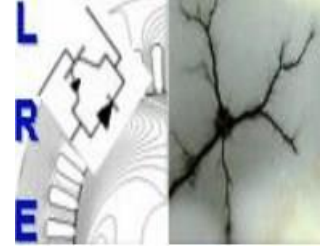


REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Électrotechnique

Implémentation de la commande sans capteur de position d'une SRM 12/8

REMITA Rami

SALHI Amine

Sous la direction de

Dr. H. SAHRAOUI

Pr. MO.MAHMOUDI

Soutenu publiquement le 19/06/2018

Composition du Jury

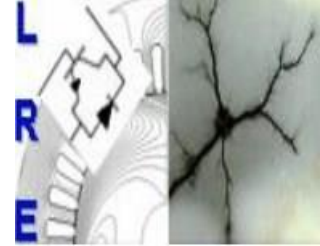
Président	Mr. K. BOUGHRARA	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteurs	Mme. H. SAHRAOUI, Mr. MO. MAHMOUDI	Docteur Professeur	Ecole Nationale Polytechnique Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	Mme. S. CHOUREF	Doctorante	Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Électrotechnique

Implémentation de la commande sans capteur de position d'une SRM 12/8

REMITA Rami

SALHI Amine

Sous la direction de

Dr. H. SAHRAOUI

Pr. MO.MAHMOUDI

Soutenu publiquement le 19/06/2018

Composition du Jury

Président	Mr. K. BOUGHRARA	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteurs	Mme. H. SAHRAOUI, Mr. MO. MAHMOUDI	Docteur Professeur	Ecole Nationale Polytechnique Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	Mme. S. CHOUREF	Doctorante	Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2018

ملخص: يتمثل هذا العمل في نمذجة نظام تحكم محرك ذو مقاومة مغناطيسية متغيرة ثلاثي التغذية الكهربائية SRM 12/8 باستخدام نموذج التدفق وتنفيذ التحكم في المتحكم microcontrôleur. في البداية تم تحديد الخصائص الكهربائية و الكهرومغناطيسية والميكانيكية للمحرك من اجل تطوير نموذج يعتمد على مستشعر الوضعية تحت بيئة ماتلاب/سيمولنك Simulink & Matlab. علاوة على ذلك تم انجاز مقدر الوضعية من خلال طريقة تقدير التدفق. بعد ذلك عرضت نتائج المحاكاة في الوضعين الديناميكي والثابت في حالات السرعة المنخفضة والعالية. تم تنفيذ تحكم المحرك مع مستشعر الوضعية بواسطة المتحكم وأدت الاختبارات إلى التحقق من صحة ونجاعة النماذج المقترحة. في الاخير تم إنشاء بطاقة كسب وضبط الكمون الكهربائي للمحرك من أجل التمكن من تنفيذ التحكم باستعمال مقدر الوضعية مكان المستشعر.

كلمات مفتاحية: نمذجة، محرك ذو مقاومة مغناطيسية متغيرة، تنفيذ، المتحكم، تحديد الخصائص، مستشعر الوضعية، ماتلاب/سيمولنك، مقدر الوضعية.

Abstract: The aim of this work is the modeling of the control system of a three-phase SRM 12/8 using the flux model and the implementation of its control using a microcontroller. An identification of the machine's parameters was carried out in order to develop a model with a position sensor under the Matlab&Simulink environment. A position estimator based on the flux estimation method was performed. Dynamic and steady-state simulations at low and high speeds were presented. The control of the SRM with a position sensor has been implemented using a microcontroller and the tests on the machine led to the validation of the proposed models. A voltage acquisition and adaptation card has been realized for the purpose of the implementation of the sensorless control.

Key words: Modeling, SRM, implementation, microcontroller, identification, position sensor, Matlab&Simulink, sensorless.

Résumé : Ce travail consiste en la modélisation du système de commande d'une SRM 12/8 triphasée en utilisant le modèle du flux et à l'implémentation de sa commande par microcontrôleur. Une identification des paramètres de la machine a été effectuée afin d'élaborer un modèle avec capteur de position sous l'environnement Matlab&Simulink. Un estimateur de position basé sur la méthode d'estimation du flux a été réalisé. Des simulations en régimes dynamique et permanent, en faibles et grandes vitesses ont été présentées. La commande de la SRM avec capteur a été implémentée par microcontrôleur et des essais ont conduit à la validation des modèles proposés. Une carte d'acquisition et de mise en forme des tensions a été réalisée à des fins d'implémentation de la commande sans capteur.

Mots clés: Modélisation, SRM, implémentation, microcontrôleur, identification, capteur de position, Matlab&Simulink, estimateur de position.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

*À mes très chers parents qu'aucune ne dédicace ne
saurait exprimer mon respect, mon amour et ma
considération pour les sacrifices consentis pour mon
instruction et mon bien être.*

Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

*Un grand merci à mon frère Ramzi et ma sœur Lina, qui
répondaient toujours présent pour moi.*

*Un énorme merci à mes amies, Bachir, Sid-Ali, Mehmet,
Rahim, Zinou, Hatem, Oussama, Amir, Seifou et tant
d'autres, toujours là quand il le fallait.*

*Un énorme merci aussi à ma meilleure et fidèle amie
Magui pour tous les moments où elle été là pour moi.*

*A mes grands-parents, et tout particulièrement à mon
grand-père Hafid et grand-mère Fatima paix à leurs
âmes.*

R.REMITA

*Je dédie ce travail à mes très chers parents qui
ont toujours été présents pour moi, leur
soutien m'est indispensable.*

*Je dédie aussi ce travail à mon frère Khalil qui
passe son BAC cette année, en lui souhaitant
toute la réussite.*

*Une pensée à mes amis d'enfance et mes amis
de classe depuis le primaire jusqu'à
aujourd'hui.*

Amine SALHI

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement Madame **H.SAHRAOUI**, docteur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir encadré et dirigé ce travail, pour ses conseils et sa disponibilité. Nous tenons également à remercier Monsieur **MO.MAHMOUDI**, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour son suivi et son orientation.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur **H.ZEROUG**, professeur à l'USTHB pour nous avoir permis d'effectuer notre étude expérimentale et de nous avoir dirigé et éclairé.

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur **K.BOUGHRARA**, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour l'honneur qu'il nous fait de présider le Jury de soutenance ainsi qu'à Mademoiselle **S.CHOUIREF**, Doctorante à l'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nous remercions du profond du cœur, l'Ecole Nationale Polytechnique et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Introduction Générale.....	13
1. Présentation et identification de la SRM 12/8.....	15
1.1. Introduction	15
1.2. Présentation de la SRM et du banc d'essais	15
1.2.1. Structure de la SRM 12/8	15
1.2.2. Principe de fonctionnement de la SRM.....	16
1.2.3. Composants du banc d'essais	17
1.3. Programmation du microcontrôleur.....	22
1.3.1. Environnement de programmation.....	23
1.3.2. Programme d'intégration du signal du capteur de position.....	24
1.3.3. Programme d'acquisition des courants	26
1.4. Identification de la SRM 12/8	28
1.4.1. Identification des paramètres électriques (Résistance)	28
1.4.2. Estimation du flux et détermination de la caractéristique électromagnétique....	28
1.4.3. Estimation du couple électromagnétique	31
1.4.4. Identification des paramètres mécaniques.....	32
1.5. Conclusion	35
2. Modélisation et simulation de la commande de la SRM avec capteur de position	36
2.1. Introduction	36
2.2. Modèle du flux.....	36
2.3. Modèle dynamique	39
2.4. Modélisation sous Matlab&Simulink	39
2.5. Simulation de la SRM en régime permanent	43
2.6. Simulation de la SRM en Régime dynamique.....	46
2.7. Conclusion	51
3. Modélisation et simulation de la commande de la SRM sans capteur de position	52
3.1. Introduction	52
3.2. Principe de l'estimateur à base de flux	52
3.3. Simulation en régime permanent	53

3.4.	Simulation en régime dynamique	57
3.5.	Conclusion	61
4.	Implémentation de la commande de la SRM	62
4.1.	Introduction	62
4.2.	Implémentation de la commande avec capteur de la SRM.....	62
4.3.	Implémentation de la commande sans capteur de la SRM	70
4.3.1.	Conception d'une carte d'acquisition de tension et de mise en forme.....	70
4.3.2.	Calcul du flux :	75
4.4.	Conclusion	79
	Conclusion Générale	80
	Bibliographie	81
	Annexe A	83
	Annexe B	84
	Annexe C	85

Liste des figures

Figure 1.1 : SRM 12/8 triphasée	16
Figure 1.2 : Structure de la SRM 12/8	16
Figure 1.3 : Banc d'essais du système de commande de la SRM 12/8.....	17
Figure 1.4 : Schéma synoptique du banc d'essais.....	18
Figure 1.5 : Convertisseur de puissance à demi-pont asymétrique	18
Figure 1.6 : Structure du convertisseur à demi-pont asymétrique.....	19
Figure 1.7 : Modes d'opération du convertisseur	19
Figure 1.8 : Formes de tensions et de courants pour les trois modes d'opération.....	19
Figure 1.9 : Encodeur de pulsation quadratique.....	20
Figure 1.10 : Schéma d'adaptation des tensions	21
Figure 1.11 : Architecture des microcontrôleurs de la famille TMSF320F2833x	22
Figure 1.12 : Microcontrôleur TMS320F28335.....	22
Figure 1.13 : Organigramme de génération des signaux de commande avec capteur de position	25
Figure 1.14 : Organigramme du calcul de la vitesse	25
Figure 1.15 : Organigramme d'acquisition des courants	26
Figure 1.16 : La fonction alimentation "Alim ph1" pour la phase 1	27
Figure 1.17 : Tension et courant expérimentaux de la phase 1	29
Figure 1.18 : Flux estimé.....	29
Figure 1.19 : Caractéristique de flux de la SRM 12/8.....	30
Figure 1.20 : Inductance estimée.....	30
Figure 1.21 : Caractéristique d'inductance de la SRM 12/8.....	31
Figure 1.22 : Caractéristique du couple électromagnétique estimée.....	32
Figure 1.23 : SRM 12/8 couplé à une GCC et Génératrice Tachymétrique.....	32
Figure 1.24 : Filtrage du couple électromagnétique.....	33
Figure 1.25 : Filtrage de la vitesse	33
Figure 1.26 : System Identification tool.....	34
Figure 1.27: Résultat du modèle estimé	34
Figure 2.1 : Caractéristique de flux identifiée.....	38
Figure 2.2 : Caractéristique de flux après interpolation	38
Figure 2.3 : Caractéristique du couple électromagnétique après interpolation	39
Figure 2.4 : Modèle d'une phase de la SRM	40
Figure 2.5 : Modèle de la SRM	40
Figure 2.6 : Modèle du capteur de position.....	41
Figure 2.7 : Circuit de commande et de puissance.....	41
Figure 2.8 : Régulateur de courant par hystérésis	41
Figure 2.9 : Modèle de l'équation dynamique de la SRM	42
Figure 2.10 : Modèle global de la SRM en régime permanent avec capteur de position.....	42
Figure 2.11 : Modèle global de la SRM en régime dynamique avec capteur de position.....	43

Figure 2.12 : Tension d'alimentation des 3 phases, $\Omega=710$ tr/min.....	43
Figure 2.13 : Courants des 3 phases, $\Omega=710$ tr/min.....	44
Figure 2.14 : Couples des 3 phases, $\Omega=710$ tr/min.....	44
Figure 2.15 : Couple électromagnétique total, $\Omega=710$ tr/min.....	44
Figure 2.16 : Tensions d'alimentation des 3 phases, $I_{ref} = 0.95A$, $\Omega= 230$ tr/min.....	45
Figure 2.17 : Courants des 3 phases, $I_{ref} = 0.95A$, $\Omega= 230$ tr/min.....	45
Figure 2.18 : Couples des 3 phases, $I_{ref} = 0.95A$, $\Omega= 230$ tr/min.....	46
Figure 2.19 : Couple électromagnétique total, $I_{ref} = 0.95A$, $\Omega= 230$ tr/min.....	46
Figure 2.20 : Courants de démarrage des 3 phases.....	47
Figure 2.21 : Couples de démarrage des 3 phases.....	47
Figure 2.22 : Couple total de démarrage.....	47
Figure 2.23 : Vitesse de démarrage à vide.....	48
Figure 2.24 : Courants des 3 phases, $Cr = 0,36 N.m$	48
Figure 2.25 : Couples des 3 phases, $Cr = 0,36 N.m$	49
Figure 2.26 : Couple électromagnétique total.....	49
Figure 2.27 : Vitesse en charge.....	49
Figure 2.28 : Courants du démarrage régulé, $I_{ref} = 0,95A$	50
Figure 2.29 : Couple électromagnétique total du démarrage régulé, $I_{ref} = 0,95A$	50
Figure 2.30 : Vitesse d'un démarrage à vide régulé en courant.....	50
Figure 3.1 : Modèle de l'estimateur.....	53
Figure 3.2 : Modèle Simulink du Système de commande de la SRM sans capteur de position en régime permanent.....	53
Figure 3.3 : Position estimée et avec capteur, alimentation pleine onde, $\Omega=710$ tr/min.....	54
Figure 3.4 : Tension d'alimentation pleine onde sans capteur, $\Omega=710$ tr/min.....	54
Figure 3.5 : Courants de phase sans capteur, régime permanent, $\Omega=710$ tr/min.....	54
Figure 3.6 : Couples des 3 phases sans capteur, régime permanent, $\Omega=710$ tr/min.....	55
Figure 3.7 : Couple électromagnétique total sans capteur, régime permanent, $\Omega=710$ tr/min.....	55
Figure 3.8 : Position avec et sans capteur, régime permanent, $I_{ref} = 1,75A$	56
Figure 3.9 : Tension d'alimentation en Hystérésis, sans capteur, $I_{ref} = 1,75A$, $\Omega = 220$ tr/min.....	56
Figure 3.10 : Couples des 3 phases, alimentation Hystérésis sans capteur, $I_{ref} = 1,75A$, $\Omega = 220$ tr/min.....	56
Figure 3.11 : Couple des 3 phases sans capteur, $I_{ref} = 1,75A$, $\Omega = 220$ tr/min.....	57
Figure 3.12 : Couple électromagnétique total, $I_{ref} = 1,75A$, $\Omega = 220$ tr/mn.....	57
Figure 3.13 : Modèle de la SRM sans capteur de position en régime dynamique.....	58
Figure 3.14 : Courant de démarrage à vide sans capteur, $\Omega = 710$ tr/min.....	58
Figure 3.15 : Couple total au démarrage sans capteur, $\Omega = 710$ tr/min.....	59
Figure 3.16 : Moment du basculement vers l'estimateur.....	59
Figure 3.17 : vitesse de démarrage à vide sans capteur, $\Omega = 710$ tr/min.....	59
Figure 3.18 : Courants lors de l'application d'une charge sans capteur, $Cr = 0,35 N.m$	60
Figure 3.19 : Courants lors de l'application d'une charge avec capteur, $Cr = 0,35 N.m$	60
Figure 3.20 : Couple lors de l'application de la charge sans capteur, $Cr = 0,35 N.m$	60
Figure 3.21 : Couple lors de l'application d'une charge avec capteur, $Cr = 0,35 N.m$	60

Figure 3.22 : Vitesse lors de l'application d'une charge sans capteur, $C_r = 0,35 \text{ N.m}$	61
Figure 4.1 : Tensions d'alimentation expérimentales des 3 phases, $\Omega = 710 \text{ tr/min}$	63
Figure 4.2 : Tension d'alimentation des 3 phases en simulation, $\Omega = 710 \text{ tr/min}$	63
Figure 4.3 : Courants des 3 phases, $\Omega = 710 \text{ tr/min}$	64
Figure 4.4 : Couples des 3 phases, $\Omega = 710 \text{ tr/min}$	64
Figure 4.5 : Couple électromagnétique total, $\Omega = 710 \text{ tr/min}$	64
Figure 4.6 : Vitesse de démarrage à vide	65
Figure 4.7 : Tensions d'alimentation expérimentales des 3 phases, $I_{\text{ref}} = 0,95\text{A}$, $\Omega = 230 \text{ tr/min}$	66
Figure 4.8 : Tensions des 3 phases en simulation, $I_{\text{ref}} = 0,95\text{A}$, $\Omega = 230 \text{ tr/min}$	66
Figure 4.9 : Courants des 3 phases, $I_{\text{ref}} = 0,95\text{A}$, $\Omega = 230 \text{ tr/min}$	66
Figure 4.10 : Couples des 3 phases	67
Figure 4.11 : Couple électromagnétique total	67
Figure 4.12 : Courant expérimentale de la phase 1, démarrage à vide suivi d'une application de charge	68
Figure 4.13 : Courant simulé de la phase 1, démarrage à vide suivi d'une application de charge	68
Figure 4.14 : Courant de la phase 1 lors de l'application du couple résistant.....	68
Figure 4.15 : Couple expérimental de démarrage suivi d'une application de charge.....	69
Figure 4.16 : Couple simulé de démarrage suivi d'une application de charge.....	69
Figure 4.17 : Couple électromagnétique total lors de l'application de la charge, $C_r = 0,24 \text{ N.m}$	69
Figure 4.18 : Vitesse de rotation, en charge, $C_r = 0,24 \text{ N.m}$	70
Figure 4.19 : Carte d'acquisition et de conditionnement de la tension d'une seule phase.....	71
Figure 4.20 : Carte d'acquisition et de conditionnement des trois phases	71
Figure 4.21 : Capteur de tension LEM LV 25-P	72
Figure 4.22 : Résultat du test 1 sur la carte d'acquisition des tensions	74
Figure 4.23: Résultat du test 2 sur la carte d'acquisition des tensions	75
Figure 4.24 : organigramme du calcul du flux	76
Figure 4.25: caractéristique de la fonction polynômiale estimée.....	77
Figure 4.26: caractéristique de flux et de la fonction polynômiale estimée.....	77
Figure 4.27: organigramme de l'estimation de la position	78

Liste des abréviations

SRM : Switched Reluctance Machine.

MOSFET : Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

DSP : Digital Signal Processor.

DSC : Digital Signal Controller.

E/S : Entrées / Sorties.

GPIO : General Purpose Input Output.

ADC : Analog Digital Converter.

eQEP : enhanced Quadrature Encoder Pulse.

CCS : Code Composer Studio.

TI : Texas Instrument.

CPU : Central Processing Unit.

PWM : Pulse Width Modulation.

R : Résistance d'une phase.

ψ_j : Flux de la phase j.

θ : Position

Ω : Vitesse de rotation.

J : Moment d'inertie.

f_r : Coefficient de frottement.

C : Couple électromagnétique de phase.

C_{em} : Couple électromagnétique total.

L : Inductance de la phase.

i_j : Courant de la phase.

GCC : Génératrice à Courant Continu.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.

θ_{ON} : Angle d'allumage de la phase.

θ_{OFF} : Angle d'extinction de la phase.

C_r : Couple résistant.

Δi : Bande de courant Hystérésis.

I_{ref} : Courant de référence.

e : Force contre électromotrice.

t : Temps.

W_c : Co-énergie.

L_{max} : Inductance maximale.

Introduction Générale

Le principe des SRM (Switched Reluctance Machine) existe depuis 1838 ; la machine a été inventée par Davidson et a été utilisée pour propulser une locomotive sur le chemin de fer Glasgow-Édimbourg [1]. Le plein potentiel du moteur ne pouvait pas être utilisé avec les interrupteurs mécaniques disponibles à cette époque. L'intérêt pour les SRM s'est ravivé avec l'avènement de l'électronique de puissance et ses interrupteurs à commutation rapide dans les années 1970 [2]. La SRM offre de nombreux avantages notamment sa simplicité de construction ; le rotor est constitué d'une simple pile de tôles magnétiques et ne comprend ni bobinage ni aimants permanent. C'est une machine robuste tolérante aux défauts, elle peut fonctionner dans un milieu à grande variations de température [3]. Son coût de fabrication est relativement faible en comparaison avec les machines classiques et elle nécessite moins d'entretien. Elle peut opérer dans une large gamme de vitesse et possède un couple relativement élevé.

Cependant, la SRM présente de fortes ondulations au niveau du couple en raison de sa double saillance et de la nature de son fonctionnement qui est à champ pulsé. Ce qui peut rendre sa commande plus complexe. Avec le développement des microcontrôleurs, leur flexibilité et leur rapidité de calcul, ainsi que les techniques de commande intelligentes, la commande de ces machines devient moins complexe et plus performante.

De plus le capteur de position qui était essentiel à l'accomplissement de la commande peut être remplacé par un estimateur, réduisant ainsi l'encombrement du capteur et les désagréments qu'il peut produire.

Notre travail consiste à la modélisation du système de commande d'une SRM 12/8 et à l'implémentation de sa commande par microcontrôleur. Une identification des paramètres électriques, électromagnétiques et mécaniques de la SRM est nécessaire afin d'élaborer des modèles Simulink utilisant le modèle du flux. En premier lieu, ce modèle est élaboré en considérant le capteur de position, puis en remplaçant celui-ci par un estimateur basé sur l'estimation du flux. Les modèles proposés seront validés par des essais expérimentaux effectués lors de l'implémentation de la commande sur microcontrôleur.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la SRM 12/8 ainsi que le banc d'essais qui lui est associé. Une identification des paramètres électriques, électromagnétiques et mécaniques est effectuée à travers des tests expérimentaux menés sur le banc d'essai. La résistance de phase, les caractéristiques de flux et d'inductance en fonction de la position et du

courant ainsi que les paramètres mécaniques (moment d'inertie J et coefficient de frottement f) sont ainsi déterminées.

Dans le deuxième chapitre, un modèle Simulink du système de commande de la SRM avec capteur de position est élaboré en considérant le modèle du flux et les caractéristiques électromagnétiques et mécaniques obtenus expérimentalement. Des simulations en régime permanent et dynamique, à faibles et grandes vitesses sont effectués afin d'analyser le comportement de la machine.

Dans le troisième chapitre, le capteur de position est remplacé par un estimateur basé sur la méthode d'estimation du flux. Des simulations tenant compte de cet estimateur sont effectuées dans les mêmes conditions que celles réalisés avec capteur afin d'évaluer la précision de l'estimateur.

Le chapitre quatre est consacré à l'implémentation de la commande de la SRM12/8 avec et sans capteur. Des programmes de commande en pleine onde et avec régulation de courant en tenant compte des signaux du capteur sont élaborés et implémentés sur microcontrôleur. Les essais avec capteur sont effectués dans les mêmes conditions que les tests de simulation afin de pouvoir valider les modèles en régime permanent et dynamique proposés au chapitre2. Par ailleurs, le capteur de position a été remplacé par l'estimateur basé sur l'estimation de flux proposé au chapitre3 afin de réaliser une implémentation de la commande sans capteur. A cet effet une carte d'acquisition et d'adaptation des tensions des phases pour les ADC du microcontrôleur est réalisée. Un programme d'estimation de flux est élaboré et implémenté sur le microcontrôleur afin de réaliser l'estimateur de position. Celui-ci nous permettra, ainsi, d'implémenter la commande sans capteur.

Chapitre 1

Présentation et identification de la SRM 12/8

1.1. Introduction

Les SRM sont des machines synchrones à double dentures alimentées par des créneaux de tension. Ce sont des machines à champs pulsé ce qui produit de fortes ondulations de couple. Néanmoins, la structure du rotor est simple, elle ne comprend ni bobinage ni aimants permanents [4], ce qui procure à la machine une meilleure dynamique et une possibilité de fonctionner à très grandes vitesses [4] [5]. De plus les phases de la machine sont généralement indépendantes (mutuelle négligeable), ce qui rend la machine tolérante aux défauts [5].

Les circuits magnétiques du rotor et du stator sont conçus par des empilements de tôles en acier afin de réduire les pertes fer et augmenter ainsi le rendement [4].

Dans ce chapitre, on se propose d'identifier une SRM 12/8 (12 dents au stator et 8 dents au rotor [1]) triphasée. La SRM 12/8 associée au circuit d'alimentation et de commande est présentée en premier lieu. Des techniques de mesures et d'identification utilisées sont aussi présentées afin de déterminer les caractéristiques électriques, électromagnétiques et mécaniques de la machine en utilisant le banc d'essais expérimental.

1.2. Présentation de la SRM et du banc d'essais

1.2.1. Structure de la SRM 12/8

La machine sur laquelle porte notre étude est un prototype constitué de SRM 12/8 triphasée dont certaines caractéristiques sont présentées en ANNEXE A. Elle est présentée sur la figure 1.1 et sa structure ainsi que la répartition du bobinage d'une phase sont présentées sur la figure 1.2.

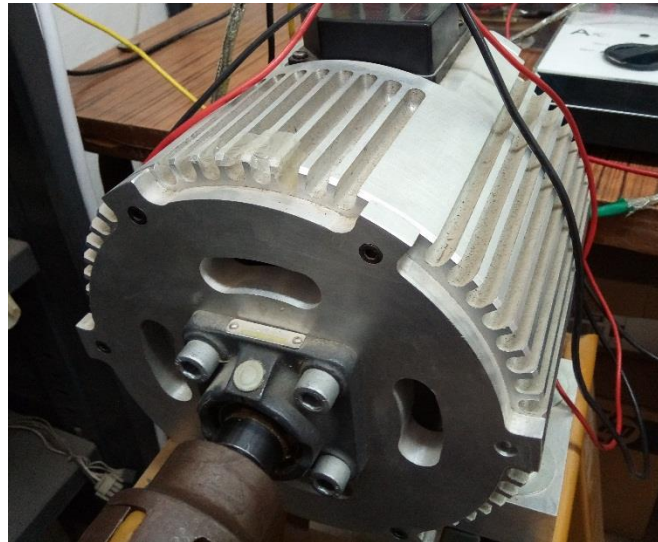
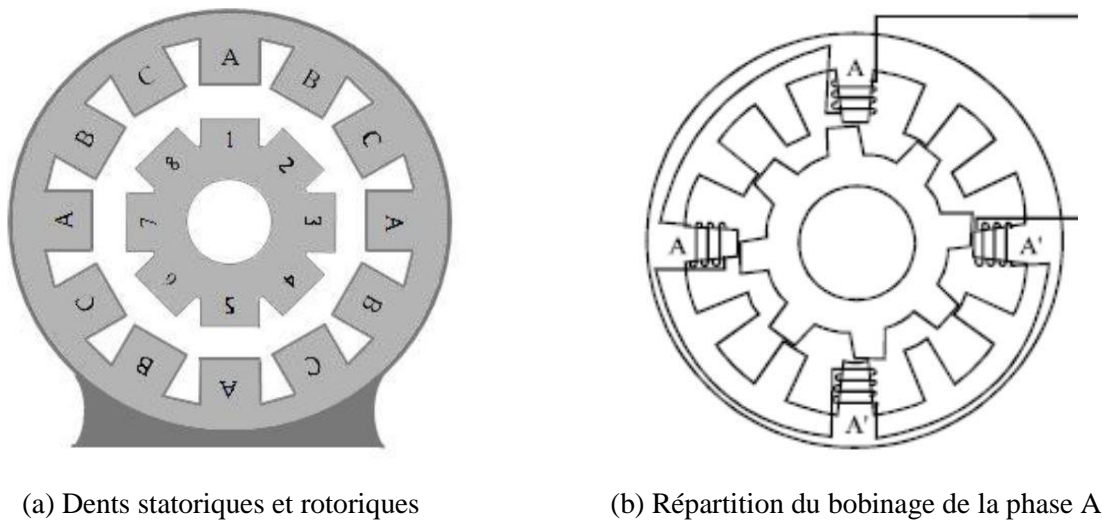


Figure 1.1 : SRM 12/8 triphasée



(a) Dents statoriques et rotoriques

(b) Répartition du bobinage de la phase A

Figure 1.2 : Structure de la SRM 12/8

1.2.2. Principe de fonctionnement de la SRM

Les SRM sont des machines à réluctance variable à double dentures. Leur principe de fonctionnement est basé sur la variation de la réluctance [6] [7]. La dent rotorique s'aligne avec la dent statorique alimentée afin de réduire la réluctance du circuit magnétique [4]. Lorsque les phases sont alimentées successivement, il se produit un couple électromagnétique dû à la variation de la réluctance.

1.2.3. Composants du banc d'essais

L'identification de la SRM nécessite quelques essais expérimentaux qui sont effectués sur un banc d'essais expérimental constituant le circuit d'alimentation et de commande représenté sur la figure 1.3, dont les éléments essentiels sont :

- Une source de tension continue.
- Un convertisseur de puissance à demi-pont asymétrique.
- Une interface d'adaptation des tensions.
- Une carte d'acquisition des courants.
- Un capteur de tension.
- Un capteur de position incrémental accouplé à l'arbre du moteur.
- Un microcontrôleur TMS320F28335.
- Une SRM 12/8 triphasée.
- Un circuit d'attaque.
- Une charge.
- Un oscilloscope numérique pour la mesure.
- Un PC pour la programmation du microcontrôleur.

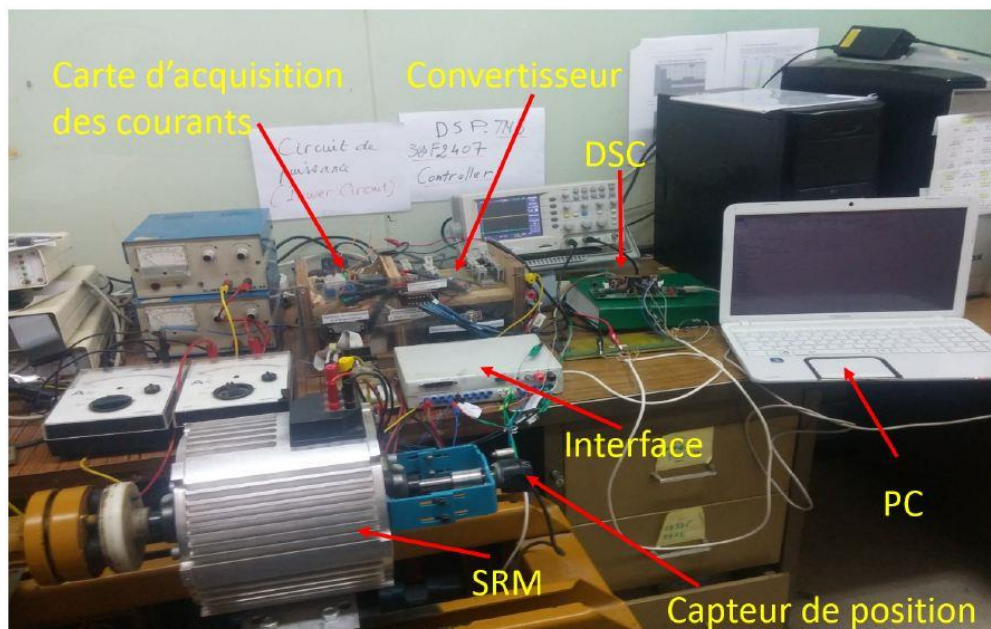


Figure 1.3 : Banc d'essais du système de commande de la SRM 12/8

Ce banc d'essais peut être représenté selon le schéma synoptique suivant :

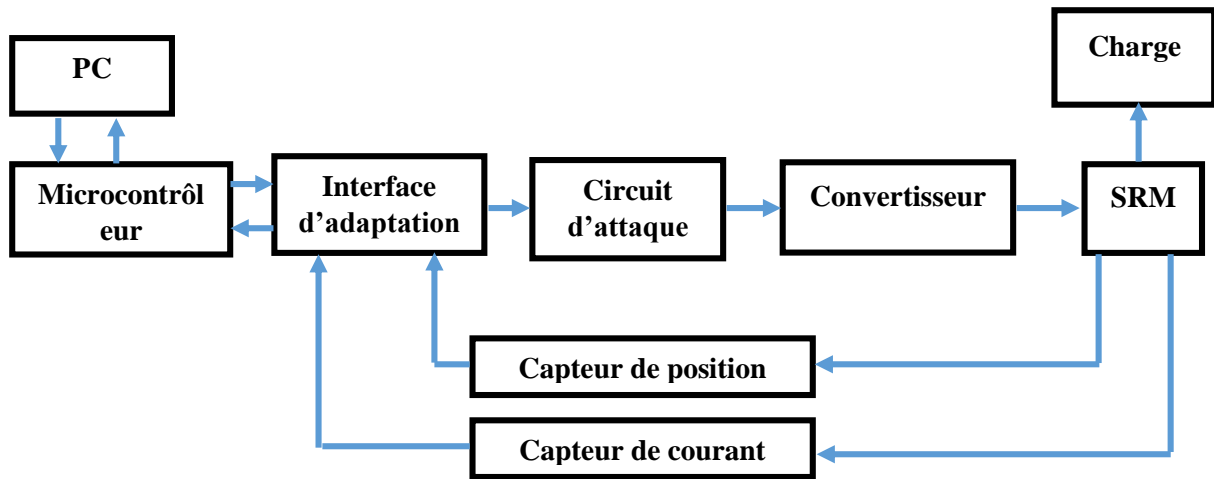


Figure 1.4 : Schéma synoptique du banc d'essais

- **Convertisseur de puissance**

L'alimentation des phases de la machine est assurée par un convertisseur de puissance à demi-pont asymétrique donné sur la figure 1.5, et dont la structure est présentée sur la figure 1.6. Ce convertisseur assure une alimentation unipolaire et permet de récupérer l'énergie emmagasinée dans les bobinages lors de la désexcitation des phases [1] [4].

Ce convertisseur asymétrique utilise deux MOSFET et deux diodes par phase. Chaque phase est indépendante des autres phases, ce qui permet d'éviter les courts circuits [4].

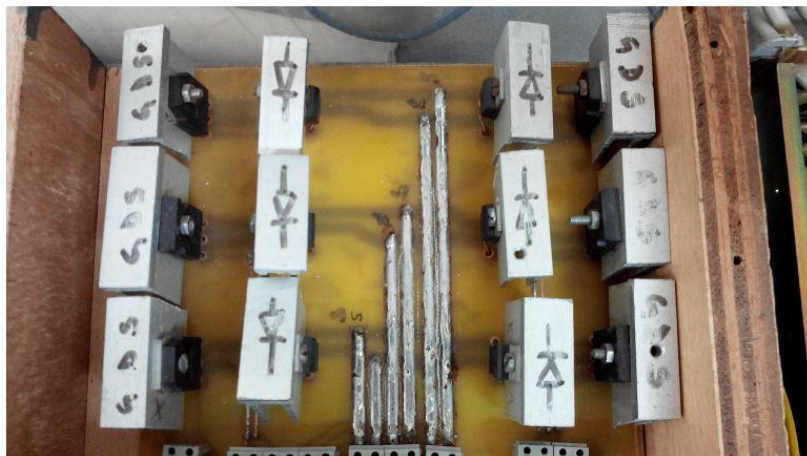


Figure 1.5 : Convertisseur de puissance à demi-pont asymétrique

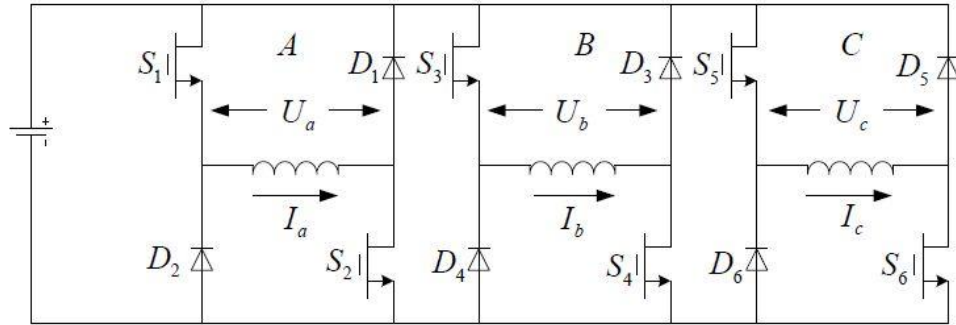


Figure 1.6 : Structure du convertisseur à demi-pont asymétrique

Il existe trois modes de fonctionnement pour ce convertisseur définis comme : mode d'excitation, mode de roue libre et mode de désexcitation [4]. Ces trois modes sont illustrés par la figure 1.7 et les formes de tensions et de courants générés sont présentées sur la figure 1.8.

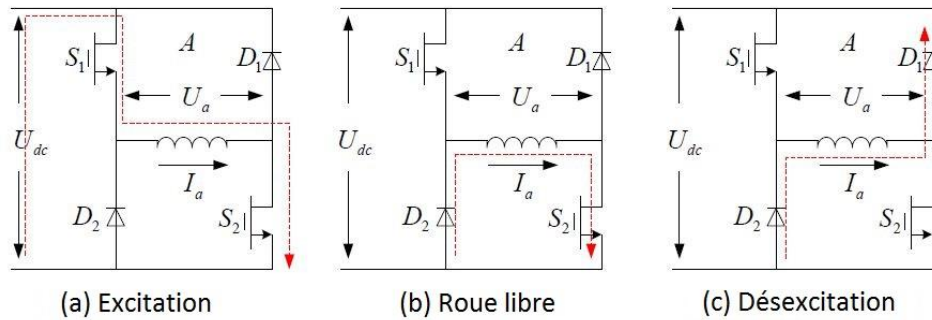


Figure 1.7 : Modes d'opération du convertisseur

- (a) : $U_a = +U_{dc}$ correspondant à la phase d'excitation.
- (b) : $U_a = 0$ correspondant à la désexcitation de la phase sans récupération d'énergie.
- (c) : $U_a = -U_{dc}$ correspondant à la phase de désexcitation où l'énergie emmagasinée dans le circuit magnétique est restituée à la source.

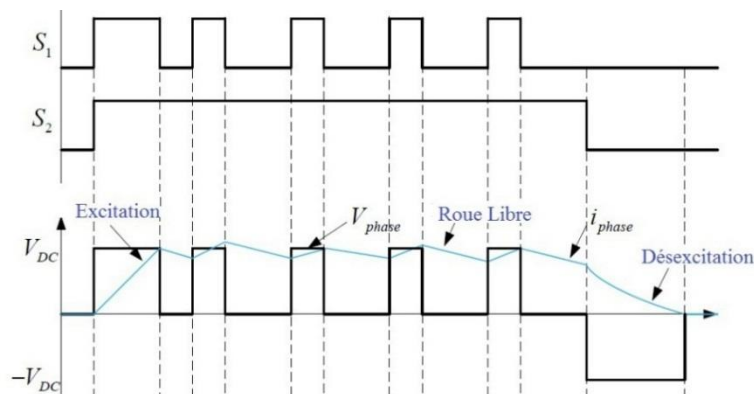


Figure 1.8 : Formes de tensions et de courants pour les trois modes d'opération

- **Carte d'acquisition des courants**

Une carte d'acquisition contenant 3 capteurs à effet Hall est utilisée pour capter les courants des 3 phases et transmettre l'information au microcontrôleur. Les tensions aux sorties de ces capteurs sont adaptées au niveau de tension du circuit d'acquisition du microcontrôleur qui ne doit pas dépasser les 3,3V.

- **Capteur de position**

Un capteur de position incrémental est accouplé à l'arbre de la SRM pour fournir la position en temps réel et assurer la bonne succession d'alimentation des phases. Il fournit 1000 impulsions pour un tour complet soit 360°. Le capteur donne en sortie deux signaux en quadrature décalés de 45° entre eux, en comptant le nombre de fronts montants et descendants des deux signaux la résolution du capteur est multipliée par 4 comme l'illustre la figure 1.9.

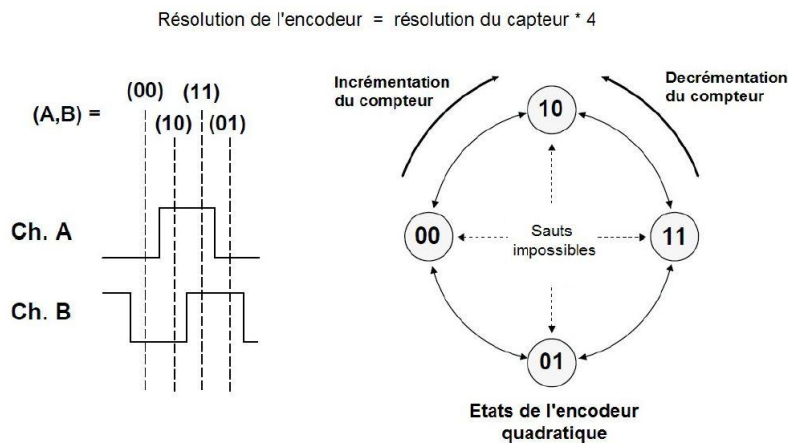


Figure 1.9 : Encodeur de pulsation quadratique

- **Circuit d'attaque**

Le circuit d'attaque a pour rôle de faire le lien entre le circuit de commande et le convertisseur de puissance. Il permet de commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de puissance.

- **Interface d'adaptation des tensions**

Tous les signaux en provenance des capteurs passent par une interface d'adaptation des tensions où une diode Zéner s'assure de saturer la tension à 3.3V afin de protéger le microcontrôleur. Ce circuit permet aussi d'adapter le niveau de tension des sorties du microcontrôleur (3,3V) au niveau des tensions de commande (5V). La figure 1.10 illustre un schéma d'adaptation des tensions entre les différents composants.

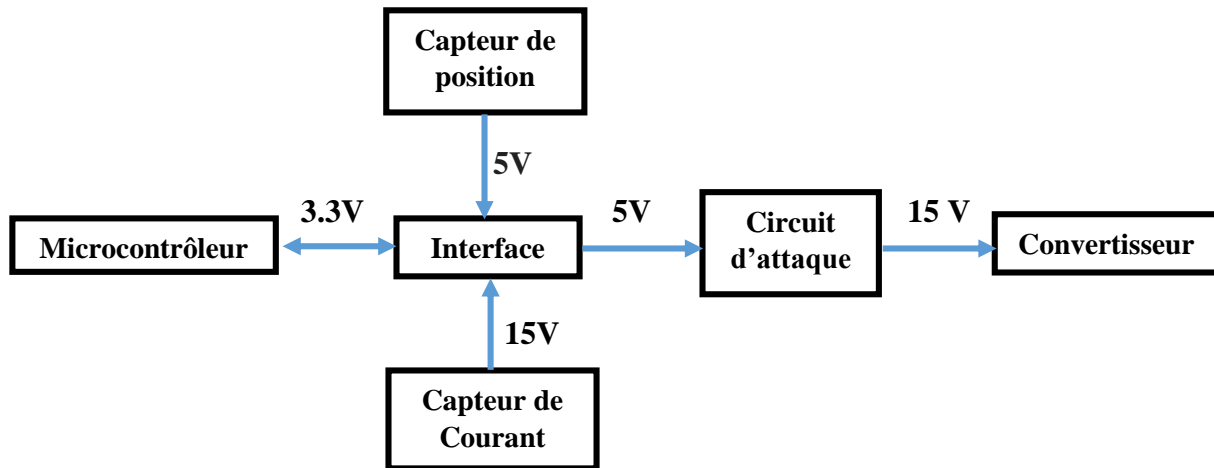


Figure 1.10 : Schéma d'adaptation des tensions

- **Microcontrôleur**

Le microcontrôleur nous permet de générer numériquement les signaux de commande pour faire fonctionner la SRM.

Le microcontrôleur utilisé est le "TMS320F28335", il fait partie de la série "C2000" de "Texas Instrument" qui est destinée pour la commande et le traitement numérique en temps réel. On lui approprie le terme "DSC", (Digital Signal Controller), car il est conçu à partir d'un microprocesseur simple qui fournit la puissance de calcul, et des périphériques entrées - sorties embarqués sur une seule puce. Il réalise les opérations mathématiques sur les signaux numériques mesurés par les différents capteurs et traite ces données rapidement et génère un flux de sortie en temps réel qui va accomplir une tâche à l'extérieur [8]

Il est basé sur l'architecture "Harvard" telle que présentée sur la figure 1.11. Cette architecture a la particularité d'intégrer deux bus mémoires distincts : le bus de données et le bus de programme. Ceci confère la capacité au microcontrôleur de lire deux zones mémoires en un seul cycle d'horloge, et donc de gagner en temps de calcul. Sa fréquence de base est de 150MHz [8].

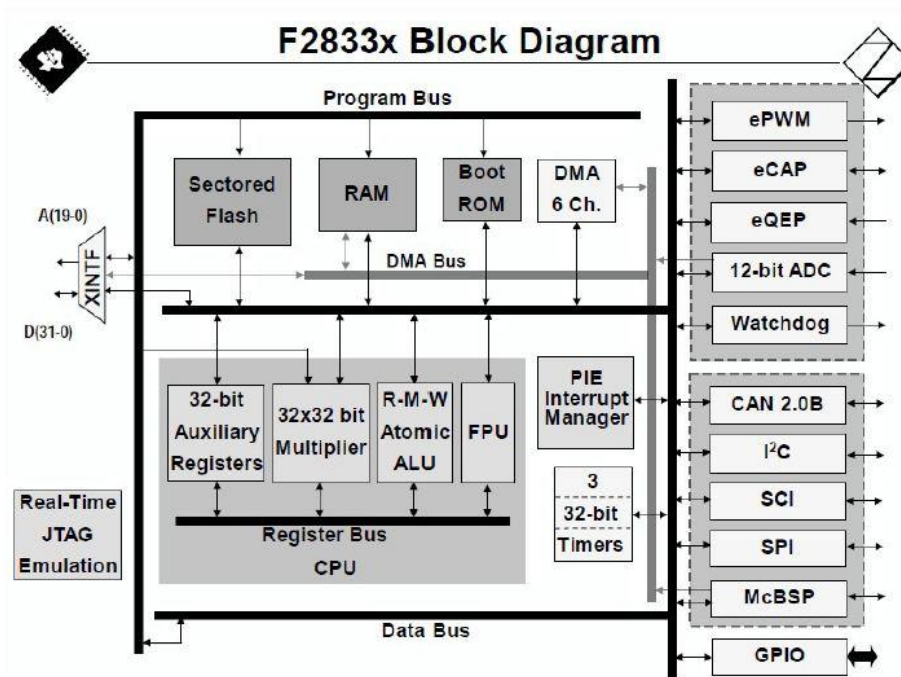


Figure 1.11 : Architecture des microcontrôleurs de la famille TMSF320F2833x

1.3. Programmation du microcontrôleur

Le microcontrôleur, ainsi que les pins qui lui sont associés sont présenté sur la figure 1.12.

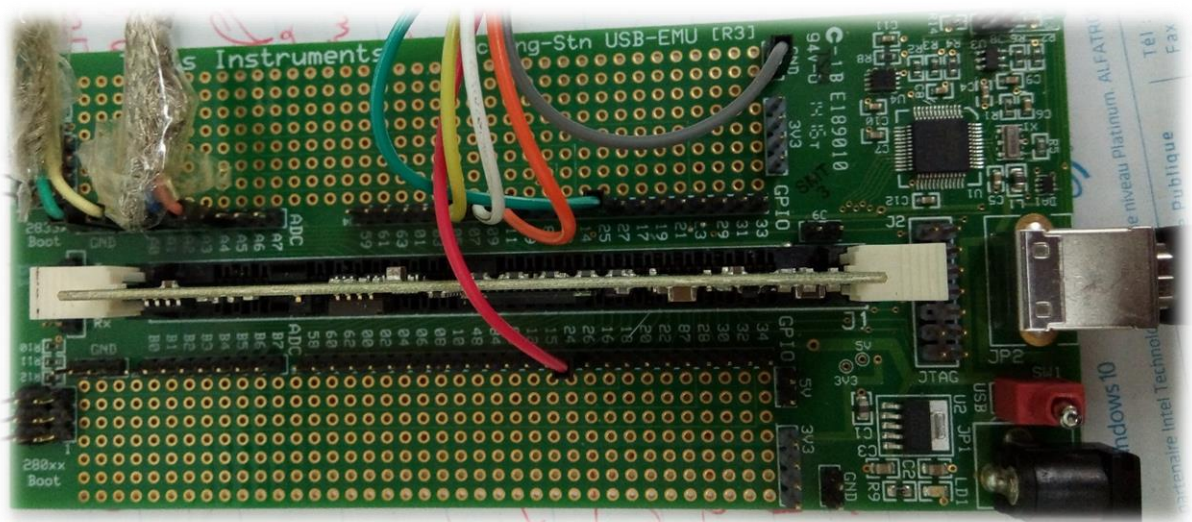


Figure 1.12 : Microcontrôleur TMS320F28335

Le "TMSF28335" dispose de 88 pins E/S multiplexés, répartis sur 3 multiplexeurs. Ceci veut dire que chaque pin peut être configuré pour 4 fonctions différentes à l'aide des registres de contrôle appelés "GPAMUX", "GPBMUX" et "GPCMUX" [8]

Les trois types de pins utilisés dans notre cas sont comme suit :

GPIO "General purpose input output"

La fonction entrée/sortie "GPIO" peut être configurée sur les 88 pins disponibles sur le microcontrôleur. Pour ce faire il faut paramétrer le registre "GPxMUX" sur la valeur 0, pour le pin associé. Une fois la fonction "GPIO" sélectionnée, il faut choisir la direction entrée ou sortie déterminée par Le registre "GPxDIR". Dans nos programmes, la fonction "GPIO" est choisie pour la génération des signaux de commande des IGBT [9].

Convertisseur analogique numérique "ADC"

Ce type de pins reçoit les signaux analogiques et les convertis en numérique. 3 ADC sont utilisés dans notre cas pour capter les courants des 3 phases.

Encodeur "eQEP" (Encodeur de pulsations en quadrature)

Ce module fonctionne avec le capteur incrémental. Les deux signaux du capteur décalés entre eux de 45°, sont reliés aux deux entrées correspondantes du "eQEP".

1.3.1. Environnement de programmation

La programmation du microcontrôleur "TMS320F28335" se fait dans l'environnement "Code Composer Studio" (CCS) fournit par Texas Instrument. Le langage de programmation utilisé est le C/C++. Ce logiciel offre beaucoup d'outils pour faciliter la commande [9], parmi eux on cite :

"Watch window"

Il s'agit d'une fenêtre qui s'ouvre une fois que le programme est compilé. Elle permet d'avoir un visuel sur des variables globales sélectionnées auparavant, avec une fréquence d'actualisation qu'il faut configurer. Cet outil permet aussi de modifier la valeur d'une variable si elle le permet, en temps réel et sans redémarrer le microcontrôleur. Cette fonction est intéressante pour la modification des variables de commande en temps réel.

"CPU window"

La fenêtre "CPU window" liste tous les registres de contrôle existants dans le microcontrôleur. Elle est nécessaire pour connaître la dénomination exacte de ces registres lors de la programmation. Il est aussi possible d'intégrer un registre dans le "Watch window" afin d'observer son évolution durant l'exécution du programme.

"Memory window"

Cette fenêtre permet d'observer en temps réel une zone mémoire du microcontrôleur, que ce soit la mémoire du programme ou la mémoire de données. Il existe aussi une fonction qui permet de sauvegarder une zone mémoire du 'DSC'.

"Graph window"

Le "Graph window" a pour objectif de tracer l'évolution d'une variable déclarée dans le programme. Il est nécessaire en premier lieu de connaître l'adresse mémoire de cette variable dans la fenêtre "Memory window". La fréquence d'échantillonnage maximale du "Graph window" est de 10Hz.

1.3.2. Programme d'intégration du signal du capteur de position

Les sorties du capteur incrémental sont connectés sur les entrées du "eQEP" du microcontrôleur, et le registre du module est configuré pour compter jusqu'à 4000 avant de se réinitialiser. La position fournie par le module n'a pas de référence exacte, il est alors nécessaire de trouver un moyen de démarrer l'incrémentation à partir d'un point de référence précis. Cela a été résolu en procédant à l'alignement d'une dent statorique avec une dent rotorique. Pour cela, la phase 3 est initialement alimentée pendant une période de temps [9].

Le programme de génération des signaux de commande avec signaux du capteur est présenté sur la figure 1.13. On configure les entrées-sorties selon leurs fonctions correspondantes. Ensuite, on choisit la fréquence d'interruption du timer à 20kHz qui sera aussi la fréquence d'exécution du programme principal [9]. Après, on procède à l'alignement en alimentant la phase 3, et on attend 20000 interruptions du timer qui correspond à 1 seconde. On initialise le registre de comptage du "eQEP" qui s'appelle "QPOSCNT" par 83 (7.5°) [9].

La boucle infinie a pour but l'alimentation des trois phases pour des angles de commutations de $[0^\circ 15^\circ]$. On commence par l'intégration de la position électrique. En effet le registre du "eQEP" fournit la position de 0 à 3999 pour un tour mécanique, or l'alimentation des trois phases se fait sur la base de la position électrique qui a une période de 45° pour le cas de la SRM 12/8. 45° correspond donc à 500 sur le registre "QPOSCNT". [9].

Un programme en parallèle utilisant un autre timer se charge du calcul de la vitesse à partir de la position. Ce calcul est illustré par l'organigramme présenté sur la figure 1.14.

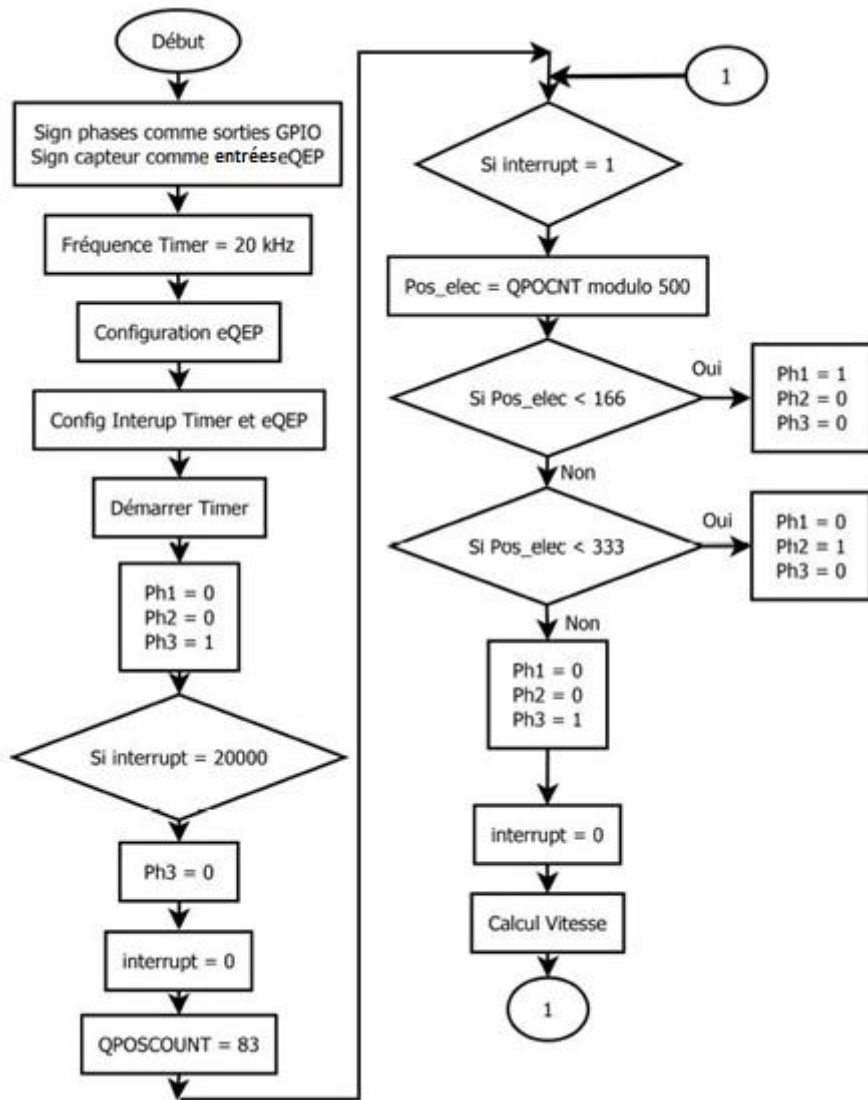


Figure 1.13 : Organigramme de génération des signaux de commande avec capteur de position

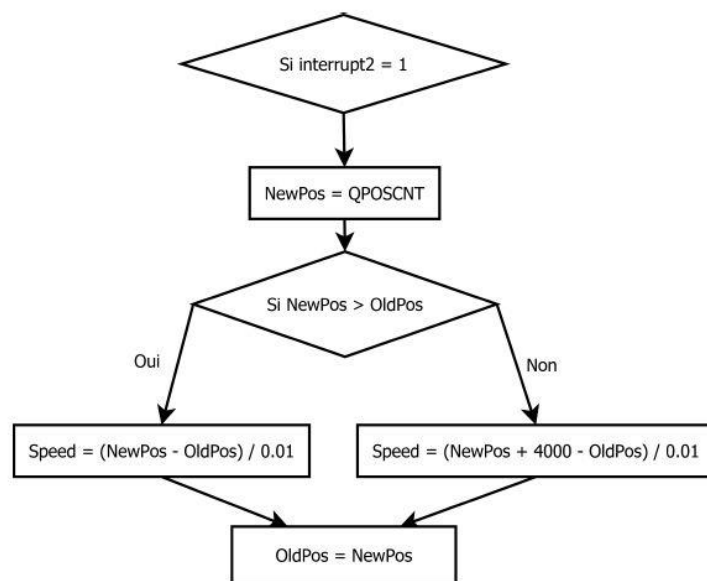


Figure 1.14 : Organigramme du calcul de la vitesse

1.3.3. Programme d'acquisition des courants

Pour le fonctionnement à faibles vitesses, il est nécessaire de contrôler le courant (Technique d'Hystérésis) pour cela l'information sur les courants des 3 phases doit parvenir au DSP. Le programme d'acquisition des courants utilise les entrées 'ADC' et le module "ePWM" pour le déclenchement. Ce programme est illustré par l'organigramme de la figure 1.15.

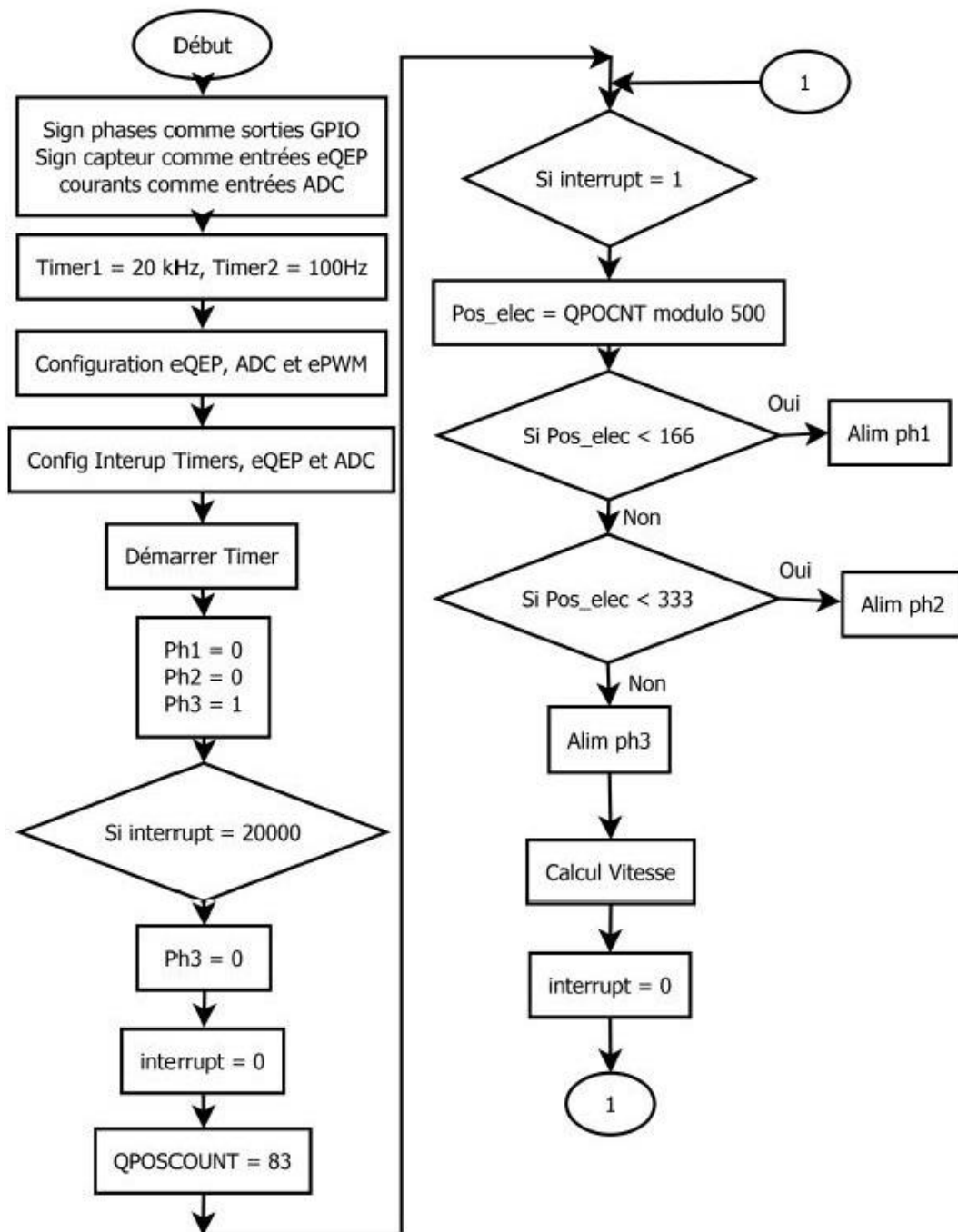


Figure 1.15 : Organigramme d'acquisition des courants

Les entrées-sorties sont configurées selon leurs fonctions correspondantes, et on ajoute l'interruption de l'ADC. Une nouvelle fonction est définie dans la boucle principale "Alim ph". Cette fonction est assurée par un programme illustré par l'organigramme donné sur la figure 1.16.

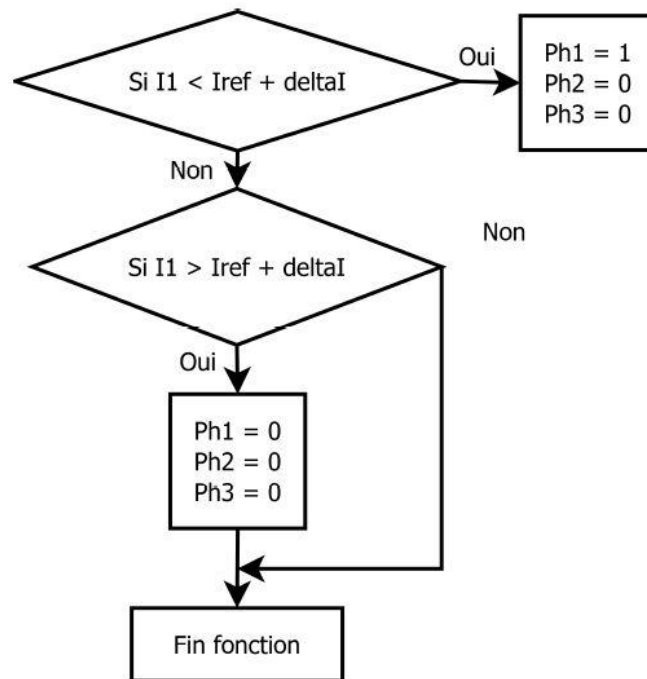


Figure 1.16 : La fonction alimentation "Alim ph1" pour la phase 1

1.4. Identification de la SRM 12/8

L'identification des paramètres électriques, électromagnétiques et mécaniques de la SRM est une étape importante dans l'étude de la machine. Ces paramètres serviront par la suite pour l'élaboration d'un modèle Simulink qui traduit le mieux possible le comportement de la machine réelle.

1.4.1. Identification des paramètres électriques (Résistance)

La mesure est effectuée en courant continu et on obtient : $R=2.5\Omega$.

1.4.2. Estimation du flux et détermination de la caractéristique électromagnétique

La mesure du Flux n'a pas pu être effectuée directement faute de moyens, celui-ci est alors estimé à partir de la mesure de la tension et du courant de phase en utilisant la relation (1.1).

$$\psi = \int (V - R.I)dt + \psi_0 \quad (1.1)$$

Avec :

V : Tension de la phase.

I : Courant de la phase.

ψ_0 : Flux initial.

La détermination de la caractéristique de flux en fonction de la position pour différentes valeurs de courant nécessite des essais sur la machine utilisant le banc d'essai expérimental présenté précédemment.

L'acquisition du courant et de la tension est assurée par le microcontrôleur à travers les capteurs ; les mesures sont récupérées sous formes de fichiers de données sur un oscilloscope numérique. Cette acquisition nous permet d'avoir un nombre de 4000 points, et constituer ainsi les tables de flux en fonction de la position et du courant.

Principe d'estimation du flux à partir d'un essai sur la SRM

On se propose d'estimer le flux de la première phase dont les relevés de tension et de courant d'un essai sont présentés sur la figure 1.17. Notons que la valeur du courant est multipliée par 15 afin de pouvoir visualiser le courant et la tension sur la même échelle. Le flux est estimé sur 15° qui correspond à la période d'excitation de la phase.

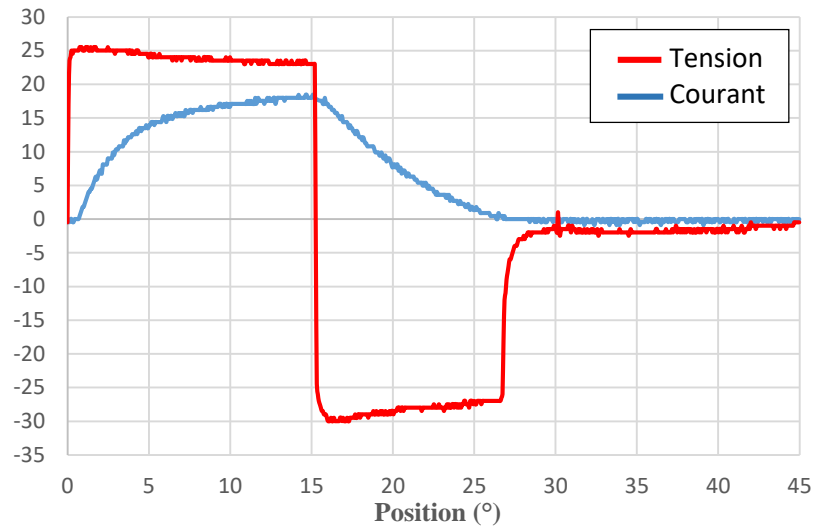


Figure 1.17 : Tension et courant expérimentaux de la phase 1

On sait que :

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.2)$$

$$dt = \frac{d\theta}{\Omega} \quad (1.3)$$

Alors :

$$\psi = \int \frac{(V-R.I)}{\Omega} d\theta + \psi_0 \quad (1.4)$$

$$\psi_{new} = \frac{(V_{new}-R.I_{new})(\theta_{new}-\theta_{old})}{\Omega} + \psi_{old} \quad (1.5)$$

L'estimation du flux en utilisant la relation (1.5) nous donne le résultat suivant :

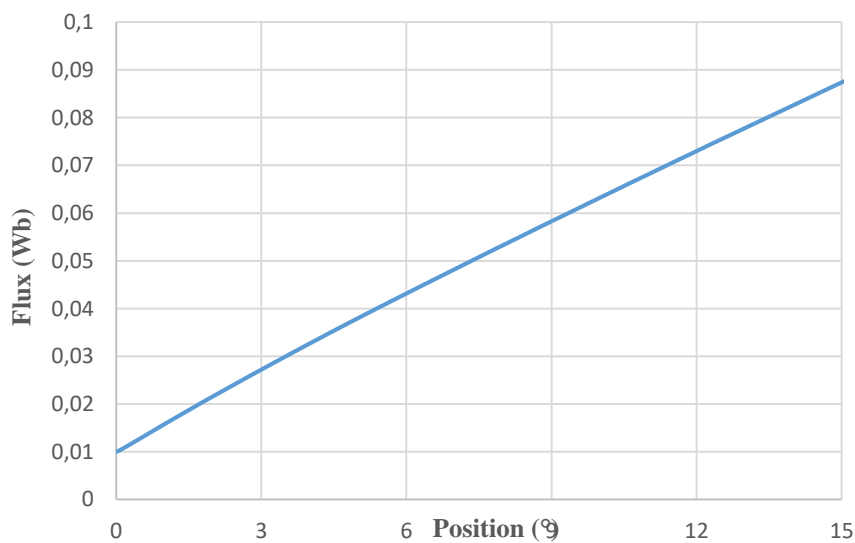


Figure 1.18 : Flux estimé

En procédant de la même manière pour différentes valeurs de courants, la caractéristique du flux en fonction du courant et de la position $\psi(\theta, i)$ est établi comme montrée sur la figure 1.19.

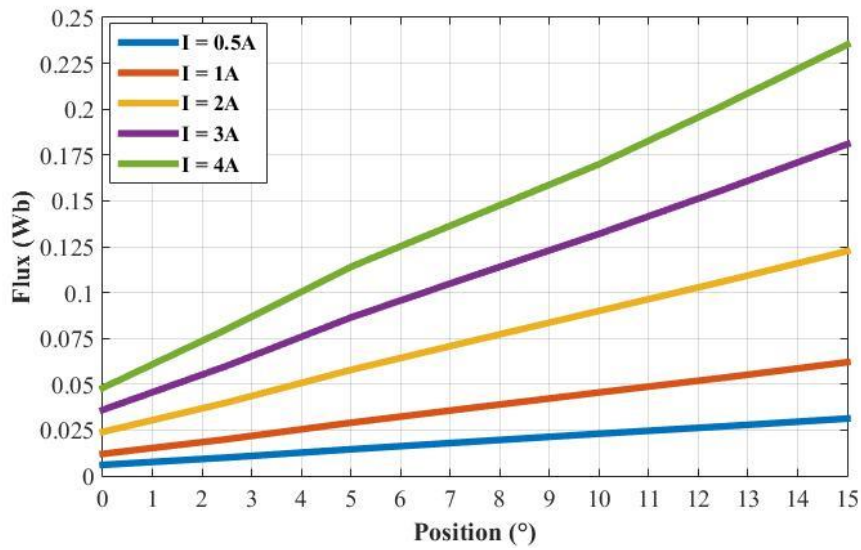


Figure 1.19 : Caractéristique de flux de la SRM 12/8

1.4.2.1. Estimation de l'inductance

L'inductance est estimée à partir du flux précédemment estimé en utilisant la relation suivante :

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (1.6)$$

L'inductance estimée de l'essai précédent est comme suit :

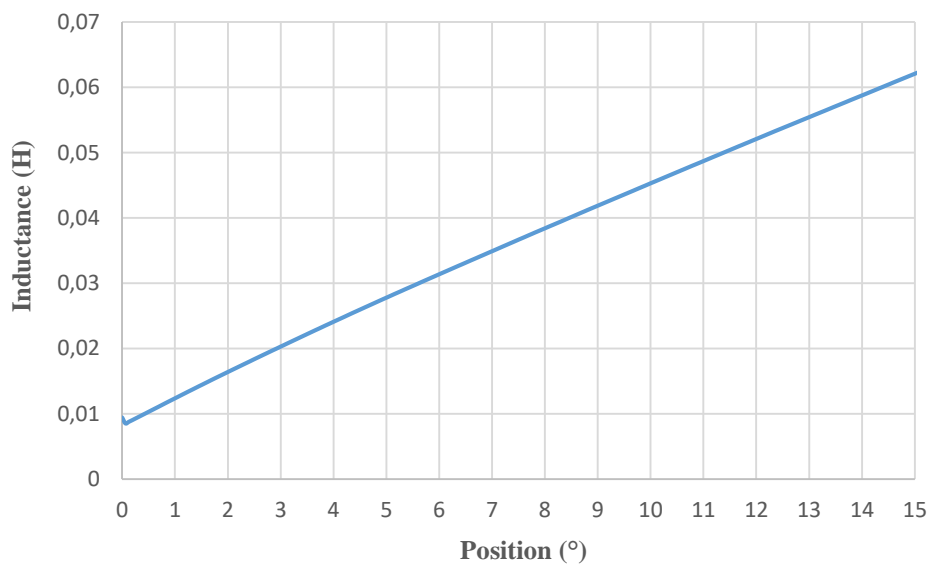


Figure 1.20 : Inductance estimée

La caractéristique d'inductance en fonction de la position et du courant $L(\theta, i)$ identifiée est présentée sur la figure 1.21.

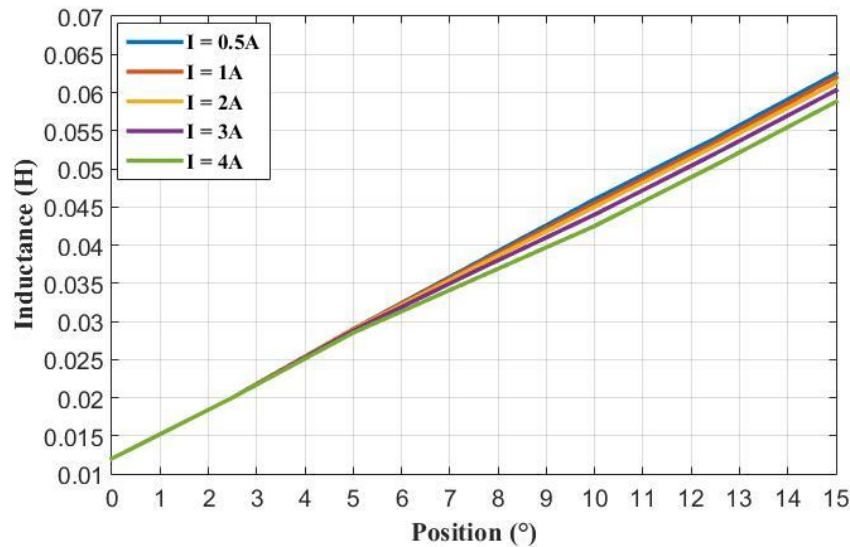


Figure 1.21 : Caractéristique d'inductance de la SRM 12/8

Lorsque la SRM n'est pas saturée, l'inductance varie linéairement et ne dépend pas du courant. A une certaine valeur de courant, le fer commence à saturer et l'inductance ne varie plus linéairement. Donc l'inductance est fonction non seulement de la position mais aussi du courant. [5] [4] [1].

La saturation sur notre SRM 12/8 commence à apparaître à partir d'un courant $I=1A$ environ, ce qui explique la diminution de L_{max} correspondant à chaque courant au fur et à mesure que ce dernier augmente.

1.4.3. Estimation du couple électromagnétique

Ne disposant pas de couplemètre au niveau du banc d'essais, le couple électromagnétique est estimé à partir de la caractéristique d'inductance obtenue précédemment et des courants de phases en utilisant la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} i^2 \quad (1.7)$$

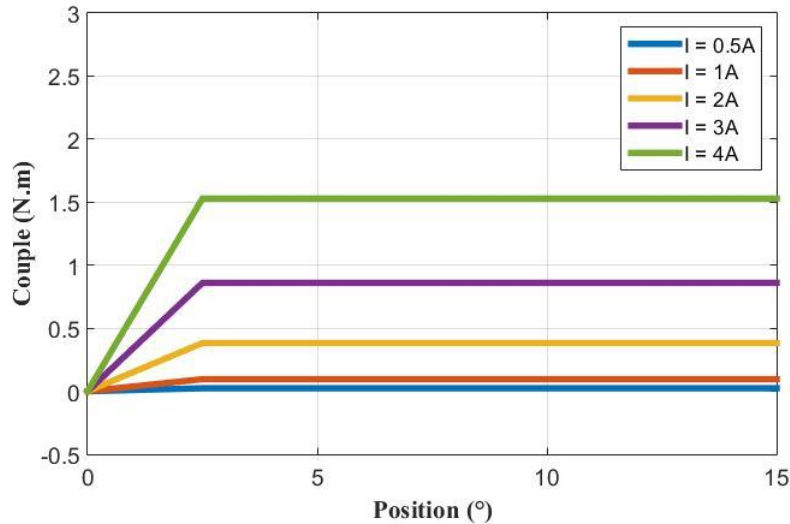


Figure 1.22 : Caractéristique du couple électromagnétique estimée

1.4.4. Identification des paramètres mécaniques

La SRM 12/8 est accouplée à une génératrice à courant continu (GCC) et à une génératrice tachymétrique pour la mesure de vitesse (figure 1.23).



Figure 1.23 : SRM 12/8 couplé à une GCC et Génératrice Tachymétrique

L'identification des paramètres mécaniques de ce système, à savoir le coefficient de frottement f_r et le moment d'inertie J , est effectuée à partir de la caractéristique de la vitesse obtenue à partir d'un démarrage du moteur sous une tension de 25V et du couple électromagnétique estimé. Pour ce faire, une connaissance de la fonction de transfert de l'équation dynamique du système est nécessaire. Elle est donnée par :

$$\Omega = \frac{1}{J.s + f_r} \cdot C_{em} \quad (1.8)$$

L'identification de ces paramètres mécaniques est effectuée à l'aide de la fonction « System Identification » sur l'environnement MATLAB, et passe par les étapes suivantes :

- Importation des données entrées - sorties qui sont respectivement la vitesse de rotation et le couple électromagnétique.
- Filtrage des données en utilisant un filtre « passe bande » afin de réduire les harmoniques de rang supérieur.

Les résultats du filtrage des données entrées - sorties sont présentés ci-après :

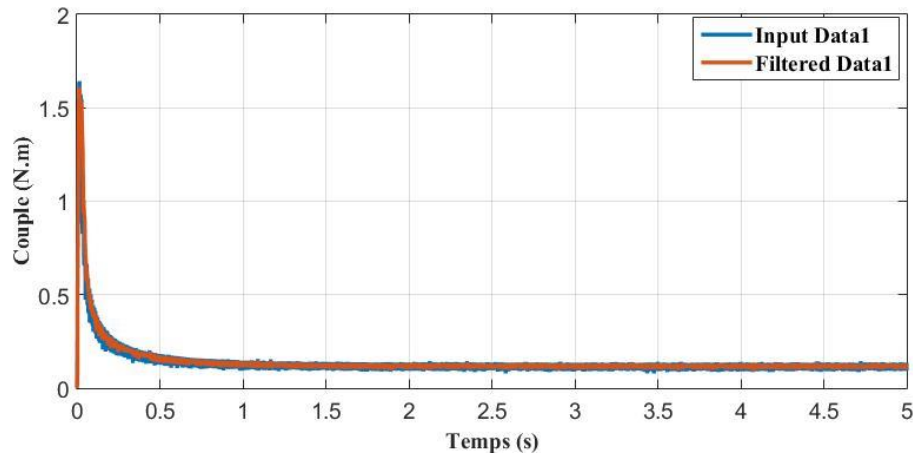


Figure 1.24 : Filtrage du couple électromagnétique

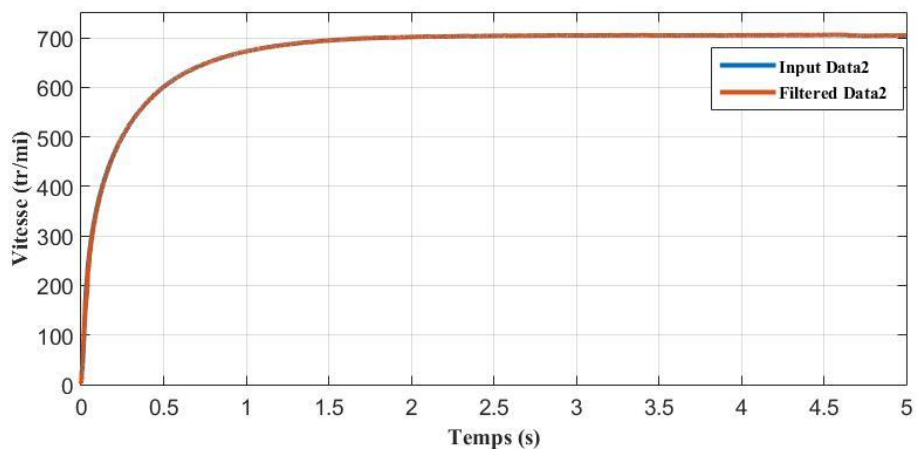


Figure 1.25 : Filtrage de la vitesse

- Estimation de la fonction de transfert du système (équation dynamique) à partir des entrées – sorties filtrées.

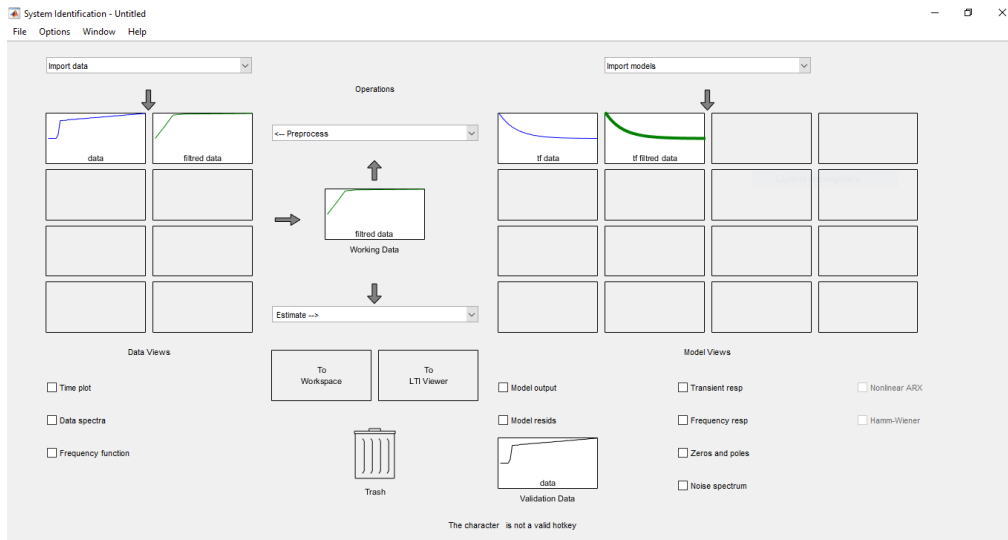


Figure 1.26 : System Identification tool

La fonction de transfert estimée du modèle est présentée ci-dessous :

```
From input "u1" to output "y1":
  0.7311 (+/- 0.0009797)
-----
s + 0.0001189 (+/- 1.947e-07)
```

```
Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.
```

```
Parameterization:
Number of poles: 1   Number of zeros: 0
Number of free coefficients: 2
Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.
```

Figure 1.27: Résultat du modèle estimé

La fonction de transfert est transformée sous la forme :

$$H(s) = \frac{K_p}{1+T_p \cdot s} \quad (1.9)$$

Ce qui conduit à :

$$K_p = 6,1488 \cdot 10^3 \quad (1.10)$$

$$T_p = 0,8410 \quad (1.11)$$

Comme la vitesse utilisée pour l'identification est en tr/min, alors que la vitesse à identifier elle est en rad/s, il est donc nécessaire de multiplier le coefficient K_p par un gain de transformation comme suit :

$$K_p = 6,1488 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi}{30} \quad (1.12)$$

En procédant par superposition à la fonction de transfert retrouvé par MATLAB, f_r et J obtenu sont donnés par :

$$f_r = \frac{1}{K_p} \quad (1.13)$$

$$J = \frac{T_p}{K_p} \quad (1.14)$$

Ce qui conduit à :

$$f_r = 15,53.10^{-4} N.m.s.rd^{-1} \quad (1.15)$$

$$J = 13,06.10^{-4} Kg.m^2 \quad (1.16)$$

1.5. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté en premier lieu, un prototype de SRM 12/8 triphasée, son principe de fonctionnement ainsi que les composants du banc d'essais qui lui est associée. De plus, Une description du microcontrôleur utilisé, l'environnement et les outils de programmation ainsi que les différents programmes qui commandent la SRM, ont été aussi présentés.

Une identification des paramètres électriques, électromagnétiques et mécaniques est effectuée, à cet effet des essais sur la SRM ont été menés pour chaque paramètre identifié. Des cartes de flux et de couple électromagnétique en fonction de la position et du courant ont été déterminées. Celles-ci seront utilisées dans les modèles proposés dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Modélisation et simulation de la commande de la SRM avec capteur de position

2.1. Introduction

Le modèle de la machine constitue l'ensemble du modèle électromagnétique et le modèle mécanique afin de tenir compte du fonctionnement en régime permanent et dynamique. Les composants du système de commande de la SRM ont été modélisés sous l'environnement Matlab&Simulink pour constituer un modèle global qui traduit le comportement réelle de la machine. En raison du caractère fortement non linéaire de la machine produit par la double denture de sa structure ainsi que la saturation de son circuit magnétique au régime nominal [5], le modèle du flux a été adopté. Ce qui nécessite une bonne connaissance des caractéristiques magnétique $\psi(\theta, i)$ de la machine.

Le modèle de simulation est basé sur le flux de la machine identifié précédemment dans le chapitre1. Les simulations effectuées dans ce chapitre concernent la SRM en présence du capteur de position en régime dynamique et en régime permanent afin d'évaluer ses performances à faibles et grandes vitesses de fonctionnement.

2.2. Modèle du flux

Le modèle de la machine est établi en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes [10] [11] :

- L'effet de la mutuelle entre phases, l'hystérésis et l'effet de bord sont négligés.
- Les paramètres de chaque phase sont identiques.
- Les courants induits dans le circuit magnétique sont négligés.
- La résistance des enroulements est constante.
- Les interrupteurs du convertisseur sont parfaits.
- La tension est parfaitement continue.

Le modèle de la SRM peut alors être représenté par les équations suivantes :

L'équation donnant la tension aux bornes de chaque phase excitée est exprimée par :

$$V_j = R. i_j + \frac{d\psi_j}{dt} \quad (2.1)$$

Avec :

R : Résistance de l'enroulement de chaque phase.

ψ_j : Flux magnétique total par phase.

i_j : Courant de la jème phase.

Sachant que le flux de chaque phase dépend de la position du rotor et du courant de la même phase, avec θ qui représente la position mécanique du rotor, on peut écrire :

$$\frac{d\psi_j(\theta, i_j)}{dt} = \frac{d\psi_j}{di_j} \frac{di_j}{dt} + \frac{d\psi_j}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.2)$$

Avec :

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega \quad (2.3)$$

Où Ω représente la vitesse de rotation exprimée en rad/s ; dans ce cas l'équation (2.1) peut s'écrire :

$$V_j = R \cdot i_j + \frac{d\psi_j}{di_j} \frac{di_j}{dt} + \frac{d\psi_j}{d\theta} \Omega \quad (2.4)$$

On définit la f.c.é.m de la SRM comme suit :

$$e = \frac{d\psi_j}{d\theta} \Omega \quad (2.5)$$

L'équation (2.1) devient :

$$V_j = R \cdot i_j + \frac{d\psi_j}{di_j} \frac{di_j}{dt} + e \quad (2.6)$$

La figure 2.1 représente la caractéristique de flux ψ (θ, i) déterminées expérimentalement au chapitre 1 .

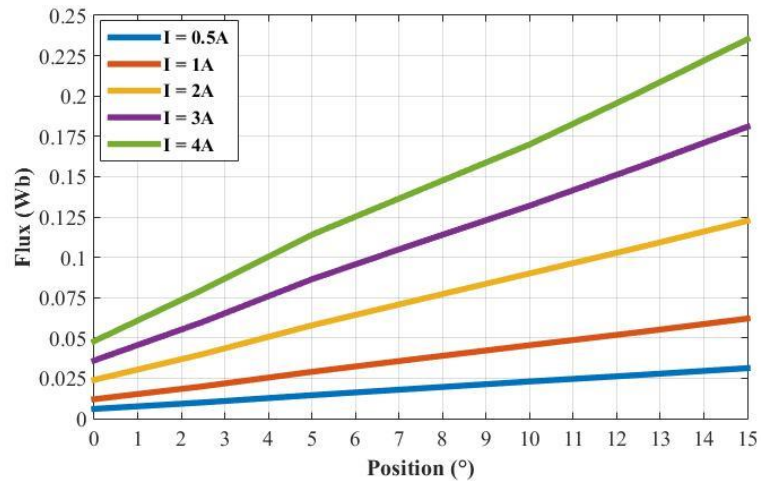


Figure 2.1 : Caractéristique de flux identifiée

Ces caractéristiques sont introduites dans le modèle Simulink sous forme de table (2-D) après avoir effectué une interpolation sur 1000 points en position et en courant afin de réduire l'erreur d'interpolation. Les caractéristiques de flux en fonction de la position et du courant après interpolation sont représentées sur la figure 2.2

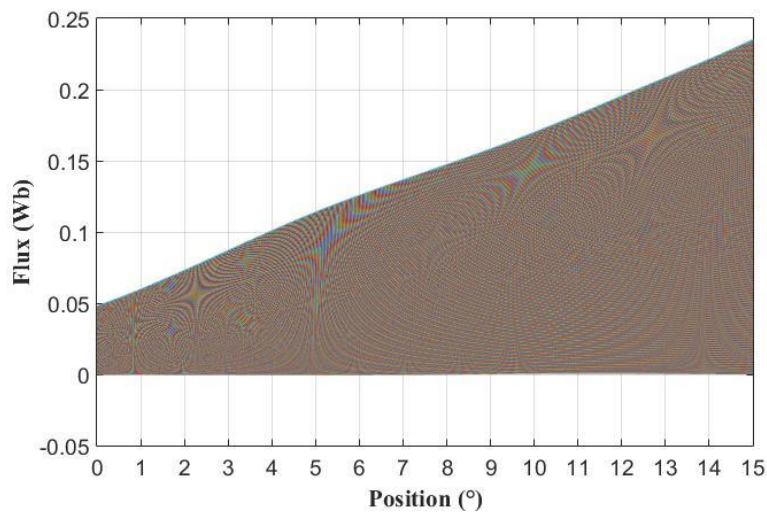


Figure 2.2 : Caractéristique de flux après interpolation

- **Caractéristique du couple électromagnétique**

La caractéristique du couple électromagnétique en fonction du courant et de la position déterminée dans la chapitre1 après interpolation est représentée dans la figure 2.3.

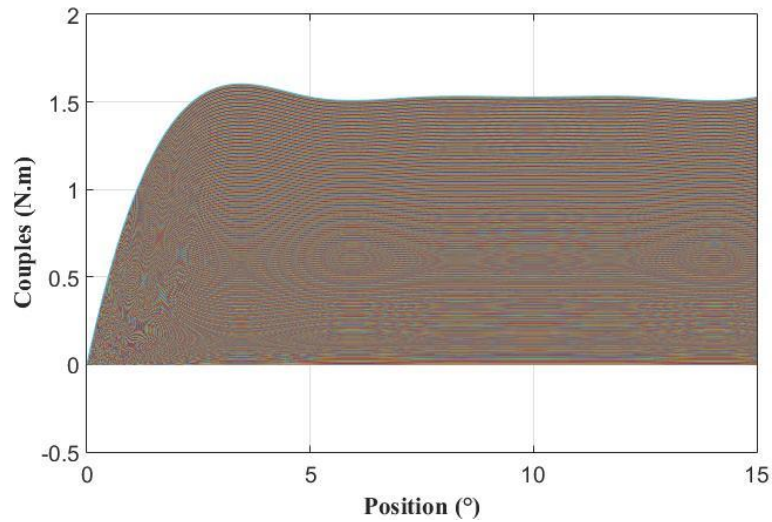


Figure 2.3 : Caractéristique du couple électromagnétique après interpolation

2.3. Modèle dynamique

L'équation mécanique de la SRM s'écrit comme suit :

$$(C_{em})_{tot} = J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega + C_r \quad (2.7)$$

Avec :

$(C_{em})_{tot}$: Couple électromagnétique total.

J : Moment d'inertie du rotor.

Ω : Vitesse angulaire de rotation (rad/s).

f_r : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple de charge.

Cette équation régit le comportement dynamique du moteur, elle permet de déterminer les performances dynamiques au démarrage et lors du changement de vitesses dues à la variation de la charge ou de la tension d'alimentation [9].

2.4. Modélisation sous Matlab&Simulink

Le modèle Simulink du système de commande est réalisé sous forme de blocs où chaque bloc représente le modèle d'un élément du système.

• **Modèle Simulink de la SRM**

Des tables (2-D) contenant les caractéristiques interpolées de flux est de couple sont utilisées pour simuler le comportement de la machine pour chaque phase. Le modèle Simulink pour chaque phase est représenté sur la figure 2.4. Ce bloc a comme entrées la tension et la position, et comme sorties le courant, le flux et le couple.

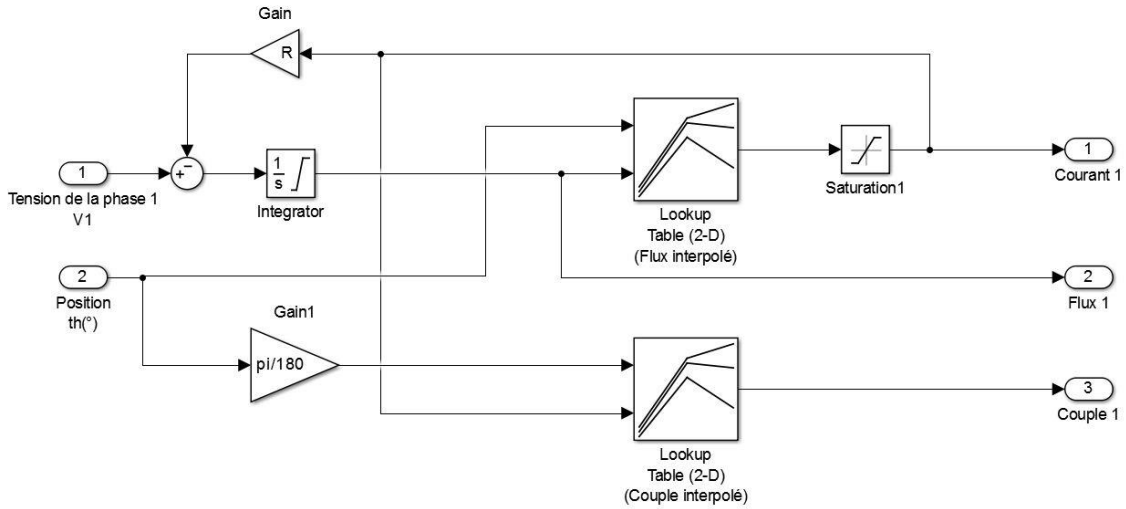


Figure 2.4 : Modèle d'une phase de la SRM

Le modèle Simulink complet de la machine est représenté sur la figure 2.5 :

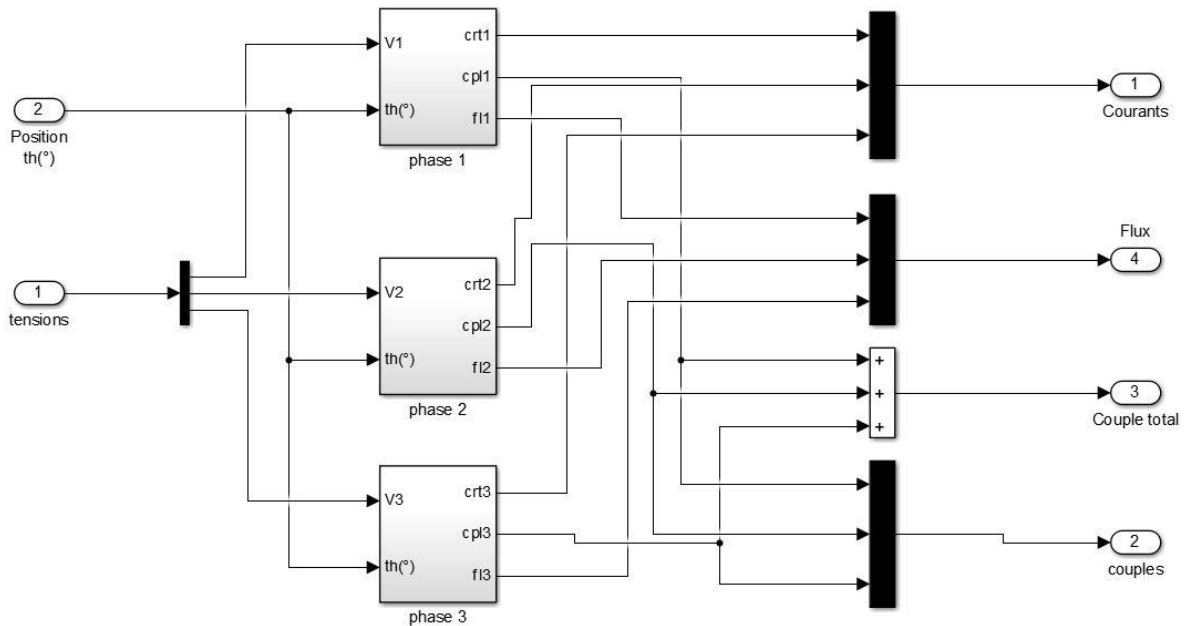


Figure 2.5 : Modèle de la SRM

• **Modèle du capteur de position**

Pour des raisons de simplification, le modèle Simulink du capteur est déduit de celui de la vitesse et il est représenté sur la figure 2.6.

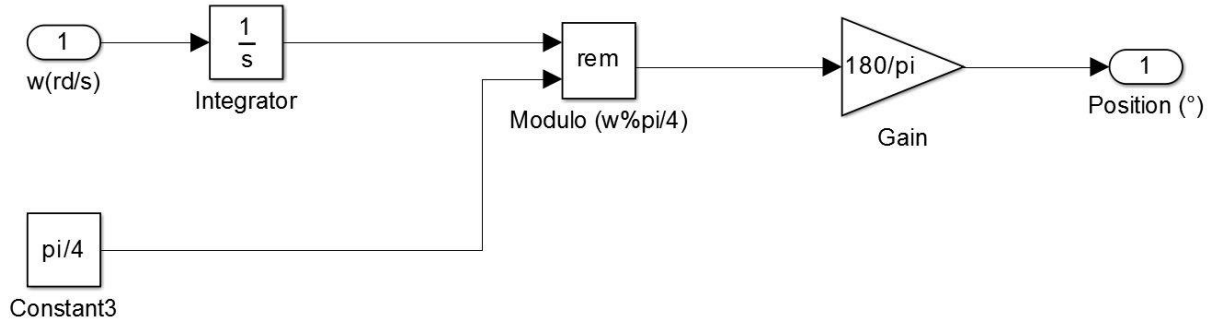


Figure 2.6 : Modèle du capteur de position

• **Modèle du circuit de commande et de puissance**

Le convertisseur, le régulateur Hystérésis et le circuit de commande (microcontrôleur) sont modélisés en un seul bloc.

La tension d'entrée (V_s) et les sorties (V_1, V_2, V_3) représente le convertisseur. L'angle d'allumage et l'angle d'extinction des IGBT ainsi que l'acquisition des courants et de la position représentent le circuit de commande comme on peut le voir sur la figure 2.8. La régulation de courant par hystérésis se fait à travers la consigne de courant de référence et le calcul d'erreur comme présentée dans la figure 2.9

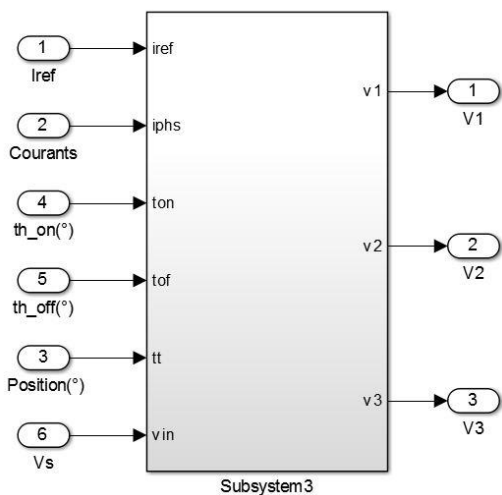


Figure 2.7 : Circuit de commande et de puissance

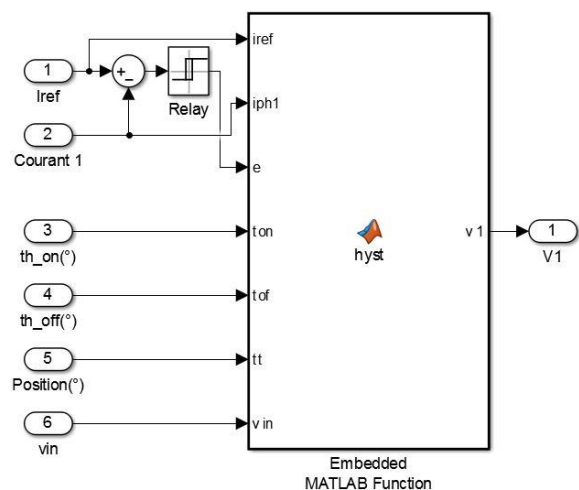


Figure 2.8 : Régulateur de courant par hystérésis

• **Modèle dynamique**

Le modèle Simulink qui permet d'étudier les performances dynamiques de la SRM peut être représenté par le schéma suivant :

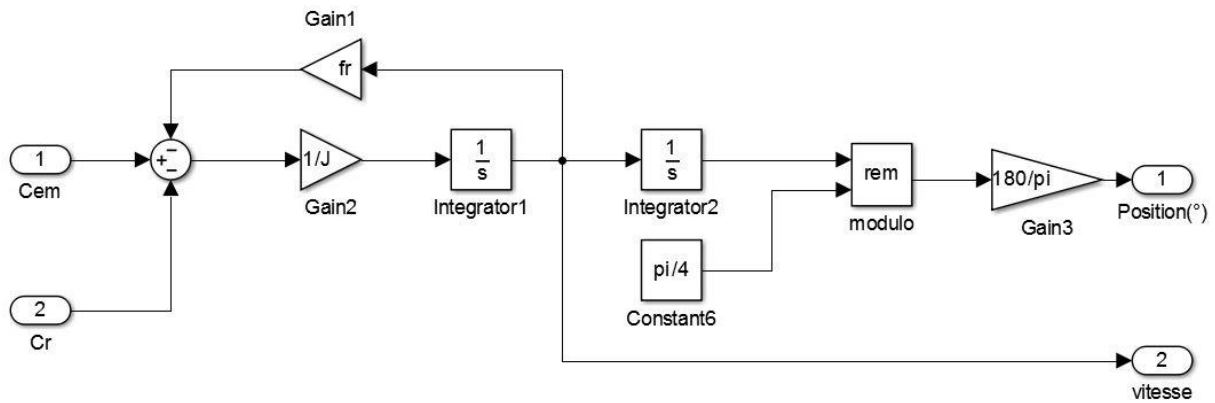


Figure 2.9 : Modèle de l'équation dynamique de la SRM

- **Modèle du système de commande la SRM en régime permanent et en régime dynamique**

Les modèles Simulink complets traduisant le comportement en régime permanent et dynamique sont donnés sur les figures suivantes :

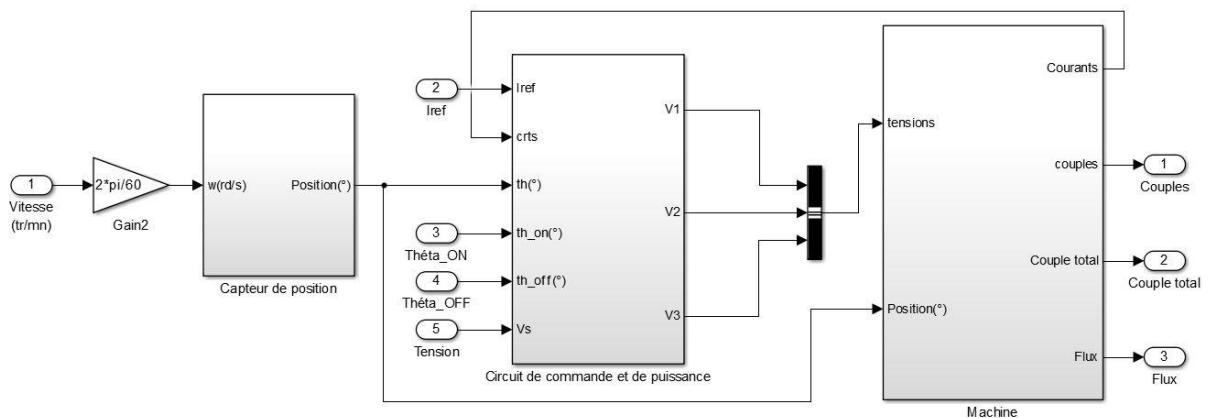


Figure 2.10 : Modèle global de la SRM en régime permanent avec capteur de position

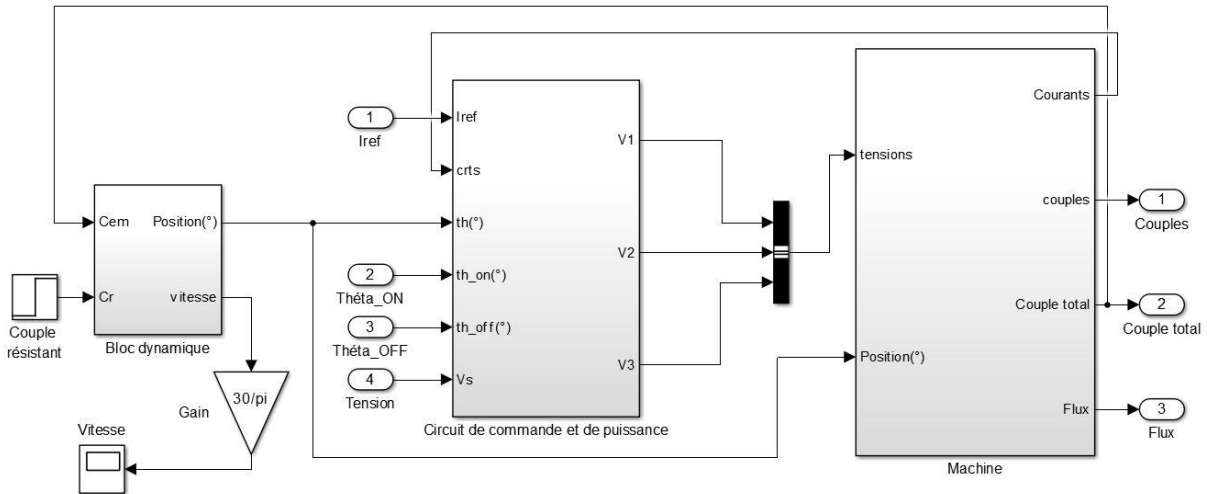


Figure 2.11 : Modèle global de la SRM en régime dynamique avec capteur de position

2.5. Simulation de la SRM en régime permanent

Le modèle Simulink en régime permanent est utilisé pour simuler le comportement de la SRM à grande et faible vitesse de fonctionnement correspondant respectivement à l'alimentation en pleine onde et à l'alimentation régulée en courant.

La simulation est normalement effectuée pour une tension de 25V pour des angles de commande $\theta_{ON} = 0^\circ$ et $\theta_{off} = 15^\circ$ afin de tenir compte des chutes de tension au niveau des interrupteurs, la tension d'alimentation est réduite à 23V.

- **Simulation en pleine onde pour une vitesse $\Omega=710$ tr/min**

Pour Simuler un fonctionnement a grandes vitesses, on choisit un fonctionnement à vide ou la vitesse est maximale et atteint 710 tr/min. Les résultats de simulation sont présentés ci-dessous :

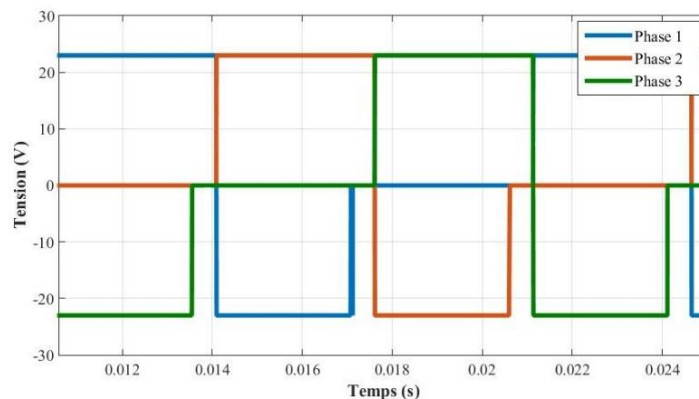


Figure 2.12 : Tension d'alimentation des 3 phases, $\Omega=710$ tr/min

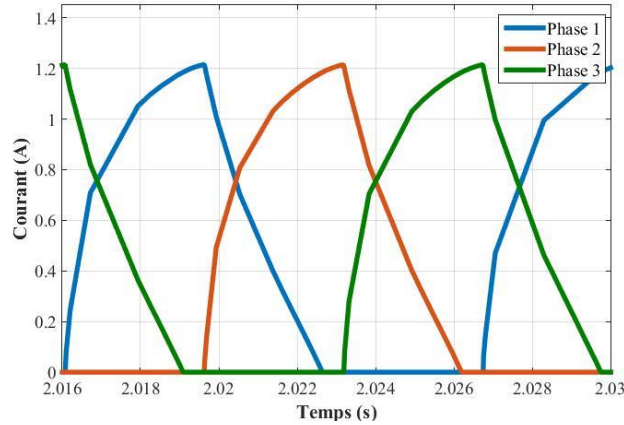


Figure 2.13 : Courants des 3 phases, $\Omega=710$ tr/min

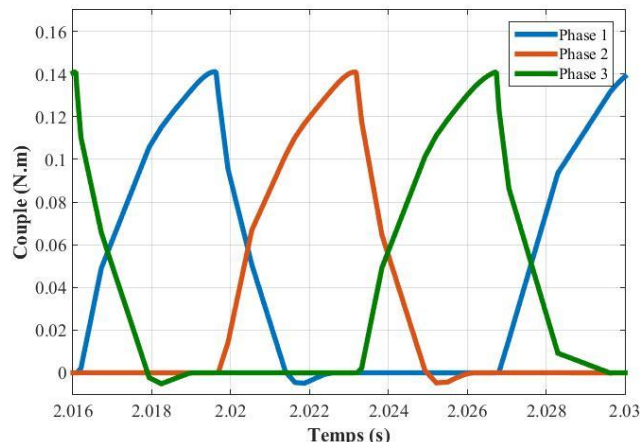


Figure 2.14 : Couples des 3 phases, $\Omega=710$ tr/min

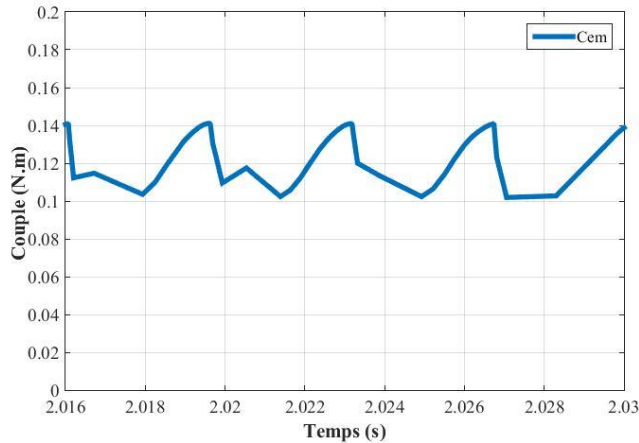


Figure 2.15 : Couple électromagnétique total, $\Omega=710$ tr/min

Les résultats de simulation obtenus confirment bien le comportement de la SRM à grandes vitesses de fonctionnement. En effet, à grandes vitesses supérieure à la vitesse de base, les courants de phases n'atteignent pas la valeur nominale car la f.c.é.m devient importante. De plus le couple électromagnétique comprend de fortes ondulations. Ce qui caractérise particulièrement la SRM.

- **Simulation pour une alimentation régulée en courant (faible vitesse $\Omega= 230$ tr/min)**

La simulation est réalisée en charge pour une faible vitesse de fonctionnement (inferieure a la vitesse de base). Une régulation du courant par la technique d'Hystérésis pour $I_{ref} = 0.95A$ et $\Delta I = 0.015A$ est alors introduite afin de contrôler le courant. La tension d'alimentation étant toujours de 23V.

Les résultats de simulation sont présentés ci-dessus :

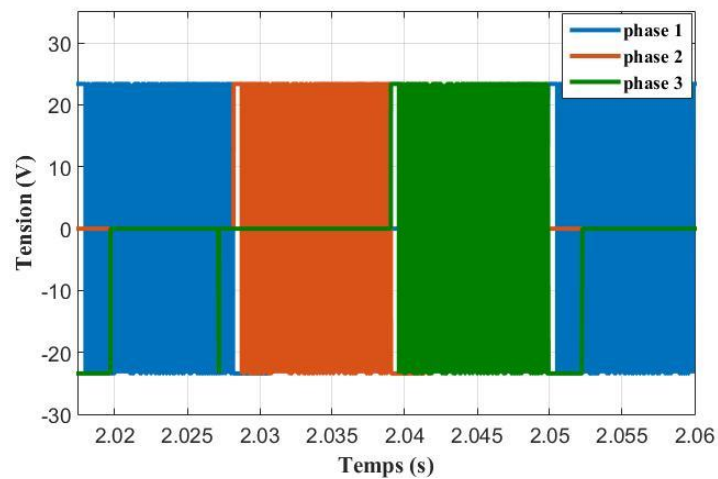


Figure 2.16 : Tensions d'alimentation des 3 phases, $I_{ref} = 0.95A$, $\Omega= 230$ tr/min

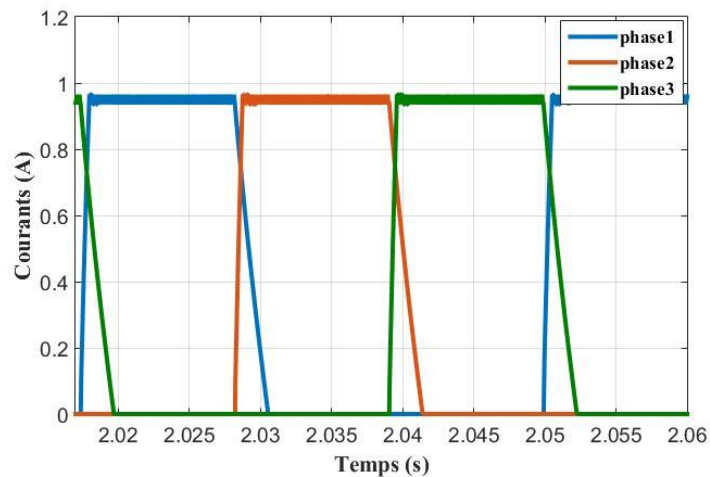


Figure 2.17 : Courants des 3 phases, $I_{ref} = 0.95A$, $\Omega= 230$ tr/min

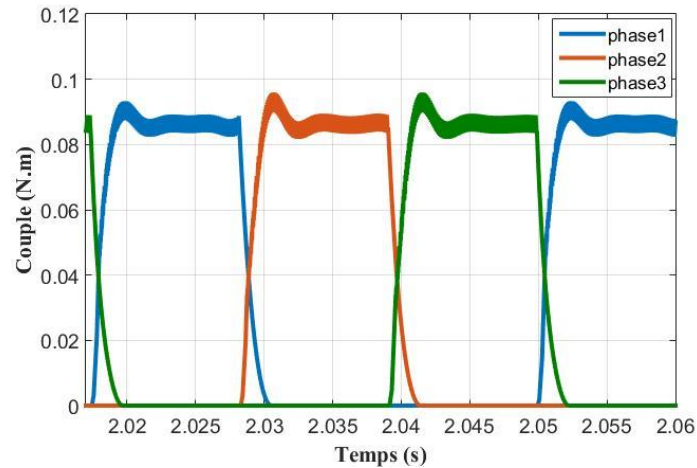


Figure 2.18 : Couples des 3 phases, $I_{ref} = 0.95A$, $\Omega = 230$ tr/min

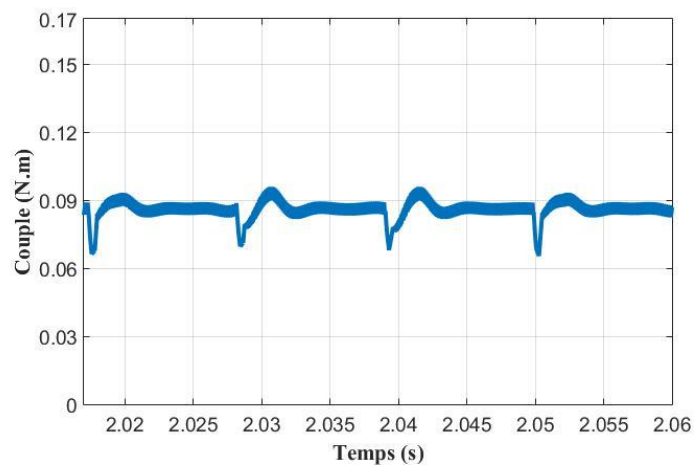


Figure 2.19 : Couple électromagnétique total, $I_{ref} = 0.95A$, $\Omega = 230$ tr/min

Dans le cas du fonctionnement à faibles vitesses (alimentation en Hystérésis), le courant s'établit rapidement dans la phase et atteint la valeur de référence et reste compris dans la bande d'Hystérésis. Le courant est ainsi maintenu plus ou moins constant durant l'alimentation de la phase. La forme du couple suit la forme du courant mais tout comme le courant le couple est maintenu plus ou moins constant uniquement durant l'excitation de chaque phase et il présente toujours de fortes ondulations dues à la commutation des phases.

2.6. Simulation de la SRM en Régime dynamique

La simulation en régime dynamique est effectuée afin de pouvoir évaluer les performances dynamiques la SRM. A cet effet, 4 tests de simulation sont effectués : deux tests démarrages à vide avec limitation de courant et régulation de courant, deux tests démarrage à vide avec application de charge.

- Démarrage à vide

Cette simulation est effectuée avec une tension de 23V, les résultats sont présentés dans ci-dessous :

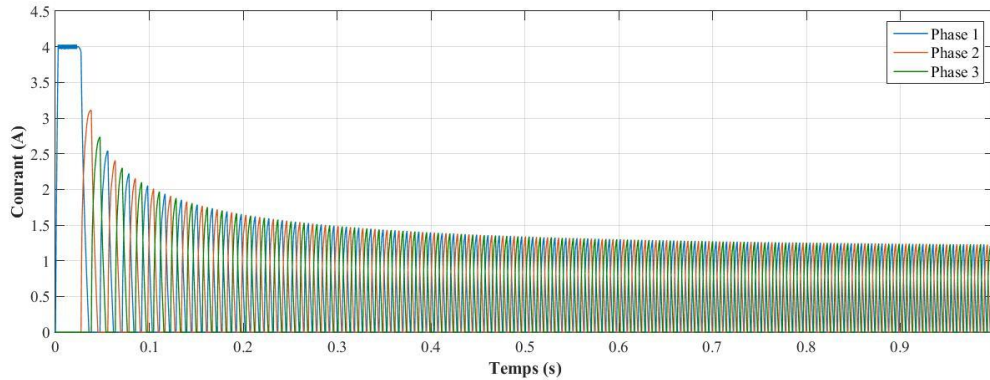


Figure 2.20 : Courants de démarrage des 3 phases

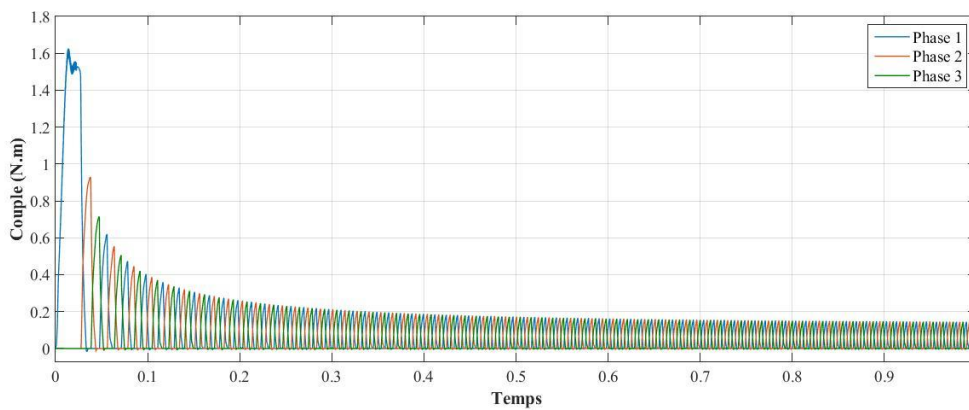


Figure 2.21 : Couples de démarrage des 3 phases

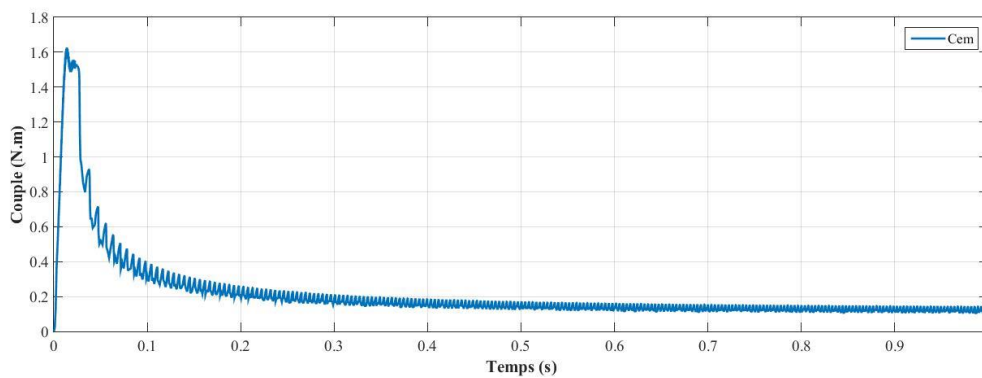


Figure 2.22 : Couple total de démarrage

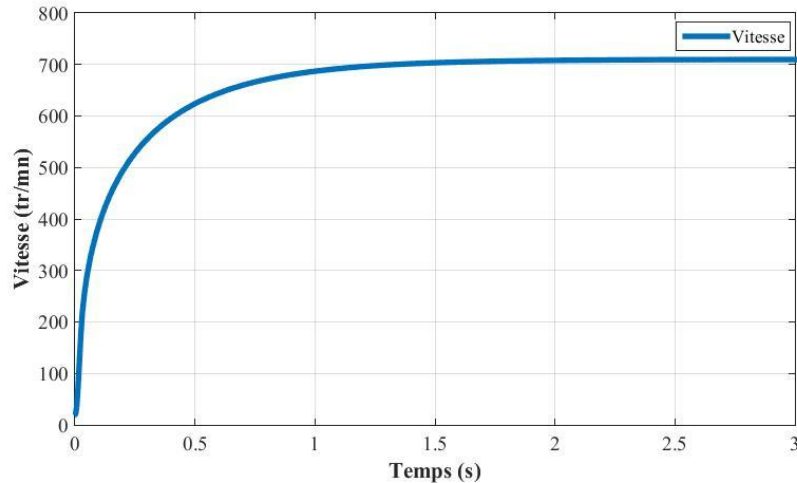


Figure 2.23 : Vitesse de démarrage à vide

Au démarrage, il y a un fort appel de courant, on impose alors une limitation de courant à travers un courant de référence de 4A qui est le courant maximale admissible afin de protéger la SRM. La régulation de courant se produit, alors, uniquement au début du démarrage. Par la suite, les courants des 3 phases diminuent et se stabilisent en régime permanent correspondant au fonctionnement à vide.

Les couples se comportent exactement comme les courants, le couple de démarrage est très important au début pour vaincre le couple inertiel du rotor puis se stabilise autour d'une valeur correspondant au fonctionnement de la machine à vide.

- **Démarrage à vide suivi d'une application de charge**

La machine démarre à vide sous une tension de 23V, une fois le régime permanent atteint et à l'instant $t=2,5s$ on applique une charge de couple $C_r = 0,36 N.m$. Les résultats de simulations sont donnés sur les figures suivantes :

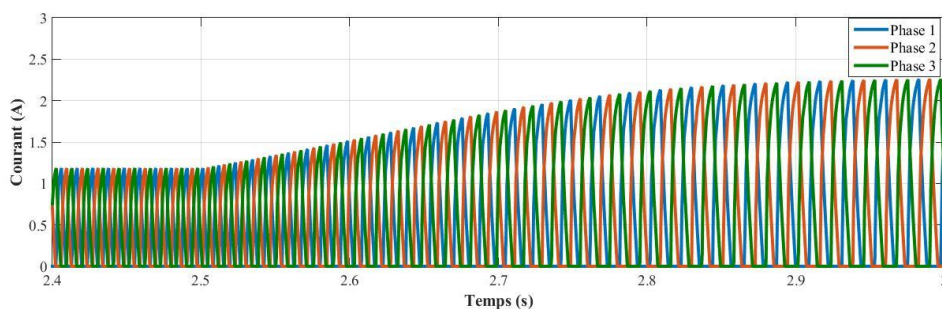


Figure 2.24 : Courants des 3 phases, $C_r = 0,36 N.m$

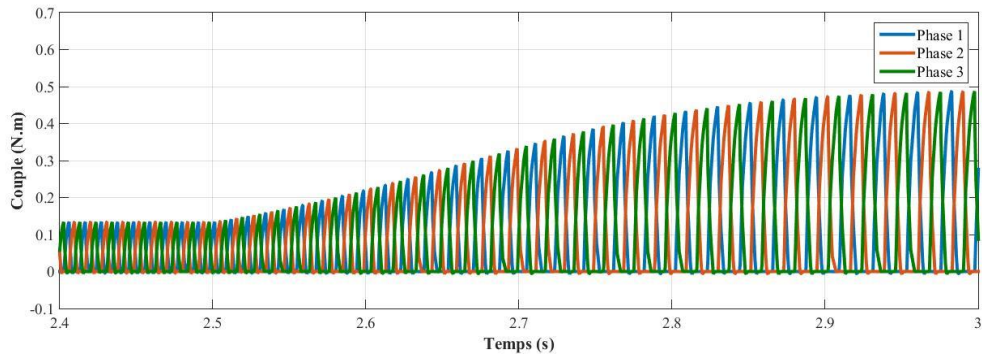


Figure 2.25 : Couples des 3 phases, $C_r = 0,36 \text{ N.m}$

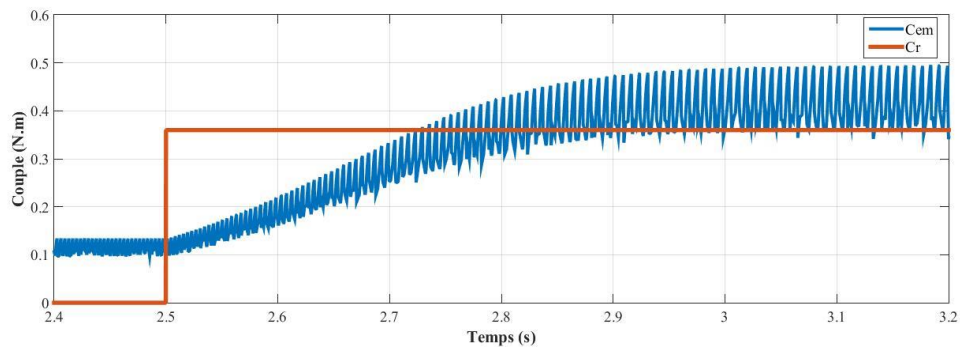


Figure 2.26 : Couple électromagnétique total

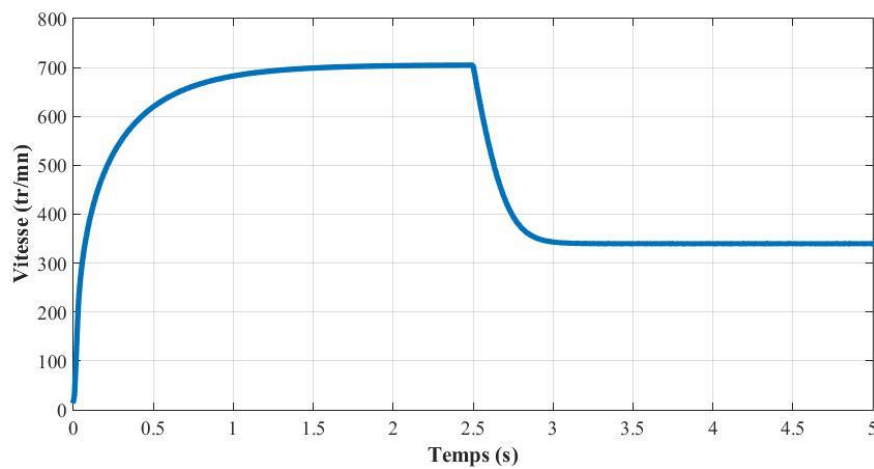


Figure 2.27 : Vitesse en charge

Au moment de l'application du couple de charge, le courant, ainsi que le couple électromagnétique augmentent pour répondre à l'augmentation du couple de charge ; ce qui fait chuter la vitesse. Un régulateur de vitesse est alors nécessaire pour maintenir la vitesse constante.

- Démarrage à vide réglé en courant

Ce test est effectué pour la même tension mais le courant de limitation est beaucoup plus faible ($I_{ref} = 0,95A$). Les résultats de simulation sont présentés ci-dessous :

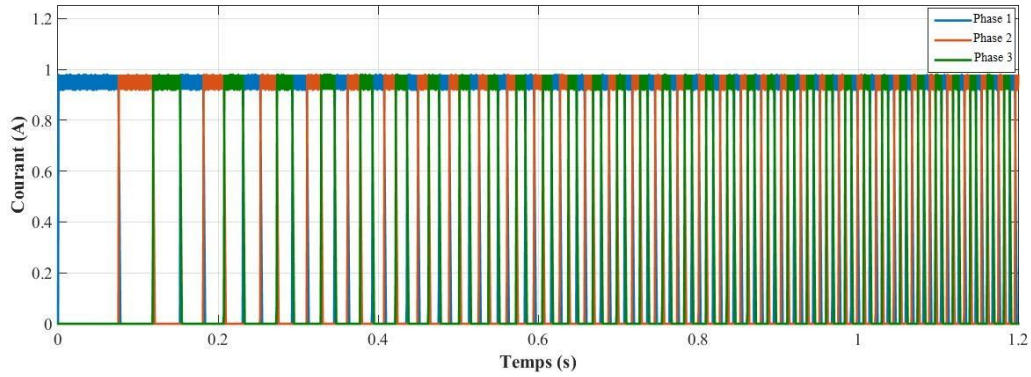


Figure 2.28 : Courants du démarrage réglé, $I_{ref} = 0,95A$

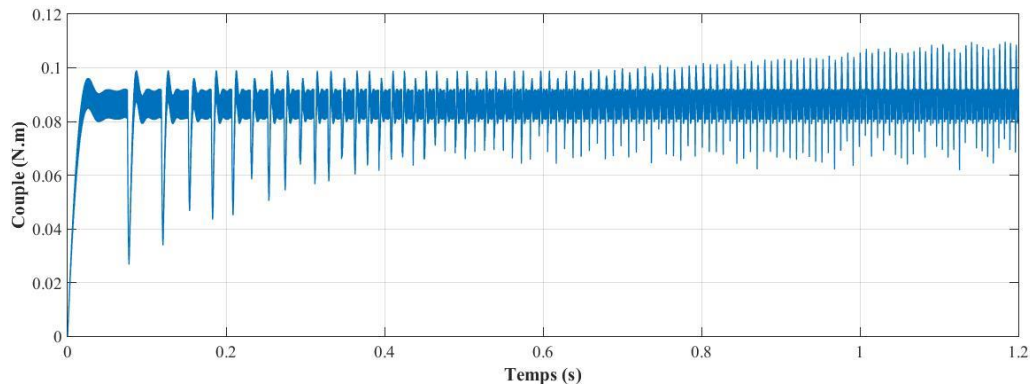


Figure 2.29 : Couple électromagnétique total du démarrage réglé, $I_{ref} = 0,95A$

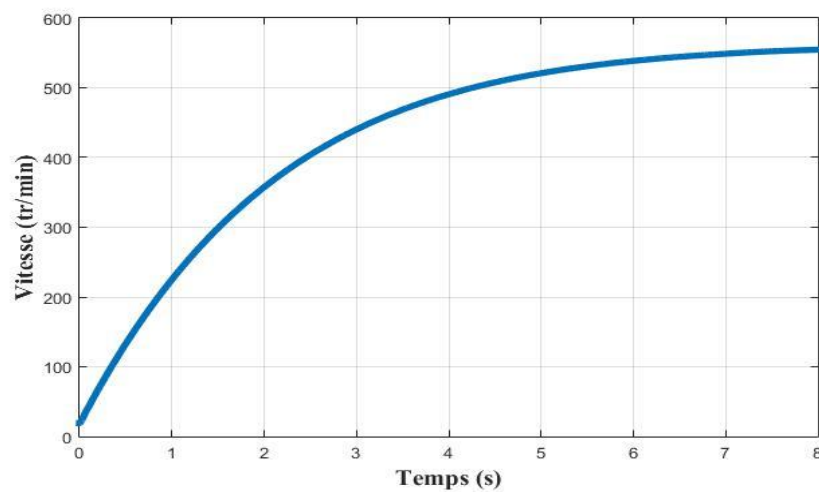


Figure 2.30 : Vitesse d'un démarrage à vide réglé en courant

La régulation de courant intervient durant tout le démarrage (Voir figure 2.30), ce qui conduit au ralentissement de la vitesse et de l'établissement du régime permanent à vide.

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle du système de commande la SRM avec capteur de position basé sur le modèle du flux est proposé.

Les simulations effectuées dans l'environnement Matlab&Simulink nous ont permis d'étudier le fonctionnement de la SRM en régime permanent et dynamique pour les faibles et les grandes vitesses de fonctionnement. Les résultats obtenus concordent bien avec d'autres travaux effectués sur des machines similaires.

Ces résultats seront comparés à ceux qu'on obtiendrait expérimentalement au chapitre4 lors de l'implémentation de la commande par microcontrôleur.

Chapitre 3

Modélisation et simulation de la commande de la SRM sans capteur de position

3.1. Introduction

La SRM peut fonctionner sur une grande gamme de vitesse, à condition de choisir soigneusement les angles de commutation des phases grâce à une détection précise de la position du rotor fournit par un capteur de position. Toutefois l'utilisation de ce capteur coûteux peut s'avérer inappropriée dans des environnements difficiles et moins tolérante aux défauts [12]. De plus le capteur de position peut être encombrant et requière un montage souvent délicat pour assurer l'alignement des axes et le calage de la machine, de plus, il est souvent affecté par les ondulations du couple produites par la SRM [13]. Ce qui peut entraîner des problèmes de fiabilité de la commande. La possibilité de supprimer le capteur physique et le remplacer par un Estimateur est une solution qui peut être intéressante pour parer à tous les problèmes engendrés par ce capteur [12] [13].

Plusieurs méthodes ont été élaborées afin de se passer du capteur de position. Elles sont toutes basées sur le principe de variation de l'inductance. Parmi ces méthodes, on peut citer : la méthode du courant haché [14], la méthode du flux-courant [15] et la méthode de détection d'impédance [14] [16]. Dans ce travail, la méthode du flux-courant est choisie.

3.2. Principe de l'estimateur à base de flux

Tous les moteurs SRM sont caractérisées par une relation unique entre le flux, le courant de phase et la position du rotor. Cela permet de prédire la position du rotor indirectement à partir du flux si la caractéristique du flux en fonction de la position et du courant est bien connue [12].

La technique du « lookup table » est utilisée pour estimer la position en utilisant une table construite à partir de la caractéristique du flux. L'Estimateur reçoit en entrée la tension et le courant de chaque phase, mesurés à partir des capteurs de tension et de courant. Un bloc intégrateur utilise ces mesures pour calculer le flux qui est utilisé avec le courant pour déterminer la position à partir de la table de flux. Le Modèle Simulink de l'estimateur est présenté sur la figure 3.1.

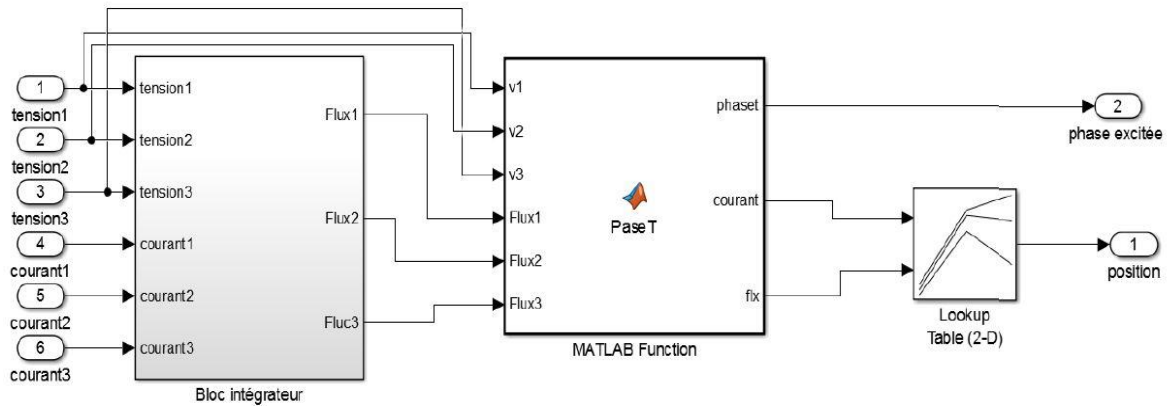


Figure 3.1 : Modèle de l'estimateur

L'estimateur est composé de 3 blocs :

- **Bloc intégrateur** : dans lequel un calcul d'intégrale est fait à partir des tensions et courants de phase pour déterminer le flux.
- **PaseT** : C'est une fonction Matlab qui délivre, à partir des flux obtenus et les tensions d'alimentation de la machine, le courant et le flux de la phase excitée.
- **Table (2-D)** : Elle a en entrée le flux et le courant obtenus par la fonction Paset, afin de déterminer la position estimée en sortie.

3.3. Simulation en régime permanent

Des simulations du fonctionnement de la SRM en régime permanent et dynamique à faibles et grandes vitesses en utilisant l'estimateur de position sont effectuées à travers le modèle Simulink global du système de commande présenté sur la figure 3.2, et dans les mêmes conditions que celles réalisés avec capteur. Les résultats de simulation avec et sans capteur sont ainsi comparés afin vérifier la précision de l'estimateur proposé. Les phases sont commandées sur 15° avec $\theta_{ON} = 0^\circ$ angle d'allumage et $\theta_{OFF} = 15^\circ$ angle d'extinction.

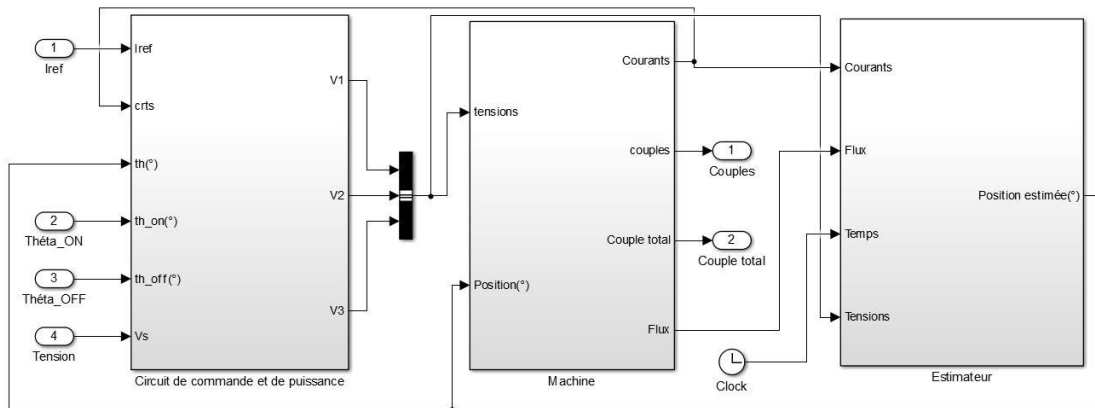


Figure 3.2 : Modèle Simulink du Système de commande de la SRM sans capteur de position en régime permanent

- Simulation en pleine onde pour une vitesse $\Omega=710$ tr/min

La tension d'alimentation est de 23V, la SRM fonctionne en alimentation pleine onde, les résultats de simulation sont représentés ci-dessous :

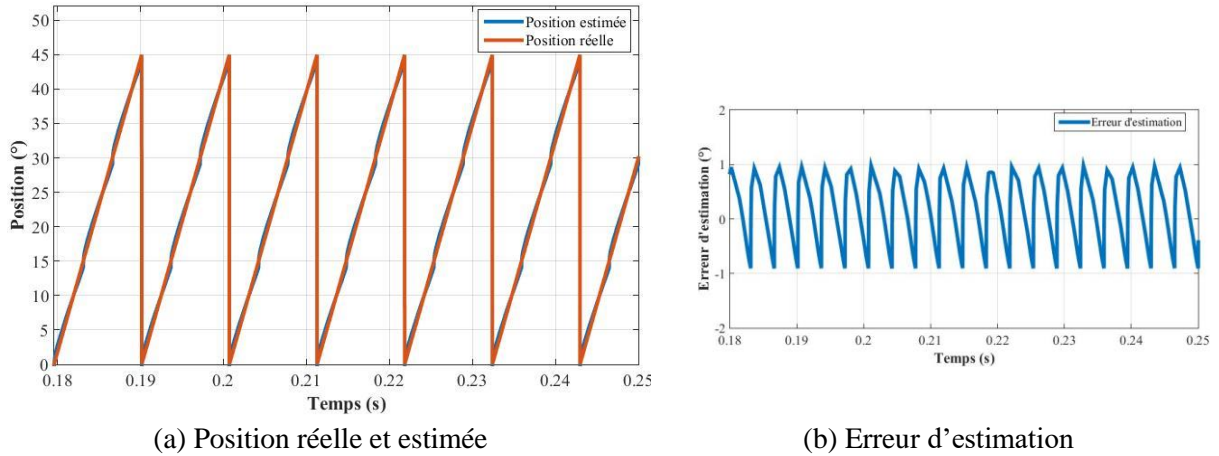


Figure 3.3 : Position estimée et avec capteur, alimentation pleine onde, $\Omega=710$ tr/min

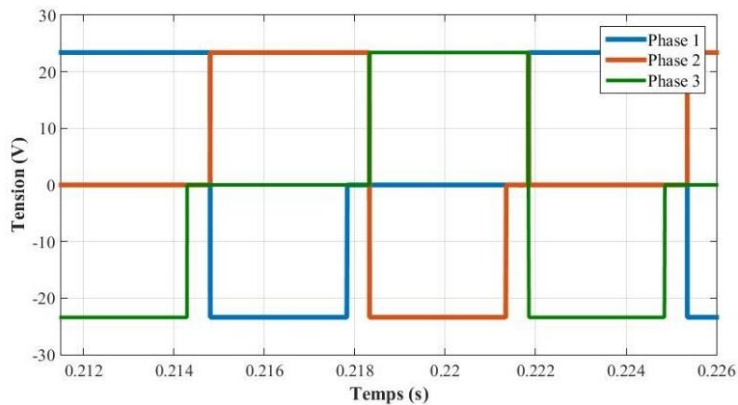


Figure 3.4 : Tension d'alimentation pleine onde sans capteur, $\Omega=710$ tr/min

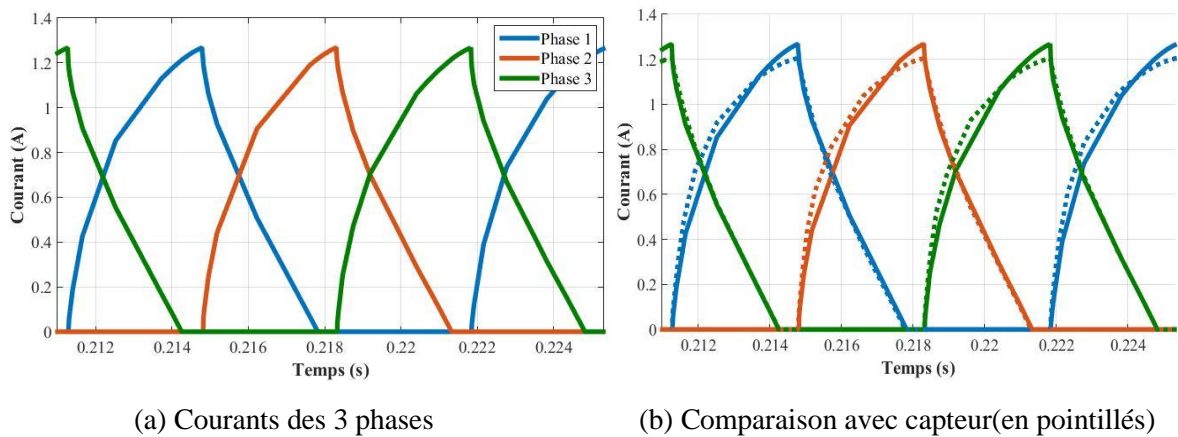


Figure 3.5 : Courants de phase sans capteur, régime permanent, $\Omega=710$ tr/min

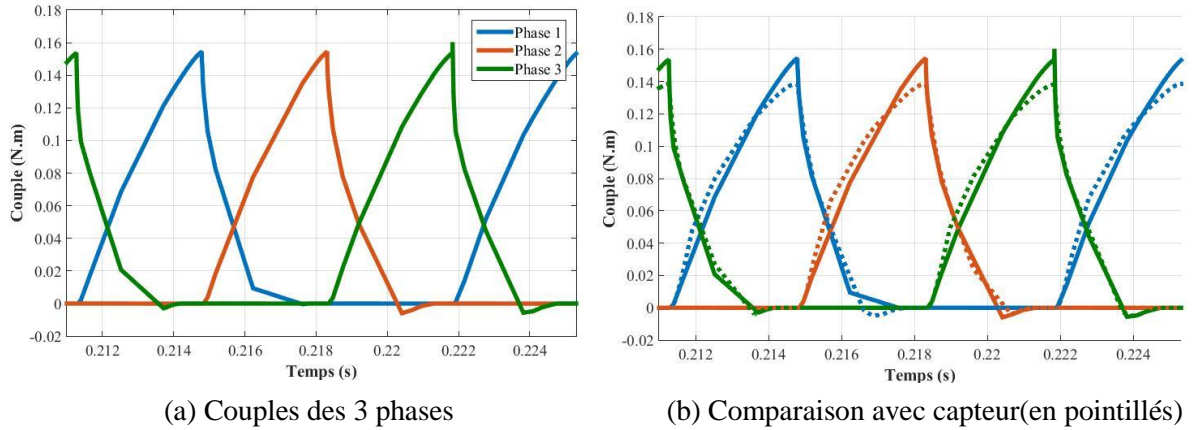


Figure 3.6 : Couples des 3 phases sans capteur, régime permanent, $\Omega=710 \text{ tr/min}$

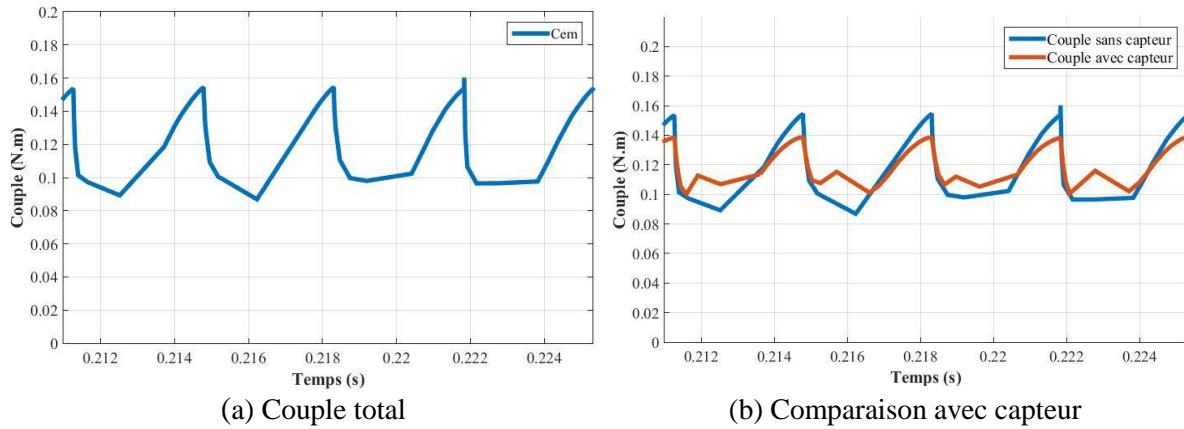


Figure 3.7 : Couple électromagnétique total sans capteur, régime permanent, $\Omega=710 \text{ tr/min}$

La position obtenue à travers l'estimateur est presque superposable à celle obtenue avec capteur. L'erreur maximale ne dépasse pas 1deg. Ce résultat est confirmé par les courants de phase et les couples comparés eux aussi dans les mêmes conditions. En effet, l'impact de l'erreur de l'estimateur sur les caractéristiques de courant et de couple paraît négligeable.

- **Simulation en courant régulé pour une vitesse $\Omega = 220\text{tr/min}$**

Les résultats de simulation sont représentés ci-après :

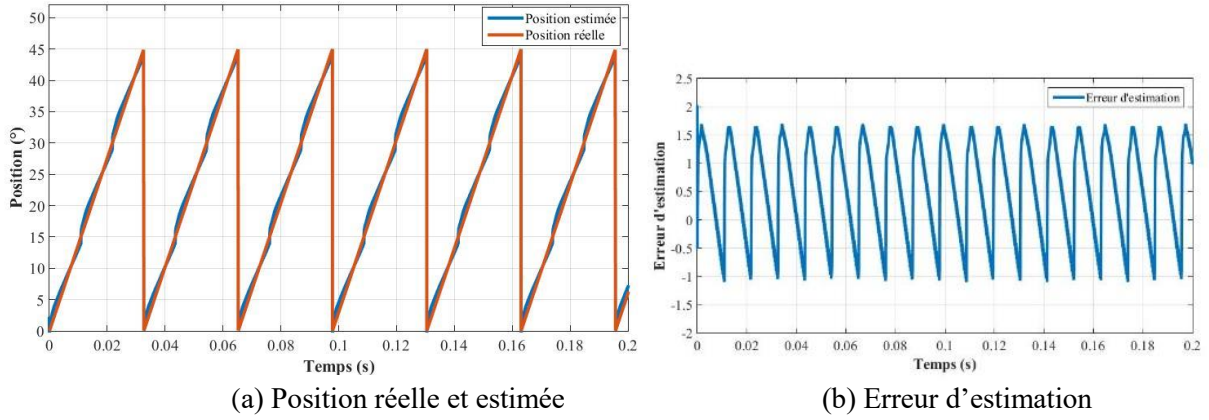


Figure 3.8 : Position avec et sans capteur, régime permanent, $I_{ref} = 1,75A$

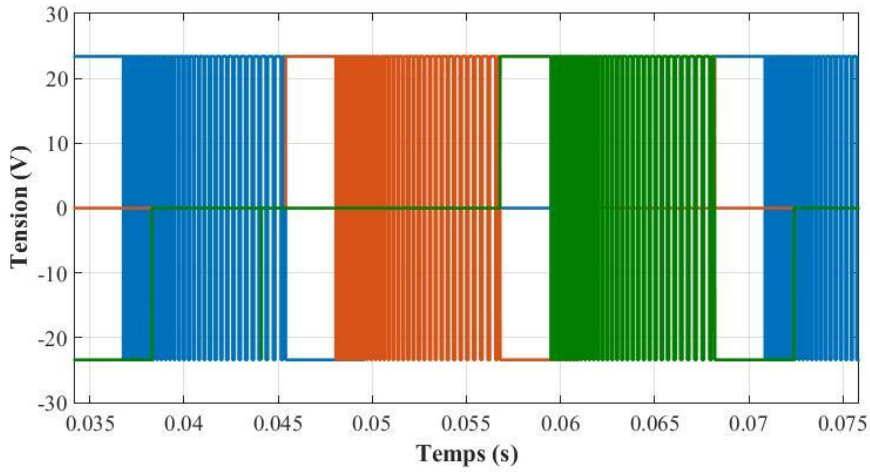


Figure 3.9 : Tension d'alimentation en Hystérésis, sans capteur, $I_{ref} = 1,75A$, $\Omega = 220$ tr/min

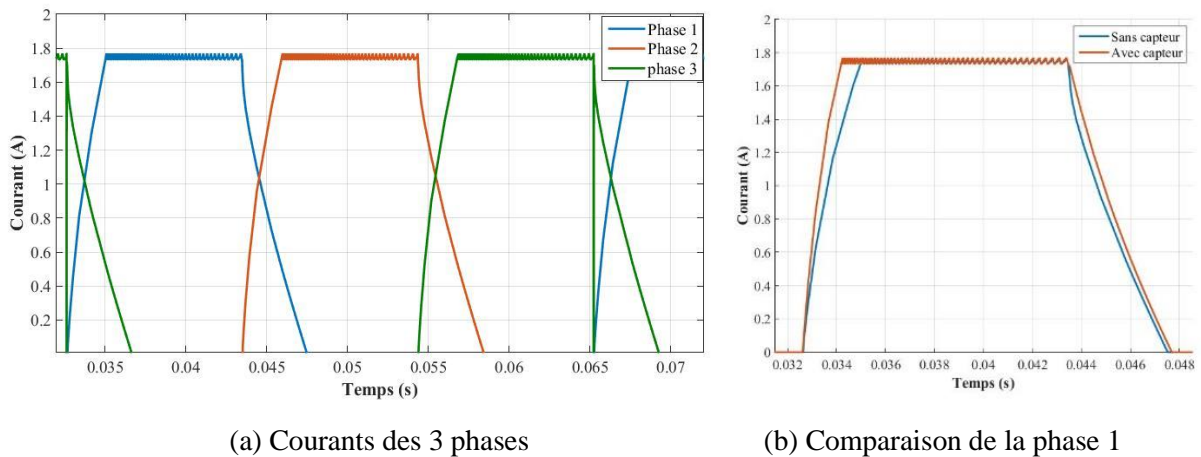


Figure 3.10 : Courants des 3 phases, alimentation Hystérésis sans capteur, $I_{ref} = 1,75A$, $\Omega = 220$ tr/min

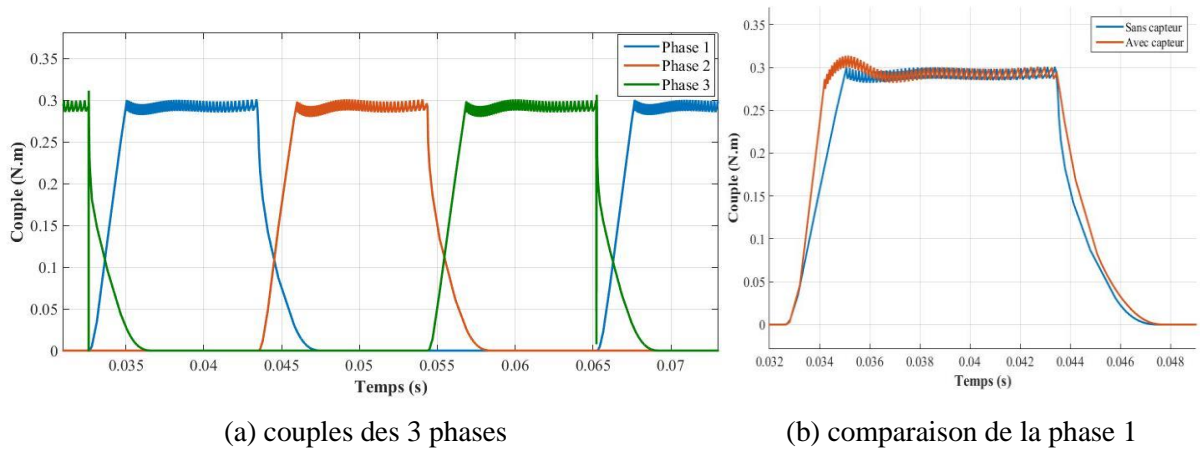


Figure 3.11 : Couple des 3 phases sans capteur, $I_{ref} = 1,75A$, $\Omega = 220tr/min$

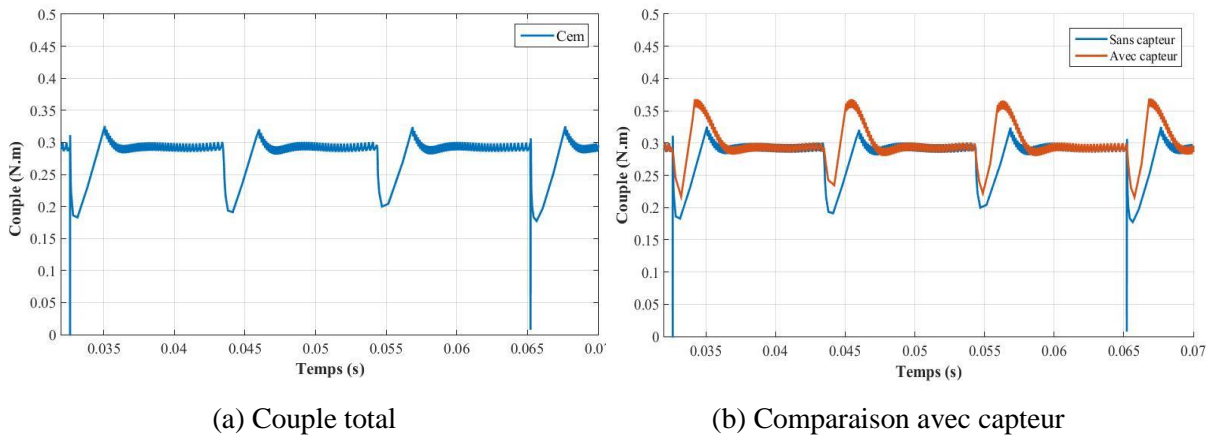


Figure 3.12 : Couple électromagnétique total, $I_{ref} = 1,75A$, $\Omega = 220tr/mn$

L'erreur sur la position est légèrement plus importante que celle obtenue pour les grandes vitesses. Cependant son impact sur les caractéristiques de courant et de couple reste négligeable.

L'estimateur fonctionne correctement en régime permanent pour les faibles et les grandes vitesses de fonctionnement correspondant respectivement à l'alimentation par hystérésis et en pleine onde.

3.4. Simulation en régime dynamique

Le fonctionnement de la SRM sans capteur en régime dynamique nécessite l'initialisation de l'estimateur. Le démarrage se fait alors avec capteur de position [17], et à l'instant $t=2s$, on bascule vers l'estimateur à l'aide d'un « switch » et le convertisseur est commandé à partir du signal de sortie du « switch ». Les phases sont commandées sur 15° avec $\theta_{ON} = 0^\circ$ angle d'allumage et $\theta_{OFF} = 15^\circ$ angle d'extinction. Le modèle Simulink global du système de

commande de la SRM avec estimateur de position en régime dynamique est donné sur la figure suivante :

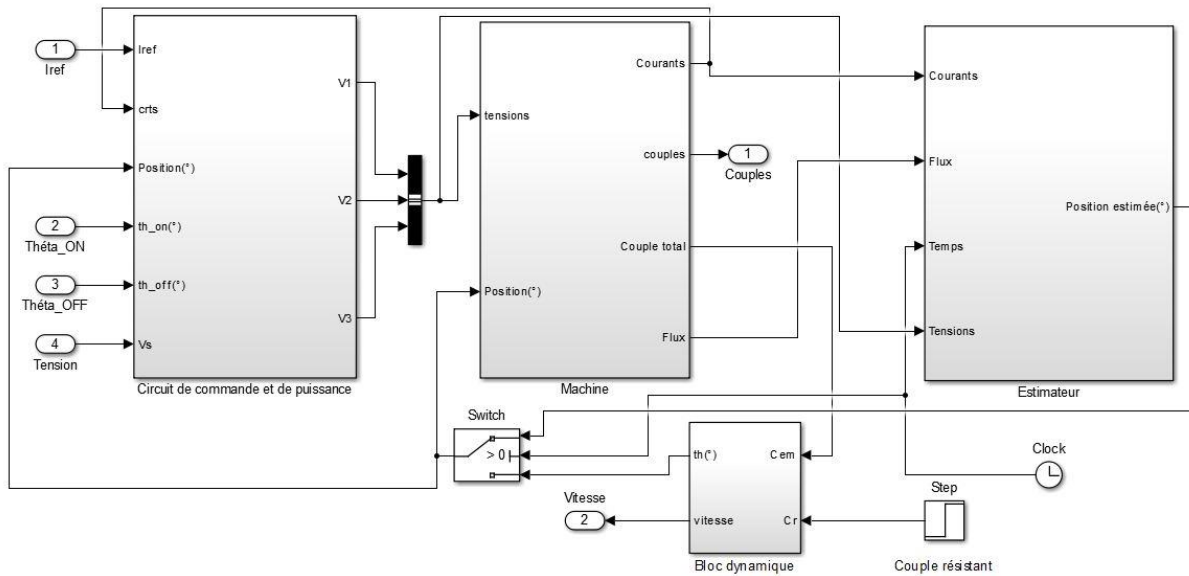


Figure 3.13 : Modèle de la SRM sans capteur de position en régime dynamique

- Démarrage à vide

Le démarrage se fait avec capteur de position, et à l'instant $t=2s$, on bascule vers l'estimateur. Les résultats de simulations sont présentés ci-dessous :

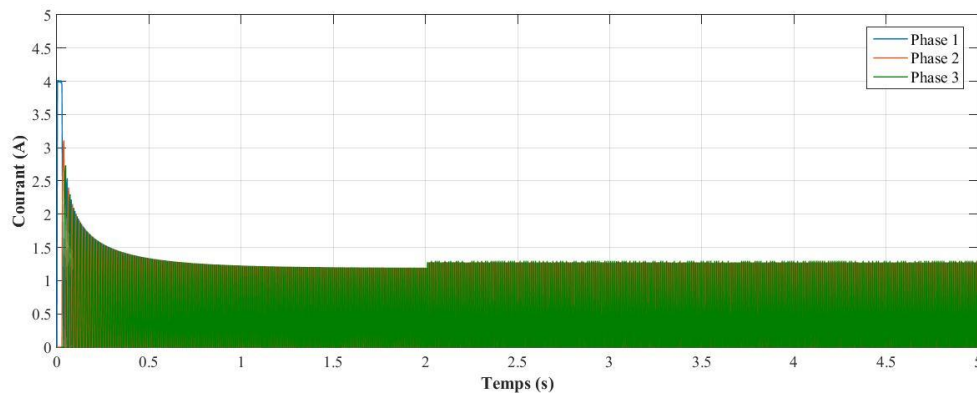


Figure 3.14 : Courant de démarrage à vide sans capteur, $\Omega = 710$ tr/min

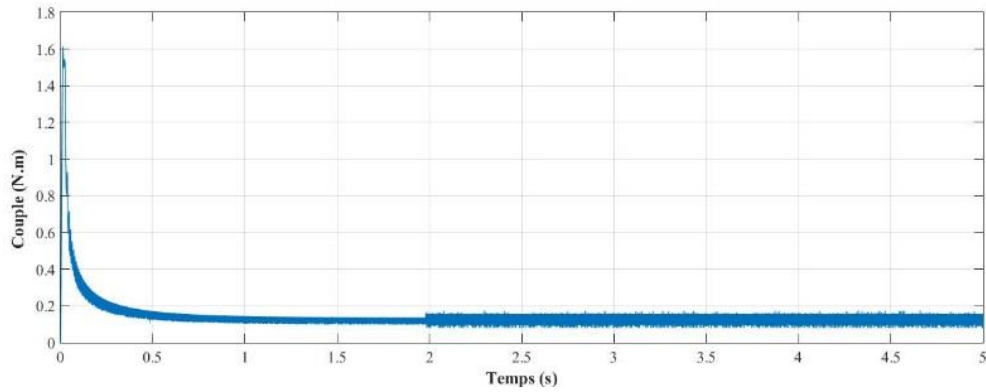


Figure 3.15 : Couple total au démarrage sans capteur, $\Omega = 710$ tr/min

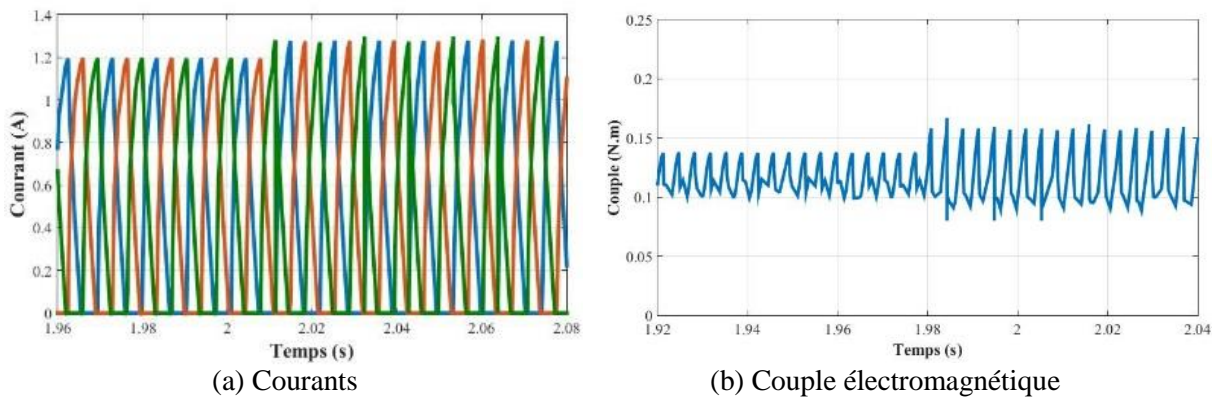


Figure 3.16 : Moment du basculement vers l'estimateur

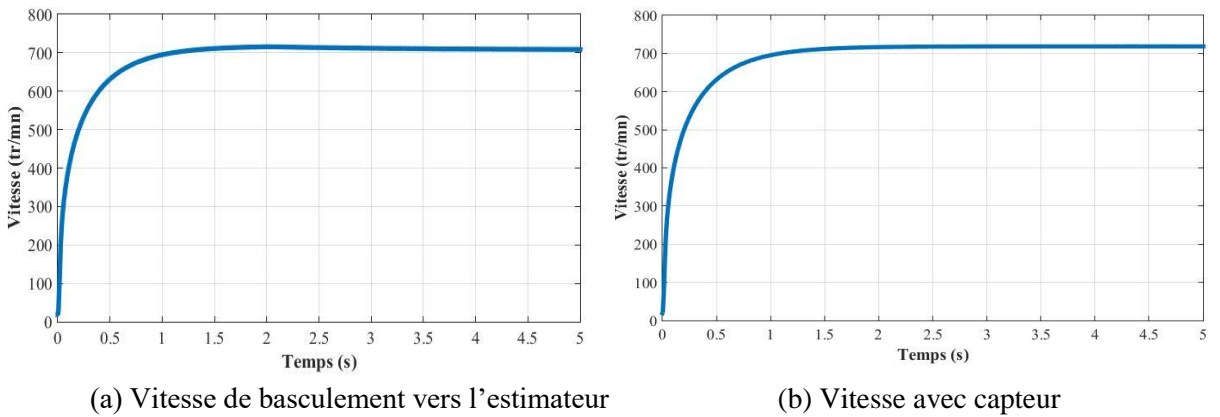


Figure 3.17 : vitesse de démarrage à vide sans capteur, $\Omega = 710$ tr/min

Au moment du basculement vers l'estimateur, on remarque une légère augmentation de la valeur maximale des courants ainsi que les couples associés à chaque phase, mais restent constants en valeur moyenne.

Le basculement vers l'estimateur n'a quasiment aucun effet sur la vitesse de rotation de la machine, le temps de démarrage est le même que le cas avec capteur.

- **Application d'une charge**

On applique une charge de couple résistant $C_r = 0,35 \text{ N.m}$ à l'instant $t=3\text{s}$, on obtient :

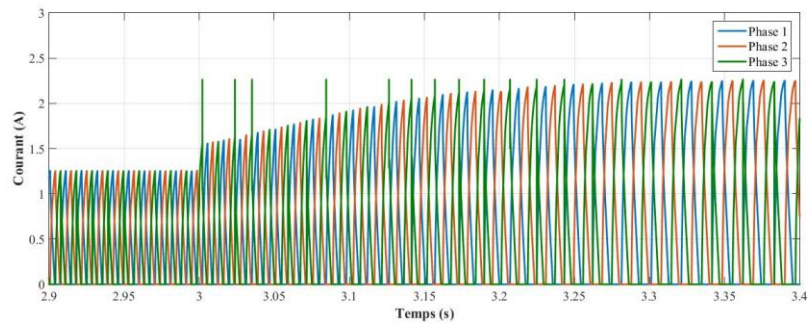


Figure 3.18 : Courants lors de l'application d'une charge sans capteur, $C_r = 0,35 \text{ N.m}$

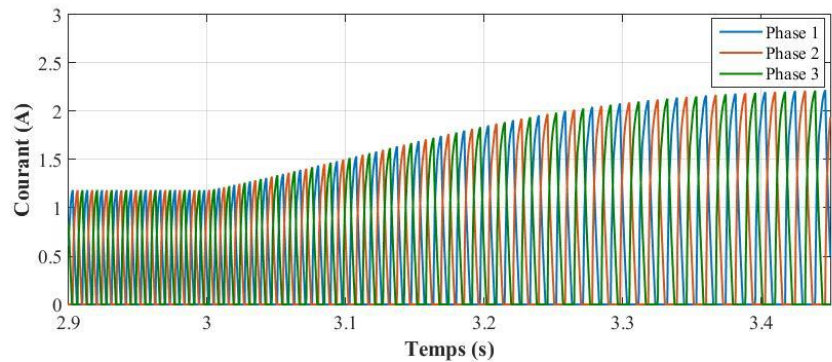


Figure 3.19 : Courants lors de l'application d'une charge avec capteur, $C_r = 0,35 \text{ N.m}$

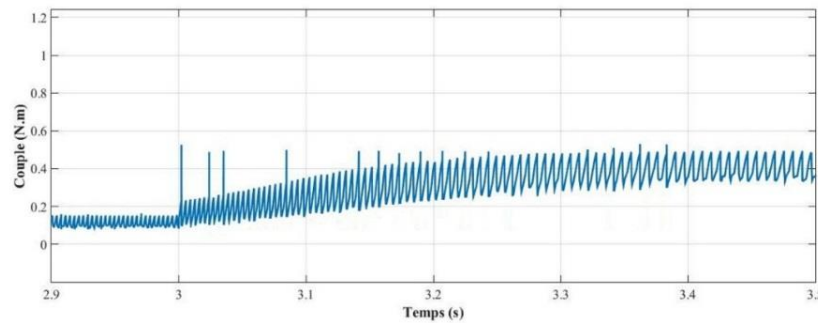


Figure 3.20 : Couple lors de l'application de la charge sans capteur, $C_r = 0,35 \text{ N.m}$

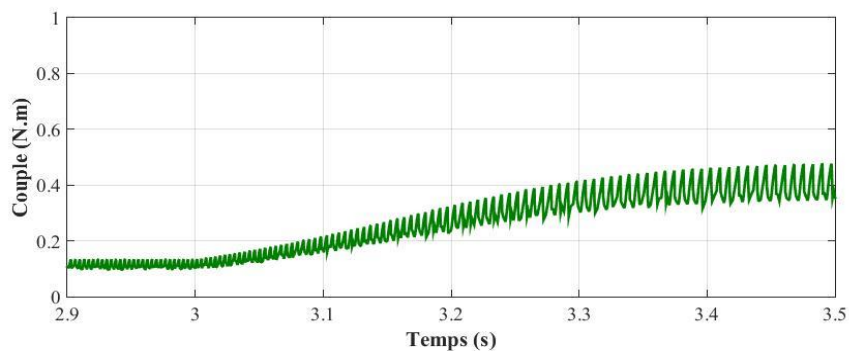


Figure 3.21 : Couple lors de l'application d'une charge avec capteur, $C_r = 0,35 \text{ N.m}$

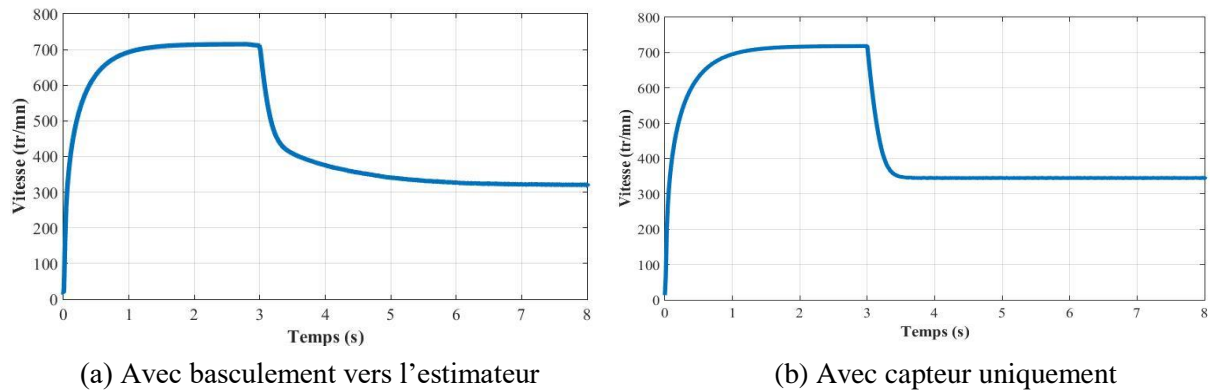


Figure 3.22 : Vitesse lors de l'application d'une charge sans capteur, $C_r = 0,35 N.m$

Les deux fonctionnements avec capteur et avec estimateur réagissent pratiquement de la même manière à l'application d'une charge, le remplacement du capteur par l'estimateur n'a pratiquement pas d'impact sur le courant de phase, le couple, la vitesse et la durée du régime transitoire.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé un estimateur de position à base de la méthode d'estimation du flux pour remplacer le capteur de position. L'erreur de l'estimateur a été estimée à 1.7% pour l'alimentation en pleine onde et 3.3% pour Alimentation régulée en courant.

La simulation du fonctionnement en régime permanent et dynamique pour les faibles et grandes vitesses en utilisant le modèle de la SRM avec l'estimateur a conduit à des résultats similaires au cas avec capteur, L'erreur de l'estimateur n'a pas eu d'impact sur le fonctionnement de la machine. Ce qui nous permet de confirmer la correction et la précision de l'estimateur.

Les résultats obtenus dans ce chapitre nous donnent la possibilité de remplacer le capteur de position par un estimateur qui peut même être implémenté par microcontrôleur.

Chapitre 4

Implémentation de la commande de la SRM

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, une implémentation de la commande sur microcontrôleur de la SRM est réalisée. Des essais de commande sur la SRM 12/8 permettent de faire une étude sur ses performances.

Dans un premier temps, une implémentation de la commande avec capteur de position de la SRM 12/8 est effectuée dans les mêmes conditions de simulation afin de pouvoir comparer les résultats et valider le modèle Simulink proposé au chapitre 2.

Ensuite, le capteur de position a été remplacé par l'estimateur basé sur l'estimation de flux proposé au chapitre 3 afin de réaliser une implémentation de la commande sans capteur. A cet effet une carte d'acquisition et d'adaptation de tensions des phases pour les ADC du microcontrôleur a été réalisée. Un programme d'estimation de flux a été élaboré et implémenté sur le microcontrôleur afin de réaliser l'estimateur de position. Celui-ci nous permettra ainsi, d'implémenter la commande sans capteur.

4.2. Implémentation de la commande avec capteur de la SRM

Afin d'évaluer les performances de la SRM 12/8, une implémentation par microcontrôleur de la commande de la machine est réalisée. Des essais à grandes et faibles vitesses de fonctionnement correspondant respectivement à l'alimentation en pleine onde et à l'alimentation par hystérésis sont effectués à partir du banc d'essai conçu à cet effet et présenté au chapitre 1.

- **Alimentation en pleine onde**

Des essais de commande pour une alimentation en pleine onde ont été effectués à partir d'un programme de commande implémenté sur microcontrôleur et dont l'organigramme est présenté au chapitre 1. Les résultats pour un essai à vide, une tension d'alimentation de 25V et d'angles de commande $\theta_{ON} = 0^\circ$, $\theta_{OFF} = 15^\circ$, sont présentés en même temps que ceux obtenus par simulation dans les mêmes conditions de fonctionnement.

Les résultats présentés sont la tension, le courant de phase, le couple électromagnétique ainsi que la vitesse.

Des capteurs de tension et de courant (à effet Hall) ont été utilisés, ce qui a conduit à des opérations d'étalonnage pour l'acquisition de ces grandeurs. Faute de Couplemètre, le couple électromagnétique a été estimé à partir de la mesure du courant et de la caractéristique d'inductance obtenue au chapitre 1, en utilisant la relation $C = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} I^2$. Pour la mesure de la vitesse, elle a été effectuée à l'aide d'un tachymètre.

Les résultats de cette expérimentation ont été relevés par oscilloscope numérique et sont stockés sous forme d'un fichier de données et sont présentés ci-dessous :

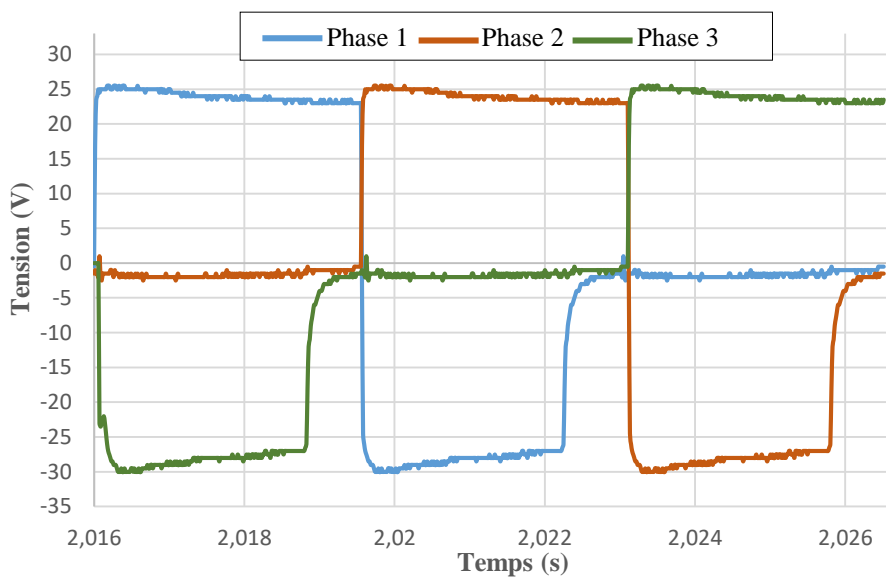


Figure 4.1 : Tensions d'alimentation expérimentales des 3 phases, $\Omega = 710$ tr/min

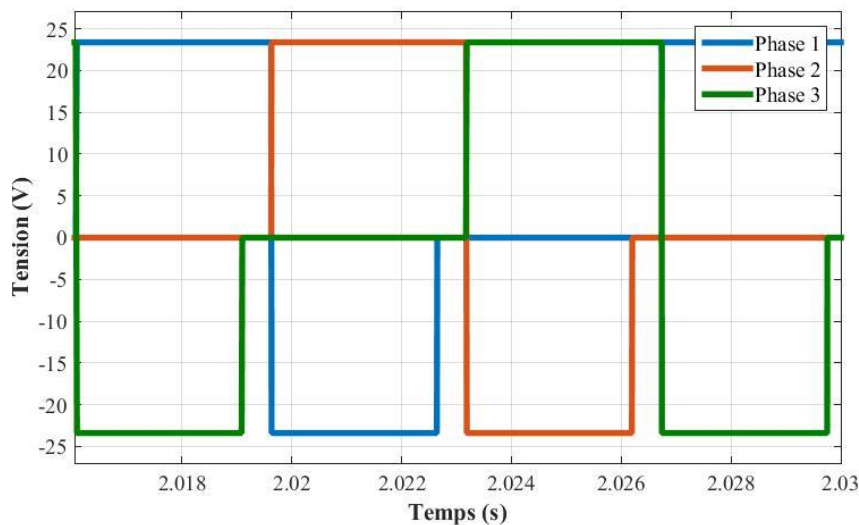


Figure 4.2 : Tension d'alimentation des 3 phases en simulation, $\Omega = 710$ tr/min

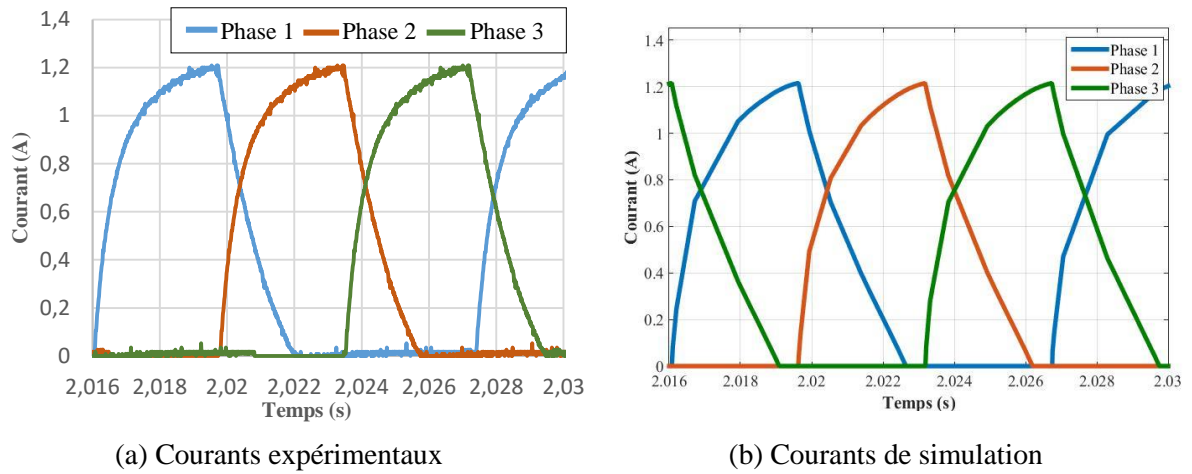


Figure 4.3 : Courants des 3 phases, $\Omega = 710$ tr/min

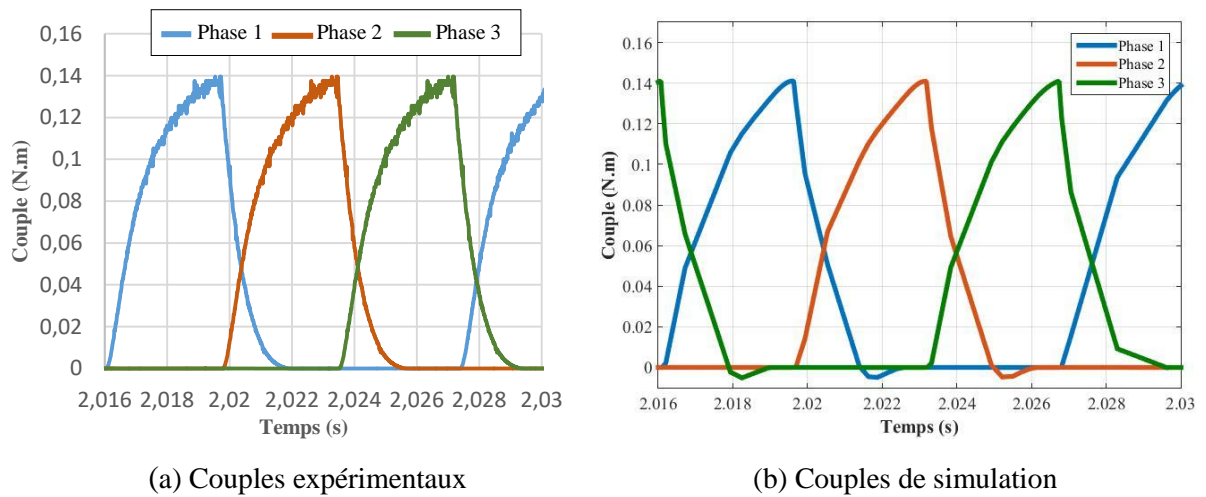


Figure 4.4 : Couples des 3 phases, $\Omega = 710$ tr/min

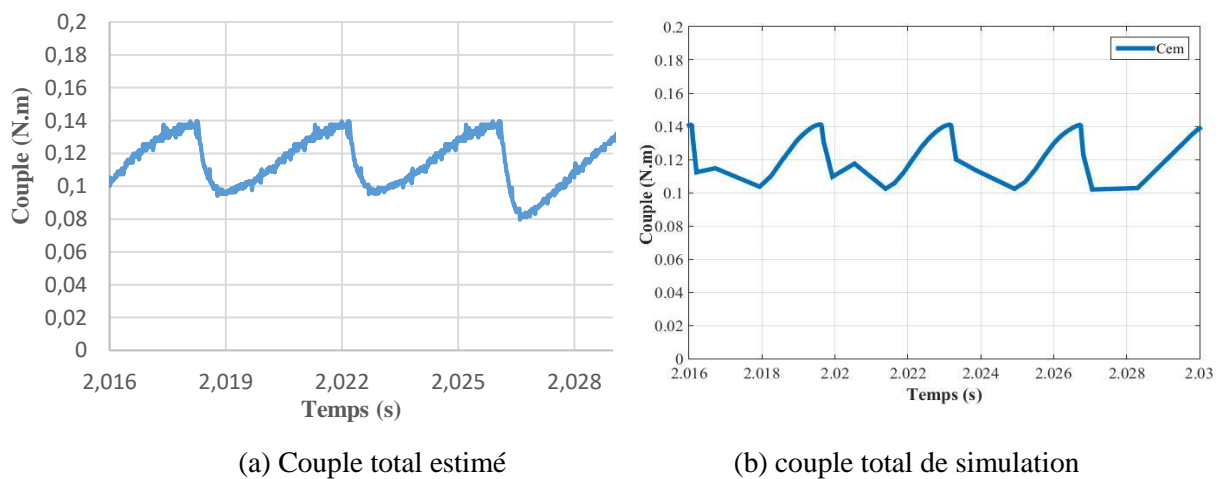


Figure 4.5 : Couple électromagnétique total, $\Omega = 710$ tr/min

Vitesse de démarrage

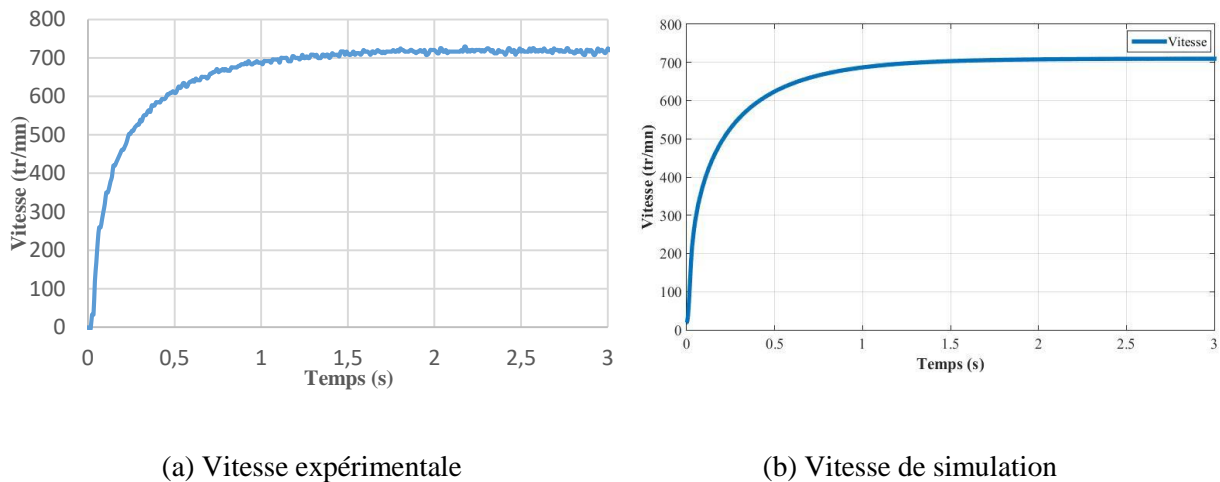


Figure 4.6 : Vitesse de démarrage à vide

Les résultats des essais de commande ont montré le bon fonctionnement du banc d'essai et de l'implémentation par microcontrôleur.

La tension de phase obtenue expérimentalement présente une légère chute de tension par rapport à la tension d'alimentation appliquée. Cette chute a lieu aux niveaux des IGBT du convertisseur de puissance. Ce qui nous a conduit à en tenir compte en simulation en choisissant une tension de 23,4 V au lieu de 25V.

Les angles d'allumage et d'extinction des courants, coïncident exactement avec ceux de la tension et les courants de phase correspondent bien à un fonctionnement en pleine onde d'une SRM. De plus, les courants, le couple et la vitesse sont similaires à ceux obtenus par simulation. Ce qui nous permet de valider le modèle Simulink de la SRM en pleine onde et en régime permanent.

- **Alimentation en Hystérésis**

Afin de tester l'alimentation par hystérésis du banc d'essai et déterminer les caractéristiques expérimentales à faible vitesse, des essais en charge avec régulation de courant sont réalisés. De plus, ces essais sont effectués dans les mêmes conditions que ceux effectués par simulation, présentés sur les figures ci-après :

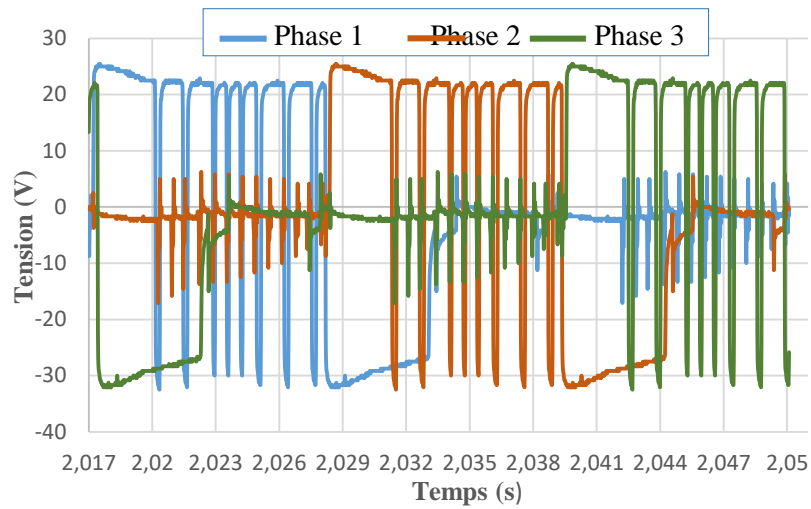


Figure 4.7 : Tensions d'alimentation expérimentales des 3 phases, $I_{ref} = 0,95A$, $\Omega = 230$ tr/min

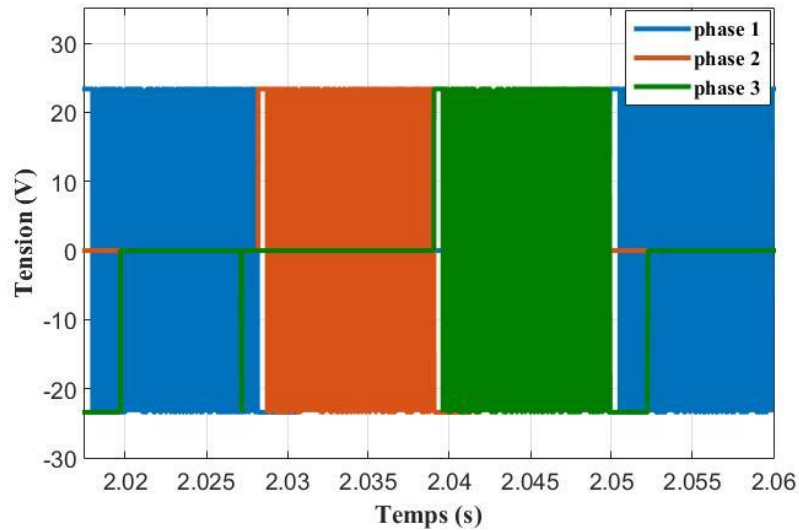
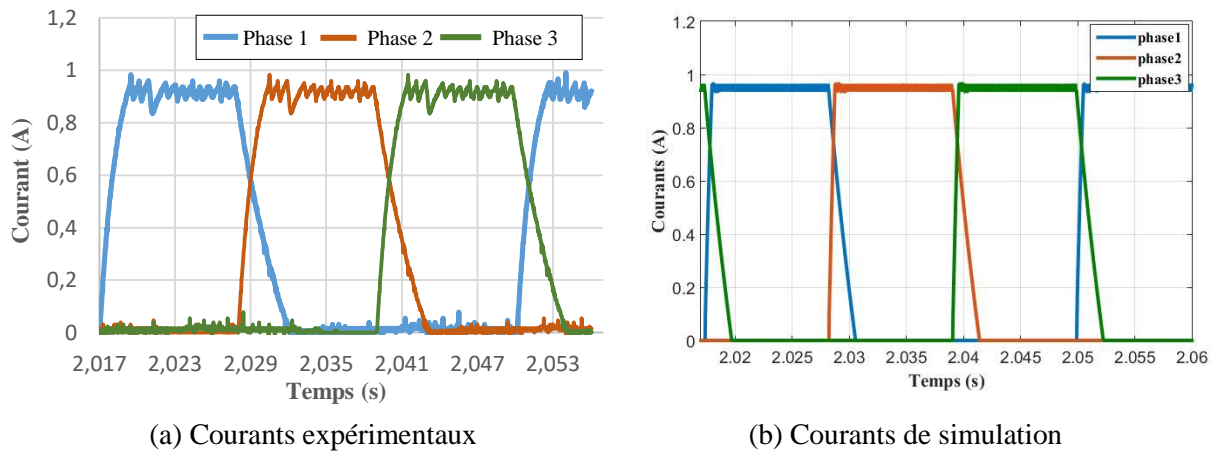


Figure 4.8 : Tensions des 3 phases en simulation, $I_{ref} = 0,95A$, $\Omega = 230$ tr/min



(a) Courants expérimentaux

(b) Courants de simulation

Figure 4.9 : Courants des 3 phases, $I_{ref} = 0,95A$, $\Omega = 230$ tr/min

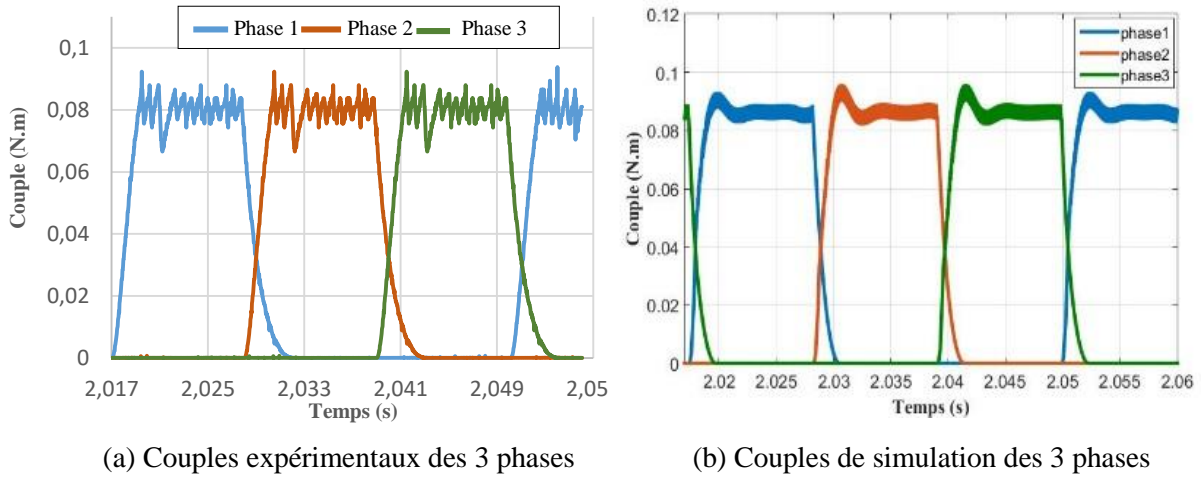


Figure 4.10 : Couples des 3 phases

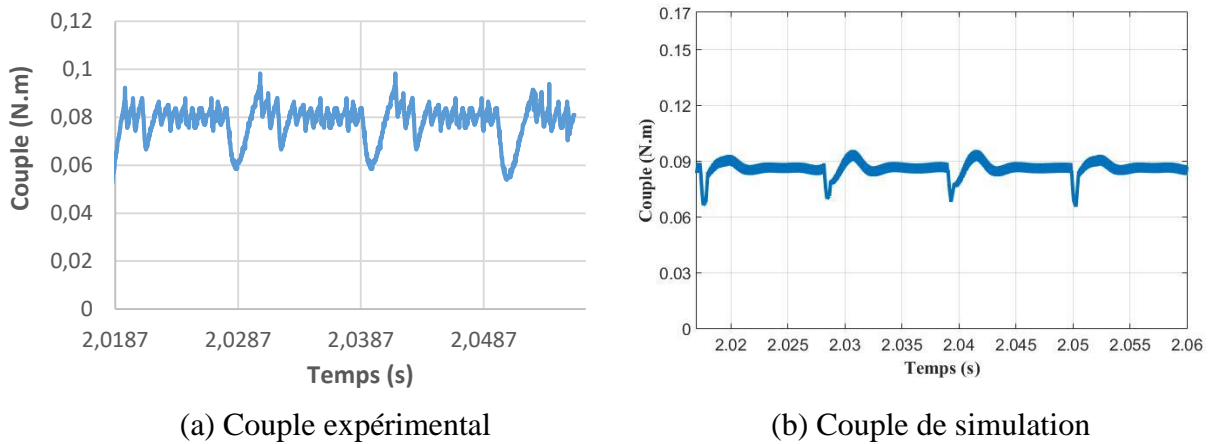


Figure 4.11 : Couple électromagnétique total

Les résultats obtenus expérimentalement ont montré que le convertisseur alimente bien les phases par les niveaux de tensions +25 et -25 V correspondent respectivement au mode d'excitation et de désexcitation. De plus la régulation de courant par hystérésis a bien fonctionné et le courant a été bien régulé autour de la valeur de référence imposée. Par ailleurs, ces résultats sont similaires à ceux obtenus par simulation opérés dans les mêmes conditions de fonctionnement.

- **Démarrage à vide suivi d'une application de charge**

Dans le but de tester davantage la dynamique de la machine, un essai de démarrage à vide avec régulation de courant de démarrage à 4A afin de protéger la machine et pour une tension d'alimentation de 30V, suivi d'une application de couple de charge de 0,24N.m a été effectué. Les résultats des essais sont présentés avec ceux obtenus par simulation dans les mêmes conditions sur les figures suivantes :

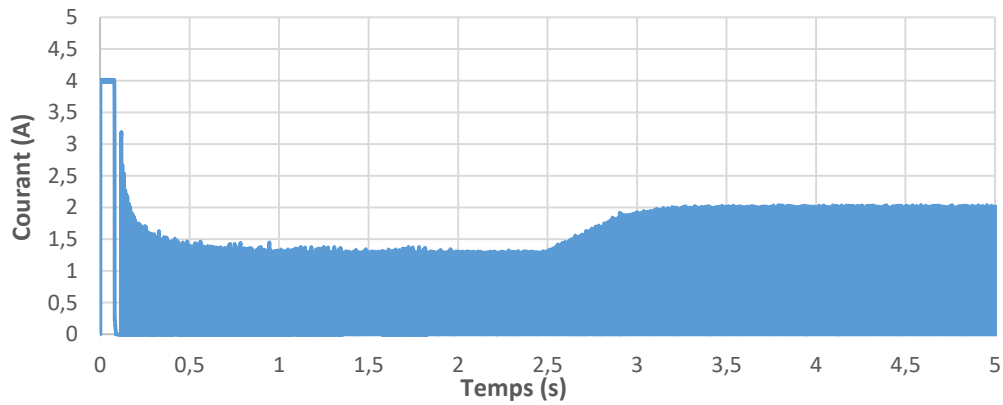


Figure 4.12 : Courant expérimentale de la phase 1, démarrage à vide suivi d'une application de charge

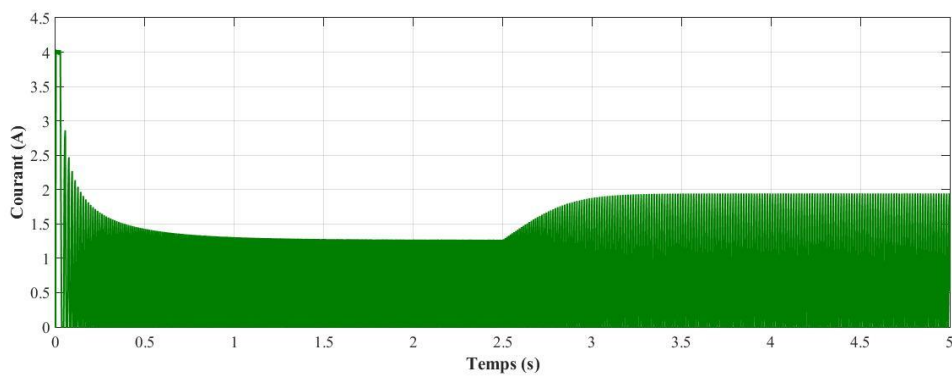
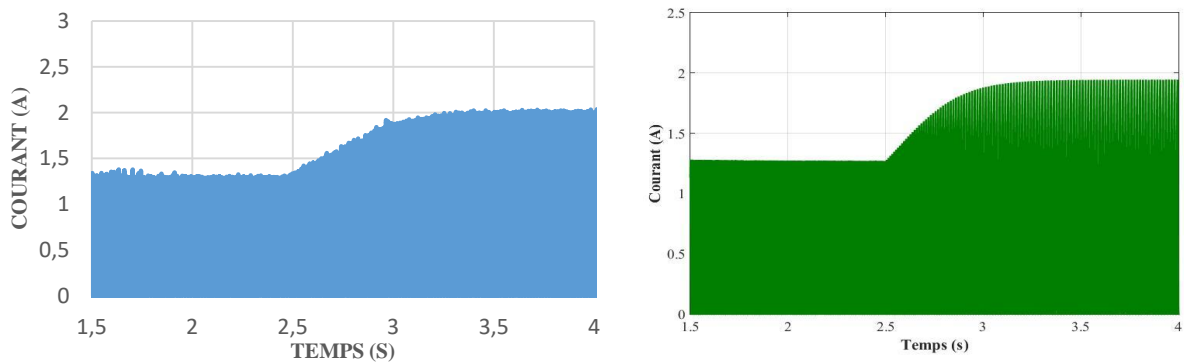


Figure 4.13 : Courant simulé de la phase 1, démarrage à vide suivi d'une application de charge



(a) Courant expérimental de la phase 1

(b) Courant de simulation de la phase 1

Figure 4.14 : Courant de la phase 1 lors de l'application du couple résistant

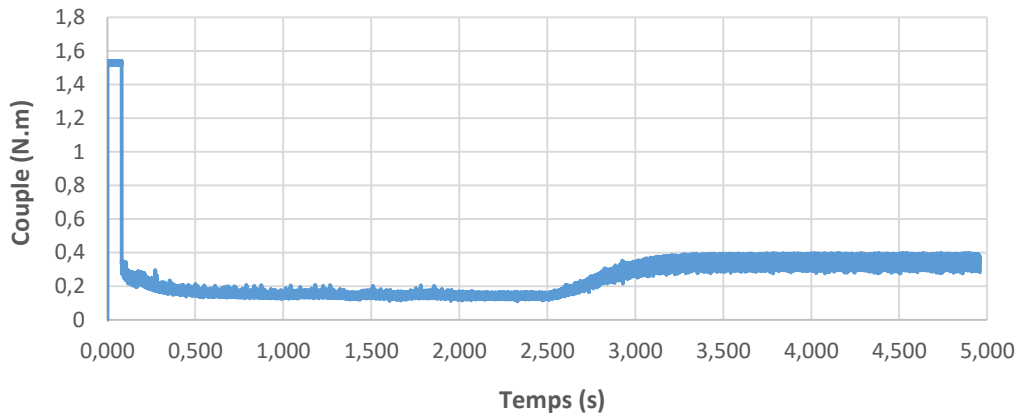


Figure 4.15 : Couple expérimental de démarrage suivi d'une application de charge

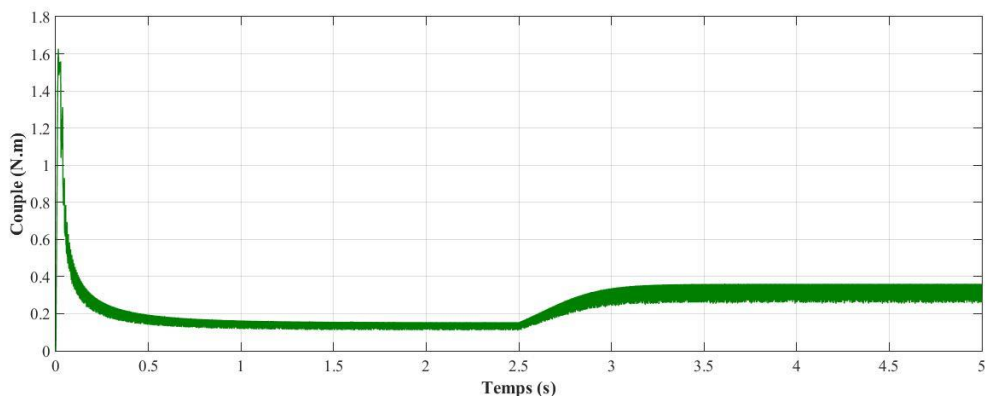


Figure 4.16 : Couple simulé de démarrage suivi d'une application de charge

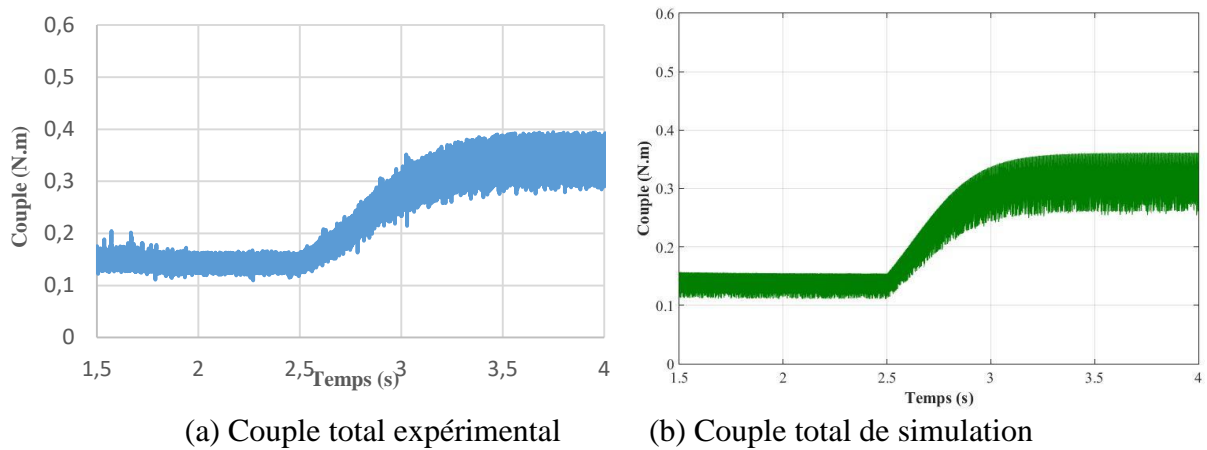


Figure 4.17 : Couple électromagnétique total lors de l'application de la charge, $C_r = 0,24 \text{ N.m}$

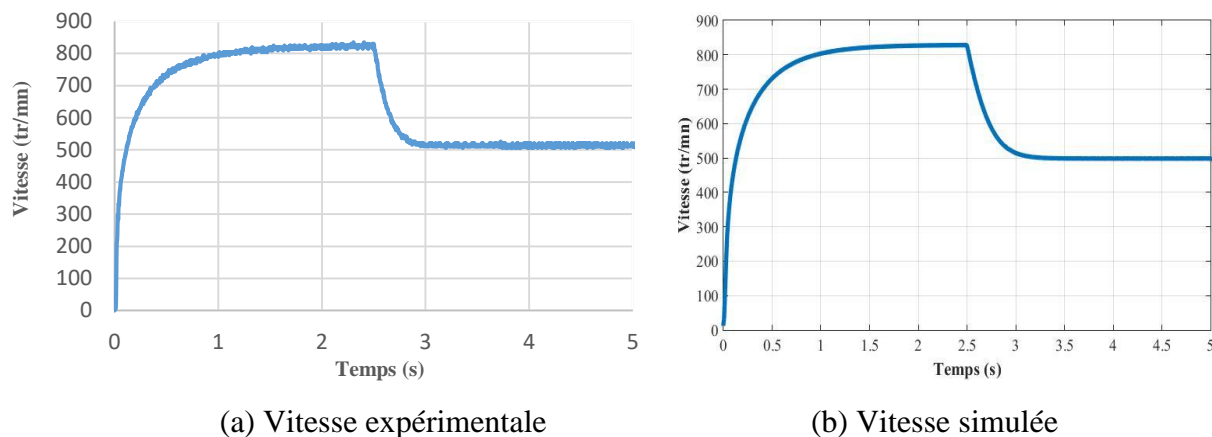


Figure 4.18 : Vitesse de rotation, en charge, $C_r = 0,24 \text{ N.m}$

Dans ce cas, la régulation de courant est utilisée pour protéger la machine du courant au démarrage. Le courant retrouve sa valeur à vide en régime permanent. La vitesse a montré que la machine démarre bien et atteint sa valeur en régime permanent.

L'application de la charge a conduit à une augmentation du courant et donc du couple, et à la diminution de la vitesse puisque celle-ci n'est pas régulée. Les résultats des essais expérimentaux sont similaires qualitativement et quantitativement à ceux obtenus par simulation opérés dans les mêmes conditions de fonctionnement.

4.3. Implémentation de la commande sans capteur de la SRM

La conception de l'estimateur de la position à travers l'estimation du flux nécessite une conception d'une carte d'acquisition et de mise en forme des tensions.

4.3.1. Conception d'une carte d'acquisition de tension et de mise en forme

L'estimation de la position en temps réelle requière la connaissance de la valeur instantanée du flux. Pour cela une acquisition de la tension des trois phases est nécessaire. Pour ce faire une carte d'acquisition et de mise en forme a été réalisée. La mesure de tension des trois phases exige la réalisation d'un circuit comportant trois capteurs de tension à effet HALL de type « LEM LV 25-P », d'un circuit d'amplification pour chaque phase à travers des amplificateurs de type « LM324-N », d'un circuit de génération d'un signal continue « offset » et d'un circuit assurant une sommation des deux signaux, les détails des composants de cette carte sont représentés en ANNEXE B.

Le schéma électrique pour une phase du circuit réalisé est présenté sur la figure suivante :

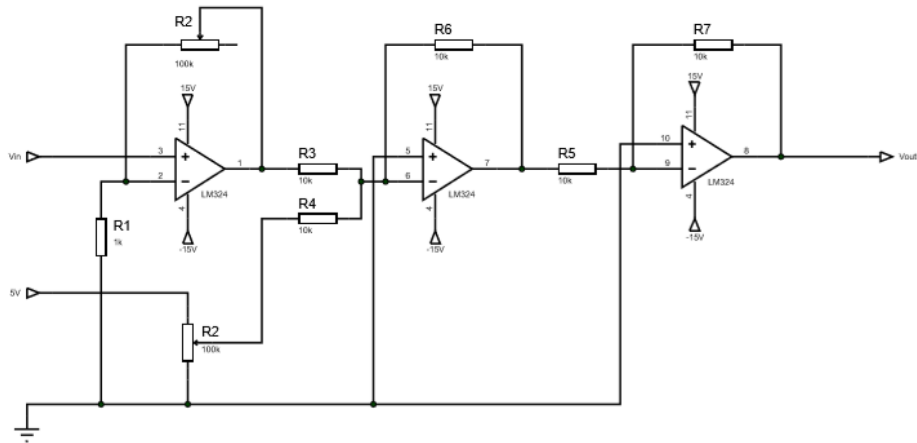


Figure 4.19 : Carte d'acquisition et de conditionnement de la tension d'une seule phase

Pour les 3 phases, le schéma de la carte est comme suit :

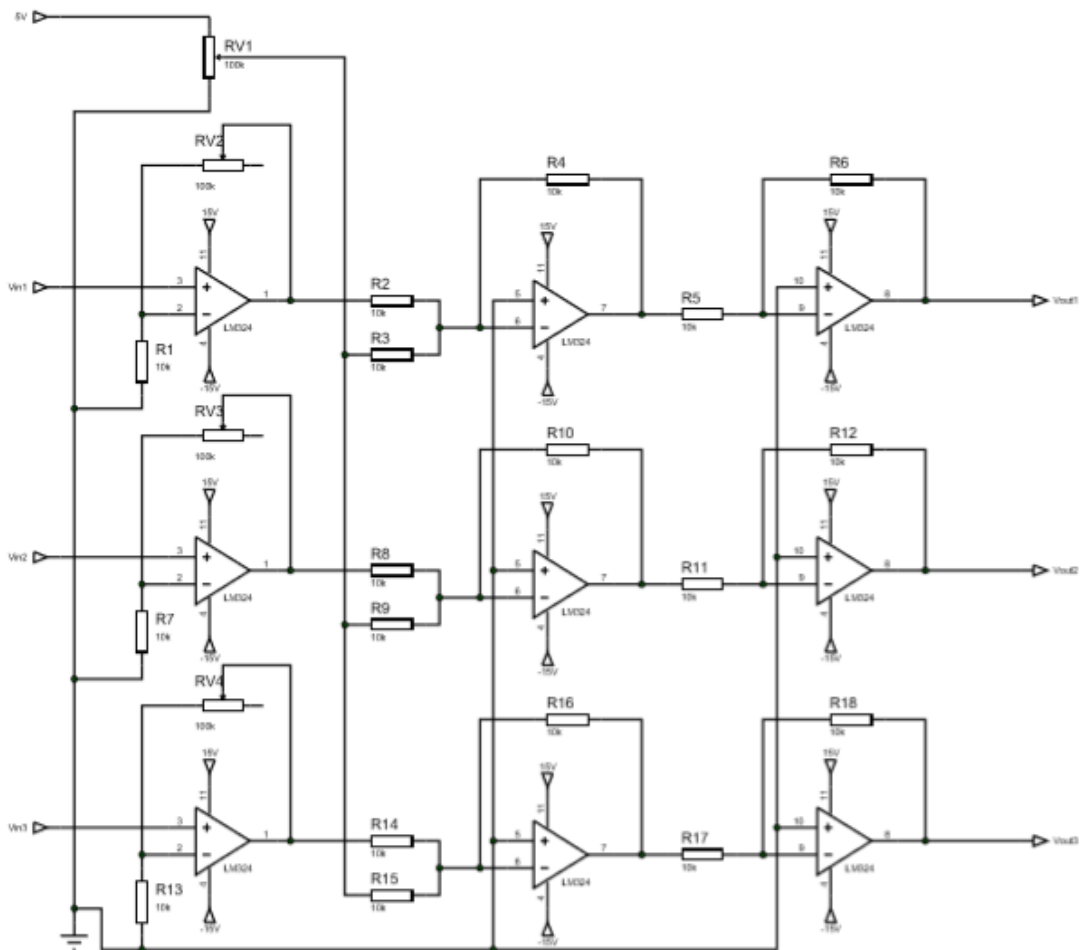


Figure 4.20 : Carte d'acquisition et de conditionnement des trois phases

- **Acquisition des tensions**

La tension de chaque phase est captée en utilisant un capteur de tension à effet Hall de type « LEM LV 25-P » qui est un adaptateur de niveau de tension assurant une isolation galvanique entre les circuits primaire et secondaire. Pour activer la mesure d'une tension, un courant proportionnel à la tension mesurée doit être recueilli à travers une résistance externe en série avec le circuit primaire de l'unité. On obtient alors un courant au secondaire avec un rapport de transformation 2500 :1000 et la tension est recueillie à travers une résistance R_M disposée en parallèle comme montré sur la figure suivante :

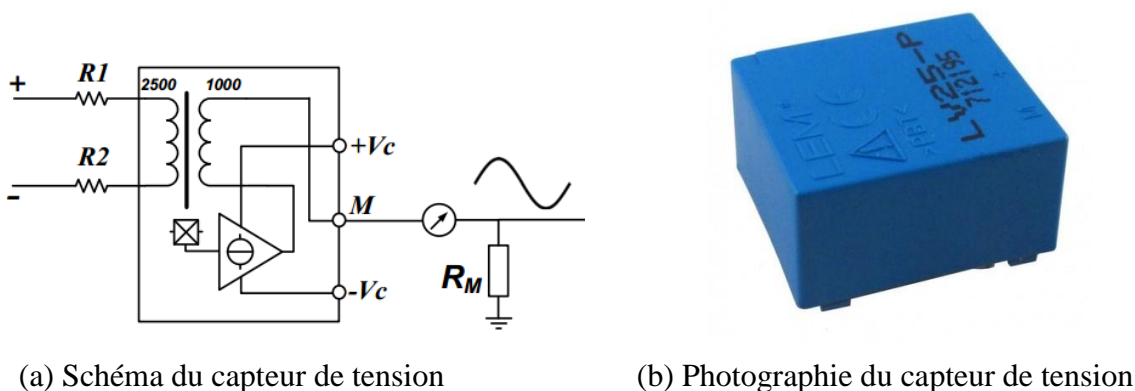


Figure 4.21 : Capteur de tension LEM LV 25-P

Après amplification du signal obtenu à la sortie du capteur de tension à travers le réglage des potentiomètres dans le circuit d'amplification, un signal continue d'amplitude constante de 1,5V vient s'ajouter à ce dernier afin d'assurer l'acquisition du signal au complet et en valeur positive avant d'être injecté dans le microcontrôleur à travers les modules de conversion analogique-numérique ADC.

Les ADC reçoivent des niveaux de tension compris entre 0 et 3,3V uniquement. Il est donc primordial de ne dépasser ni la tension maximale de 3,3V ni la avoir une négative inférieure à 0V. Ainsi, les tensions alternatives recueillies présentent un offset de 1.5V, et une valeur maximale de 3.3V. En vue de protéger le microcontrôleur contre les tensions mesurées dépassant les 3.3V, nous avons placés des diodes Zéner de 3V en inverse juste à l'entrée de chaque canal de l'unité de l'ADC permettant d'écarter les valeurs des tensions supérieures à 3V. Afin de conduire des mesures dans une large gamme de fonctionnement pour des tensions d'alimentation continues de la machine entre 0 et 40V, un premier étalonnage de la tension mesurée a été effectué. Cet étalonnage dépend des valeurs des résistances à l'entrée et à la sortie du capteur de tension. Cette dernière se trouvera réduite dans une plage de - 500 mV et 500 mV. Cette tension est ensuite amplifiée pour avoir une plage de tension comprise entre -

1.5V et 1.5V. La tension de sortie est alors rajoutée à une tension continue d'offset de 1.5V, ce qui conduit à une plage de tension de mesure 0 et 3V, compatible avec les niveaux de tension des ADC du microcontrôleur.

Les coefficients d'étalonnages choisis seront considérés lors de l'acquisition des données par microcontrôleur.

- **Tests préliminaires effectués sur la carte**

Dans le but de vérifier le bon fonctionnement de la carte d'acquisition, des tests sont effectués en injectant des signaux alternatifs sinusoïdaux à l'aide d'un générateur à basse fréquences (GBF) comme tension d'entrée et on visualise le signal à la sortie du capteur, du circuit d'amplification et à la sortie du circuit assurant la somme du signal amplifié et le signal de l'offset.

La fréquence du signal fournie par le GBF est choisie de sorte à ce qu'elle soit du même ordre que la fréquence d'alimentation des phases de la SRM en fonctionnement.

(a) : représente le signal à la sortie du capteur.

(b) : représente le signal après amplification.

(c) : représente le signal de l'offset

(d) : représente le signa à la sortie de la carte.

- **Test 1**

Dans ce premier test, une tension alternative et sinusoïdale de valeur maximale 40V est injectée dans la carte, les résultats sont présentés ci-après :

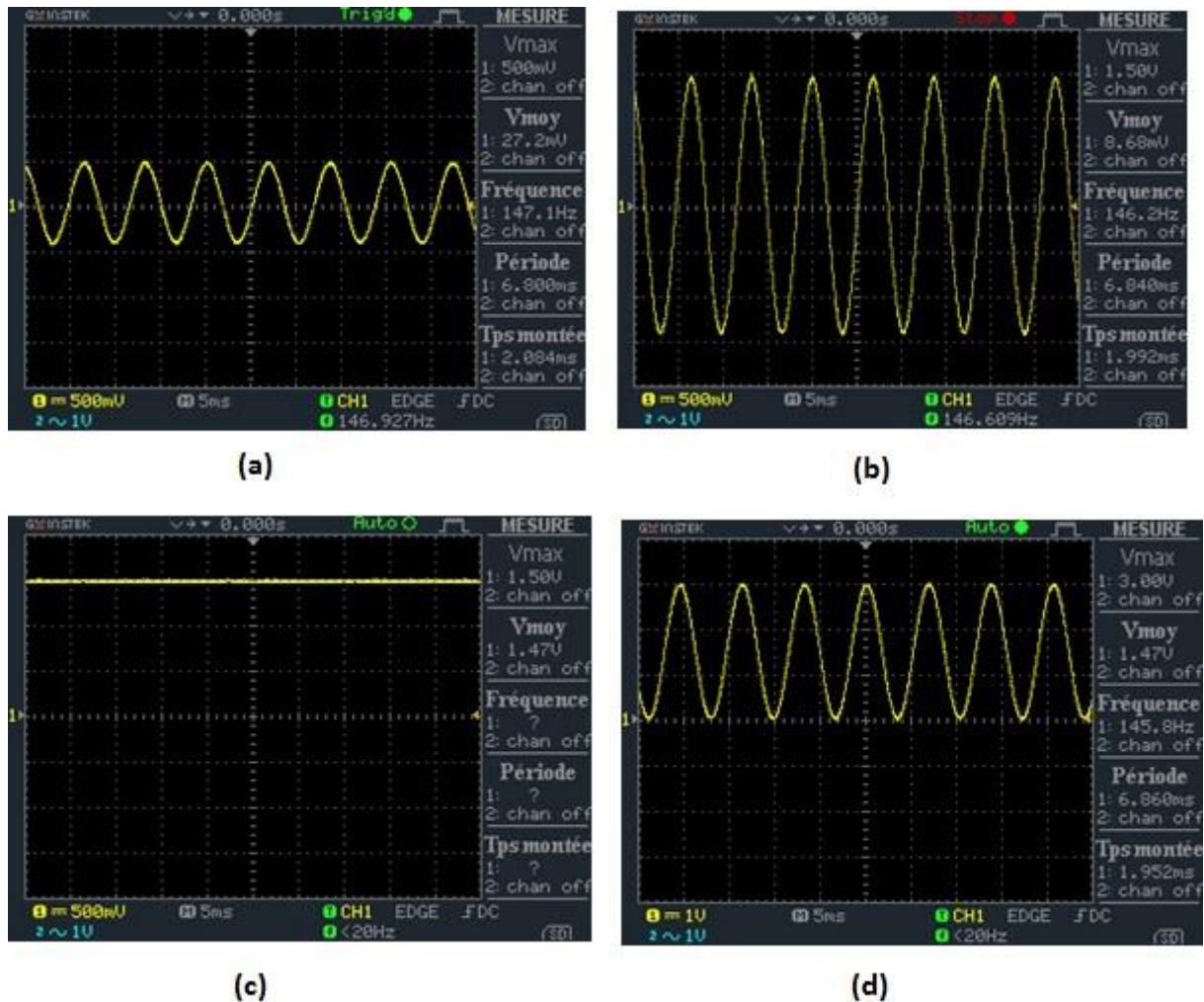


Figure 4.22 : Résultat du test 1 sur la carte d'acquisition des tensions

Le signal de sortie correspond parfaitement au niveau de tension approprié à l'entrée des ADC du microcontrôleur, ce signal passe aussi par l'interface d'adaptation des tensions afin de s'assurer définitivement de la protection du microcontrôleur.

- **Test 2**

Dans ce test, la tension injectée par le GBF est inférieure à la valeur maximale stipulée précédemment et cela dans le but de la confirmation de l'étalonnage effectué préalablement

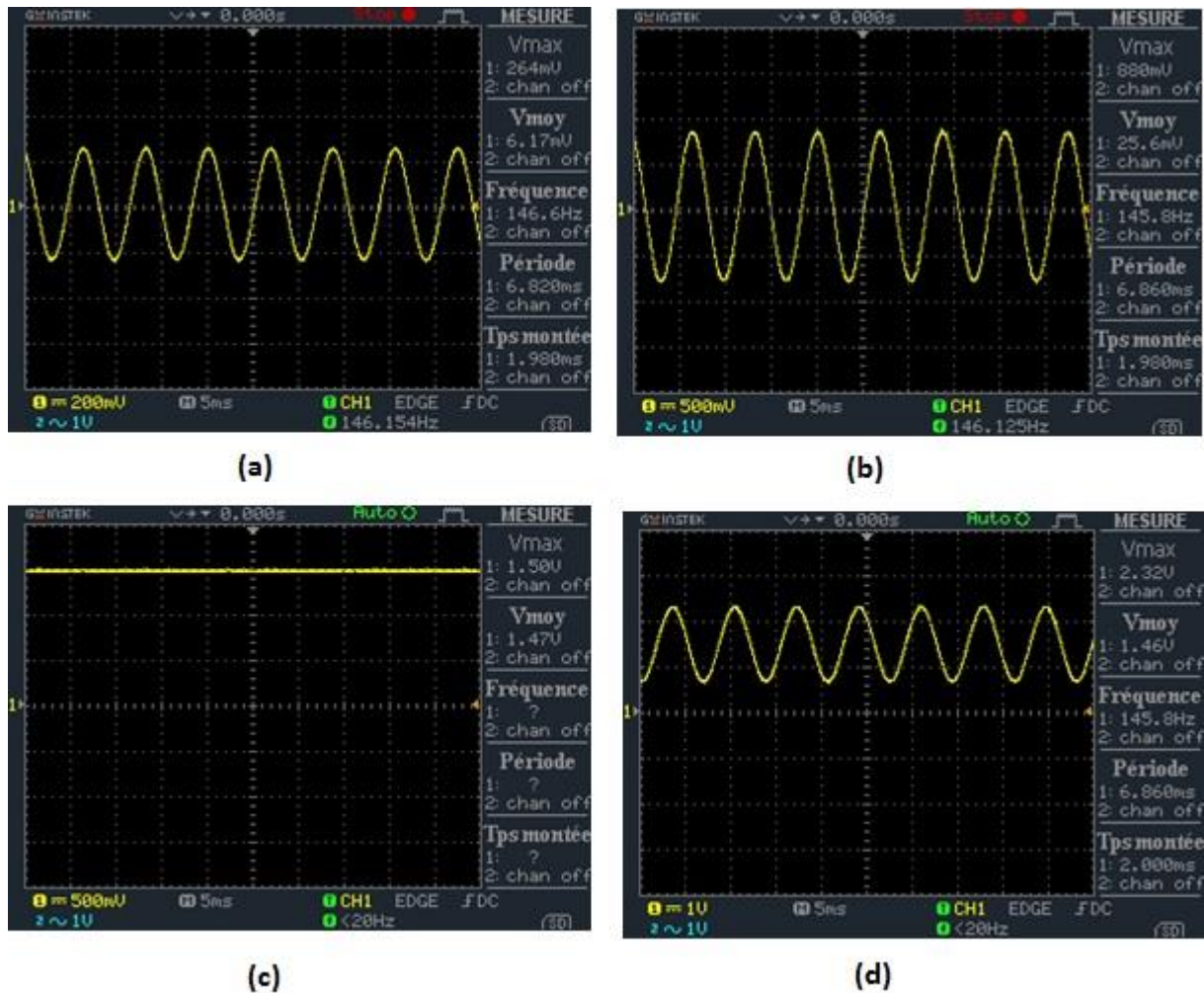


Figure 4.23: Résultat du test 2 sur la carte d'acquisition des tensions

Les tests montrent clairement le bon fonctionnement du circuit réalisé et de l'étalonnage effectué pour l'acquisition des tensions.

4.3.2. Calcul du flux

Dans un premier temps et en vue de l'implémentation de l'estimateur de position, un calcul du flux en temps réel est indispensable. Le calcul du flux se fait à la même fréquence que celle du calcul de la vitesse, et se trouve être dans la même boucle de calcul, et utilise donc un même timer. Le calcul du flux est établi par la relation (1.5)

L'implémentation de ce calcul sur le microcontrôleur est représentée par l'organigramme ci-après :

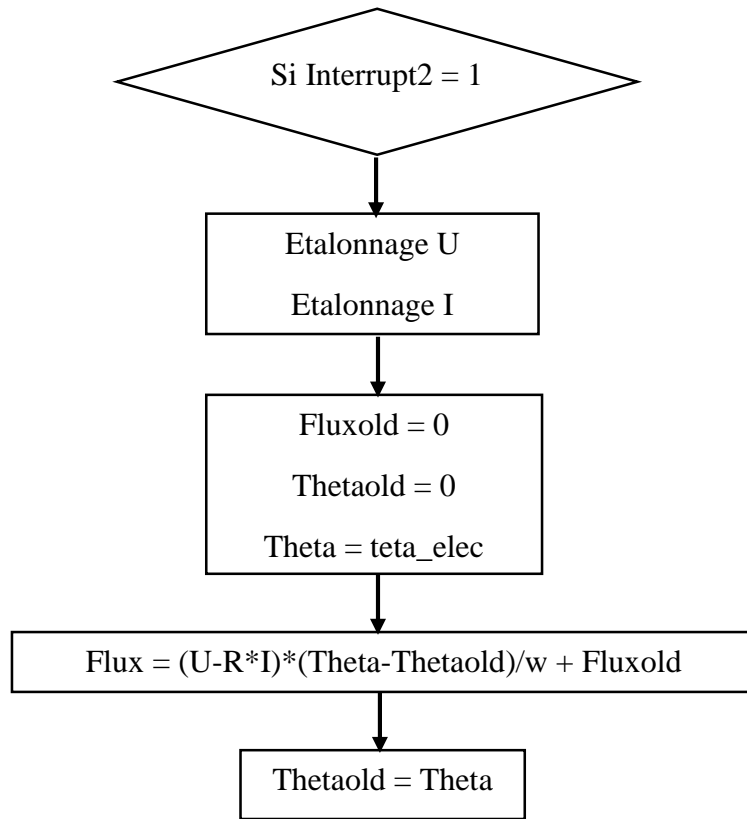


Figure 4.24 : organigramme du calcul du flux

Après le calcul du flux vient l'implémentation de l'estimateur de flux basée sur celui déjà proposé et testé en simulation au chapitre 3. Cet estimateur passe par une fonction de sélection des phases en conduction pour pouvoir estimer la position sur l'intervalle de conduction de chaque phase car le calcul de tous ces paramètres se fait en temps réel. Le calcul présenté sur l'organigramme ci-dessus doit être effectué pour les trois phases du moteur.

L'estimateur de position étant basé sur la caractéristique de flux $\psi(\theta, i)$ qui est remplacé dans ce cas par une équation polynômiale de troisième degré dont la caractéristique est représentée dans la figure 4.25 et dont la résolution est effectuée par la méthode de Cardan [18] (Voir ANNEXE C) Cette fonction admet comme entrées le flux et le courant de chaque phase en conduction et la sortie la position. Pour chaque itération les coefficients de ce polynôme sont recalculés en fonction de ces entrées pour une estimation de la position en temps réel.

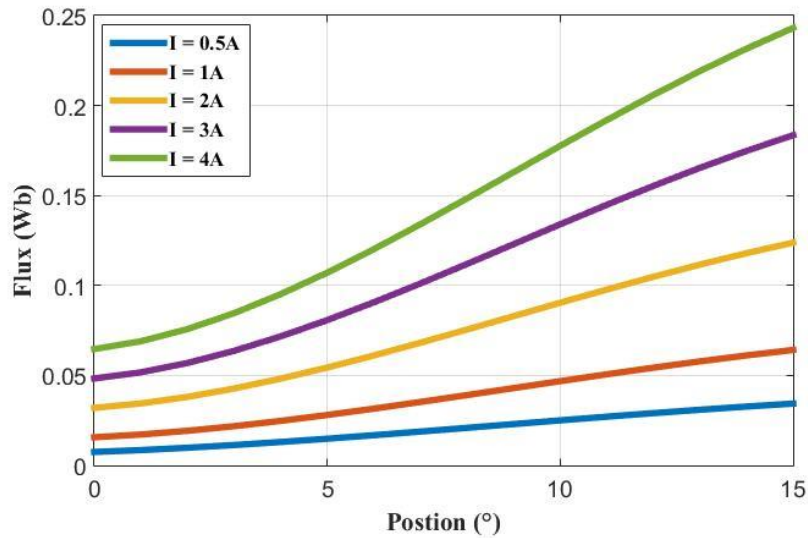


Figure 4.25: caractéristique de la fonction polynômiale estimée

La comparaison de cette fonction approximée et de la caractéristique de flux $\psi(\theta, i)$ est représentée dans la figure 4.26 ci-dessous :

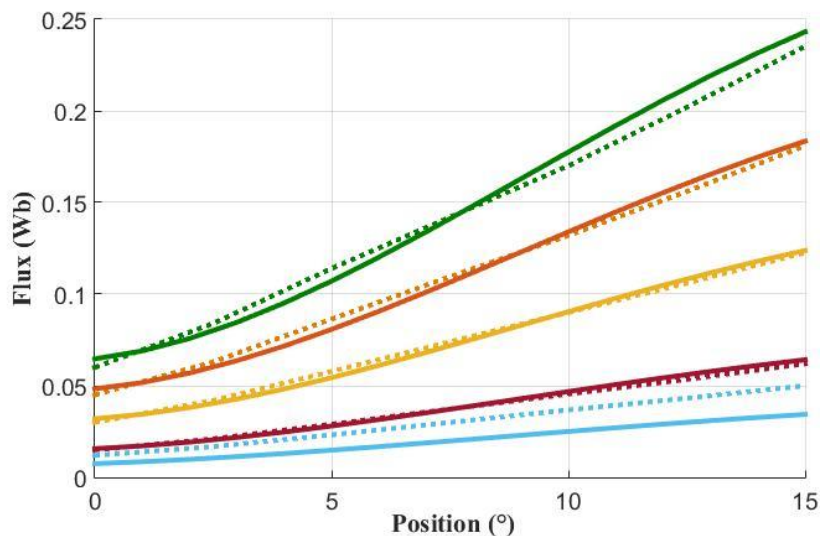


Figure 4.26: caractéristique de flux et de la fonction polynômiale estimée

La fonction polynomiale approximée se superpose à la caractéristique de flux élaborée préalablement par identification. Néanmoins présente un léger décalage dans le cas des faibles courants de l'ordre de 0,5A.

Un programme de résolution de cette équation est élaboré afin d'estimer la position en temps réel. Son organigramme est donné sur la figure 4.27.

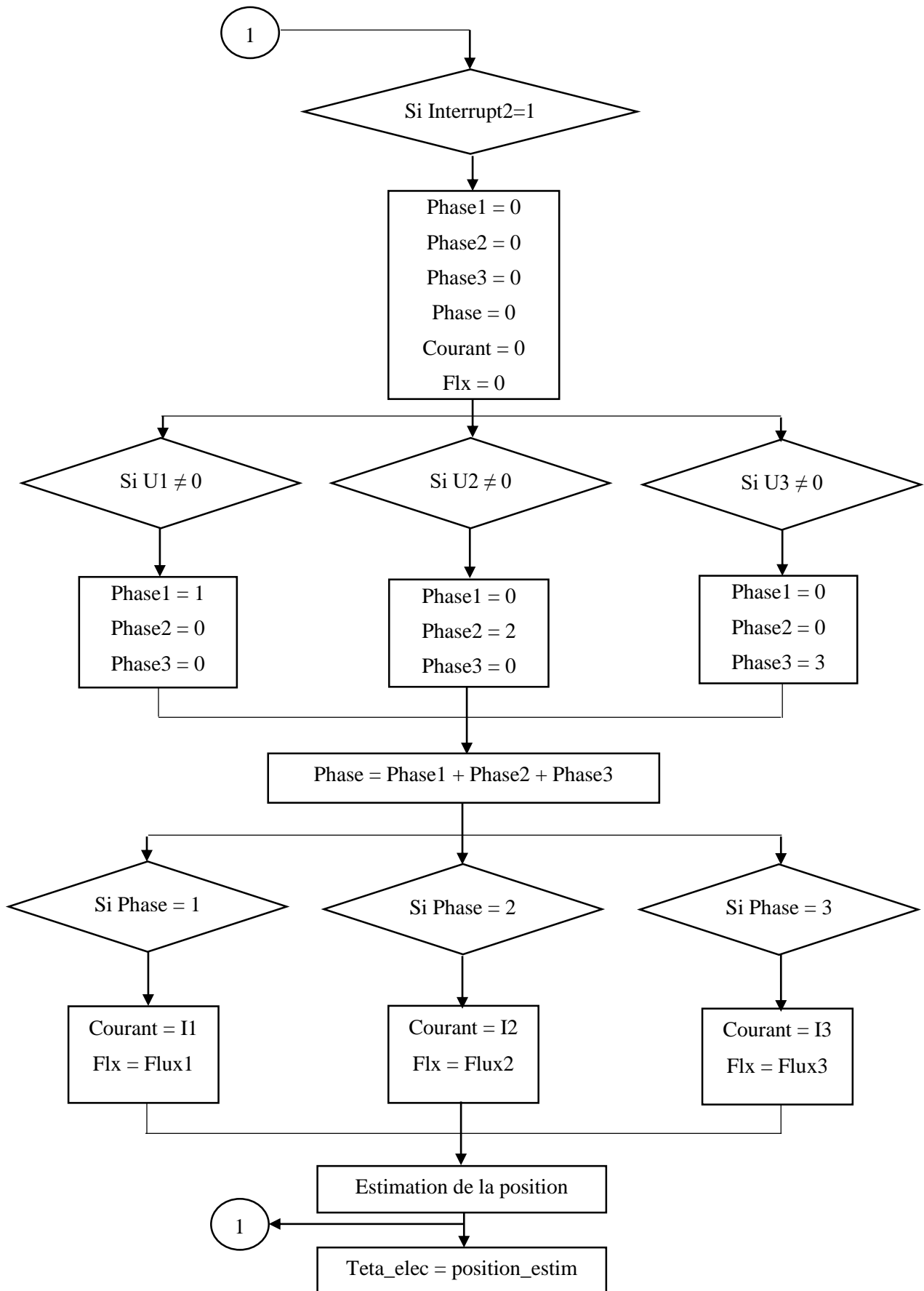


Figure 4.27: organigramme de l'estimation de la position

Cet Estimateur n'a pas encore été testé faute de temps. Nous espérons que le travail soit complété en finalisant cette implémentation.

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, l'implémentation de la commande de la SRM 12/8 par microcontrôleur a été réalisé. Elle nous a permis de tester tous les éléments du banc d'essai, elle nous a aussi permis de déterminer expérimentalement les caractéristiques de la SRM 12/8 pour les fonctionnements en régime permanent et dynamique à faible et grandes vitesses de fonctionnement.

De plus, les résultats obtenus nous ont permis de valider les paramètres électromagnétiques et dynamiques déterminées au chapitre 1 et valider les modèles Simulink proposées au chapitre 2.

Par ailleurs, ce travail nous a permis d'améliorer la qualité du banc d'essai, et de le compléter par une carte d'acquisition et de mise en forme de tension, et de courant pour l'estimation du flux et l'implémentation d'une commande sans capteur.

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est l'identification, la modélisation du système de commande d'une SRM 12/8 ainsi que l'implémentation de sa commande par microcontrôleur.

En premier lieu, la SRM 12/8 associée à un banc d'essai expérimental est présentée, suivi d'une identification de ses paramètres électriques, électromagnétique et mécaniques. Des cartes de flux et de couple électromagnétique en fonction de la position et du courant ainsi que les paramètres mécaniques de la SRM sont déterminées à partir d'essais expérimentaux.

Au deuxième chapitre, un modèle du système de commande de la SRM 12/8 avec capteur de position basé sur le modèle du flux est proposé. Des simulations sous l'environnement Matlab&Simulink en utilisant les résultats d'identification sont effectuées en régime permanent et dynamique, à faibles et grandes vitesses de fonctionnement. Ce travail nous a permis, ainsi, de tester les paramètres de la machine déterminés au chapitre 1 et d'étudier le fonctionnement de la SRM à partir du modèle du flux.

Le chapitre 3 est consacré à la modélisation du système de commande de la SRM en remplaçant le capteur de position par un estimateur basé sur l'estimation du flux. Des simulations avec estimateur de position ont été réalisées et comparées à celles obtenues avec capteur et les résultats sont plutôt satisfaisants. L'estimateur proposé peut alors être considéré pour l'implémentation par microcontrôleur.

Dans le dernier chapitre, la commande de la SRM 12/8 est implémentée sur le microcontrôleur TMS320F28335. L'implémentation est, d'abord, réalisée avec un capteur de position incrémental. La commande en pleine onde et en régulation de courant par hystérésis sont réalisés. Les performances à grandes et faibles vitesses de fonctionnements en régime permanent et dynamique sont déterminées et sont comparées à celles obtenues par simulation. La similitude des résultats nous conduit à valider les caractéristiques identifiées au chapitre1 et les modèles proposés au chapitre2.

Par ailleurs, une implémentation de l'estimateur de position proposé au chapitre3 a été initiée, en réalisant une carte d'acquisition, et en proposant une fonction polynomiale à utiliser afin de réaliser l'implémentation sans capteur.

Ce travail doit être finalisé en effectuant l'implémentation sans capteur et en comparant ses performances à celles avec capteur. Il pourrait être étendu à la régulation de vitesse en utilisant des techniques robustes telles que le mode glissant, ou en s'intéressant à la minimisation des ondulations de couple en optimisant les angles de commande

Bibliographie

- [1] T.J.E. Miller, "Switched Reluctance Motors and their Control," Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993..
- [2] NARLA, Sandeep. "Modeling and Control of Switched Reluctance Machines for Four-quadrant Operation," 2010. Thèse de doctorat. University of Akron..
- [3] AHN, Jin-Woo. "Switched reluctance motor. In : Torque Control. InTech," 2011..
- [4] Xiao Wang, "A position sensorless control of switched reluctance motor," Master of Applied Science, McMASTER UNIVERSITY, Hamilton, Ontario, 2016..
- [5] 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 doct. Ecole Nationale Polytechnique, 2007..
- [6] G. Yuan, "Speed control of switched reluctance motors," These de Doctorat, Aout 2000..
- [7] Amor, Lofti Ben. "Commande non linéaire d'un moteur à réluctance variable," Diss. Université de Montréal, 1996..
- [8] T. INSTRUMENT, "Dsps the tms320f2833x, architecture and peripherique," technical reference, 2011..
- [9] S.H.MERINI F.BOUFATEH. "Commande numérique d'une machine à réluctance variable à double denture", Mém. De mast. Ecole Nationale Polytechnique, 2015..
- [10] KRISHNAN, Ramu. "Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications," CRC press, 2001..
- [11] J. Faiz et J.W. finch. "Aspectsofdesignoptimizationforswitchedreluctance motors," In: IEEE Trans.OnEnergyConv (1993)..
- [12] GALLEGOS-LOPEZ, Gabriel, KJAER, Philip C., et MILLER, T. J. E. "High-grade position estimation for SRM drives using flux linkage/current correction model," IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, vol. 35, no 4, p. 859-869..
- [13] KRISHNAMURTHY, Mahesh, EDRINGTON, Chris S., et FAHIMI, Babak. "Prediction of rotor position at standstill and rotating shaft conditions in switched reluctance machines," IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, vol. 21, no 1, p. 225-233..

- [14] ACARNLEY, Paul P., HILL, Roland J., et HOOPER, Clive W. "Detection of rotor position in stepping and switched motors by monitoring of current waveforms," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1985, no 3, p. 215-222..
- [15] LYONS, J. P., MACMINN, S. R. et PRESTON, M. A. "Flux-current methods for SRM rotor position estimation. In : *Industry Applications Society Annual Meeting*,"1991., *Conference Record of the 1991 IEEE. IEEE*, 1991. p. 482-487..
- [16] MACMINN, Stephen R., RZESOS, William J., SZCZESNY, Paul M., et al. " Application of sensor integration techniques to switched reluctance motor drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, vol. 28, no 6, p. 1339-1344..
- [17] M.DJAOUT A.HAOUARA, "Commande sans capteur de position d'une machine à reluctance variable à double denture (SRM)," *Mémoire d'ingéniorat, ENP, Alger*, 2017.
- [18] H. Weber " *Formule de Cardan modifiée par Cayley [archive]*," *Nouvelles annales de mathématiques, 3e série, tome 14 (1895)*, p. 347-349..

Annexe A

Paramètres	Valeurs
Puissance	100 W
Courant maximal admissible	4A
Nombre de phases	3
Nombre de dents au stator	12
Nombre de dents au rotor	8
Inductance maximale	75mH
Inductance minimale	12mH

Table 1 : Caractéristiques de la SRM 12/8

Annexe B

Désignation	Référence	Valeur	Quantité
Résistance		- 1k - 10k	- 03 - 15
Capteur de tension	LEM LV 25-P		03
Potentiomètres		100k	04
Amplificateur	LM324-N		03

Annexe C

Méthode de Cardan

L'algorithme de calcul des racines d'une équation polynômiale de troisième ordre selon la méthode de Cardan est le suivant :

Mettre l'équation à résoudre sous la forme

$$z^3 + pz + q = 0$$

Où les coefficients p et q sont réels.

Les solutions de cette équation sont données par :

$$z = u_k + v_k$$

Avec

$$u_k = j^k \sqrt[3]{\frac{1}{2} \left(-q + \sqrt{\frac{-\Delta}{27}} \right)}$$

Et

$$3u_k v_k = -p$$

D'où :

$$v_k = j^{-k} \sqrt[3]{\frac{1}{2} \left(-q - \sqrt{\frac{-\Delta}{27}} \right)}$$

Où le discriminant de l'équation est :

$$\Delta = -(4p^3 + 27q^2), \text{ et ou } j = e^{\frac{2i\pi}{3}}$$

- Si $\Delta > 0$: l'équation possède trois solutions réelles données par la relation suivante :

$$z_k = 2 \sqrt{\frac{-p}{3}} \cos\left(\frac{1}{3} \arccos\left(\frac{-q}{2} \sqrt{\frac{27}{-p^3}}\right) + \frac{2k\pi}{3}\right), \text{ avec } k = \{0,1,2\}$$

- Si $\Delta < 0$: l'équation admet une solution réelle et deux complexes de la forme :

$$\begin{cases} z_0 = u + v \\ z_1 = ju + \bar{j}v \\ z_2 = j^2u + j^2\bar{v} \end{cases}, \text{ ou } \begin{cases} j = -\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ j^2 = -\frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{cases}$$

- Si $\Delta = 0$: On distingue deux cas :

- 1- Dans le cas où p et q sont nuls, l'équation possède 0 comme solution triple.
- 2- Dans le cas où p et q sont non nuls, l'équation admet deux solutions réelles, une simple et une double :

$$\begin{cases} z_0 = \frac{3q}{p} \\ z_1 = z_2 = \frac{-3q}{2p} \end{cases}$$

Remarque :

Si l'on part de l'équation général comme dans notre cas : $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0, a \neq 0$, on se ramène à la forme réduite en posant :

$$x = z - \frac{b}{a}, p = -\frac{b^2}{3a^2} + \frac{c}{a} \text{ et } q = \frac{b}{27a} \left(\frac{2b^2}{a^2} - \frac{9c}{a} \right) + \frac{d}{a}$$