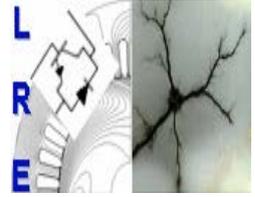




Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :
REZKI Lamia

Intitulé

Modélisation et Commande d'un Moteur à Réluctance Variable à Double Saillance avec et sans capteur de position

Directeur(s) du mémoire :

| | | |
|-------------|------------|-----|
| SAHRAOUI.H | Docteur | ENP |
| MAHMOUDI.MO | Professeur | ENP |

ENP 2012

A mon très cher père et très chère mère

Lamia

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I : Généralités sur les SRM

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction..... | 3 |
| 1. Présentation de la SRM..... | 3 |
| 1.1 Description | 3 |
| 1.2 Principe de fonctionnement de la SRM..... | 3 |
| 1.3 Le convertisseur d'alimentation | 5 |
| 1.4 Les stratégies d'alimentation utilisées dans la commande des SRM. | 6 |
| 1.4.1 Alimentation en pleine onde..... | 6 |
| 1.4.2 Alimentation en courant..... | 6 |
| 1.4.2.1 La technique à hystérésis..... | 7 |
| 1.4.2.2 La technique à MLI à porteuse triangulaire..... | 8 |
| 2. Commande de la SRM..... | 9 |
| 2.1 Principe de commande avec capteur..... | 9 |
| 2.2 Principe de commande sans capteur..... | 9 |
| 2.3 Commande numérique..... | 10 |
| Conclusion..... | 10 |

Chapitre II : Modélisation linéaire et Simulation par Matlab/Simulink de la SRM 12/8

| | |
|---------------------------------|----|
| Introduction..... | 11 |
| 1. Modélisation de la SRM..... | 11 |
| 1.1 Choix de la 1.2 SRM..... | 11 |
| 1.2 Choix du convertisseur..... | 11 |

| | | |
|-----------|------------------------------------------------------------|----|
| 1.3 | Choix de la technique d'alimentation..... | 12 |
| 1.4 | Modélisation de la SRM..... | 12 |
| 1.4.1 | Equations Electriques..... | 12 |
| 1.4.2 | Equation du couple électromagnétique..... | 13 |
| 1.4.3 | Equation électromécanique en régime dynamique..... | 13 |
| 1.4.3 | Equation électromécanique en régime dynamique..... | 13 |
| 1.5 | Modèle linéaire des inductances..... | 14 |
| 2. | Modélisation de la SRM sous Matlab/Simulink..... | 14 |
| 2.1 | Modèle Simulink du système global..... | 15 |
| 2.2 | Modèle Simulink d'une phase..... | 15 |
| 3. | Simulation..... | 16 |
| 3.1 | Simulation du fonctionnement en régime permanent..... | 16 |
| 3.1.1 | Simulation du fonctionnement à grande vitesse | 16 |
| 3.1.2 | Simulation à faible vitesse (alimentation en courant)..... | 17 |
| 3.1.2. a. | Alimentation par la technique à hystérésis (Soft)..... | 17 |
| 3.1.2.b. | Alimentation par la technique à MLI triangulaire | 19 |
| 3.2- | Simulation du fonctionnement en régime dynamique..... | 20 |
| 3.2.1 | A faible vitesse..... | 20 |
| 3.2.2 | A grande vitesse..... | 21 |
| | Conclusion..... | 22 |

Chapitre III : Optimisation et Commande de la SRM à faible et à grande vitesse

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction..... | 23 |
| 1. Optimisation de l'angle d'extinction..... | 23 |
| 1.1 Fonctionnement à faible vitesse | 23 |
| 1.2 Fonctionnement à grande vitesse..... | 25 |
| 2. Influence de la vitesse sur le couple de la machine..... | 25 |
| 2.1 Influence des faibles vitesses de rotation..... | 25 |
| 2.2 Influence des grandes vitesses de rotation..... | 26 |
| 3. Commande en vitesse..... | 27 |
| 3.1 Présentation du système de commande..... | 27 |
| 3.2 Détermination des coefficients du régulateur (PI)..... | 27 |
| 3.3 Simulation du fonctionnement de la structure de commande..... | 28 |
| 3.3.1 Régulation de la vitesse pour l'alimentation en tension..... | 28 |
| 3.3.2 Régulation de la vitesse pour l'alimentation en courant..... | 28 |
| 3.4 Application d'une perturbation au système en régime permanent..... | 29 |
| 3.4.1 A faible vitesse..... | 29 |
| 3.4.2 A grande vitesse..... | 30 |
| Conclusion | 32 |

Chapitre VI : Estimation de la position et commande sans capteur

| | |
|-------------------|----|
| Introduction..... | 33 |
|-------------------|----|

| | |
|----------------------------------------------------------|----|
| 1. Méthode d'estimation de la position..... | 33 |
| 2. Simulation..... | 34 |
| 2.1 Résultats de simulation..... | 34 |
| 3. Commande sans capteur avec régulation de vitesse..... | 36 |
| Conclusion..... | 37 |
| Conclusion générale et perspectives | 38 |

Introduction Générale

Depuis une vingtaine d'années, les machines à réluctance variable (MRV) intéressent les industriels et les chercheurs. Elles présentent un véritable atout du fait de leur simplicité de structure comparée aux machines classiques. De ce fait, la MRV représente une technologie compétitive notamment pour les utilisations nécessitant une plage de variation de vitesse importante.

Cependant, le principe de la réluctance variable est resté très marginal. Il fut surpassé par les machines synchrones, les machines asynchrones (seuls moteurs pouvant se mettre en marche sans dispositif auxiliaire et fonctionner sur le réseau alternatif) et par les machines à courant continu à collecteur.

Leur réputation de produire un couple pulsatoire, des vibrations et la nécessité de leur associer un capteur de position limitent leur utilisation à plus grande échelle. De nombreux laboratoires de recherche s'intéressent aux aspects de conception, de modélisation et de commande de la MRV.

Le travail que nous avons effectué consiste à la modélisation, l'optimisation et la commande de la SRM avec et sans capteur de position.

Dans le premier chapitre, des généralités sur la SRM ont été présentées : sa structure géométrique, son principe de fonctionnement, les stratégies d'alimentation utilisées, ainsi que sa commande avec et sans capteur de position.

Dans le second chapitre, une modélisation mathématique de la machine sera effectuée, puis utilisée dans l'élaboration d'un modèle numérique sous un environnement Matlab/Simulink, celui-ci nous permet d'effectuer la simulation du fonctionnement de la machine en régime permanent et transitoire à grande et à faible vitesse, correspondant respectivement à l'alimentation pleine onde de tension et l'alimentation régulée en courant.

Dans le chapitre 3, une étude des performances de la SRM est réalisée : Une recherche d'un angle d'extinction optimal est effectuée afin de minimiser l'ondulation du couple à faibles vitesses et obtenir une puissance maximale à grande vitesse. Une étude de l'influence de la vitesse sur l'ondulation du couple est également prévue. Par ailleurs, Une commande en vitesse sera réalisée en utilisant un régulateur PI. La robustesse de ce dernier sera testée.

Au dernier chapitre, on s'intéresse à la commande de la machine sans capteur. A cet effet l'estimation de la position utilisant la méthode de l'estimation du flux est considérée. Une commande en vitesse avec estimateur est réalisée.

Chapitre 1

Généralités sur les SRM

$$W'_{em} = \int_0^{ni_0} \phi \partial ni \dots \dots \dots (I. 2)$$

Dans notre cas on se limitera à un modèle où la saturation est négligée (modèle linéaire), donc le flux est proportionnel aux ampère- tours tel que :

$$\Psi (\theta) = \eta (\theta) \cdot ni \dots \dots \dots (I.3)$$

Dans ce cas l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em}(\theta) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \dots \dots \dots (I. 4)$$

Pour une machine triphasée (6/4) 6 dents au stator et 4 dents au rotor :

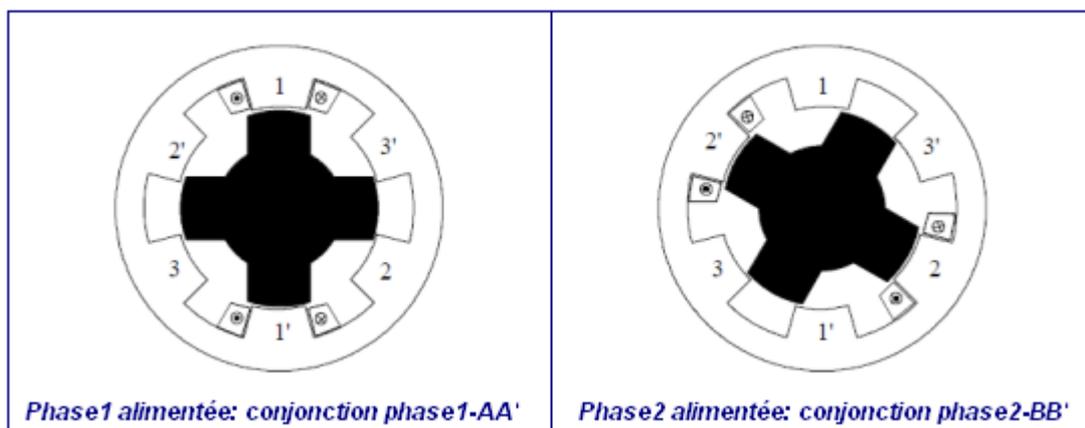


Fig. I. 1 : Alimentation et rotation d'une SRM

La machine fonctionne par effet de reluctance variable due à la présence des dents au rotor et au stator. Lorsqu'une phase est alimentée, le rotor tend à se déplacer vers la position de réluctance minimale.

L'alimentation successive des trois phases fait tourner le rotor dans un sens, le changement de la séquence d'alimentation permet l'inversion du sens de rotation.

On distingue les deux fonctionnements de la machine, le fonctionnement moteur correspondant à la partie croissante de l'inductance et le fonctionnement génératrice correspondant à la partie décroissante de l'inductance, comme l'illustre la figure Fig. I. 2.

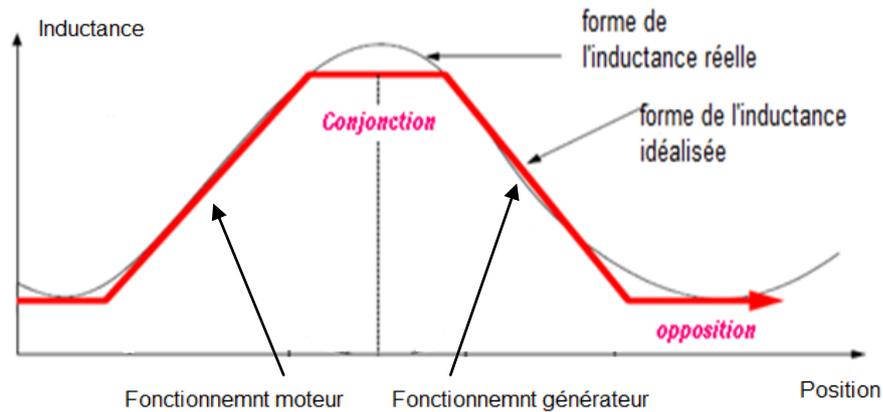


Fig. I. 2 : Caractéristique de la SRM en fonction de la position

Pour obtenir un couple positif qui permet d'entretenir le mouvement de rotation il faut alimenter les phases lorsque la dent rotorique s'approche de la dent statorique c'est à dire pendant la période de croissance de l'inductance de la phase. L'alimentation de la phase lorsque l'inductance décroît, engendre un couple résistant donc la machine freine. [9, 12].

1.3 Le convertisseur d'alimentation

Etant donné que l'alimentation de la SRM est unipolaire, et dans le but de commander les phases du moteur de façon indépendante, le convertisseur en demi-pont asymétrique, présenté sur la figure I. 6, est le mieux adaptée [8].

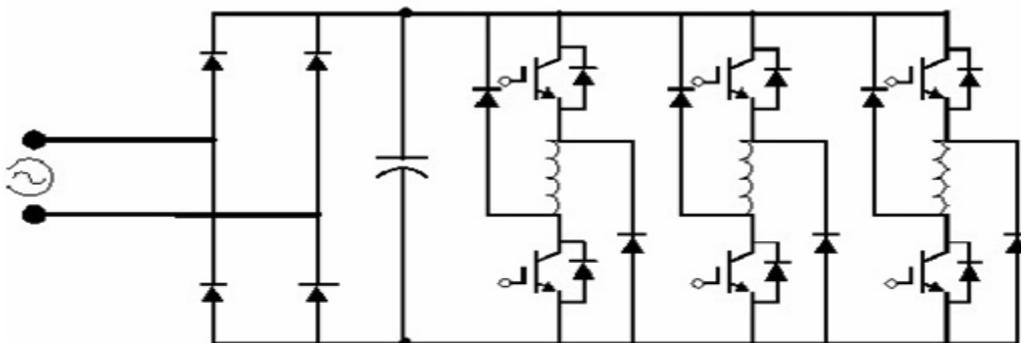


Fig. I. 3 : Convertisseur en demi- pont asymétrique

1.4 Les stratégies d'alimentation utilisées dans la commande des SRM

Le choix de la stratégie d'alimentation des SRM dépend de la vitesse de rotation qu'on veut obtenir, on distingue alors :

- l'alimentation en pleine onde de tension.
- l'alimentation régulée en courant.

1.4.1 Alimentation en pleine onde de tension

Dans ce mode d'alimentation chaque phase de la SRM est alimentée périodiquement par des créneaux de tension positive qui commencent et se terminent à des instants bien choisis liés à la forme de l'inductance. Comme illustré sur la figure I. 4, l'intervalle d'excitation de la phase est compris entre θ_{on} et θ_{off} .

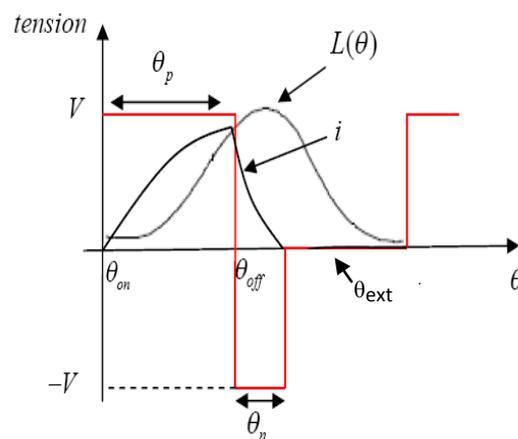


Fig. I. 4 : Forme de la tension et du courant pour une alimentation en pleine onde

Ce mode d'alimentation est utilisé pour des grandes vitesses de rotation de la machine, où le courant dépend de la vitesse et des angles de commande.

1.4.2 Alimentation en courant

Son principe consiste à commander les deux transistors en série de la phase, suivant des séquences permettant d'avoir trois niveaux de tension pour chaque phase, $+V$, $-V$ et 0 .

Elle regroupe deux principales techniques d'alimentation qui sont la technique à hystérésis et la technique à MLI. Elle est Utilisée pour les faibles vitesses.

1.4.2.1 La technique à hystérésis :

Le but de cette stratégie d'alimentation est de réguler le courant de chaque phase de la SRM autour d'une valeur préalablement choisie, variant dans une bande Δi que l'on fixe. Ce control se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et leur référence. La différence entre les deux valeurs permet à la logique de commande du convertisseur d'imposer une commutation des interrupteurs lorsque cette différence dépasse $\frac{\Delta i}{2}$.

On distingue deux techniques d'alimentation par hystérésis :

❖ La stratégie Soft Shopping

Cette technique consiste à exciter et désexciter chaque phase de la SRM selon les séquences de commande des interrupteurs indiquées dans le tableau ci-dessous.

| Etat des interrupteurs | V_{phase} | Courant de phase |
|------------------------------------------------------|-------------|------------------|
| T_1 et T_2 fermés D_1 et D_2 ouverts | $+V_{DC}$ | Croissant |
| T_1 et D_1 fermés ou T_2 et D_2 fermés | 0 | Décroissant |
| T_1 et T_2 ouverts D_1 et D_2 fermés | $-V_{DC}$ | Désexcitation |

Tab. I.1 : État des interrupteurs pour la stratégie soft shopping

❖ La stratégie Hard Shopping

Cette technique utilise les deux transistors par phase en même temps pour l'excitation des phases et la régulation du courant.

Les séquences de commande des interrupteurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

| Etat des interrupteurs | V_{phase} | Courant de phase |
|-------------------------------------------------|-------------|------------------|
| T_1 et T_2 fermés D_1 et D_2 ouverts | $+V_{DC}$ | Croissant |
| T_1 et T_2 ouverts D_1 et D_2 fermés | $-V_{DC}$ | Décroissant |

Tab. I. 2 : Etat des interrupteurs pour la technique hard shopping

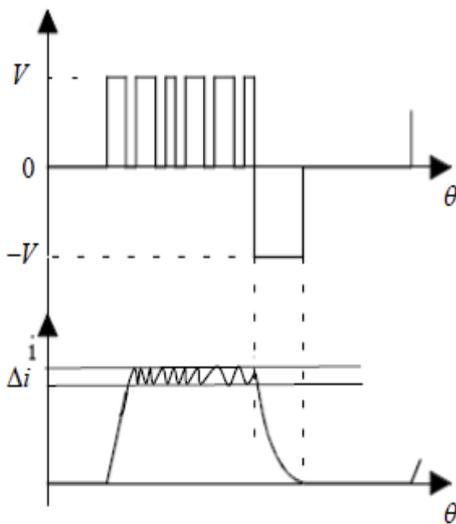


Fig. I. 5: Alimentation par hystérésis
(Soft shopping)

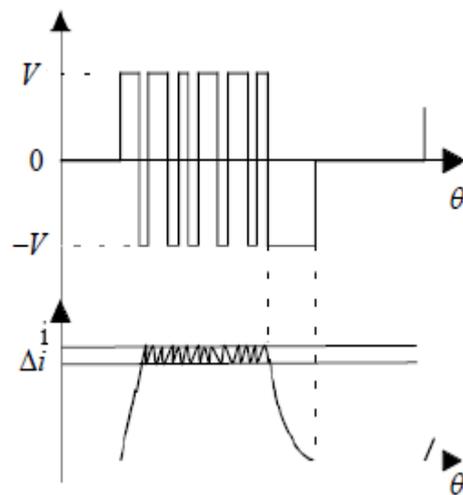


Fig. I. 6: Alimentation par hystérésis
(Hard shopping)

1.4.2.2 La technique à MLI à porteuse triangulaire

Cette stratégie consiste à produire un signal triangulaire (porteuse) et le comparer à la différence entre le courant de référence et celui de la phase pour obtenir les impulsions nécessaires à la commande des semi-conducteurs. De même que l'alimentation à hystérésis, l'alimentation à MLI peut être réalisée en Soft ou en Hard Shopping.

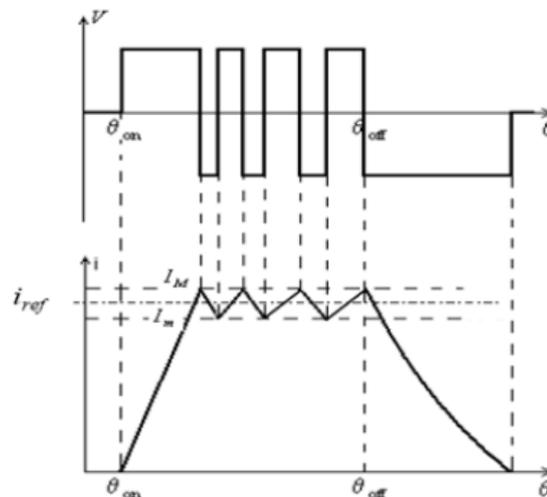


Fig. I. 7: Forme du courant pour une alimentation MLI

2. Commande de la SRM

2.1 Principe de commande avec capteur

L'alimentation de la machine nécessite la connaissance de la position du rotor. Pour cela un capteur de position doit être utilisé [12, 18, 19]

2.2 Principe de commande sans capteur

La présence d'un capteur de position augmente l'encombrement et le coût du système d'entraînement et réduit sa fiabilité. Pour ces raisons, de grandes actions de recherche sont menées dans le but de développer une stratégie fiable et peu coûteuse pour la commande sans capteur. De telles techniques sont généralement basées sur une estimation de la position du rotor à partir l'estimation du flux [12].

La technique d'estimation de flux est l'une des techniques les plus utilisées pour l'estimation de la position dans le cas de la commande des SRM sans capteur de position. Cette méthode est basée sur la comparaison entre le flux calculé (estimé) en fonction du courant actuel et la tension de la phase, et le flux de référence correspondant au même courant afin d'estimer la position [4].

Le flux d'une phase (Ψ_{ph}) est estimé à partir du moment où la phase est excitée, il est calculé par l'équation suivante:

$$\Psi_{ph} = \int_{t_{on}}^t (u_{ph} - R \cdot i_{ph}) dt \dots\dots\dots (I.8)$$

Chaque fois que le flux est calculé, il est comparé au flux de référence pris des courbes de magnétisation de référence en fonction du courant réel de la phase. Afin d'indiquer la position où se trouve le rotor, la méthode est illustrée par le schéma suivant:

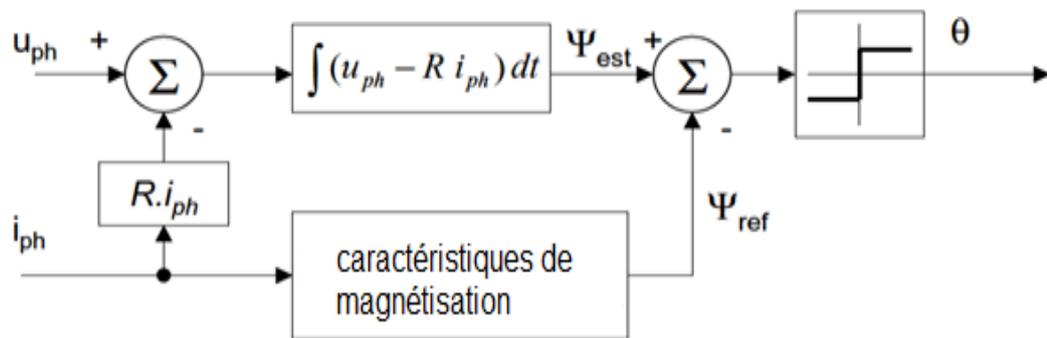


Fig. 8 : Estimation de la position par l'estimation du flux

2.3 Commande numérique

La commande avec et sans capteur de la SRM se fait, en général, numériquement à base d'un micro- contrôleur ou de DSP [4, 8].

Le capteur de position installé sur l'arbre de la machine, envoie l'information acquise sur la position du rotor au microcontrôleur sous forme d'un signal. Le microcontrôleur traite l'information, puis il génère des signaux qui permettent la commande des commutateurs du convertisseur.

Dans le cas de la commande sans capteur, l'estimateur de position donne l'information sur la position du rotor au microcontrôleur.

Conclusion

La SRM présente une structure simple et de par son principe de fonctionnement, son alimentation nécessite un convertisseur unipolaire plus économique que les convertisseurs utilisés dans les machines classiques.

La présence d'un capteur de position réduit l'avantage de la simplicité de la SRM et de sa fiabilité, une commande sans capteur est souvent considérée en le remplaçant par un estimateur.

Chapitre 2

*Modélisation linéaire et Simulation par
Matlab/Simulink de la SRM 12/8*

Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle mathématique de la SRM basé sur le modèle linéaire de l'inductance. En s'appuyant sur ce modèle, nous effectuerons une modélisation numérique par le logiciel Matlab/ Simulink pour les deux modes d'alimentation : pleine onde et courant. Une simulation est alors effectuée pour ces alimentations correspondantes respectivement au fonctionnement à grandes vitesses et à faibles vitesses, en régime permanent et dynamique.

1. Modélisation de la SRM

1.1. Choix de la SRM

Notre étude est effectuée sur une structure 12/8 triphasée [19], dont les caractéristiques sont présentées en annexe A.

1.2. Choix du convertisseur

Dans notre cas, nous choisissons un convertisseur en demi-pont asymétrique à trois bras dont la structure pour un bras est présentée sur la figure II. 1.

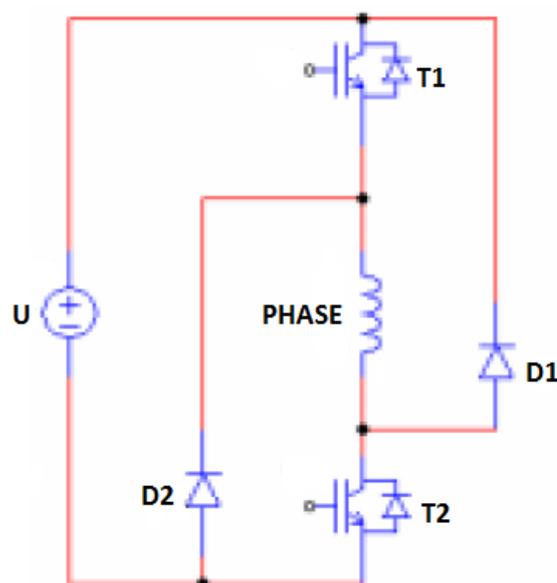


Fig. II. 1 : alimentation d'une phase par un demi-pont

1.3. Choix de la technique d'alimentation

Comme ça a été présenté au chapitre précédent, la stratégie d'alimentation de la SRM change selon la vitesse. Pour les vitesses inférieures à la vitesse de base, un courant doit être imposé à la machine, par contre au-delà de la vitesse de base, c'est la tension qui doit être fixée.

Nous testerons pour les faibles vitesses en premier lieu la technique à hystérésis, puis la technique à MLI.

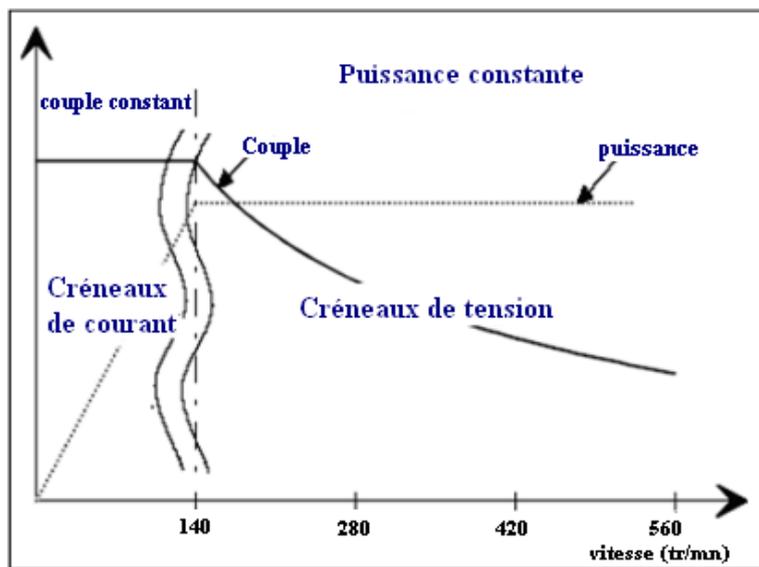


Fig. II. 2 : Stratégies d'alimentation selon la vitesse de rotation [9].

1.4. Modélisation de la SRM

Les trois équations traduisant le comportement de la machine sont :

1.4.1. Equations Electriques

Chaque phase est régie par l'équation de la tension suivante :

$$V = r \cdot i + \frac{d\Psi(\theta,i)}{dt} \dots\dots\dots (II.1)$$

Où $\Psi(\theta, i)$ est le flux engendré par phase. Dans le cas non saturé le flux peut être exprimé par :

$$\Psi(\theta, i) = L(\theta) \cdot i \quad \dots\dots\dots (II.2)$$

$$V = r \cdot i + L(\theta) \frac{di}{dt} + \Omega i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad \dots\dots\dots (II.3)$$

$$\text{Avec: } \Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Le troisième terme de cette équation représente la force contre électromotrice (fcem) de la machine :

$$e = \Omega i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad \dots\dots\dots (II.4)$$

1.4.2. Equation du couple électromagnétique

Pour chaque phase le couple est donné par la formule suivante :

$$C_i(\theta) = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL_i}{d\theta} \quad \dots\dots\dots (II.5)$$

Le couple total créé par les trois phases est :

$$C_T = \sum_{i=1}^3 C_i \quad \dots\dots\dots (II.6)$$

1.4.3. Equation électromécanique en régime dynamique

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_T - C_r - F\Omega \quad \dots\dots\dots (II.7)$$

J : Moment d'inertie de la machine et du système entraîné.

F : Le coefficient de frottement visqueux.

C_r : Le couple de charge.

1.5. Modèle linéaire des inductances

Nous approximations les inductances par une forme trapézoïdale dont les variations sont données par la figure II. 3.

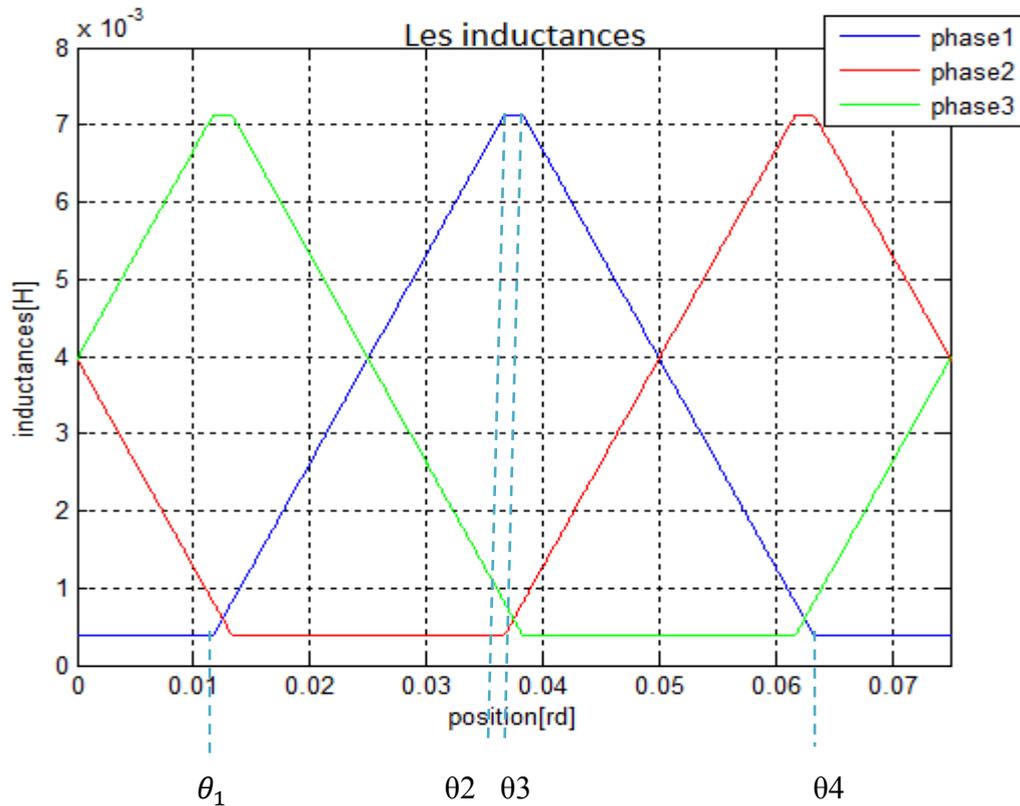


Fig. II. 3 : variation des inductances en fonction de la position

Où L_{max} , L_{min} sont respectivement les valeurs maximale et minimale de l'inductance.

Les trois inductances sont décalées l'une par rapport à l'autre d'un angle δ , calculé par la relation suivante :

$$\delta = 2\pi \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right).$$

2. Modélisation de la SRM sous Matlab/Simulink

Un modèle de la SRM élaboré sous un environnement Matlab/Simulink est proposé, ce modèle prend en compte le fonctionnement de la machine pour les grandes et les faibles vitesses de fonctionnement correspondant respectivement à l'alimentation pleine onde et l'alimentation régulée en courant.

2.1 Modèle Simulink du système global

Le modèle Simulink de tout le système (SRM + système d'entraînement) en régime permanent et dynamique est représenté sur la figure II. 4.

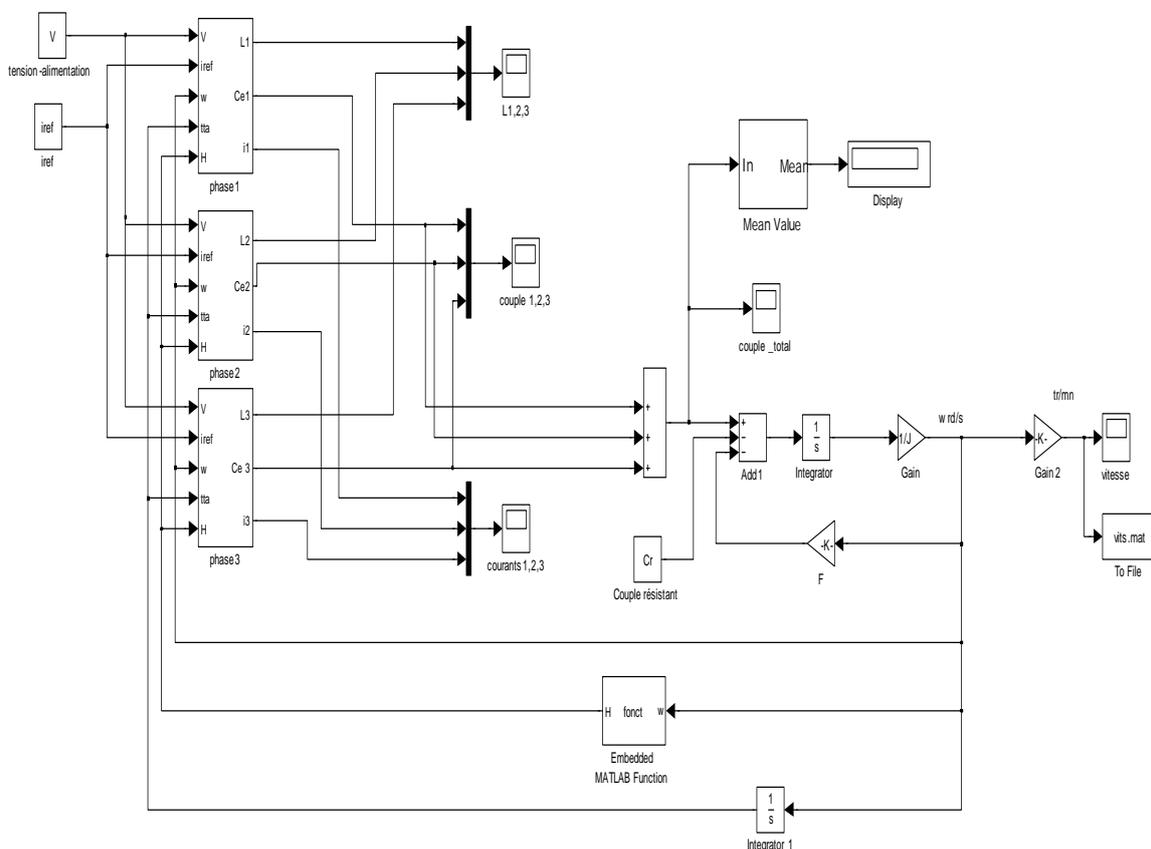


Fig. II. 4 : Modèle Matlab/Simulink global de la SRM

2.2 Modèle Simulink d'une phase

Chaque phase est représentée par le schéma bloc suivant :

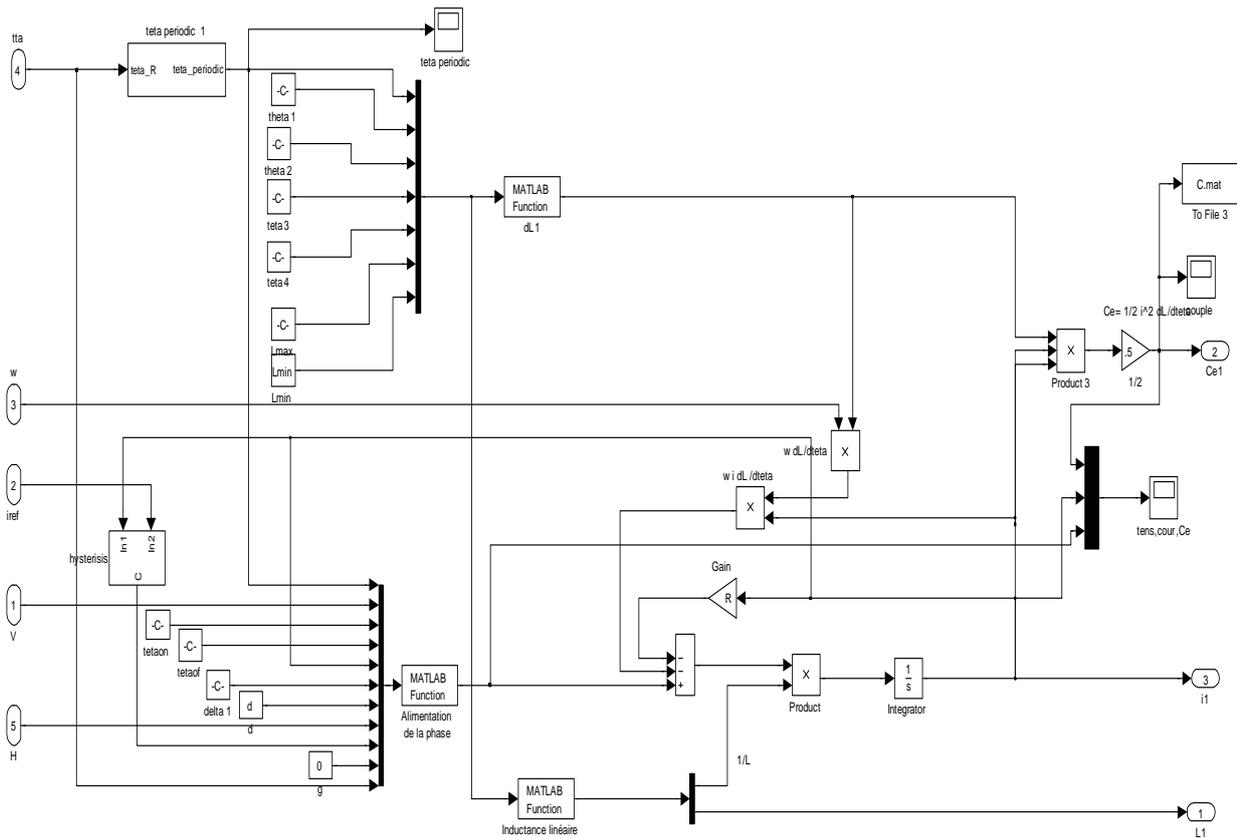


Fig. II. 5 : Modèle Matlab/Simulink d'une phase de la SRM

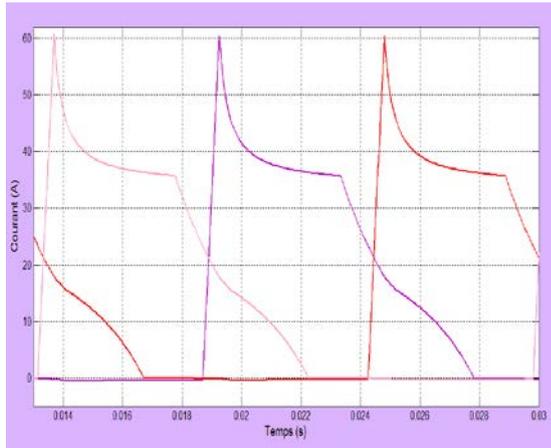
3. Simulation

3.1 Simulation du fonctionnement en régime permanent :

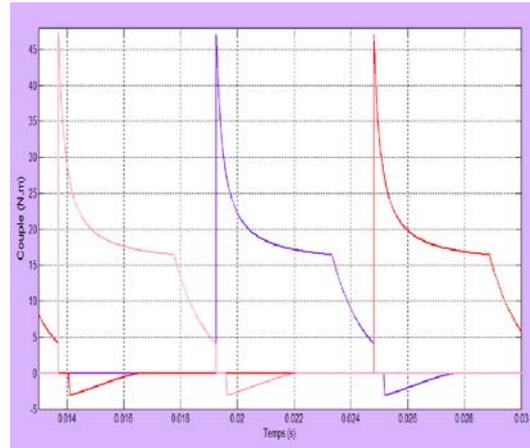
3.1.1 Simulation du fonctionnement à grande vitesse : alimentation en pleine onde

Le fonctionnement à vitesse élevée nécessite une alimentation en pleine onde de tension. La simulation a été réalisée pour une vitesse supérieure à la vitesse de base.

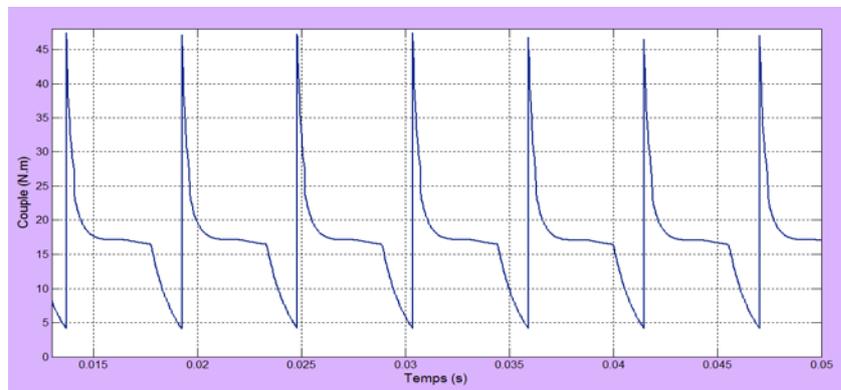
Les résultats de simulation des trois phases sont représentés dans la figure II. 6.



(a) Courant des phases



(b) couples des phases



(a) Couple total de la machine

Fig. II. 6 : Fonctionnement en régime permanent, $\Omega=450\text{tr/mn}$, $\theta_{on}=5.5^\circ$, $\theta_{off} = 18^\circ$.

Pour un fonctionnement à vitesse élevée, on constate que le courant qui s'établit dans la phase présente un pic, il est due au changement rapide de l'inductance au moment de sa croissance. On remarque aussi une coexistence de deux couples, un couple moteur ($\frac{dL}{d\theta} > 0$) de la phase excitée qui fait tourner le moteur dans le sens de rotation et un couple négatif ($\frac{dL}{d\theta} < 0$) de la phase en désexcitation qui s'oppose à la rotation. Le chevauchement des phases laisse le couple total de la machine positif mais ondulé. La résolution de ce problème se fait en jouant sur les angles de commutation.

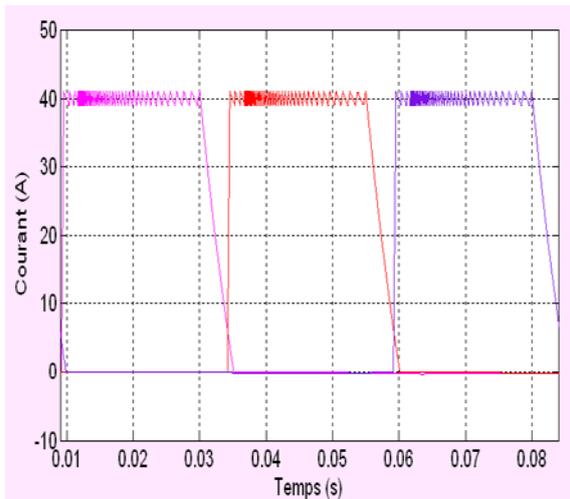
Les résultats obtenus pour cette simulation sont concordants aux résultats trouvés en bibliographie [8,13].

3.1.2 Simulation à faible vitesse (alimentation en courant):

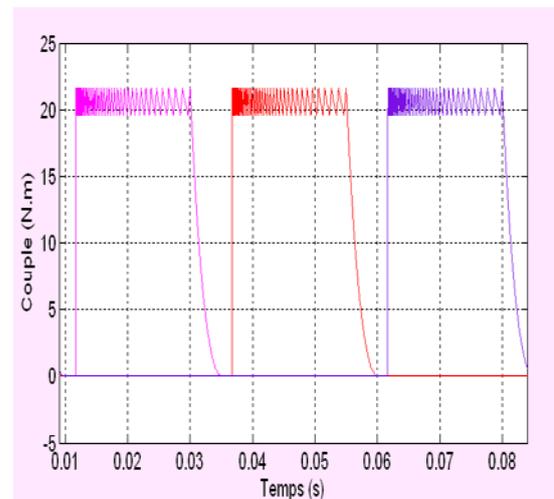
Les techniques de régulation par Hystérésis (Soft-Shopping et Hard Shopping) et MLI (Soft-Shopping) ont été testées dans ce cas.

3.1.2. a. Alimentation par la technique à hystérésis (Soft- Shopping)

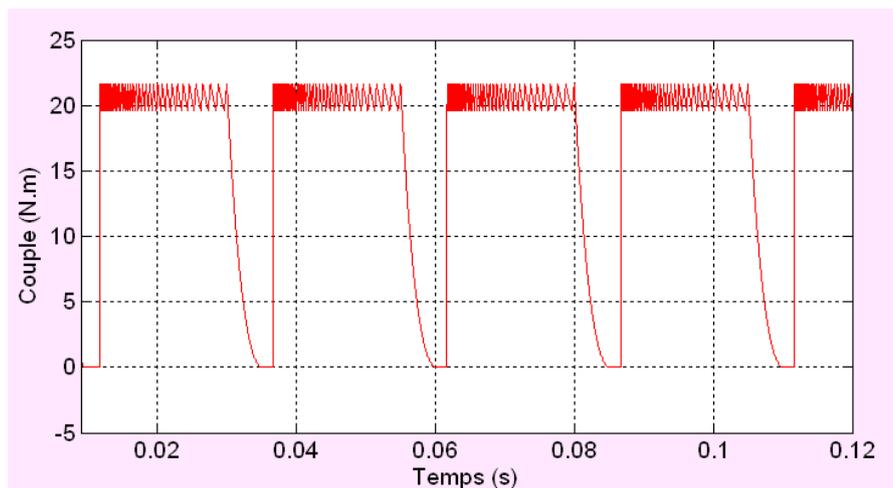
Les résultats de simulation pour les trois phases :



(a) Courant des phases



(b) Couple des phases



(b) Couple total de la machine

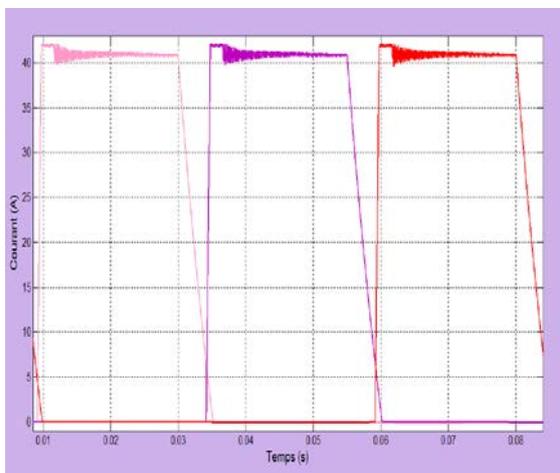
Fig. II. 7 : Fonctionnement à faible vitesse($\Omega=100\text{tr/mn}$), régime permanent, Alimentation à hystérésis (Soft-Shopping) pour $\theta_{on}=5.5^\circ$, $\theta_{off} = 18^\circ$, $I_{ref}=40\text{A}$, $\Delta i = 1\text{A}$

Pour une vitesse inférieure à la vitesse de base, nous observons que le courant dans une phase reste autour du courant de référence, la régulation du courant est réalisée dans la bande fixée. Ceci est réalisé par l'échantillonnage de la tension de la phase. Une tension négative est appliquée afin d'accélérer la décroissance du courant et donc éviter l'apparition du couple négatif (frein). Nous remarquons aussi que le couple total de la machine présente des ondulations importantes soit pendant la conduction des phases qui sont dus à l'hystérésis ou pendant la commutation brusque des phases, ce qui est l'inconvénient principal des machines à réluctance variable.

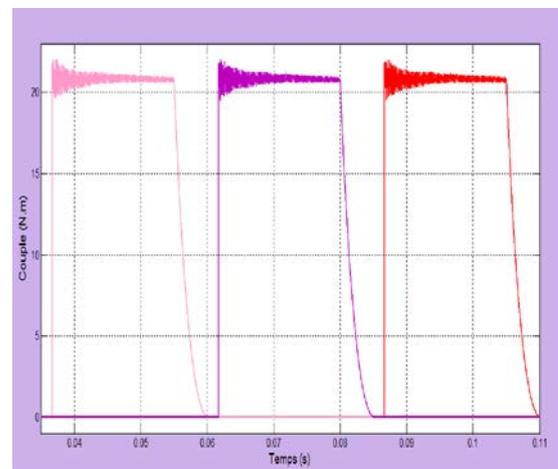
3.1.2.b. Alimentation par la technique à MLI triangulaire (Soft- Shopping)

Dans ce cas de commande, il faut bien choisir les caractéristique du signal triangulaire (porteuse). Pour une porteuse de fréquence de 5KH, avec une amplitude de 2A.

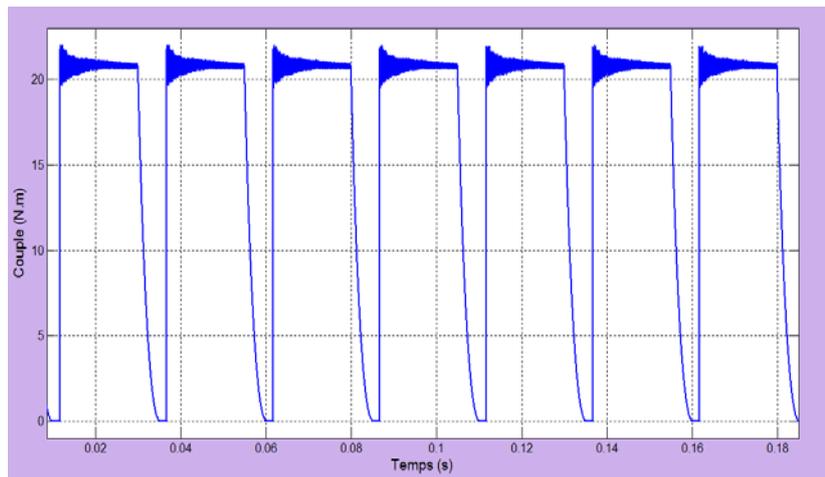
Les résultats de simulation pour les trois phases sont présentés dans la figure II. 8.



(a) Courants des phases



(b) Couple des phases



(c) Couple total de la machine

Fig. II. 8 : Fonctionnement en régime permanent (100tr/mn), alimentation par la technique MLI triangulaire (Soft- Shopping), pour $\theta_{on}=5.5^\circ$, $\theta_{off}=18^\circ$, $I_{ref}=40A$

Nous constatons que la fréquence de commutation est constante après un laps de temps (le rapport cyclique de la MLI est constant). Cependant, le courant tend à se stabiliser à une valeur légèrement supérieure à la valeur de référence. D'autre part, le couple de la machine qui suit le courant est relativement maintenu constant grâce à la régulation du courant. Néanmoins, celui-ci présente des ondulations surtout pendant les commutations.

Remarque :

L'angle correspondant à la coupure du courant est plus long que celui correspondant à son établissement, ceci est dû au fait que l'inductance est plus élevée en conjonction qu'en opposition. Ainsi le traînage du courant à la coupure peut se produire pendant la phase de décroissance de l'inductance et entraîner l'apparition d'un couple instantané négatif (frein). Lorsque la vitesse augmente, on est conduit à "avancer" le début de croissance du courant par rapport à la position correspondante à la croissance de l'inductance.

3.2 Simulation du fonctionnement en régime dynamique

3.2.1 A faible vitesse

🚦 Simulation de démarrage avec un couple de charge de 10N.m

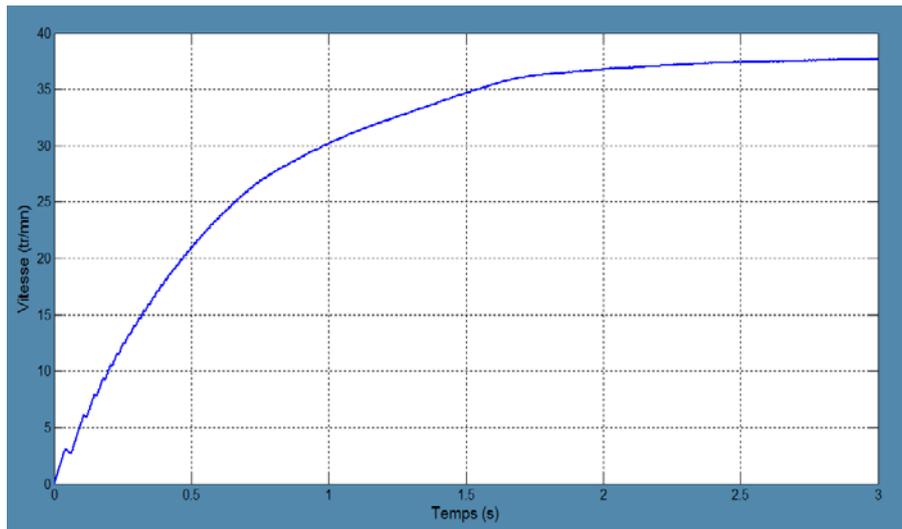


Fig. II. 9 : Régime transitoire à faible vitesse (régulation du courant)

On constate que la vitesse présente des oscillations, leurs origine est la commutation brusque des phases. Le système atteint la vitesse maximale qui est égale à 38tr/mn (3.14 rd/s) en un temps de 2s. Ce temps est relativement grand, ceci confirme la dynamique lente à faible vitesse.

3.2.2 A grande vitesse

✚ Test sur la dynamique de la machine à grande vitesse

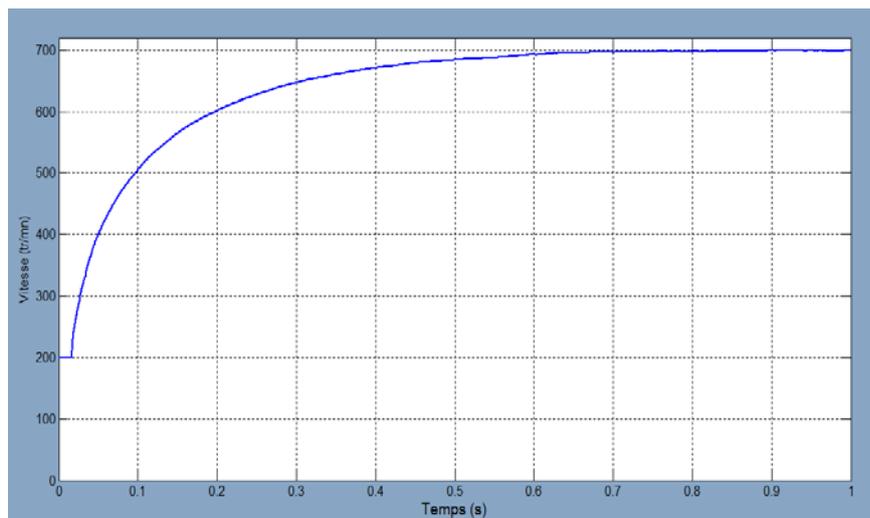


Fig. II. 10 : Régime transitoire à grande vitesse (pleine onde)

On remarque que le régime permanent (700tr/mn) est atteint en un temps de 0. 8s, ce temps est relativement faible. Ce qui confirme la dynamique rapide de la machine à grande vitesse.

Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle mathématique de la machine a été conçu en régime non saturé, puis exploité pour l'élaboration d'un modèle numérique sous un environnement Matlab/Simulink, un test de performance de la machine a été proposé pour les différentes stratégies d'alimentations en régime permanent.

Suite a ces tests, on a remarqué qu'une limitation de courant est nécessaire à faible vitesse afin d'empêcher le courant d'atteindre des valeurs élevées qui peuvent dépasser la valeur nominale de la machine (107A). Ce problème ne se pose pas à grande vitesse, dans ce cas une alimentation pleine onde doit être utilisée.

Un autre test de performance a été effectué pour le régime transitoire pour l'alimentation pleine onde et l'alimentation régulé en courant, qui a montré une dynamique lente à faible vitesse et une dynamique rapide à grande vitesse.

Chapitre 3

Optimisation et Commande de la SRM à faible et à grande vitesse

Introduction

Dans cette partie, en premier lieu, une optimisation à faible vitesses de l'angle d'extinction a été faite pour permettre au système d'entraînement la génération d'un couple moyen important avec un minimum d'ondulation. Une autre optimisation à grandes vitesses de l'angle d'extinction permet au moteur la production d'une puissance maximale. La simulation est effectuée en régime permanent.

Une étude de l'influence de la vitesse sur le couple et la puissance dans les deux plages de vitesses de fonctionnement possible de la machine est également réalisée.

Par ailleurs, on s'intéresse à la commande en vitesse par un régulateur PI, et la robustesse du régulateur est testée, en appliquant une perturbation au système en régime permanent.

1. Optimisation de l'angle d'extinction θ_{off}

1.1 Fonctionnement à faible vitesse

Les résultats de simulation obtenus au chapitre précédent montrent que le couple de la machine à faible vitesse (hystérésis ou MLI) pour un angle d'extinction donné n'est pas constant. Celui-ci présente des ondulations surtout pendant la commutation des phases. Pour cela, nous nous proposons de chercher l'angle de commande θ_{off} qui conduit à un couple moyen maximal avec un minimum d'ondulation. Pour ce faire, nous examinons l'influence de l'angle d'extinction sur la valeur moyenne du couple total ainsi que sur son ondulation. Ces deux grandeurs seront calculées pour plusieurs angles d'extinction et pour les deux techniques de régulation : Hystérésis et MLI.

Les figures III. 1 nous permet de voir l'influence de θ_{off} sur le couple moyen et l'ondulation pour la technique Hystérésis.

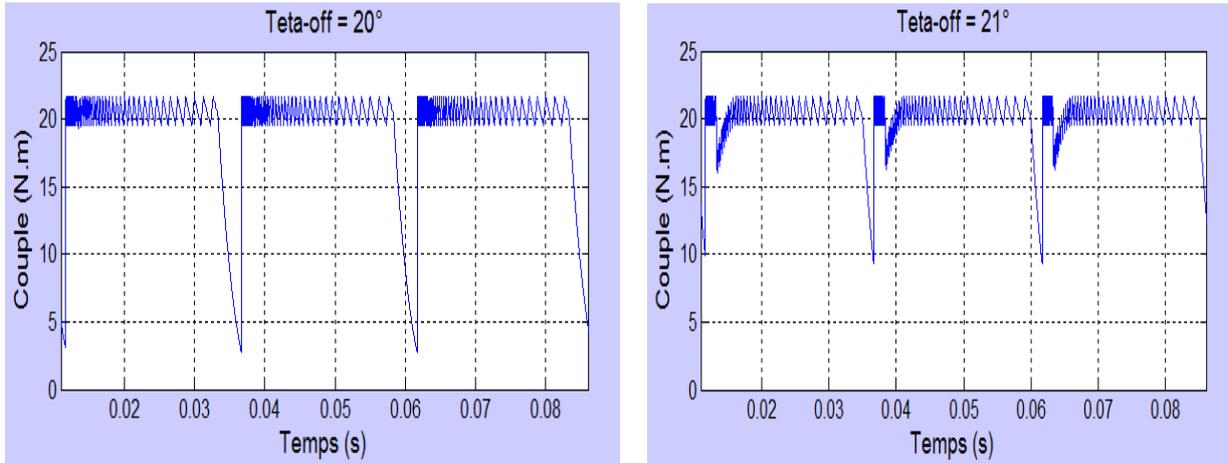


Fig. III. 1: Couple total, $\Omega= 100\text{tr/mn}$, $\theta_{off}=20^\circ, 21^\circ$, $\theta_{on}=5.5^\circ$, $I_{ref}=40\text{A}$, $\Delta I=1\text{A}$

Les résultats montrent que l'angle d'extinction θ_{off} a un effet sur le couple total moyen et le taux d'ondulation. Le couple moyen et le taux d'ondulation sont calculés pour différentes valeurs de θ_{off} . En effet, le couple moyen augmente avec θ_{off} jusqu'à une certaine valeur, alors que le taux d'ondulation diminue. Nous notons que le taux d'ondulation est minimal (46 %) pour l'angle $\theta_{off}= 21.3^\circ$. correspondant à la valeur moyenne maximale du couple (19.78N.m).

Pour la technique MLI, l'influence de θ_{off} sur le couple total de la machine est illustré par les figures III. 2

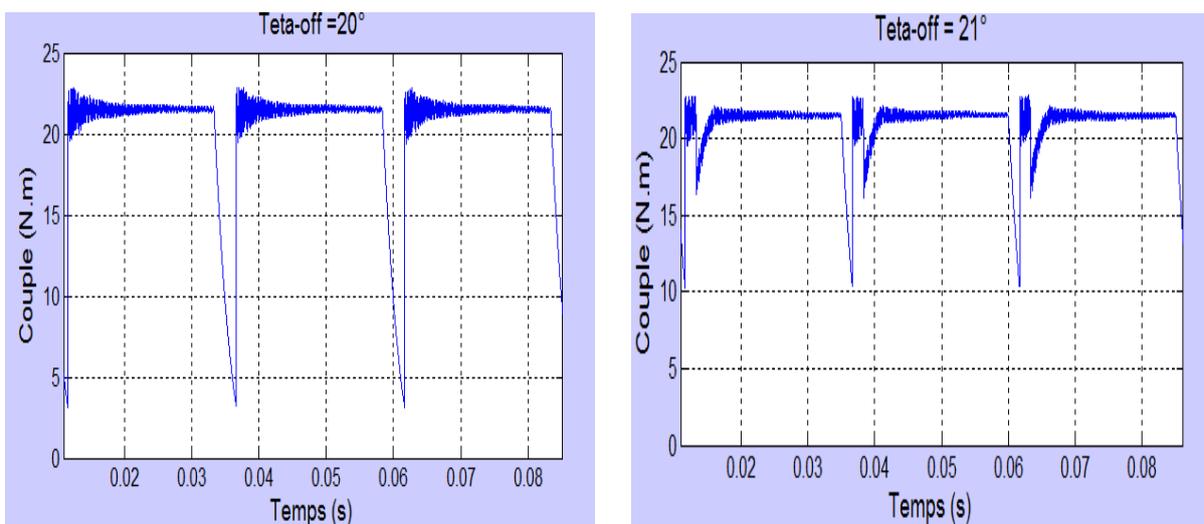


Fig. III. 2 : Formes du couple total, $\theta_{off}= 20^\circ, 21^\circ$.

Le couple moyen et le taux d'ondulation sont calculés pour les mêmes valeurs de θ_{off} utilisés pour la technique à hystérésis, l'angle d'extinction optimale dans ce cas est de 21.3° qui est le même que pour le cas de l'alimentation à hystérésis.

1.2 Fonctionnement à grande vitesse

En fonctionnement à grande vitesse, il est nécessaire d'optimiser l'angle d'extinction qui permet au moteur de produire une puissance maximale. Ceci revient, pour une vitesse donnée, à optimiser l'angle qui permet au moteur la production d'un couple électromagnétique moyen maximal. Pour cela nous allons calculer le couple moyen pour plusieurs angles d'extinction. Dans ce cas, on ne s'intéresse pas aux ondulations de couple car celles-ci affectent moins le fonctionnement de la machine à grandes vitesses.

Les résultats de la simulation pour deux angles d'extinction sont présentés sur figure III. 3.

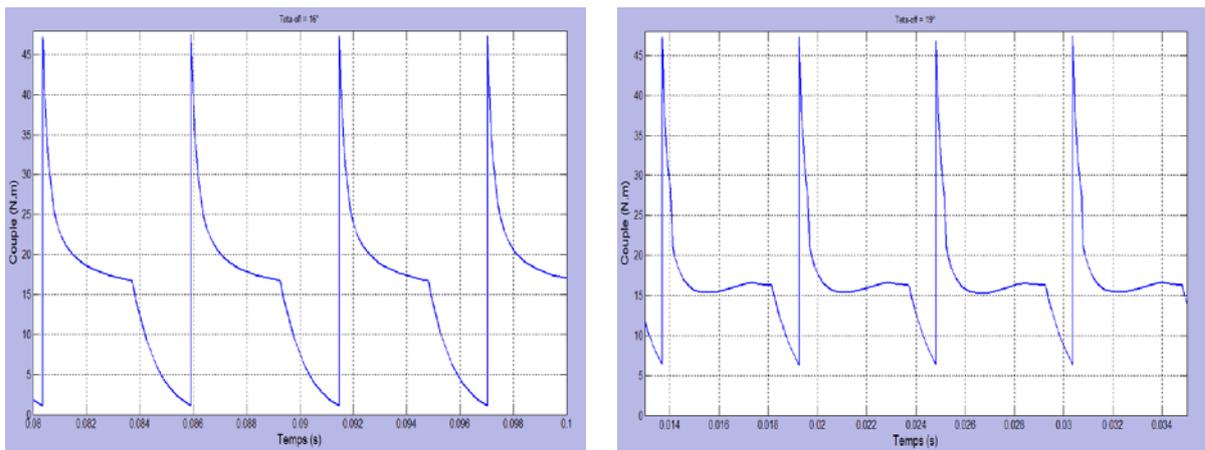


Fig. III. 3 : Couple total, $\Omega=450\text{tr/mn}$, $\theta_{off}=16^\circ, 19^\circ$, $\theta_{on}=5.5^\circ$

Le couple moyen calculé pour différentes valeurs de θ_{off} , le couple moyen maximal (16.35N.m) est obtenu pour un angle d'extinction égal à 18.5° . Nous notons que l'angle d'extinction optimal pour les grandes vitesses reste autour de 18.5° .

2. Influence de la vitesse sur le couple de la machine

2.1 Influence des faibles vitesses de rotation

En alimentant les phases pendant la période de conduction optimale déterminée. On analysera l'influence des faibles vitesses sur les performances de la machine. La simulation pour deux vitesses inférieures à la vitesse de base est réalisée, les résultats sont présentés par la figure III. 4.

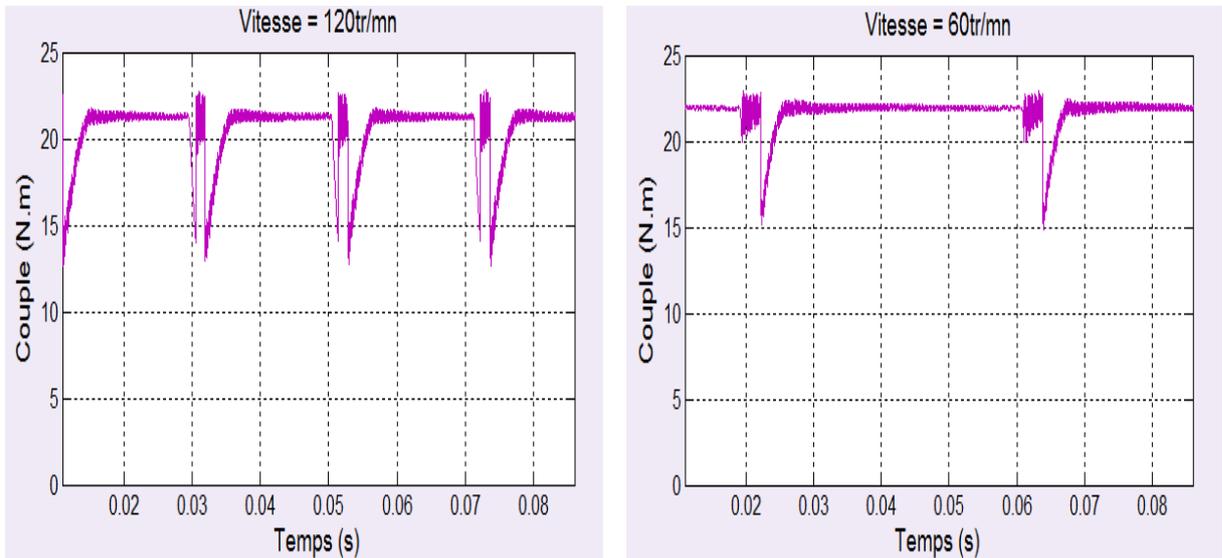


Fig. III. 4 : Couple total, $\Omega=120\text{tr/mn}$, 60tr/mn

Le couple moyen et le taux d'ondulation pour différentes valeurs de vitesse, sont donnés par le tableau III. 1.

| Vitesse (tr/mn) | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| C_{moy} [N.m] | <u>21.61</u> | <u>21.36</u> | <u>21.02</u> | <u>20.6</u> | <u>20.15</u> |
| Taux d'ond(%) | <u>60.89</u> | <u>39.15</u> | 40.56 | <u>47.52</u> | <u>52.1</u> |

Tableau III. 1 : Influence des faibles vitesses sur le couple.

On remarque que le couple moyen reste presque constant avec l'augmentation de la vitesse, ce qui est conforme au fonctionnement de la SRM à faibles vitesses. Par ailleurs, l'ondulation du couple varie avec la vitesse, et elle est minimale autour de 60tr/mn

2.2 Influence des grandes vitesses de rotation

Pour l'angle d'extinction optimal déterminé, les valeurs du couple moyen pour différentes vitesses supérieure à la vitesse de base sont présentées sur le tableau III. 2.

| Vitesse (tr/mn) | 150 | 200 | 300 | 450 | 500 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| C_{moy} [N.m] | <u>134.2</u> | <u>78.22</u> | <u>36.03</u> | <u>16.35</u> | <u>13.33</u> |

Tableau III. 2: Influence des grandes vitesses sur le couple

Le couple moyen diminue avec l'augmentation de la vitesse ce qui est conforme à la caractéristique couple-vitesse de la SRM (voir chapitre 2).

3. Commande en vitesse

3.1 Présentation du système de commande

La régulation de la vitesse conduit à la régulation du couple qui nécessite la régulation du courant. Le système de commande en utilisant un régulateur PI est représenté par le schéma de la figure III. 5.

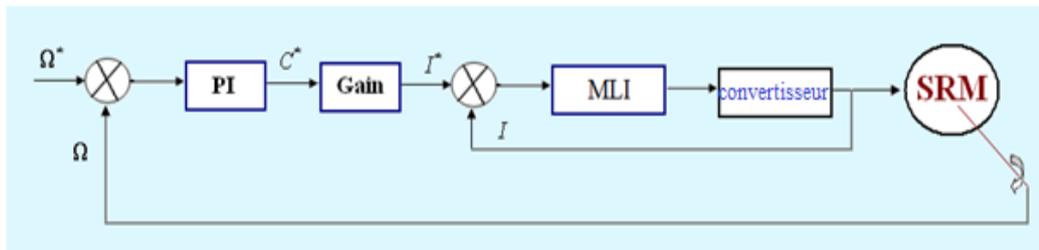


Fig. III. 5 : Diagramme en blocs de la commande en vitesse.

3.2 Détermination des coefficients du régulateur (PI)

L'action proportionnelle et intégrale d'un PI, sont mises en parallèle. Un PI est structuré comme suit:

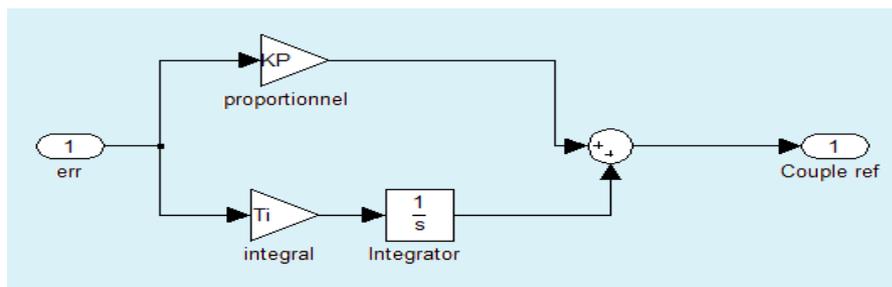


Fig. III. 6 : Structure d'un PI réalisée sous Simulink.

Sa fonction de transfert est donnée par la formule suivante:

$$H(p) = K_p + \frac{T_i}{s} = \frac{C^*}{err}$$

En utilisant la méthode de Ziegler-Nichols, nous déterminons les deux paramètres du régulateur [24].

3.3 Simulation du fonctionnement de la structure de commande

3.3.1 Régulation de la vitesse pour l'alimentation en tension

Le calcul et l'ajustement des coefficients du régulateur PI ont donné les valeurs suivantes : $K_p=5$ et $T_i=35$. En introduisant ce régulateur dans le système de commande, une simulation pour un échelon de vitesses de référence supérieure à la vitesse de base, est réalisée. Le résultat est donné par la figure III. 7.

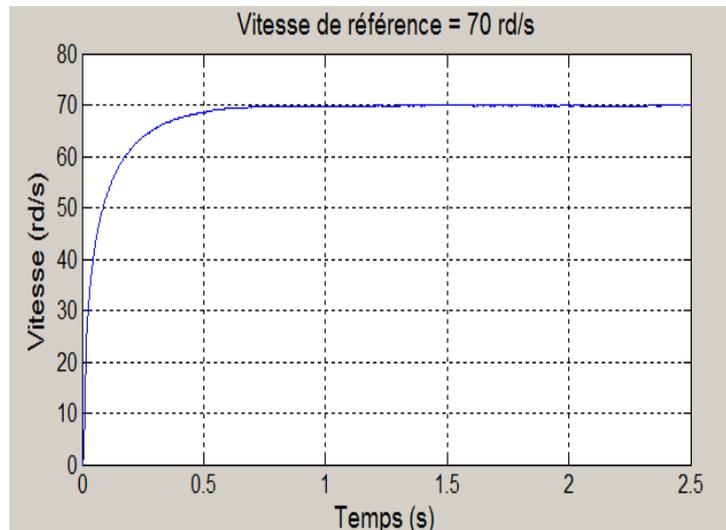


Fig. III.7 : Réponse en vitesse, $\Omega=70\text{rd/s}$

Les paramètres du régulateur obtenus après ajustement conduisent à une réponse de vitesse sans dépassement.

3.3.2 Régulation de la vitesse pour l'alimentation en courant

Le calcul et l'ajustement des coefficients du régulateur PI ont conduit aux valeurs suivantes : $K_p=0.5$ et $T_i=0.95$.

La simulation du fonctionnement du système, pour un échelon de vitesses de référence inférieure à la vitesse de base, est effectuée. Le résultat est donné par la figure III. 8.

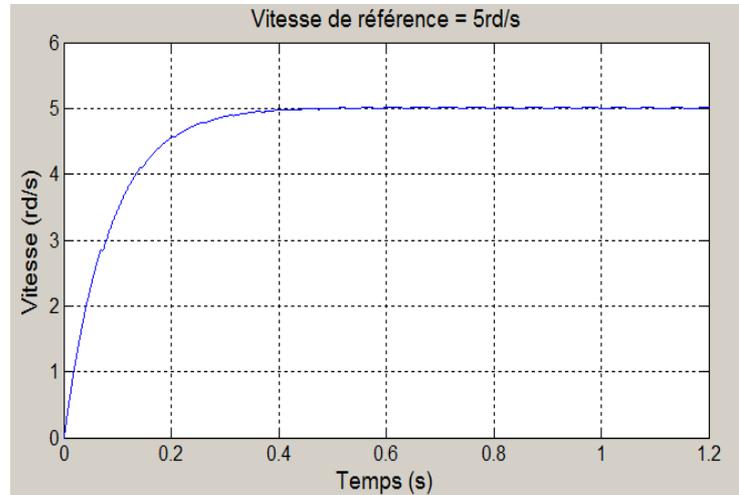


Fig. III. 8 : Réponse en vitesse, $\Omega_{ref} = 5\text{rd/s}$.

Le résultat montre que la vitesse de la machine suit la référence, et le temps de réponse est très réduit que sans régulateur

3.4 Application d'une perturbation au système en régime permanent

Afin de tester la robustesse du régulateur utilisé, on procèdera à une augmentation brusque (échelon) du couple résistant lorsque le régime permanent est établi. Et cela à faible et à grande vitesse de fonctionnement.

3.4.1 A faible vitesse

La simulation de la réponse du système avec régulateur, pour une application d'un échelon de couple à $t = 0.8\text{s}$ a conduit aux résultats donnés par la figure III.9.

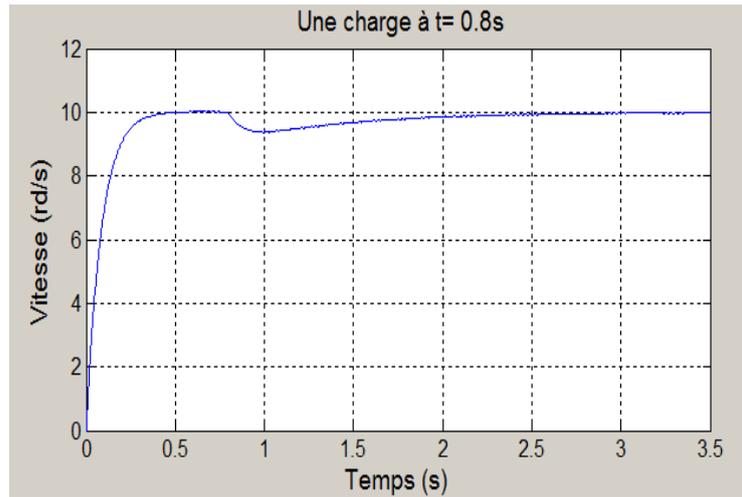


Fig. III. 9 : Réponse en vitesse, $\Omega_{ref} = 10\text{rd/s}$

Nous constatons que le régulateur a bien répondu à la perturbation.

3.4.2 A grande vitesse

Les graphes de la figure III.10, représentent la réponse dynamique à une référence de vitesse 78rd/s suivie d'une application d'un couple résistant.

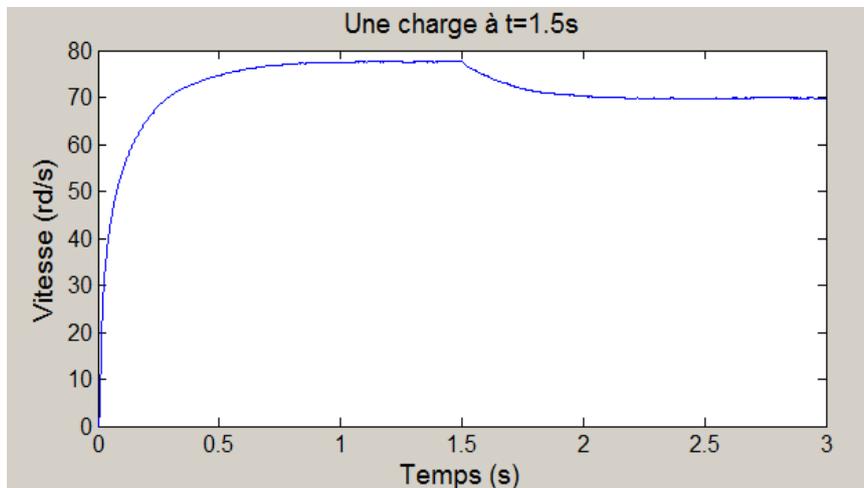


Fig. III. 10 : réponse en vitesse avec régulateur PI

On remarque la diminution de la vitesse à l'issue de l'application du couple résistant. Celle-ci se rétablit au régime permanent très lentement. Ainsi on conclut que le régulateur PI ne rejette pas très rapidement la perturbation à grande vitesse qui s'effectue avec un temps de réponse dépendant fortement des paramètres de la machine. Le régulateur PI n'est pas

robuste. On propose donc la régulation de la vitesse avec un autre type de régulateur, qui est le régulateur IP.

La différence entre les deux régulateurs se situe dans la disposition des actions proportionnelle et intégrale, qui sont en parallèle pour un régulateur PI et en série pour un régulateur IP [22]. La structure d'un IP est donnée par la figure III.11.

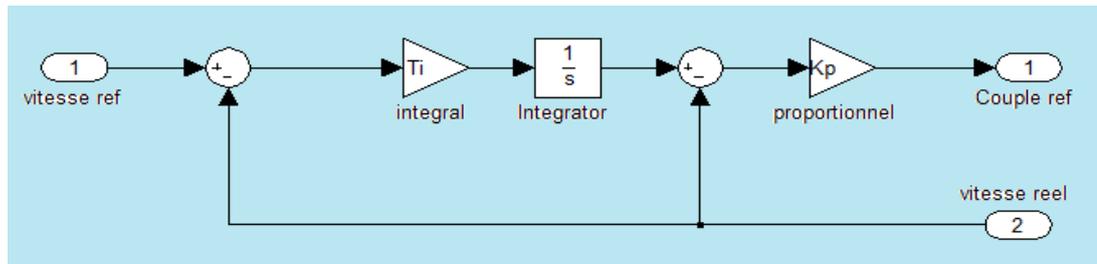


Fig.III. 11 : Structure d'un IP réalisée sous Simulink

Les coefficients du régulateur PI obtenus précédemment sont maintenus dans ce cas, et les résultats de simulation de la réponse en vitesse avec application d'un échelon de couple a conduit aux résultats présentés par la figure III.12.

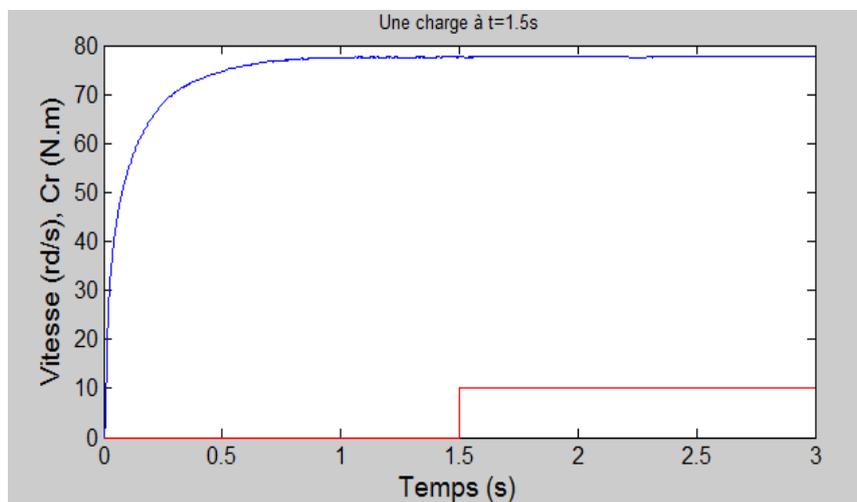


Fig. III. 12 : réponse en vitesse avec régulateur IP

On remarque une nette amélioration au niveau de la compensation de la perturbation, celle-ci s'effectue rapidement avec une légère diminution et un rapide rétablissement de la vitesse. Les résultats obtenus mettent bien en évidence l'apport des régulateurs IP dans le domaine de la régulation.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence de l'angle d'extinction sur le couple de la machine à faible et à grande vitesse de fonctionnement. Nous avons retenu qu'ils présentent un effet important sur le couple moyen produit et le taux d'ondulation essentiellement à faible vitesse. Cette étude nous a permis de trouver l'angle d'extinction optimal pour la minimisation du taux d'ondulation à faibles vitesses, et un angle d'extinction optimal pour la puissance maximale pour les grandes vitesses.

La commande en vitesse de la SRM a été réalisée en premier lieu avec un régulateur PI qui s'est avéré intéressant. Cependant, le régulateur n'a pas répondu aux tests de robustesse. Ce qui nous a conduits à proposer un autre régulateur (IP) qui a paré a ce problème. Les différents résultats de simulation sont conformes aux résultats obtenus [13, 20,21].

Chapitre 4

*Estimation de la position et
commande sans capteur*

Introduction

La présence d'un capteur de position augmente l'encombrement et le cout du système d'entraînement et réduit la fiabilité. Ceci, élimine certains avantages que présente particulièrement la SRM. Le remplacement de ce capteur par un estimateur peut s'avéré intéressant pour maintenir ces avantages.

Dans ce chapitre, la méthode de l'estimateur de flux est adaptée pour l'estimation de la position. Une commande en vitesse par régulateur PI intégrant cet estimateur, est réalisée [23].

1. Méthode d'estimation de la position

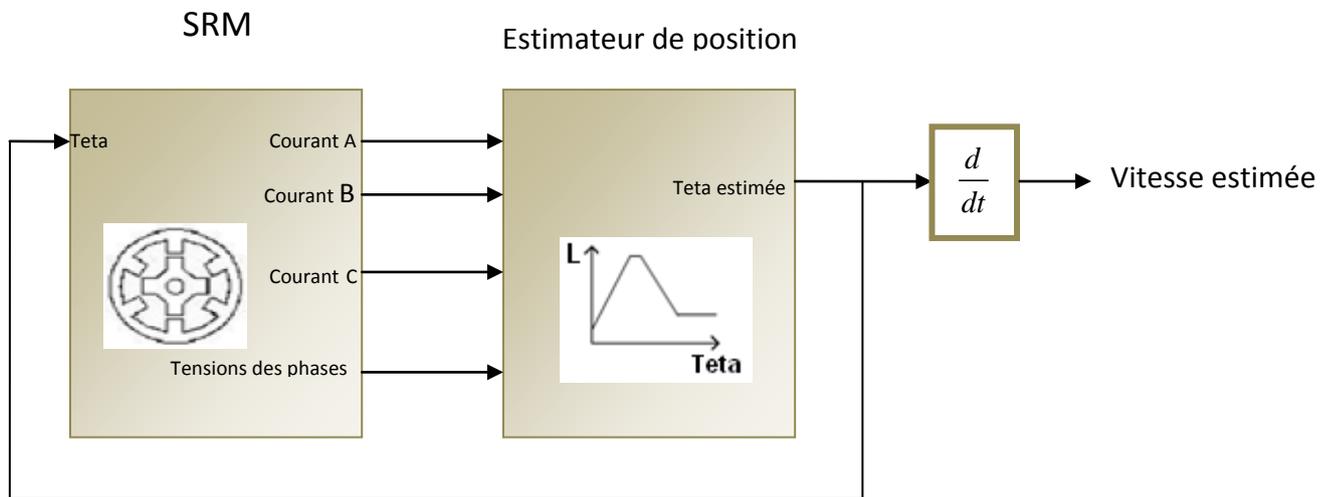


Fig. IV.1 : Schéma de la méthode d'estimation de la position

Le flux est estimé à partir de la relation suivante

$$\psi_{estimé} = \int (V - Ri)dt \dots\dots\dots (IV. 1)$$

On peut obtenir l'inductance estimée à partir de la relation suivante :

$$L_{estimée}(\theta) = \frac{\psi_{estimé}}{i} \dots\dots\dots (IV. 2)$$

En utilisant la caractéristique d'inductance $L(\theta)$, on peut alors estimer la position.

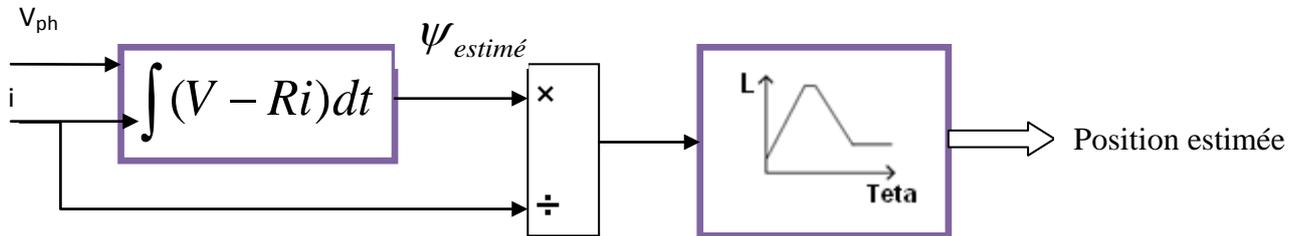


Fig. IV.2 : Méthode d'estimation de la position

2. Simulation

La simulation du fonctionnement de la machine en régime permanent, en remplaçant le capteur de position par l'estimateur, est effectuée.

2.1 Résultats de simulation

Pour une vitesse constante ($\Omega = 90$ tr/mn), la position estimée est donnée par la figure IV.3.

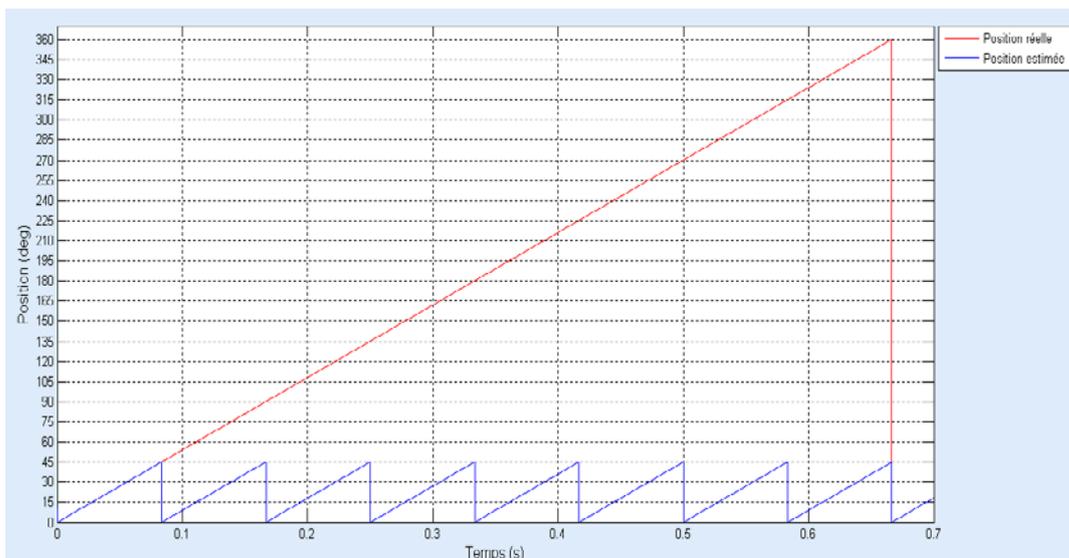


Fig. VI.3 : Position estimée

- La position réelle du rotor est d'une période de 360° mécanique.

- La position estimée est d'une période de 45° électrique ce qui correspond a l'alimentation des 3phases, ceci est en accord avec la position réelle dans notre cas (SRM 12/8)

En régime dynamique, en introduisant dans le modèle simulink les blocs traduisant l'équation dynamique de la machine, la position estimée est donné par la figure IV. 4.

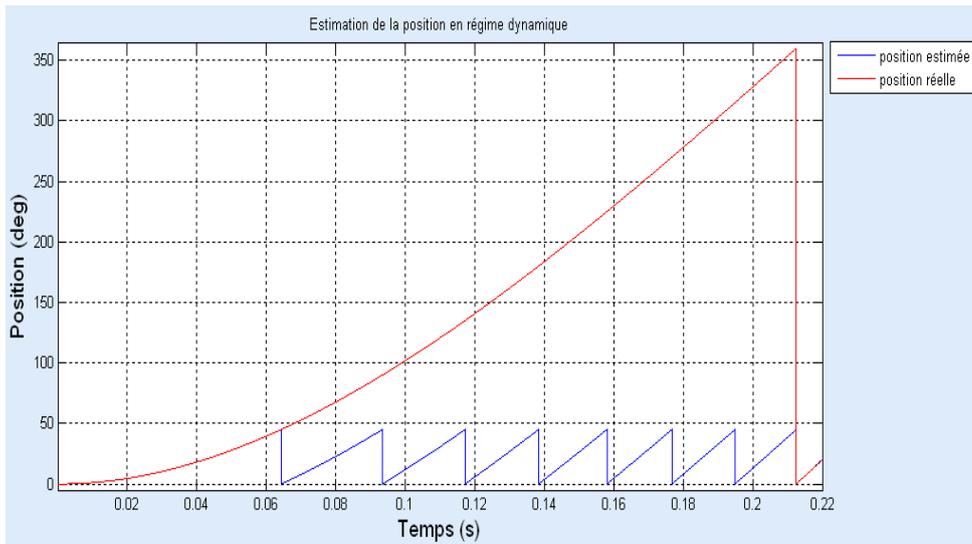


Fig. IV. 4 : La position estimée et réelle en régime dynamique

On constate que la variation de la position est lente à faible vitesse et rapide à grande vitesse.

En dérivant la position estimée obtenue, on obtient la vitesse présentée dans la figure IV.5.

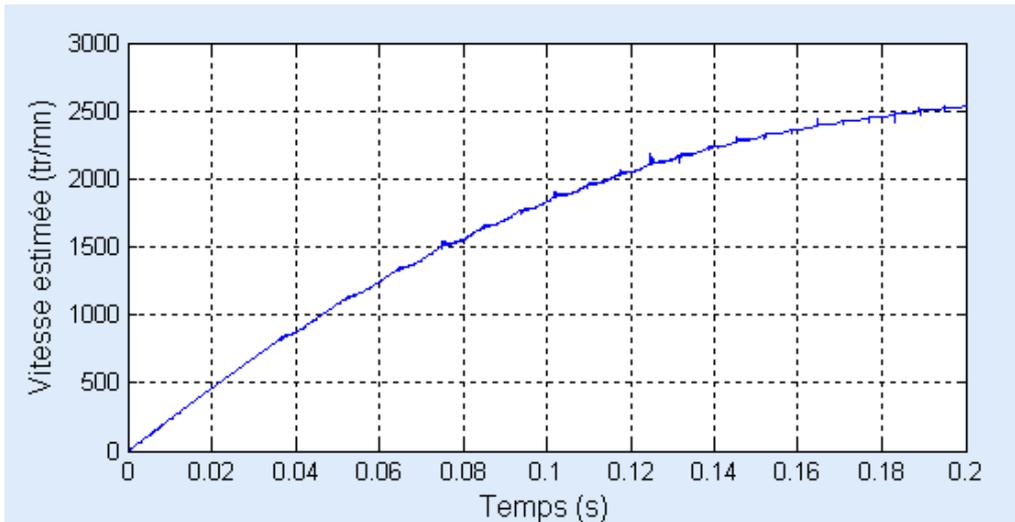


Fig. IV. 5 : Vitesse estimée

3. Commande sans capteur avec régulation de vitesse

Après l'estimation de la position, la commande avec régulateur de type proportionnel et intégral PI de la vitesse estimé obtenue précédemment est effectuée.

La méthode de commande est illustrée par le schéma de la figure. IV. 6.

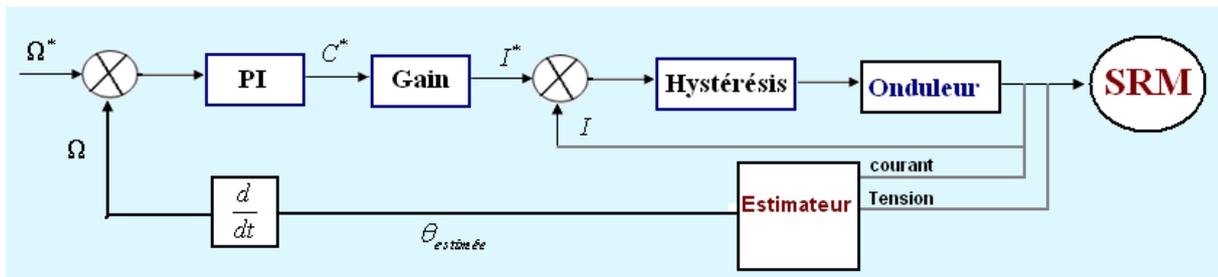


Fig. IV. 6 : Schéma bloc de la commande en vitesse sans capteur

Résultat de simulation

Pour une vitesse référence de 2500tr/mn, la réponse de la vitesse est donnée par la figure VI.7.

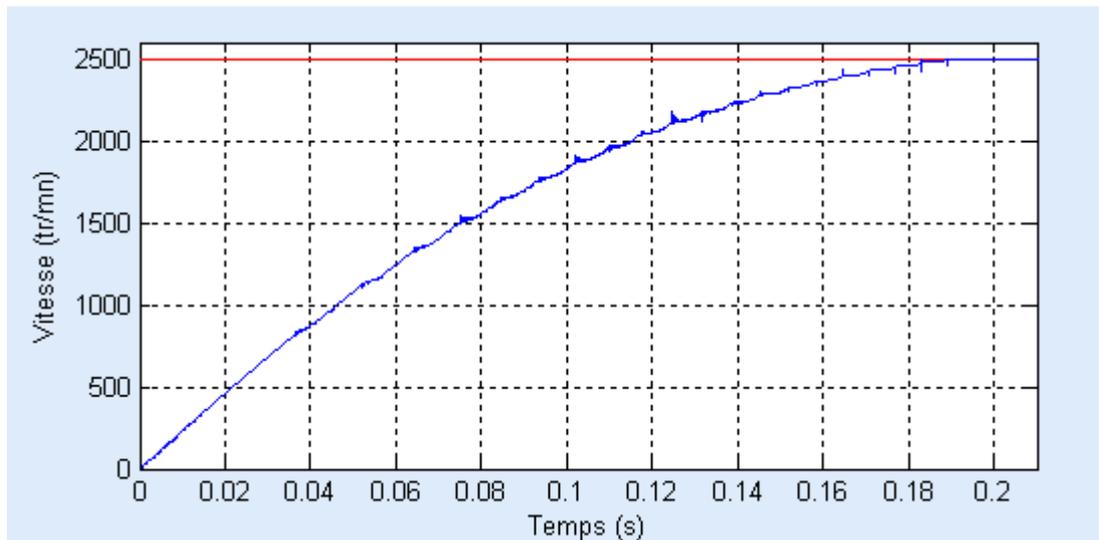


Fig. IV.7 : courbe de vitesse pour $\Omega_{ref} = 2500$ tr/mn

On remarque que la vitesse estimée suit la consigne.

Conclusion

La technique « d'estimation de flux » pour l'estimation de la position a été adaptée à notre modèle et a conduit à des résultats satisfaisants. Cet estimateur a été introduit dans la commande en vitesse de la SRM en éliminant le capteur de position. La commande en vitesse avec régulateur PI a été adoptée.

Conclusion générale et perspectives

Durant ce siècle, les performances des machines à réluctance variable (MRV) se sont considérablement améliorées et ont suscité l'attention des applications d'industrie grâce aux progrès des matériaux et à une meilleure optimisation permise par l'accroissement des moyens de calcul, de l'électronique de puissance et de commande qui a permis d'élargir leurs domaines d'application en moteur et en générateur.

Ce type de machine surtout apprécié pour sa simplicité et sa robustesse ainsi que son faible coût dans la production et les besoins d'entretien réduits pour des performances très intéressantes, aussi bien en fonctionnement moteur qu'en générateur.

Ce travail avait pour objectif la commande en vitesse d'une SRM en remplaçant le capteur de position par un estimateur conçu à partir de l'estimateur de flux.

Au terme de ce travail nous pouvons conclure :

La SRM présente une structure simple et de par son principe de fonctionnement, son alimentation nécessite un convertisseur unipolaire plus économique que les convertisseurs utilisés dans les machines classiques. La présence d'un capteur de position réduit l'avantage de la simplicité de la SRM et de sa fiabilité, une commande sans capteur est souvent considérée en le remplaçant par un estimateur.

Le modèle Simulink proposé nous a permis de déterminer les caractéristiques de la machine et d'étudier ses performances en fonction des paramètres de commande

La commande en vitesse de la SRM a été réalisée en premier lieu avec un régulateur PI qui s'est avéré intéressant. Cependant, le régulateur n'a pas répondu aux tests de robustesse. Ce qui nous a conduits à proposer un autre régulateur (IP) qui a paré a ce problème.

La technique « d'estimation de flux » pour l'estimation de la position a été adaptée à notre modèle et a conduit à des résultats satisfaisants. Cet estimateur a été introduit dans la commande en vitesse de la SRM en éliminant le capteur de position. La commande en vitesse avec régulateur PI a été adoptée.

Nous nous somme basé dans notre étude sur le modèle linéaire de la SRM pour l'estimation de la position, nous pouvons prévoir une analyse des performances, et une estimation de la position en

considérant le modèle non-linéaire basé sur les caractéristiques magnétiques de la machine déterminées par éléments finis ou expérimentalement.

En régime saturé, des commandes non linéaires seront plus efficaces telle que la commande en mode glissant ou la commande par la logique floue.

- [1] **B. MULTON, F. CAMUS, E. HOANG, J. LE CHENADEC, C MOUCHOUX**
« Possibilités du moteur à réluctance variable à double saillance pour la motorisation de véhicules électriques. Bilan des essais d'un prototype de 27 kW » ; École Normale Supérieure de Cachan, C-VELEC'95, Grenoble 1-2 février 1995.
- [2] **B. MULTON** « Conception et Alimentation Electronique des Machines à Réluctance Variable à Double Saillance » ; Laboratoire d'Electricité Signaux et Robotique (LÉSiR) URA CNRS D1375, ENS de Cachan, 1994.
- [3] **S. MOUELLEF** « Contribution A L'étude D'une Machine A Reluctance Variable : Conception, Modélisation & Simulation D'une MRVDS 6-4 » ; Mémoire de magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 03/06/ 2008.
- [4] **R.VISINKA** , « 3-Phase Switched Reluctance (SR) Sensorless Motor Control Using a 56F80x, 56F8100 or 56F8300 Device Design of a Motor Control Application »; Février 2005.
- [5] **H. GAO, F. R. SALMASI, M. EHSANI** « Inductance Model-Based Sensorless Control of the Switched Reluctance Motor Drive at Low Speed »; *IEEE*, VOL. 19, November 2004, PP. 1568-1572.
- [6] **Y. LAOUBI, Z. GOUICHICHE** « Commande d'une génératrice à réluctance variable utilisée dans une application pour une éolienne autonome »; projet de fin d'étude, ENP, juin 2010.
- [7] **H. SERHOUD** « Contribution à l'Etude de la Machine Synchrone à Reluctance Variable » ; Mémoire de Magister, 2007.
- [8] **C.MOUCHOUX** « Etude et réalisation de l'alimentation électronique d'un moteur à réluctance variable pour véhicule électrique – expérimentation du moteur » ; projet de fin d'étude, 1994.
- [9] **H. SAHRAOUI** « Contribution à la Modélisation et à l'Optimisation d'un Système de Commande d'un Moteur à Reluctance Variable à Double Denture (SRM) », Thèse de Doctorat, 2007
- [10] **B. MULTON** « principe et éléments de dimensionnement des machines a réluctance variable à double saillance autopilotées » ; Laboratoire d'Electricité Signaux et Robotique (LÉSiR) URA CNRS D1375, ENS de Cachan, Mars 1993.

- [11] **S. DJEBARRI, O. DAHMANI** « *Analyse des Performances et Commande d'une SRM utilisée en Altern-Démarreur Pour Véhicules* » ; Projet de Fin d'Etude, ENP, 2009
- [12] **G. SEGUIER, F. NOTELET** « *Electrotechnique Industrielle* », 3^{ème} édition
- [13] **R. REDJEM** « *Modélisation et Optimisation d'une Structure de Machine à Réductance Variable Dédiee aux Energies Renouvelables* » ; Thèse de Doctorat, 2010.
- [14] **Y. NESSAB, M. TAKARLI** « *Modélisation et commande par mode glissement d'une MRV utilisée en alterno-démarreur pour véhicule* » ; Projet de fin d'étude, Juin 2011.
- [15] **B. TOUNSI** « *Etude comparative de Groupe Electrogènes Embarqués à Large Gamme de vitesse Variable associant machine à aimant permanents et conversion statique* » ; Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [16] **M. BENSOAM** « *Capteurs et Actionneurs* » ; Cours Master SIS.1 ; Université Paul Cézanne Aix-Marseille, Génie Electrique, 2005.
- [17] **D. STREMPLEWSKI, F.MORTIER** « *Les capteurs magnétiques GMR rivalisent avec l'effet Hall* » ; DECEMBRE 2002.
- [18] **J. HATTAB** « *Les capteur de mesure de courant* » ; cours Lycée Technique E. Branly,
- [19] **J. VICENTE** « *Les microcontrôleurs* » ; Département ME-Otion SIIC 2ème année, Ecole Polytechnique de Marseille, 2005-2006.
- [20] **J.FAIZ, K. MOAYED-ZADEH**, «*Design of switched reluctance machine for starter/generator of hybrid electric vehicle*», Electric Power Systems, Science Direct, June 2005, pp.153-160.
- [21] **S.DJEBARRI, O.DAHMANI**, « *Analyse des Performances et Commande d'une SRM utilisée en Altern-Démarreur Pour Véhicules.* », Projet de Fin d'Etude, ENP, Juin 2009.
- [22] **N.MADANI, MO. MAHMOUDI, MF.BENKHORIS, S. SIALA**, « *Comparaison Des Régulateurs PI et IP pour La Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone* », Proceedings of the IEEA, International Conference, décembre 1997.

[23] **E. MESE, DA. TORREY** «*An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks*»; Department of Electric Power Engineering Rensselaer Polytechnic Institute, 2001.

Résumé

Ce mémoire a pour objet l'étude et la modélisation d'un moteur à reluctance variable (SRM 12/8) ainsi qu'une optimisation des performances en vue de minimiser les ondulations du couple basé sur une analyse des résultats de simulation réalisée sous Matlab/Simulink. Une commande en vitesse est réalisée et présentée.

Une méthode d'estimation de la position a été ensuite proposée dans le but de substituer le capteur de position dans la commande des SRM.

Mot clé : SRM, capteur de position, modélisation, simulation, Matlab/Simulink, estimateur, régulateur.

Abstract

This work has as an aim the study and the modeling of switched reluctance motor (SRM 12/8) as well as an optimization of the performances in order to minimize the undulations of the torque based on an analysis of the results of simulation carried out under Matlab/Simulink. A speed control is carried out and presented.

A method of estimate of the position was then proposed with an aim of substituting the position encoder in the order of the SRM.

Keywords : SRM, position encoder, modélisation, simulation, Matlab/Simulink, estimation, regulator.

المخلص

هذا العمل له كهدفه ادراسه و النمذجه لمحرك reluctance متغير (SRM 12/8) و تحسين الاداء من اجل تقليل التذبذبات في العزم بناء على تحليل نتائج المحاكه التي جرت تحت Matlab/Simulink. تم تنفيذ تحكم بالسرعه و تقديمه.

