



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Lettres et des Langues
Département de Génie Electrique
Filière d'Énergie renouvelable

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologie
Filière : Electromécanique
Spécialité : **Électromécanique**

Présenté et soutenu par :
Ghacha Abou Yakoub Badr Eddine
Fezzai Aissa

Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Jury:

Mer	Yahia Khaled	Prof	Université de Biskra	President
M ^{ed}	Laala widad	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Mer	Chenoufi Halim	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire: 2021-2022



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electromécanique
Spécialité : Électromécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Soutenu le: mardi 28 juin 2022

Présenté par :

Avis favorable de l'encadreur :

Ghacha Abou Yakoub Badr Eddine
Fezzai Aissa

Laala widad

Signature

Signature Avis favorable du Président du Jury

Yahia Khaled

Signature

Cachet et signature

Résumé

Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, aux approches non linéaires de contrôle et à la qualité des machines à aimants permanents (plus précisément à l'aide de terres rares), les machines à aimants permanents ont récemment connu une popularité accrue.

Dans ce mémoire, on étudie dans un premier temps, généralités sur les machines synchrones à aimants permanents. Après, on présente à la modélisation dynamique de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère biphasé est consacrée à l'étude de l'onduleur de tension et de sa commande. Et finalement, on étudie le principe de la commande vectorielle de la MSAP pour l'asservissement de vitesse. La simulation de cette commande à été réaliser par le logiciel Matlab / Simulink.

Mots clés : Machine synchrone à aimants permanents, MLI, Commande vectorielle.

Abstract

Thanks to advances in power electronics, non-linear control approaches and the quality of permanent magnet machines (specifically using rare earths), permanent magnet machines have recently become more popular.

In this brief, we first study, generalities on synchronous machines with permanent magnets. After, we present to the dynamic modeling of the synchronous permanent magnet machine in the two-phase mark is dedicated to the study of the voltage inverter and its control. Finally, we study the principle of vector control of the MSAP for speed control. The Matlab / Simulink software performed the simulation of this command.

Key words: Permanent magnet synchronous machine, PWM, Field oriented control

المخلص

بفضل التقدم في إلكترونيات الطاقة ، والأساليب غير الخطية للتحكم ، وجود آلات المغناطيس الدائم (تحديدًا باستخدام العناصر الأرضية النادرة) ، شهدت آلات المغناطيس الدائم مؤخرًا شعبية متزايدة.

في هذه الرسالة ، قمنا أولاً بدراسة العموميات على الآلات المتزامنة ذات المغناطيس الدائم. بعد ذلك ، نقدم إلى النمذجة الديناميكية للآلة المتزامنة مع المغناطيس الدائم في المرجع ثنائي الطور المخصص لدراسة عاكس الجهد والتحكم فيه. وأخيرًا ، قمنا بدراسة مبدأ التحكم في المتجهات للآلة المتزامنة مع مغناطيس دائم للتحكم في السرعة. تم تنفيذ محاكاة هذا الأمر بواسطة برنامج.

الكلمات المفتاحية : ماكينة متزامنة ذات مغناطيس دائم ، تعديل عرض النبضة ، التحكم بتوجيه التدفق.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord Allah, seigneur de l'univers, pour la volonté, la santé, qui nous a donnée durant toutes ces longues années. A lui toute louange.

Je tiens à remercier sincèrement mon encadrant

*La madame : **Laala Widad**, pour son soutien et ses conseils
Et son encadrement, dont nous avons bénéficié pour faire ce
travail*

*Nous remercions également les membres du jury, M.r : **Yahia
Khaled** Et M.r : **Chenuofi Halim**.*

C'est notre honneur d'accepter de juger notre travail.

*Mes remerciements aux professeurs du département
ingénierie électrique.*

*En finalement, j'aimerais remercier ma famille, mes amis et
tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.*

Dédicaces

Je tiens C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail : À lettre le plus cher de ma vie, Mémère. À ce lui qui m'a fait de moi un homme, mon père. À tous mes amis de promotion de 2ème année Master GE en électromécanique.

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur. À tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom : yakoub.

je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite. À mon cher binôme Aissa.

À mon meilleur ami Lazhar, Abdulkader, Akram, Hawari et Fawzi et ramzy.

Yakoub.

Dédicaces

Je tiens C'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail : À lettre le plus cher de ma vie, Mémère. À ce lui qui m'a fait de moi un homme, mon père. À tous mes amis de promotion de 2ème année Master GE en électromécanique.

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur. À tous les membres de ma famille et toute personne qui porte le nom : Aissa.

je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite. À mon cher binôme yakoub.

À mon meilleur ami Hawari et Fawzi et ramzy.

Aissa.

Sommaire

Sommaire.....	I
Notations et symboles	IV
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les machines synchrones à aimants permanents (MSAP)	
I.1.Introduction.....	4
I.2.Généralités sur les machines électriques à aimants permanents	4
I.2.1. Les machines à courant continu et aimant permanents (MCC).....	5
I.2.2. Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB)	6
I.2.3. Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP)	6
I.2.4. Les rotors de la machine à aimants permanents	6
I.3.Classement des machines synchrones :.....	7
I.3.1 Rotors à pôles lisses	7
I.3.2 Rotors à pôles saillants	7
I.4. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents	8
I.4.1. Exemples usuels des moteurs á aimants permanents.....	9
I.4.2. Matériaux pour aimants.....	11
I.4.3. Analyse du fonctionnement de la MSAP	14
I.5. Couple des machines synchrones à aimants permanents	14
I.6. Comparaison entre la MSAP et les autres machines électriques	15
I.7.Les domaines d’application de MSAP	16
I.8. Principe de L’autopilotage des Machines Synchrones.....	16
I.9. Différents Modes D’alimentation des MSAP	17
I.9.1 Alimentation par un commutateur de courant.....	17
I.9.2 Alimentation par un onduleur de tension	17
I.10.Avantages des MSAPs par rapport aux autres types de machines.....	18

I.10.1. Moteurs synchrones à aimants - Moteurs à courant continu :	18
I.10.2. Moteurs synchrones à aimants - Moteurs synchrone classique :.....	18
I.10.3. Moteurs synchrones à aimants - Moteurs asynchrones :.....	19
I.11. Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents.....	19
I.12. Conclusion	20
Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	
II.1. Introduction	22
II.2. Structure d'entraînement à vitesse variable pour moteur synchrones.....	22
II.3. Hypothèse simplificatrices.....	22
II.4. Modélisation de la machine synchrone á aimants permanents	23
II.4.1. Mise en équation de la MSAP en triphasé	23
II.4. 2.Transformation triphasé -diphasé.....	25
II.4.2.1. Principe de la transformation de Concordia.....	25
II.4.2.2. Principe de la transformation du Park	26
II.4.2.3. Choix du Référentiel	27
II.4.3. Modélisation de la MSAP dans le modèle de Park	27
II.5.4. Mise sous forme d'équation d'état	30
II.5 .Simulation numérique des différents fonctionnements de la MSAP	32
II.5.1. Alimentation par un réseau triphasé équilibré	32
II.6. Modélisation de l'alimentation de la MSAP.....	34
II.6.1. Constitution d'alimentation de la MSAP.....	34
II.6.1.1. Modélisations du redresseur triphasé double alternance à diodes	34
II.6.1.2. Modélisation du filtre.....	35
II.6.2. Onduleur de tension triphasé.....	36
II.6.2.1. Modélisation de l'onduleur de tension	37
II.6.2.2. Onduleur de Tension à MLI	38
II.6.2.2.1. Modulation de Largeur d'Impulsion Sinus-Triangle.....	38
II.6.2.2.2. Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis.....	39
II.7. Résultat de simulation de la MSAP alimenté avec un onduleur de tension	40
II.8. Conclusion.....	44

Chapitre III : Commande Vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents

III.1. Introduction.....	46
III.2. Principe de la commande vectorielle	46
III.3. Avantages et inconvénients de la commande vectorielle	48
III.4. Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension	48
III.4.1. Schéma global de la Commande vectorielle de la MSAP	48
III.4.1.1. Découplage par compensation.....	49
III.4.2. Calcul des régulateurs.....	52
III.4.2.1. Dimensionnement des régulateurs	52
III.4.2.2.1 Régulateur de courant I_q	53
III.4.2.2.2. Régulateur de courant I_d	54
III.4.2.2.3. Régulateur de vitesse.....	55
III.5. Bloc de dé fluxage	56
III.6. Résultats de simulation de la commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension.....	57
III.7. Etude de Robustesse aux variations paramétrique de la MSAP	62
III.8. Conclusion	68
Conclusion générale et perspectives	69
ANNEXE	70
BIBLIOGRAPHIE	72

Notations et symboles

MSAP	Machine synchrone à aimants permanents.
MCC	Machine à courant continu.
MAPSB	Machine à aimant permanent sans balais.
f.é.m	La Force magnétomotrice.
d, q	Composantes de Park (lié au rotor) directe et quadrature.
α, β	Référentiel fixe lié au stator.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
t	Temp(s).
P	Opérateur de la Place($\frac{d}{dt}$) .
V_s	Tension instantanés des phases statorique (V).
I_s	Courant instantanés des phases statorique (A).
I_a, I_b, I_c	Courants des phases statorique (A).
V_a, V_b, V_c	Tensions des phases statorique (V).
L_a, L_b, L_c	Inductances propres des phases a,b,c respectivement (H).
M_{ab}, M_{bc}, M_{ac}	Inductances mutuelles entre les phases (H).
φ_s	Flux statorique (Wb).
L_{ss}	Inductance statorique (H).
R_s	Résistance statorique (Ω).
f	Coefficient de frottement visqueux (Nm/Rad/s) .
J	Enertie de l'entraînement (Kg.M ²).
p	Nombre de pair de pôles.
Ω	Vitesse de rotation mécaniques (Rad/s).
Ω_{ref}	Vitesse de référence (Rad/s).
ω	Pulsation électrique de rotor (rad/s) .
C_e	Couple électromagnétique (N.m).
C_r	Couple mécanique résistant (N.m).
θ_{ref}	Position de référence (Rad).

θ	Position réelle (Rad).
V_d, V_q	Tensions statorique du repère de Park (V).
I_d, I_q	Courants statorique du repère de Park (A).
φ_d, φ_q	Flux du stator selon les axes d, q (Wb).
L_d, L_q	Inductance du stator selon les axes (d, q) (H).
φ_{sf}	Flux des aimants (Wb).
s	Opérateur de Laplace.
k_p	L'action proportionnelle du régulateur.
k_i	L'action intégrale du régulateur.
Tr	Temps de réponse imposé.
τ_m	Constante mécanique de la machine.
ω_n	Pulsation propre du système.
ξ	Facteur d'amortissement.

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les machines synchrones à aimants permanents (MSAP)	
Figure I.1 : Structure des machines à aimants permanents.....	5
Figure.I.2 : machine synchrone à aimants permanents.....	6
Figure I.3 : représenté un schéma de type de machine synchrone.....	7
Figure I.4 : MS rotor à pole lisse.....	8
Figure I.5 : MS rotor à pole saillant.....	8
Figure.I.6 : stator et rotor de la machine synchrone à aimants permanents.....	9
Figure I. 7 : Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.....	9
Figure I. 8 : Machine synchrone à aimants permanents insérés.....	10
Figure I. 9 : Machine synchrone à aimants permanents chapeautés.....	10
Figure I. 10 : Machine synchrone à aimants enterrés : (a) avec concentration de flux, (b) structure classique.....	11
Figure I.11 : les Alnicos.....	11
Figure I.12 : les ferrites.....	12
Figure I.13 : Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux.....	12
Figure I.14 : donne les courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.....	13
FigureI.15 : Caractéristique du couple-angle électrique.....	14
Figure I.16 : Schéma de Principe d'autopilotage d'une Machine Synchrone.....	17
Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	
Figure II.1 : Schéma de principe d'entraînement à vitesse variable pour moteur synchrones	22
Figure II.2 : Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.....	23
Figure II.3 : Différents couples qui agissent sur le rotor.....	25
Figure II .4 : Machine équivalente au sens de Park.....	28
Figure II.5 : Le circuit équivalent du MSAP dans le système d'axe d-q.....	29
Figure II.6 : Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension.....	31
Figure II.7 : Résultats de la MSAP alimenté par un réseau triphasé équilibré puis application d'un couple de charge $C_r = 10 \text{ N.m}$ à $t = 0.5 \text{ s}$	33
Figure II.8 : Redresseur triphasé double alternance à diodes.....	35
Figure II.9 : Le filtre passe bas.....	35
Figure II.10 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.....	37
Figure II.11 : Schéma de principe de MLI sinus triangle.....	39

Figure II.12 : Principe de la commande MLI sinus triangle.....	39
Figure II.13 : Il lustration de la bande de courant à hystérésis.....	40
Figure II.14 : Schéma bloc d'une MSAP alimentée par onduleur de tension commandé par la technique MLI sinus triangle.....	41
Figure II.15 : Résultat de simulation de la MSAP alimenté par un onduleur de tension Puis application d'une charge de $C_r=10N.m$ à $t= 0.5s$	43
Chapitre III : Commande Vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents	
Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle.....	47
Figure III.2 : Modèle de la MSAP commandé à flux orienté I_d à nul.....	48
Figure III.3 : Schéma global de simulation de la commande vectorielle avec régulateur PI..	49
Figure III.4 : Description de couplage.....	50
Figure III.5 : Principe de découplage par compensation.....	51
Figure III.6 : Structure générale : (machine-découplage par compensation).....	51
Figure III.7 : Régulateur PI.....	52
Figure III.8 : Boucle de régulation de courant I_q	53
Figure III.9 : Boucle de régulation du courant I_d	54
Figure III.10 : Boucle de régulation de vitesse.....	55
Figure III.11 : Boucle de régulation de vitesse.....	55
Figure III.12 : schéma bloc de défluxage.....	57
Figure III.13 : Résultat de simulation lors d'un démarrage à vide.....	58
Figure III.14 : Résultat de simulation lors d'un démarrage une charge avec ($C_r =10 N.m$ à $t=0.5 s$).....	60
Figure III.15 : Résultat de simulation d'un démarrage en charge a pour une consigne de vitesse de 100rd/s avec l'inversion de la consigne (-100 rd/s).....	61
Figure III.16 : Résultats des simulations lors des variations de la résistance R_s	63
Figure III.17 : Résultats des simulations lors des variations de l'inertie J	65
Figure III.18 : Résultats des simulations lors des variations du flux.....	66
Figure III.19 : Résultats des simulations lors des variations de l'inductance (L_d,L_q).....	67

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Exemples de propriétés magnétiques des aimants.....	13
Tableau I.2 : comparaison entre les différents types des machines.....	15

Introduction générale

Pendant les deux dernières décennies, il y a eu un développement dans des méthodes de conception pour commande des systèmes dynamique non linéaires. Plusieurs méthodes ont été inventées. Les assemblages comportant des convertisseurs statiques et des moteurs électriques ont progressivement supplanté les techniques traditionnelles de variation de vitesse (mécanique et électromécanique). Historiquement, le moteur à courant continu a fonctionné admirablement dans la plupart des applications industrielles. Le collecteur mécanique, qui est mal toléré dans certaines situations et ajoute des frais de maintenance, reste son défaut fondamental [1]. Le développement en parallèle de l'électronique de puissance et des aimants permanents ont conduit à la conception d'un nouveau type de machine synchrone excitée par des aimants permanents d'où le nom : Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) [25].

Dans le domaine de la vitesse variable, la machine synchrone à aimants permanents assure actuellement une part très importante et toujours croissante du marché grâce à sa simplicité, sa robustesse et son faible coût de fabrication. Malgré tous ces avantages, sa commande reste une des plus complexes comparativement à celle de la machine à courant continu, car son modèle mathématique est non linéaire et fortement couplé, ce qui est à l'opposé de sa simplicité structurelle. Mais, depuis une trentaine d'années, des commandes assez laborieuses ont été mises au point pour pouvoir réaliser un contrôle découplé de la machine synchrone à aimants permanents par l'utilisation de repères appropriés. Elles sont appelées commandes vectorielles, celles-ci assurent des performances dynamiques équivalentes à celles obtenues par la machine à courant continu [54].

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différents types des machines électriques à aimants permanents, tout en précisant les différentes structures associées aux différents aimants permanents et leurs domaines d'application.

Le deuxième chapitre a été destinée, en première partie, à la modélisation dynamique de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère biphasé. C'est là où se concentrent les équations mathématiques, électromagnétiques et mécaniques de la MSAP. La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'onduleur de tension et de sa commande.

Le troisième chapitre décrit le principe de la commande vectorielle de la MSAP pour l'asservissement de vitesse. La simulation de cette commande à été réaliser par le logiciel Matlab / Simulink.

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion.

Chapitre I :
Généralités sur les machines
synchrones à aimants
permanents (MSAP)

I.1.Introduction

Toutes les machines dont la vitesse de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant sont appelées machines synchrones. Le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation, pour ce faire le champ magnétique du rotor est alors fixe par rapport au rotor, ce qui fait que les champs tournants du rotor et du stator tournent à la même vitesse pendant le fonctionnement normal. Cette famille de machines est en fait divisée en plusieurs sous-familles, allant de plusieurs centaines de mégawatts à quelques watts, y compris les moteurs pas à pas. Malgré cela, toutes ces machines ont une construction similaire. Le stator est généralement composé de trois enroulements triphasés dispersés, ce qui entraîne des forces électromotrices sinusoïdales ou trapézoïdales créées par la rotation du champ rotor. Les stators sont équivalents à ceux d'une machine asynchrone, surtout à haute puissance. Le rôle du champ d'induction du rotor est généré par trois familles de rotors principaux. Rotors d'aimant, rotors spiralés à pôles lisses et rotors spiralés à pôles élevés [1].

Dans ce chapitre, nous aborderons les sujets suivants : Informations générales sur les machines électriques à aimants permanents, Présentation et analyse du fonctionnement et des domaines d'application du MSAP, Différents modes d'alimentation et principe de l'autopilotage de la MSAP, et enfin, les avantages et les inconvénients des machines synchrones à aimants permanents.

I.2.Généralités sur les machines électriques à aimants permanents

Les moteurs à aimants permanents ont explosé en popularité ces dernières années, grâce au développement de matériaux avec des aimants permanents à haute énergie et des améliorations dans le domaine de l'électronique de puissance. Ils ont été utilisés dans diverses applications de haute performance, y compris la robotique, les avions, les outils électriques, la production d'énergie renouvelable, l'équipement médical, les automobiles électriques et hybrides, et ainsi de suite. Les machines à aimants permanents sont parfois préférées à d'autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones ordinaires et les moteurs asynchrones, pour tous ces usages, et en particulier pour des applications spécifiques (servomoteur à vitesse variable). A titre d'illustration, quelques avantages des machines à aimants permanents, sont cités ci-dessous [2] :

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.

- Le couple volumique et la puissance massique importants permettent une meilleure compacité.
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.

De plus, les aimants permanents sans balais peuvent fonctionner avec un facteur de puissance proche de l'unité. Avec un simple onduleur de tension triphasé, le couple, la vitesse et le contrôle de position sont précis et rapides. Les machines à aimants permanents sont classées en trois types en fonction de leurs principes de fonctionnement :

- Les machines à courant continu et aimants permanents (MCC).
- Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB).
- Les machines synchrones à aimants permanents sans balais (MSAP).

La figure (I.1) montre la configuration de ces trois types.

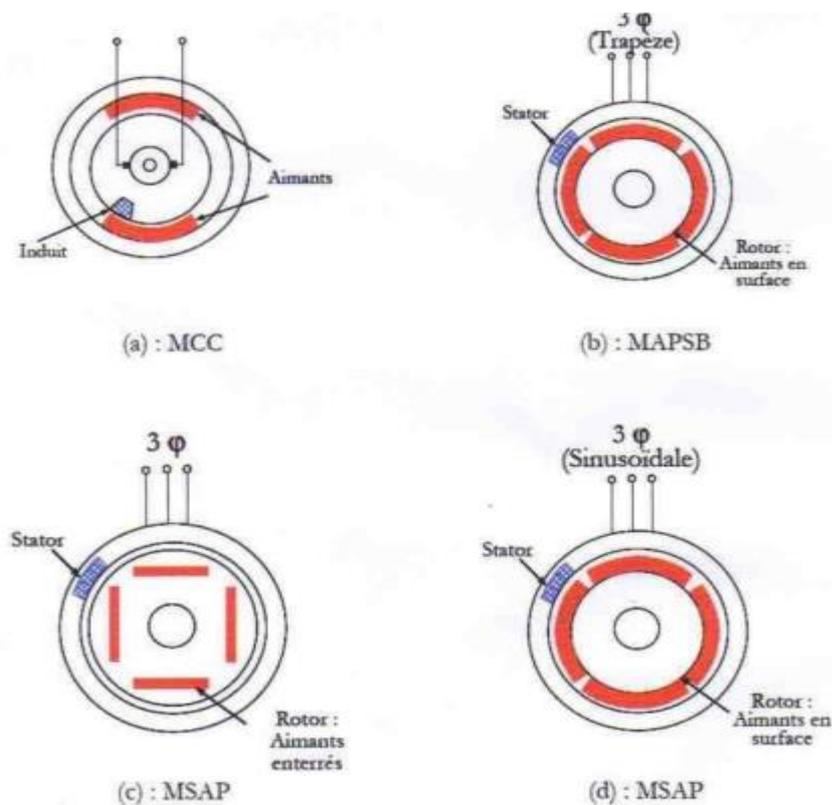


Figure I.1 : Structure des machines à aimants permanents [2].

I.2.1. Les machines à courant continu et aimant permanent (MCC)

C'est la machine à courant continu dans lesquels le champ magnétique généré par électromagnétisme est remplacé par celui d'aimants permanents. En conséquence, les pertes de joule liées à l'excitation ne sont plus présentes, mais le champ d'excitation n'est plus contrôlé. Cela limite leur utilisation à des applications à faible puissance et à haute dynamique qui ne nécessitent pas une fonction de désescalade [2].

I.2.2. Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB)

D'autres types de machines à courant continu ont été développés grâce aux progrès de la technologie des semi-conducteurs, dans laquelle la commutation des collecteurs de balais a été remplacée par la commutation électronique. Des aimants permanents sont positionnés sur le composant rotatif de ces machines, et le stator est composé de trois enroulements qui sont alimentés par des formes d'onde carrées fournies par un convertisseur. La commutation du convertisseur est gérée de sorte que seulement deux phases sont actives à un moment donné. Cette méthode de commutation électrique est fonctionnellement équivalente à la commutation mécanique à balais sur une machine à courant continu. En conséquence, les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB) (PMDC sans balais) ou à ondes carrées sont les noms donnés à ce type de machine à aimants permanents (PMDC à ondes carrées) [2].

I.2.3. Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP)

Des aimants permanents sont également installés sur la partie filante des machines synchrones munies d'aimants permanents. Comme l'illustre l'image de la figure (I.2), le stator est composé d'un enroulement triphasé. Son fonctionnement est basé sur le principe de rotation synchrone du champ magnétique avec le rotor, donc le terme "machines à aimants permanents synchrones" (MSAP) [2].



Figure.I.2 : machine synchrone à aimants permanents.

I.2.4. Les rotors de la machine à aimants permanents

Les machines à aimants permanents sont disponibles dans une variété de configurations de rotor. Voici leur classification globale en termes de positionnement de l'aimant [2] :

- Aimants en surface (Surface magnet type).
- Aimants insérés (Inset magnet type).
- Aimants enterrés (Interior magnet type).
- Aimants à concentration de flux (Burried magnet type).

I.3. Classement des machines synchrones :

En regroupe trois grandes familles de machine synchrone comme suivant :

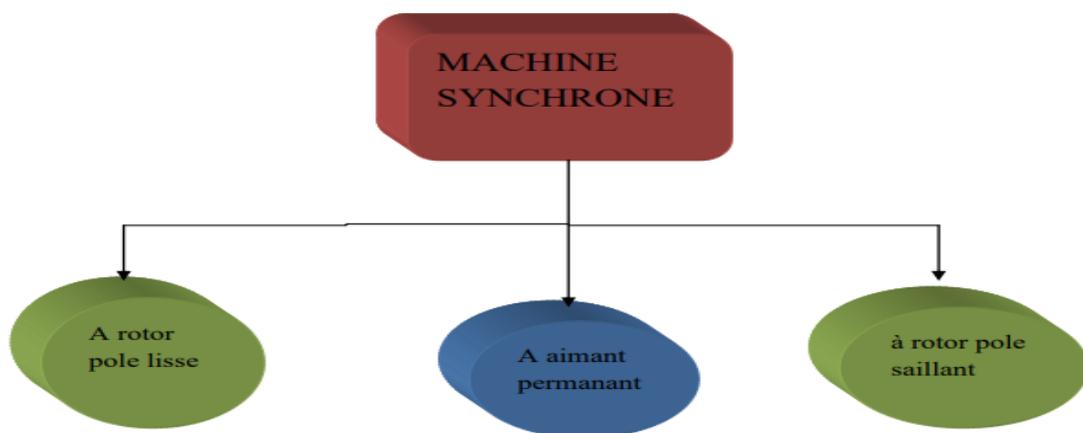


Figure I.3 : représenté un schéma de type de machine synchrone [3].

I.3.1 Rotors à pôles lisses

L'intervalle d'air a une épaisseur constante qui est indépendante de la position de l'arbre à un point donné. Ils peuvent être trouvés sur les machines suivantes [3]:

- À faible nombre de pôles (2 ou 4)
- De faible diamètre.
- De longueur importante.

I.3.2 Rotors à pôles saillants

L'épaisseur de l'intervalle d'air varie en fonction de la position de l'arbre à un moment donné. Ils peuvent être trouvés sur les machines suivantes [3] :

- À nombre de pôles élevés (jusqu'à 40)
- De diamètre élevé.
- De longueur relativement faible.

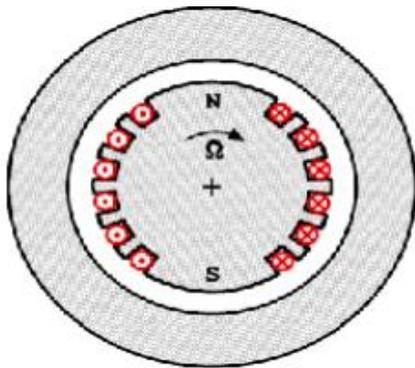


Figure I.4 : MS rotor à pole lisse.

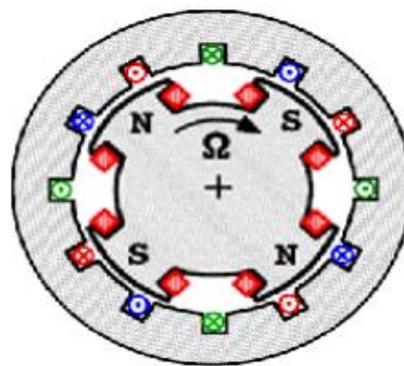


Figure I.5: MS rotor à pole saillant.

I.4. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

Le moteur synchrone est constitué de deux parties, une partie mobile ou rotor constituant l'inducteur, et une partie fixe ou stator portant des enroulements constituant l'induit. La mince zone localisée entre ces deux éléments est appelée entrefer. Le stator d'une machine synchrone triphasée est constitué de trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer. Il est généralement construit en tôle à base d'alliage fer-silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée [4].

Au rotor, les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternant pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f.é.m) alternatives. L'interaction des champs statorique et rotorique donne naissance à un couple sur l'arbre du moteur et entraîne le moteur à vitesse de rotation synchrone [5].

La figure suivante, présente une machine synchrone à aimants permanents

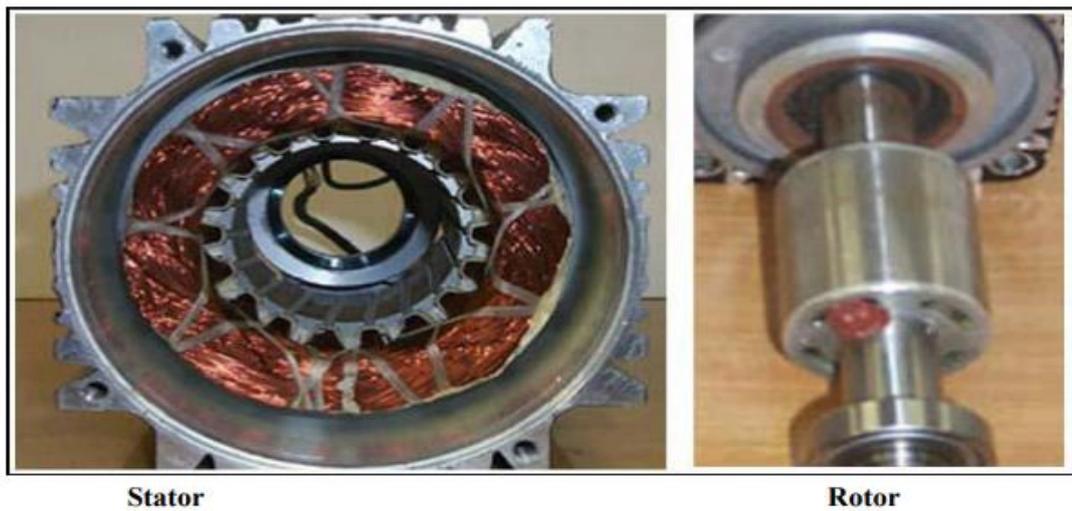


Figure.I.6: stator et rotor de la machine synchrone à aimants permanents.

I.4.1. Exemples usuels des moteurs à aimants permanents

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue construction mécanique [6] [7]:

➤ **Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS) :** Parce que les aimants radiaux permanents sont placés directement sur la périphérie du rotor, cette structure est la plus simple à construire. La plupart des aimants sont en forme de carreaux et collés à une culasse. Cette structure de la machine tombe dans la catégorie des machines à poteaux lisses.

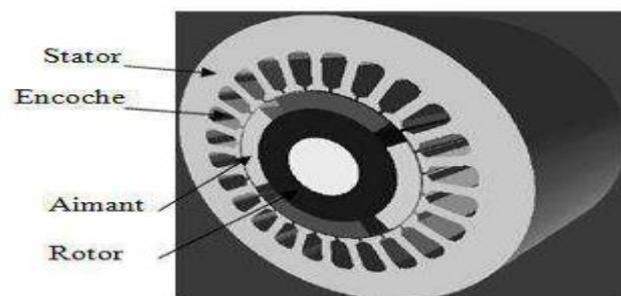


Figure I. 7: Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.

➤ **Machine synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI) :** Pour faciliter l'assemblage mécanique, les fentes de la structure antérieure ont été rainurées pour permettre l'insertion des aimants permanents dans le rotor. Les espaces inter-polaires mettent en évidence les sections de fer entre les aimants permanents. Les propriétés de cette structure, cependant, sont sensiblement similaires à la MSAPS.

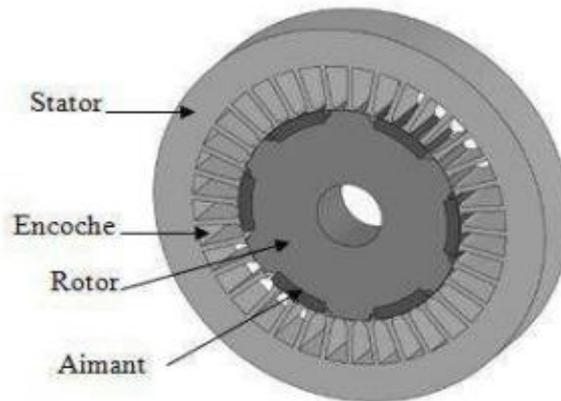


Figure I. 8: Machine synchrone à aimants permanents insérés.

➤ **Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC) :** Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaire généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la f.e.m. au stator en agissant sur le profil de la pièce.

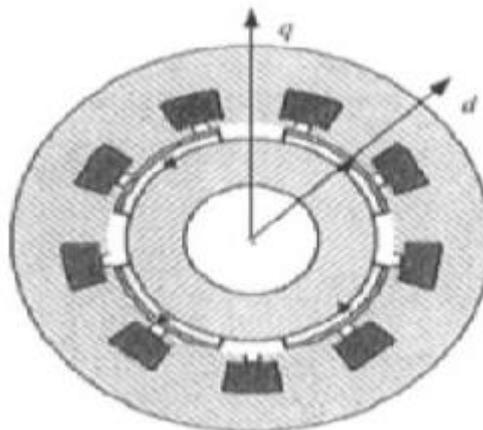


Figure I. 9: Machine synchrone à aimants permanents chapeautés

➤ **Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE) :** Le but de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'intervalle d'air par rapport à l'induction résiduelle de l'aimant permanent. En fait, les parties polaires utilisent des aimants tangentiels dont la surface

latérale est supérieure à la demi-surface de la partie polaire prise à l'entrefer pour canaliser le flux généré par les aimants permanents.

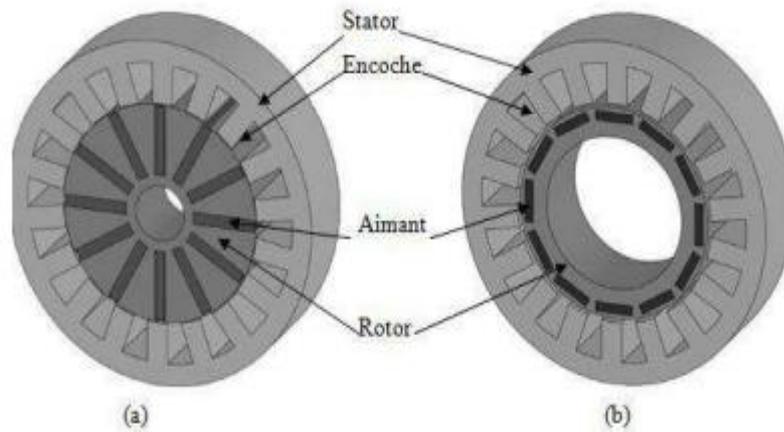


Figure I. 10 : Machine synchrone à aimants enterrés : (a) avec concentration de flux,
(b) structure classique.

I.4.2. Matériaux pour aimants

On peut distinguer trois types de matériaux pour la réalisation des aimants :

➤ **Les Alnicos** : sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt, leurs champs rémanents est élevé, mais leur excitation coercitive est faible, sensibles aux champs antagonistes.



Figure I.11 : les Alnicos.

➤ **Les ferrites** : sont des composées d'oxydes de ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum. Leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante. Le faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants [8].



Figure I.12 : les ferrites.

➤ **Les composées de cobalt et de terre rares comme le samarium** : Ce sont actuellement les aimants permanents les plus puissants utilisés dans la construction de machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium-cobalt, caractérisé par une induction résiduelle élevée et un champ coercitif. La densité d'énergie stockée dans l'aimant est trois fois supérieure à celle d'Alnicos et six fois supérieure à celle des ferrites de même taille, ce qui entraîne une réduction significative du volume du rotor, une augmentation du couple de masse et une diminution de l'inertie. Cependant, ils ont un coût élevé.

Ces caractéristiques peuvent être utilisées pour classer différents types d'aimants.

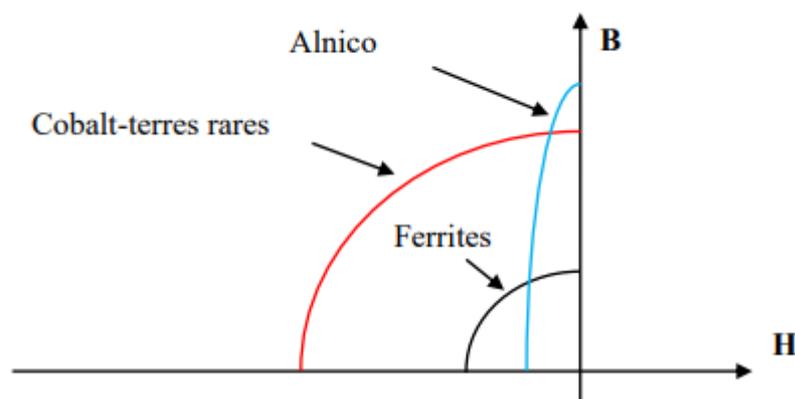


Figure I.13 : Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux [10].

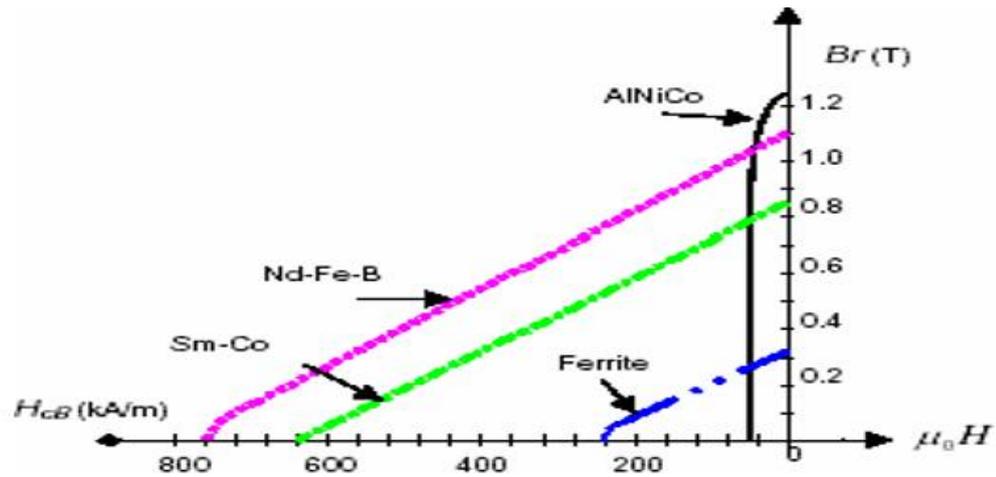


Figure I.14: donne les courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.

Le choix des aimants est effectué en fonction des caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le (tableau I.1) ci- dessous [10]:

Type d'aimants	Densité d'énergie (BH) max (kJ /	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif -Hc (kA/m)	Température Tmax (°C)	Prix (€ / Kg)
NdFeB	200 - 380	1,2 - 1,5	900-2000	140 -220	80-150
Sm Co5	140 - 200	1	2000	280	220
Sm2 Co17	180 - 240	1,0 5	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1,1 - 1,3	130	550	45
Ferrites strontium	27-35	0,3 - 0,4	250	250	6
Ferrites barium	8-30	0,2 - 0,4	170	100-240	4,5

Tableau I.1 : Exemples de propriétés magnétiques des aimants.

I.4.3. Analyse du fonctionnement de la MSAP

La machine étudiée est un moteur, il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. Plus le couple sur l'arbre est élevé plus l'angle de décalage polaire est plus grand. Le rotor décroche du flux tournant dès que cet angle dépasse 90. La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator. La caractéristique du couple-angle électrique est illustrée dans la figure suivante [9] :

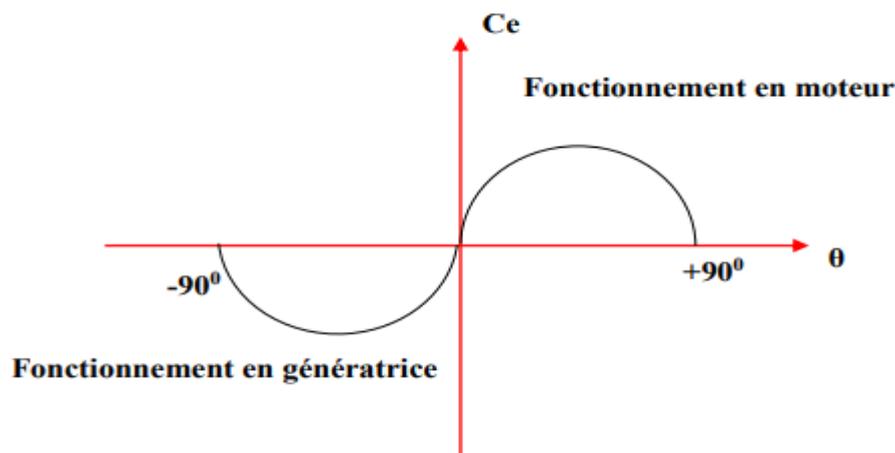


Figure I.15 : Caractéristique du couple-angle électrique.

I.5. Couple des machines synchrones à aimants permanents

On distingue trois types de couple [1]:

- **Couple de détente :**

Quand les aimants tournent avec le rotor et passent devant les dents du stator, ils rencontrent une reluctance variable qui entraîne un couple de valeur moyenne nulle que l'on appelle couple de détente; pour tenter de l'annuler, les encoches peuvent être inclinées d'un pas d'encoche, mais cela rend plus difficile l'opération de bobinage, il est préférable d'incliner les aimants plutôt que les encoches.

- **Couple reluctance :**

Appelé aussi couple de saillance, il est dû aux variations des inductances des enroulements statorique en fonction de la position du rotor. Il faut noter que dans le cas des aimants montés en

surface, le flux d'induit rencontre la même réluctance quelle que soit la position du rotor, il n'y a pas donc pour ces moteurs de couple de réluctance à prendre en compte.

• **Couple mutuelle** : Il est dû à l'interaction des deux champs statorique et rotorique.

I.6. Comparaison entre la MSAP et les autres machines électriques

Dans le tableau (I.2), les caractéristiques des différentes machines sont comparées à celles de la MSAP. (Bénéfices et inconvénients).

MACHINE	CARACTERISTIQUES
MSAP	<ul style="list-style-type: none"> • excitation assurée par les aimants. • Pertes associées à la composante magnétisante négligeable. • Possibilité de fonctionnements à des facteurs de puissance élevés. • Dégradation des performances avec l'augmentation de la température. • possibilité démagnétisation des aimants (température, pic de courant, défluxage...)
Machine synchrone rotors bobinés	<ul style="list-style-type: none"> • Exige une alimentation auxiliaire à courant continu par alimenter le circuit d'excitation • commander très complexes • faible couple volumique • mauvais rendement global • mauvais facteur de puissance • Pertes Joules au rotor difficiles à évacuer. • robuste
MCC	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentation continue complémentaire • présence des contacts torments • maintenance régulière des balais • manquer robuste • grandes pertes dans l'inducteur

Tableau I.2 : comparaison entre les différents types des machines [10].

I.7. Les domaines d'application de MSAP

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance allant de quelques centaines de watts (servomoteurs) à plusieurs MEGA watts (systèmes de propulsion des navires). Dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction.

Applications, comme [11] [8]:

- Equipements domestiques (machine à laver le linge).
- Les automobiles.
- Les équipements de technologie de l'information (DVD drives).
- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.
- Les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste).
- Les servomoteurs.
- Les applications robotiques.
- La production d'électricité.
- La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins.
- Les machines-outils.
- Les applications de l'énergie de l'éolienne.

I.8. Principe de L'autopilotage des Machines Synchrones

L'autopilotage d'une machine synchrone consiste à maintenir constant ou peu variable le décalage angulaire entre les f.é.m. de celle-ci et les courants statoriques. Avec cette condition le couple électromagnétique développé par la machine peut être contrôlé et une boucle d'asservissement de position ou de vitesse peut être réalisée autour de la boucle de commande du couple de la machine. Pour réaliser cette tâche, le synchronisme de la machine doit être contrôlé par un capteur de position lié au rotor. Cela permet d'imposer le courant ou la tension qu'il faut afin d'assurer le contrôle du couple de la machine. Avec l'utilisation de ce principe, plusieurs variantes existent, dans lesquelles le type de la machine et du convertisseur sont pris en compte [8].

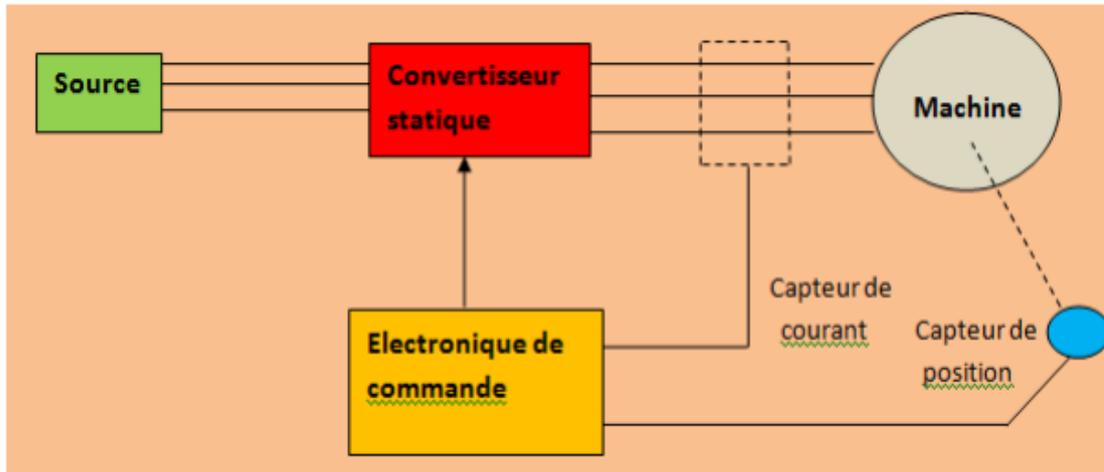


Figure I.16 : Schéma de Principe d'autopilotage d'une Machine Synchrone [8].

I.9. Différents modes d'alimentation des MSAP

La tension ou le courant peuvent être utilisés pour alimenter la machine synchrone. Pour le fonctionnement dans les quatre quadrants (moteur/générateur dans toutes les directions de rotation), la source doit être réversible. Les convertisseurs électroniques de puissance AC/DC ont une large gamme d'applications, dont la plus célèbre est peut-être la variation de vitesse de la machine AC. Le développement de composants semi-conducteurs entièrement programmables, puissants, résilients et rapides a entraîné le développement rapide de cette capacité [13].

I.9.1 Alimentation par un commutateur de courant

La commutation peut être naturelle dans le cas d'une alimentation en courant (le courant doit être en avance sur la tension). La machine doit être surexcitée pour supporter ce style de fonctionnement). La commutation peut être forcée en même temps. Les f.é.m., par exemple, sont insuffisants pour permettre aux thyristors d'être éteints au démarrage. L'alimentation de la machine doit être adaptée aux propriétés de la machine. Dans le cas d'une machine avec une courbe de couple électromagnétique trapézoïdale $C_e(m)$ lorsque deux de ses phases sont alimentées en série par un courant constant, il sera préférable de fournir une niche de courant (moteur magnétique synchrone sans pièces polaires). Les ondulations de couple (la superposition des courbes) sont minimisées avec cette alimentation [14].

I.9.2 Alimentation par un onduleur de tension

Un convertisseur statique alimenté par une source de tension continue constante peut également commander un moteur synchrone. En agissant sur la commande des commutateurs du convertisseur

statique, les onduleurs de tension peuvent imposer des tensions d'amplitude et de fréquence variables sur les enroulements du stator de la machine (GTO, transistors bipolaires, MOSFET, IGBT, etc.). dans les années 90, le transistor IGBT a complètement relancé la construction des onduleurs nécessaires à l'alimentation des moteurs à courant alternatif asynchrones et synchrones. Facile à commander, sa grille étant assimilable à un circuit de charge d'un condensateur, il présente les principaux avantages d'un transistor bipolaire, et il se prête aussi particulièrement bien à la mise en parallèle. Pour réaliser un onduleur triphasé classique alimenté par une source de tension continue (munie d'un filtrage capacitif), et dont le récepteur est une charge alternative qui se comporte comme une source de courant (le stator d'une machine à courant alternatif est inductif), on a besoin de 6 interrupteurs bidirectionnels en courant. Il faut aussi disposer donc de diodes rapides et performantes, montées en parallèle inverse avec les transistors IGBT. Cette conception permet d'imposer des courants de distorsion harmoniques faibles aux moteurs, ouvrant la voie au développement de systèmes d'entraînement à moteur AC haute performance. Dans la nomenclature anglo-saxonne, ces approches sont appelées (modulation de largeur d'impulsion, MLI) ou (Pulse Width Modulation, PWM, dans le jargon anglo-saxon). La performance de fréquence de coupe des composants électroniques utilisés dans ces schémas de commande de l'onduleur est basée sur la performance de fréquence de coupe autorisée par les composants électroniques utilisés [14].

I.10. Avantages des MSAPs par rapport aux autres types de machines

Un avantage évident de l'utilisation d'aimants à un niveau producteur de flux est l'élimination des pertes dues à l'effet Joule d'un système inductif. On voit que dans le cas des machines classiques, l'importance relative de ces pertes par effet Joule par rapport à la puissance utile est plus élevée du fait de la taille réduite de la machine. Un autre avantage de l'excitation magnétique est lié à une sécurité de fonctionnement accrue. Indéniablement, les moteurs synchrones à aimants sont intéressants du point de vue de la puissance, du rendement, du facteur de puissance et du moment d'inertie pour la plage utilisable (coût et fiabilité) [14].

I.10.1. Moteurs synchrones à aimants - Moteurs à courant continu :

Les moteurs à courant continu sont en concurrence avec les moteurs synchrones à aimants. En effet les moteurs synchrones à aimants créent un couple élevé, et l'absence d'un système de brosse pour les lames du collecteur permet moins d'entretien et d'éviter les problèmes avec des limitations de vitesse maximales [14].

I.10.2. Moteurs synchrones à aimants - Moteurs synchrone classique :

La perméabilité des aimants modernes, particulièrement les plus puissants, comme les terres rares, est similaire à celle de l'air. En conséquence, l'écart correspondant est plus grand que pour les machines synchrones classiques. Les moteurs à aimants synchrones bénéficient de cet avantage puisqu'ils sont plus stables. Le moteur synchrone typique, par contre, est limité pour les vitesses de rotation élevées par le volume de son rotor, ce qui n'est pas le cas avec un inducteur à aimants. Les décrochages et les ralentissements ne sont plus un problème avec les voitures autonomes [14].

I.10.3. Moteurs synchrones à aimants - Moteurs asynchrones :

Les moteurs à aimants présentent les avantages suivants par rapport aux moteurs asynchrones [14] :

- Un faible moment d'inertie, ce qui a pour effet de donner une réponse plus rapide pour un couple donné.
- Un rendement plus élevé que celui des moteurs asynchrones classiques, en effet les pertes joules rotoriques sont négligeables pour les machines à aimants, tandis que les pertes fer rotoriques d'un moteur asynchrone dépendent du glissement.
- Le moteur à aimants est avantage par sa rusticité, et il n'a pas besoin de requérir à une source de courant d'excitation, ce qui n'est pas le cas pour le moteur asynchrone.
- Pour les mêmes performances, le moteur est de taille plus réduite, cet avantage permet d'utiliser les machines à aimants là où l'encombrement est limité. Toute fois le moteur asynchrone ne produit pas de couple de détente ce qui est le cas des machines synchrone à aimants.

I.11. Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents [15]

- Coût élevé des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons présenté des informations générales sur la machine synchrone à aimants permanents. En passant en revue les différents types d'aimants permanents utilisés qui sont des éléments fondamentaux pour ce type de machine, les différentes structures des aimants sur le rotor, les domaines d'application, et enfin les avantages et les inconvénients de la machine MSAP.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et à la simulation de la machine synchrone à aimants permanents.

Chapitre II :
Modélisation des machines
synchrones à aimants
permanents

II.1. Introduction

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Ce qui nous permet d'étudier le comportement de ce système face aux différentes sollicitations et comprendre ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement [36], La modélisation de la MSAP fait l'objet de nombreuses études en moyenne et grande puissance. La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP facilite largement son étude.

Les lois modernes de commande de plus en plus performantes permettent un meilleur contrôle des régimes transitoires tout en assurant, dans une grande plage de fonctionnement, un asservissement précis de la vitesse. Tous ces perfectionnements demandent une bonne connaissance de la machine et de son convertisseur, notamment en régime transitoire [34].

Dans ce chapitre on présentera la Structure d'entraînement à vitesse variable et la modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents et Simulation des différents fonctionnements de la MSAP Alimentation par un réseau triphasé équilibré et alimentée par onduleur de tension. La simulation est réalisée grâce au logiciel MATLAB/Simulink.

II.2. Structure d'entraînement à vitesse variable pour moteur synchrones

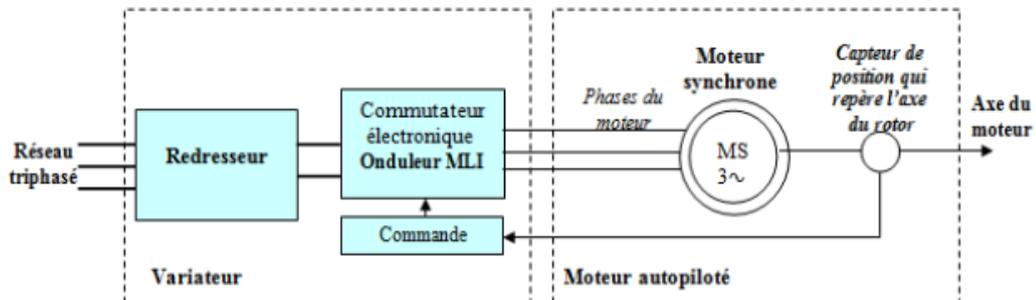


Figure II.1 : Schéma de principe d'entraînement à vitesse variable pour moteur synchrones [42].

II.3. Hypothèse simplificatrices

Pour faire la modélisation et réduire la complexité du modèle de la MSAP, on adopte certaines hypothèses simplificatrices [17] [18]:

- La saturation des courants de Fauculté, l'hystérésis et le circuit magnétique sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne changent pas par rapport les températures et l'effet de peau sont négligeables.
- On admet que la force magnétomotrice créée par les enroulements est sinusoïdale.
- L'enter fer est d'épaisseur uniforme.

- L'effet d'encoche est plus petit ou bien négligeable.
- L'induction dans l'enter fer est sinusoïdale.
- Les harmoniques d'encoche et d'espaces ne sont pas prises en compte.
- L'hystérésis et l'effet de peau sont négligeables.
- L'excitation utilisée par un aimant permanent, tel que le flux d'excitation, est généralement un aimant fixe, et peut également être considérée comme un enroulement sans résistance ou inductance mutuelle appropriée, mais comme une source de flux.

II.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Une méthode mathématique pour réduire une machine électrique à un système simple d'équations différentielles appelé modélisation. La création d'un modèle mathématique d'une machine est une condition préalable pour contrôler et simuler ses nombreux régimes de fonctionnement. Les équations du modèle sont fondées sur les hypothèses communes suivantes [19] [16] :

II.4.1. Mise en équation de la MSAP en triphasé

➤ Équations électriques

Les tensions, flux et courants statoriques triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes respectivement : $[V_s]$, $[\varphi_s]$ et $[i_s]$

La figure (II.2) représente les enroulements d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents:

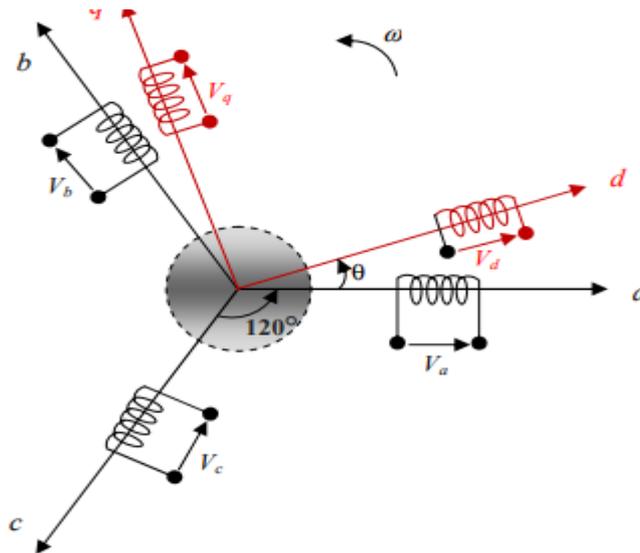


Figure II.2: Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.

Chapitre II Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

A partir de la figure, nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle:

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + d \frac{[\varphi_s]}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$[\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [\varphi_f] \quad (\text{II.2})$$

$$\text{D ou } [L_s] = [L_{s0}] + [I_s v]$$

Avec :

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

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

$$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T : \text{Vecteur flux statoriques.}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice résistances du stator.}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} : \text{Matrice d'inductances du stator.}$$

$$[\varphi_s] = [\varphi_{sf}] \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} : \text{Vecteur flux engendré par l'aimant.}$$

Avec:

φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant à travers les enroulements statoriques [20] [21].

θ : Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé défini par [20]:

$$\theta(t) = \int_0^T \omega dt \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Avec } \omega = p \omega_r \quad (\text{II.4})$$

ω : La pulsation électrique.

P : Le nombre de pair de pôles de la machine.

Chapitre II Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

ωr : La vitesse de rotation de la machine (rotor). Le modèle électrique doit être complété par les expressions du couple électromagnétique et de la vitesse, décrivant ainsi le mode mécanique.

➤ Équation électromagnétique

La connaissance du couple électromagnétique de la machine est essentielle pour l'étude de la machine et sa commande [20] [21].

$$C_{em} = [Is]^T \cdot \left[\frac{d[L_{ss}]}{2d\theta} \right] \cdot [Is] + \frac{d[\varphi_s f]}{2d\theta} \quad (II.5)$$

➤ Équation mécanique

Les seules pièces mobiles d'une MSAP sont le rotor. La robustesse et la fiabilité du MSAP est une conséquence directe de sa structure peu compliquée, le point de départ pour un modèle du système mécanique est la deuxième loi de Newton. La dernière équation importante complète le modèle du MSAP, est l'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine [20] [21] [22]:

$$\sum i C_i = J d\Omega dt \quad (II.6)$$

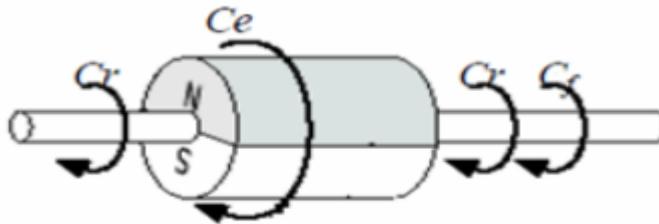


Figure II.3 : Différents couples qui agissent sur le rotor.

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (II.7)$$

$$\text{Avec : } C_f = f\Omega \quad (II.8)$$

J : Moment d'inertie du moteur.

f : coefficient de frottement visqueux.

C_e : le couple électromagnétique délivré par le moteur.

C_r : le couple résistant, ou de charge.

II.4. 2.Transformation triphasé -diphase

II.4.2.1. Principe de la transformation de Concordia

La transformation directe de Concordia est définie par une matrice $[C]$. Aux vecteurs originaux $[V_{abc}]$ $[I_{abc}]$ $[\varphi_{abc}]$, la transformation de Concordia fait correspondre les vecteurs

Chapitre II Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

originaux $[V_{\alpha\beta 0}] [I_{\alpha\beta 0}] [\varphi_{\alpha\beta 0}]$. Elle est appliquée de manière identique aux tensions, aux courants, et aux flux.

La transformation de Concordia est définie par :

$$\begin{cases} [X_{abc}] = [C][X_{\alpha\beta 0}] & \text{(II.9)} \\ [X_{\alpha\beta 0}] = [C^{-1}][X_{abc}] & \text{(II.10)} \end{cases}$$

Où $[C]$ est la matrice de transformation directe de Concordia, elle est donnée par [23],[29] :

$$[C] = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(II.11)}$$

II.4.2.2. Principe de la transformation du Park

La transformation de Park est souvent appelée transformation à deux axes. Physiquement, l'application de cette transformation à la MSAP correspond à une transformation des trois bobines (statoriques) à deux bobines équivalentes reprenant les mêmes considérations ou aspects en termes de f.é.m., de flux, de couple ou du moins une image qui leur sera parfaitement proportionnelle. On définit une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux. Elle conserve l'invariance de la puissance et est orthogonale. De plus, on fait l'hypothèse que toutes les grandeurs homopolaires sont nulles. La transformation qui traduit ce passage du système triphasé (a, b, c) au système biphasé (d, q) est donnée par [24] [14] :

$$\begin{cases} [X_{abc}] = [P] \cdot [X_{dq0}] & \text{(II.12)} \\ [X_{dq0}] = [P]^{-1} [X_{abc}] & \text{(II.13)} \end{cases}$$

$[P]$: La matrice de passage direct de Park,

X_{abc} : Représente les variables considérées de la machine (tensions, courants ou flux).

X_{dq0} : La composante homolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre.

[P] et [P]⁻¹ sont les matrices de passage directe et inverse, qui sont données par:

$$[P] = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$[P]^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

II.4.2.3. Choix du Référentiel

Pour étudier la théorie des régimes de la machine synchrone à aimants permanents, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d, q) [26]:

- **Référentiel lié au stator** : dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au stator, dans ce cas la phase a et d coïncident. Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes de démarrages et de freinages des machines à courants alternatif.
- **Référentiel lié au rotor** : dans ce référence, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω_r .L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrages et transitoires dans les machines synchrones et asynchrones.
- **Référentiel lié au champ tournant** : dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au champ tournant électromécanique créé par les enroulements du stator. Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de prévoir l'application d'une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

II.4.3. Modélisation de la MSAP dans le modèle de Park

En appliquant la transformation de Park au système d'équation du MSAP, on peut exprimer tous les vecteurs de courants, de tensions et de flux dans un repère lié au rotor. On obtient donc [27] [28]:

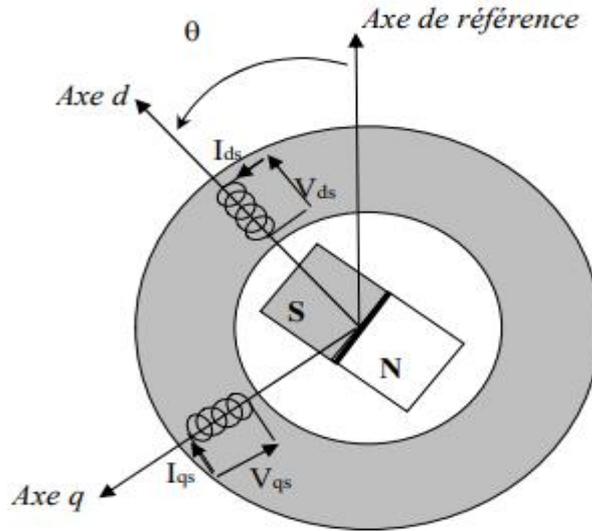


Figure II .4: Machine équivalente au sens de Park.

➤ **Équations électriques**

Le modèle de la machine après la transformation de Park est donné par [19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = R_s \cdot I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega r \varphi_q \end{array} \right. \quad (\text{II.16})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_q = R_s \cdot I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega r \varphi_d \end{array} \right. \quad (\text{II.17})$$

➤ **Équations magnétiques**

Les équations des flux peuvent s'écrire comme suite [19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_d = L_d \cdot I_d + \varphi_f \end{array} \right. \quad (\text{II.18})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_q = L_q \cdot I_q \end{array} \right. \quad (\text{II.19})$$

φ_d : Constante indiquant le champ dû à l'aimantation permanente du rotor Sur l'axe q.

Après le remplacement des deux équations des flux dans (II. 20 et II. 21) le modèle de la MSAP peut s'écrire sous la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega r \cdot L_q \cdot I_q \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_q = R_s \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega r \cdot (L_d \cdot I_d + \varphi_f) \end{array} \right. \quad (\text{II.21})$$

Avec :

V_d : Tension statorique sur l'axe d.

V_q : Tension statorique sur l'axe q.

I_d : Courant statorique sur l'axe d.

I_q : Courant statorique sur l'axe q.

L_d : Inductance statorique sur l'axe d.

L_q : Inductance statorique sur l'axe q.

Ces équations permettent de dessiner le circuit équivalent de la machine synchrone à aimants permanents dans le système d'axe d-q présenté par la figure (II.6)

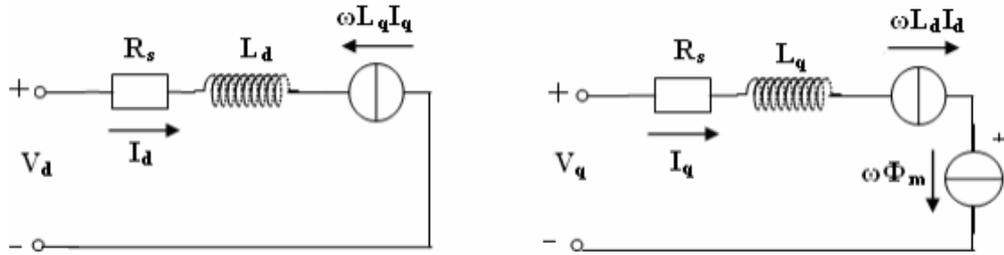


Figure II.5 : Le circuit équivalent du MSAP dans le système d'axe (d-q).

➤ Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [29] [30]:

$$C_e = \frac{d\omega e}{d\theta_{geo}} = P \frac{d\omega e}{d\theta_e} \quad (\text{II.22})$$

ωe : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

P : nombre de paires de pôles, Selon Park l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II.23})$$

En remplaçant V_d, V_q par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} [R_s(I_d^2 + I_q^2) + (I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\varphi_q}{dt}) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d)] \quad (\text{II.24})$$

$\frac{3}{2} [R_s(I_d^2 + I_q^2)]$: représente la puissance dissipée en pertes Joules dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} (I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\varphi_q}{dt})$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d)$: Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P\Omega = \omega \text{ et } P_e = C_e \omega$$

$$Ce = \frac{3}{2} P [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] \quad (\text{II.25})$$

Après affectation des opérations nécessaires on peut écrire:

$$Ce = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + I_q \varphi_f] \quad (\text{II.26})$$

➤ **Équations du mouvement** [31]

$$J \frac{d\Omega}{dt} = Ce - Cr - f\Omega \quad (\text{II.27})$$

Avec

J : Le couple d'inertie des masses tournantes.

Cr : Couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique.

Ce : Couple électromagnétique.

Ω : vitesse mécanique de rotation.

f : Coefficients des frottements visqueux.

II.5.4. Mise sous forme d'équation d'état

En prenant les tensions (V_d, V_q) et le flux d'excitation φ_f comme grandeurs de commande, les courants statorique (I_d, I_q), comme variables d'état et le couple Cr comme Perturbation. Alors à partir de ça on peut écrire le système sous forme d'équations d'état [32] [43] :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{II.28})$$

où $[X] = [i_d, i_q]^t$ est le vecteur des variables d'état

$[U] = [V_d, V_q, \varphi_f]^t$ Est le vecteur de commande.

$[A]$: Matrice du fondamentale qui caractérise le système.

$[B]$: Matrice d'entrée.

$[V]$: Vecteur de commande.

$[X]$: Vecteur d'état.

Le système peut s'écrire sous forme d'équation suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U]$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_r \\ \frac{-L_d}{L_q} \omega_r & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega_r}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

On peut écrire les matrices $[A]$ et $[B]$ sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_r \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega_r & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix}$$

$$\left\{ \begin{aligned} [A] &= [A_1] + \omega_r [A_2] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \\ [B] &= [B_1] + \omega_r [B_2] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_q} \end{bmatrix} \end{aligned} \right.$$

Donc la forme d'équation d'état donnée comme suite [31] [1] :

$$\left\{ \begin{aligned} d \frac{I_d}{dt} &= \frac{V_d}{L_d} - R_s \frac{I_d}{L_d} + p\omega_r \frac{L_q}{L_d} I_q \\ d \frac{I_q}{dt} &= \frac{V_q}{L_q} - R_s \frac{I_q}{L_q} - p\omega_r \frac{L_d}{L_q} I_d - p\omega_r \frac{\phi_{fs}}{L_q} \\ C_e &= \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + I_q \phi_{fs}] \\ J \frac{d\omega_r}{dt} &= C_{em} - C_r - f_r \omega_r \end{aligned} \right. \quad (II.30)$$

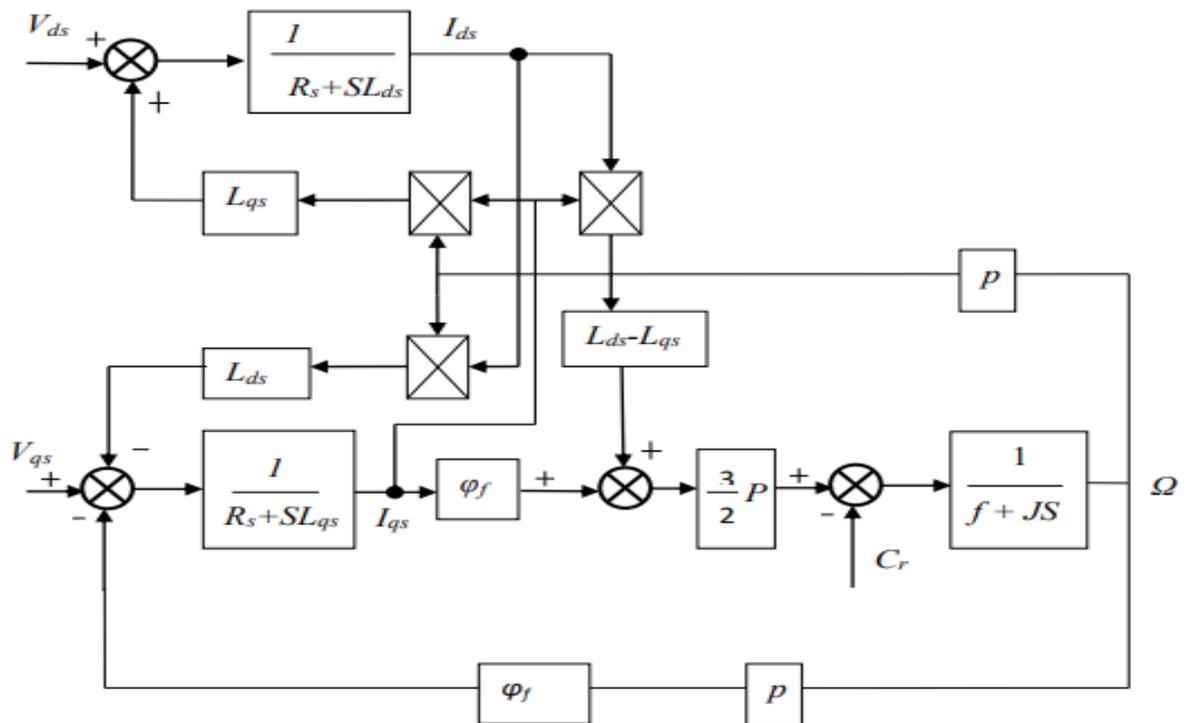


Figure II.6 : Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension.

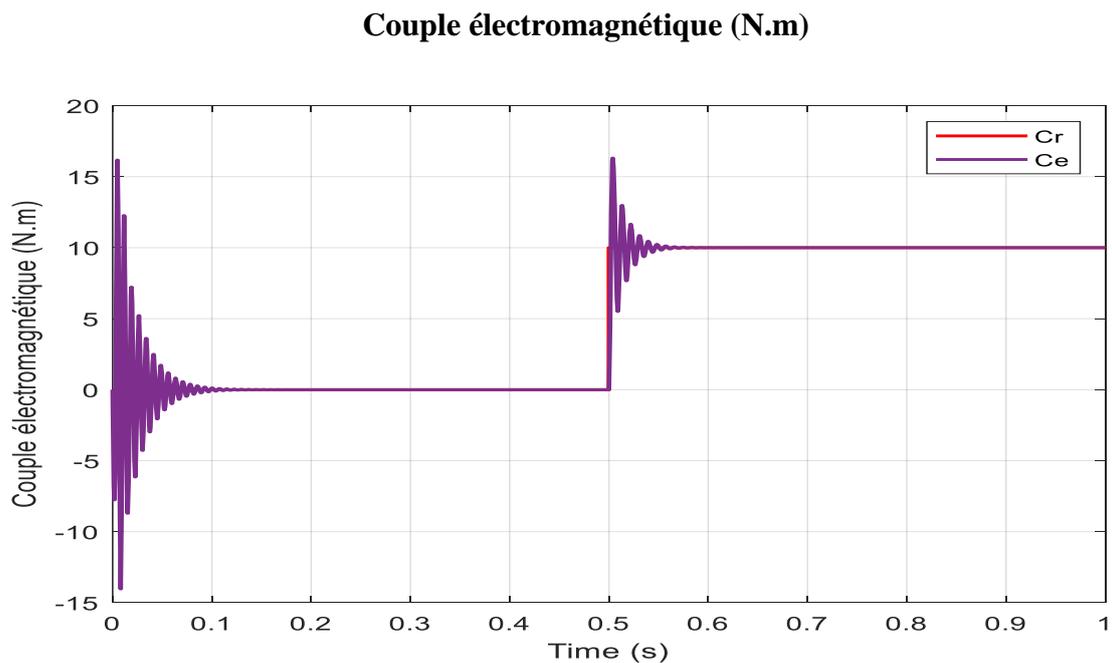
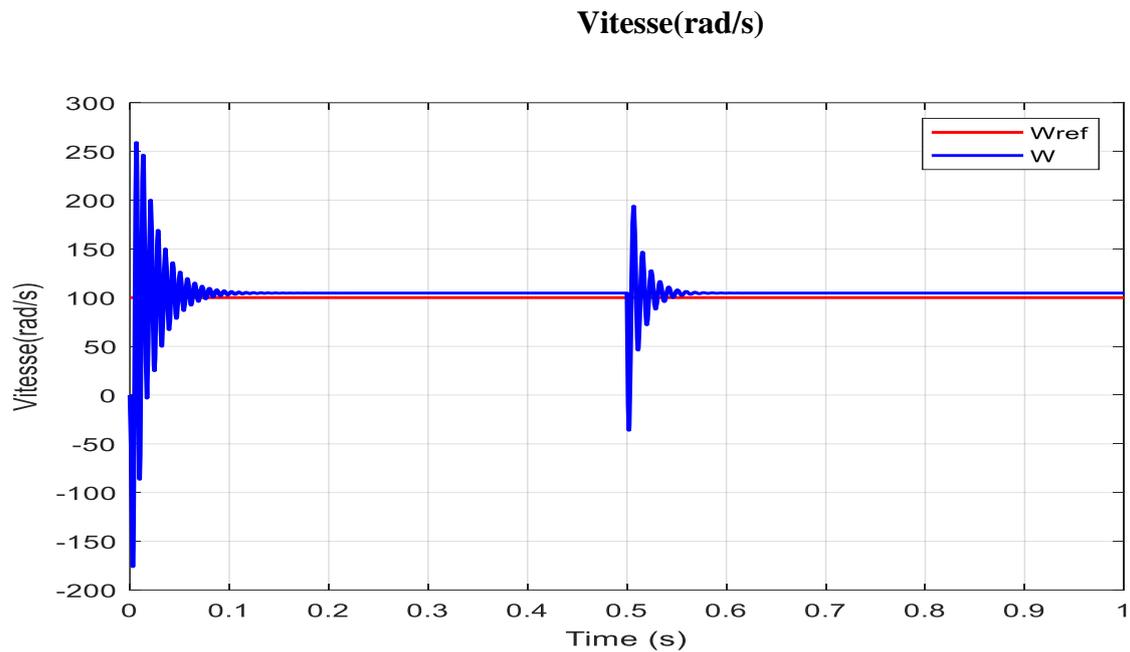
II.5 .Simulation numérique des différents fonctionnements de la MSAP

II.5.1. Alimentation par un réseau triphasé équilibré

Pour compléter l'étude théorique présentée précédemment, la première application, du modèle de la machine synchrone à aimants permanents et sa mise en œuvre dans la simulation numérique d'un démarrage direct sur un réseau (220/380V) triphasé équilibre de fréquence fixe 50HZ.

La simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

❖ Résultat de simulation démarrage en charge :



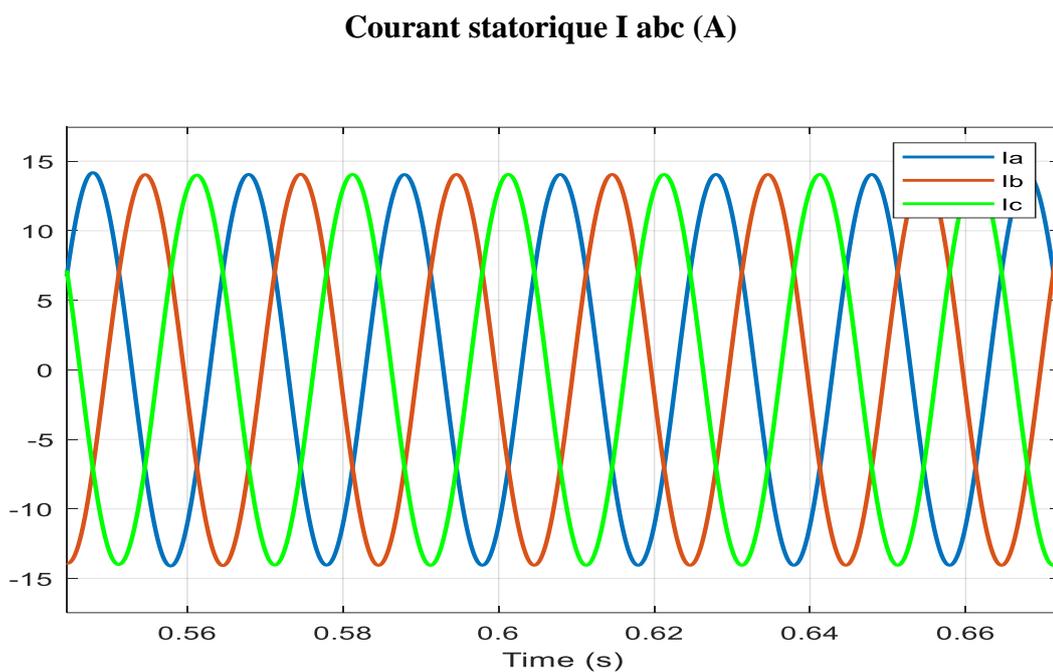
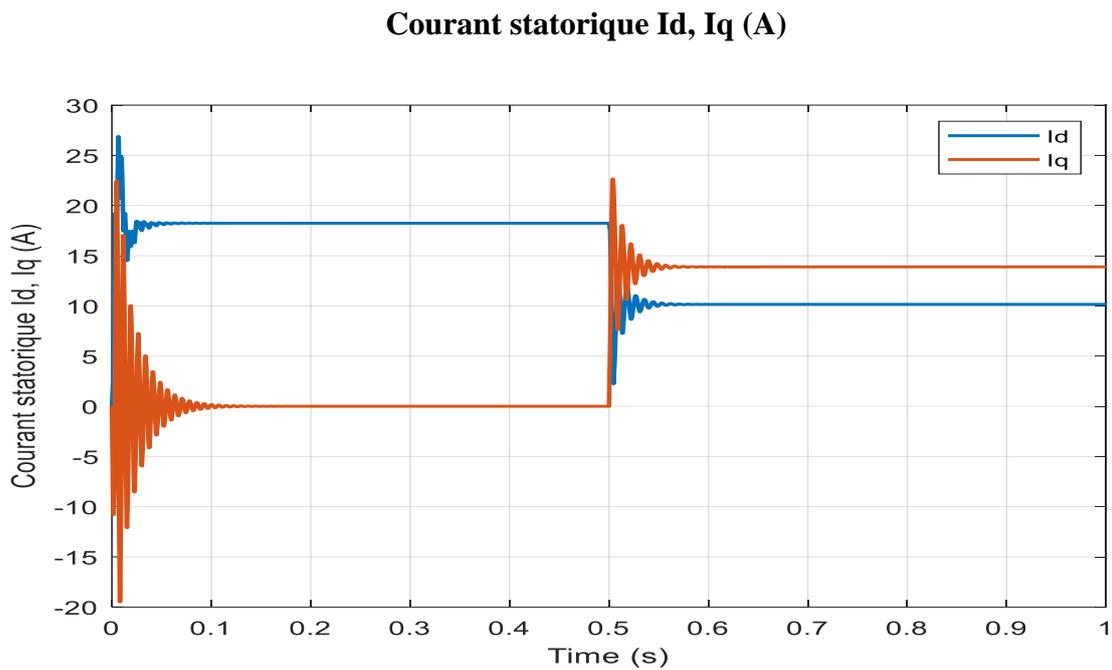


Figure II.7: Résultats de la MSAP alimenté par un réseau triphasé équilibré puis application d'un couple de charge $C_r = 10 \text{ N.m}$ à $t = 0.5\text{s}$.

❖ **Interprétation des résultats:**

La vitesse atteint une vitesse constante avec un dépassement rapide, puis reste constante et égale à la vitesse de synchronisation jusqu'à $C_r = 10\text{N.m}$ est appliquée à $t = 0.5\text{s}$, lorsque la perturbation

de charge est présente. On remarque que la vitesse reste constante, ce qui est une propriété de la machine synchrone car elle tourne toujours à la vitesse de synchronisation.

Il y a un énorme pic de courant pendant le démarrage pour les composants des courants, qui ensuite se stabilisent dans une valeur permanente.

Il est également intéressant de noter que le couple électromagnétique répond rapidement aux demandes de charge.

II.6. Modélisation de l'alimentation de la MSAP

Les machines synchrones sont divisées en deux groupes basés sur la distribution spatiale des conducteurs (sinus et non sinus). Les moteurs synchrones sinusoïdaux sont alimentés par des courants sinusoïdaux et ont un couple constant en théorie, et leur modèle linéaire dans repère Park est assez simple [33].

II.6.1. Constitution d'alimentation de la MSAP

Les différents éléments constituant la chaîne d'alimentation sont [34]:

- **Source électrique à courant alternatif** : la source électrique alternative est généralement obtenue par un réseau triphasé électrique.
- **Redresseur** : il permet de transformer une tension alternative en tension continue.
- **Filtrage** : il élimine les phénomènes d'ondulation de la tension en sortie du redresseur. Ce filtre, associé au pont redresseur, représente une source de tension continue servant à alimenter le bus continu à l'entrée de l'onduleur.
- **Onduleur** : il permet de transformer une tension continue en une tension alternative d'amplitude et de fréquence variable.

II.6.1.1. Modélisations du redresseur triphasé double alternance à diodes

Un convertisseur alternatif/continu est le redresseur. Une conversion d'énergie électrique permet la création d'une source de courant continu à partir d'une autre source, comme le montre la figure suivante :

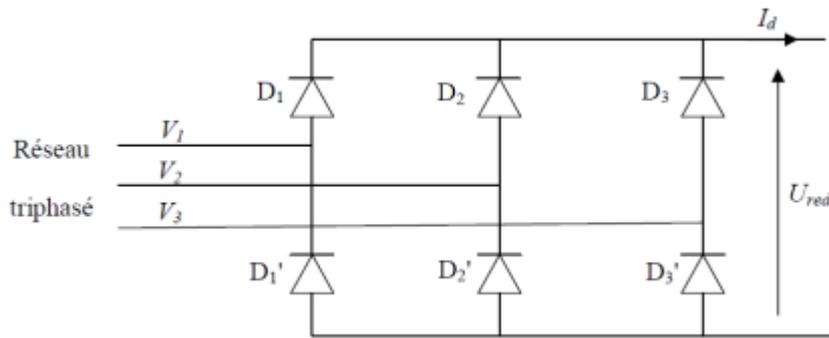


Figure II.8 : Redresseur triphasé double alternance à diodes.

Ce type de redresseur comporte trois diodes à cathode comme assurant l’aller du courant $i_d(t)$, D1, D2 et D3, et trois diodes à anode comme assurant le retour du courant $i_d(t)$, D4, D5 et D6. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\begin{cases} U_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ U_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ U_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$U_{redmoy} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (\text{II.32})$$

Cette tension redressée est assez ondulations, ce qui nécessite une opération de filtrage [35].

II.6.1.2. Modélisation du filtre

Afin de réduire le taux de l’ondulation de cette tension redressée, on utilise un filtre passe bas(LC), caractérisé par les équations différentielles suivantes [36]. Le schéma représentatif est donné par figure [37]:

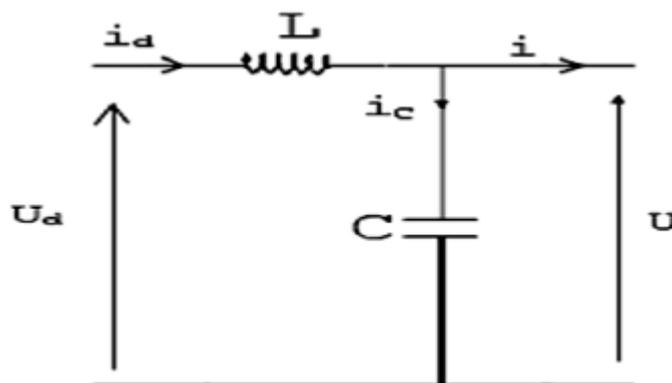


Figure II.9 : Le filtre passe bas.

Les équations du filtre sont :

$$\begin{cases} \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L} [U_d(t) - U(t)] \\ \frac{dU(t)}{dt} = \frac{1}{C} [i_d(t) - i(t)] \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Le rôle de la capacité C est d'assurer le caractère de source de tension à l'entrée de l'onduleur, de fournir l'énergie réactive à la machine, et d'absorber le courant négatif restitué par la charge.

Le rôle de l'inductance L est de lisser le courant i_d à travers la source de tension.

Le filtre est du deuxième ordre dont la fréquence de coupure est:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.34})$$

Le critère de minimisation des harmoniques de I_d et u conduit aux conditions suivantes sur le choix de L et C.

$$\omega_c \ll \omega \rightarrow \sqrt{LC} \cdot \omega \gg 1$$

$$i \ll i_c \rightarrow C\omega \gg \frac{1}{\omega}$$

Avec :

I : La valeur moyenne du courant i .

U : La valeur moyenne de la tension u .

ω : La pulsation de la tension.

II.6.2. Onduleur de tension triphasé

L'onduleur de tension est un dispositif qui convertit l'énergie continue en courant alternatif (DC/AC). Dans le monde actuel de la conversion de l'énergie électrique, cette utilisation est très courante. L'onduleur peut être utilisé à une fréquence définie, comme pour alimenter un système alternatif alimenté par batterie, ou à une fréquence variable (MLI), comme pour changer la vitesse de l'équipement électrique. L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir du réseau. L'onduleur de la machine est composé de trois bras composés de commutateurs électroniques qui sont choisis principalement en fonction de la puissance et de la fréquence de travail. Chaque bras a deux composants d'alimentation supplémentaires avec diodes montées antiparallèle. Une fois les interrupteurs ouverts, les diodes de roue libre assurent que le courant dans la machine continue à circuler [38] [16].

II.6.2.1. Modélisation de l'onduleur de tension

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure (II.10), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à $E/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 [39].

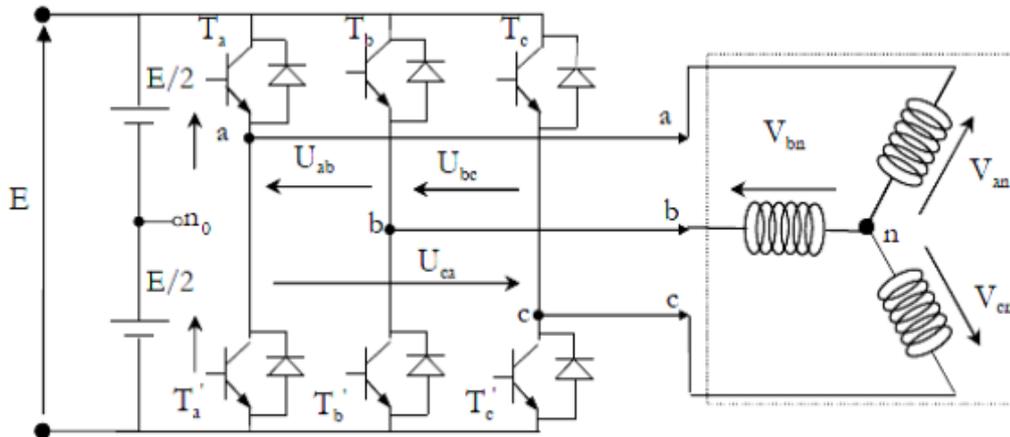


Figure II.10 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

Pour simplifier l'étude, on supposera que [40]:

- ✓ La commutation des interrupteurs est instantanée.
- ✓ La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- ✓ La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé n .

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an}, V_{bn} et V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques $S_j (j=a, b, c)$. On appelle T_i et T_i' les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux) ; on a :

- si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert.
- si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Les tensions composées (de lignes) délivrées par l'onduleur sont données comme suit :

$$U_{ab} = V_{an} - V_{bn} = E(S_a - S_b) \quad (\text{II.35})$$

$$U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = E(S_b - S_c) \quad (\text{II.36})$$

$$U_{ca} = V_{cn} - V_{an} = E(S_c - S_a) \quad (\text{II.37})$$

Les tensions V_{an}, V_{bn}, V_{cn} forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.38})$$

De (II.36), (II.38) et (II.39), on a :

$$V_{an} = \frac{E}{3} (2S_a - S_b - S_c) \quad (\text{II.39})$$

De (II.36), (II.37) et (II.39), on a :

$$V_{bn} = \frac{E}{3} (2S_b - S_a - S_c) \quad (\text{II.40})$$

De (II.37), (II.39) et (II.40), on a :

$$V_{cn} = \frac{E}{3} (2S_c - S_a - S_b) \quad (\text{II.41})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = E \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

II.6.2.2. Onduleur de Tension à MLI

Plusieurs types de MLI existent en pratique, notamment [36]:

Les modulations du triangle sinusoïdal comparent un signal de référence sinusoïdal à un porteur triangulaire.

Les modulations pré calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde fondamentale.

Les modulations MLI symétriques régulières ou vectorielles MLI sont des modulations post-computées dans lesquelles les angles de commutation sont déterminés en ligne. Voici une description de la stratégie la plus ancienne et là plus largement utilisée.

II.6.2.2.1. Modulation de Largeur d'Impulsion Sinus-Triangle

Le principe général est de convertir un modulateur (tension de référence de niveau de contrôle), généralement sinusoïdal, en une tension générée à la sortie de l'onduleur sous forme de fentes successives (niveau de puissance). Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux [41]:

- Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commande des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

Chapitre II Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs La commande de MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants [41] [14] :

- L'indice de modulation « m » égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence ($m = \frac{f_p}{f_{ref}}$).
- Le coefficient de réglage en tension « r » égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation ($r = \frac{v_{ref}}{v_p}$).

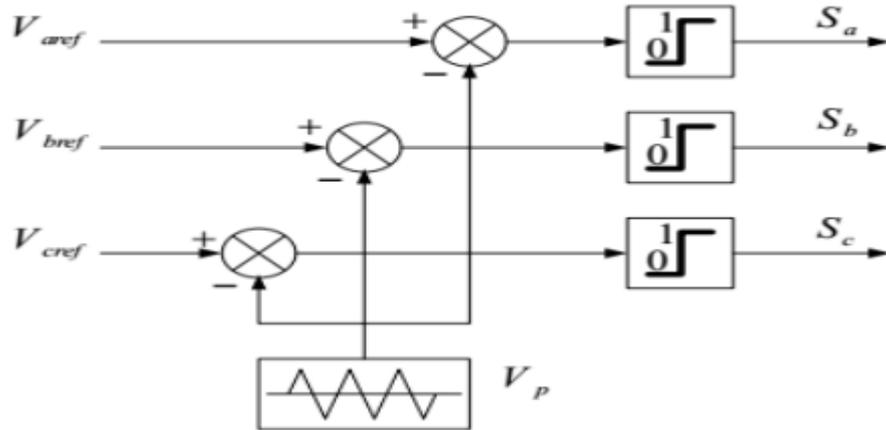


Figure II.11 : Schéma de principe de MLI sinus triangle.

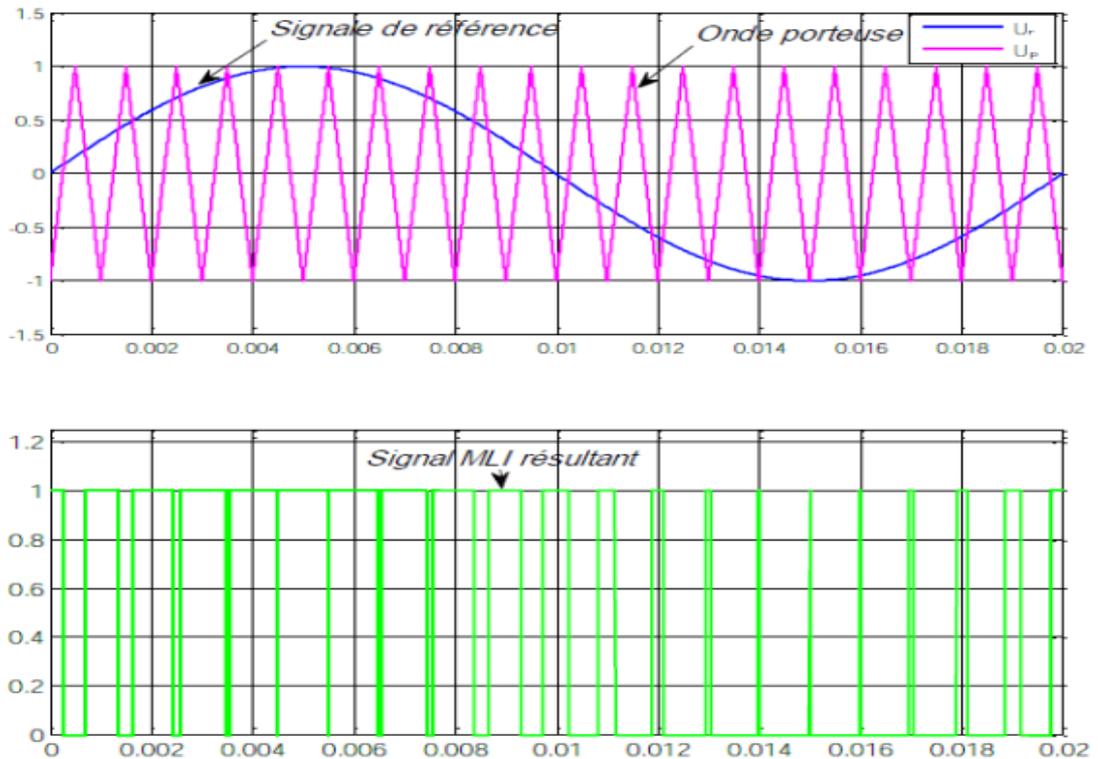


Figure II.12 : Principe de la commande MLI sinus triangle.

II.6.2.2.2. Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis

Chapitre II Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Les interrupteurs T_i et T'_i sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur. Où, le changement de signe de la différence entre le courant de référence et le courant mesuré n'entraîne pas instantanément le basculement du comparateur à cause de l'effet de l'hystérésis, c'est-à-dire que le courant mesuré évolue en augmentant jusqu'à ce que ΔI soit égal à h . Le comparateur bascule ou l'autre interrupteur rentre en conduction à son tour tant que $\Delta I < h$ illustrée par la figure (II.13). Les conditions de commutation sont définies en terme des états logiques S_i correspondants de la façon suivante [39]:

$$\begin{aligned}
 S_i &= -1 \quad \text{si} \quad i_i \geq i_{ref} + \Delta i \\
 S_i &= 1 \quad \text{si} \quad i_i \leq i_{ref} - \Delta i \\
 S_i &= S_i - 1 \quad \text{si} \quad i_i = i_{ref}
 \end{aligned}
 \tag{II.43}$$

Tel que :

i_i ($i = 1, 2, 3$) : représentent les courants des phases statoriques (i_a, i_b, i_c)

i_{ref} ($i = 1, 2, 3$): représentent les courants de référence issus des circuits de commande des trois bras de l'onduleur.

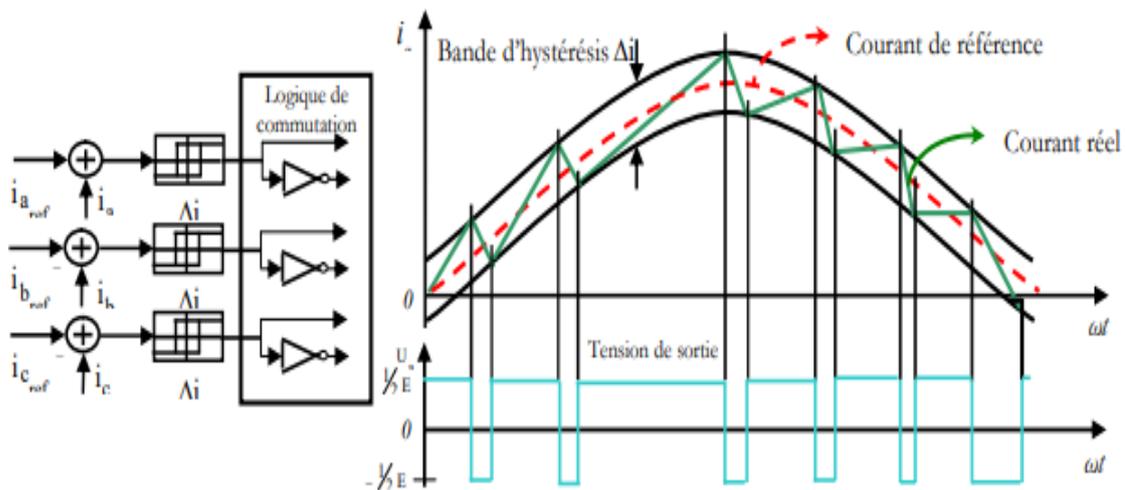


Figure II.13 : Il lustration de la bande de courant à hystérésis [39].

II.7. Résultat de simulation de la MSAP alimenté avec un onduleur de tension

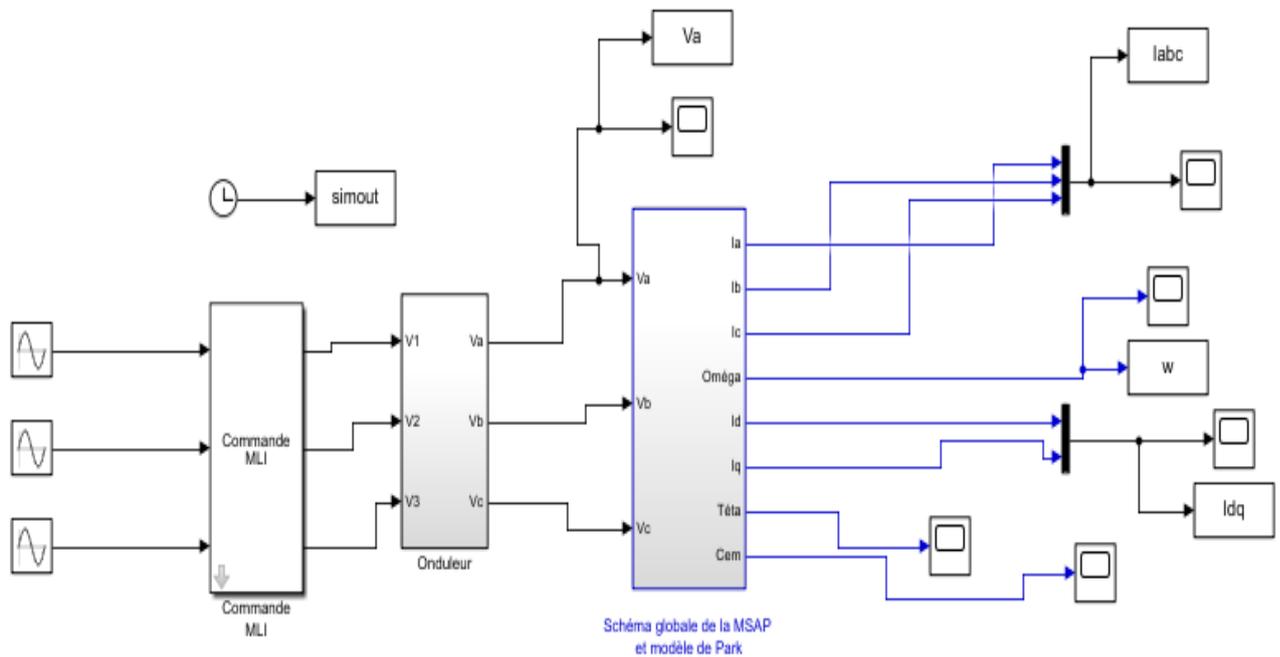
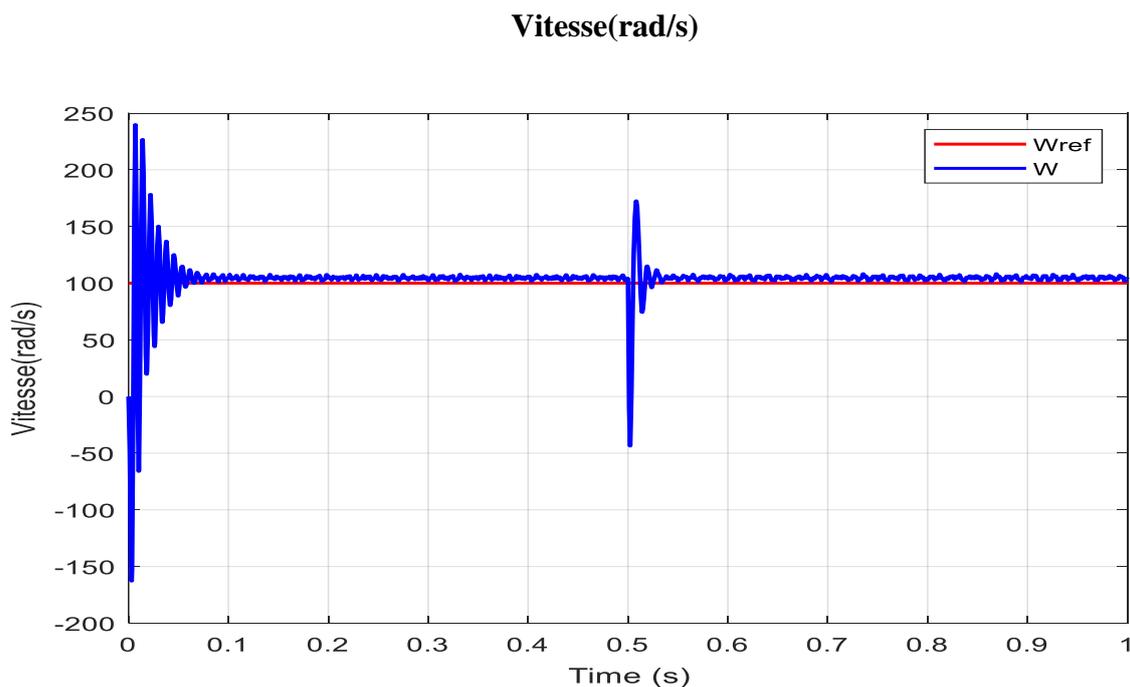


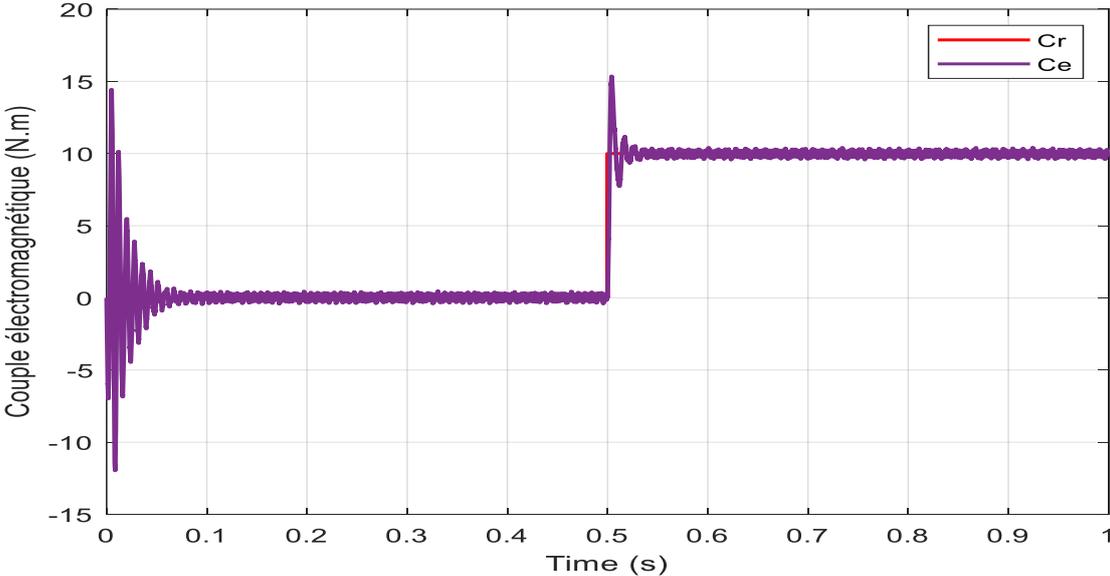
Figure II.14 : Schéma bloc d'une MSAP alimentée par onduleur de tension commandé par la technique MLI sinus triangle.

La simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

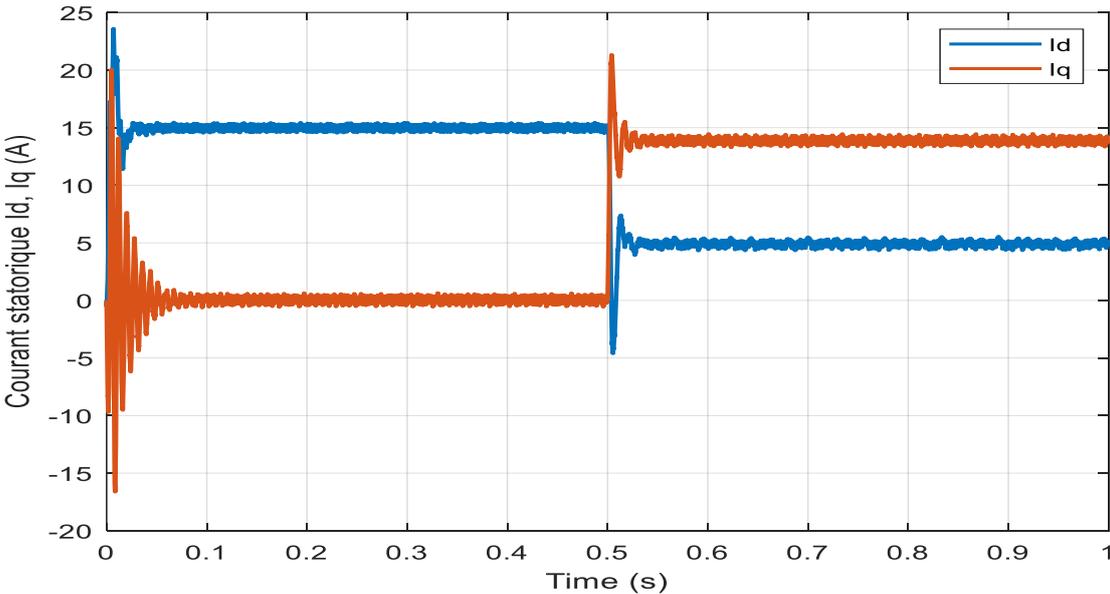
❖ Résultat de simulation démarrage en charge :



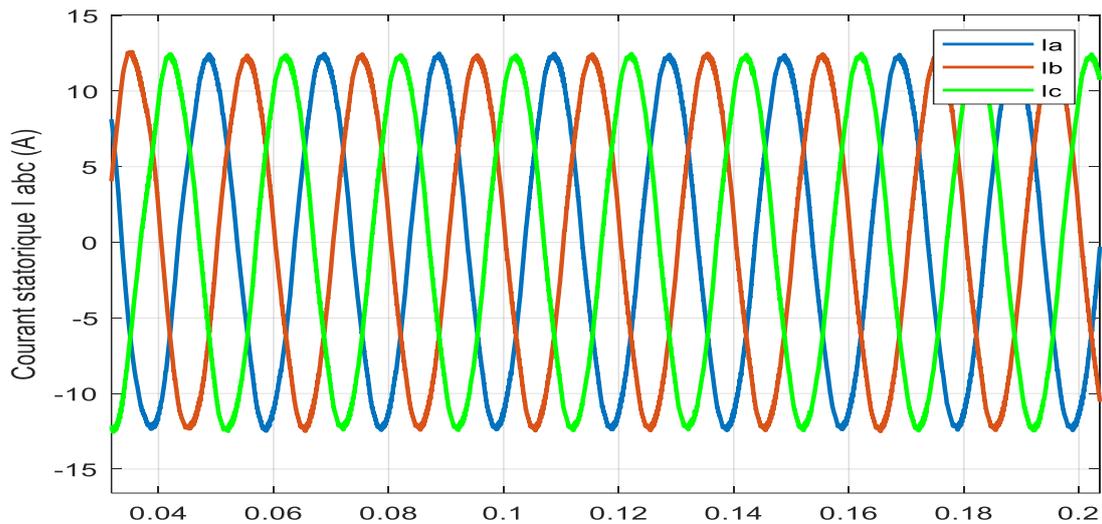
Couple électromagnétique (N.m)



Courant statorique Id, Iq (A)



Courant statorique I abc (A)



La Tension de sortie de l'onduleur commandé par la MLI triangulé-sinusoidale V_a (v)

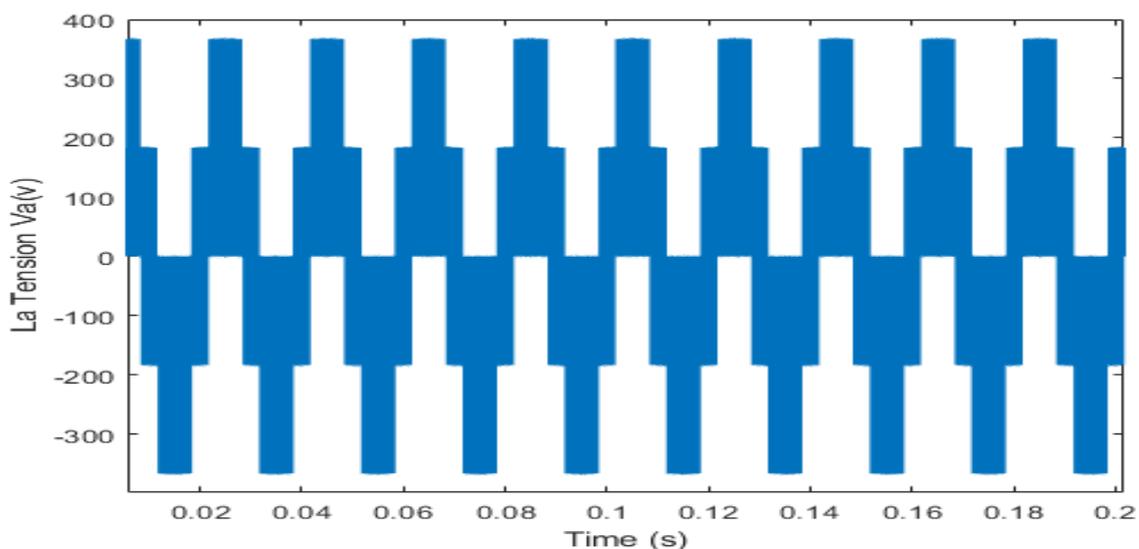


Figure II.15 : Résultat de simulation de la MSAP alimenté par un onduleur de tension Puis application d'une charge de $C_r=10\text{N.m}$ à $t=0.5\text{s}$.

❖ Interprétation des résultats:

En comparant ces résultats (MSAP alimenté par un onduleur) à ceux obtenus précédemment (MSAP alimenté par un réseau triphasé équilibré), on constate qu'ils sont presque identiques, à l'exception que la présence de l'onduleur engendre des ondulations qui influencent les performances de la machine.

II.8. Conclusion

Les principes fondamentaux de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) ainsi que sa modélisation sous forme d'équations mathématiques ont été discutés dans ce chapitre. Nous diffusons le modèle MSAP dans le point de repère du Park basé sur une série d'hypothèses simplificatrices afin de linéariser le système et de le rendre plus facile à étudier.

Ensuite nous avons présenté le modèle de l'onduleur de tension et de sa commande. Il s'agit de la technique de commande par : MLI sinus-triangle. Et en dernière partie, nous avons simulé le modèle de la MSAP alimenté par une source parfaite, puis par un onduleur de tension commande par MLI sinus-triangle.

Les résultats de simulation obtenus précédemment sont stables, mais nous constatons que les Performances ne sont pas bonnes, surtout au début et lors de l'application du couple de charge.

En conséquence, nous utilisons la commande vectorielle, qui sera abordée dans le prochain chapitre, pour obtenir de grandes performances statiques et dynamiques.

Chapitre III :

Commande Vectorielle de La

MSAP

III.1. Introduction

Dans les secteurs utilisant la motorisation électrique, la MSAP occupe une place importante. En effet, elle présente l'avantage d'une maintenance minimale par rapport au moteur à courant continu (MCC). Cependant, la MCC présente une commande simple en offrant de bonnes réponses dynamiques. Ce résultat est dû au fait que les circuits induit et inducteur sont physiquement séparés et les f.é.m. des deux armatures sont constamment orthogonales [54]. Le courant d'induit peut être contrôlé indépendamment du courant d'inducteur. Cela permet un découplage du couple et du flux, ce qui n'est pas le cas de la MSAP. Blashke et Hass, des chercheurs allemands, ont proposé une théorie de contrôle par orientation de champ en 1971, dans laquelle le phraséur de courant de stator est décomposé en deux composantes, dont l'un assure le contrôle du débit et l'autre agit sur le couple et rend sa dynamique identique à celle d'une machine à courant continu (MCC) [52].

La technique de la commande vectorielle permet de transformer la MSAP en une structure semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée dans laquelle le flux n'est pas affecté par les variations du couple électromagnétique. Ce contrôle permet une amélioration du temps de réponse et un réglage rapide du couple. Mais, cette amélioration est accompagnée par une complexité plus grande de la commande et la mise en œuvre de structures d'observation ou de mesure des grandeurs de la machine, exigée par la commande. De plus, la sensibilité aux variations des paramètres internes de la machine présente l'inconvénient majeur de la commande vectorielle.

III.2. Principe de la commande vectorielle

En analysant le système d'équations (II.26) l'équation du couple, nous pouvons relever que le modèle est non linéaire et il est couplé. En effet, le couple électromagnétique dépend à la fois des grandeurs I_d et I_q .

L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, c'est à dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique.

Il existe plusieurs stratégies de lutte anti vectorielle pour les machines à aimants permanents; le contrôle axé sur le débit est un terme qui est récemment apparu dans la littérature en ce qui concerne les techniques de contrôle du moteur électrique; cette stratégie consiste à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotor produit par le système d'excitation, comme dans une machine à courant continu.

La solution la plus simple pour une machine synchrone avec des aimants permanents est de maintenir le courant du stator en quadrature avec le flux du rotor (I_d nulle du courant continu et le courant du stator est réduit à un seul composant I_q [32]:

($I_s = I_q$), qui donne un couple maximal contrôlé par un composant de courant unique (I_q) et régule la vitesse par le courant passe par I_q via la tension V_q . Cela vérifie le principe de la machine à courant continu.

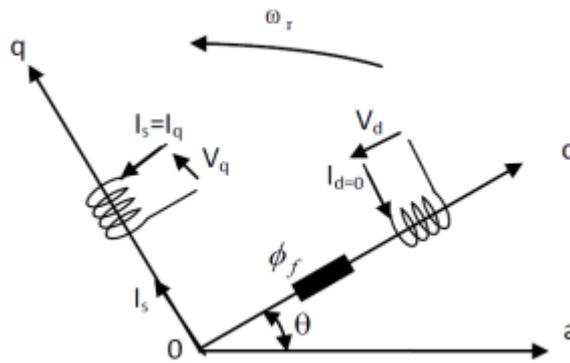


Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle.

Il est également intéressant de noter que l’annulation de I_d abaisse le courant du stator, permettant à la machine de fonctionner dans la zone de non-saturation. Le système d’équations du MSAP sera réduit aux équations suivantes lorsque $I_d = 0$:

$$\begin{cases} V_d = -p\omega_r L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + p \phi_f \end{cases} \quad (III.1)$$

Et le couple devient:

$$\begin{cases} C_{em} = p \phi_f I_q \\ C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\omega_r \end{cases} \quad (III.2)$$

On remarque que cette stratégie permet d’éliminer le problème de couplage entre les axes (d,q) Lorsque le courant I_d est nul ,le modèle de la MSAP est réduit au modèle équivalent à la machine à courant continu à excitation séparée comme le montre la figure(III.2):

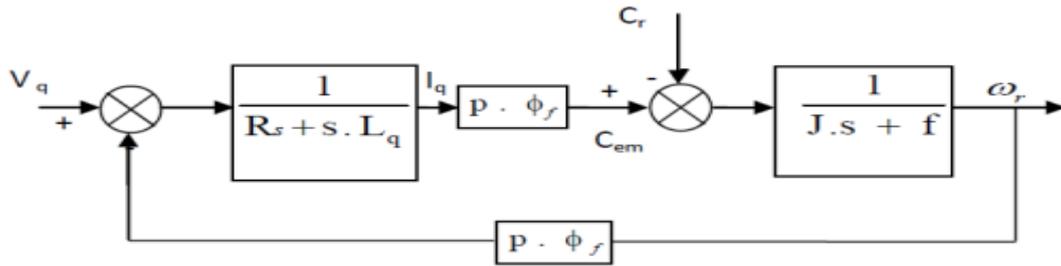


Figure III.2 : Modèle de la MSAP commandé à flux orienté I_d à nul [32].

III.3. Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

❖ Avantages de la commande vectorielle [44]

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique).
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

❖ Inconvénients de la commande vectorielle

Le contrôle vectoriel par orientation du flux rotorique présente un certain nombre d'inconvénients [44]:

- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP.).
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé.
- La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.

III.4. Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension

III.4.1. Schéma global de la Commande vectorielle de la MSAP

Dans les axes d et q, le command vectoriel est couramment utilisé sur les machines alimentées en tension et à courant régulé. Cette conception permet d'améliorer la dynamique de contrôle du couple tout en évitant les inconvénients d'une alimentation en courant. La figure (III.3) représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse de la (MSAP) alimentée en tension et commandée par orientation du flux.

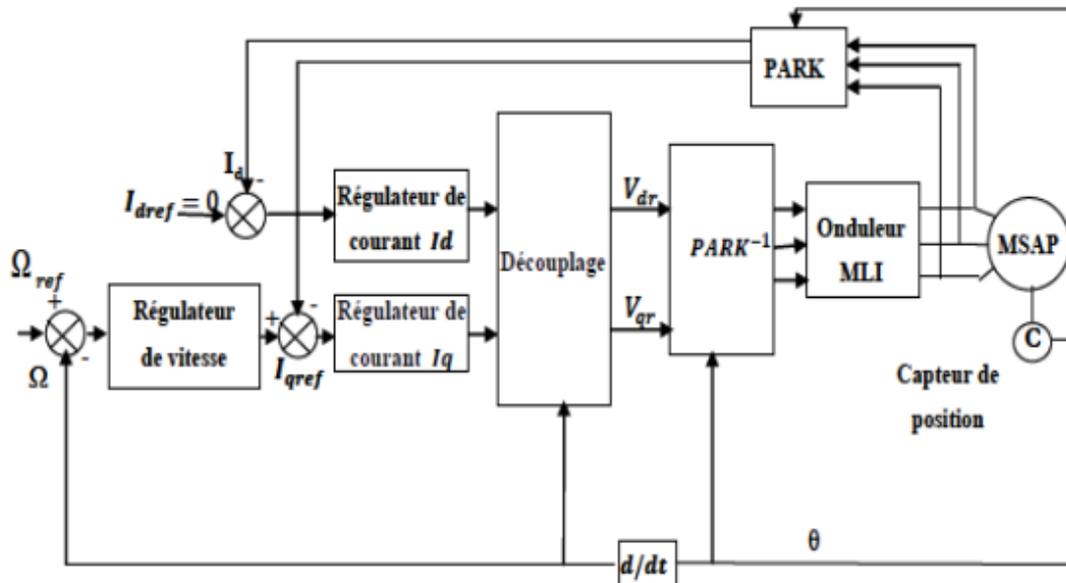


Figure III.3 : Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP.

Les principaux constituants dans la commande vectorielle sont la boucle de régulation de vitesse, celle des courants I_d et I_q et transformation de Park et Concordia [28].

La vitesse est régulée à travers la boucle externe du bloc, la sortie de son régulateur est le couple électromagnétique de référence C_{emref} ou le courant de référence I_{qref} . Il est limité de manière à tenir compte des caractéristiques de l'onduleur et de la surcharge de la machine. I_{qref} est comparé à la valeur I_q issue de la mesure des courants réels. L'erreur sollicite l'entrée du régulateur de référence V_{dref} . En parallèle avec cette boucle interne, on trouve une boucle de régulation de I_d . Le courant I_d de référence est maintenu à zéro. La sortie des régulateurs de I_d et I_q donnent des tensions de référence V_{dref} et V_{qref} et par la transformation de Park, on obtient les références de tensions V_{as}, V_{bs}, V_{cs} qui sont les tensions de la commande de l'onduleur à commande MLI [28].

III.4.1.1. Découplage par compensation

L'alimentation en tension est créée en appliquant des tensions de référence à l'entrée de commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports de cycle sur les bras de

l'onduleur de sorte que les tensions d fournies par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient aussi proches que possible des tensions de référence. Cependant, les termes de compensation doivent être définis parce qu'il y a des termes de couplage entre les axes d et q dans les équations statoriques [24] [45].

Les tensions suivant les axes (d, q) peuvent être écrites sous les formes suivantes [30]:

$$\begin{cases} V_d = (R_s I_d + L_d \frac{d I_d}{dt}) - \omega L_q I_q \\ V_q = (R_s I_q + L_q \frac{d I_q}{dt}) + \omega(L_d I_d + \varphi_f) \\ \omega = p\omega_r \end{cases} \quad (III.3)$$

La figure (III.4) représente le couplage entre les axes d et q.

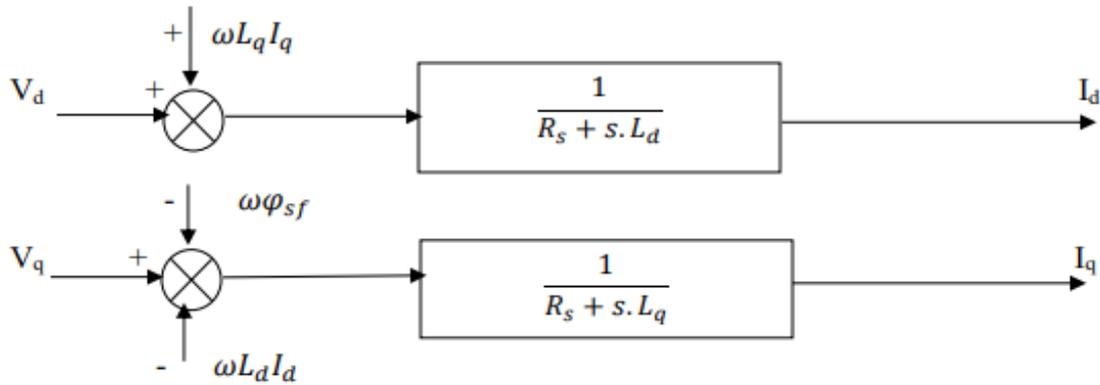


Figure III.4 : Description de couplage.

Les tensions V_d et V_q dépendent à la fois des courants sur les axes « d » et « q », on est donc amené à implanter un découplage. Ce découplage est basé sur l'introduction des termes compensatoires ed et eq

Avec :

$$\begin{cases} ed = \omega L_q I_q \\ eq = \omega(L_d I_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (III.4)$$

A partir de l'équation III.3 et III.4 on a :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - ed \\ V_q = V_{q1} + eq \end{cases} \quad (III.5)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + S.L_d)I_d \\ V_{q1} = (R_s + S.L_q)I_q \end{cases} \quad (III.6)$$

On a donc les courants " I_d " et " I_q " sont découplés. Le courant I_d ne dépend que de V_{d1} et I_q ne dépend que de V_{q1} , à partir de l'équation (III.6) les courants I_d et I_q s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{(R_s + s.L_d)} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{(R_s + s.L_q)} \end{cases} \quad (III.7)$$

S : Opérateur de Laplace.

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques.

Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure ci-dessous:

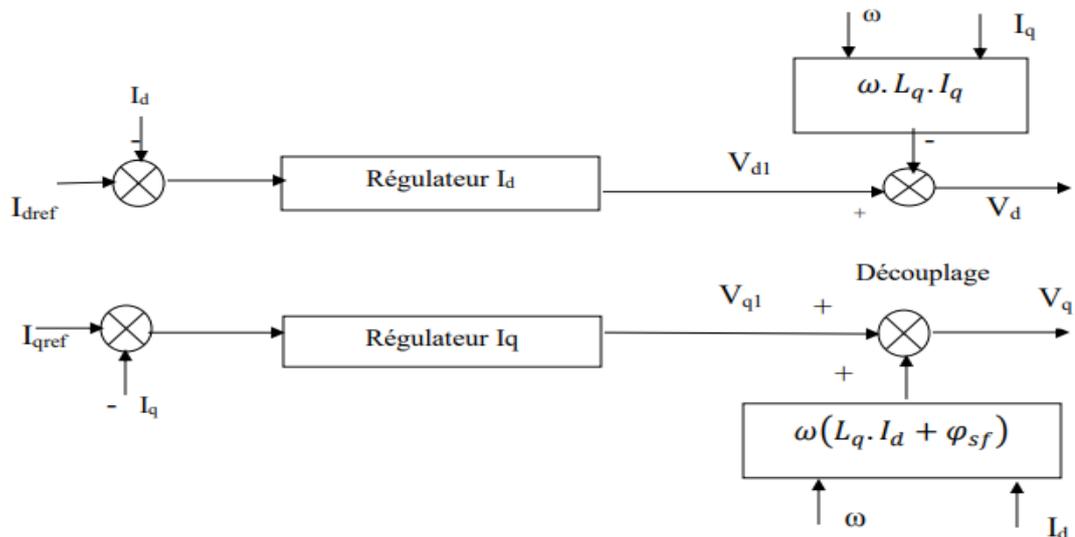


Figure III.5 : Principe de découplage par compensation.

Avec :

V_{d1} : La tension à la sortie de régulateur de courant “ I_d ”

V_{q1} : La tension à la sortie de régulateur de courant “ I_q ”

Si on associe la machine avec le bloc de compensation on obtient la figure (III.6)

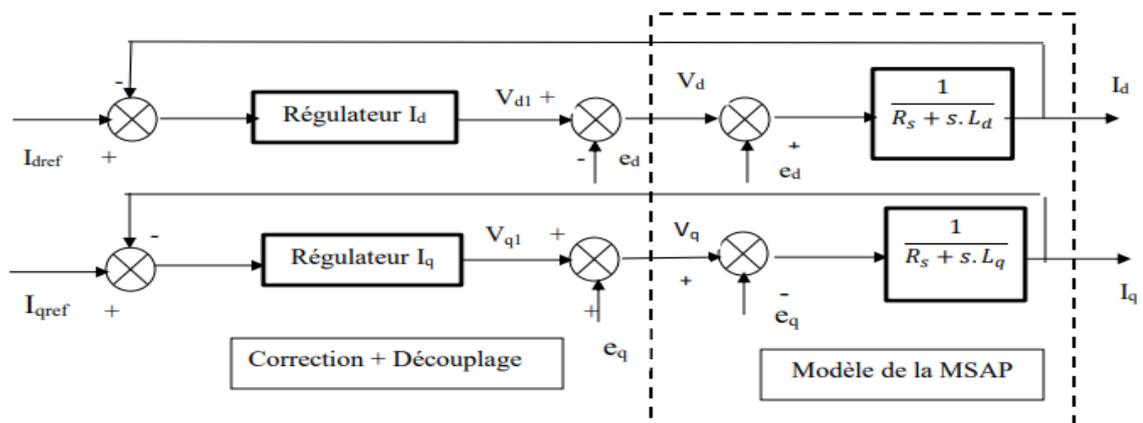


Figure III.6 : Structure générale : (machine-découplage par compensation) [30].

III.4.2. Calcul des régulateurs

Le rôle des régulateurs est de maintenir une grandeur de sortie égale à la grandeur de référence impose malgré la présence des perturbations internes ou externes [46].

Lorsque le découplage entre l'axe d et l'axe q est réalisé, la régulation est effectuée à l'aide des régulateurs de type proportionnel-intégral (PI). L'action intégrale a pour effet de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée. L'action proportionnelle permet le réglage de la rapidité du système [24].

Le régulateur (PI) est la mise en parallèle des actions proportionnelle et intégrale, figure (III.7). La relation entre la sortie $U_r(t)$ r u t et le signal d'erreur $\mathcal{E}(t)$ t est donnée par la relation suivante :

$$U_r(t) = k_p \mathcal{E}(t) + k_i \int_0^t \mathcal{E}(t) dt \tag{III.8}$$

La fonction de transfert sera :

$$\frac{U_r}{\mathcal{E}} = k_p + \frac{k_i}{s} \tag{III.9}$$

Où : k_p : Gain proportionnel.

k_i : Gain intégral.

On peut aussi écrire le régulateur sous la forme suivante :

$$P.I \rightarrow \frac{U_r}{\mathcal{E}} = \frac{1+sT_1}{sT_2} \tag{III.10}$$

Avec :

$$\begin{cases} k_p = \frac{T_1}{T_2} \\ k_i = \frac{1}{T_2} \end{cases} \tag{III.11}$$

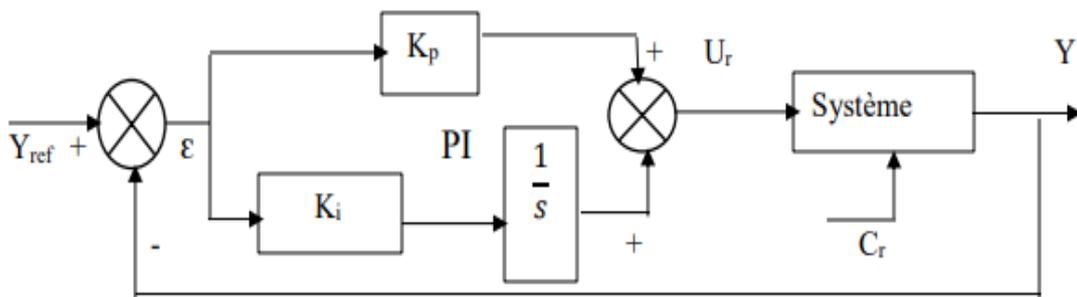


Figure III.7 : Régulateur PI.

III.4.2.1. Dimensionnement des régulateurs

La machine étant découplée selon deux axes (d, q), la régulation sur l'axe "d" est faite par une seule boucle, tandis que la régulation sur l'axe "q" est faite par deux boucles en cascades l'une interne pour réguler le courant et l'autre externe pour réguler la vitesse [47].

III.4.2.2.1 Régulateur de courant I_q [25,49,50]

La commande de la MSAP s’effectue en contrôlant les courants I_d et I_q , le système est composé d’une boucle de régulation de vitesse, qui impose la référence I_{qref} , le courant I_d est maintenu nul, la commande est effectuée par les régulateurs (PI) pour avoir l’erreur statique nulle ($\varepsilon = 0$).

Sachant que :

$$I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \tag{III.12}$$

Et que la forme générale du régulateur (PI) est :: $\frac{1+sT1}{sT2}$ (équation (III.10)), on aboutit au schéma de la figure (III.8) :

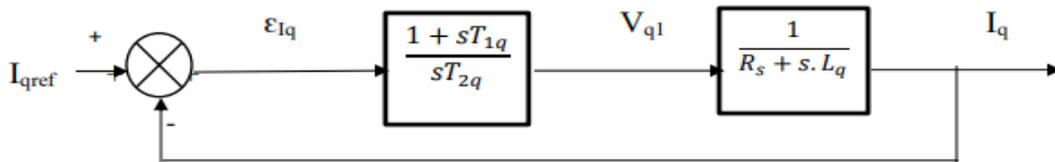


Figure III.8 : Boucle de régulation de courant I_q .

La fonction de Transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure (III.8) est :

$$FTBO = \frac{1+sT1q}{sT2q (Rs+sLq)} \tag{III.13}$$

$$FTBO = \frac{1+sT1q}{sT2qRs(1+s \frac{Lq}{Rs})} \tag{III.14}$$

Par l’utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

$$1 + sT1q = 1 + s \frac{Lq}{Rs} \text{ Ce qui se traduit par la condition :}$$

$$\frac{Lq}{Rs} = T1q = \tau q \tag{III.15}$$

Avec :

$$\frac{Lq}{Rs} : \text{ Constante de temps électrique.}$$

Si on remplace la constante par sa valeur, équation (III.15) dans l’équation (III.13), on trouve

$$FTBO = \frac{1}{sRsT2q} \tag{III.16}$$

Pour la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1+FTBO} \tag{III.17}$$

$$FTBF = \frac{1}{1+sRsT2q} \text{ De la forme :}$$

$$\left(\frac{1}{1+s\tau q} \right) \tag{III.18}$$

Par identification on trouve :

$$\tau q = RsT2q \Rightarrow T2q = \frac{\tau q}{Rs} \tag{III.19}$$

En imposant le temps de référence :

$$Tr = 3\tau q \text{ (Critère de } \pm 5\%) \tag{III.20}$$

On a :

$$T2q = \frac{Tr}{3Rs} \tag{III.21}$$

Tr : Temps de réponse imposé.

Si on remplace l'équation (III.21) dans (III.11) et on obtient finalement :

$$\begin{cases} Kpq = \frac{3Lq}{Tr} \\ Kiq = \frac{3Rs}{Tr} \end{cases} \tag{III.22}$$

III.4.2.2.2. Régulateur de courant I_d [51,53]

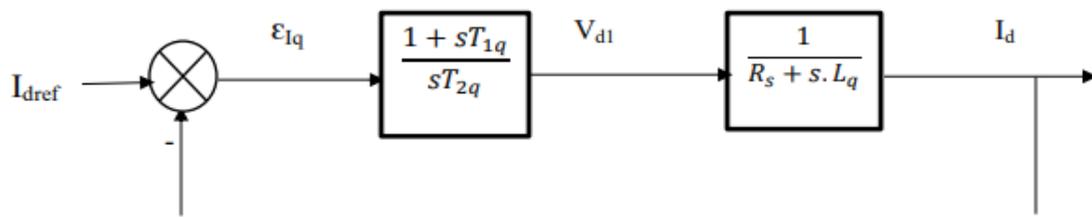


Figure III.9 : Boucle de régulation du courant I_d .

De la même façon que le calcul de régulateur du courant I_q on détermine le régulateur du courant I_d avec :

$$\frac{L_d}{R_s} = T1d = \tau d \tag{III.23}$$

On Impose:

$$Tr = 3\tau d = \frac{3 R_s}{K_{id}} \tag{III.24}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{id} = \frac{3.Rs}{Tr} \\ K_{pd} = \frac{3Ld}{Tr} \end{array} \right. \quad (III.25)$$

III.4.2.2.3. Régulateur de vitesse

Le processus à commander est décomposé en deux sous système :

- Sous système du réglage de courant I_q donc du couple aussi.
- Sous système de la partie mécanique.

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure ci-dessous :

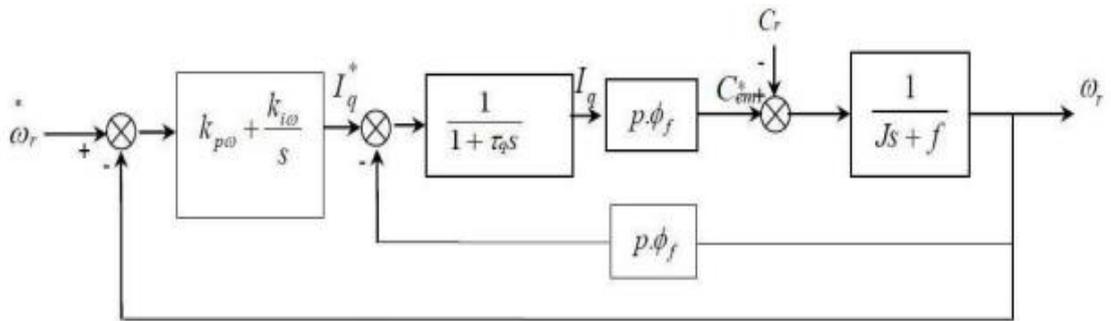


Figure III.10: Boucle de régulation de vitesse.

Le schéma de la figure (III.10) peut être simplifié par la figure (III.11) :

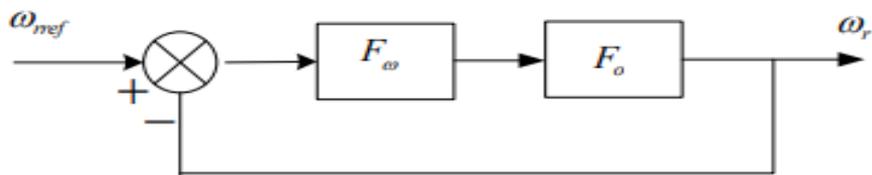


Figure III.11: Boucle de régulation de vitesse.

$F(s)$: La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$F\omega(s) = Kp\omega + \frac{Ki\omega}{s} = \frac{1+sT1\omega}{sT2\omega} \quad (III.26)$$

Ou :

$$\left\{ \begin{array}{l} Kp\omega = \frac{T1\omega}{T2\omega} \\ Ki\omega = \frac{1}{T2\omega} \end{array} \right. \quad (III.27)$$

$F\sigma(s)$: La fonction de transfert en boucle ouverte.

$$F\sigma(s) = \frac{P\phi s f}{f(1+s\tau\phi)+(1+s\tau m)} \quad (III.28)$$

$\tau m = \frac{J}{f}$: Constante mécanique de la machine.

La FTBF est donnée par :

$$FTBF(s) = \frac{F\omega(s)F\omega(s)}{1+F\omega(s)F\omega(s)} \quad (III.29)$$

Après les calculs on trouve :

$$FTBF(s) = \frac{P\varphi_{sf}(Kp\omega s + Ki\omega)}{J\tau_{qs}^2 + (J+f\tau_q)s^2 + (P\varphi_{sf}Kp\omega + f)s + P\varphi_{sf}Ki\omega} \quad (III.30)$$

Si on néglige $(J \cdot \tau_q)$, $(f \cdot \tau_q)$ devant J , le polynôme caractéristique de cette fonction devient :

$$P(s) = Js^2 + (f + P\varphi_{sf}Kp\omega)s + P\varphi_{sf}Ki\omega \quad (III.31)$$

En imposant au polynôme caractéristique en boucle fermée deux pôles complexes conjugués : $S_{1,2} = \rho \cdot (1 \pm j)$ il devient alors :

$$P(s) = s^2 + 2Ps + 2P^2 \quad (III.32)$$

Par identification terme à terme entre l'équation (III.31) et (III.32) on trouve :

$$\begin{cases} Kp\omega = \frac{2J\rho - f}{P\varphi_{sf}} \\ Ki\omega = \frac{2\rho^2 J}{P\varphi_{sf}} \end{cases} \quad (III.33)$$

Où : $\rho = \xi\omega n$

ωn : Pulsation propre du système.

ξ : Facteur d'amortissement.

III.5. Bloc de dé fluxage

Le bloc de dé fluxage permet l'exploitations des capacités magnétiques de la machine permet un fonctionnement à couple constant si la vitesse est inférieure à la vitesse nominale. D'une autre part ce bloc permet d'affaiblir le flux inversement à la vitesse, pour le fonctionnement à puissance constante lorsque la vitesse excède la vitesse nominale. Il est défini par la relation non linéaire suivant [48]:

$$\varphi_{ref} = \begin{cases} \varphi_{ref} = \varphi_{nom} & \text{Si } |\Omega| \leq \Omega_{nom} \\ \frac{\varphi_{nom}}{|\Omega|} \Omega_{nom} & \text{Si } |\Omega| \geq \Omega_{nom} \end{cases} \quad (III.34)$$

Avec :

φ_{ref} : le flux de référence.

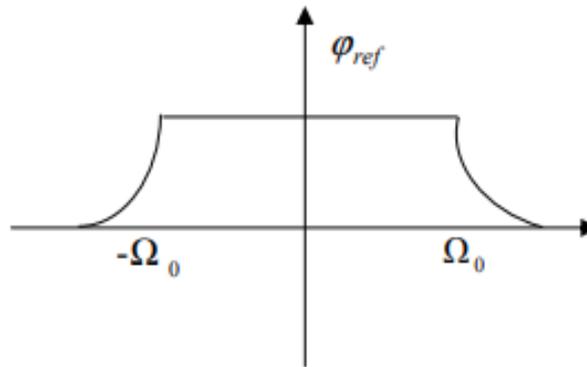
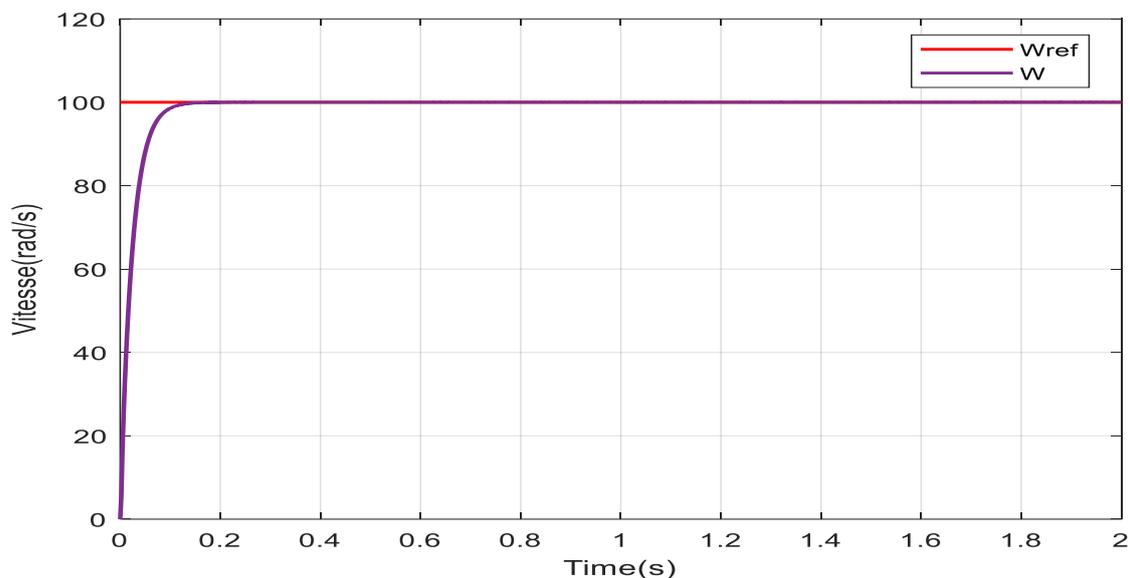


Figure III.12: schéma bloc de défluxage [48].

III.6. Résultats de simulation de la commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension

Après réalisation du découplage et la synthèse des régulateurs, et afin de tester les performances de la commande vectorielle appliqué à une MSAP, nous avons simulé le fonctionnement de l'ensemble onduleur-machine à l'aide de logiciel MATLAB/ Simulink.

Les modèles mathématiques de machine et d'onduleur présenté dans le chapitre précédent sont utilisés dans cette partie. Le schéma bloc utilisée pour la simulation est donnée en annexe.



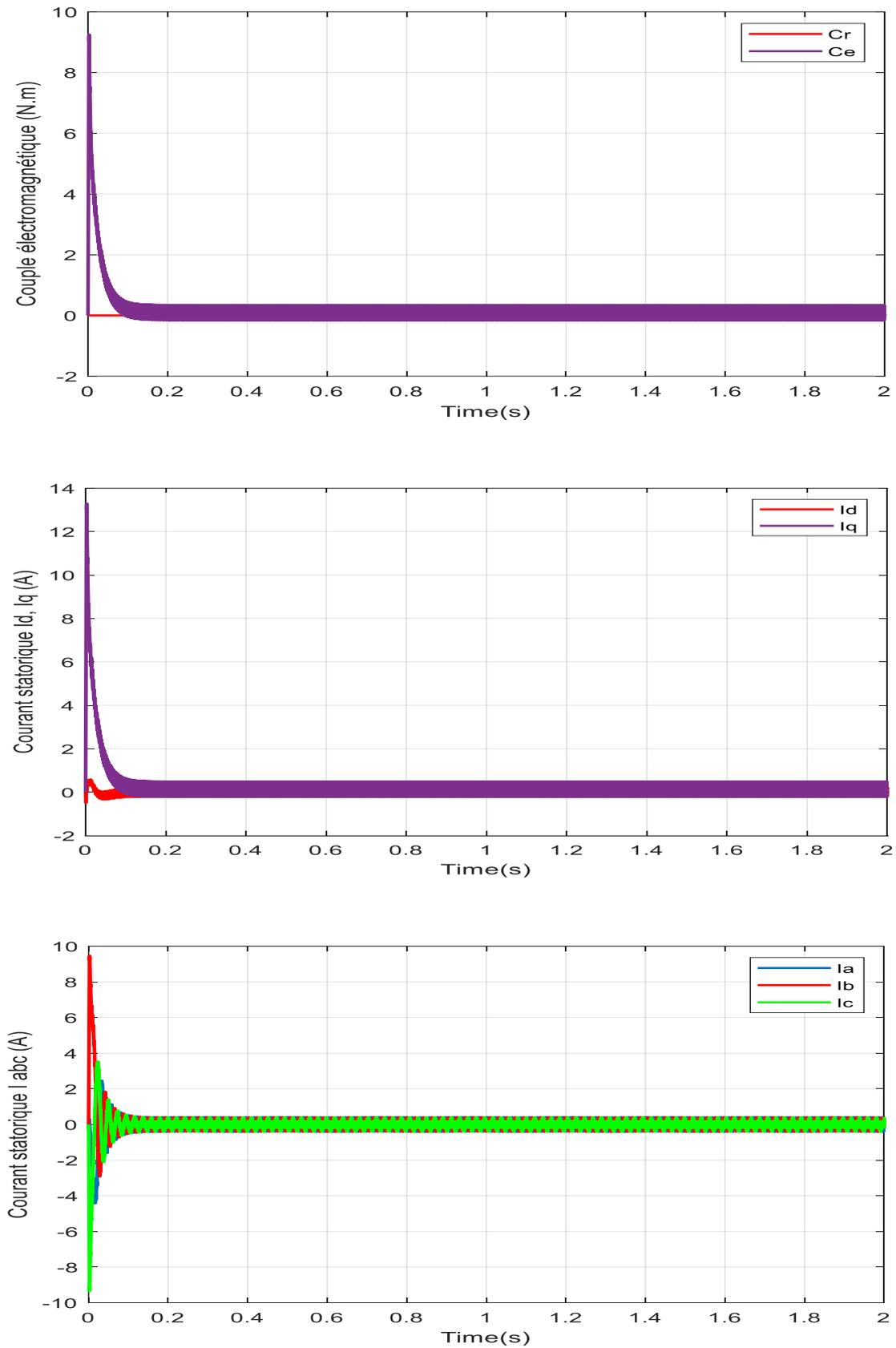
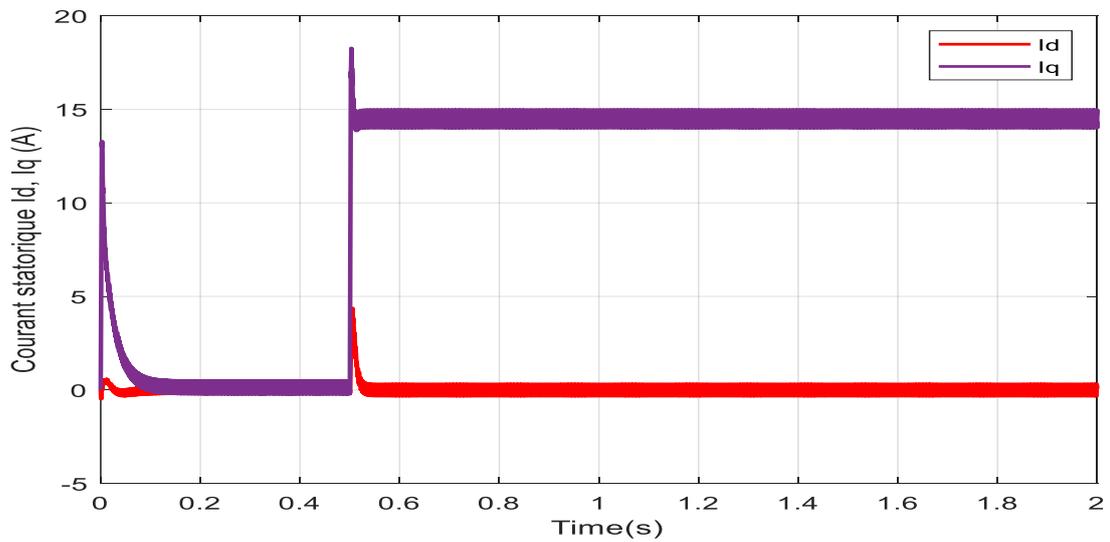
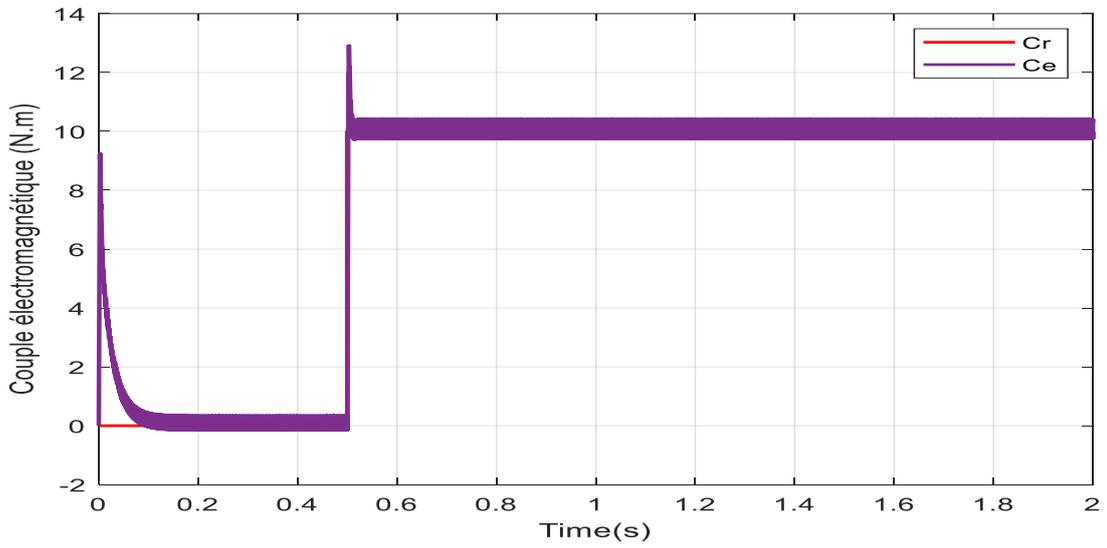
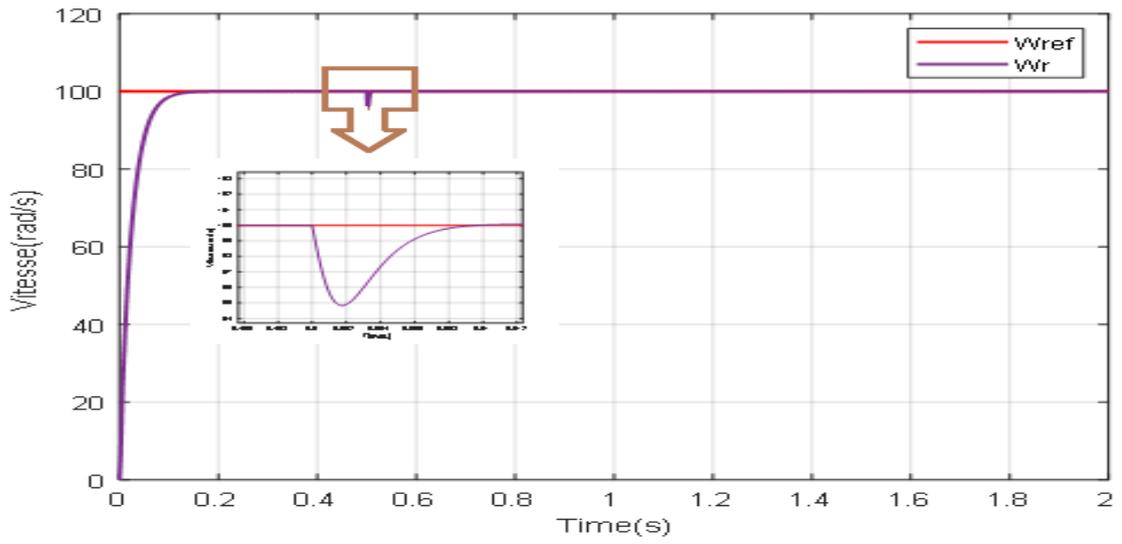


Figure III.13 : Résultat de simulation pour un fonctionnement à vide.



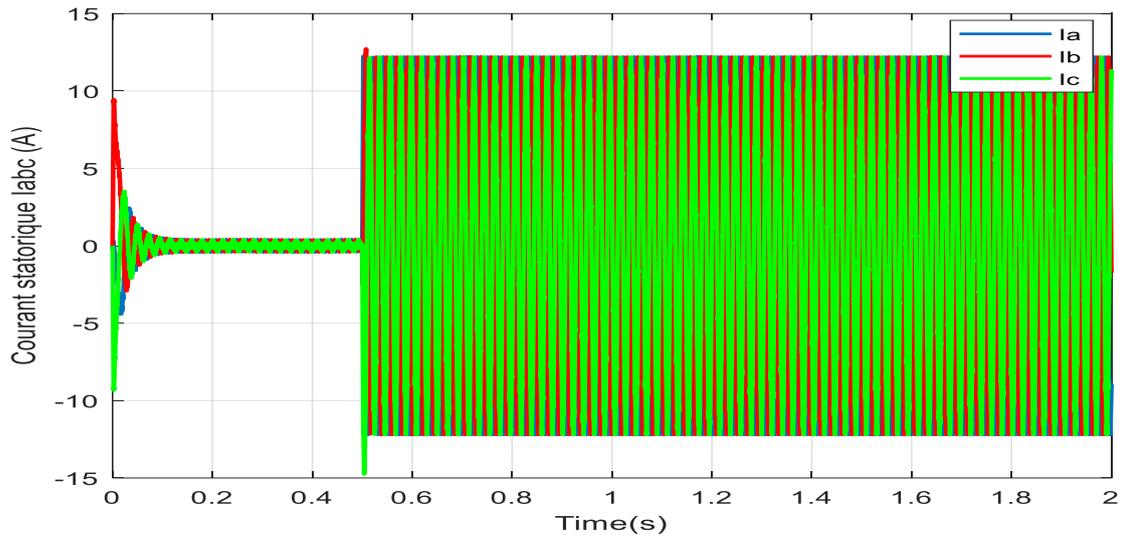
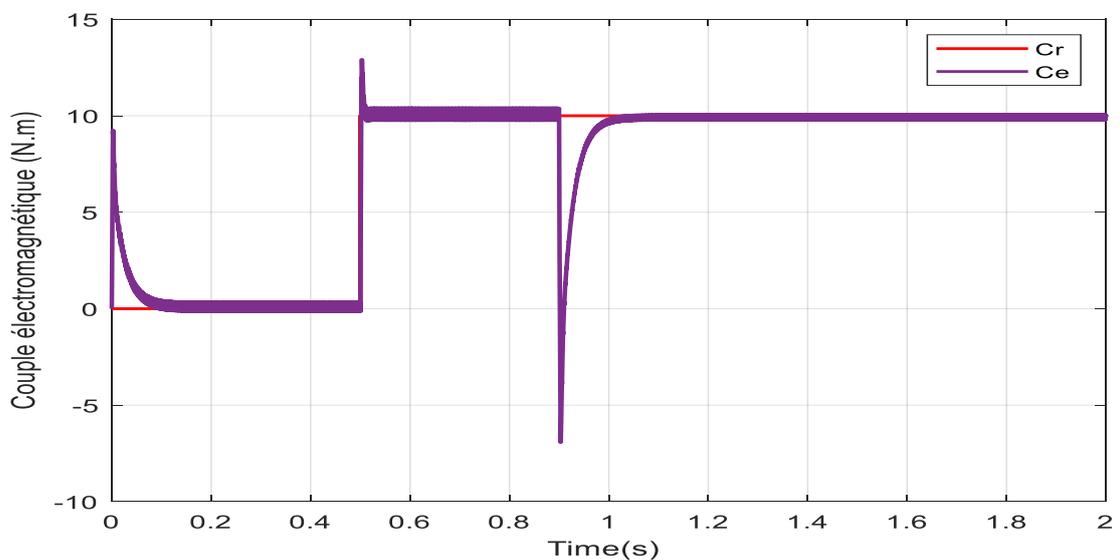
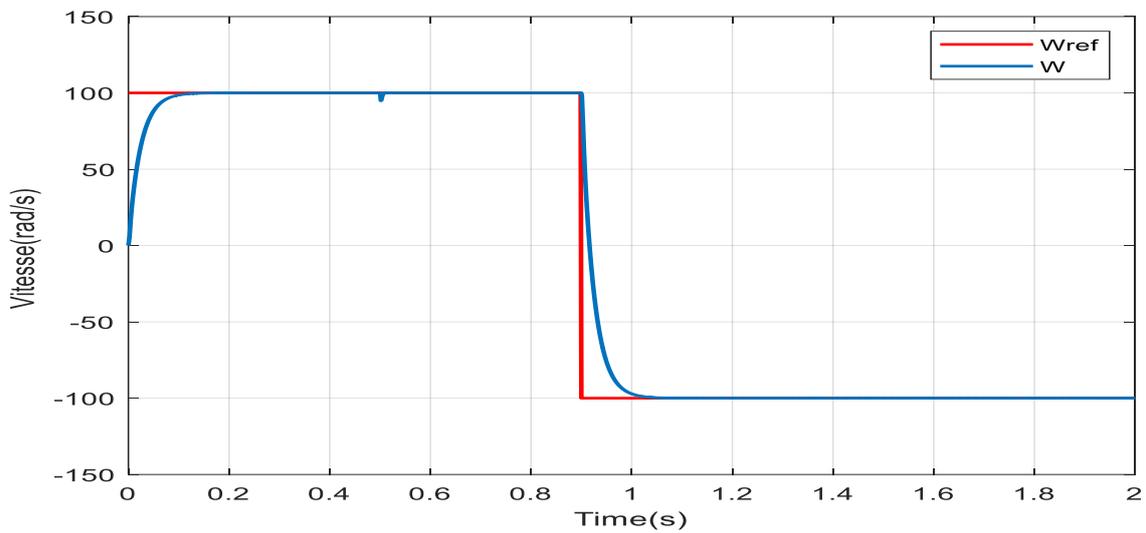


Figure III.14 : Résultat de simulation avec application d'une charge ($C_r = 10 \text{ N.m}$) à $t = 0.5 \text{ s}$.



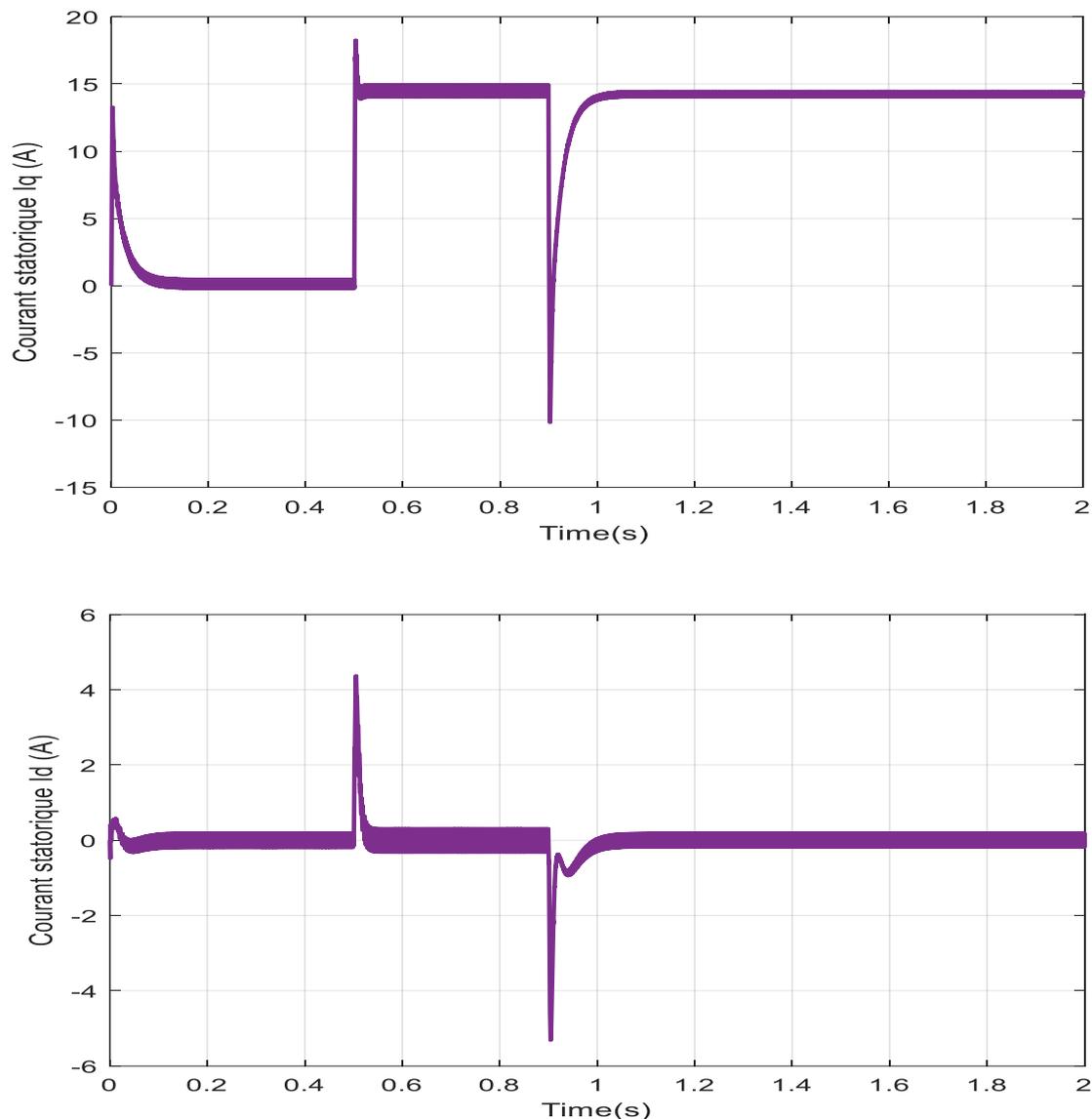


Figure III.15: Résultat de simulation pour un fonctionnement en charge et avec une inversion de la consigne de vitesse de 100 rad/s à -100 rad/s.

❖ Interprétation des résultats

- L'entrée d'ordre reçoit un incrément de la valeur de consigne de 100 (rad/s). Les résultats de simulation pour un fonctionnement à vide et à charge sont présentés dans les figures (III.13) et (III.14). Il est à noter qu'à vide, la vitesse suit pleinement sa référence, qui est atteinte rapidement et avec un temps de réponse raisonnable. Nous détectons une légère baisse de vitesse après l'application de la charge au temps $t = 0.5s$ ($Cr = 10 Nm$), qui est rapidement rejetée et atteint ensuite sa valeur de déréférence.

Avant et après l'application de la charge, le couple atteint son maximum au premier moment de démarrage, puis se stabilise vers la valeur de couple de charge.

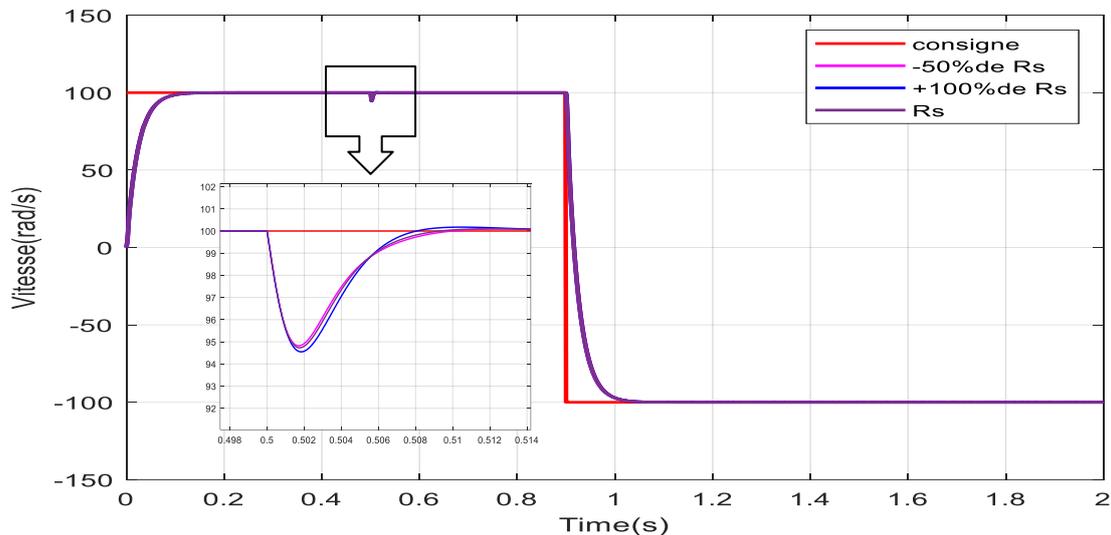
Le découplage fourni par la commande vectorielle de la machine ($I_d = 0$) avec le couple électromagnétique, qui dépend uniquement du composant I_q , peut être vu dans la réponse des deux composants de courant.

- La figure (III.15) illustre l'inversion du point de consigne de vitesse de rotation de la MSAP de la valeur de référence (-100 rad/s) au temps $t = 0,9$ s. Le tracé de la vitesse montre que la réponse de cette dernière suit la valeur de la consigne et ne le dépasse pas. Le couple et les courants après un régime transitoire se stabilisent autour les valeurs ($I_d=0$ A, $I_q=15$ A, $C_e=10$ Nm).

III.7. Etude de Robustesse aux variations paramétrique de la MSAP

Nous avons simulé les performances de la commande vectorielle dans les séries de tests précédente. Et vue que les paramètres de la MSAP sont sujets à des variations qui peuvent être causées par plusieurs facteurs comme la température, nous examinons maintenant sa robustesse afin de vérifier son comportement face aux variations paramétriques de la machine. Il est donc essentiel d'analyser l'influence de la modification des paramètres définissant le modèle.

Nous appliquons donc, une variation de la résistance statorique, le flux, l'inductance, et du moment d'inertie.



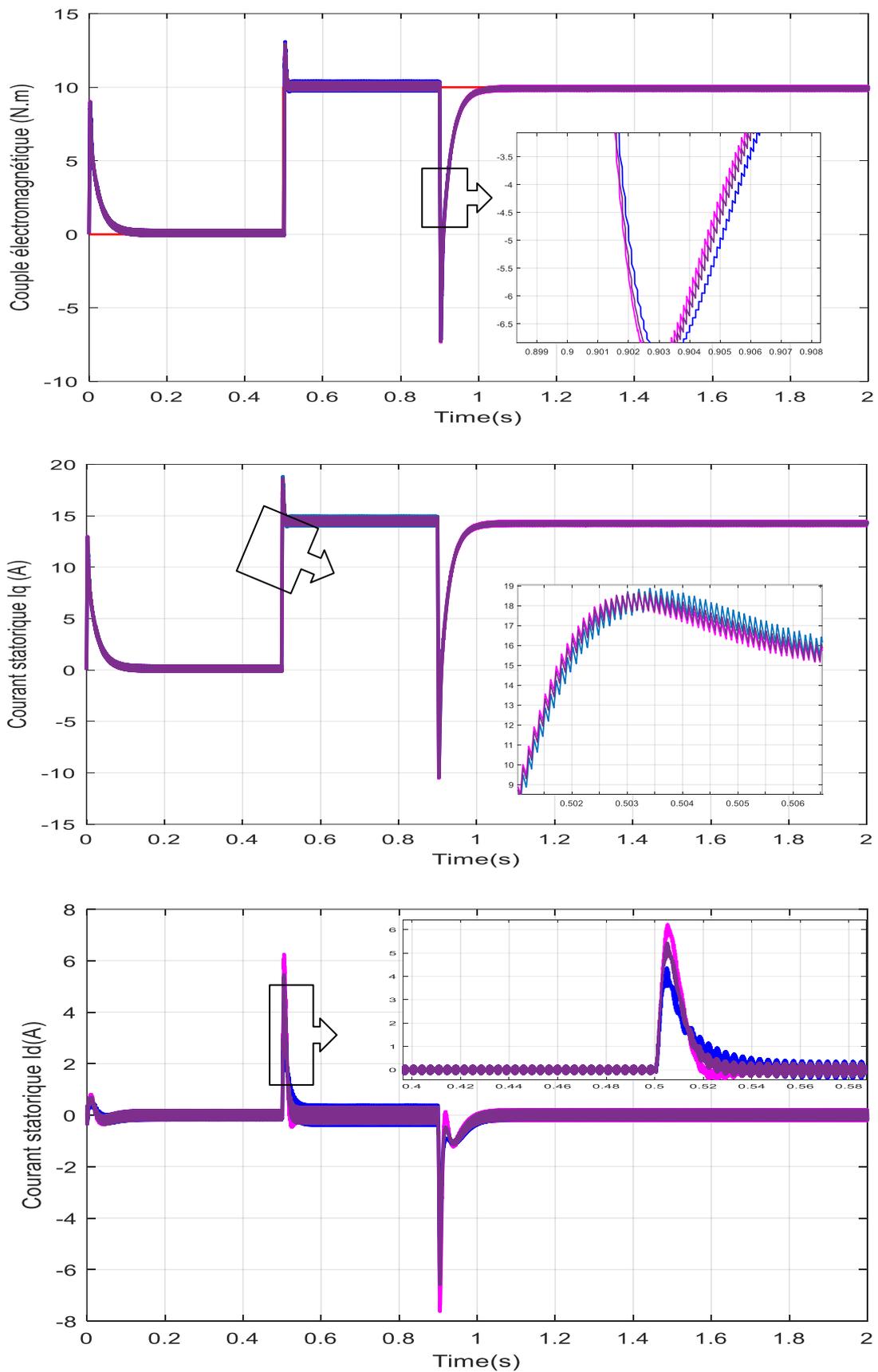
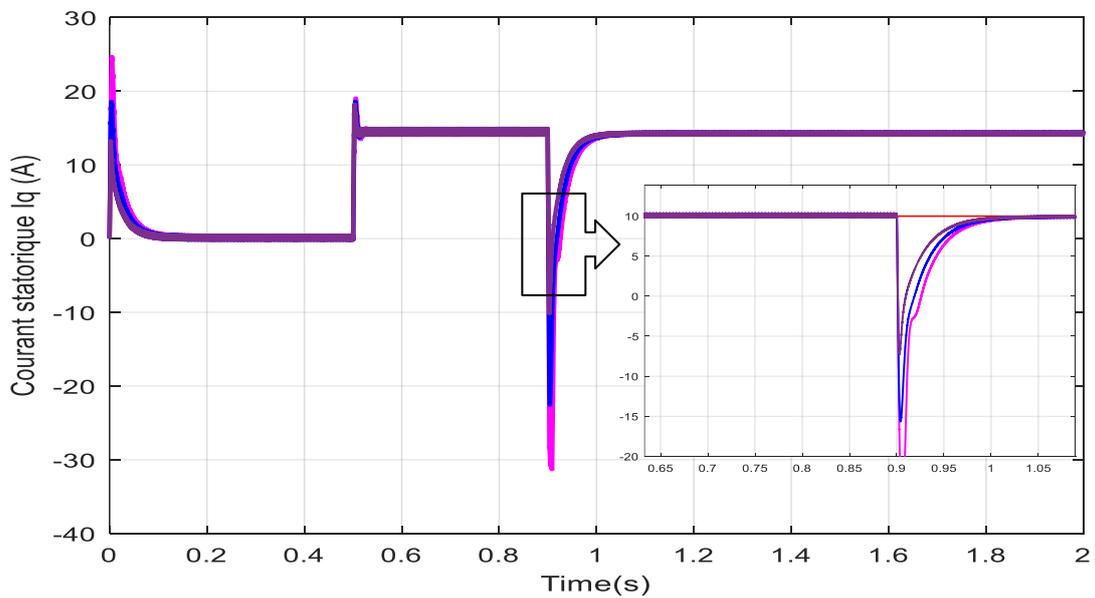
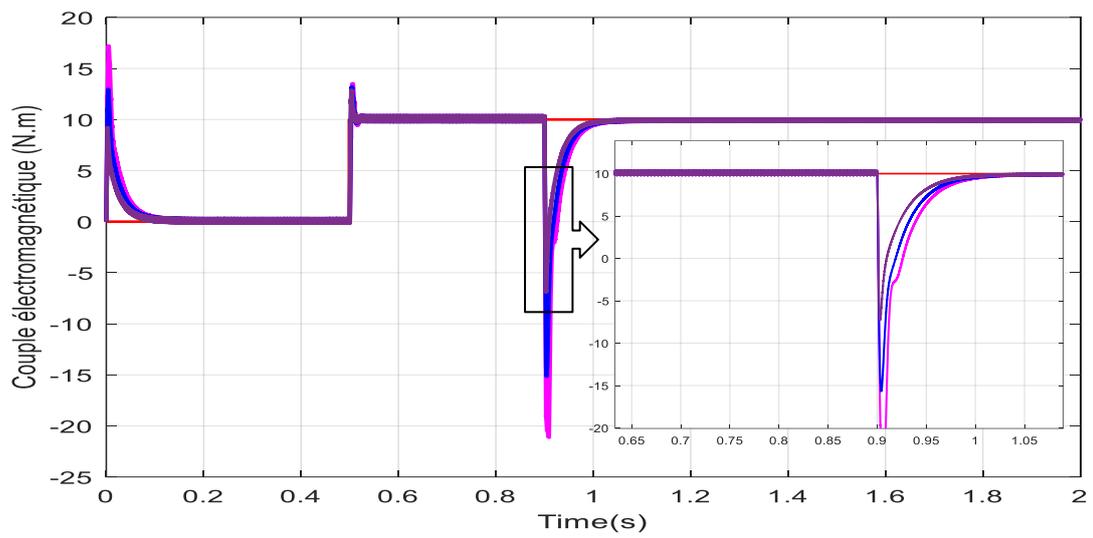
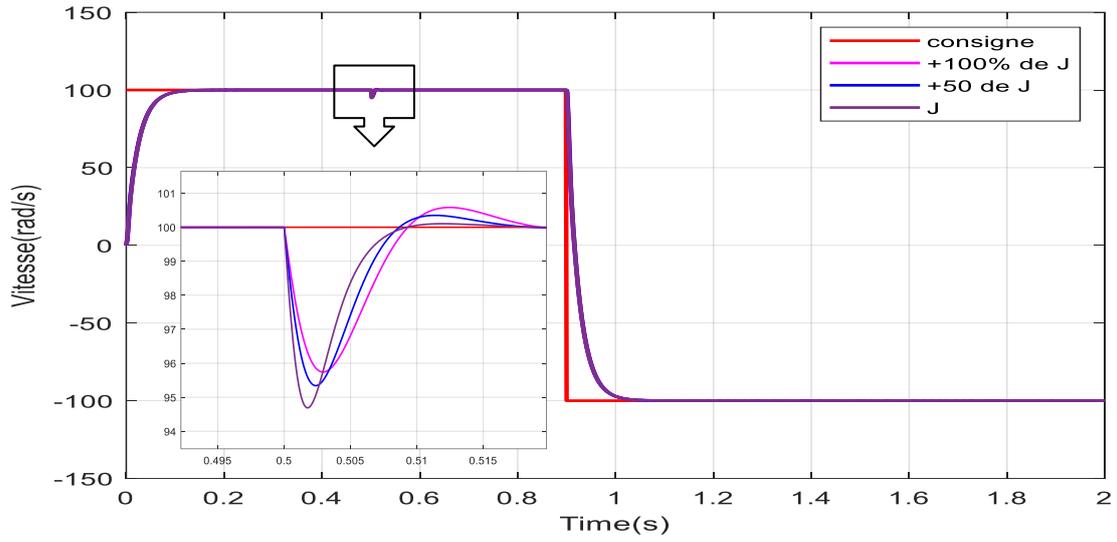


Figure III.16: Résultats des simulations lors des variations de la résistance R_s .



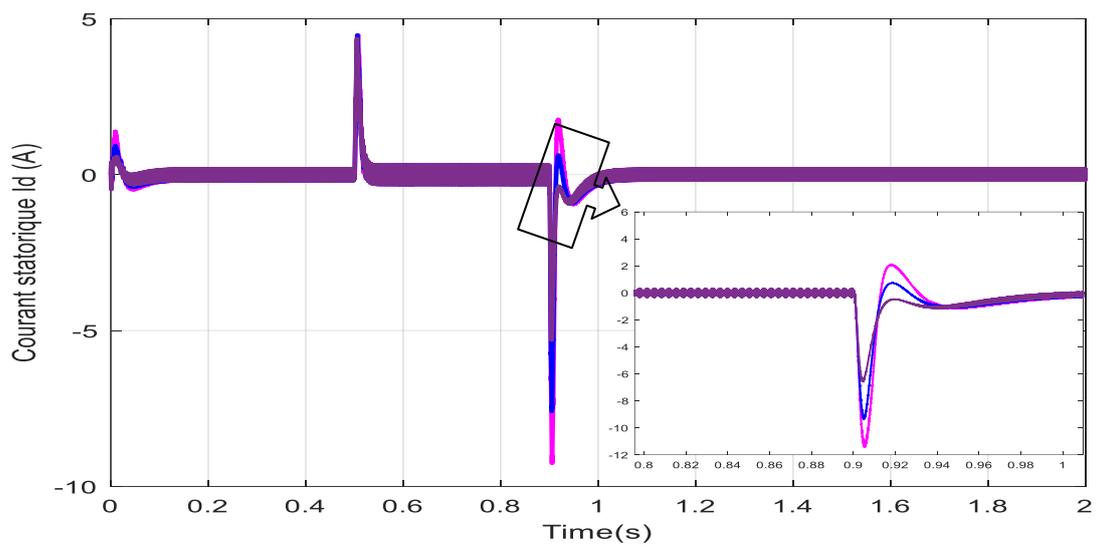
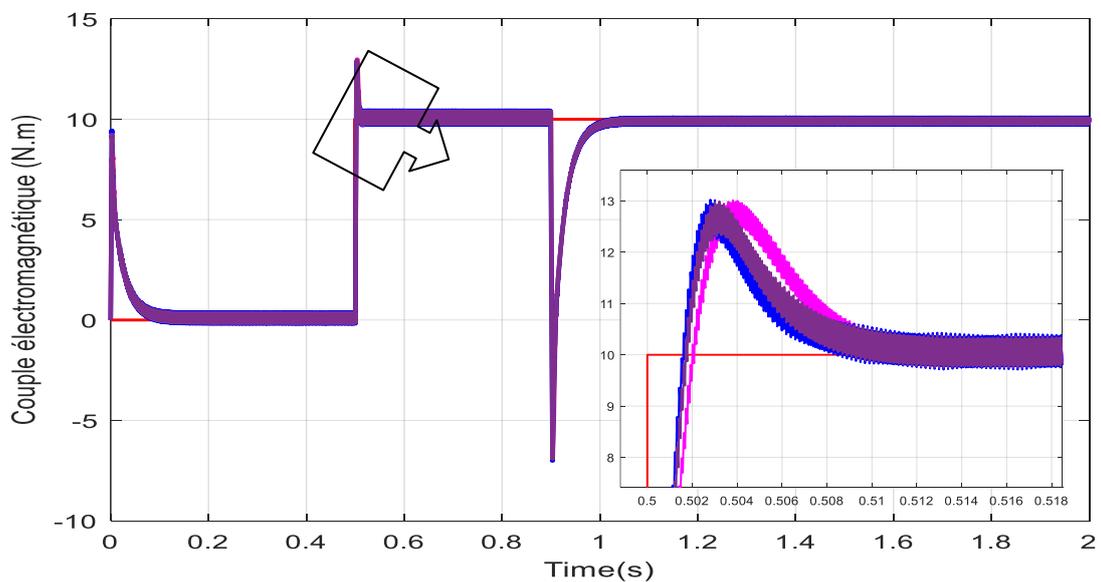
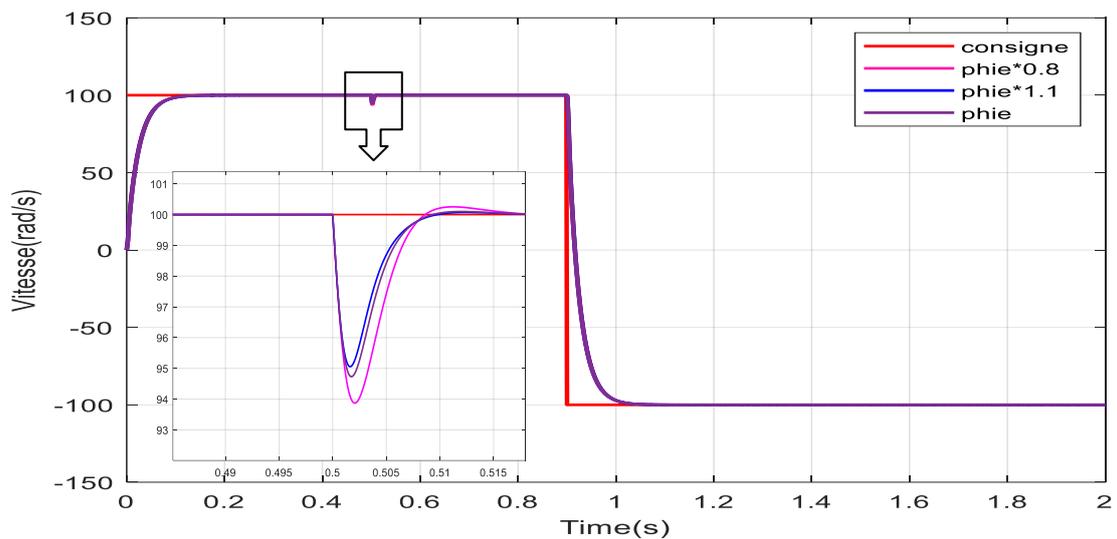


Figure III.17: Résultats des simulations lors des variations de l'inertie J.



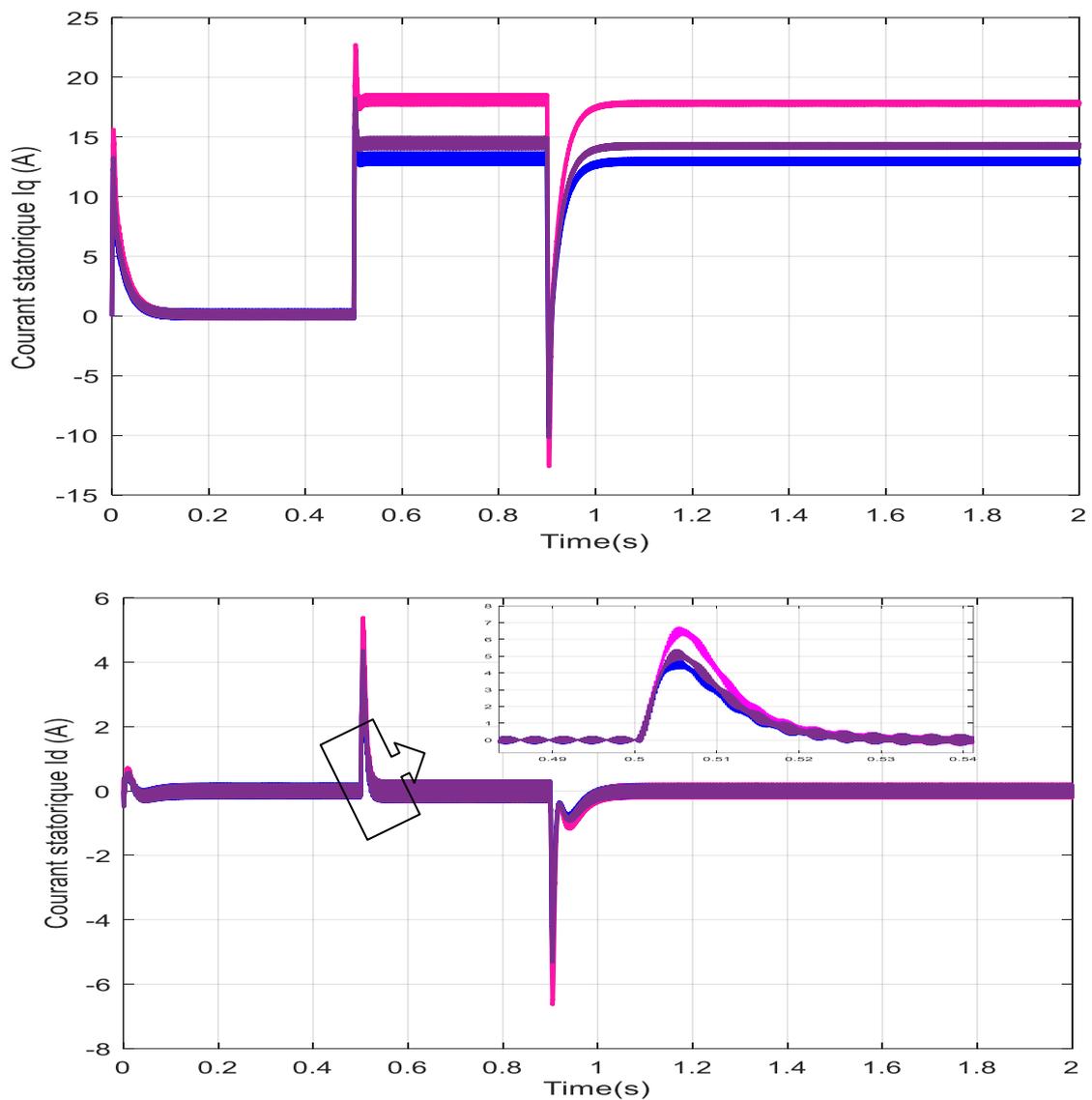
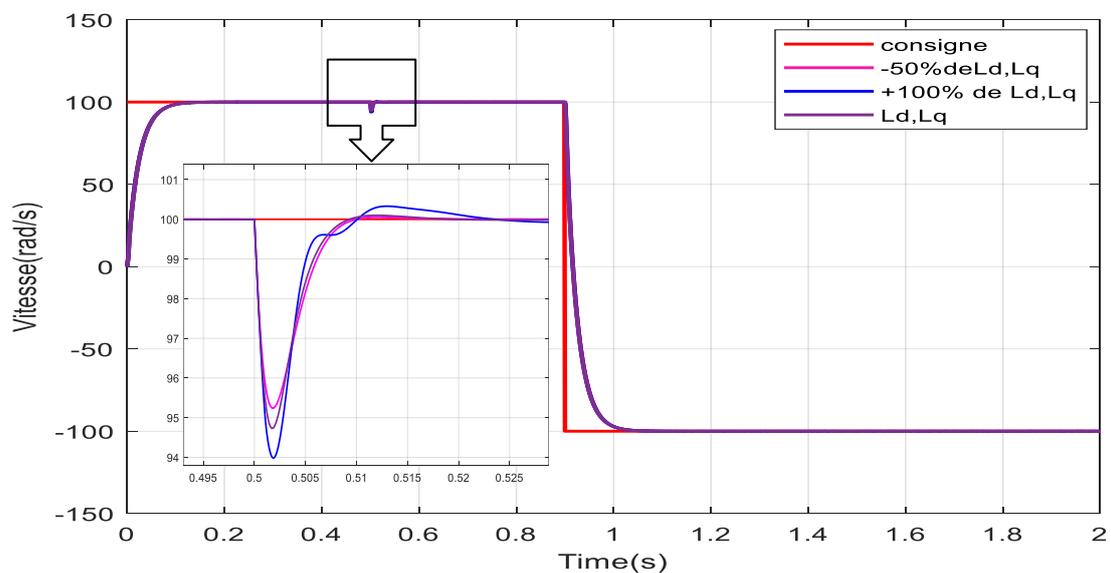


Figure III.18: Résultats des simulations lors des variations du flux.



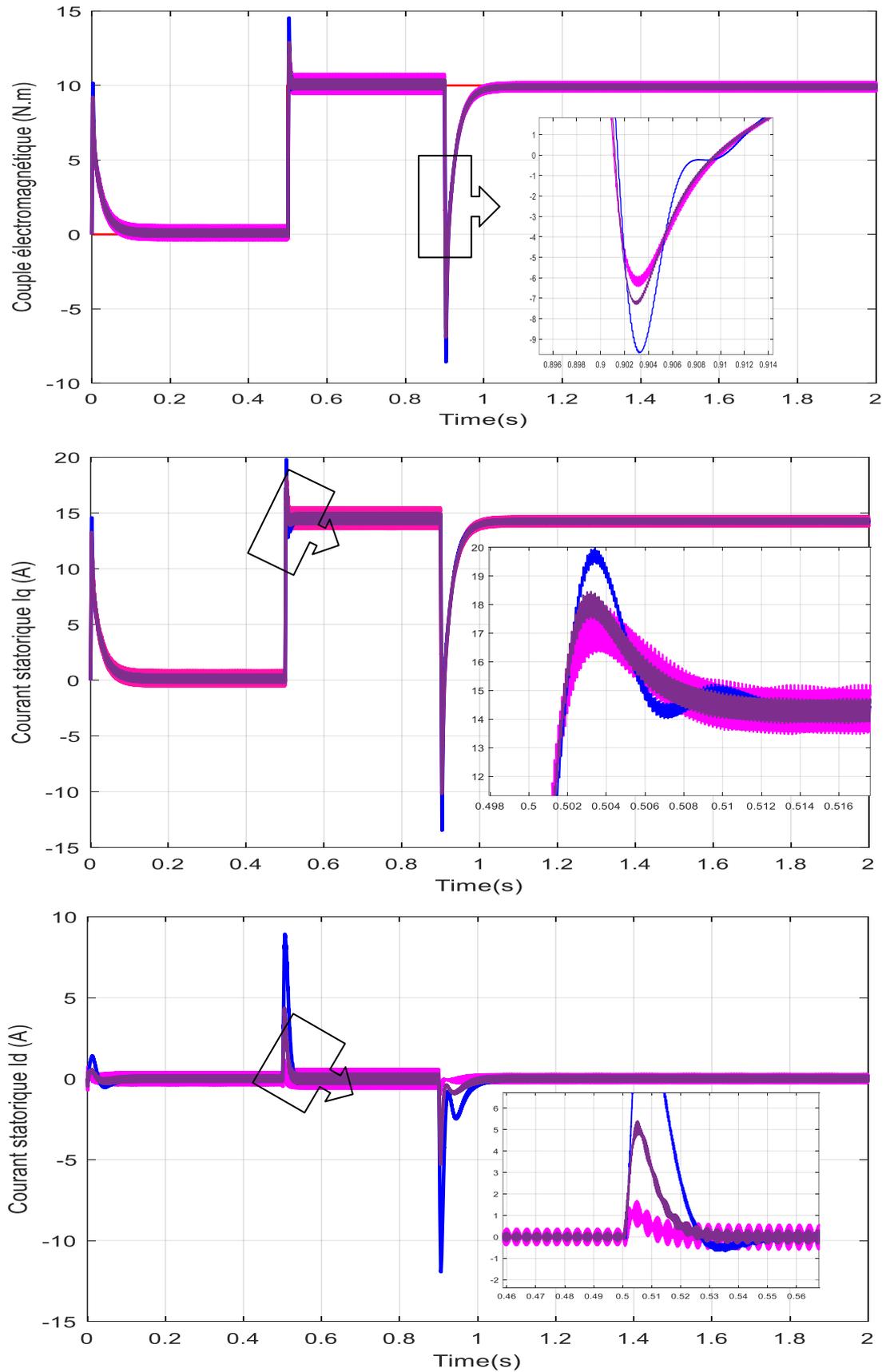


Figure III.19: Résultats des simulations lors des variations de l'inductance (L_d, L_q).

❖ Interprétation des résultats

Les simulations, reportées sur les figures III.16 à III.19, concernent un échelon de vitesse de 0 à 100 rd/s puis l'application d'un couple de charge de 10 Nm à $t=0.5s$ avec inversion de sens de rotation à $t = 0.9 s$. Nous appliquons donc, une variation de la résistance statorique, le flux, l'inductance, et du moment d'inertie.

On note d'après ces résultats de simulation obtenus, que les différentes variations des paramètres du moteur n'affectent pas la commande vectorielle. En effet, son comportement reste stable en régime statique et le découplage entre les deux axes d et q persiste.

III.8. Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons appliqué la commande vectorielle à la MSAP, cette stratégie permet le découplage entre le couple et le flux de la machine afin d'assurer une commande souple de sa vitesse. Les résultats de simulation présentés précédemment montrent les performances et la robustesse exceptionnelles de cette commande, comme en témoignent les temps de réponse faibles, un rejet rapide des perturbations, une erreur statique nulle en état stable (régime permanent), et des oscillations transitoires ou des dépassements négligeables.

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire concerne la commande vectorielle d'une machine synchrone à aimants permanents alimentée en tension avec un onduleur MLI triphasée.

Tout d'abord, nous avons présenté dans le premier chapitre, les différentes structures concernant la construction de celle-ci du point de vue emplacement des aimants permanent puis nous avons passé un aperçu sur les différents types d'alimentations et les domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous sommes passés à la modélisation de la MSAP à pôles lisses dans le repère de Park (d, q). Cette modélisation qui permet la mise sous forme d'équation d'état la machine alimentée en tension. Ce modèle doit être capable de représenter fidèlement les différentes dynamiques. Il a été validé dans un environnement MATLAB/SIMULINK., pour faire des simulations permettant de visualiser l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques.

Malgré les hypothèses simplificatrices, le modèle de la MSAP est très complexe (non linéaire et multi variable). Le couple et le flux électromagnétiques sont des variables fortement liées, ce qui présente un défi important avec cet actionneur. Une solution parmi les différentes solutions de découplage, qui est la commande vectorielle. Au troisième chapitre, nous avons donné un aperçu explicite de la commande vectorielle. Cette dernière permet d'imposer à la MSAP un comportement semblable à celui de la machine à courant continu à excitation séparée. En dernier lieu nous avons simulé le système global onduleur-MSAP en utilisant la commande vectorielle avec une régulation de vitesse. Grace aux régulateurs classiques, les performances dynamiques obtenues par le réglage de la vitesse de la MSAP sont très satisfaisantes. La perturbation est rejetée en un temps très court, le système possède un temps de réponse satisfaisant.

Comme perspective, nous proposons pour des travaux futurs :

- ❖ Association de la commande vectorielle avec d'autre type de régulateurs comme régulateur flou.
- ❖ La suppression des capteurs de vitesse à l'aide des techniques d'estimation ou d'observation de l'automatique.

ANNEXE

Les paramètres de la MSAP utilisés sont donnés dans la table suivante :

Description	Paramètres
Fréquence	$f = 50 \text{ Hz}$
Puissance nominale	$P_n = 1.5 \text{ Kw}$
Résistance statorique	$R_s = 1.4 \Omega$
Inductance directe	$L_d = 0.0066 \text{ H}$
Inductance quadratique	$L_q = 0.0066 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0.00176 \text{ Kg.m}^2$
Coefficients de frottements	$f_r = 0.00038818 \text{ N.m.s/rad}$
Flux des aimants	$\phi_{sf} = 0.1564 \text{ Wb}$
Nombre de pair de pôles	$P = 3$
Vitesse de rotation nominale	$\omega = 105 \text{ rad/s}$

Schéma bloc de la MSAP :

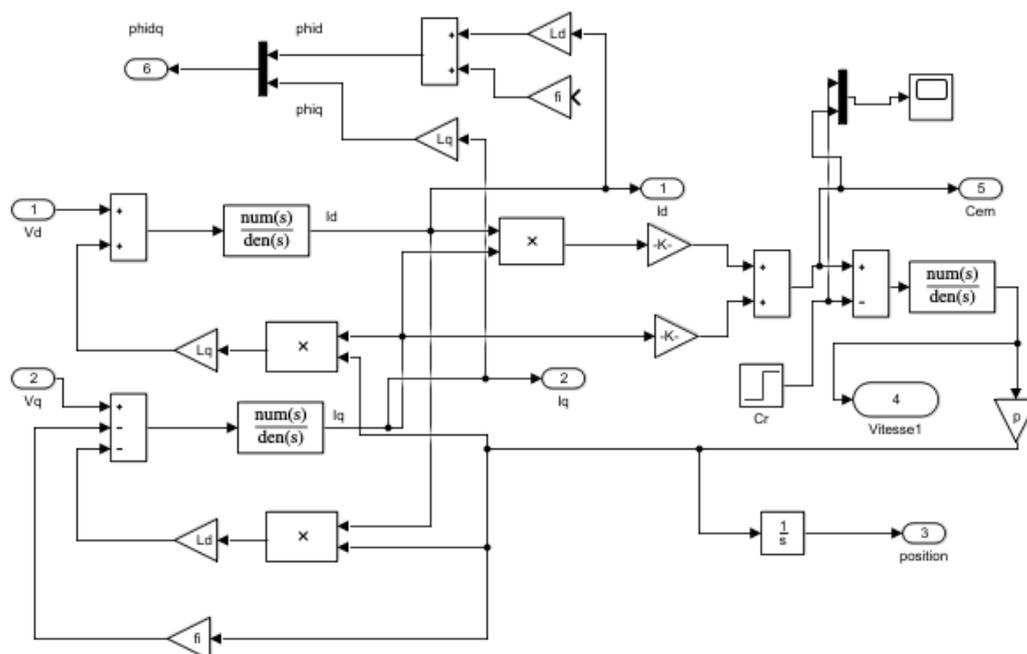


Schéma bloc de la MSAP alimenté avec un onduleur de tension :

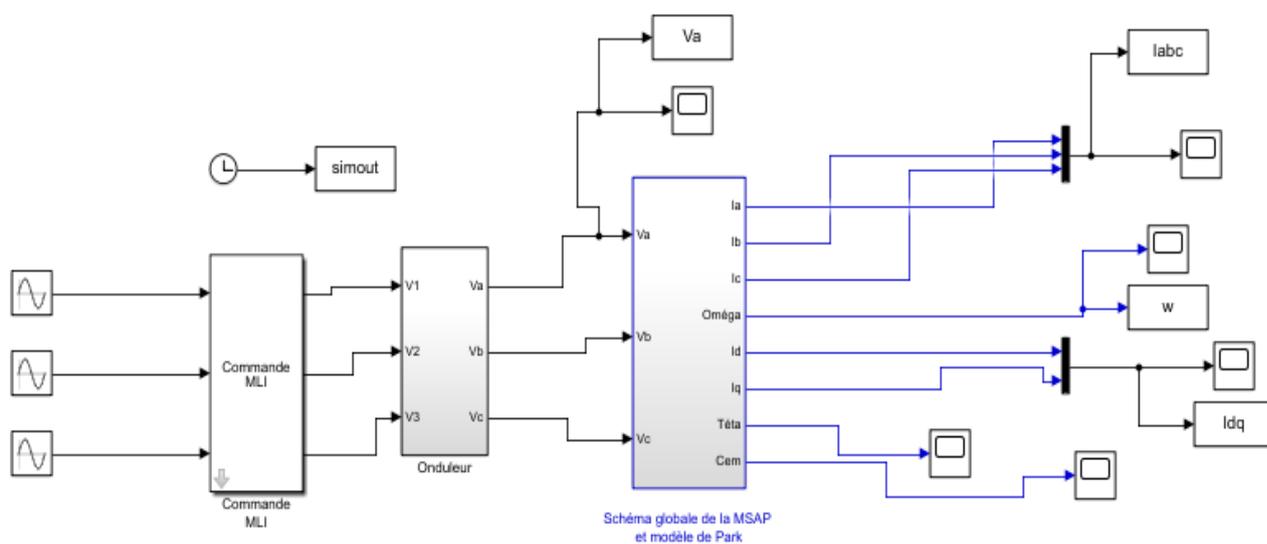
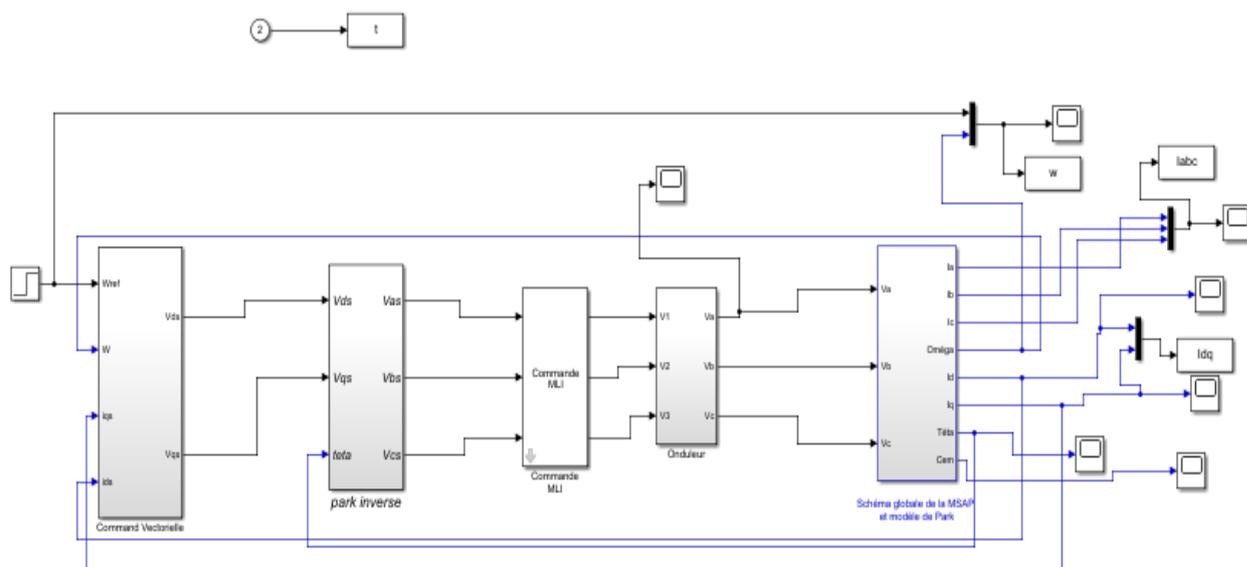


Schéma bloc de la commande vectorielle de la MSAP à MLI :



- [1] Boudjema Abde Raouf "Commande Vectorielle De La Machine Synchrone A Aimants Permanents MSAP "Thème De Master Université Mohamed Khider Biskra ,2013 / 2014.
- [2] A, F Jawad "Etude Du Problème Inverse En Electromagnétisme En Vue De La Localisation Des Défauts De Désaimantation Dans Les Actionneurs A Aimants Permanents " Thèse De Doctorat L'université De Technologie De Belfort-Montbéliard, 05 Décembre 2008.
- [3] Bounouiah. H, Taleb.M "Modélisation Analytique Et Numérique Des Moteurs Synchrones A Aimants Sinusoïdaux " Mémoire Master Académique Université Mohamed Boudiaf - Msila 2017 / 2018.
- [4] G. Lacombe "Définition Et Réalisation D'une Nouvelle Génération De Logiciels Pour La Conception Des Moteurs Futurs " Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2007.
- [5] B. Multon " (Les Machines Synchrones Autopilotées " Notes De Cours ; Ecole Normale Supérieure De Cachan, Antenne De Bretagne, 2004.
- [6] S. Hamecha, Ep.Bourekache " Etude Et Commande D'une Eolienne A Base D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents " Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2013.
- [7] Kadri Nadjib "Conception Et Commande D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents " Mémoire Master Académique Université Kasdi Merbah Ouargla Soutenu 07/07/2019.
- [8] Hacene Bensaadi "Commande DTC-SVM D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents " Thèse De Magistère Université De Batna.2012.
- [9] Boumaaza Fatiha "Commande Non Linéaire Par Linéarisation Entrée – Sortie De La Machine Synchrone A Aimants Permanents "Thèse De Master Université Larbi Ben M'hidi - Oum El Bouaghi - Soutenu 14 Juin 2014.
- [10] Dourari Ilyes "Calcul Analytique Du Champ Dans Une Machine Synchrone A Aimants Permanents A Pôles Lisses " Thèse De Master Université Mouloud Mameri De Tizi-Ouzou Soutenu 27 Septembre 2017.
- [11] Lahmar Badis "Commande Vectorielle De La Machine Synchrone A Aimants Permanents " Thème De Master Université Larbi Ben M'hidi - Oum El Bouaghi Juin 2017.

- [12] B.Hacéne "Contribution A La Commande Des Machines Synchrones A Aimants Permanents " Thèse De Doctorat, L'institut National Polytechnique De Lorraine .Juin 1995.
- [13] Ameer. A "Commande Sans Capteur De Vitesse Par DTC D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents Dotée D'un Observateur D'ordre Complet A Modes Glissants " Thèse De Magister Université De Batna Soutenu Le, 25.10.2005.
- [14] N. Bounasla "Commande Par Mode De Glissement D'ordre Supérieur De La Machine Synchrone A Aimants Permanents " Thèse De Magister, Université Sétif -1, 2015.
- [15] Dou Zakaria Et Deheb Abdelhamid "Commande Par Mode Glissant D'une Machine Synchrone Sans Capteur Mécanique " Thèse De Master Université Echahid Hamma Lakhdar D'el-Oued Soutenu En Juin 2018.
- [16] Nabti Khalil "Stratégies De Commande Et Techniques Intelligentes Appliquées Aux Machines De Type Synchrone " These De Doctorat De Université Mentouri De Constantine Soutenu 14 / 12 / 2010.
- [17] Largot. S "Commande Directe Du Couple D'une Machine Synchrone A Aimant Permanent "Thèse Master De Université Echahid Hamma Lakhdar D'el-Oued 2020-2021.
- [18] Khlaief. A "Nouvelle Approche De Détection De La Position Initiale Du Rotor Des Moteurs Synchrones A Aimants " Mémoire De Mastère De l'Ecole Supérieure Des Sciences Et Techniques De Tunis, 11 Août 2007.
- [19] A. Kaddouri "Étude D'une Commande Non-Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents " Faculté Des Sciences Et De Génie, Université Laval Québec, Nov 2000.
- [20] M. Carriere Sébastien "Synthèse Croisée De Régulateurs Et D'observateurs Pour Le Contrôle Robuste De La Machine Synchrone " Thèse De Doctorat, l'Institut National Polytechnique De Toulouse, France, 2010.
- [21] A. R. Benaskeur, A. Desbiens "Backstepping-Based Adaptive PID Control "IEE Proc. In Control Theory And Applications, Vol. 49, Issue 1, 2002, Pp. 54-59.
- [22] T. Rekioua "Contribution A La Modélisation Et A La Commande Vectorielle Des Machines Synchrones A Aimants Permanents "Thèse De Doctorat De L'inpl Lorraine, 1991.
- [23] Aribi Fouad Salim, Nedjaa Riad Abdelhafid "Commande par mode glissant de la Machine Synchrone à Aimants Permanents "Thèse Master université kasdi merbah ouargla 2017/2018.
- [24] Benchabane. F "Commande En Position Et En Vitesse Par Mode De Glissement D'un Moteur Synchrone Triphasé A Aimants Permanents Avec Minimisation Du Chattering "Thèse Magister De Université Mohammed Khider De Biskra 2004/2005.

- [25] H.Aid, W.Aina "Synthèse De Lois De Commande Non-Linéaires Pour Un Entrainement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents " Mémoire De Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [26] G. Octavian Cimuca "Système Inertiel De Stockage D'énergie Associe A Des Générateurs Eoliens " Ecole Nationale Supérieure D'arts Et Métiers Centre De Lille 2005.
- [27] H. Ziane "Commande Vectorielle Des Machines Synchrones A Aimants Permanents Avec Compensation De Temps Mort De L'onduleur, Commande Sans Capteur Mécanique " Mémoire De Magister D'université De Bejaia 2001.
- [28] M.Djouder "Modélisation Et Commande D'un Véhicule Electrique A Base D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents " Mouloud Mammeri Université Tizi-Ouzou Algérie Thesis · Septembre 2015.
- [29] Abdessemed, R. Kadjouj, M. "Modélisation Des Machines Electriques ". Presse De L'université De Batna 1997.
- [30] Babak, N "Commande Vectorielle Sans Capteur Mécanique Des Machines Synchrones A Aimants: Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification "En Ligne" Des Paramètres " Thèse De Doctorat l'Université De Téhéran, Iran, 2001.
- [31] Benbrahim. A "Commande Prédictive Généralisée D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents " Thèse De Magistère En Université De Batna Soutenu Le, 18 / 06 /2009.
- [32] Debal. A "Commande Vectorielle De La MSAP En Utilisant La Technique Mli Vectorielle " Mémoire De Master De Université Labri Ben M'Hidi-Oum El-Bouaghi Soutenu Le 14/07/2021.
- [33] H. Kaddour "Etude De La Machine Synchrone Autopilotée : Modélisation Et Simulation " Thèse Du Doctorat D'état Université Des Sciences Et De La Technologie D'oran Juillet 2012.
- [34] Amara. Y "Contribution A La Conception Et A La Commande Des Machines Synchrones A Double Excitation Application Au Véhicule Hybride " Thèse Doctorat, Université Paris Xi, France 2001.
- [35] H. Tamrabet "Robustesse D'un Contrôle Vectorielle De Structure Minimal D'une Machine Asynchrone " Mémoire De Magister, Université De Batna, 2006.
- [36] A. Ameer "Commande Sans Capteur De Vitesse Par DTC D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents Dotée D'un Observateur D'ordre Complet A Mode Glissant " Mémoire De Magister, Université De Batna, 2005.
- [37] N. Choug "Etude De La Robustesse Des Contrôleurs Flous D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents Avec Pilotage Vectorielle " Mémoire De Magister, Université De Batna, 2011.

- [38] S. Rezgui "Commande De Machine Electrique En Environnement, Matlab/Simulink Et Temps Réel " Mémoire De Magister, Université Mentouri De Constantine, Algérie, 2009.
- [39] A. Ferroudj "Commande Non Linéaire De La MSAP Sans Capteur De Vitesse. Apporte Des Méthode De l'Intelligence Artificielle " Mémoire De Magister, Université De Batna, 2011.
- [40] F. Labrique, G. Segulier Et R. Baisiere "Les Convertisseurs De L'électronique De Puissance Volume 4 : La Conversion Continu-Alternatif " Lavoisier, 1995.
- [41] D. Lahouel "Commande Non Linéaire Adaptatif D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents " Mémoire De Magister, Université De Batna, 2009.
- [42] SI – Chaine D'énergie "Fonction Convertir : Machines Synchrones Triphases "2STE – Unité A.D.C Page 55/70.
- [43] B. Bendaha Mansour "Identification Des Paramètres D'une Machine Synchrone A Aimant Permanent En Vue D'une Intégration Dans Des Simulateurs En Temps Réel " Mémoire De Magistère, Université Des Sciences Et De La Technologie d'Oran, Soutenu Le 04/02 /2015.
- [44] Amiri. M Ali Dahmane. O "Commande Vectorielle En Vitesse Du Moteur Synchrone A Aimants Permanents Dotée D'un Observateur Mode Glissant " Thèse De Master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –, Soutenu 04 / 07 / 2017.
- [45] M.S. Mahgoun "Application De La Commande H_∞ Aux Systèmes Linéaires Perturbés "Mémoire De Magister, Université Ferhat Abbas-Setif, 2012.
- [46] N.S. Amirouche "Contribution A La Commande Adaptative Et Neuronale D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents " Thèse De Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [47] M. Alaoui "Commande Et Observateur Par Mode Glissant D'un Système De Pompage Et D'un Bras Manipulateur " Thèse De Doctorat, Université De Sidi Mohammed Ben Abdallah,2002.
- [48] Serhoud. H "Contribution A L'étude De La Machine Synchrone A Réductance Variable " Thèse Magister De Université De Batna Soutenu Le,01/07/2009.
- [49] M.S. Merzoug "Etude Comparative Des Performances D'un DTC Et D'un FOC D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents (MSAP) ", Mémoire De Magister, Batna, Algérie, 2007.
- [50] B. Belabbes "Commande Linéarisant D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents " Mémoire De Magister, Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes, Algérie, 2001.
- [51] A.S. Sekkel "Etude Comparative Des Diéèses Commandes De La Machine A Aimants Permanents " Mémoire de Magister, Université Djilali Liabes SBA, Algérie, 2008.

- [52] A. Maasoum "Commande à la commande singulièrement perturbé d'une machine synchrone à aimants permanents (Commande à structure variable CSV) Neuro-Floue " Thèse de doctorat Es-science, Sidi Bel-Abbas, Algérie, 2007.attou
- [53] M.Attou Amine" Commande Par Mode De Glissement de la MSAP" Thèse de Mastère , Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes,2011.
- [54] Khalili. z,Nouari. I" Etude et commande de la machine synchrone à aiment permanant MSAP " Thèse de Mastère, Universite Ahmed Draia Adrar, 2020/2021.