

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU MAMMARI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

# Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention  
du diplôme de Master en Électrotechnique

*Option : Machines Électriques*

***Thème:***

IMPLÉMENTATION SUR CARTE dSPACE <<DS1102>> DE LA VARIATION DE  
VITESSE D'UN MOTEUR SYNCHROME Á AIMANTS PERMANENTS  
APPLICATION AU CYCLE D'UN LAVE-LINGE

**Proposé et dirigé par:**

M : B. BOUKAIS

**Étudié et réalisé par:**

M : BELHADI Sofiane  
M : BANDOUC Rachid

Année universitaire 2012/2013

## *Remerciements*

*Au terme de ce modeste travail, nous remercions dieu le tout puissant pour nous avoir donné le courage et la volonté.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude à notre promoteur M<sup>r</sup> B.Boukais pour toute l'aide, conseils et encouragements qu'il a prodigué le long du travail.*

*Nous remercions également M<sup>r</sup> T.Otmane Cherif, M<sup>r</sup> H.Sediki, M<sup>r</sup> A.Bechouche, M<sup>r</sup> S.Harmim, M<sup>r</sup> K.Mesbah, M<sup>r</sup> L.Akkouche et M<sup>elle</sup> F.Hacid pour leurs soutiens tout au long de notre travail.*

*Nous tenons à remercier aussi les membres de jury qui nous feront honneur de juger notre travail.*

*Nos remerciements, vont aussi à tous ceux qui nous ont encouragées, à la réalisation de notre modeste travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

- A toute ma famille.*
- A mes copains de chambre (Arab et Nassim).*
- A tous mes amis (es).*

*B.Sofiane*

*Je dédie ce travail*

- A toute ma famille.*
- A Tous les gents que je connais.*
- A Toute la promotion 2012-2013.*

*B.Rachid*

# Sommaire

# SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités sur le lave-linge et la machine synchrone**

Introduction .....	3
I.1 Généralités sur les lave-linge .....	3
I.1.1 Différentes étapes d'un cycle de lave-linge .....	4
I.1.2. Les différents types de moteurs électriques utilisés dans les lave-linges .....	5
I.2. Généralités sur la machine synchrone à aimants permanents .....	8
I.2.1. Principe de fonctionnement d'un moteur synchrone à aimants permanents.....	8
I.2.2. Autopilotage de moteur synchrone à aimants permanents .....	9
I.3. Différentes structures des moteurs synchrones à aimants permanents .....	9
I.4. Alimentation des moteurs synchrones à aimants permanents .....	11
Conclusion .....	13

## **Chapitre II : Modélisation du système d'étude et résultats de simulation**

Introduction .....	14
II.1. Modélisation du système machine-convertisseur .....	14
II.1.1. Modélisation du moteur synchrone à aimant permanent(BDCM) .....	15
II.1.2 Modèle du capteur de position.....	22
II.1.3. Modèle de l'onduleur .....	23
II.2. La logique de commande de l'onduleur .....	24
II.3.Intégration du modèle de l'ensemble BDCM-Convertisseur piloté par un capteur de position .....	26
II.4. Simulation du système BDCM- Convertisseur.....	27
II.4.1 Essai de simulation sous conditions nominales .....	27

---

II.4.2 Réalisation d'un profil de vitesse d'un lave-linge .....	35
Conclusion .....	41
 <b>Chapitre III : Mise en œuvre d'un banc d'essai et résultats expérimentaux</b>	
Introduction .....	42
III.1 Description du banc d'essai.....	42
III.2. Description de la carte dSPACE DS1102.....	44
III.3 Adaptation du schéma Matlab-Simulink pour l'implémentation en temps réel sur dSPACE .....	47
III.4 Essais et résultats expérimentaux .....	47
III.4.1. Essais préliminaires.....	47
III.4.1.1 Essai avec une carte de commande analogique .....	48
III.4.1.2 Essais préliminaires avec la carte numérique dspace1102 .....	49
III.4.1.3 Variation de la vitesse de la BDCM .....	50
III.4.2 Essai sur le système BDCM-Onduleur à une vitesse de 750 tr/min .....	52
III.4.3 Essai en charge sur le système BDCM-Onduleur à des vitesses de 200 et 1000 tr/min .....	55
III.4.4 Réalisation expérimentale d'un profil de vitesse de lave-linge .....	56
Conclusion.....	62
 <b>Conclusion générale</b> .....	 63

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Jusqu'à un passé récent, la machine à courant continu (M.C.C) a été majoritairement utilisée dans les entraînements à vitesse variable. Ceci tient au fait que son fonctionnement est relativement simple, mais surtout à cause de ses performances statiques et dynamiques exceptionnelles. En effet le couple est le produit vectoriel de deux grandeurs naturellement orthogonales (flux inducteur et courant d'induit) quasiment indépendantes l'une de l'autre.

Cependant, la fragilité du système balais-collecteur a toujours été l'inconvénient de la M.C.C, ce qui limite sa puissance et sa vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour ces inconvénients qu'on a eu recours à l'utilisation des moteurs à courants alternatifs tels que les moteurs asynchrones et les moteurs synchrones à aimants permanents.

L'apparition des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) dans le monde des actionneurs électriques a joué un rôle crucial dans l'évolution des systèmes électriques en leur ouvrant de nouvelles opportunités grâce à leurs fonctionnements dans une ambiance déflagrante. En plus, des recherches approfondies ont permis de mettre au point des matériaux nouveaux, comme par exemple des aimants à base de terre rare. Ces derniers permettent d'obtenir des machines à aimants qui présentent, par rapport aux autres types de machines, beaucoup d'avantages, entre autres, une inertie faible et un couple massique élevé. Elles sont actuellement les mieux classées pour répondre aux exigences des applications, telles que les machines outils, la robotique, la technologie de l'espace (actionneurs d'aviation, de satellites...) et d'une manière générale dans les systèmes à entraînement direct (Direct Drive).

D'autre part, à la différence du moteur à courant continu où il suffit de faire varier la tension d'alimentation de l'induit pour faire varier la vitesse, le moteur synchrone nécessite l'utilisation de courants alternatifs à fréquence variable. Cependant, avec le progrès de l'électronique de puissance lié à l'apparition de composants interrupteurs rapides ainsi que le développement des techniques de commande et des calculateurs numériques, il est possible, à présent, de choisir une structure de commande beaucoup plus évoluée.

L'objectif de ce travail est d'implémenter sur une carte dSPACE <<DS1102>> la commande en boucle ouverte de la vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents à f.c.e.m trapézoïdale. Cette dernière est alimentée par un onduleur de tension et pilotée par un codeur de position, afin de réaliser un profil de vitesse d'un lave-linge. Une étude théorique se basant sur le modèle de l'ensemble machine-convertisseur a été nécessaire pour prédire les performances du système. La partie expérimentale a été effectuée au laboratoire de Commande des Actionneurs Electriques (C.A.E) du Département d'Electrotechnique.

Ce mémoire résume notre travail de manière synthétique avec un apport expérimental permettant de compléter un travail déjà engagé avec les étudiants des promotions précédentes, à savoir la réalisation de l'onduleur triphasé [01], codeur de position [02].

Notre mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les moteurs utilisés pour l'entraînement des lave-linges en portant un intérêt particulier à la présentation du moteur synchrone à aimants permanents.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation du moteur synchrone à aimants permanents à f.c.e.m trapézoïdale. Le modèle développé a été implémenté sur Matlab Simulink et SimPowerSystems, celui-ci a été testé sur trois machines de différentes puissances.

Le troisième chapitre est consacré à la description du banc d'essai expérimental utilisé dans ce présent travail, suivie d'une présentation des résultats expérimentaux obtenus et d'une comparaison avec les résultats théoriques.

Nous portons enfin, dans la conclusion générale, notre appréciation sur le travail réalisé.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le lave-linge et la machine synchrone**

## Introduction

L'entraînement électromécanique direct (electromechanical direct drive) représente une grande simplification des systèmes de conversion électromécanique d'énergie puisqu'il permet de supprimer les organes de transmission mécanique : réducteur, multiplicateur, courroie, pignon-crémaillère... Cette simplification de la transmission est utilisée depuis toujours dans certaines applications où les caractéristiques mécaniques correspondaient bien à celles des moteurs classiques (vitesses comprises entre 1000 et 3000 tr/min). Cependant, dans les applications de très basses vitesses et forts couples, celles des très hautes vitesses ainsi que celles à mouvements linéaires, l'entraînement direct est devenu une grande préoccupation industrielle. Dans ce travail, nous proposons d'utiliser un moteur synchrone à aimants permanents pour l'entraînement direct du tambour d'un lave-linge domestique.

### I.1. Généralités sur les lave-linges

Un lave-linge est une machine qui Permet de laver, rincer et essorer le linge de façon automatique. Le linge est entraîné en rotation dans un tambour contenant de l'eau et de la lessive. Dans les machines à laver habituellement commercialisées, le tambour est entraîné par un moteur électrique par l'intermédiaire d'une courroie. Le moteur électrique est ainsi placé à l'arrière de la machine. Alors que le système Direct Drive a la particularité d'intégrer directement le moteur électrique sur l'arbre du tambour, évitant ainsi l'utilisation de système poulie-courroie.

L'efficacité de lavage d'un lave-linge est toujours le résultat de la combinaison de trois actions :

- Une action thermique, qui a pour but de libérer les principes actifs contenus dans les lessives.
- Une action physico-chimique, assurée par les propriétés des lessives.
- Une action mécanique, qui consiste à battre le linge plus ou moins efficacement dans un bain eau-lessive.

Ces différentes actions sont mises en jeu dans un cycle "lavage - rinçage – essorage".

### I.1.1 Différentes étapes d'un cycle de lave-linge

Les trois étapes principales du déroulement du programme d'un lave-linge sont:

➤ Le lavage

-Rotation lente et alternée

-C'est la phase la plus longue où le linge sera débarrassé de toutes ses salissures.

➤ Le rinçage

- Elimination des restes de salissure et des traces de lessive sur le linge.

- Refroidissement progressif du linge par prises d'eau successives.

➤ L'essorage

-Rotation à grande vitesse.

-Elimine le maximum d'eau dans le linge pour réduire le temps de séchage.

La figure ci-dessous décrit un exemple de profil de vitesse d'un lave-linge:

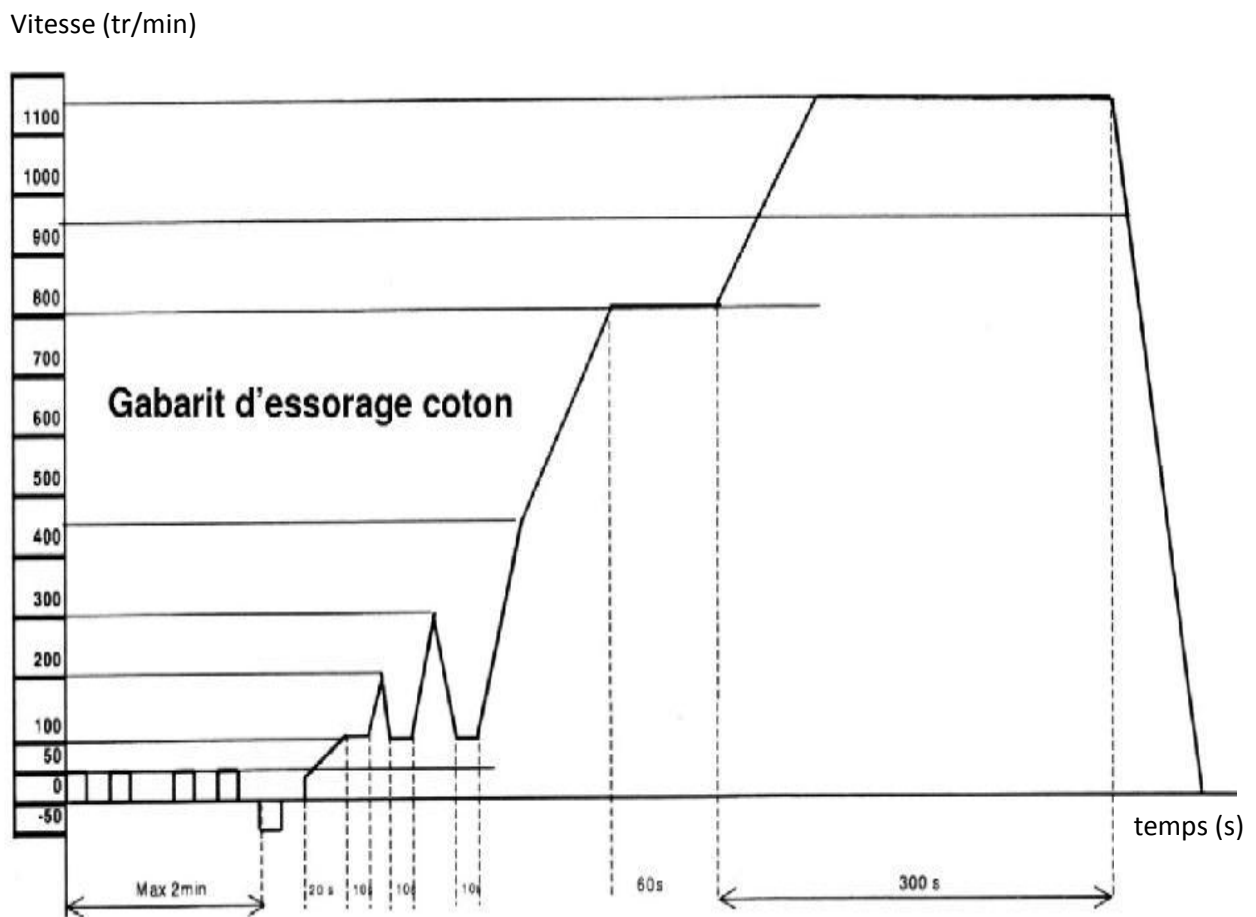


Figure I.1: Profil de vitesse d'un lave-linge (programme lavage coton)

### I.1.2. Les différents types de moteurs électriques utilisés dans les lave-linges

Selon la technologie du lave-linge, on distingue 4 types de moteurs d'entraînement :

- Le moteur asynchrone monophasé
- Le moteur universel
- Le moteur asynchrone triphasé
- Le moteur synchrone à aimants permanents

#### a. Moteur asynchrone monophasé

Jusqu'à présent, en Algérie, la plus part des lave-linges domestiques commercialisés sont dotés par ce type de moteur. Celui-ci équipe les machines à vitesse d'essorage fixe et relativement faible (ancienne génération). Le moteur asynchrone monophasé est constitué d'un double bobinage permettant d'obtenir une vitesse faible pour le lavage et une vitesse plus élevée pour l'essorage, ceci par changement du nombre de paires de pôles. Avec une paires de pôles, la vitesse maximale du moteur est de 2900 tr/min ; ce qui donne une vitesse d'essorage qui n'excède pas 400 tr/min au tambour (rapport de réduction de 0.14).

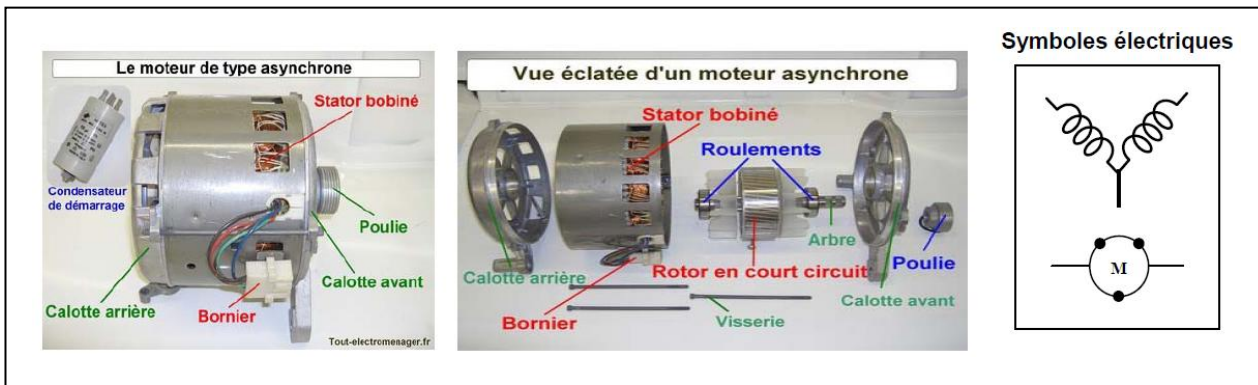


Figure I.2: Moteur asynchrone monophasé

#### b. Moteur universel

Pour améliorer les performances des lave-linges, le moteur asynchrone monophasé a été remplacé par le moteur universel qui permet d'atteindre des vitesses d'essorage beaucoup plus élevées.

Le moteur universel a la même constitution qu'un moteur à courant continu à inducteur bobiné. Il se constitue d'une partie fixe (stator) comportant le bobinage inducteur et d'une partie tournante (rotor) comportant le bobinage induit. L'alimentation de l'induit se fait par contacts glissants grâce à des balais qui frottent sur les lames du collecteur.

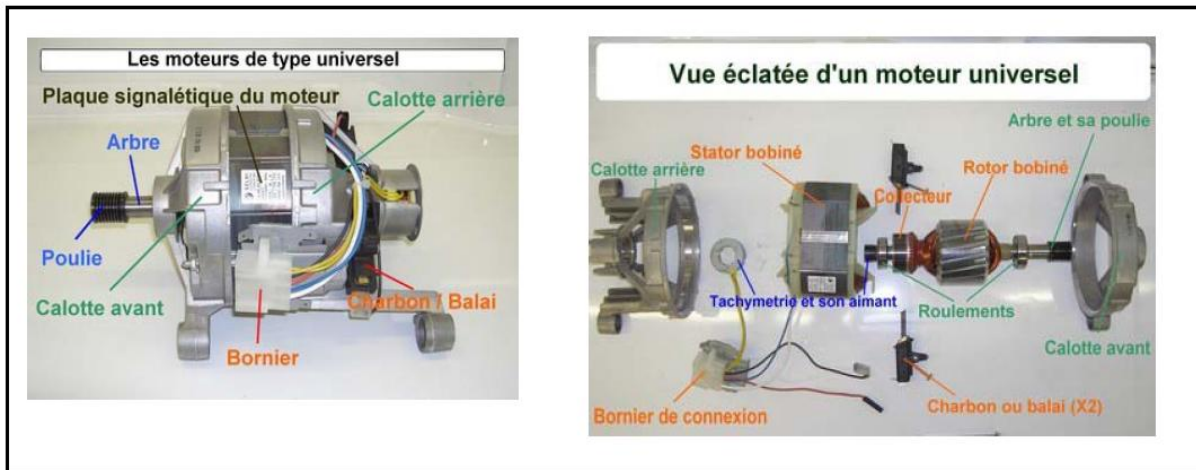


Figure I.3: Moteur universel

Les deux enroulements (induit et inducteur) sont montés en série, ce qui permet d'utiliser ce moteur en mode universel (continu ou alternatif). Le moteur est piloté par un module électronique avec possibilité de réglage de la vitesse d'essorage. Le sens de rotation s'inverse lorsqu'on permute les bornes de l'induit ou de l'inducteur. L'inversion est réalisée par deux relais à contact inverseur intégrés dans le module électronique.

### C. Moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone triphasé est utilisé dans les applications à puissance plus élevée. On le trouve utilisé dans les lave-linges industriels et à caractère commerciale tel que les dégraissages. Contrairement au moteur universel la rotation se fait sans frottement (pas de balais) donc pas d'usure et moins de risque de panne. Par rapport au moteur asynchrone monophasé, le moteur triphasé ne nécessite pas de condensateur de démarrage. Cependant, il nécessite la présence du réseau triphasé.



Figure I.4: Moteur asynchrone triphasé

**d. Moteur synchrone à aimants permanents**

Avec ses performances dynamiques et sa densité de puissance très élevées, ce moteur est de loin le plus adapté dans les systèmes à entraînement direct. Son introduction dans ce domaine d'application est très récente. En effet, celui-ci équipe les lave-linges de dernière génération dotée de la technologie « Direct Drive » (exemple du lave-linge LG). Dans ce cas, l'entraînement du tambour se fait sans courroie ni poulie, la puissance du moteur lui est directement transmise.

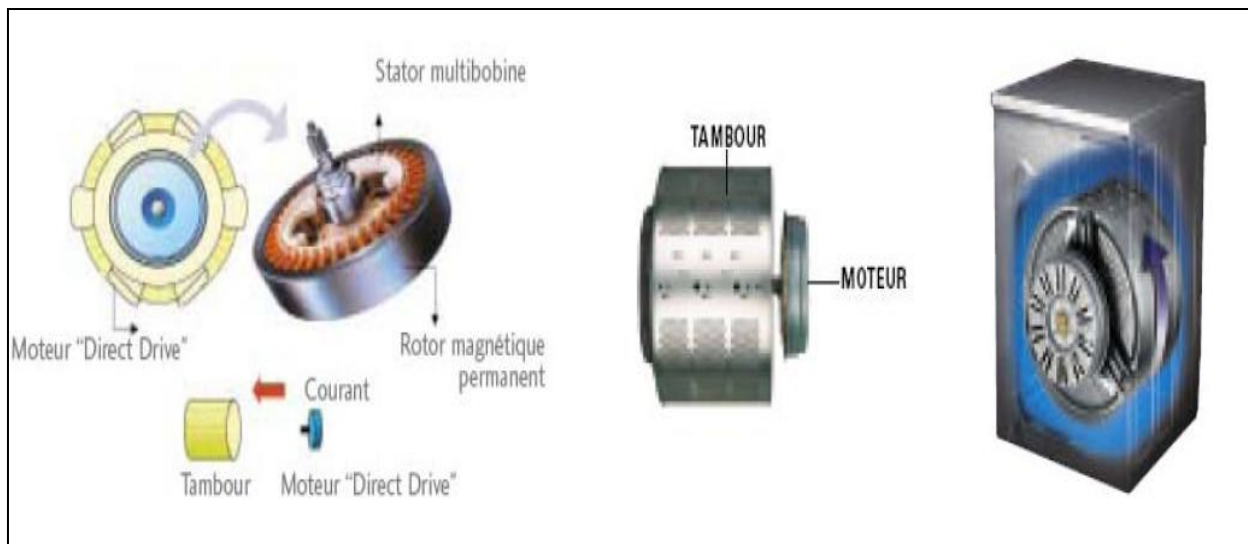


Figure I.5: Système Direct Drive avec un moteur synchrone

Malgré que la technologie Direct Drive est actuellement plus couteuse, cependant elle présente de nombreux avantages, qui sont:

- entraînement sans courroie ni poulie donc moins de risque de panne
- pas de contacts glissants (balais-collecteur)
- moins de vibration donc réduction du bruit
- meilleure qualité d'essorage par réglage de la vitesse.

Vu les avantages et les performances que présente la machine synchrone à aimants permanents et sa technologie qui ne cesse de s'améliorer, nous proposons dans ce travail d'utiliser ce type de moteur pour réaliser les profils de vitesse de lave-linge à technologie direct drive.

## I.2. Généralités sur la machine synchrone à aimants permanents

D'une manière générale, le terme machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré par des aimants permanents. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal l'égalité entre la vitesse de du rotor et celle du champ tournant statorique.

Cette machine a été surtout utilisée en génératrice mais grâce aux avancées technologiques dans l'électronique de puissance, les matériaux et les calculateurs numériques, la machine synchrone à aimants permanents est devenue attractive est concurrente de la machine asynchrone dans beaucoup de domaines d'entraînement électrique.

Les machines synchrone à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machine : à courant continu, synchrone à excitation bobinée et asynchrone. Parmi ces avantages, on peut citer [03] :

- Puissance massique et volumique important (densité de puissance élevée).
- Absence d'enroulement (courant) d'excitation (30% de pertes au moins).
- Un très bon rendement et un facteur de puissance élevé.
- Moins d'usure et moins de frais d'entretien (pas de balais, pas de collecteur).
- Meilleure caractéristique thermique, la localisation des pertes joules et des pertes fer au stator simplifié le refroidissement de la machine.
- Une capacité à fonctionner à haute, voire très haute vitesse.

Cependant ils ont tout de même certains inconvénients :

- Coût relativement élevé (à cause du prix des aimants), mais ne cesse de diminuer.
- La technologie de fabrication des aimants est très complexe.
- Problème de tenue en température des aimants (250 °C pour le samarium-cobalt)
- Difficulté de réglage de l'excitation (par angle de calage).

### I.2.1. Principe de fonctionnement d'un moteur synchrone à aimants permanents

L'enroulement statorique est parcouru par un système de courants triphasé équilibré de pulsation  $\omega_s$  créant un champ tournant dans l'entrefer à vitesse angulaire  $\Omega = \omega_s / P$ , les

aimants permanents engendre un champ magnétique fixe par rapport au rotor. L'interaction entre le champ tournant statorique et le champ fixe rotorique crée un couple électromagnétique qui fait tourner le rotor.

Dans le cas d'une alimentation à fréquence fixe, le démarrage spontané d'un moteur synchrone à aimants n'est pas possible sans artifice. Pour assurer le démarrage, il faut soit l'entraîner par un moteur auxiliaire, soit le démarrer en asynchrone si celui-ci est équipé d'une cage de démarrage.

Dans Le cas d'une alimentation à fréquence variable (avec convertisseur), une variation de la pulsation d'alimentation entraîne une variation tout aussi rapide de la vitesse du champ tournant statorique. Et comme le rotor est soumis à l'inertie du système mécanique, la vitesse de rotation de champ rotorique n'augmente donc pas aussi vite. Cela aura pour effet de générer un décalage très important entre les deux champs et donc peut faire décrocher la machine. Pour résoudre ce problème, l'idée est d'asservir la position du champ rotorique par rapport à celle du champ statorique et on parle alors d'autopilotage.

### **I.2.2. Autopilotage de moteur synchrone à aimants permanents**

Le principe de l'autopilotage est de capter la position de rotor pour commander le convertisseur électronique en fonction de cette position. La pulsation  $\omega_s$  de l'alimentation statorique est asservie à la vitesse de rotation du rotor  $\Omega$ , et le dispositif maintient toujours la condition :

$$\Omega = \omega_s / P \quad (P : \text{nombre de paires de pôles de la machine})$$

Le décrochage est alors impossible. L'autopilotage donne à l'ensemble convertisseur et moteur synchrone un fonctionnement similaire à celui d'une machine à courant continu. L'inversion du sens de rotation est obtenue par un changement de l'ordre des commutations des interrupteurs du convertisseur.

### **I.3. Différentes structures des moteurs synchrones à aimants permanents**

Les structures des moteurs synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial et à flux axial [04].

#### **➤ Moteurs synchrone à aimants à flux radial**

Les moteurs synchrones à aimants permanents à flux radial sont classés en quatre catégories : les moteurs à aimants en surface, à aimants insérés ou encastrés, à aimants enterres et à aimants à concentration de flux [08].

La figure (I.6) représente les différentes structures du rotor de moteurs à flux radial :

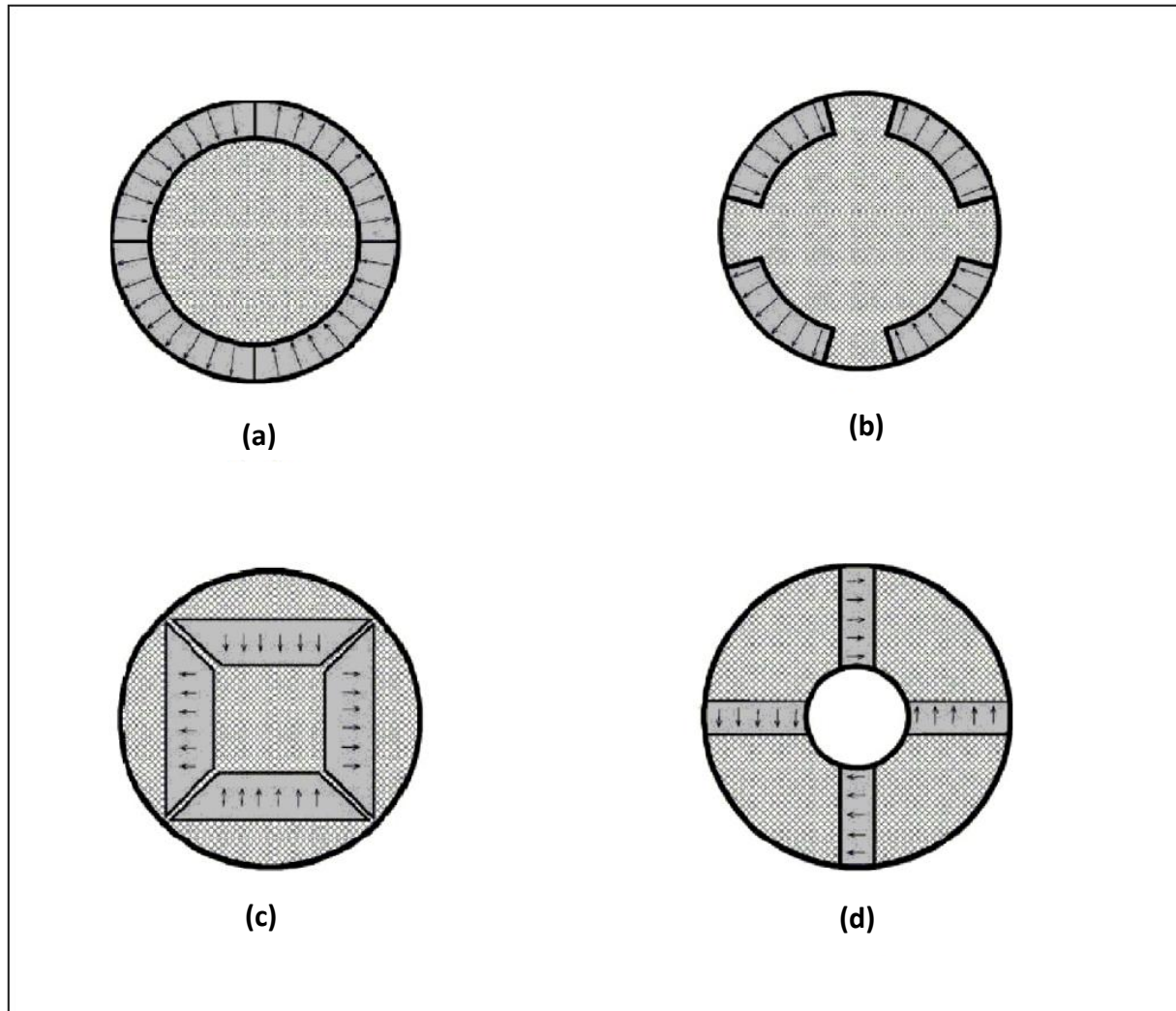


Figure I.6: Différents dispositions d'aimants permanents dans un rotor [08]

(a) Aimants en surface

(b) Aimants insérés ou encastrés

(c) Aimants enterres

(d) Aimants à concentration de flux

#### ➤ Moteur synchrone à aimants à flux axial

Il existe plusieurs configurations des MSAP à flux axial suivant le nombre de rotors et de stators et de leurs dispositions. Ces différentes possibilités donnent lieu à différentes configurations des MSAP à flux axial dont les principales sont les structures simples, à double stator, à double rotor et à multi rotor multi stator [05].

La figure (I.7) représente les différentes structures de machines à flux axial :

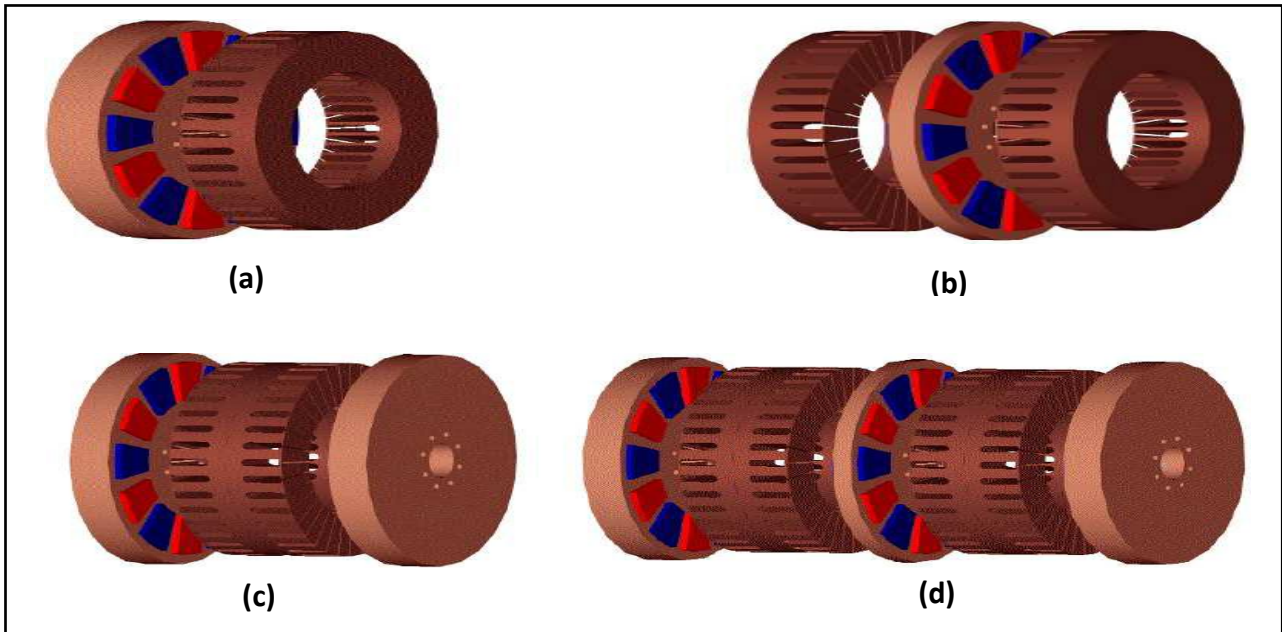


Figure I.7: Vue d'un moteur à flux axial (différentes configurations) [06]

(a) structure simple

(b) structure double stator

(c) Structure double rotor

(d) structure multi rotor multi stator

#### I.4. Alimentation des moteurs synchrones à aimants permanents

La plupart des moteurs à aimants permanents fabriqués sont conçus pour s'insérer dans une chaîne de commande, composée d'un élément de pilotage, d'un convertisseur statique, du moteur et de la charge. La machine est alimentée par un onduleur de courant ou de tension. Les signaux de commande de l'onduleur sont générés à partir de la position du rotor. Selon la commande utilisée, l'onduleur peut générer différentes formes d'onde de courant. En effet, les moteurs synchrones à aimants permanents peuvent être classés, selon le mode d'alimentation, en deux grandes catégories [07]:

- Les moteurs à f.c.e.m sinusoïdale, dites PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machines).

- Les moteurs à f.c.e.m trapézoïdale, dites BDCM (Brushless Direct Current Motors).

##### ➤ Les moteur PMSM

Les PMSM sont alimentés par des courants sinusoïdaux (figure I.8), ce qui réduit l'ondulation du couple causée par la commutation. Ils ont un fonctionnement plus proche de celui de la machine synchrone classique. Dans ce cas, on cherche à avoir une f.c.e.m sinusoïdale. Les PMSM sont utilisés pour les applications à grandes performances qui demandent une grande qualité de couple.

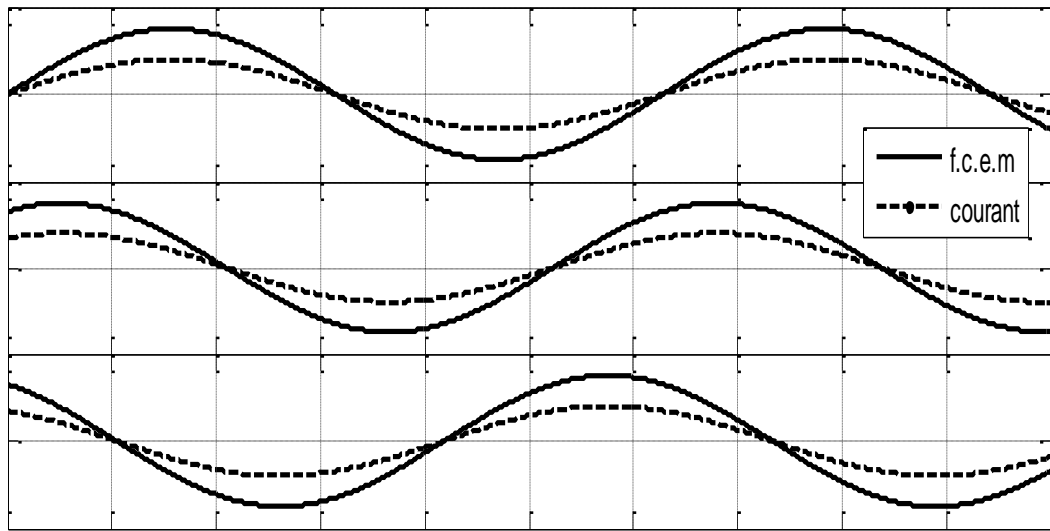
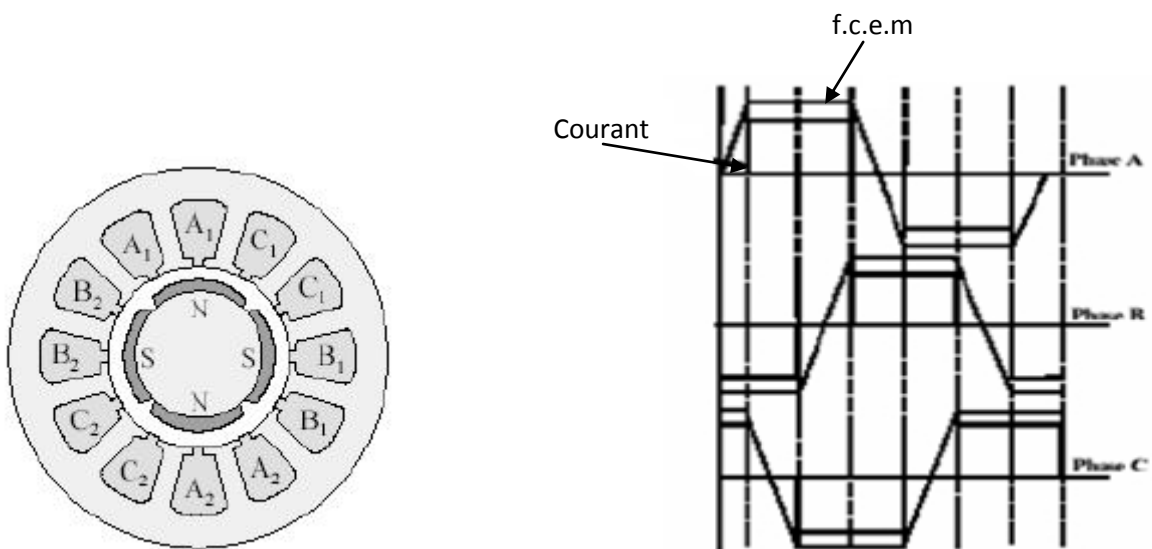


Figure I.8 : formes d'onde des courants et des f.c.e.m

➤ **Les moteurs BDCM**

Dans un moteur BDCM, les phases sont alimentées par des courants en créneaux en fonctions de la position du rotor. Ce régime de fonctionnement est très proche de celui de la machine à courant continu sauf que la commutation dans les conducteurs du stator est assurée par l'électronique. Ce type de machine est très utilisé à cause de la simplicité de sa commande, et sont faible coût. Cependant, un simple retard de commutation peut causer un grand couple pulsatoire; cela est l'inconvénient majeur de ce type de machine [07].



(a).Moteur BDCM à 4 pôles

(b). La forme du courant de phase et la f.c.e.m.

Figure I.9: Le courant de phase et la f.c.e.m. d'un moteur BDCM à 4 pôles

Afin de minimiser le couple pulsatoire, on alimente la machine avec des créneaux de courant de 120°. Cette alimentation consiste à alimenter à toutes instantes deux phases du

moteur avec des créneaux de courant. La figure (I.9-a) montre la géométrie d'un moteur Brushless triphasé à 4 pôles. La figure (I.9-b) montre les formes d'onde des courants d'alimentation et des f.c.e.m de la machine.

Deux types de convertisseurs permettent d'assurer l'alimentation de cette machine: le commutateur de courant, plus adapté aux grandes puissances, et l'onduleur de tension contrôlé en courant pour les faibles et moyennes puissances [07].

Cependant, en pratique, il est possible d'alimenter une machine à f.c.e.m trapézoïdale en courants sinusoïdaux et vice-versa. L'intérêt de ces associations est généralement d'offrir les qualités exigées pour l'application (grande qualité de couple avec les premières et simplicité de commande et faible coût avec les secondes).

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté succinctement les étapes de fonctionnement des lave-linges ainsi que les différents moteurs électriques utilisés pour l'entraînement de leur tambour, tout en spécifiant l'apport de la nouvelle technologie d'entraînement dite « Direct drive », qui est plus performante et plus efficace que la technique classique utilisant le système poulie-courroie. Par ailleurs, nous avons brièvement décrit le fonctionnement du moteur synchrone à aimants permanents en citant ces différentes topologies (axiale ou radiale) et ces différents modes d'alimentations (courants sinusoïdaux ou en créneaux).

Le moteur synchrone à aimants permanents à f.c.e.m trapézoïdale alimenté par des courants en créneaux (BDCM) fera l'objet de notre étude, le chapitre prochain sera consacré à sa modélisation.

# **Chapitre II**

## **Modélisation du système d'étude et résultats de simulation**

## Introduction

La représentation de l'ensemble machine-convertisseur par un modèle mathématique est une étape très importante dans l'étude et l'analyse du système. Ceci a pour but de prédire son comportement et ses performances en vue de sa mise en œuvre expérimentale.

En effet, afin d'élaborer une structure de commande, il est très important de disposer d'un modèle mathématique représentant fidèlement les caractéristiques du processus. Ce modèle ne doit pas être trop simple pour ne pas s'éloigner de la réalité physique, et ne doit pas être trop complexe pour simplifier l'analyse des structures de commande [09].

Dans ce chapitre, nous modélisons et simulons l'ensemble machine synchrone à aimants permanents alimenté par un onduleur de tension. Ce modèle a été développé sous l'environnement Matlab-Simulink-SimPowerSystems.

### II.1. Modélisation du système machine-convertisseur

Le système à modéliser est constitué d'un moteur synchrone à aimants permanents à f.c.e.m trapézoïdale alimenté à fréquence variable par un onduleur de tension, piloté par un codeur de position, la figure ci-dessous montre le schéma synoptique de l'ensemble.

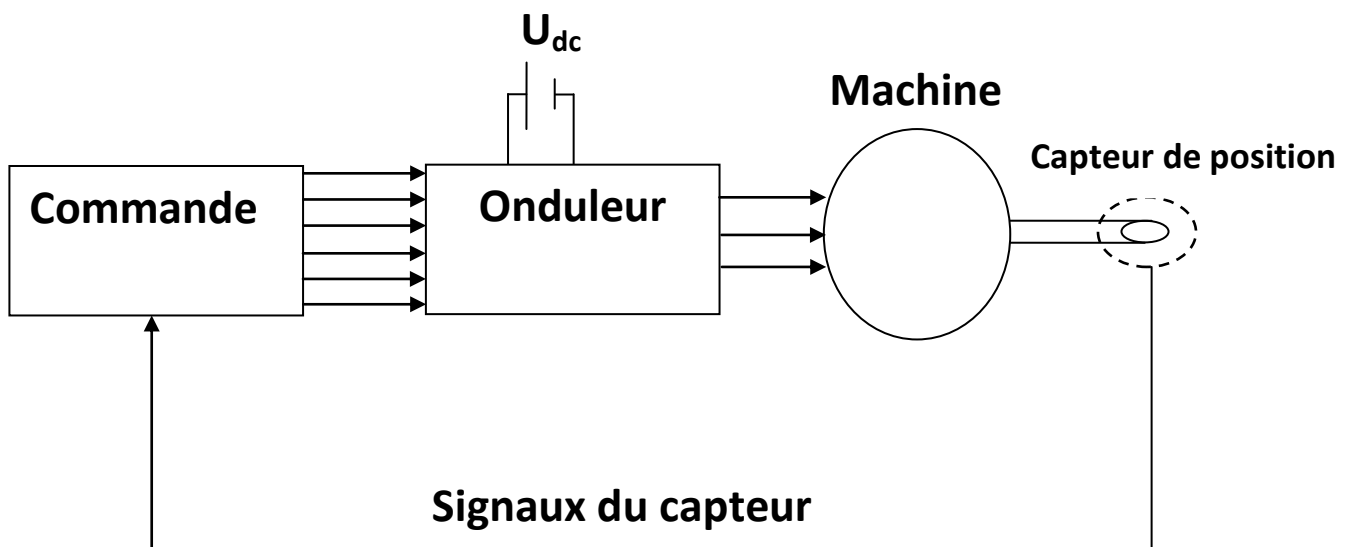


Figure II.1: Schéma synoptique de l'ensemble machine-convertisseur.

## II.1.1. Modélisation du moteur synchrone à aimants permanents(BDCM)

### a. hypothèses simplificatrices

La modélisation du moteur synchrone à aimants permanents est subordonnée par les hypothèses simplificatrices suivantes [04]:

- L'entrefer est constant :
  - On néglige l'effet d'encoches donc pas de couple de détente.
  - Le rotor est lisse, les inductances propres et mutuelles sont considérées constantes.
- Les enroulements de stator sont considérés symétriques et connectés en étoile avec neutre en l'air.

### b. Elaboration du modèle de la machine (BDCM)

#### b.1. Modèle électrique de la machine

Les équations générales du moteur à aimants permanents sont obtenues en appliquant la loi d'Ohm à chaque enroulement statorique:

$$\begin{cases} V_{an} = R_a \cdot i_a + \frac{d\phi_{ta}}{dt} \\ V_{bn} = R_b \cdot i_b + \frac{d\phi_{tb}}{dt} \dots\dots\dots [\text{II.1}] \\ V_{cn} = R_c \cdot i_c + \frac{d\phi_{tc}}{dt} \end{cases}$$

$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  : Sont respectivement les tensions simples des phases a, b et c

$i_a, i_b, i_c$  : Sont respectivement les courants dans les phases a, b et c

$R_a, R_b, R_c$  : Sont respectivement les résistances des phases a, b et c

$\phi_{ta}, \phi_{tb}, \phi_{tc}$  : Sont respectivement les flux totaux induits dans les phases a, b et c

Les flux totaux des trois phases peuvent s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \phi_{ta} = \phi_{aa} + \phi_{ab} + \phi_{ac} + \phi_{ra} \\ \phi_{tb} = \phi_{ba} + \phi_{bb} + \phi_{bc} + \phi_{rb} \dots\dots\dots [\text{II.2}] \\ \phi_{tc} = \phi_{ca} + \phi_{cb} + \phi_{cc} + \phi_{rc} \end{cases}$$

$\phi_{aa}, \phi_{ab}, \phi_{ac}, \phi_{ba}, \phi_{bb}, \phi_{bc}, \phi_{ca}, \phi_{cb}, \phi_{cc}$  : Sont respectivement les flux auto-induits par les courants dans les phases statoriques a, b et c (Flux propres et mutuels).

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$  : Sont respectivement les flux mutuels entre le rotor et les phases a, b et c (flux envoyée par l'aimant dans le stator).

En introduisant les inductances propres et mutuelles, les flux totaux peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} \phi_{ta} = L_{aa} \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c + \phi_{ra} \\ \phi_{tb} = M_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + M_{bc} \cdot i_c + \phi_{rb} \dots \dots \dots [II.3] \\ \phi_{tc} = M_{ca} \cdot i_a + M_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c + \phi_{rc} \end{cases}$$

$L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$  : Sont respectivement les inductances propres des phases a, b et c.

$M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$  : Sont respectivement les inductances mutuelles entre les phases a, b, c.

D'après les hypothèses simplificatrices les phases sont symétriques et les inductances sont indépendantes de la position du rotor, donc on peut écrire :

$$R_a = R_b = R_c = R$$

$$M_{ab} = M_{ac} = M_{ba} = M_{bc} = M_{ca} = M_{cb} = M = \text{Constante}$$

Les enroulements des phases de la machine sont connectés en étoile avec neutre en l'air, la composante homopolaire du courant est nulle, il est possible de faire la simplification suivante :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \Rightarrow i_b + i_c = -i_a \dots \dots \dots [II.4]$$

$$\phi_{ta} = L \cdot i_a + M \cdot (i_b + i_c) + \phi_{ra} \dots \dots \dots [II.5]$$

$$\phi_{ta} = (L - M) \cdot i_a + \phi_{ra} \dots \dots \dots [II.6]$$

$L_m = (L - M)$  : Inductance cyclique (inductance équivalente d'une phase).

Les flux totaux induits dans les phases a, b et c peuvent alors s'écrivent :

$$\begin{cases} \phi_{ta} = L_m \cdot i_a + \phi_{ra} \\ \phi_{tb} = L_m \cdot i_b + \phi_{rb} \dots \dots \dots [II.7] \\ \phi_{tc} = L_m \cdot i_c + \phi_{rc} \end{cases}$$

On remplace [II.7] dans [II.1] et on obtient les équations électriques suivantes :

$$\begin{cases} V_{an} = R.i_a + L_m \frac{di_a}{dt} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{bn} = R.i_b + L_m \frac{di_b}{dt} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \dots\dots\dots [II.8] \\ V_{cn} = R.i_c + L_m \frac{di_c}{dt} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases}$$

Le troisième terme de chaque équation du système [II.8] représente les forces contre électromotrice (f.c.e.m) dont les expressions sont les suivantes :

$$\begin{cases} e_a = \frac{d\Phi_{ra}}{dt} = \frac{d\phi_{ra}}{d\theta_e} \cdot \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d\phi_{ra}}{d\theta_e} \cdot \omega_r = e_{ra} \cdot \omega_r \\ e_b = \frac{d\Phi_{rb}}{dt} = \frac{d\phi_{rb}}{d\theta_e} \cdot \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d\phi_{rb}}{d\theta_e} \cdot \omega_r = e_{rb} \cdot \omega_r \dots\dots\dots [II.9] \\ e_c = \frac{d\Phi_{rc}}{dt} = \frac{d\phi_{rc}}{d\theta_e} \cdot \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d\phi_{rc}}{d\theta_e} \cdot \omega_r = e_{rc} \cdot \omega_r \end{cases}$$

$e_a, e_b, e_c$  : Sont respectivement les forces contre électromotrices des phases a, b et c.

$e_{ra}, e_{rb}, e_{rc}$  : Sont représentent les f.c.e.m par unité de vitesse des phases a, b et c

$\theta_e$  : Angle de rotation électrique

$\omega_r$  : Vitesse de rotation électrique

Le modèle électrique de la machine prend alors la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{an} = R.i_a + L_m \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_{bn} = R.i_b + L_m \frac{di_b}{dt} + e_b \dots\dots\dots [II.10] \\ V_{cn} = R.i_c + L_m \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases}$$

Le système des équations électriques peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \dots\dots\dots [\text{II.11}]$$

Le système d'équations [II.11] représente le modèle électrique de la BDCM, son schéma électrique équivalent est :

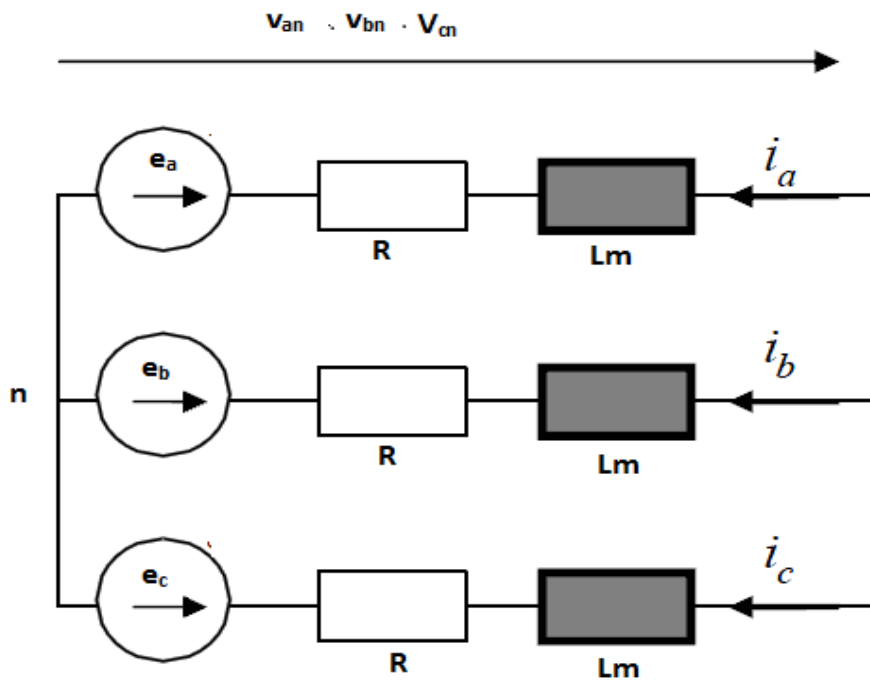


Figure II.2: Schéma électrique équivalent de la BDCM connectée en étoile

A partir de système d'équation [II.10] les tensions composées sont obtenue par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ab} = R.i_a - R.i_b + L_m \frac{di_a}{dt} - L_m \frac{di_b}{dt} + e_a - e_b \\ V_{bc} = R.i_b - R.i_c + L_m \frac{di_b}{dt} - L_m \frac{di_c}{dt} + e_b - e_c \end{cases} \dots\dots\dots [\text{II.12}]$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \Rightarrow i_c = -(i_a + i_b) \dots\dots\dots [\text{II.13}]$$

Remplaçant [II.13] dans [II.12] on obtient :

$$\begin{cases} V_{ab} = R.i_a - R.i_b + L_m \frac{di_a}{dt} - L_m \frac{di_b}{dt} + e_a - e_b \dots \dots \dots [\text{II.14}] \\ V_{bc} = R.i_b - R.i_c + L_m \frac{di_b}{dt} - L_m \frac{di_c}{dt} + e_b - e_c \dots \dots \dots [\text{II.15}] \end{cases}$$

[II.14]×2+ [II.15] et après simplification, on obtient :

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3L_m} (2V_{ab} + V_{bc} - 3R.i_a - 2e_a + e_b + e_c) \dots \dots \dots [\text{II.16}]$$

[II.15]×2- [II.14] et après simplification, on obtient :

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3L_m} (-V_{ab} + V_{bc} - 3R.i_b + e_a - 2e_b + e_c) \dots \dots \dots [\text{II.17}]$$

Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3L_m} (2V_{ab} + V_{bc} - 3R.i_a - 2e_a + e_b + e_c) \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3L_m} (-V_{ab} + V_{bc} - 3R.i_b + e_a - 2e_b + e_c) \dots \dots \dots [\text{II.18}] \\ \frac{di_c}{dt} = -\left(\frac{di_b}{dt} + \frac{di_a}{dt}\right) \end{cases}$$

On remplace les f.c.e.m par les f.c.e.m par unité de vitesse et on obtient :

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3L_m} (2V_{ab} + V_{bc} - 3R.i_a + \Omega.p.K(-2e_{ra} + e_{rb} + e_{rc})) \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3L_m} (-V_{ab} + V_{bc} - 3R.i_b + \Omega.p.K(e_{ra} - 2e_{rb} + e_{rc})) \dots \dots \dots [\text{II.19}] \\ \frac{di_c}{dt} = -\left(\frac{di_b}{dt} + \frac{di_a}{dt}\right) \end{cases}$$

$e_{ra}, e_{rb}, e_{rc}$  : Sont représentés les f.c.e.m en valeur unitaire par unité de vitesse des phases a, b et c

$V_{ab}, V_{bc}$  : Tensions composées entre phases

$\Omega$  : Vitesse de rotation mécanique

$p$  : Nombre de paires de pôles

## b.2. Représentation de la f.c.e.m

Notre modèle se base sur une forme d'onde trapézoïdale idéale de f.c.e.m. Afin de normaliser son amplitude, celle-ci sera représentée en valeur unitaire comme illustrée par la figure suivante :

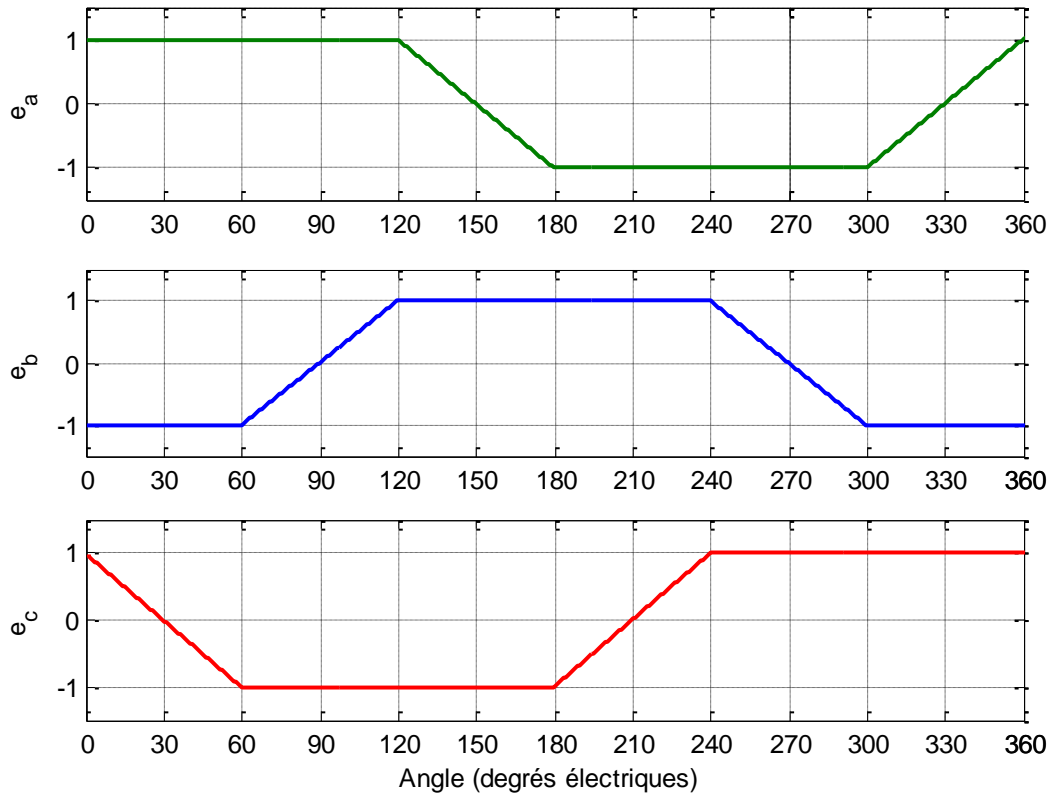


Figure II.3: formes d'onde des f.c.e.m des trois phases en valeur unitaire

Son amplitude devrait être multipliée par la vitesse de rotation pour retrouver la f.c.e.m pour une vitesse donnée. Les f.c.e.m des trois phases sont décalées de 120° électriques.

## b.3. Modèle mécanique de la machine

La dynamique du rotor est définie par l'équation suivante :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \dots \dots \dots [II.20]$$

Fonctionnement en moteur  $\Rightarrow$  le couple électromagnétique est un couple moteur, le couple résistant est donnée par la charge entraînée.

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \dots\dots\dots [II.21]$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f\Omega) \dots\dots\dots [II.22]$$

$J$  : Représente l'inertie du rotor (Kg.m<sup>2</sup>)

$f$  : Représente le coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rd)

$C_r$  : Représente le couple de charge mécanique (N.m)

$\Omega$  : Vitesse de rotation mécanique (rd/s)

$C_{em}$  : Représente le couple électromagnétique développé par la machine (N.m)

L'expression du couple électromagnétique peut être établie à partir de la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \dots\dots\dots [II.23]$$

$$P_{em} = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c \dots\dots\dots [II.24]$$

$$C_{em} = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{\Omega} \dots\dots\dots [II.25]$$

On remplace les f.c.e.m par les f.c.e.m par unité de vitesse et on obtient la relation de couple suivante :

$$C_{em} = p.K.(e_{ra} \cdot i_a + e_{rb} \cdot i_b + e_{rc} \cdot i_c) \dots\dots\dots [II.26]$$

Utilisant les équations [II.19], [II.22] et [II.26] nous construisons le modèle de simulation, ce dernier est représenté par l'organigramme ci-dessous :

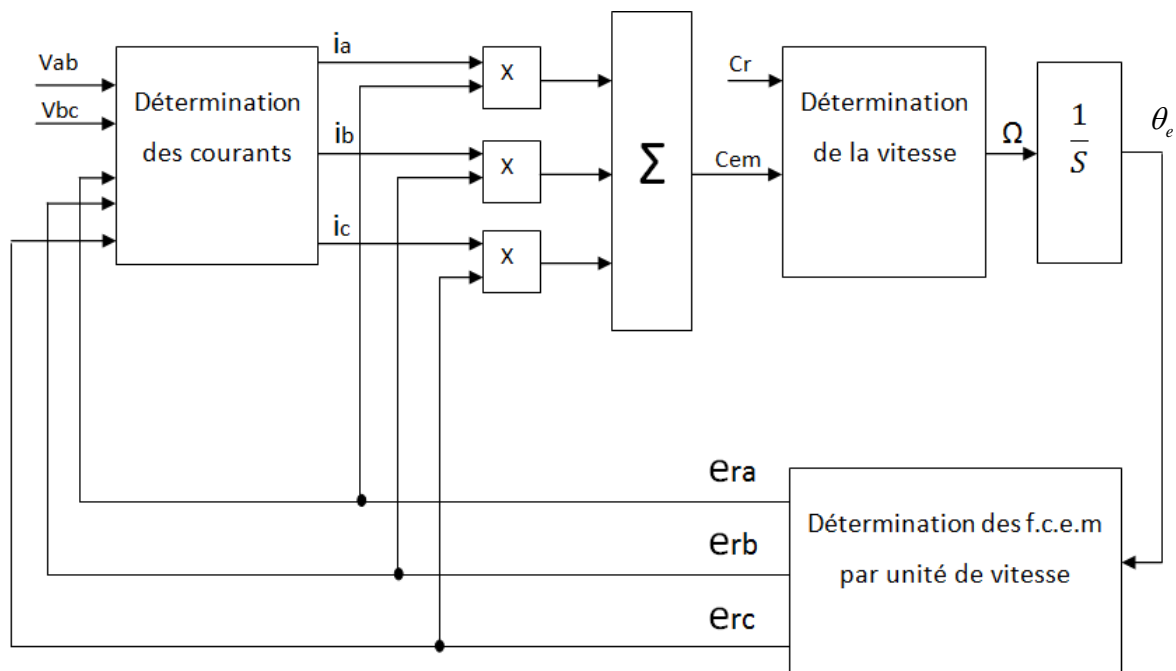


Figure II.4: Organigramme du modèle de simulation de la machine

Les entrées du modèle sont les deux tensions composées ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ) et le couple de charge  $C_r$ .

Les sorties sont les courants des trois phases ( $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$ ), le couple électromagnétique  $C_{em}$ , et la vitesse de rotation  $\Omega$ .

### II.1.2 Modèle du capteur de position

L'autopilotage de la BDCM nécessite un capteur qui détermine la position du rotor par rapport au stator. Dans notre cas, nous avons utilisé un codeur permettant de détecter la position du rotor à chaque  $60^\circ$  électriques. Le capteur délivre trois signaux logiques codé en code Gray comme illustrée par la figure ci-dessous.

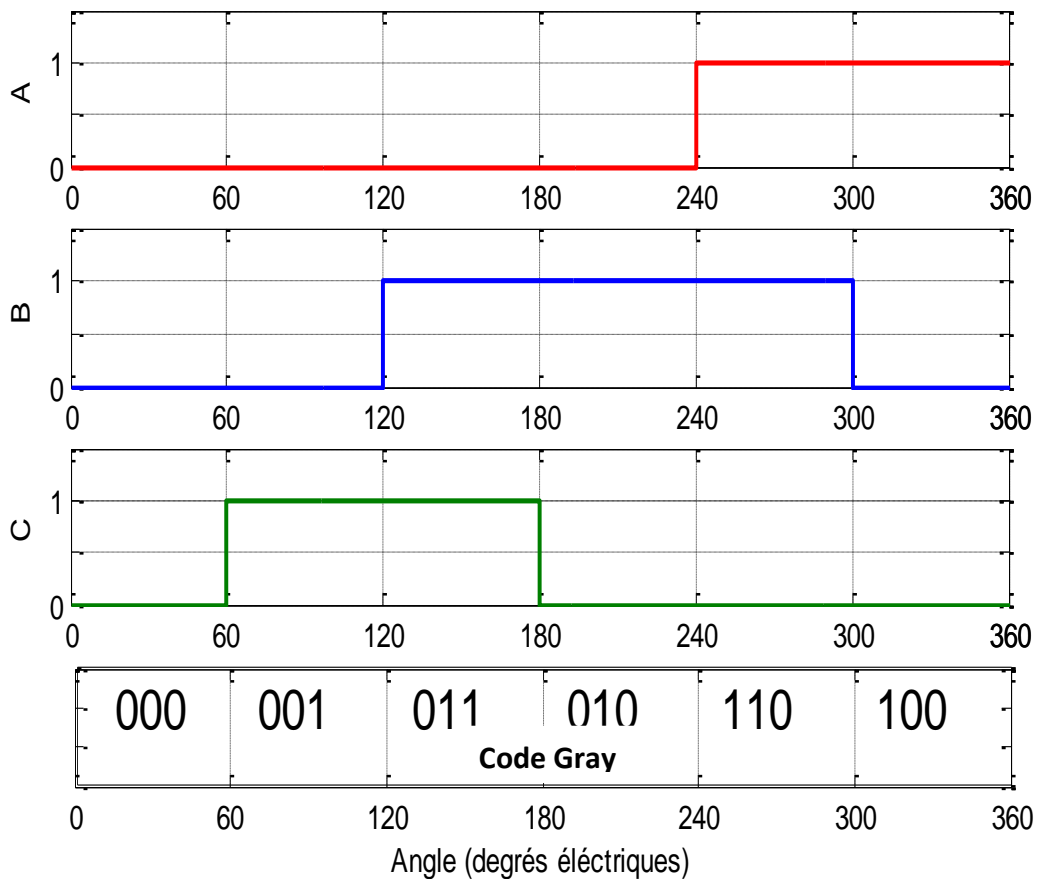


Figure II.5: Signaux logiques à la sortie du codeur de position

En exploitant l'angle de rotation électrique, nous avons construit le modèle du capteur sur Matlab-Simulink, ce dernier est représenté par l'organigramme suivant:

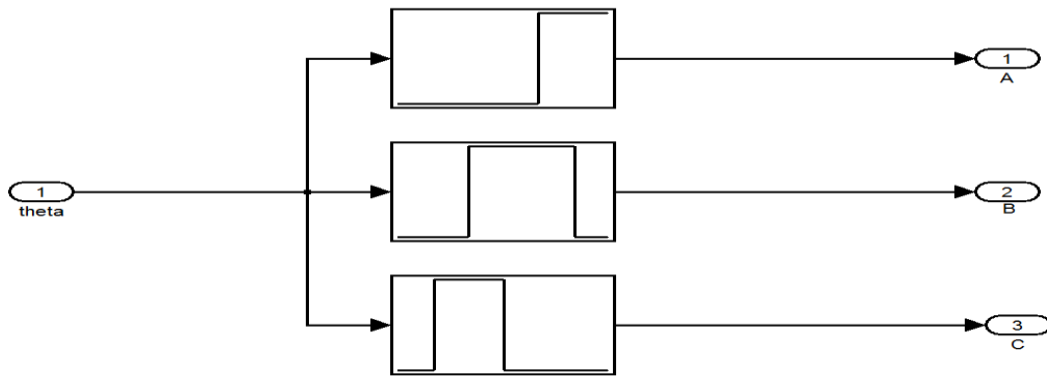


Figure II.6: Organigramme du Modèle du capteur

L'entrée du modèle est l'angle de rotation électrique  $\theta$ . Les sorties sont les trois signaux logiques A, B et C.

### II.1.3. Modèle de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif, il permet de modifier de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir un signal contrôlé en fréquence et en amplitude.

Ce dernier est un ensemble d'interrupteurs, représentant les transistors et les diodes, qui sont soit à l'état conducteur (on) soit à l'état bloqué (off). Il est constitué de trois bras, de deux transistors IGBT pour chacun. Chaque transistor est monté en anti parallèle avec une diode de récupération, pour assurer la continuité des courants.

Dans ce travail, nous utilisons directement le modèle de l'onduleur triphasé disponible dans la librairie de Matlab-SimPowerSystems, la figure II.7 montre son schéma synoptique. Cependant, le modèle a été paramétré en fonction des transistors et des diodes utilisés dans le dispositif expérimental en se basant sur les fiches techniques de ces composants.

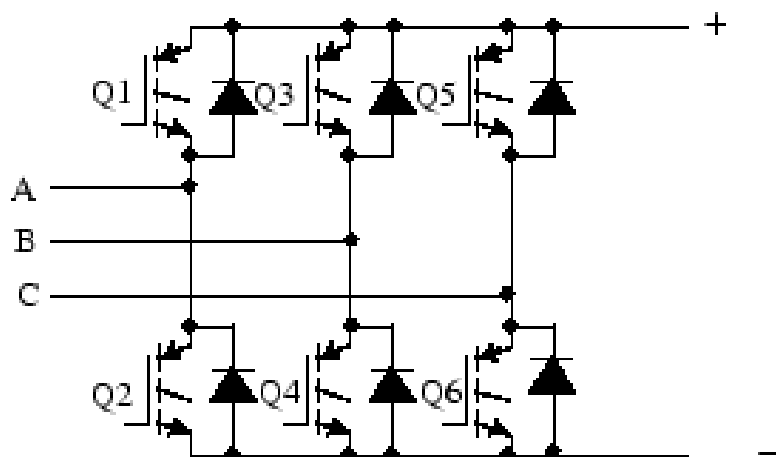


Figure II.7: Schéma de l'onduleur IGBT-Diode Sur SimPowerSystems

Le symbole utilisé pour représenter l'onduleur IGBT-Diode sur SimPowerSystems est donné par la figure ci-dessous.

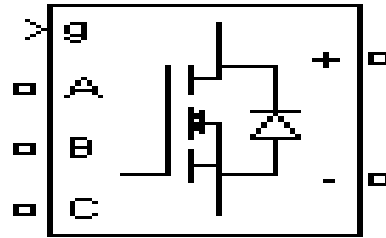


Figure II.8: Symbole de l'onduleur IGBT-Diode disponible sur Matlab- SimPowerSystems

Les entrées du modèle sont la tension du bus continu  $V_{dc}$  et les signaux de commande des grilles des transistors "g" ( $g_1...g_6$ ). Les sorties sont les tensions simples  $v_a$ ,  $v_b$  et  $v_c$ .

## II.2. La logique de commande de l'onduleur

Afin d'imposer la logique de commande 120° électriques, nous utilisons l'information logique (signaux A, B et C) en sortie du capteur de position pour générer les signaux qui permettent l'ouverture et la fermeture des transistors de l'onduleur. La commande se fait de telle sorte qu'à chaque position élémentaire du rotor de la BDCM (thêta =60° électriques) des ordres doivent être donnés pour le blocage d'un transistor et le déblocage d'un autre. Ceci se fait en synchronisant les courants (champ statorique) et les f.c.e.m (champ rotorique) et en maintenant entre eux un angle de déphasage nul (angle de calage nul).

En outre, afin d'assurer l'inversion du sens de rotation du moteur, nous définissons les tables de vérités dans les deux sens.

Angles	A	B	C	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0°-60°	0	0	0	1	0	0	1	0	0
60°-120°	0	0	1	1	0	0	0	0	1
120°-180°	0	1	1	0	0	1	0	0	1
180°-240°	0	1	0	0	1	1	0	0	0
240°-300°	1	1	0	0	1	0	0	1	0
300°-360°	1	0	0	0	0	0	1	1	0

Tableau II.1: Signaux du capteur et états des interrupteurs (rotation dans le sens horaire)

Angles	A	B	C	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0°-60°	0	0	0	0	1	1	0	0	0
60°-120°	0	0	1	0	1	0	0	1	0
120°-180°	0	1	1	0	0	0	1	1	0
180°-240°	0	1	0	1	0	0	1	0	0
240°-300°	1	1	0	1	0	0	0	0	1
300°-360°	1	0	0	0	0	1	0	0	1

Tableau II.2: Signaux du capteur et états des interrupteurs (rotation dans le sens antihoraire)

Les tableaux précédents indiquent lesquels des interrupteurs de l'onduleur à activer, en fonction des signaux du codeur de position, afin d'assurer les commutations adéquates des phases du moteur. De plus, ils précisent l'ordre de succession des commutations permettant le fonctionnement dans les deux sens de rotation.

En utilisant la simplification de Karnaugh, nous déduisons les fonctions logiques des six transistors, tel que dans le sens horaire :

$$Q1 = \bar{A}.\bar{B}$$

$$Q2 = B.\bar{C}$$

$$Q3 = \bar{A}.B$$

$$Q4 = \bar{B}.\bar{C}$$

$$Q5 = A.\bar{C}$$

$$Q6 = \bar{A}.C$$

Le modèle représentant la logique de commande de l'onduleur implémenté sur Matlab-Simulink est le suivant :

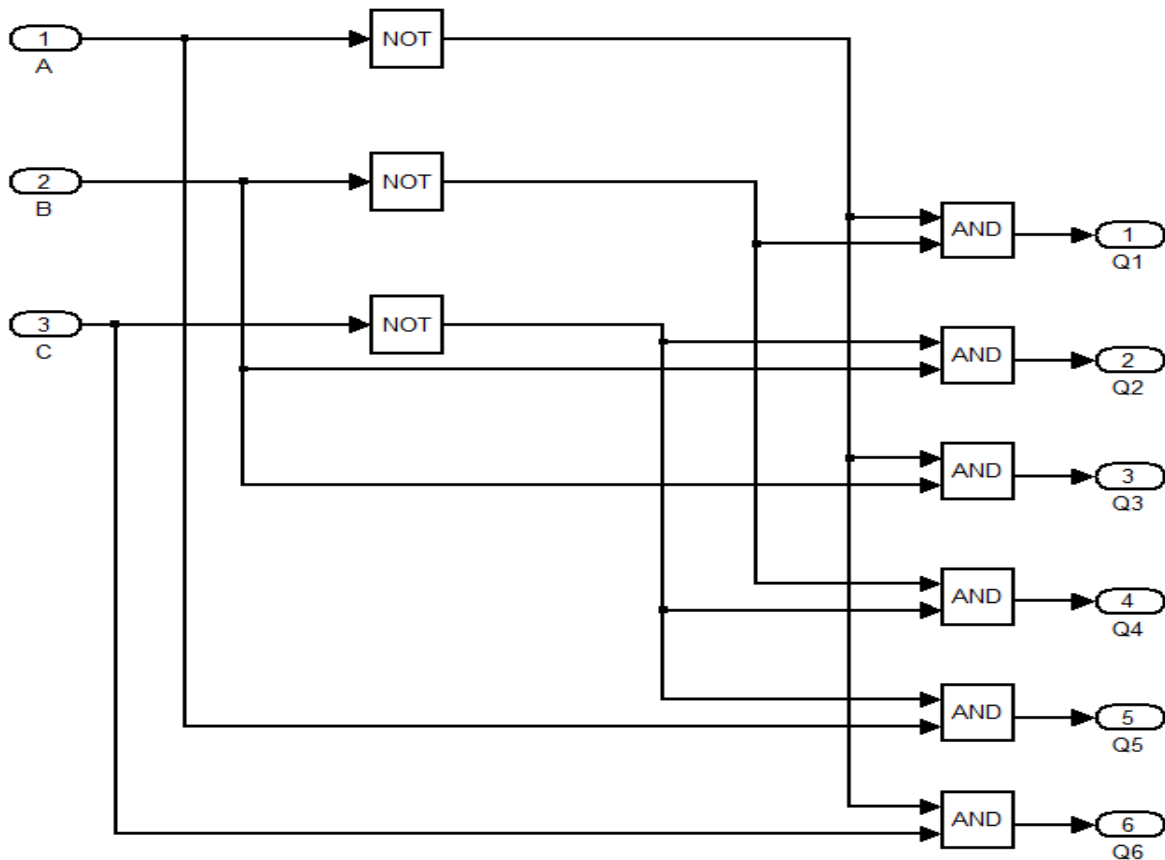


Figure II.9: Organigramme de la logique de commande 120° de l'onduleur

### II.3. Intégration du modèle de l'ensemble BDCM-Convertisseur piloté par un capteur de position

Les différents modèles (machine, onduleur et capteur de position) développés aux sections précédentes sont intégrés afin de constituer le modèle de simulation de l'ensemble BDCM-Convertisseur, piloté par un capteur de position.

Le modèle de simulation de l'ensemble est implémenté sous l'environnement Matlab-Simulink et SimPowerSystems selon l'organigramme suivant :

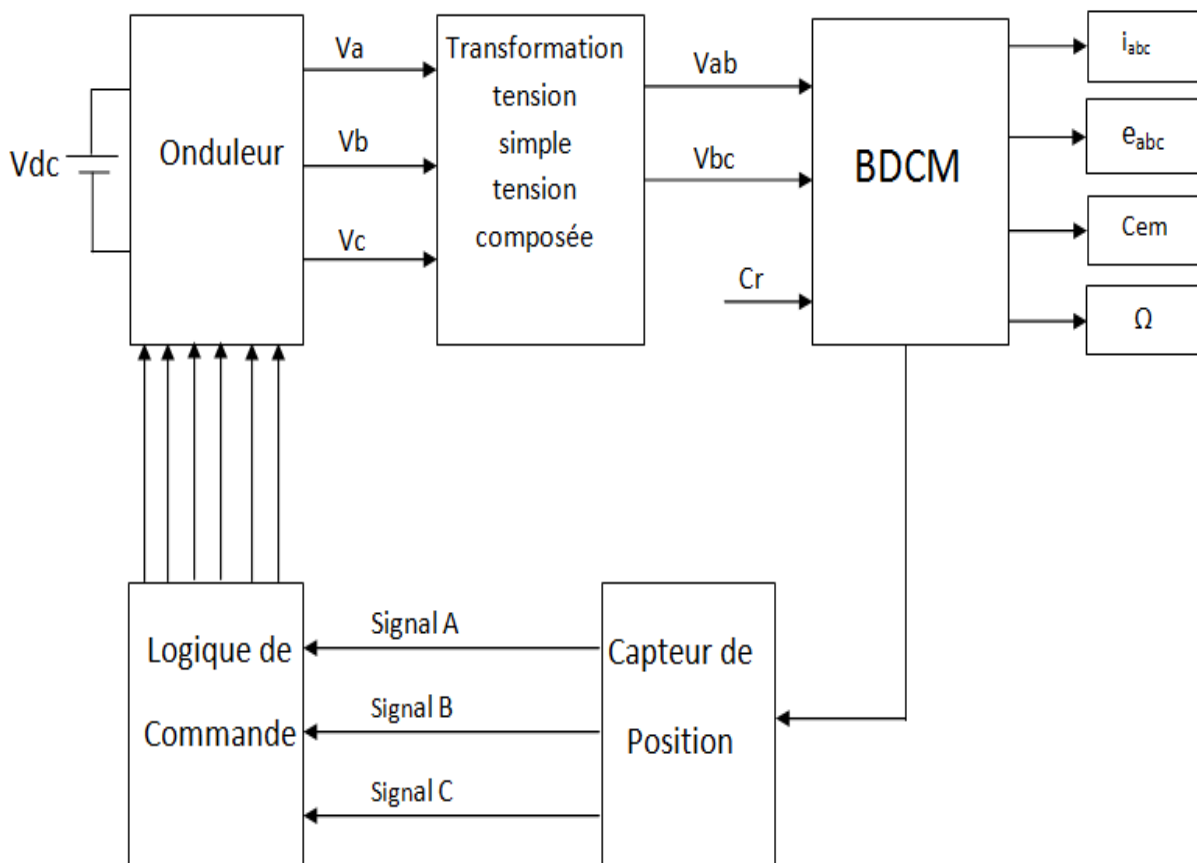


Figure II.10: Organigramme du modèle de l'ensemble BDCM-Convertisseur

Les entrées du modèle sont la tension continue  $V_{dc}$  à l'entrée de l'onduleur et le couple de charge  $C_r$  appliqué sur l'arbre du moteur.

Les sorties sont le couple  $C_{em}$ , la vitesse de rotation  $\Omega$  du moteur, les courants  $i_{abc}$  et les tensions induites par phase  $e_{abc}$  de la machine.

## II.4. Simulation du système BDCM- Convertisseur

Le modèle associant la machine et le convertisseur élaboré aux sections précédentes est implémenté sous l'environnement Matlab-Simulink et SimPowerSystems afin de déterminer les caractéristiques et les performances du système BDCM-Convertisseur. Plusieurs essais de simulation seront menés pour prédire les allures des différentes caractéristiques.

Des essais préliminaires, sous conditions nominales, ont été effectués sur trois machines de puissances différentes. La première est la machine (1) de notre étude de puissance 7kW qui est disponible au sein de notre laboratoire. La deuxième est la machine (2) étudiée par B.Zadoud et A.Oubellil (référence [10]) de puissance 0.75kW. Quant à la troisième machine (3), c'est celle de l'exemple de Matlab- SimPowerSystems qui est de puissance 1kW. Notons que les trois machines sont à f.c.e.m trapézoïdales, leurs paramètres sont donnés en annexe 01.

Enfin, dans l'objectif de notre travail, deux essais concernant la réalisation d'un profil de vitesse d'un lave-linge ont été effectués avec la machine de notre étude. Un essai en commande pleine onde et un autre en commande MLI.

### II.4.1 Essai de simulation sous conditions nominales

Un essai en démarrage direct sous conditions nominales a été effectué sur les trois machines citées précédemment. Les figures II.11 à II.15, II.16 à II.20 et II.21 à II.25 donnent respectivement les résultats obtenus pour les trois machines 1,2 et3.

#### ➤ Résultats concernant la machine (1) de notre étude (présente au laboratoire)

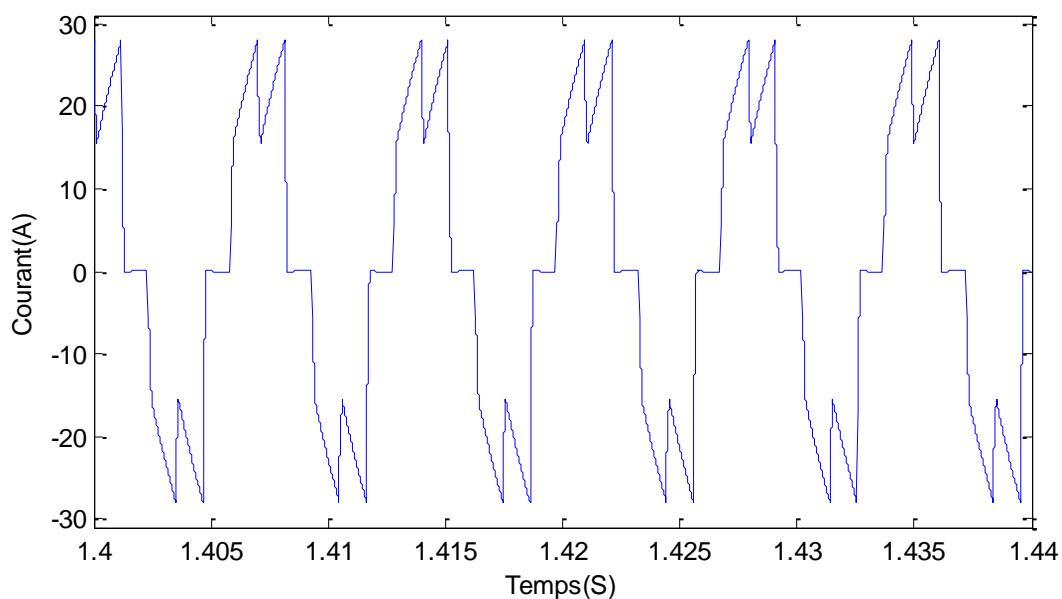


Figure II.11: Zoom de l'allure du courant d'une phase en régime permanent

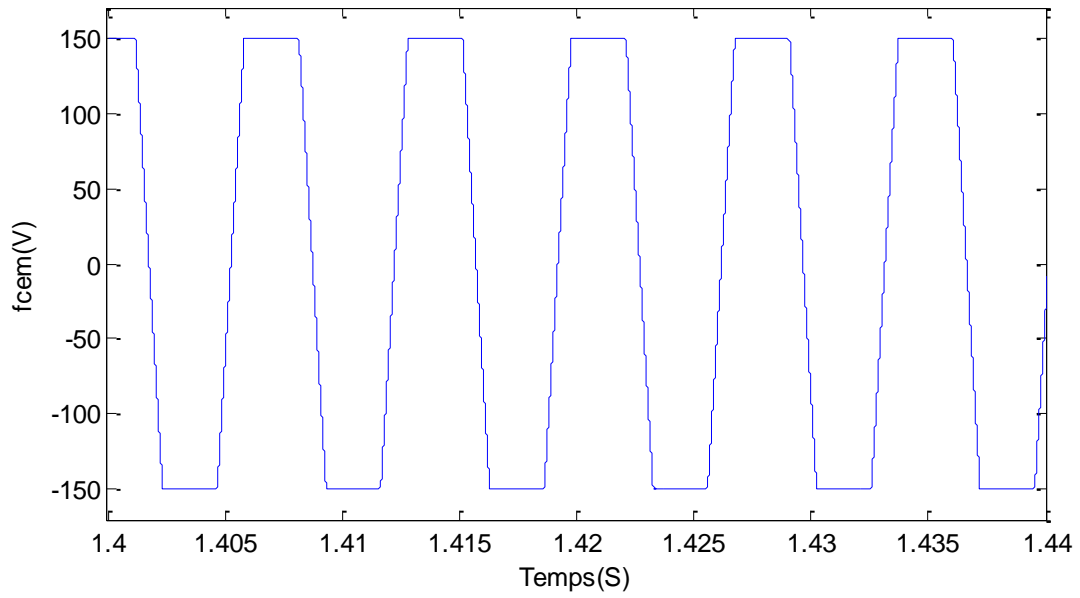


Figure II.12: Zoom de l'allure de la f.c.e.m d'une phase en régime permanent

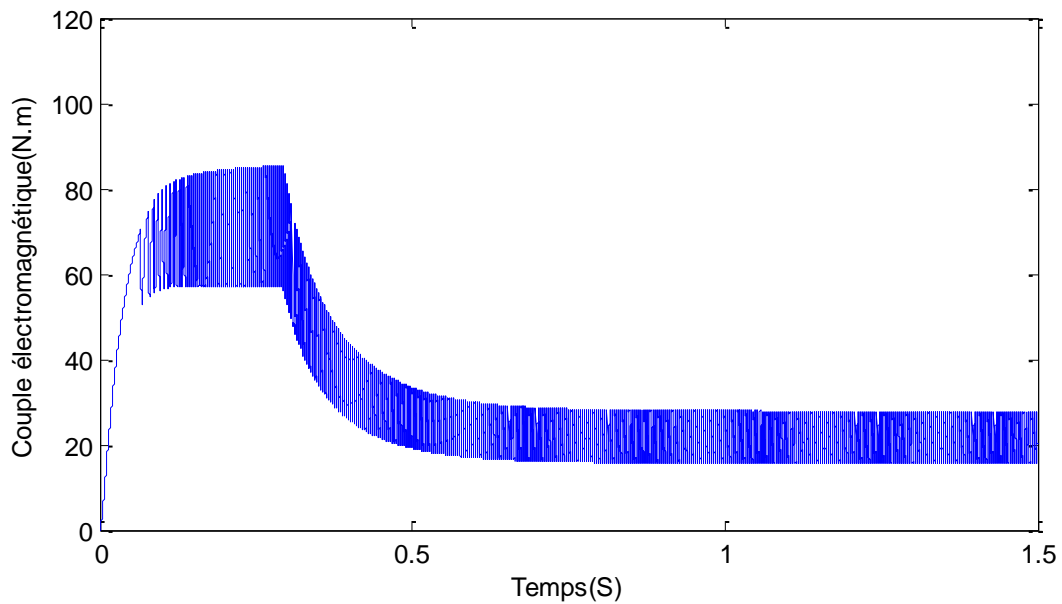


Figure II.13: Variation du couple électromagnétique

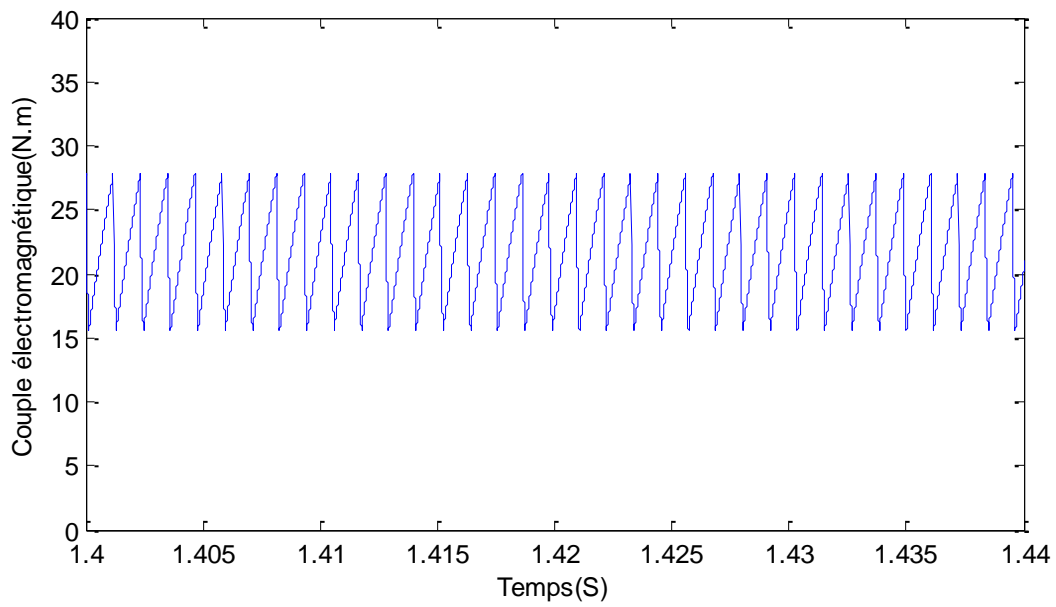


Figure II.14: Zoom sur le couple électromagnétique en régime permanent

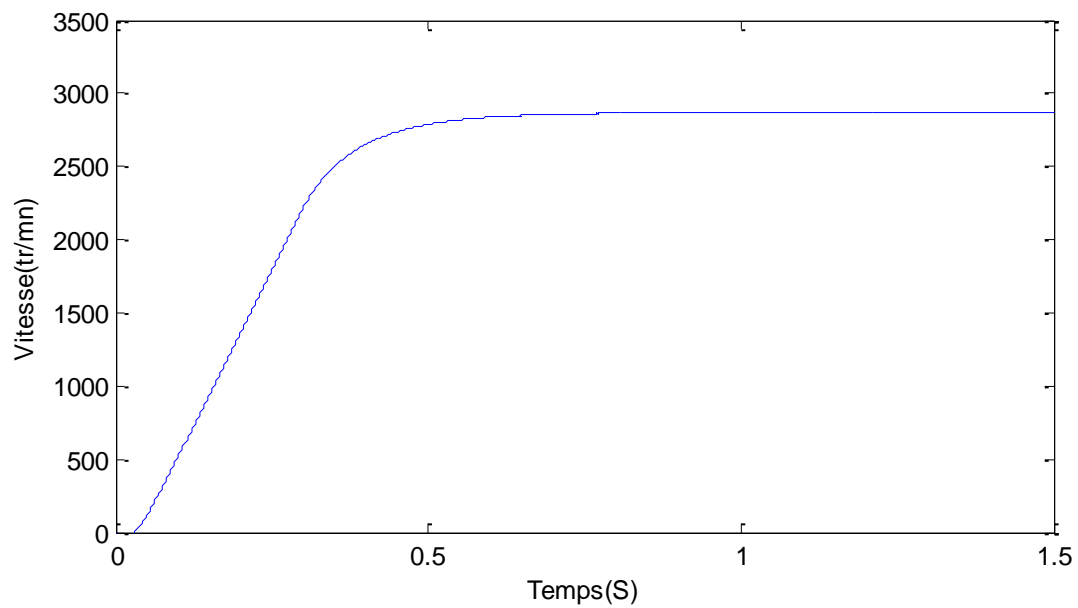


Figure II.15: Allure de la vitesse de rotation

## ➤ Résultats concernant la machine donnée par la référence [10]

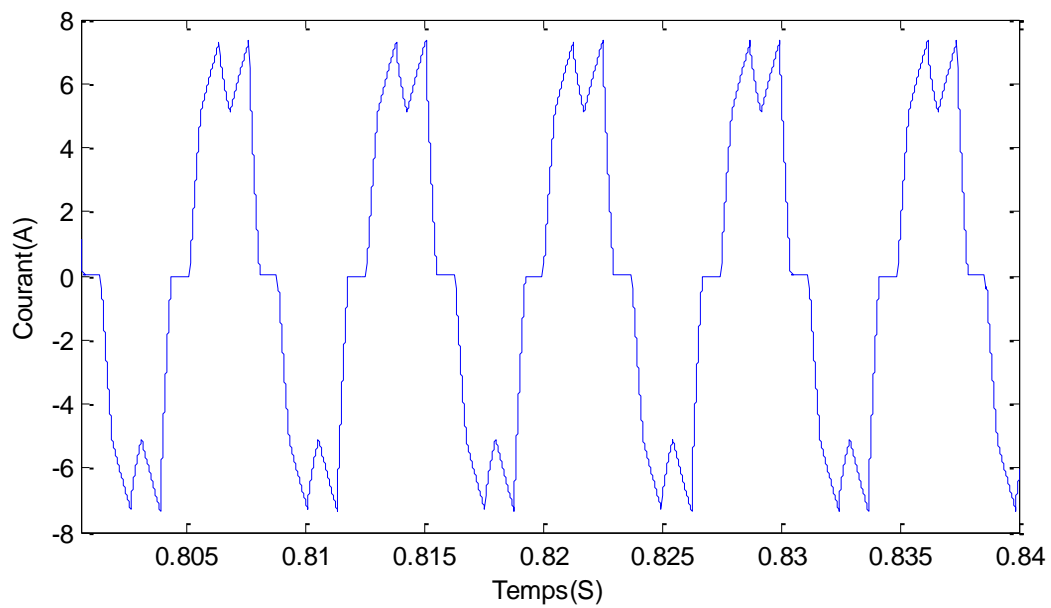


Figure II.16: Zoom de l'allure du courant d'une phase en régime permanent

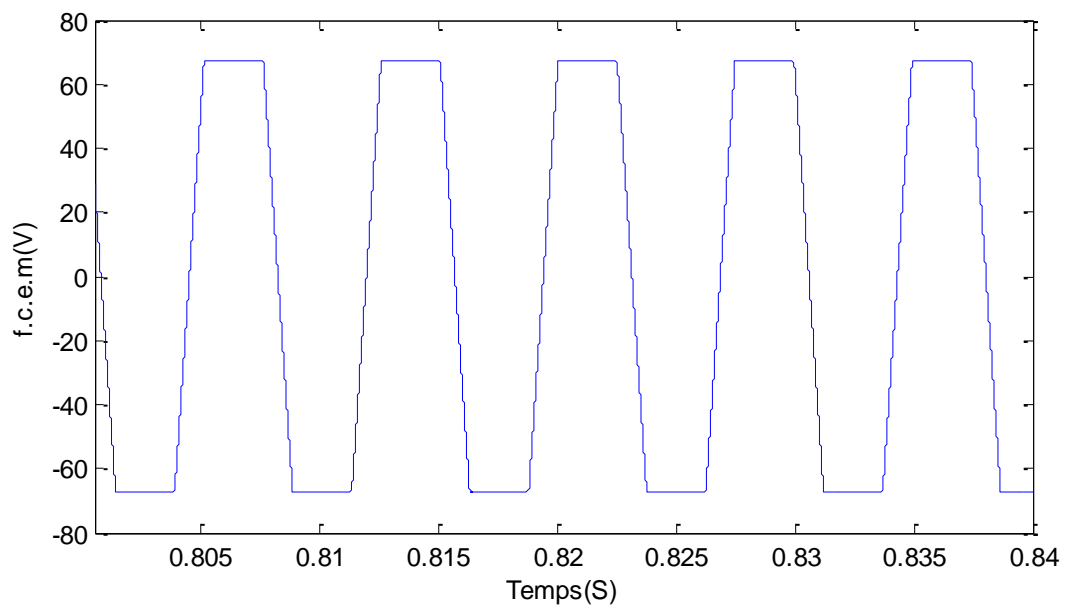


Figure II.17: Zoom de l'allure de la f.c.e.m d'une phase en régime permanent

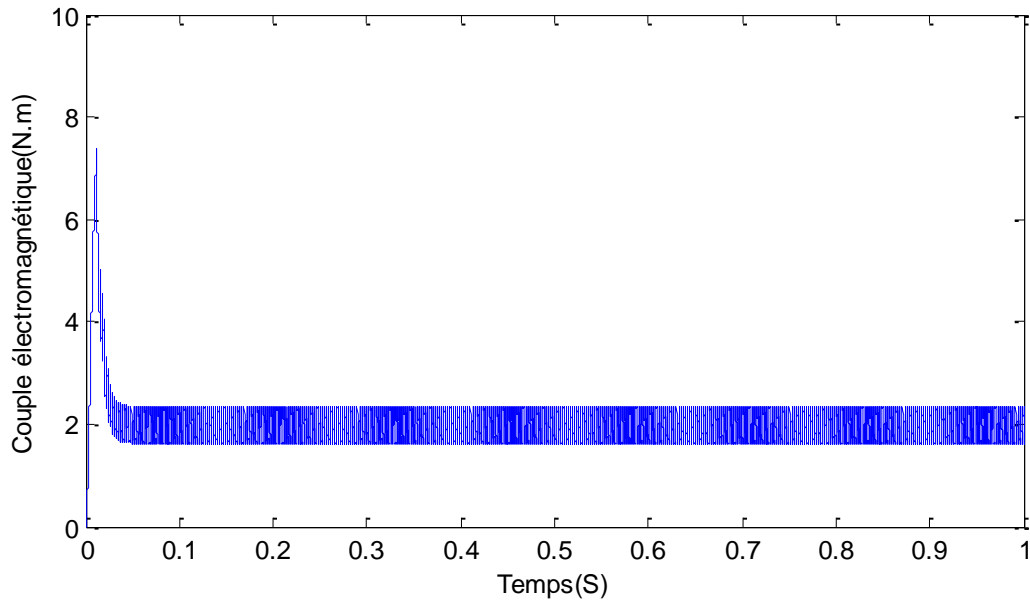


Figure II.18: Variation du couple électromagnétique

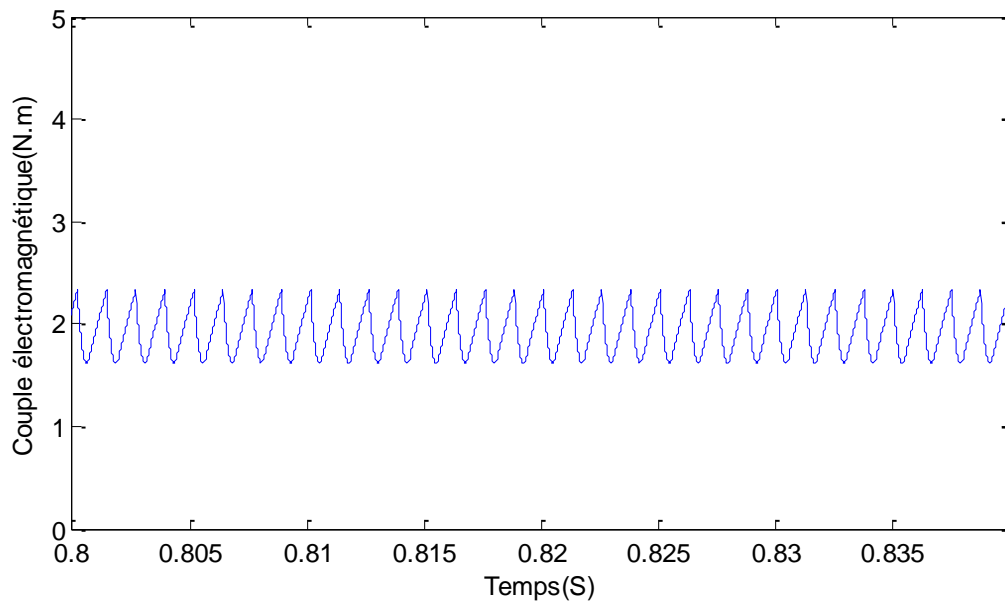


Figure II.19: Zoom sur le couple électromagnétique en régime permanent

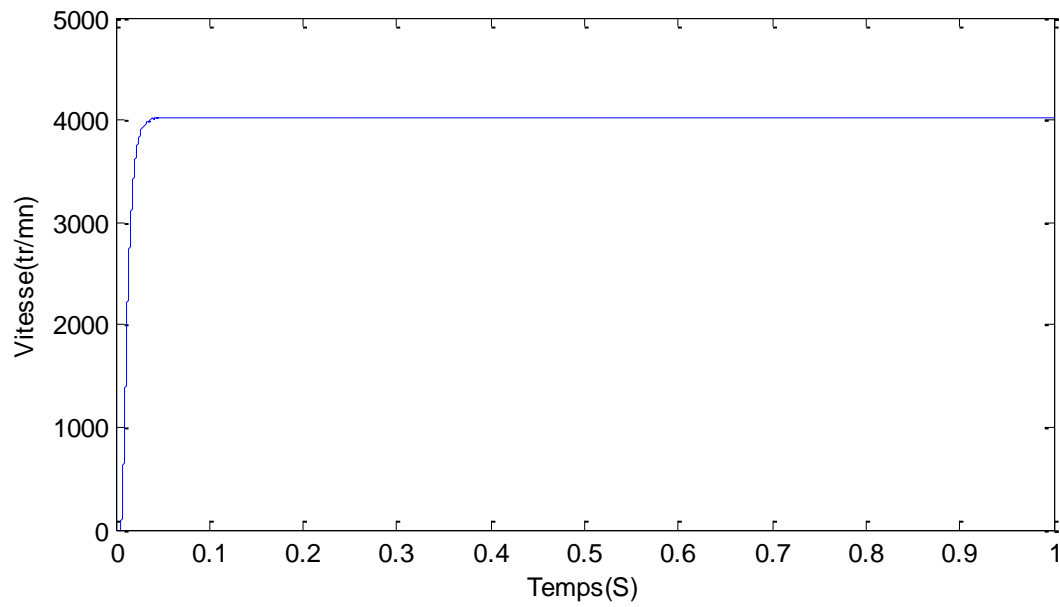


Figure II.20: Allure de la vitesse de rotation

➤ **Résultats concernant la machine de l'exemple de Matlab-SimPowerSystems**

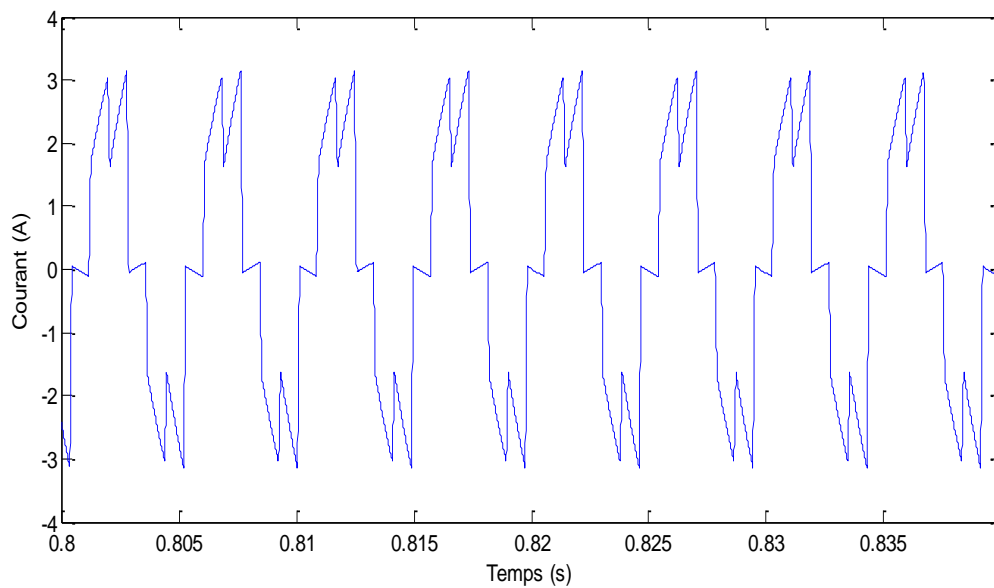


Figure II.21: Zoom de l'allure du courant d'une phase en régime permanent

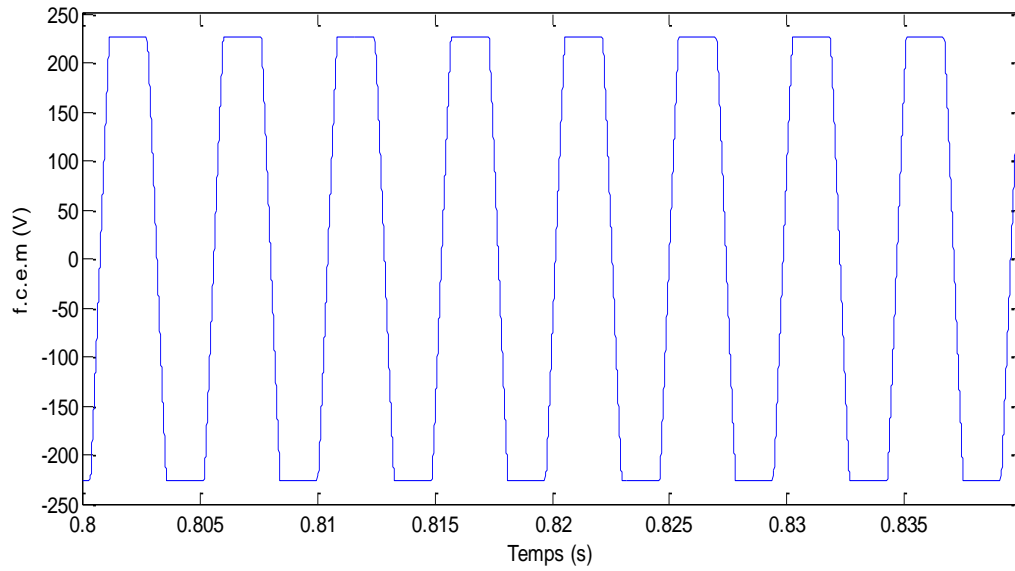


Figure II.22: Zoom de l'allure de la f.c.e.m d'une phase en régime permanent

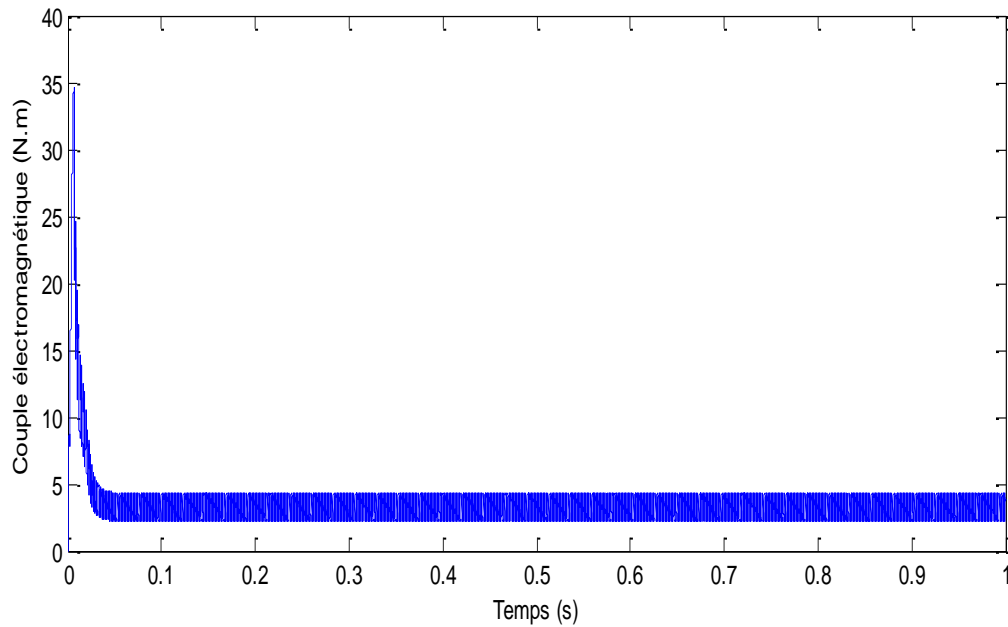


Figure II.23: Variation du couple électromagnétique

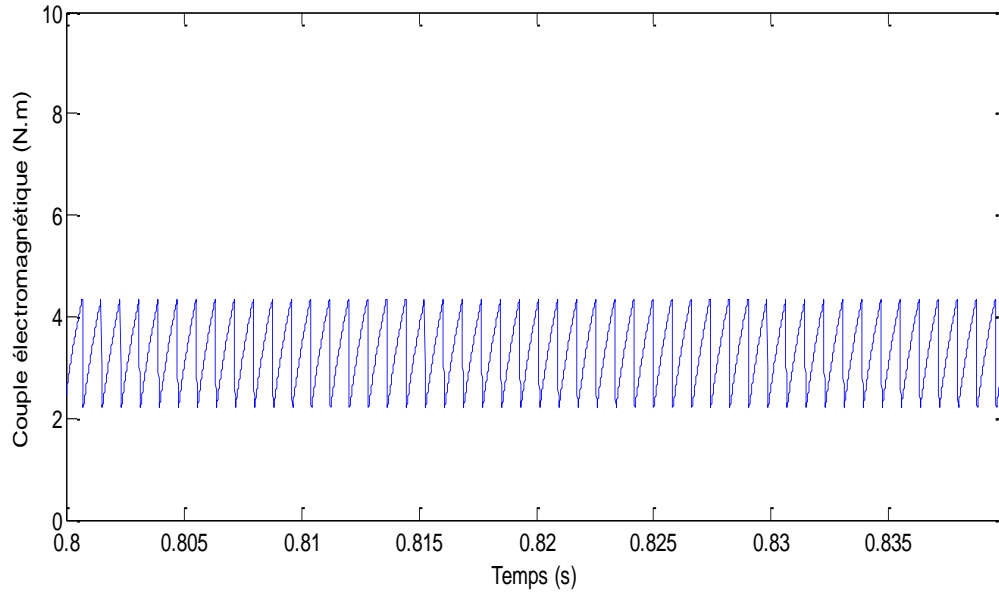


Figure II.24: Zoom sur le couple électromagnétique en régime permanent

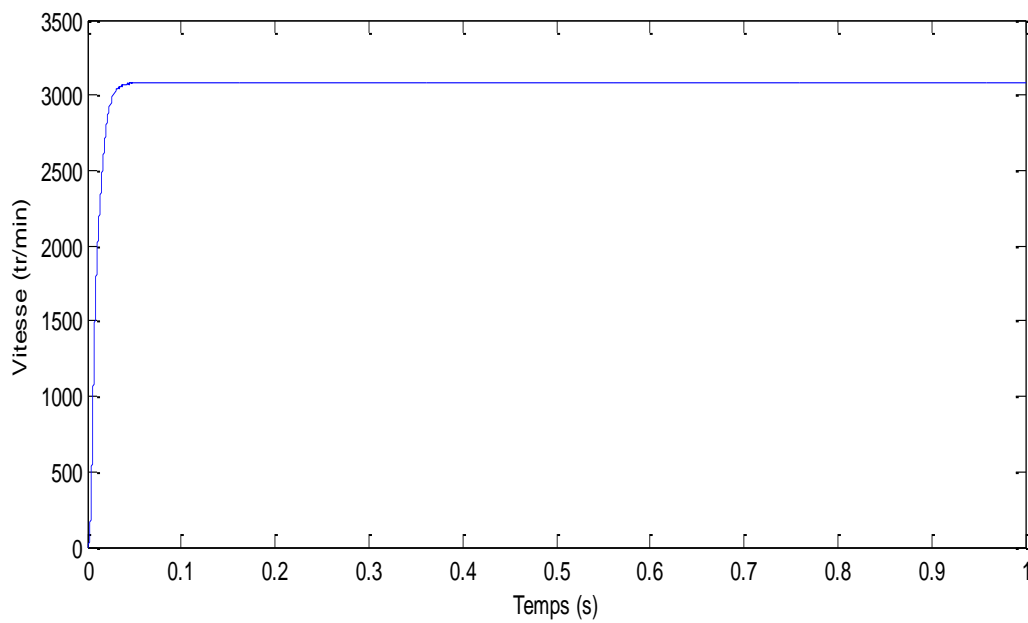


Figure II.25: Allure de la vitesse de rotation

### Interprétation des résultats obtenus

La figure (II.11) représente la courbe du courant d'une phase en régime permanent, sa forme présente des durées de conduction de  $120^\circ$  électriques alternées par des interruptions de  $60^\circ$  électrique. Son allure est différente de celle en créneaux idéaux. En effet, il présente des creux qui sont dues à l'effet retardataire des inductances de la machine lors de la commutation d'une phase à une autre, sa valeur maximale est de 28 A.

La figure (II.12) représente la f.c.e.m d'une phase de la machine en régime permanent. La forme de la f.c.e.m est purement trapézoïdale avec un plateau d'amplitude 150V.

La figure (II.13) représente le couple électromagnétique développé par la machine. Sa forme n'est pas lisse, elle présente des ondulations importantes qui sont dues en grande partie à la déformation de la forme des courants durant la période de commutation. En régime permanent sa valeur moyenne égale est à la somme des couples de charge et de frottement imposés (22 N.m).

L'allure de la vitesse de rotation de la machine est donnée par la figure (II.15) et montre que le régime permanent s'établit à une vitesse de 2900 tr/min au bout de 0.5s.

Les résultats obtenus lors de la simulation avec les paramètres de la machine de la référence [10] et la machine de l'exemple de Matlab-SimPowerSystems sont similaires à ceux obtenues avec la machine de notre étude et concordent bien avec les résultats données par les deux références. En définitif, nous pouvons confirmer que notre modèle décrit d'une façon assez précise le fonctionnement du système machine-convertisseur de notre étude. Et nous consacrerons la suite de la simulation à la réalisation de profil de vitesse du moteur qui est dans l'objectif dans notre travail.

#### II.4.2 Réalisation d'un profil de vitesse d'un lave-linge

Etant donné que le but de notre travail est de réaliser un profil de vitesse d'un lave-linge. Pour illustrer, et mettre en œuvre un profil approprié, nous avons envisagé une période de simulation s'étalant sur 8 secondes, dans laquelle toutes les phases sont exécutées, avec des vitesses avoisinant 230tr/min au lavage et 1100tr/min pendant l'essorage. Ces vitesses sont prévues pour un entraînement direct du tambour, en technologie direct drive. La simulation du système a été effectuée dans les conditions suivantes :

-Un couple de charge  $C_r = 2$  N.m

-Une tension  $V_{dc} = 116$ v pour l'essorage et  $V_{dc} = 26$ v pour le lavage.

La figure (II.27) décrit le sens de rotation du tambour pendant le lavage et l'essorage.

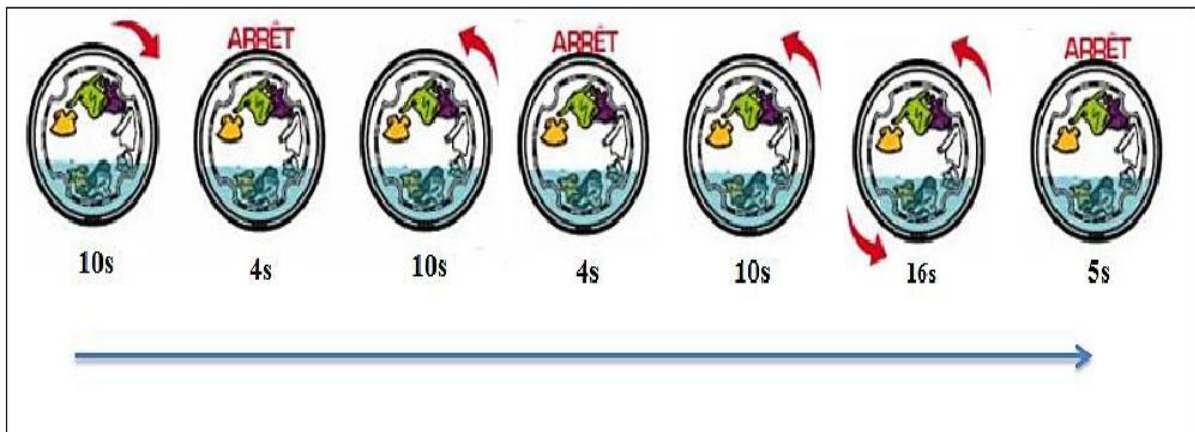


Figure II.26. Sens de rotation du tambour du lave-linge

Le profil de vitesse à réaliser est donné par la figure ci-dessous:

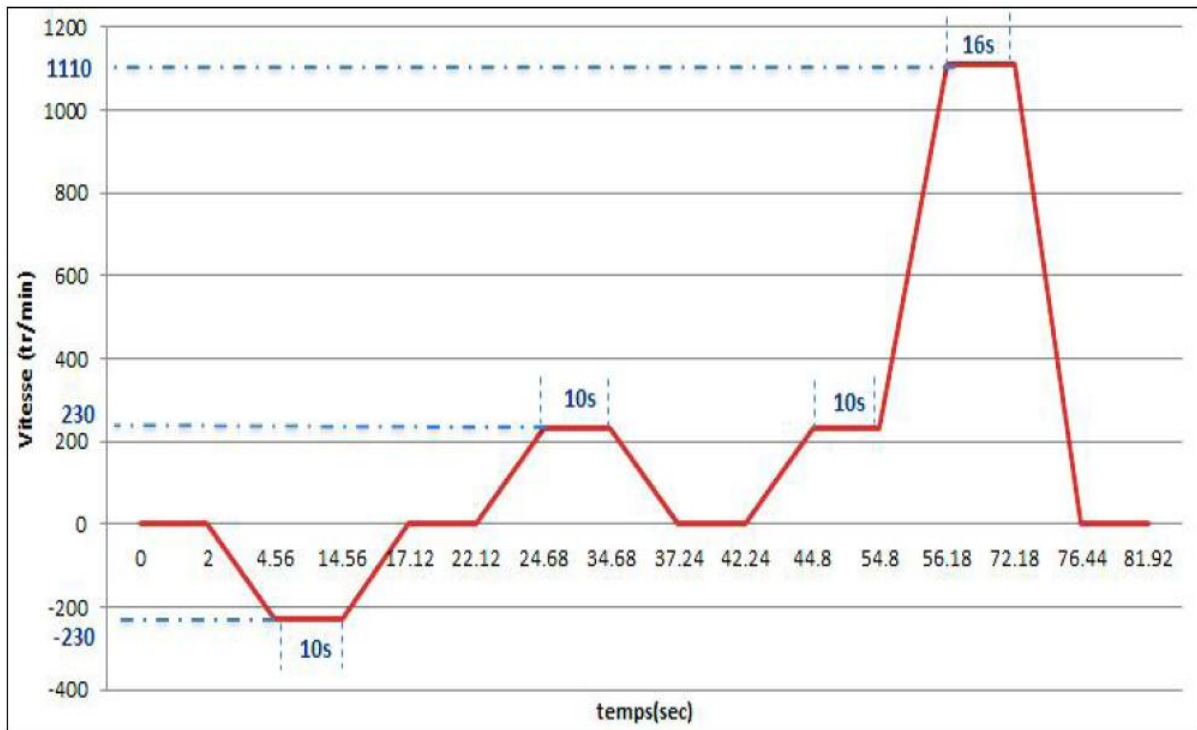


Figure II.27. Profil de vitesse à réaliser

Après simulation nous avons obtenu les résultats suivants :

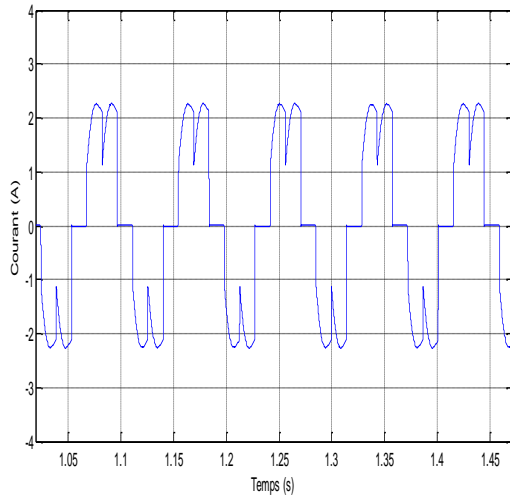


Figure II.28: Allure du courant d'une phase pendant le lavage

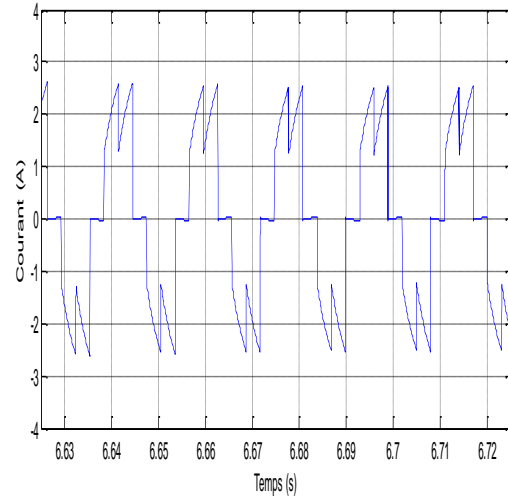


Figure II.29: Allure du courant d'une phase pendant l'essorage

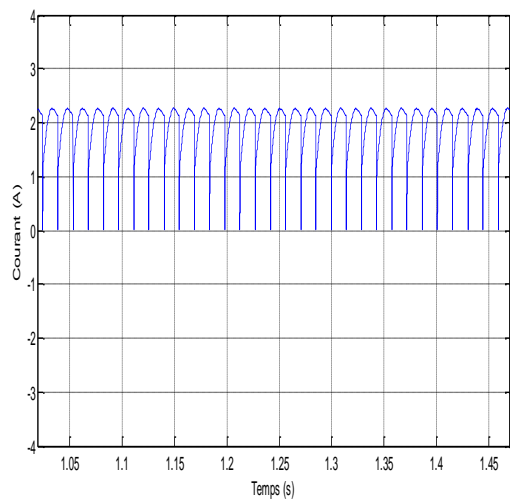


Figure II.30: Allure du courant continu pendant le lavage

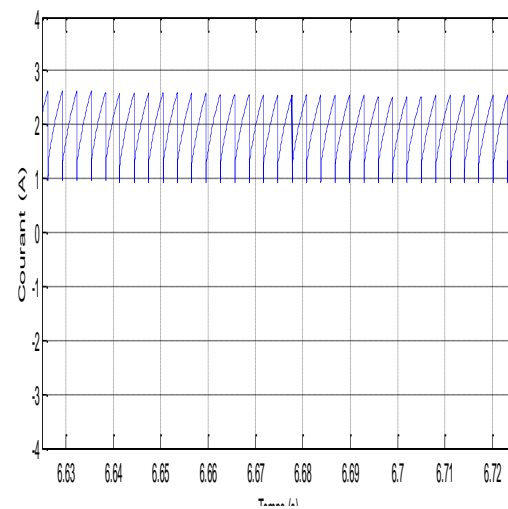


Figure II.31: Allure du courant continu pendant l'essorage

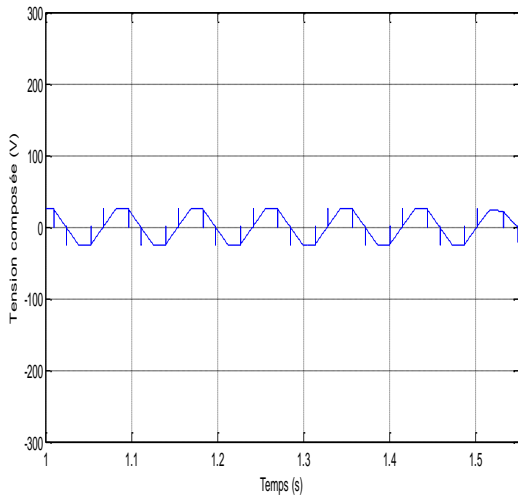


Figure II.32: Allure de la tension composée pendant le lavage

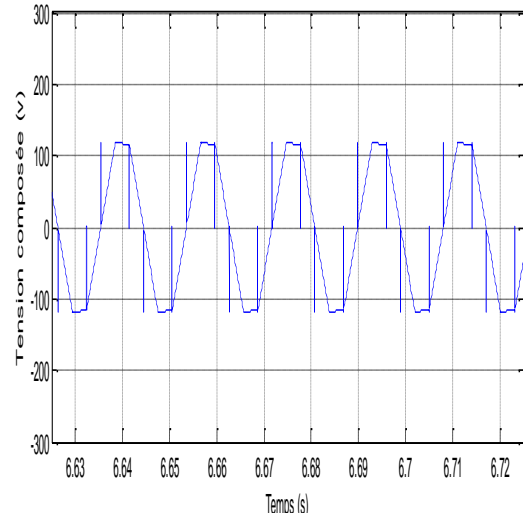


Figure II.33: Allure de la tension composée pendant l'essorage

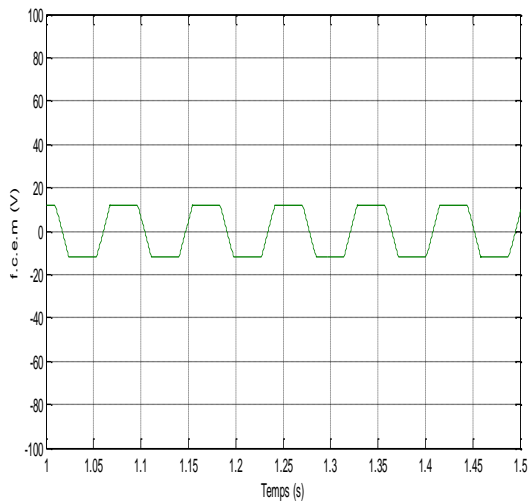


Figure II.34: Allure de la f.c.e.m pendant le lavage

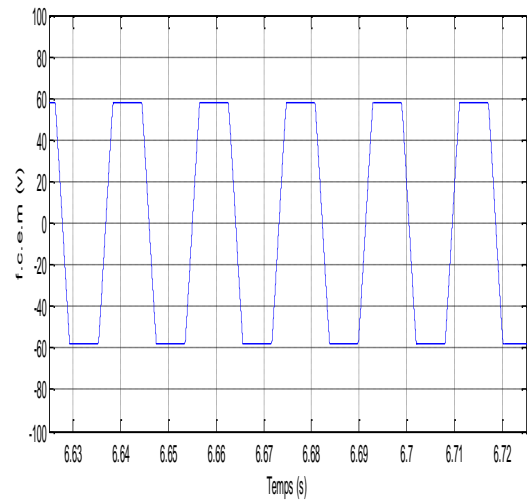


Figure II.35: Allure de la f.c.e.m pendant l'essorage

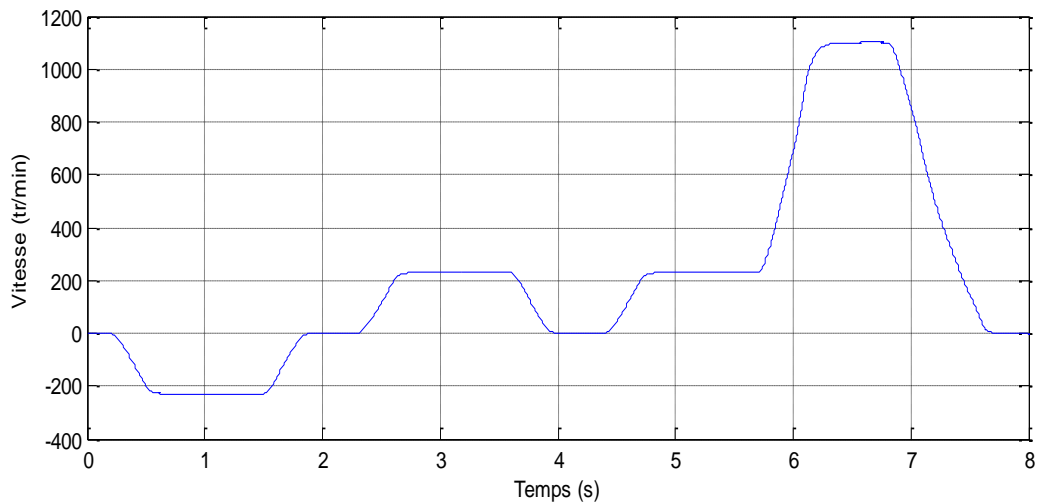


Figure II.36: Profil de vitesse du lave-linge

Pour mieux se rapprocher de la pratique, nous avons implémenté la technique MLI pour réaliser le profil de vitesse, cette technique permet d'agir sur le rapport cyclique des signaux de commande des transistors de l'onduleur, et par conséquent sur la vitesse du moteur. Dans ce cas la tension d'entrée continue de l'onduleur est fixé à  $V_{dc}=116V$  et le rapport cyclique des signaux commande atteint  $\alpha=0.5$  pour le lavage et  $\alpha=1$  pour l'essorage.

Après simulation nous avons obtenu les résultats suivants :

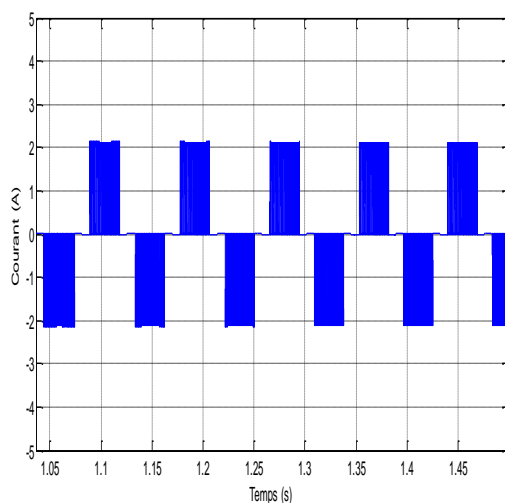


Figure II.37: Allure du courant d'une phase pendant le lavage

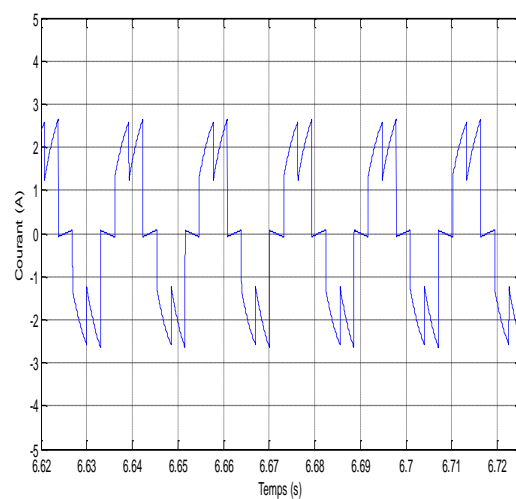


Figure II.38: Allure de courant d'une phase pendant le l'essorage

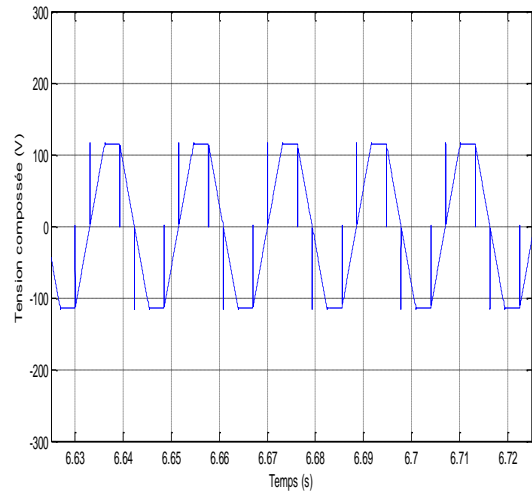
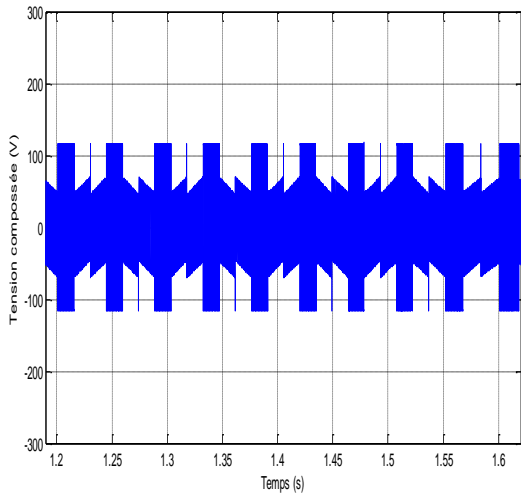


Figure II.39: Allure de la tension composée pendant le lavage

Figure I.40: Allure de la tension composée pendant l'essorage

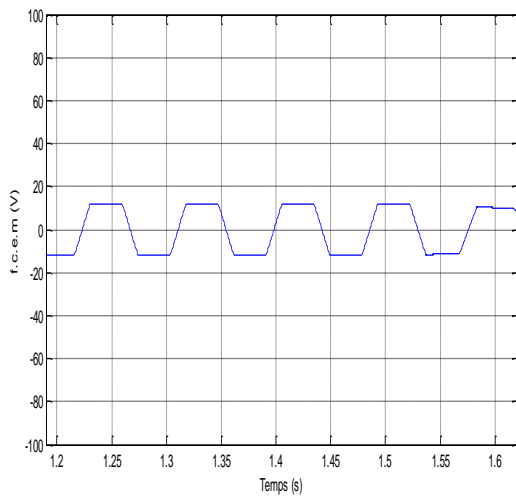


Figure II.41: Allure de la f.c.e.m pendant le lavage

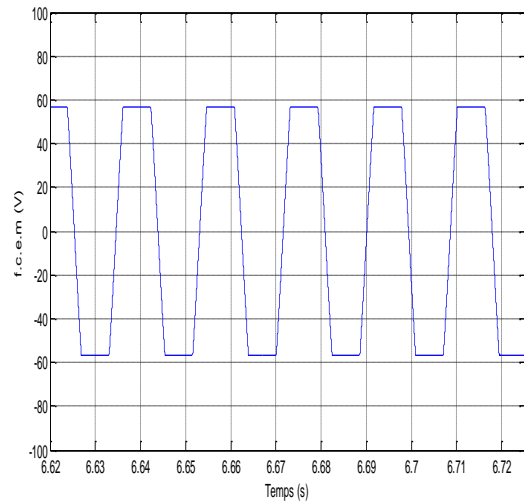


Figure II.42: Allure de la f.c.e.m pendant l'essorage

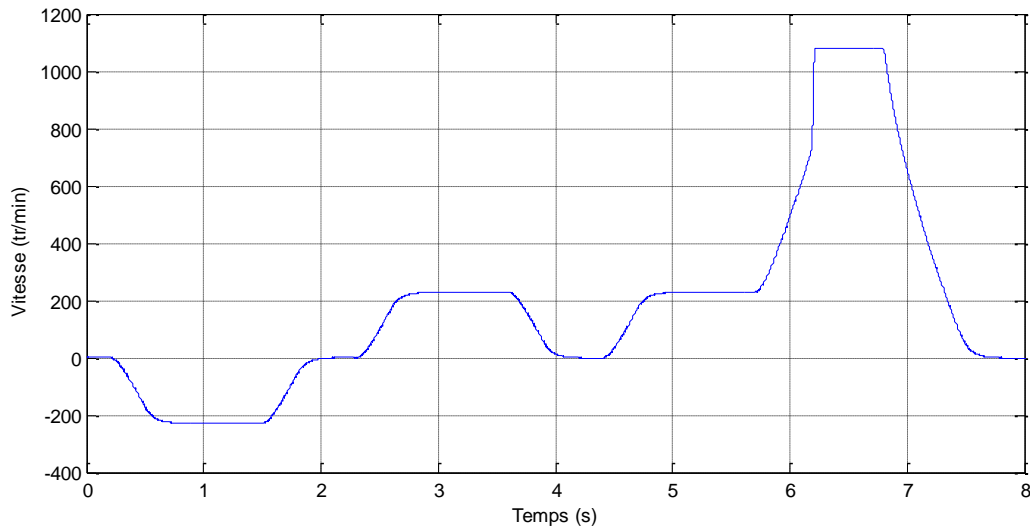


Figure II.43. Profil de vitesse du lave-linge avec la technique MLI

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle de simulation de l'ensemble BDCM-Onduleur piloté par un codeur de position à 3 pistes. Celui-ci est implémenté sous l'environnement Matlab-Simulink et SimPowerSystems.

Des essais de simulation sous conditions nominales ont été menés sur trois BDCM de différentes puissances. Les résultats des essais montrent que le modèle de simulation établi représente d'une manière satisfaisante la réalité de la machine et celle de son convertisseur.

De plus, nous avons réalisé un profil de vitesse d'un lave-linge dans lequel toutes les phases sont exécutées, avec des vitesses avoisinant 230tr/min au lavage et de 1100tr/min pendant l'essorage.

En s'inspirant du modèle théorique élaboré, nous procéderons à la réalisation expérimentale du profil de vitesse désiré. La mise en œuvre d'un banc d'essai expérimental fera l'objet du dernier chapitre.

# **Chapitre III**

## **Mise en œuvre d'un banc d'essai et résultats expérimentaux**

## Introduction

Cette dernière partie est consacrée à la mise en œuvre du banc d'essai expérimental de l'ensemble BDCM–Convertisseur. Le profil de vitesse réalisé au chapitre précédent, constituant le principal objectif de notre travail, sera implémenté et exécuté en temps réel. La solution se base sur l'utilisation d'une carte numérique dSPACE <<DS1102>> munie d'une interface permettant une implémentation rapide des schémas transcrits en Matlab-Simulink. En effet, le module de dSPACE Real Time Interface <<RTI>> assure la compilation et le transfert du code généré par Real Time Workshop <<RTW>> dont les programmes en temps réel sont aisément écrits sous forme graphique par le logiciel Matlab/Simulink.

### III.1 Description du banc d'essai

La plate forme expérimentale utilisée dans ce travail comporte :

- 1-Une machine synchrone à aimants permanents de puissance 7 KW (représentant la machine (01) de notre étude).
- 2-Une machine à courant continu, servant de charge mécanique, équipée d'un capteur de vitesse (génératrice tachymétrique).
- 3-Un capteur de position de type codeur absolu à trois pistes.
- 4-Un onduleur de tension triphasé à transistors IGBT.
- 5-Carte dSPACE + PC.
- 6- Panneau des connexions des entrées-sorties de la carte Dspace
- 7-Capteurs de courant et de tension.
- 8, 9 -Oscilloscope numérique + PC.
- 10-Pupitre d'alimentation.

Les coefficients multiplicatifs des différents capteurs utilisés sont donnés en annexe 02.

Les figures III.1, III.2 montrent la photographie et le schéma synoptique de banc d'essai expérimental utilisé dans ce travail.



Figure III.1: Photo de banc d'essai mis en œuvre au laboratoire CAE.

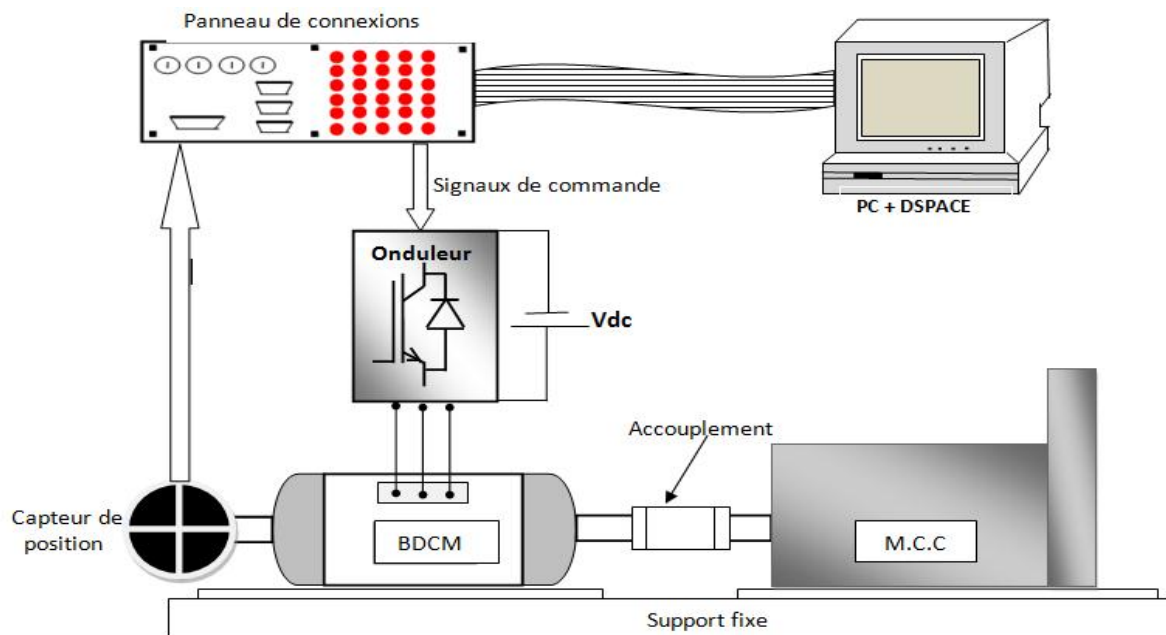


Figure III.2: Schéma synoptique de banc d'essai.

### III.2 Description de la carte dSPACE « DS1102 »

Le calcul numérique et la génération des signaux de commande sont obtenus à partir d'une carte électronique à base d'un processeur numérique de signal DSP (Digital Signal Processor). Ces processeurs ont une grande puissance de calcul. La carte dSPACE <<DS1102>> est destinée à la commande des machines électriques. Elle s'articule autour du processeur « TMS320C31 » de Texas instrument ayant une horloge interne qui peut atteindre les 40MHz et peut exécuter une instruction d'un cycle en un temps très court de 25ns. Elle est connectée via le bus « ISA » (Industry Standard Architecture) d'un PC, cette liaison permet le téléchargement du code exécutable du DSP depuis le PC siège de la compilation. Pour ce faire, la carte est équipée d'une zone mémoire RAM de 128 ko, le DSP utilisé étant un processeur 32 bit. Ce lien par bus « ISA » est également mis à profit pour permettre un dialogue de haut niveau en temps réel entre le DSP et les outils de supervision installés sur le PC, « Control desk » [11].

Le processeur est entièrement programmable à partir d'un langage de type schéma blocs (Matlab-simulink) grâce aux modules RTI « Real Time Interface » et au RTW « Real Time Workshop ».

Les principales caractéristiques de la carte sont résumées dans le tableau [III.1] et schématisées sur la figure (III.3) :

			Résolution	Temps de conversion
Entrées analogiques	4 voies	Voies 1 et 3	16 bits	4 $\mu$ s
		Voies 2 et 4	12 bits	1.25 $\mu$ s
Sorties analogiques	4 voies		12 bits	4 $\mu$ s
Entrées numériques	16		16 bits	
Sorties numériques	16		16 bits	
Processeur maître	TMS320C31	40 MHz	32 bits	
Processeur esclave	TMS320p14	25 MHz	32 bits	

Tableau [III.1] : Principales caractéristiques de la carte dSPACE <<1102>> [11].

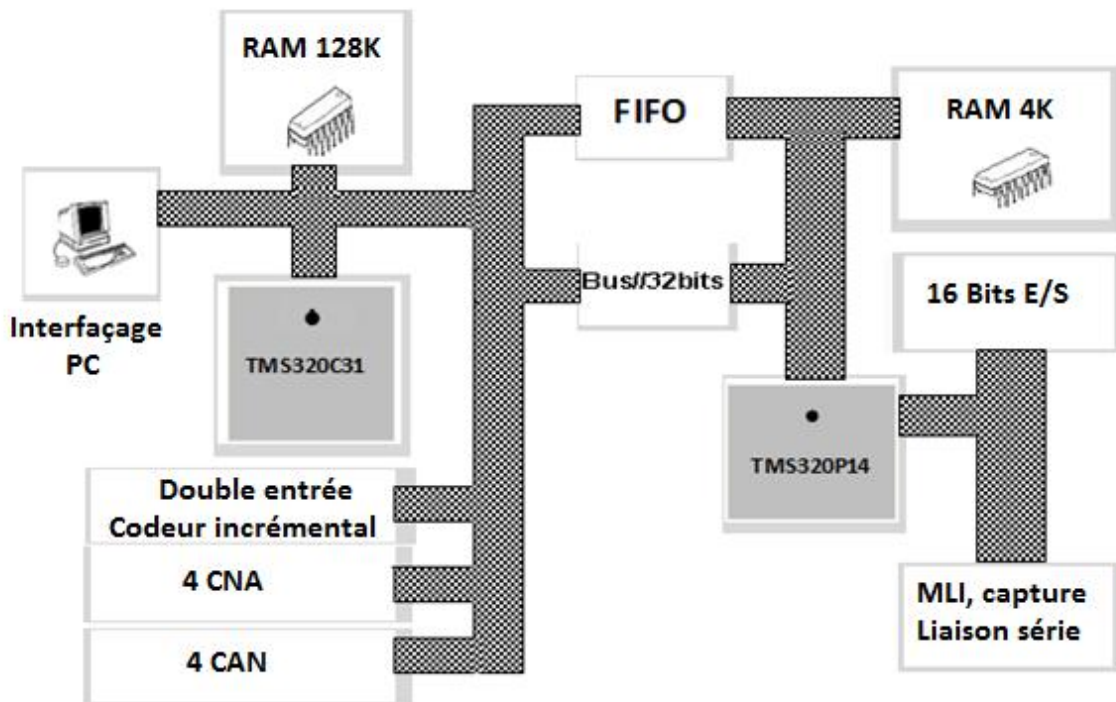


Figure III.3: Schéma synoptique de la carte dSPACE DS1102.

Le synoptique de la carte, montre que celle-ci intègre également un certain nombre de périphériques tels que les deux étages d'entrées pour un codeur incrémental, un processeur esclave le « TMS320P14 » dédié à la gestion de 16 entrées/sorties numériques, des 06 sorties MLI, de liaison série .....etc. Il existe deux types de liaison entre les 02 processeurs. Un bus parallèle classique de 32 bits et une liaison de 32 bits « bufférisée » via une communication FIFO. Cette dernière a l'avantage de permettre une commutation entre les deux processeurs sans synchronisation de ces derniers, ce type de liaison assure des durées d'exécution très courtes des tâches [11].

L'extension simulink permet sous forme graphique, de créer des algorithmes de commande, de décrire et de résoudre les équations des systèmes d'étude. Ces algorithmes sont traduits en code C à l'aide de l'outil Real Time Workshop (RTW). Le module Real Time Interface (RTI), quant à lui, permet d'inclure les interfaces de la carte dSPACE et de charger le modèle dans sa mémoire.

L'organigramme d'échange d'information entre l'environnement Matlab et la carte dSPACE est décrit par le schéma de la figure III.4.

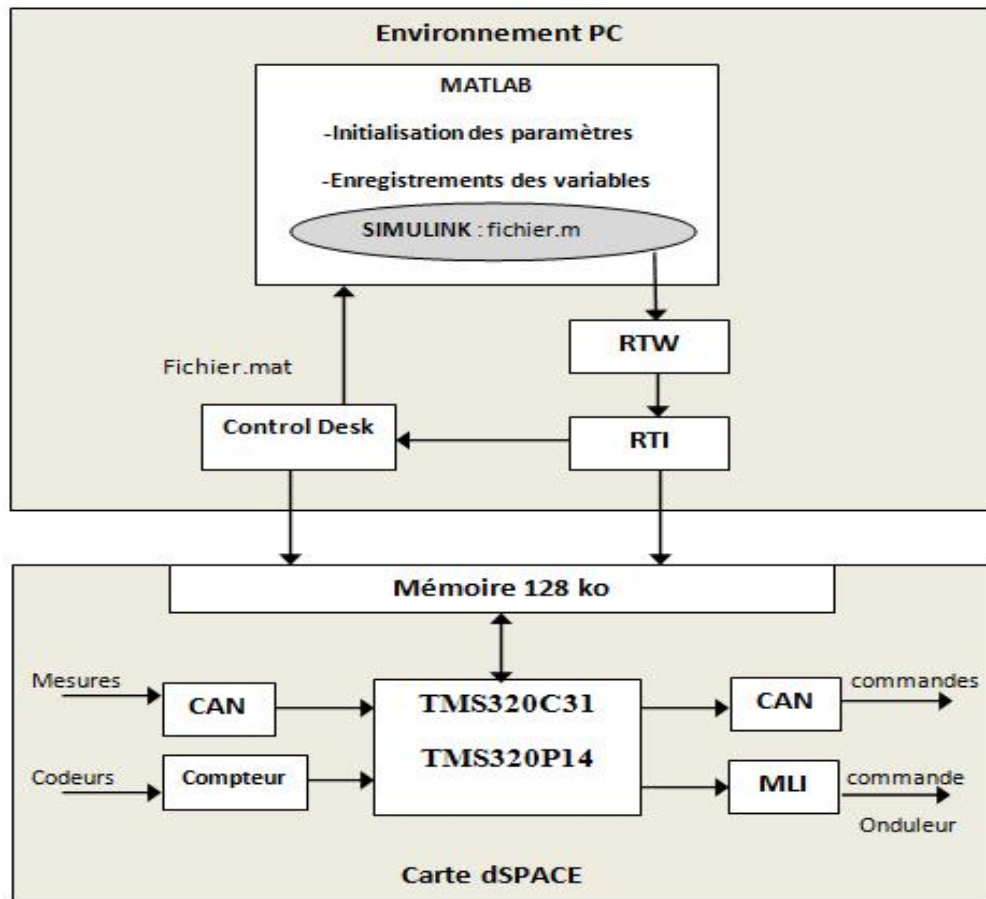


Figure III.4: Organigramme d'échange des données du système.

Les variables du système étudié peuvent être affichées et visualisées à l'aide l'outil de visualisation Control Desk. Son environnement de travail est donné par la figure ci-dessous :

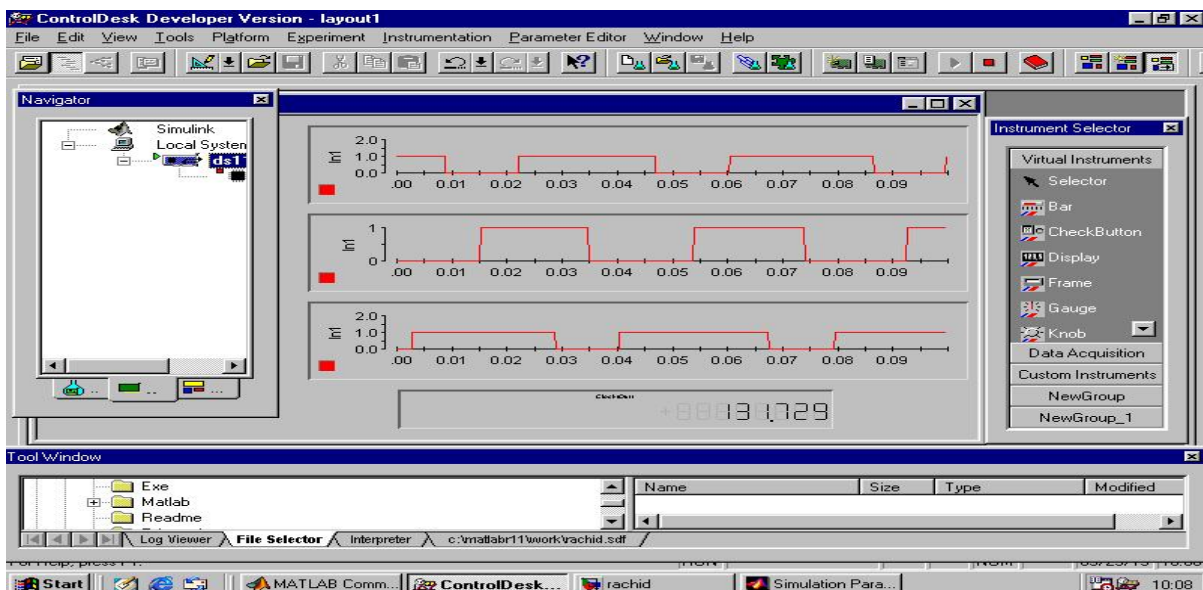


Figure III.5: Fenêtre de travail Control Desk

### III.3 Adaptation du schéma Matlab-Simulink pour l'implémentation en temps réel sur dSPACE

Pour pouvoir implémenter en temps réel le schéma de commande transcrit en Simulink, il est nécessaire d'apporter certaines modifications au schéma de simulation du système étudié au chapitre II. Celles-ci consistent à utiliser les blocs real time <<RTI>> de l'environnement dSPACE tels que les entrées numériques (C2, C4 et C6) et les sorties MLI (a, b, c, d, e et f). Le schéma d'implémentation en temps réel de la commande des transistors (Q1...Q6) de l'onduleur a été élaboré comme indiqué par la figure III.6

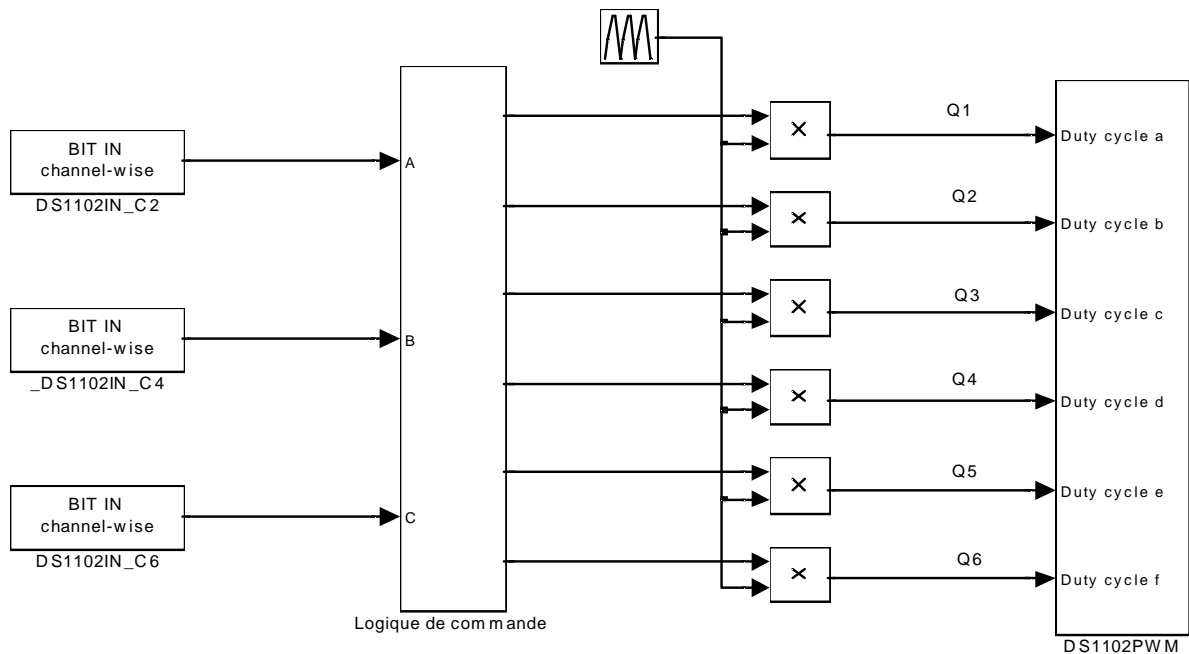


Figure III.6: Schéma d'implémentation en temps réel de la commande 120° des transistors

Les trois signaux du codeur de position sont introduits par les trois entrées numériques C2, C4, C6 constituant les entrées de la logique de commande. Les six transistors de l'onduleur sont commandés par les sorties (duty cycle a, b, c, d, e et f) du bloc PWM (MLI).

### III.4 Essais et résultats expérimentaux

Plusieurs essais ont été menés afin d'aboutir à la réalisation du profil de vitesse désiré. En effet des essais préliminaires se sont avérés nécessaires pour s'assurer du bon fonctionnement des différentes parties du système.

### III.4.1 Essais préliminaires

Afin de s'assurer du bon fonctionnement du système onduleur-BDCM- capteur, nous avons commencé par effectuer des essais en utilisant une carte analogique de commande  $120^\circ$ . Par la suite, nous avons entamé des essais sur la carte dSPACE en vérifiant l'acquisition des signaux délivrés par le capteur de position ainsi que l'implémentation en temps réel de la logique de commande des signaux des six transistors de l'onduleur.

#### III.4.1.1 Essai avec une carte de commande analogique

Dans ce cas, la BDCM est alimentée par un onduleur de tension  $120^\circ$  avec une tension d'entrée continue ajustée à  $V_{dc} = 52\text{ V}$ , la vitesse s'établi à  $500\text{ tr/min}$ . Les mesures des courants et des tensions ont été effectuées à l'aide d'un oscilloscope numérique. Les allures de la tension de phase, de la tension composée, du courant de phase ainsi que du courant continu d'entrée sont respectivement données par les figures III.7, 8, 9 et 10.

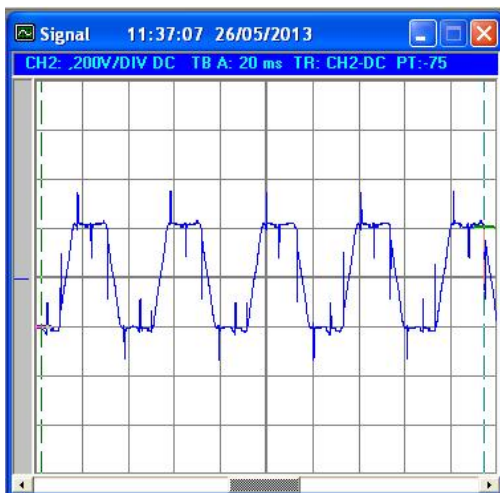


Figure III.7: Allure de la tension d'une phase à  $500\text{tr/min}$  avec  $V_{dc}=52\text{v}$

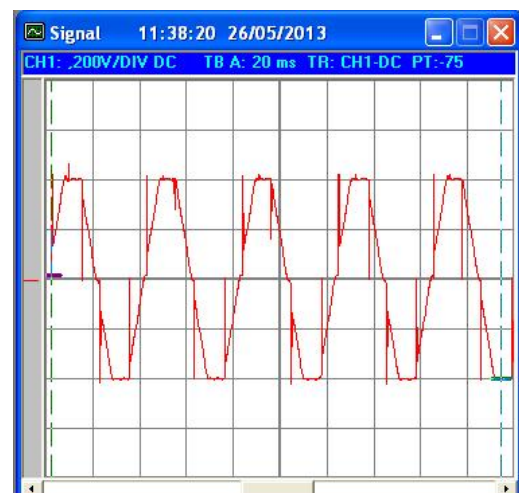


Figure III.8: Allure de la tension composée à  $500\text{tr/min}$  avec  $V_{dc}=52\text{v}$

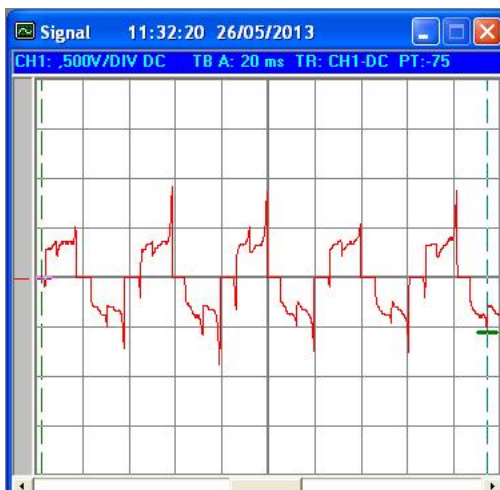


Figure III.9: Allure du courant d'une phase à  $500\text{tr/min}$  avec  $V_{dc}=52\text{v}$

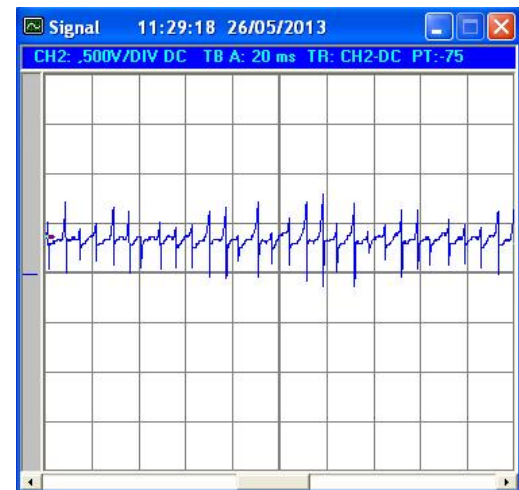


Figure III.10 : Allure du courant d'entrée continu à  $500\text{tr/min}$  avec  $V_{dc}=52\text{v}$

Les allures des différentes grandeurs montrent que le système machine-convertisseur fonctionne relativement bien, avec des durées de conduction de  $120^\circ$  et des interruptions de  $60^\circ$  électriques pour chaque phase de la machine.

#### III.4.1.2 Essais préliminaires avec la carte numérique dSPACE1102

Les essais préliminaires sur la carte dSPACE concernent la visualisation des signaux délivrés par le codeur de position et des signaux de commande des transistors.

##### a- Visualisation des signaux délivrés par le capteur de position

Le capteur de position solidaire à la BDCM est entraîné à une vitesse de 500 tr/min par un moteur à courant continu. Les signaux délivrés par le capteur sont introduits sur trois entrées numériques C2, C4 et C6 du panneau de connections de la carte dSPACE et sont visualisés à l'aide de l'interface interactive « Control Desk », voir figure III.1.

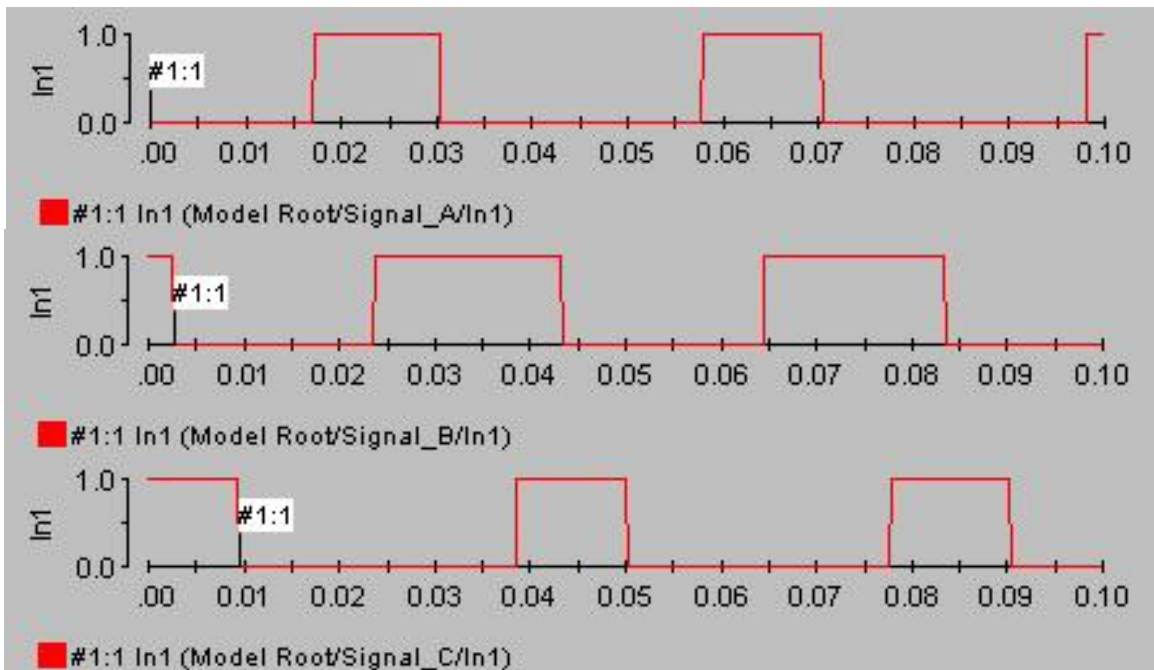


Figure III.11: Allure des signaux du capteur de position pour une vitesse de 500tr/min

La figure III.11 montre que les entrées numériques de la carte dspace rapportent fidèlement les états des signaux du codeur. En effet, les pistes A et C sont à l'état logique 1 durant  $120^\circ$  tandis que celui de la piste B est à 1 durant  $180^\circ$  électriques. Par ailleurs, nous avons incorporé une sous-broutine utilisant le bloc STOP de Simulink qui permet d'arrêter le programme en cas de code erroné délivré par le capteur.

### b- Signaux de commande des transistors

Après avoir exécuter le programme d'implémentation en temps réel de la logique de commande  $120^\circ$ , en entrainant la BDCM à 500tr/min, nous avons visualisé avec Control Desk les signaux destinés à la commande des transistors de chacun des trois bras de l'onduleur.

La figure III.12 montre que les signaux de commande sont à l'état 1 durant  $120^\circ$  électrique qui correspond à  $1/3$  de sa période et que la durée entre le blocage d'un transistor et l'amorçage d'un autre du même bras est de  $60^\circ$  électrique correspondant à  $1/6$  de la période.

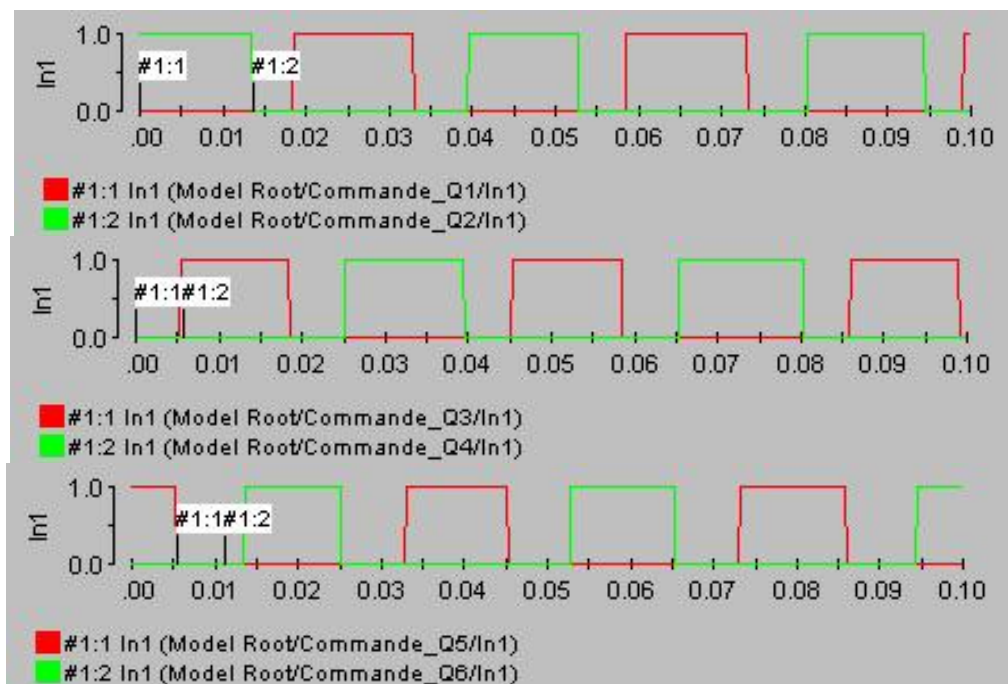


Figure III.12: Allure des signaux de commande des transistors pour une vitesse de 500tr/min et un rapport cyclique  $\alpha=1$

#### III.4.1.3 Variation de la vitesse de la BDCM

Après avoir testé le fonctionnement du système, nous avons entamé des essais concernant la variation de la vitesse de la BDCM dans les deux sens de rotation. A cet effet, nous avons implémenté des programmes en temps réel pour aboutir à la variation désirée.

##### a- Variation de la vitesse de la BDCM dans un seul sens de rotation

Afin de faire varier la vitesse de rotation du moteur dans un seul sens, suivant un profil bien défini, nous avons programmé la variation du rapport cyclique  $\alpha$  des sorties de commande MLI avec une rampe d'accélération et de décélération.

La figure III.13 présente la variation de la vitesse de rotation en fonction du temps pour une tension d'entrée de l'onduleur  $V_{dc} = 30V$ . La vitesse maximale est de 230 tr/min pour  $\alpha=1$ .

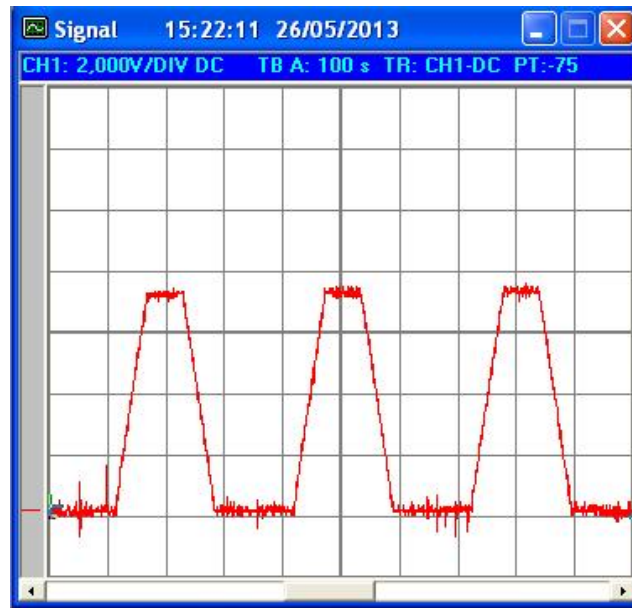


Figure III.13: Variation de la vitesse de rotation de la BDCM avec  $V_{dc} = 30V$  et  $\alpha = [0,1]$  (un seul sens de rotation)

#### b- Variation de la vitesse de la BDCM avec inversion du sens de rotation

Vu que le fonctionnement des lave-linges nécessite deux sens de rotation durant l'étape du lavage, nous avons réalisé un autre programme qui permet simultanément la variation de la vitesse et l'inversion du sens de rotation.

La figure III.14 présente la variation de la vitesse de rotation dans les deux sens en fonction de temps pour une tension  $V_{dc} = 30V$ . La vitesse maximale dans les deux sens de rotation est de 230tr/min, correspondant à un rapport cyclique  $\alpha=1$ .

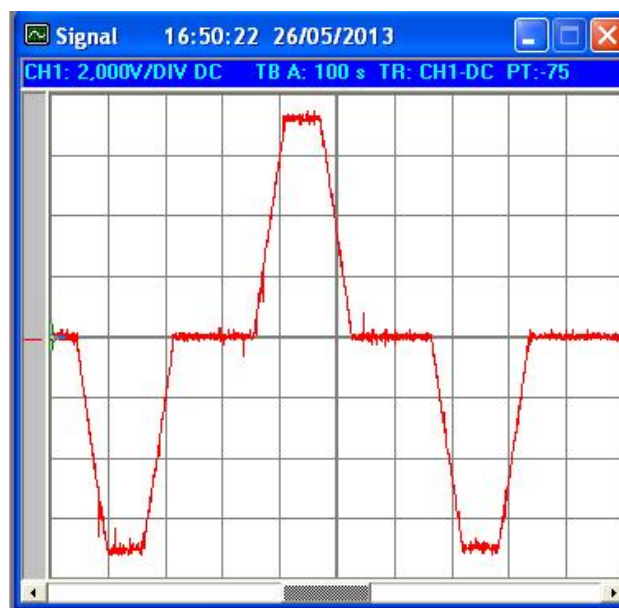


Figure III.14: Variation de la vitesse de rotation de la BDCM avec  $V_{dc} = 30V$  et  $\alpha = [0,1]$  (deux sens de rotation)

Les tests préliminaires menés sur les différents composants sont plus au moins satisfaisants. En effet, en ce qui concerne le fonctionnement à grande vitesse, avec des tensions d'alimentation plus élevées, nous avons été limités à environ 500 tr/min à cause de l'apparition de perturbations provoquant des erreurs de codage du capteur de position réalisé par nos camarades de la promotion précédente. Et afin de résoudre ce problème, nous avons apportés certaines améliorations en ajustant la dimension des pistes et de l'intervalle entre les diodes émettrices et les photos transistors du codeur. La photographie de codeur ainsi amélioré est donnée en annexe 3. Cette solution nous a permis d'atteindre de grandes vitesses qui sont nécessaires durant l'étape d'essorage du cycle du lave-linge.

### III.4.2 Essai sur le système BDCM-Onduleur à une vitesse de 750 tr/min

Dans ce cas la BDCM est alimentée sous une tension plus élevée de  $V_{dc}=123V$  avec des signaux de commande MLI à rapport cyclique  $\alpha=0.8$ . La charge correspond à un couple de 2 N.m sur l'arbre dû aux frottements de la génératrice à C-C. La vitesse de rotation de la machine s'établit à 750 tr/min.

Les signaux du capteur, de la commande des transistors ainsi les allures du courant de phase, courant continu d'entrée, la tension simple et composée sont respectivement données par les figures III.15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 et 22.

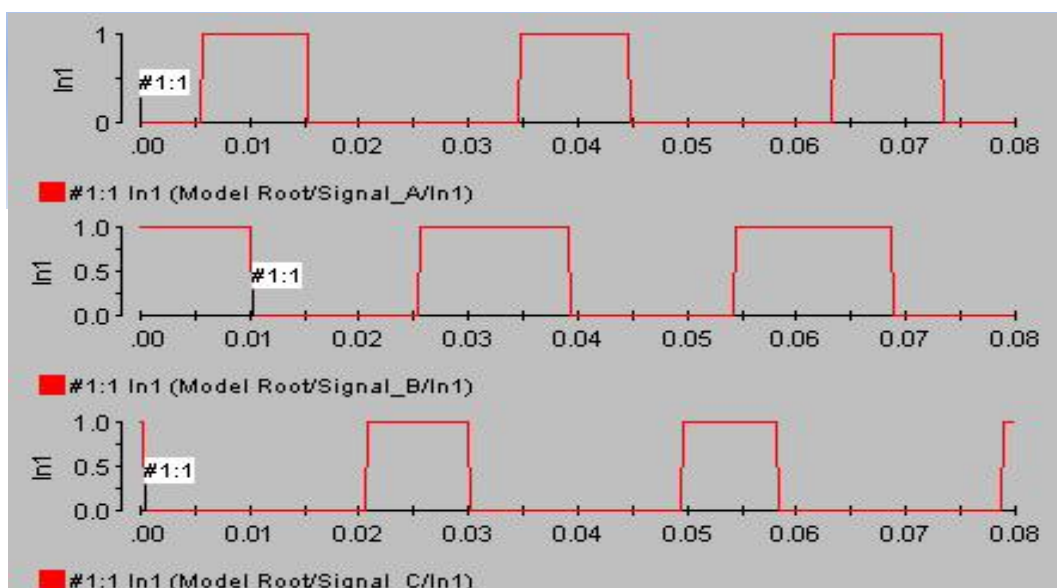


Figure III.15: Allure des signaux du capteur de position pour une vitesse de 750tr/min et un rapport cyclique  $\alpha=0.8$

La figure III.15 montre que les signaux A, B et C du capteur de position acquis par les trois entrées numériques de la carte dSPACE ont des durées prévues pour cette vitesse de 750 tr/min. En effet, les signaux A et C sont à l'état logique 1 durant  $120^\circ$  électriques par

contre le signal B est à 1 durant  $180^\circ$  électriques. Cela montre que l'amélioration apportée au capteur de position a donné des résultats satisfaisants.

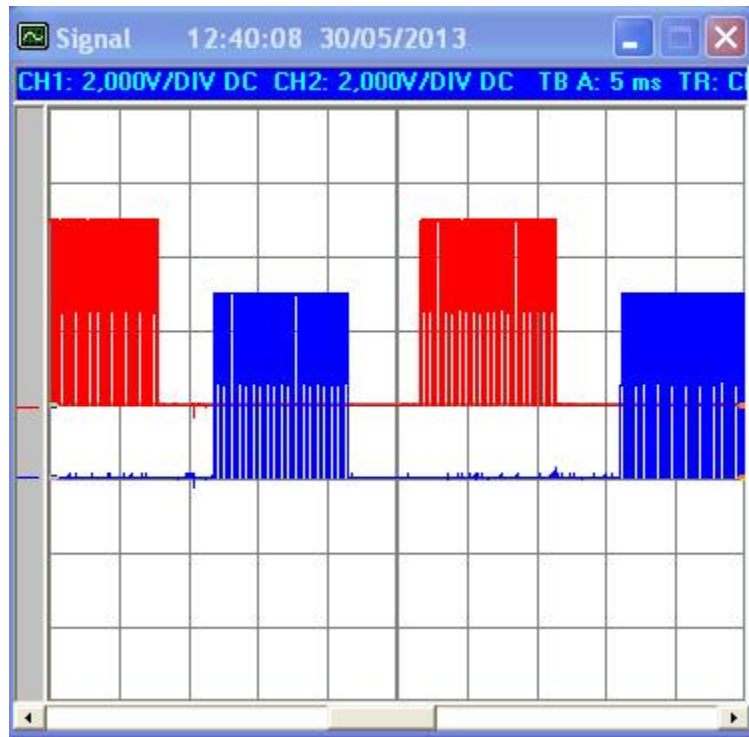


Figure III.16: Allure des signaux de commande des transistors Q1 et Q2 pour une vitesse de 750tr/min et un rapport cyclique  $\alpha=0.8$

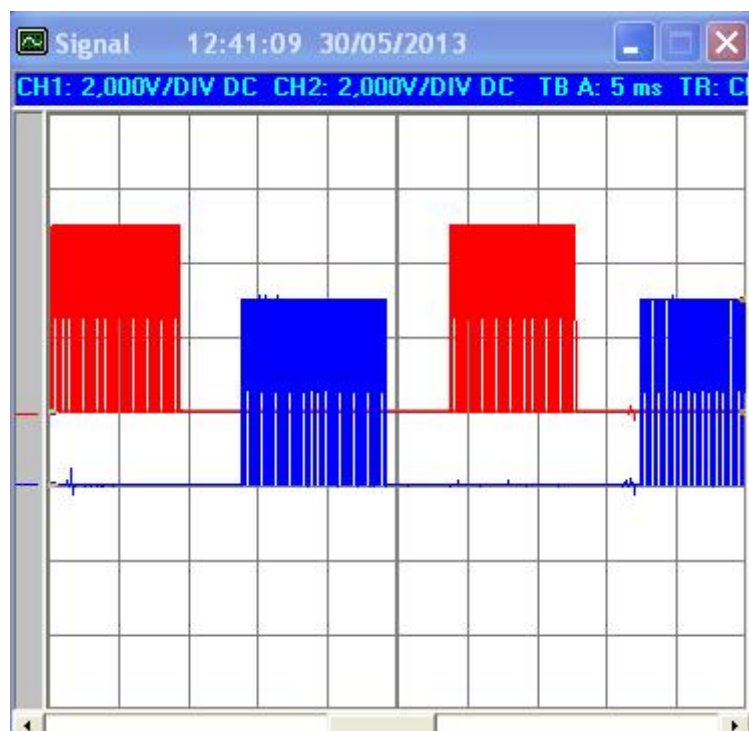


Figure III.17: Allure des signaux de commande des transistors Q3 et Q4 pour une vitesse de 750tr/min et un rapport cyclique  $\alpha=0.8$

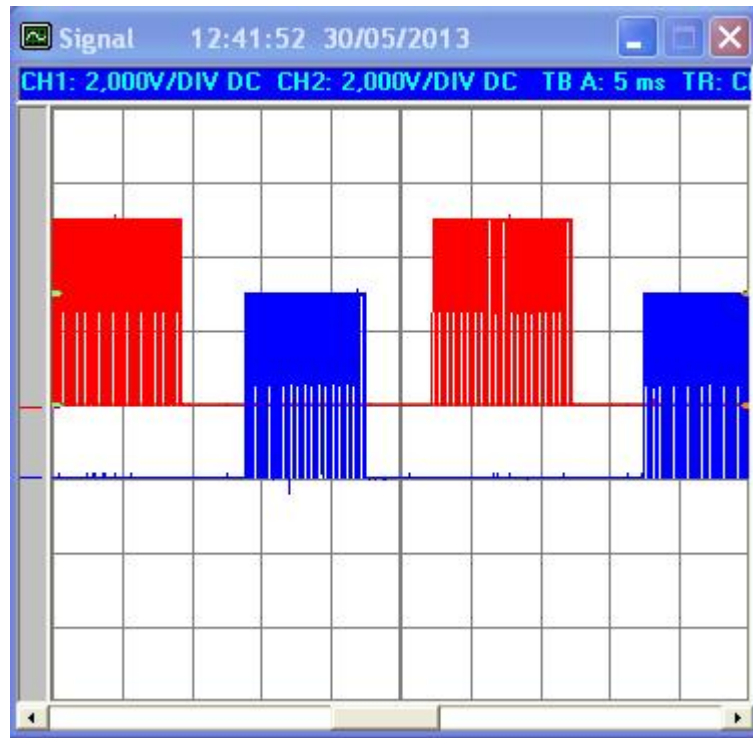


Figure III.18: Allure des signaux de commande des transistors Q5 et Q6 pour une vitesse de 750tr/min et un rapport cyclique  $\alpha=0.8$

Les figures III.16, III.17 et III.18 présentent respectivement les signaux de commande MLI des transistors de chacun des trois bras de l'onduleur, cela pour une vitesse 750 tr/min et un rapport cyclique  $\alpha =0.8$ . Nous pouvons remarquer que les signaux de commande ont une durée  $120^\circ$  électrique qui correspond à  $1/3$  de sa période et que le temps entre le blocage d'un transistor et l'amorçage d'un autre du même bras est de  $60^\circ$  électriques correspondant à  $1/6$  de la période.

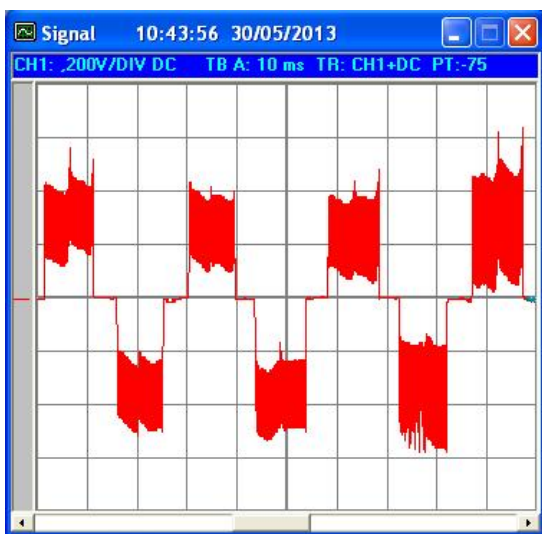


Figure III.19: Allure du courant d'une phase à 750tr/min avec  $\alpha=0.8$

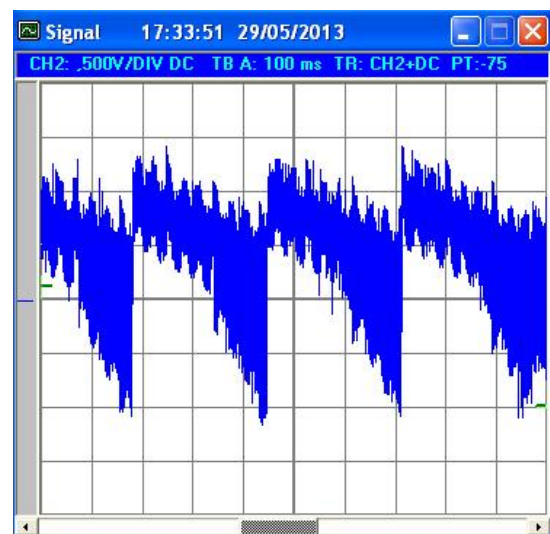


Figure III.20: Allure du Courant d'entrée continu à 750tr/min avec  $\alpha=0.8$

Les figures III.19 et III.20 illustrent respectivement les allures du courant de phase et du courant continu d'entrée pour une vitesse 750 tr/min et un rapport cyclique  $\alpha = 0.8$ . L'allure du courant de phase est en forme de créneaux différents de la forme idéale avec une déformation au niveau du plateau de conduction  $120^\circ$ . Quant à l'allure du courant continu d'entrée de l'onduleur, sa fréquence est de six fois celle des grandeurs de sorties tension et courant de phase.

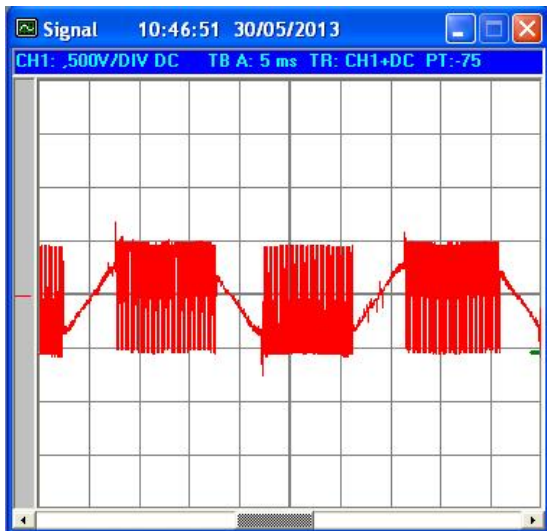


Figure III.21: Allure de la tension d'une phase à 750tr/min avec  $\alpha=0.8$

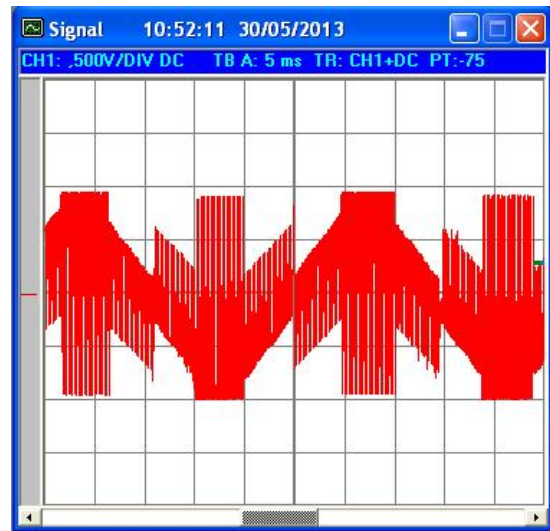


Figure III.22: Allure de la tension composée à 750tr/min avec  $\alpha=0.8$

Les figures III.21 et III.22 présentent respectivement les allures de la tension simple et de la tension composée pour une vitesse 750 tr/min et un rapport cyclique  $\alpha = 0.8$ . De l'allure de la tension simple aux bornes d'une phase de la machine, on peut bien distinguer les périodes de commutation et de conduction. L'allure de la tension composée entre deux phases de la machine prend des valeurs entre  $-V_{dc}$ , et  $+V_{dc}$  correspondant à  $\pm 123V$ .

#### III.4.3 Essai en charge sur le système BDCM-Onduleur à des vitesses de 200 et 1000 tr/min

Afin de tester notre système à des courants et tension plus élevés, nous avons effectué deux essais en charge. Un essai à faible vitesse de 200 tr/min sous une tension  $V_{dc}=120V$  avec un rapport cyclique  $\alpha = 0.6$  et un deuxième essai avec  $V_{dc}=107V$  et  $\alpha = 1$ . Dans ce cas la génératrice à courant continu débite sur une charge résistive. Les allures de courant et de la tension de phase sont respectivement données par les figures III.23, III.24, III.25, III.26 pour les deux vitesses.

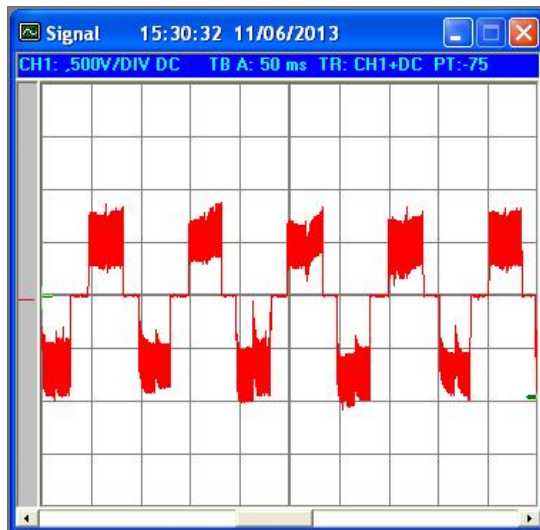


Figure III.23: Allure du courant d'une phase en charge à 200tr/min avec  $\alpha=0.6$

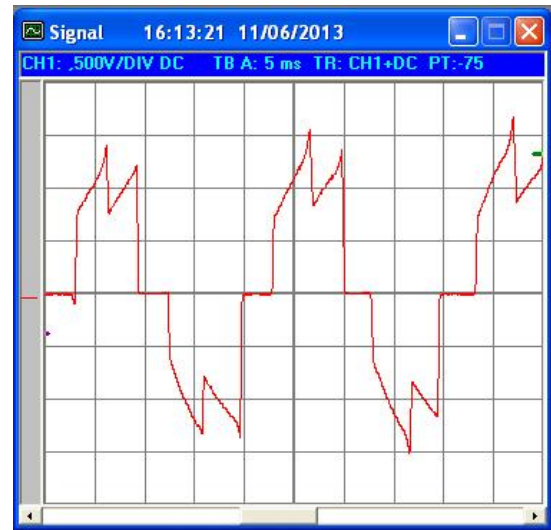


Figure III.24: Allure du courant d'une phase en charge à 1000tr/min avec  $\alpha=1$

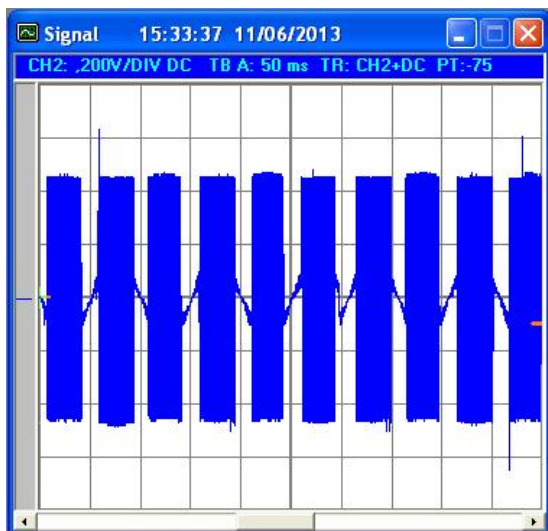


Figure III.25: Allure de la tension d'une phase en charge à 200tr/min avec  $\alpha=0.6$

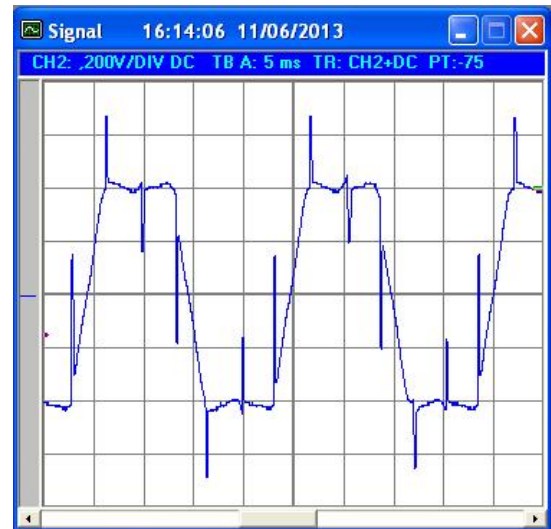


Figure III.26: Allure de la tension d'une phase en charge à 1000tr/min avec  $\alpha=1$

L'application du couple de charge a fait un appel de courant qui atteint une valeur maximale de 5A pour  $\alpha=0.6$  et 7.9 A pour  $\alpha=1$ , et nous remarquons aussi qu'en charge la forme des courants de phases se rapproche bien de celle prévue par simulation.

#### III.4.4 Réalisation expérimentale d'un profil de vitesse de lave-linge

La réalisation expérimentale du profil de vitesse de lave-linge constituant l'objectif principal de notre travail, sera le dernier essai effectué dans ce travail. En effet, le profil de vitesse réalisé par simulation au chapitre précédent, sera implémenté en temps réel sur la carte dSPACE. Les résultats expérimentaux seront comparés avec ceux obtenus par simulation.

Afin d'obtenir les cycles de lavage et d'essorage du profil désiré, nous avons effectué l'essai dans les conditions suivantes :

- Tension d'entrée continue de l'onduleur est fixée à  $V_{dc}=116V$
- La commande MLI des transistors est à rapport cyclique réglable qui s'établit à  $\alpha=0.5$  (correspondant à la vitesse 230tr/min) pour l'étape de lavage et  $\alpha=1$  (1100tr/min) pour l'étape d'essorage.

Les allures de la tension de phase, de la tension composée, du courant de phase et du courant continu d'entrée ainsi que du profil de vitesse durant les deux étapes (lavage et essorage) sont respectivement données par les figures ci-dessous.

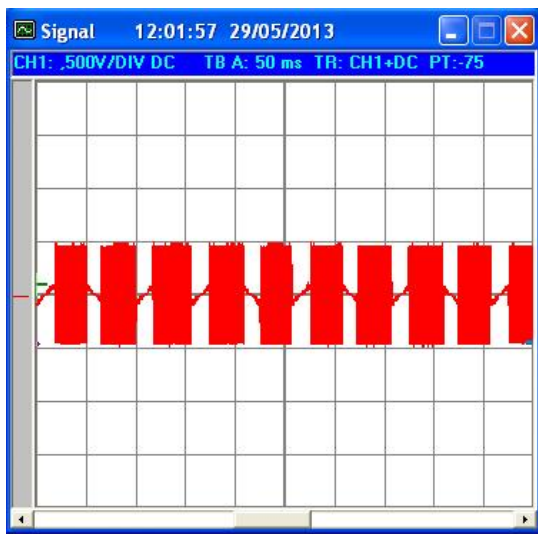


Figure III.27: Allure de la tension de phase pendant le lavage

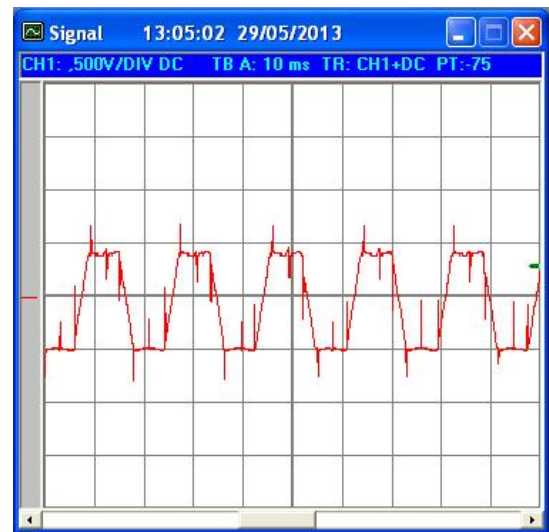


Figure III 28: Allure de la tension de phase pendant l'essorage

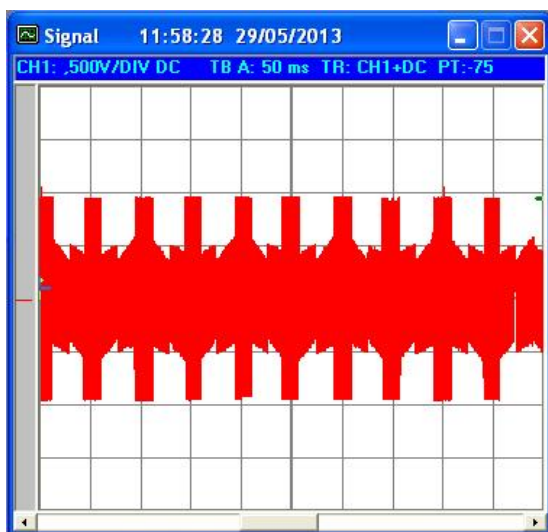


Figure III.29: Allure de la tension composée pendant le lavage

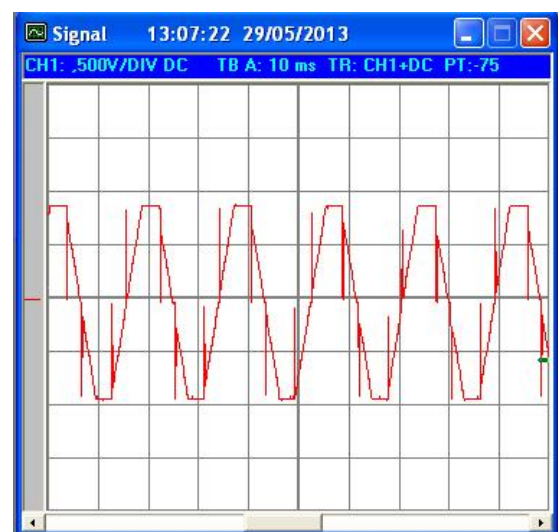


Figure III.30: Allure de la tension composée pendant l'essorage

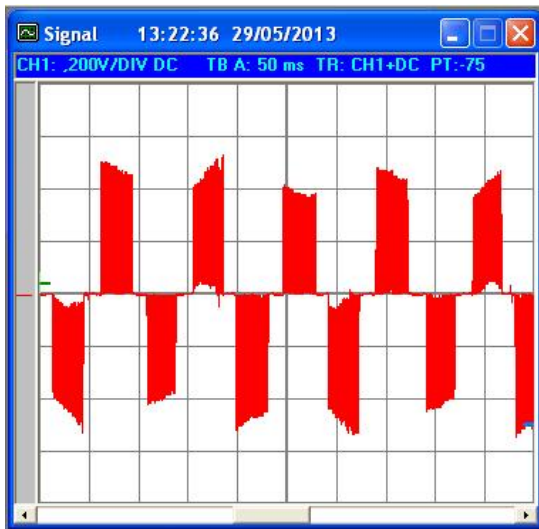


Figure III.31: Allure du courant d'une phase pendant le lavage

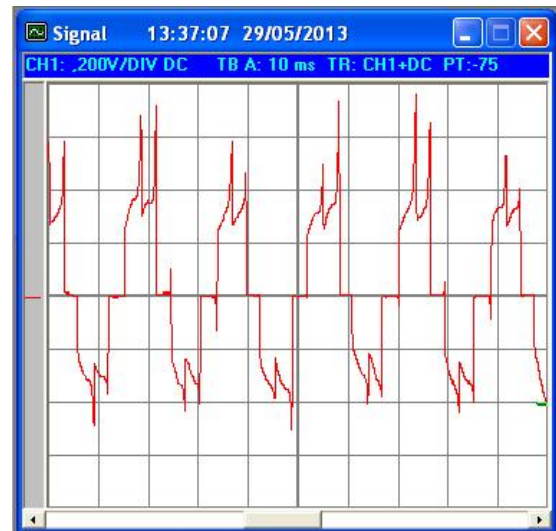


Figure III.32: Allure du Courant d'une phase pendant l'essorage

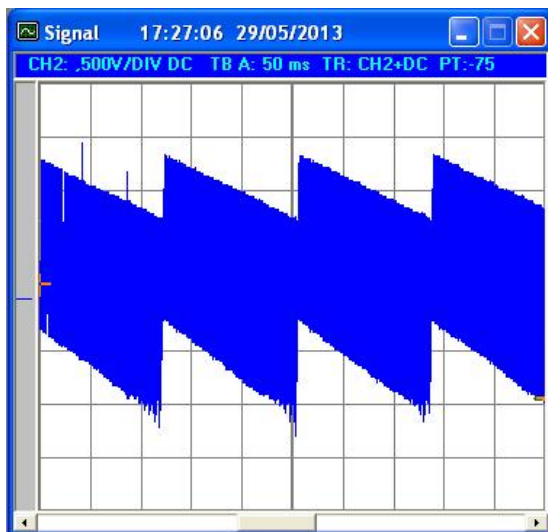


Figure III.33: Allure du courant d'entrée continu pendant le lavage

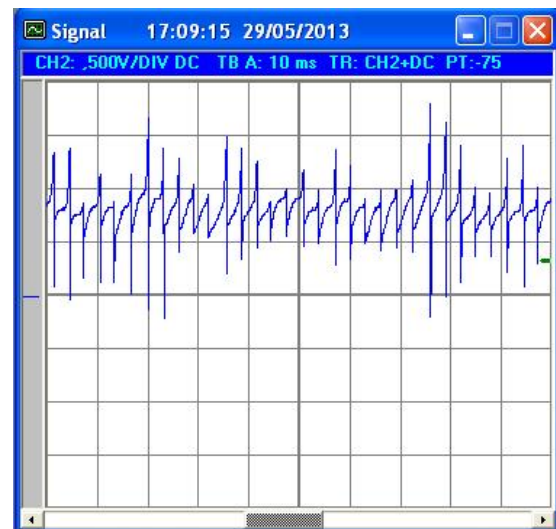


Figure III.34: Allure du courant d'entrée continu pendant l'essorage



Figure III.35: profil de vitesse d'un lave-linge en temps réel

- **Comparaison avec les résultats de simulation**

Dans les mêmes conditions, les résultats expérimentaux et théoriques sont comparés. Les figures III.36 à III.47 présentent respectivement les allures du courant de phase, du courant continu et de la tension composée ainsi le profil de vitesse de lave-linge. La comparaison entre les résultats de simulation et ceux expérimentaux montre un accord satisfaisant. Cet accord entre la théorie et l'expérience confirme la méthodologie suivie tout au long de ce travail pour aboutir à la réalisation du profil de vitesse désiré.

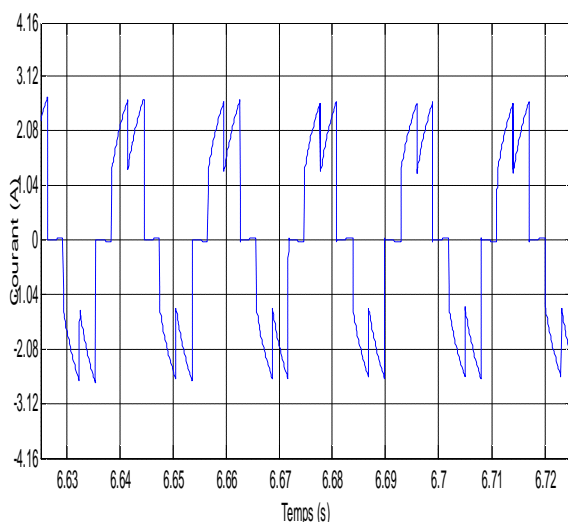


Figure III.36: Allure du courant de phase simulée (Essorage)

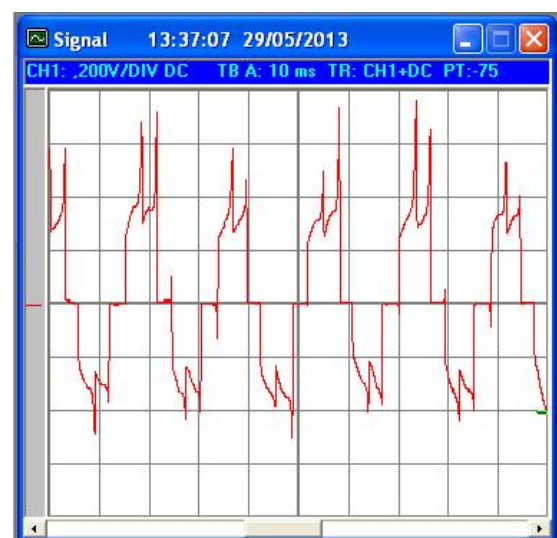


Figure III.37: Allure du courant de phase expérimentale (Essorage)

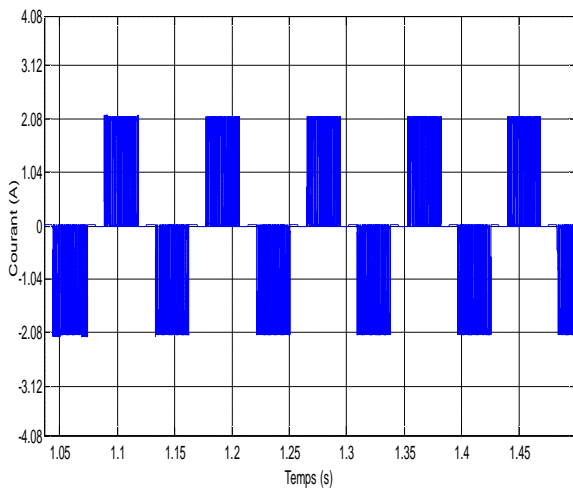


Figure III.38: Allure du courant de phase simulée (Lavage)

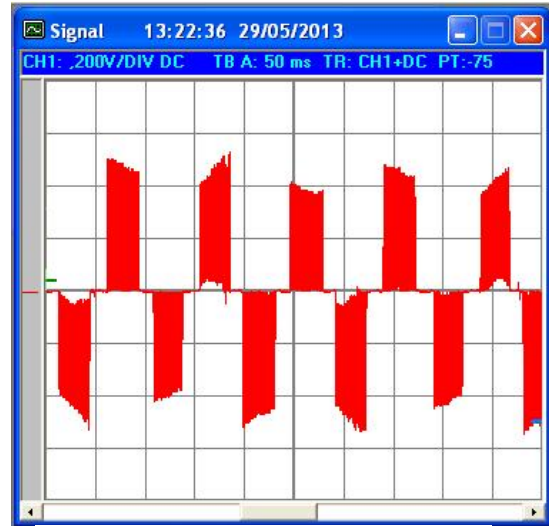


Figure III.39: Allure du courant de phase expérimental (Lavage)

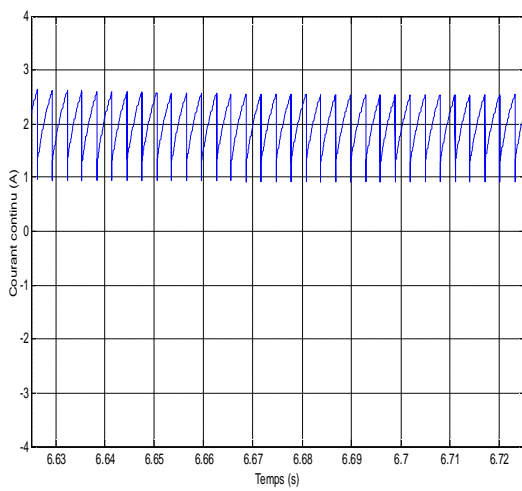


Figure III.40: Allure du courant continu simulé (Essorage)

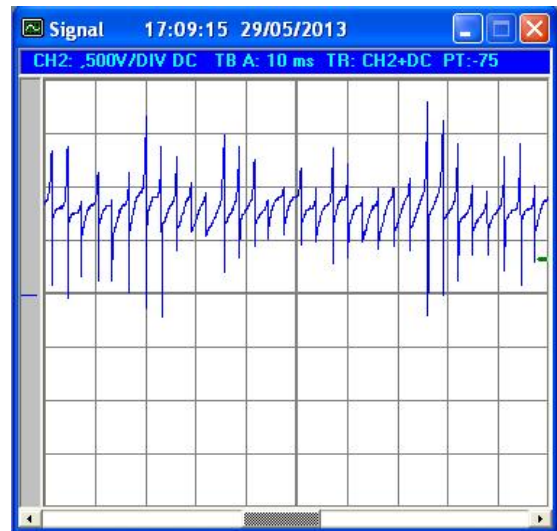


Figure III.41: Allure du courant continu expérimental (Essorage)

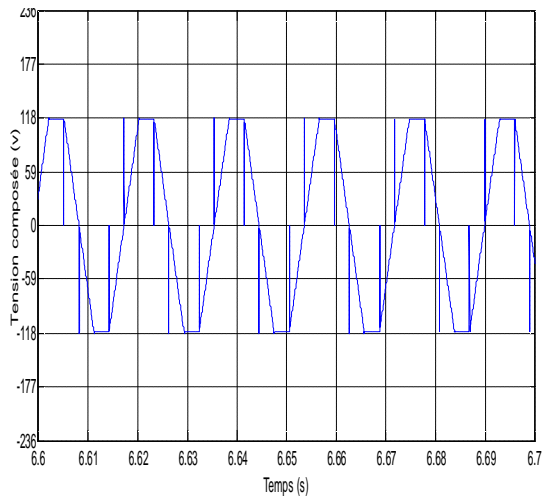


Figure III.42: Allure de la tension composée simulée (Essorage)

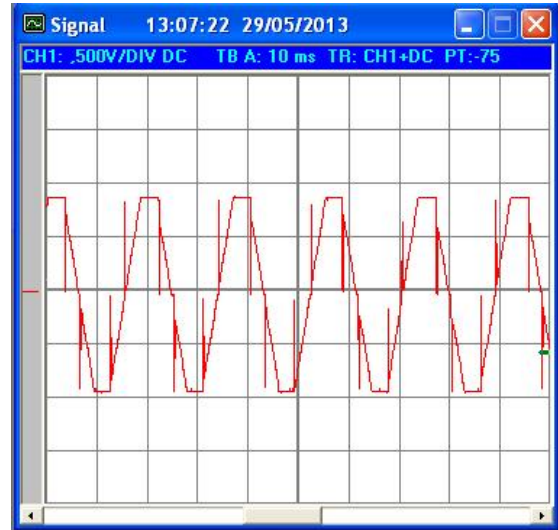


Figure III.43: Allure de la tension composée expérimentale (Essorage)

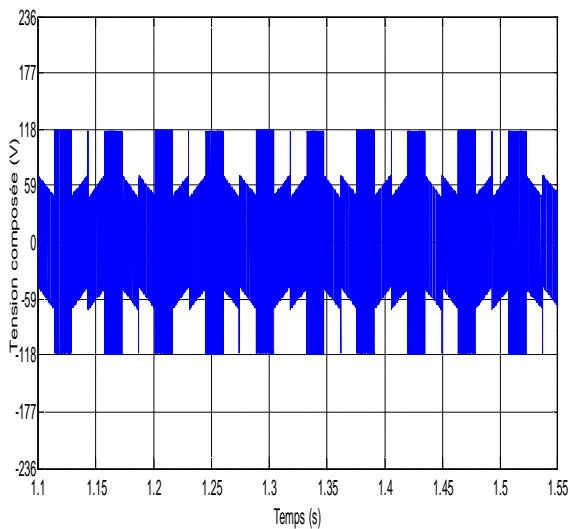


Figure III.45: Allure de la tension composée expérimentale (Lavage)

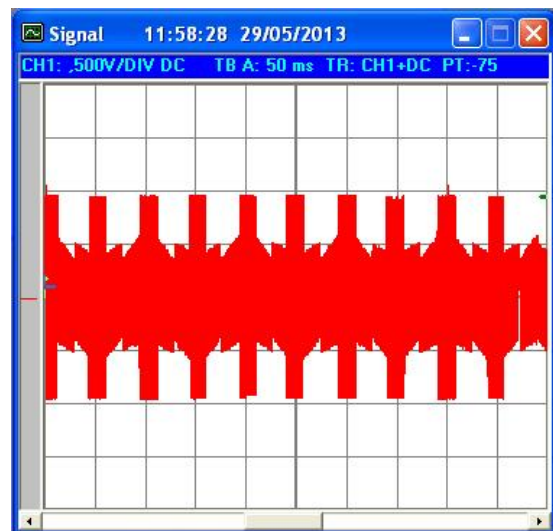


Figure III.44: Allure de la tension composée simulée (Lavage)

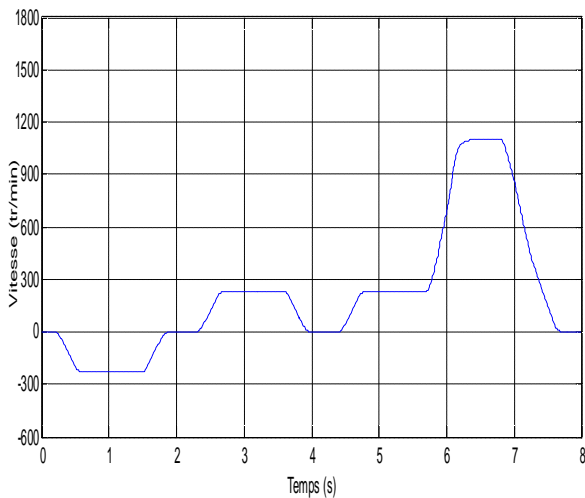


Figure III.46 : Profil de vitesse simulé



Figure.III.47: Profil de vitesse expérimental

## Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les éléments du banc expérimental utilisé ainsi que les différentes étapes d'implémentation en temps réel sur carte dSPACE de la commande de l'onduleur.

Les essais préliminaires concernant le fonctionnement des différents éléments du banc d'essai nous ont permis de déceler un mauvais fonctionnement du système aux grandes vitesses. A cet effet, nous avons apporté certaines corrections au niveau du dimensionnement des pistes du codeur.

Après avoir apporté les améliorations nécessaires au bon fonctionnement du système, nous avons réalisé le profil de vitesse d'un lave-linge dans lequel toutes les phases sont exécutées, avec des vitesses avoisinant 230 tr/min au lavage et de 1100 tr/min pendant l'essorage. En plus, dans les mêmes conditions, les résultats expérimentaux ont été comparés avec satisfaction à ceux obtenus par simulation.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent l'étude théorique et expérimentale de la variation de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents à f.c.e.m trapézoïdale alimenté par un onduleur de tension, piloté par un capteur de position mécanique. Ceci dans le but de réaliser un profil de vitesse d'un lave-linge.

Nous avons commencé par présenter des généralités sur les lave-linges et les différents moteurs utilisés pour l'entraînement de leurs tambours. Nous avons également évoqué les avantages des moteurs synchrones à aimants permanents utilisés dans les lave-linges équipés de la nouvelle technologie « Direct Drive ».

Afin de se familiariser avec la machine synchrone à aimants permanents, nous avons présenté ces différentes topologies (axiale ou radiale) et ces différents modes d'alimentations (courants sinusoïdaux ou en créneaux).

Un modèle de l'ensemble BDCM-convertisseur piloté par un capteur de position a été élaboré. Celui-ci a été implémenté sous l'environnement Matlab-Simulink et SimPowerSystems. Les résultats de simulation montrent que le modèle de simulation établi représente d'une manière satisfaisante la réalité de la machine et celle de son convertisseur. De plus nous avons comparés avec satisfaction nos résultats avec ceux obtenus par B.Zadoud et A.Oubellil [10] et ceux donnés par Matlab (exemple sur SimPowerSystems).

Dans la fin du deuxième chapitre, nous avons réalisé par simulation un profil de vitesse d'un lave-linge dans lequel toutes les phases sont exécutées, avec des vitesses avoisinant 230tr/min au lavage et de 1100tr/min pendant l'essorage.

Notre travail est entre autre, basé sur l'implémentation en temps réel et la validation expérimentale du modèle développé en théorie. Pour cela, nous avons mis en œuvre une plate-forme expérimentale comportant principalement une BDCM équipée d'un capteur de position et un onduleur de tension commandé par une carte dSPACE <<DS1102>>. Ceci pour pouvoir réaliser expérimentalement le profil de vitesse désiré.

Les essais préliminaires effectués sur les différentes parties du banc d'essai ont montré un mauvais fonctionnement du système aux grandes vitesses. A cet effet, nous avons apporté certaines corrections au niveau du dimensionnement des pistes du codeur. Cette amélioration nous a permis de réaliser expérimentalement le profil de vitesse d'un lave-linge dans lequel toutes les phases sont exécutées, avec des vitesses avoisinant 230 tr/min au lavage et de 1100 tr/min pendant l'essorage. En plus, les résultats ont été comparés avec

satisfaction à ceux obtenus par simulation dans les mêmes conditions. Cet accord satisfaisant entre la théorie et l'expérience a permis de confirmer la méthodologie suivie pour aboutir à l'implémentation en temps réel sur carte dSPACE du profil de vitesse désiré finalisant l'objectif de notre travail.

Cependant, au vu de notre expérience, nous proposons une autre amélioration du système, en réalisant un blindage concernant le boîtier du codeur de position pour éviter toute perturbation de son codage.

Une commande en vitesse en boucle fermée avec contrôle des courants de phases serait souhaitable, sa simulation et sa réalisation expérimentale présenterait une perspective très intéressante pour la promotion à venir.

# **Références bibliographiques**

## Bibliographie

- [01] D.Mokrane, A.Ferhat <<Réalisation d'un onduleur triphasé à base de transistors IGBT>>, Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2009.
- [02] M.Lounes, A.Lyes <<Réalisation d'un capteur de position en vue d'autopiloté une machine synchrone à aimants permanents>>, Thèse master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2012.
- [03] A. Hassina <<Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variables électriques>>, Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2011.
- [04] B.Boussad << Contribution à la commande des systèmes couples machines convertisseurs: Application aux machine à aimants permanents (BDCM-PMSM)>> Thèse de Doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2012.
- [05] A. Jaouad <<Contribution à la modélisation et à l'optimisation des machines synchrones à aimants permanents à flux axial. Application au cas de l'aérogénérateur>>, Thèse de Doctorat, université du Havre 2007.
- [06] L.Ramdane << Modalisation des machines asynchrones et synchrones à aimant avec prise en compte des harmoniques d'espace de temps: Application à la propulsion marine par POD>>, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine 2006.
- [07] O. Mohammed <<Elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimants permanents>>, Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2011.
- [08] E.Marwa mohamed moustafa<< Commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimants permanents>>, Thèse de Doctorat, Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes 2011.
- [09] Bbak Nahid Mobarakeh <<commande vectorielle sans capteur mécanique des machines à aimants : méthodes, convergence, robustesse, identification des paramètres>>, Thèse de doctorat de l'INPL, France 2001.
- [10] B.Zadoud, A.Oubellil <<Modélisation physique d'un moteur synchrone à aimants permanents à f.e.m trapézoïdale>>, Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2009.

[11] K.Aknine, Y.Ammouri, N.Slimani, <<Etude et réalisation d'un onduleur IGBT triphasé piloté par une carte dSPACE DS1102>>, Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2006.

# **Annexe**

## PARAMETRES DES MACHINES ÉTUDIÉES

### Pour la machine présente au laboratoire(CAE)

Nombre de paires de pôles:  $P=3$

Résistance par phase :  $R=0.125 \Omega$

Inductance cyclique :  $L_m=0.0014 \text{ H}$

Coefficient des frottements visqueux:  $f=1 \cdot 10^{-4} \text{ N.m.s/rd.}$

Moment d'inertie propre de la machine:  $J=528 \cdot 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$

Constante des f.c.e.m:  $K=0.5(\text{V.s/rd})$

Couple de charge :  $Cr_n=21.68 \text{ N.m}$

Tension continue:  $V_{dc_n}=350 \text{ v}$

### Pour la machine donnée par la référence [10]

Nombre de paires de pôles:  $P=2$

Résistance par phase :  $R=1.25 \Omega$

Inductance cyclique :  $L_m=0.0065 \text{ H}$

Coefficient des frottements visqueux:  $f=764 \cdot 10^{-6} \text{ N.m.s/rd.}$

Moment d'inertie propre de la machine:  $J=128 \cdot 10^{-6} \text{ Kg.m}^2$

Constante des f.c.e.m:  $K=0.16(\text{V.s/rd})$

Couple de charge:  $Cr_n=1.5 \text{ N.m}$

Tension continue:  $V_{dc_n}=190 \text{ v}$

### Pour la machine à f.c.e.m trapézoïdale de l'exemple Matlab

Nombre de paires de pôles:  $P=4$

Résistance par phase :  $R=2.8750 \Omega$

Inductance cyclique :  $L_m=0.0085 \text{ H}$

Coefficient des frottements visqueux:  $f=1 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.s/rd}$

Moment d'inertie propre de la machine:  $J=0.8 \cdot 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$

Constante des f.c.e.m:  $K=0.7 (\text{V.s/rd})$

Couple de charge:  $Cr_n=3 \text{ N.m}$

Tension continue:  $V_{dc_n}=500 \text{ v}$

## **Coefficients multiplicatifs des capteurs**

➤ **Pour le courant continu d'entrée**

Capteur de courant à effet hall (LEM LA 55P) avec un coefficient multiplicatif  $K1=2$  (A/V)

➤ **Pour les courants des phases**

Capteur de courant à effet hall (LEM LA 55P) avec un coefficient multiplicatif  $K2=5.3$  (A/V)

➤ **Pour les tensions composées et les tensions simples**

Capteur de tension à effet hall (LEM LV 25P) avec un coefficient multiplicatif  $K3=118$

➤ **Pour la vitesse de rotation**

Une génératrice tachymétrique avec une constante  $K4= 33.33$  [(tr/min)/V]



Photo du codeur absolu

## **Résumé :**

L'apparition des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) dans le monde des actionneurs électriques a joué un rôle crucial dans l'évolution des systèmes électriques en leur ouvrant de nouvelles opportunités grâce à leurs fonctionnements dans une ambiance déflagrante. En plus, des recherches approfondies ont permis de mettre au point des matériaux nouveaux, comme par exemple des aimants à base de terre rare. Ces derniers permettent d'obtenir des machines à aimants qui présentent, par rapport aux autres types de machines, beaucoup d'avantages, entre autres, une inertie faible et un couple massique élevé. Elles sont actuellement les mieux classées pour répondre aux exigences des applications, telles que les machines outils, la robotique, la technologie de l'espace (actionneurs d'aviation, de satellites...) et d'une manière générale dans les systèmes à entraînement direct (Direct Drive). L'objectif des travaux présentés dans ce mémoire est l'implémentation sur une carte dSPACE <<DS1102>> la commande en boucle ouverte de la vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents à f.c.e.m trapézoïdale. Cette dernière est alimentée par un onduleur de tension et pilotée par un codeur de position, afin de réaliser un profil de vitesse d'un lave-linge, ce profil est prévu pour un entraînement direct du tambour, en technologie direct drive.

**Mots clés :** Machine synchrone à aimants permanents, modélisation du système machine-convertisseur, entraînement direct, lave-linge, carte dSPACE.