2, 1902.
- [12] Zelenay, Rosenfeld, and Dulait, “Travelling wave applied to electric railways,” French patent 318 634, Feb. 12, 1902.
- [13] Rosenfeld and Zelenay, “Tangential traction,” Bull. Ass. Ing. Mantefiore, Vol. 3, pp. 214-238, 1903.

[14] Birkeland, K., Norwegian Patents 11 228, Apr. 22, 1902, and 13 052, Apr. 23, 1903.

[15] Jones, M.F, "Three phase linear motor catapult system," U.S.Patent 2 404 984, July 30, 1946.

[16] Hermant, C., "Improvements to the linear induction electromagnetic pumps," Bull. Soc. Fr. Elec., pp. 163-178

[17] F. Alonge, M. Cirrincione, F. D'Ippolito, M. Pucci, and A. Sferlazza, "Active disturbance rejection control of linear induction motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 5, pp. 4460_4471, Sep. 2017.

Résumé

Le développement de certains concepts tels que les machines à très haut débit conduit au développement des moyens de production plus rapide et plus précise, et ce concept est nouveau, parce que la mise en œuvre de ce type de machine est difficile à exécuter mais il reste dans certains des domaines spécifiques.

Maintenant, il a été créé grâce aux axes de fente de direction par des moteurs linéaires. Ce type de moteur permet une augmentation de la vitesse, l'accélération et la décélération, ce qui en fait est important par rapport aux systèmes conventionnels. Et est parmi tous les moteurs linéaires utilisés, le moteur devient inductif linéaire (LIM) est le plus des exigences communes de l'industrie. L'objectif de cette étude est la modélisation, le contrôle et le moteur de simulation à induction linéaire (LIM).

Les travaux de modélisation avec MATLAB / SIMULINK après parc d'application de conversion. Il peut être contrôlé par un contrôle direct LIM de force. Et effacer la validité et l'efficacité de ce contrôle par les résultats de la simulation.

المخلص :

يؤدي تطوير مفاهيم معينة مثل الآلات ذات الإنتاجية العالية إلى تطوير وسائل إنتاج أسرع وأكثر دقة ، وهذا المفهوم جديد ، لأن تنفيذ هذا النوع من الآلات قد يكون صعبًا ، مثل البقاء في بعض المجالات المحددة.

الآن تم إنشاؤه بفضل محاور فتحة التوجيه بواسطة المحركات الخطية. يسمح هذا النوع من المحركات بزيادة السرعة والتسارع والتباطؤ ، وهو أمر مهم في الواقع مقارنة بالأنظمة التقليدية. ومن بين جميع المحركات الخطية المستخدمة ، يصبح المحرك خطيًا (LIM) هو أكثر متطلبات الصناعة شيوعًا. الهدف من هذه الدراسة هو النمذجة والتحكم والمحاكاة الحركية للحث الخطي (LIM).

عمل النمذجة بواسطة MATLAB / SIMULINK بعد خاصية بارك. يمكن التحكم فيه عن طريق التحكم المباشر بالقوة LIM. وتتضح صلاحية وفعالية هذا الضبط من خلال نتائج المحاكاة.

Summary

The development of certain concepts such as very high throughput machines leads to the development of faster and more precise means of production, and this concept is new, because the implementation of this type of machine may be difficult eg remains in some specific areas.

Now it has been created thanks to the steering slot axes by linear motors. This type of motor allows an increase in speed, acceleration and deceleration, which in fact is significant compared to conventional systems. And is among all the linear motors used, the motor becomes linear inductive (LIM) is the most common industry requirements. The objective of this study is the modeling, control and motor simulation of linear induction machine (LIM).

Modeling work with MATLAB / SIMULINK after park conversion It can be controlled by direct force LIM control. And clear the validity and effectiveness of this control by the results of the simulation.