

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
قسم الإلكترونيات
Département d'électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologies ST
Filière : Électrotechnique ELT
Spécialité : Électromécanique ELM

مذكرة نهاية الدراسة لنيل شهادة ماستر
Mémoire de Fin d'étude pour l'obtention du Master

Présenté par : BEN MOULAI Safa et BEN LEHBIB Fella

Thème

الموضوع

Étude d'une commande directe d'un MSAP alimenté par un onduleur multicellulaire à quatre niveaux

Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité
Sid Ahmed BESSEDIK	Pr	Président
Aissa AMEUR	Pr	Examineur
Bachir MOKHTARI	MCA	Encadreur
M'hamed BIRAME	MCA	Co-encadreur

Année Universitaire 2022/2023

تهدف هذه الدراسة إلى معرفة مدى تحسن أداء التحكم المباشر في العزم و الدفع المغناطيسي لمحرك متزامن ثلاثي الطور ذي مغناطيس دائم باستعمال موج للجهود متعدد الخلايا بأربع مستويات. دراستنا هذه قسمت إلى أربع فصول كما يلي :

- **الفصل الأول :** يمثل تعريفا و نمذجة للمحرك بكتابة مختلف معادلاته الكهرومغناطيسية و الميكانيكية في معلم مرتبط بالجزء الساكن للمحرك مما يلائم التحكم المباشر في العزم و الدفع المغناطيسي.
 - **الفصل الثاني:** قدمنا موج الجهود متعدد الخلايا بأربع مستويات المستعمل في دراستنا.
 - **الفصل الثالث :** قمنا بشرح تقنية التحكم المباشر في العزم و الدفع المغناطيسي الأصلية التي صاغها الباحث **تاكاهاشي**.
 - **الفصل الرابع :** أظهرنا نتائج المحاكات و أعطيناها قراءة تفسيرية.
- الكلمات المفتاحية :** التحكم المباشر في العزم و الدفع المغناطيسي، محرك متزامن ثلاثي الطور ذو مغناطيس دائم ، النمذجة ، موج جهود متعدد الخلايا بأربع مستويات.

Abstract

The aim of this study is to know the improvements obtained when using a four-level multicellular voltage inverter (4LMI) in direct torque and magnetic flux control (DTC) applied to a three-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM). This study is divided into four chapters as follows:

- **The first chapter:** represents the definition and the modeling of the motor by writing its various electromagnetic and mechanical equations in a reference linked to the stator of the motor which is adapted to the DTC.
- **The second chapter:** We presented the multicellular voltage inverter with four levels, used in this study.
- **Chapter Three:** we explained the original direct magnetic flux and torque control technique formulated by researcher *Takahashi*.
- **Last chapter:** we showed the results of the simulations and gave them an explanatory reading.

Keywords: DTC, PMSM, Modeling, 4LMI.

Résumé

Le but de cette étude est de savoir les améliorations obtenues lors de l'utilisation d'un onduleur de tension multicellulaire à quatre niveaux (OM4N) dans une commande directe du couple et du flux magnétique (DTC) appliquée à un moteur synchrone triphasé à aimants permanents (MSAP). Cette étude est divisée en quatre chapitres comme suit:

- **Le premier chapitre :** représente la définition et la modélisation du moteur en écrivant ses différentes équations électromagnétiques et mécaniques dans un repère lié au stator du moteur ce qui est adapté à la DTC.
- **Le deuxième chapitre :** Nous avons présenté l'onduleur de tension multicellulaire à quatre niveaux, utilisé dans cette étude.
- **Chapitre trois :** Nous avons expliqué la technique DTC d'origine formulée par le chercheur *Takahashi*.
- **Dernier Chapitre:** Nous avons montré les résultats des simulations en leur donnant des explications.

Mots clés : DTC, MSAP, Modélisation, OM4N.

Remerciements

En premier lieu, nous remercions ALLAH qui nous a permis d'arriver jusque-là.

Grand merci à notre encadreur monsieur *Bachir Mokhtari*, pour l'orientation, la confiance et la patience, qui ont constitué un apport considérable pour nous.

Nos vifs remerciements vont également à notre co-encadreur monsieur *M'hamed Birame* pour ses orientations et ses encouragements durant la réalisation de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier les deux membres du jury messieurs *Sid Ahmed BESSEDIK* et *Aissa AMEUR* pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner.

Nous remercions tous ce qui contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

A tous nos enseignants du département d'électrotechnique, merci à tous....

Dédicace

Je : exprime toutes les deux

Je dédie ce travail à mes très chers parents, aucune dédicace ne saurait exprimée l'amour, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices. Puisse Allah le tout puissant vous préserver et vous accorder la bonne santé, la longue vie et le bonheur.

A mes frères et sœurs adorés : Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'amour que j'ai pour vous. Je vous souhaite un avenir plein de bonheur et de réussite. Je vous exprime à travers ce travail tous mes sentiments de fraternité.

A toute ma famille pour leurs encouragements et leur soutien.

A mes chères amies.

Je dédie ce travail, enfin, à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Ben Lehlil Fella et Ben moulai Safa

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	01
ABREVIATIONS ET SYMBOLS	04
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	06
Chapitre I : Construction et Modélisation du MSAP	
I.1. Introduction	08
I.2. Généralités sur le MSAP	08
I.2.1. Principe de fonctionnement du MSAP	09
I.2.2. Avantages et inconvénients du MSAP	09
I.2.3. Domaines d'application du MSAP	10
I.2.4. Techniques de commande du MSAP	11
I.3. Modélisation du MSAP	11
I.3.1. Modèle du MSAP dans le repère triphasé	12
I.3.2. Mise en équation du MSAP	12
I.3.3. Transformation de Park	14
I.3.4. Modèle du MSAP dans le repère lié au rotor (α, β)	14
I.4. Conclusion	15
Chapitre II : Onduleurs multicellulaire à quatre niveaux	
II.1 Introduction	17
II.2 Aperçu sur les onduleurs	17
II.2.2 Différents types d'onduleurs	20
II.2.2.1. Onduleur autonome	20
II.2.2.2 Onduleur non autonome	20
II.2.3. Différents type de commande des onduleurs	20
II.3. Les onduleurs multiniveaux	21
II.3.1. Application des convertisseurs multiniveaux	21
II.3.2. Les avantages et les inconvénients de l'onduleur multiniveaux	22
II.4. Topologie d'un onduleur multicellulaire à quatre niveaux	23
II.5. Conclusion	24
Chapitre III : La commande DTC appliquée au MSAP	
III.1. Introduction	26
III.2. Principe de la commande DTC	26
III.3. Avantages et inconvénients de la commande DTC	27
III.3.1. Avantage	27
III.3.2. Inconvénient	27
III.4. Algorithme de la commande DTC	27
III.5. Principe du contrôle du couple et flux statorique	28
III.5.1. Contrôle du flux statorique	28
III.5.2. Contrôle du couple électromagnétique	29
III.6. Choix des vecteurs de tension	29
III.7. Estimation du Flux et du Couple	30
III.7.1. Estimation du flux statorique	30
III.7.2. Estimation du couple électromagnétique	30

III.8. Élaboration de la table de commutation	31
III.9. DTC associée à un onduleur multicellulaire à quatre niveaux.....	31
III.9.1. DTC appliquée à un MSAP alimentée par OM4N.....	32
III.9.2. Correcteur du couple a sept niveaux	32
III.9.3. Construction de la commutation	32
III.10. Conclusion	33
Chapitre IV : Résultats de Simulation	
IV.1. Introduction	35
IV.1.1. Paramètres et grandeurs utilisés dans cette étude (SI).....	35
IV.2. Structure de simulation	35
IV.2.1. Détail des blocs.....	36
IV.3. Résultats de simulation	39
IV.4. Conclusion	43
CONCLUSION GENERALE	45
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	47

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La machine synchrone à aimants permanents a fait l'objet de nombreuses recherches, que ce soit dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie éolienne par exemple ou dans son fonctionnement en moteur pour les systèmes de traction par exemple. Notre travail concerne le fonctionnement en mode moteur, il s'agit, en particulier de son contrôle basé sur la commande directe du couple associée à un onduleur multiniveaux.

Un intérêt est accordé à la MSAP pour plusieurs raisons :

- Pas de pertes résistives au rotor et donc pas d'équipement de refroidissement au rotor ;
- Faible inertie et un couple massique élevé ;
- Meilleure performance dynamique ;
- Facteurs de puissance et rendement élevé ;
- Robustesse incontestée par rapport au moteur à courant continue.

La commande directe de flux et de couple d'un moteur électrique connue sous l'abréviation DTC, est très connue actuellement et rentre dans des applications industrielles où le couple moteur forme le facteur majeur de l'application.

Mais comme toute technique, cette commande a quelques inconvénients qui peuvent être nuisibles pour le système entraîné et l'opérateur lui-même (vibrations et problème acoustique). Plusieurs solutions sont présentées et réalisées afin de réduire ces inconvénients. Notre travail aborde l'une de ces solutions qui est l'utilisation d'un onduleur multi niveaux pour qu'on puisse délivrer plus de tensions lorsque le système le demande. Cette stratégie peut fournir au couple la tension adéquate à une légère correction et le faire coïncider dans une bande plus étroite et donc on aura moins d'ondulations

Organisation du mémoire

Le but de ce travail est l'étude d'une commande directe d'un MSAP alimenté par un onduleur multicellulaire à quatre niveaux. La simulation est réalisée en utilisant Simulink/Matlab.

- Dans le premier chapitre on va présenter la construction et modélisation du moteur synchrone à aimants permanents.
- Le deuxième chapitre donnera un aperçu des onduleurs multiniveaux. Nous étudions spécifiquement l'onduleur multicellulaire à quatre niveaux.
- Dans le troisième chapitre, on présentera les fondements et principes de la DTC appliquée à un moteur synchrone à aimants permanents.
- Dans le dernier chapitre, on expliquera les résultats obtenus par simulation. Des comparaisons seront faites aux niveaux des tensions, de couple électromagnétique, de flux magnétique statorique et du courant statorique.

Enfin une conclusion générale où on présentera une synthèse des résultats obtenus et les perspectives futures pour l'amélioration de ce travail.

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

ABREVIATIONS ET SYMBOLES

MSAP	Moteur Synchrone à Aimants Permanents
DTC	Direct Torque Control (Commande directe de flux et de couple)
OM4N	Onduleur Multicellulaire à quatre niveaux
C_e ou T_e	Couple électromagnétique
φ_s	Flux magnétique statorique
V_i	Tension délivrée par l'onduleur (i=1,2,3,...)
R_s	Résistance statorique
$I_{a,b,c}$	Courants absorbés par le moteur
θ	Angle de l'axe de repère de Park par rapport à l'axe (a) du système triphasé
K_i	Etat des interrupteurs de l'onduleur (i=1,2,3,..)
T_s	Période d'échantillonnage

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure I.1: Stator bobiné et rotor à aimants permanents d'un MSAP [18KI].	08
Figure I.2: Stator et rotor du MSAP [19AS].	09
Figure I.3: Quelques techniques de commande utilisées pour les moteurs électriques [18KI].	11
Figure.I.4: Représentation d'un MSAP [13HO].	12
Figure II.1: Schéma d'un onduleur triphasé a deux niveaux alimentant une charge en étoile [20BC].	17
Figure II.2: Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux [19AS].	19
Figure II.3: Présentation d'un bras pour l'onduleur deux niveaux et celui du OM4N.	23
Figure II.4: Les états des interrupteurs d'un (OM4N).	24
Figure III.1: Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple du MSAP [18BA].	26
Figure III.2: Evolution de l'extrémité de φ_s pour $R_s I_s$ négligeable [18KI].	28
Figure III.3: Choix du vecteur de tension.	29
Figure III.4: Correcteur du couple à hystérésis à sept niveaux [14BM].	32
Figure IV.1: Schéma global de la commande DTC avec les deux blocs de DTC simple et avec OM4N.	36
Figure IV.2: Bloc du modèle du MSAP.	36
Figure IV.3: Bloc de la TVC.	37
Figure IV.4: Passage de l'écart de couple par le zéro : (a) DTC simple, (b) DTC avecOM4N.	37
Figure IV.5: Bloc de l'OM4N.	38
Figure IV.6: Les blocs pour numéroter les secteurs : (a) DTC simple, (b) pour OM4N.	38
Figure IV.7: Tensions délivrées par les deux onduleurs dans le plan $\alpha\beta$.	39
Figure IV.8: Bloc d'estimation de flux, de sa position et du couple.	39
Figure IV.9: Secteurs occupé par le vecteur de flux lors d'une DTC simple et avec OM4N.	40
Figure IV.10 : Vecteurs-tensions délivrés par les deux onduleurs.	40
Figure IV.11 : Evolution du couple électromagnétique.	41
Figure IV.12: Evolution du flux magnétique statorique.	41
Figure IV.13: Trajectoire du vecteur de flux magnétique dans l'espace $(\alpha\beta)$.	42
Figure IV.14: Evolution du courant d'une phase du MSAP.	42
Table II.1: Table de commutation des séquences de l'onduleur à deux niveaux.	19
Table III.1: Table de commutation.	31
Table III.2: Table de commutation proposée pour un OM4N [14BM].	33
Table IV.1 : Grandeurs et Paramètres.	35

Chapitre I

Construction et modélisation du MSAP

I.1 Introduction

L'apparition sur le marché des aimants de bonne qualité et de faible coût ainsi que les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ont permis le développement des moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) afin de remplacer les moteurs à courant continu (M.C.C). Le MSAP permet l'obtention de couple massique élevé et l'utilisation des aimants permanents à la place de l'enroulement inducteur annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement, mais malheureusement, annule aussi la possibilité de lui imposer une commande via son rotor.

Dans ce chapitre on va présenter la construction et la modélisation du MSAP triphasé afin de l'entraîner par la commande DTC.

I.2 Généralité sur le MSAP

Pour la plus part des moteurs électriques triphasés, la construction est la même. On a toujours une partie immobile appelée le stator et une autre mobile appelée le rotor [14HZ]. Le stator du MSAP est composé de trois enroulements identiques et son rotor est composé des aimants permanents. Le stator et le rotor ont une forme cylindrique, le rotor étant recouvert par le stator avec une distance qui les sépare appelée l'entrefer en donnant ainsi la possibilité au rotor à se tourner.

Les axes des inductances du stator sont décalés dans l'espace électrique de 120° . Ces bobines sont logées dans des encoches formant le circuit magnétique. Ce dernier est feuilleté pour réduire les courants de *Foucault* et limiter les pertes dans le fer. Le flux inductif balaie les enroulements du stator et y induit une force électromotrice (f.e.m) alternatives. L'interaction des champs du stator et du rotor crée un couple entraînant le moteur sur son arbre à vitesse de synchronisme. La figure I.1 représente un stator bobiné et un rotor à aimants permanents d'un MSAP.



Figure I.1: Stator bobiné et rotor à aimants permanents d'un MSAP [18KI].

I.2.1. Principe de fonctionnement du MSAP

Tout moteur dont la vitesse du rotor est égale à la vitesse du moteur la vitesse de rotation du champ magnétique tournant est appelée moteur synchrone. Afin d'obtenir un tel fonctionnement, le champ du rotor doit être contrôlé par les aimants ou par le circuit d'excitation. Soit, en mode permanent, la position du champ magnétique Le rotor est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose la même vitesse de rotation entre les deux Champs tournants du rotor et du stator [20BA].

A. Stator: L'induit est la partie fixe du moteur et se compose de trois parties Les enroulements traversés par le courant alternatif sont décalés spatialement de 120° , et Avec le temps, s'installe dans l'encoche qui fixe le circuit magnétique

B. Rotor: ou inducteur est la partie mobile du moteur et se compose d'aimants permanents. Il a l'avantage d'éliminer les pertes causées par la présente des bobines et les balais-collecteur telles que les pertes par effet de joule et les pertes par frottement des charbons etc. Il ne nécessite pas donc de source d'alimentation pour fournir du courant de champ. Cependant, l'amplitude du flux du rotor ne peut pas être contrôlée car il est fixe ce qui limite la possibilité de son contrôle. La figure suivante illustre un exemple de son stator et son rotor.



A. Stator



B. Rotor

Figure I.2: Stator et rotor du MSAP [19AS].

I.2.2. Avantages et inconvénients du MSAP

Tout système possède des avantages et des inconvénients, dans ce qui suit on va citer ceux du MSAP pour donner un aperçu sur son importance dans les diverses applications [20BC].

A. Avantages

- Puissances massives élevées et précision de sa commande ;

- Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contacts (bague –balais) dans ces moteurs ce qui réduit les problèmes de maintenance ;
- Absence de contacts glissants ;
- Robustesse incontestée par rapport au moteur à courant continu ;
- Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans le moteur. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor ;
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement ;
dynamique en accélération et en freinage ;
- Grande fiabilité ;
- Facteur de puissance et rendement élevé par rapport à ceux des moteurs asynchrones ;
- Fonctionnement en survitesse.

B. Inconvénients

- Coût élevé des aimants ;
- Interaction magnétique due au changement de structure ;
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure du moteur.

I.2.3. Domaines d'application du MSAP

Le MSAP convient à une large gamme de puissance, de centaines de Watts (servomoteurs) à plusieurs Mégawatts (systèmes de transmission Bateau). Dans diverses applications telles que le positionnement et la synchronisation [20BC]:

- Il fonctionne comme compensateur synchrone ;
- La production d'électricité (l'éolienne par exemple);
- L'entraînement à vitesse variable, et la traction (propulsion des véhicules électriques et propulsion des sous-marins etc.);
- Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges ;
- Equipements domestiques (machine à laver...);
- Les équipements de soins médicaux (fraise de dentiste ...);
- Diverse applications robotiques.

I.2.4. Techniques de commande du MSAP

La technologie de contrôle du MSAP peut être divisée en contrôle scalaire et contrôle vectoriel. Le premier est basé sur une relation effective en régime permanent. L'amplitude et la fréquence de la variable contrôlée sont prises en compte.

Sous contrôle vectoriel, en tenant compte de la valeur et de la position du vecteur spatial contrôlé. Cette relation est valable même pendant les transitoires, ce qui est essentiel pour contrôler le couple et la vitesse précis.

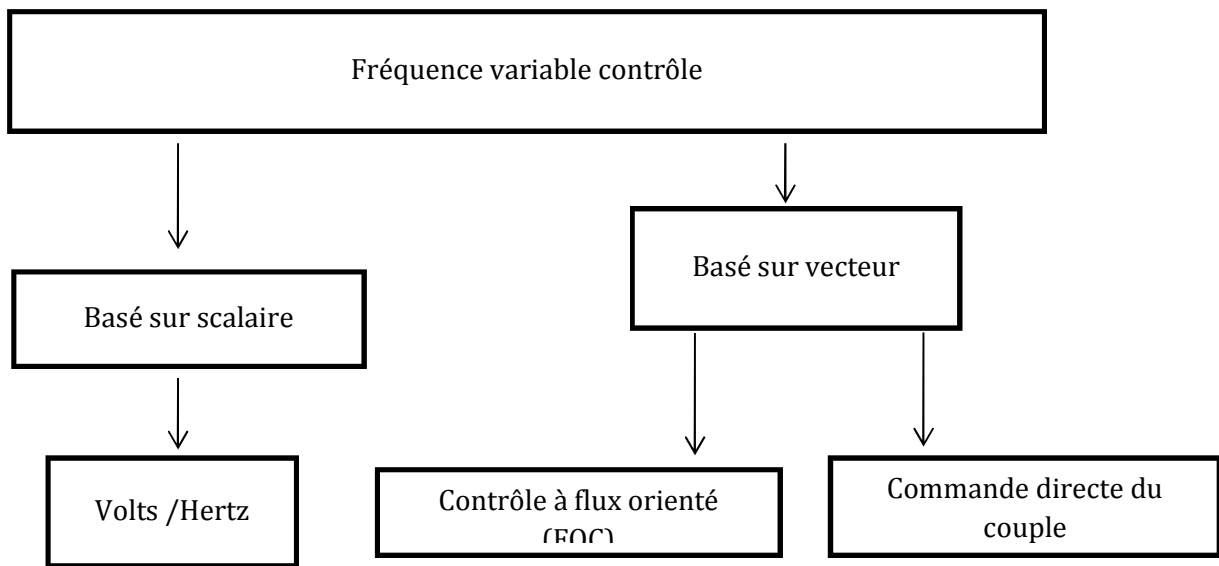


Figure I.3: Quelques techniques de commande utilisées pour les moteurs électriques [18KI].

I.3. Modélisation du MSAP

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation, qui permet de simuler le comportement du système sous différents facteurs de contraintes afin de comprendre les mécanismes qui contrôlent son fonctionnement, et la modélisation de MSAP fait l'objet de nombreuses études de puissance moyenne proposées. Le formatage du modèle mathématique MSAP facilite grandement son apprentissage.

Certains ou tous les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être pris en compte dans le modèle. Ils proviennent de plusieurs niveaux de modélisation liés à des hypothèses simplificatrices connexes. Ces simplifications proviennent des caractéristiques des moteurs à courant alternatif. Pour cela, nous adoptons les hypothèses suivantes [14HZ], [20BA]:

- Le circuit magnétique de la machine et non saturé ;

- Répartition sinusoïdale de la f.e.m ;
- L'effet de la température sur les résistances est négligeable ;
- L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- L'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligeable ;
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme ;
- L'effet d'encoche n'est pas pris en compte.

I.3.1. Modèle du MSAP dans le repère triphasé

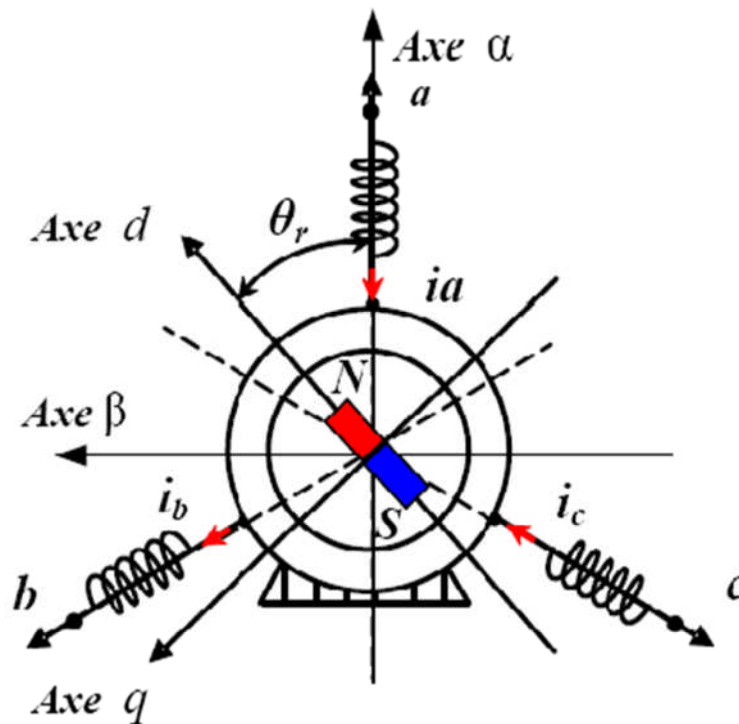


Figure.I.4: Représentation d'un MSAP [13HO].

I.3.2. Mise en équation du MSAP

Le comportement du moteur est entièrement défini par trois types d'équations à savoir [20BC] :

- Equations électriques ;
- Equations magnétiques ;
- Equation mécanique.

A. Equations électriques

Les tensions, flux et courants statorique triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes $[V_S]$, $[\phi_S]$ et $[I_S]$. L'équation de tension dans le référentiel du stator s'écrit [20BC] :

$$[V_S] = [R_S] \cdot [I_S] + \frac{d}{dt} [\varphi_S] \quad (I.1)$$

B. Equations magnétiques

Le flux statorique a pour expression [14HZ] :

$$[\varphi_S] = [L_S] * [I_S] + [\varphi_f] \quad (I.2)$$

La matrice $[L_S]$ est une matrice carrée qui contient des termes constants regroupés dans $[L_{S0}]$ alors que les termes variables dépendant de (θ) sont regroupés dans $[L_{S2}(\theta)]$. Dans le cas général, elle se met sous la forme [20BC] :

$$[L_S] = [L_{S0}] + [L_{S2}(\theta)] \quad (I.3)$$

Avec :

$$[L_{S0}] = \begin{bmatrix} L_{S0} & M_{S0} & M_{S0} \\ M_{S0} & L_{S0} & M_{S0} \\ M_{S0} & M_{S0} & L_{S0} \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

Où :

M_{S0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

L_{S0} : Inductance propre d'une phase statorique,

θ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator

C. Equation mécanique

Elle complète le modèle du MSAP. C'est une équation mécanique de base décrivant la dynamique du rotor du moteur et qui relie les différents couples à la vitesse et sa dérivée [20BC].

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + f \omega_r = C_e - C_r \quad (I.5)$$

Tels que :

J : Moment d'inertie de la partie tournante (kg.m²) ;

f : Coefficient de frottement visqueux (N.m. s/rad) ;

C_r: Couple résistant (N.m) ;

Ω : vitesse de rotation (rad/s).

I.3.3. Transformation de Park

La transformation de Park est définie par la matrice suivante [16HB] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

D'où les nouvelles composantes dans cet espace sont obtenues par :

$$[X_{d,q,0}] = [P(\theta)][X_{a,b,c}] \quad (I.7)$$

I.3.4. Modèle du MSAP dans le repère lié au stator (α, β)

En reportant les transformations d'expression du flux et de la tension, on obtient :

- Expressions des composantes estimées de flux :

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \int (v_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \psi_{s\beta} = \int (v_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \\ |\psi_s| = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \end{cases} \quad (I.8)$$

- Sa position est estimée par l'expression :

$$\theta = \arctg \frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}} \quad (I.9)$$

- Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = \frac{3}{2} p ((l_d - l_q) i_{s\alpha} i_{s\beta} + \psi_e i_{s\beta}) \quad (I.10)$$

Notons que le couple électromagnétique se décompose en deux termes comme suit :

- Le couple principal du MSAP:

$$C_e = \frac{3}{2} p \psi_e i_{s\beta} \quad (I.11)$$

- le couple de réductance variable :

$$C_e = \frac{3}{2} p (l_d - l_q) i_{s\alpha} i_{s\beta} \quad (I.12)$$

I.4. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre la conception d'un moteur synchrone à aimants permanents. Nous avons donné un aperçu sur ses avantages et ses inconvénients ainsi que sur quelques domaines d'utilisations, ensuite nous avons présenté les différentes équations qui le modélisent en se basant sur les hypothèses simplificatrices citées précédemment.

Pour une préparation à sa commande par DTC, nous avons réécrit son modèle dans un repère lié au stator car c'est l'écriture adéquate à cette commande. Dans le chapitre suivant, nous

présenterons l'onduleur de base à deux niveaux et l'onduleur multicellulaire à quatre niveaux utilisé dans la commande du MSAP par DTC.

Chapitre II

Onduleur multicellulaire à quatre niveaux

II.1 Introduction

Les onduleurs électriques sont des dispositifs basés sur des composants à semi-conducteurs (transistors généralement) appelés interrupteurs et qui convertissent l'énergie électrique sous la forme continue en énergie sous forme alternative. Ils sont très utiles et employés largement dans les applications domestiques et industrielles.

L'onduleur multicellulaire est un l'un deux qui permet cette conversion d'énergie électrique DC/AC; il est constitué d'un ensemble de cellules, chacune comportant un interrupteur électronique et un condensateur ; L'avantage principal de ce type d'onduleur est sa capacité à gérer des tensions plus élevées que les onduleurs traditionnels, tout en offrant une meilleure efficacité énergétique ;Les onduleurs multicellulaires sont particulièrement adaptés aux applications industrielles nécessitant une haute puissance ; comme les moteurs électriques ou les équipements de soudage [17ZM].

Dans ce chapitre nous rappellerons le principe d'un onduleur de tension à deux niveaux ensuite on présente l'onduleur multicellulaire à quatre niveaux qui sera impliqué par la suite dans la commande du MSAP par DTC.

II.2 Aperçu sur les onduleurs

Les onduleurs comme déjà dit sont des convertisseurs statiques qui assurent la transformation électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC); en fait cette conversion d'énergie est assurée par des dispositifs contrôlés (semi-conducteurs) fournissant une fréquence et une valeur efficace réglées aux bornes du récepteur. La figure II.1 représente le schéma de principe d'un onduleur à deux niveaux [19OS] :

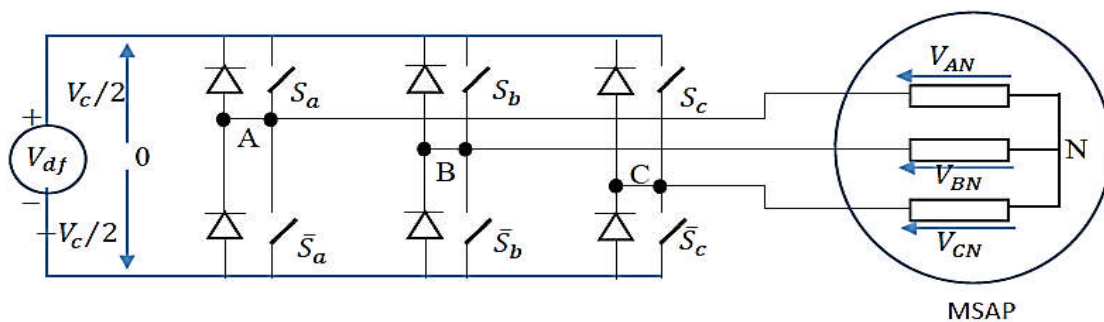


Figure II.1: Schéma d'un onduleur triphasé a deux niveaux alimentant une charge en étoile [20BC].

Les signaux de commande sont complémentaires alors:

$$\begin{cases} \bar{S}_a = 1 - S_a \\ \bar{S}_b = 1 - S_b \\ \bar{S}_c = 1 - S_c \end{cases} \quad (II.1)$$

Les tensions U_0 sont $\frac{U_0}{2}$ lorsque $\bar{S}_a = 1$ ($S_a = 0$) et elle devient $-\frac{U_0}{2}$ lorsque $\bar{S}_a = 0$.

Le contrôle de la vitesse des machines à champ magnétique tournant (machines synchrones et asynchrones) est généralement obtenu en modifiant la vitesse de rotation du champ tournant. Pour cela on agit sur la fréquence f de la tension, ce qui nécessite un onduleur séparé pour alimenter la machine comme pour la plupart des moteurs triphasés, un onduleur triphasé est utilisé pour réaliser le changement de vitesse.

En effet, la machine jouant le rôle de récepteur inductif fonctionne comme une source de courant, c'est donc l'onduleur qui effectue la conversion d'une source de tension continue en une source de courant alternatif. Ces machines sont alimentées par ces onduleurs de tension et cependant elles sont simples à contrôler.

Si le système est équilibré on a $V_1(t) + V_2(t) + V_3(t) = 0$ quel que soit t .

De plus, les tensions composées sont exprimées par :

$$\begin{cases} U_{12}(t) = V_1(t) - V_2(t) = (S_a - S_b)V_c \\ U_{23}(t) = V_2(t) - V_3(t) = (S_b - S_c)V_c \\ U_{31}(t) = V_3(t) - V_1(t) = (S_c - S_a)V_c \end{cases} \quad (II.2)$$

Le system de tension V_1 ; V_2 et V_3 est équilibré ; ce que permet d'établir les expressions des tensions simples :

$$\text{Calculons : } U_{12}(t) - U_{31}(t) = V_1(t) - V_2(t) - V_3(t) + V_1(t) = 2V_1(t) - (V_2(t) + V_3(t))$$

En remplaçant :

$$\begin{cases} V_1(t) = \frac{1}{3} \cdot [U_{12}(t) - U_{31}(t)] \\ V_2(t) = \frac{1}{3} [U_{23}(t) - U_{12}(t)] \\ V_3(t) = \frac{1}{3} [U_{31}(t) - U_{23}(t)] \end{cases} \quad (II.3)$$

En faisant intervenir les relations et on tire finalement :

$$\begin{cases} V_1 = (2S_a - S_a - S_b) \frac{V_c}{3} \\ V_2 = (2S_b - S_a - S_c) \frac{V_c}{3} \\ V_3 = (2S_c - S_a - S_b) \frac{V_c}{3} \end{cases} \quad (II.4)$$

Le modèle de l'onduleur triphasé à deux niveaux sous forme matricielle est :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

Selon les séquences binaires attribuées à $S_{k=a,b,c}$ qui sont au nombre de $2^3=8$ combinaisons possibles on peut générer l'hexagone de l'onduleur vectoriel matérialisant les six positions possibles avec les deux séquences nulle. Le tableau ci-dessous récapitule ses valeurs :

N	V_I	S_a	S_b	S_c	V_{sa}	V_{sb}	V_{sc}	V_s
1	V_0	0	0	0	0	0	0	0
2	V_1	0	0	1	$2V_c/3$	$-V_c/3$	$-V_c/3$	$\sqrt{2/3} V_c$
3	V_2	0	1	0	$V_c/3$	$V_c/3$	$-2V_c/3$	$\sqrt{2/3} V_c e^{j\pi/3}$
4	V_3	0	1	1	$-V_c/3$	$2V_c/3$	$-V_c/3$	$\sqrt{2/3} V_c e^{j2\pi/3}$
5	V_4	1	0	0	$-2V_c/3$	$V_c/3$	$V_c/3$	$\sqrt{2/3} V_c e^{j\pi}$
6	V_5	1	0	1	$-V_c/3$	$-V_c/3$	$2V_c/3$	$\sqrt{2/3} V_c e^{j4\pi/3}$
7	V_6	1	1	0	$V_c/3$	$-2V_c/3$	$V_c/3$	$\sqrt{2/3} V_c e^{j5\pi/3}$
8	V_7	1	1	1	0	0	0	0

Table II.1: Table de commutation des séquences de l'onduleur à deux niveaux.

L'ensemble des vecteurs de tensions délivrés par un onduleur à deux niveaux ainsi que les séquences de niveaux de phase correspondantes sont représentés dans la figure ci-dessous.

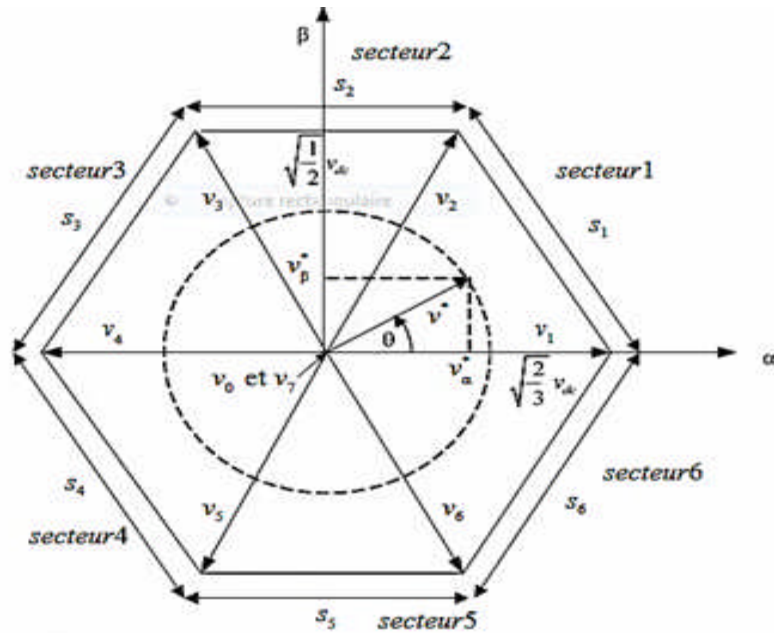


Figure II.2: Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux [19AS].

II.2.2 Différents types d'onduleurs

Les onduleurs sont principalement divisés en deux catégories [17ZM] :

II.2.2.1. Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire spécifique pour commuter des thyristors ou d'autres semi-conducteurs, auquel cas on contrôle la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie. Il existe deux types d'onduleurs autonomes :

- Onduleur de tension alimenté par une source de tension continue.
- Onduleur alimenté par courant continu.

A. Onduleur de courant

Un onduleur de courant convertit le courant continu dans les enroulements du moteur en courant triphasé. Il peut fonctionner en commutation naturelle, ce qui est le cas des moteurs synchrones. Effectuez un basculement forcé sur toutes les autres machines. De tels onduleurs permettent uniquement le réglage de la fréquence de la grandeur de sortie, dont l'amplitude doit être obtenue en ajustant la grandeur d'entrée.

B. Onduleur de tension

Les onduleurs de tension sont une fonction importante dans l'électronique de puissance. Les deux domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les variateurs de vitesse. Le fort développement des onduleurs de tension repose d'une part sur le développement de semi-conducteurs puissants, robustes et rapidement contrôlables utilisation quasi universelle des techniques de modulation large.

II.2.2.2. Onduleur non autonome

C'est le nom de l'ensemble redresseur avec tous les thyristors (pont de Gretz), commutant naturellement à l'aide du réseau auquel il est connecté, permettant un fonctionnement en onduleur (par exemple en récupérant de l'énergie lors du freinage de la motorisation). Basé sur le développement des variateurs statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, des cyclo convertisseurs, des onduleurs de courant pour moteurs synchrones et asynchrones (jusqu'à plusieurs Mégawatts), ce type de composant est progressivement remplacé par des convertisseurs de remplacement IGBT ou GTO.

II.2.3. Différents type de commande des onduleurs

Assure la détermination en temps réel des instants de fermeture et d'ouverture de l'interrupteur. Il existe trois techniques de modulation :

- Modulation MLI ;
- Modulation hystérésis ;
- Modulation vectorielle.

II.3. Les onduleurs multiniveaux

Lorsqu'un convertisseur statique produit une tension de sortie constituée d'au moins trois niveaux, il est dit « multiniveaux ». Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part, ces structures limitent la contrainte de tension subie par les interrupteurs de puissance : chaque composant à l'état bloqué supporte une fraction de la pleine tension du bus continu supérieure au nombre de niveaux. D'autre part, les convertisseurs multiniveaux fournissent des tensions de sortie avec des qualités spectrales intéressantes. Multiplier la quantité par les niveaux intermédiaires réduit la capacité pour chaque quantité dans la tension de sortie. Alors l'amplitude de la raie harmonique est donc plus faible. Les avantages de ces structures multiniveaux résident dans leurs capacités à améliorer les formes d'onde et les spectres harmoniques des grandeurs de sortie.

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Les trois topologies de base de ces onduleurs multiniveaux sont [21AA]:

- La topologie à diode de bouclage (NPC) ;
- La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées) ;
- La topologie en cascade.

II.3.1. Application des convertisseurs multiniveaux

En tant que l'une des options de conversion préférées pour les applications haute puissance, les convertisseurs multiniveaux ont reçu une attention considérable de la part de l'industrie et du milieu de recherches scientifiques. Ils ont réussi à se frayer un chemin dans les environnements industriels et peuvent donc être considérés comme une technologie mature et éprouvée [20TS].

A. Application dans le domaine des énergies solaires

Afin d'augmenter le rendement des systèmes photovoltaïques (PV), c'est-à-dire de maximiser la puissance délivrée aux charges connectées aux bornes du générateur photovoltaïque, divers moyens et techniques d'optimisation ont été appliqués pour obtenir de bonnes performances, forte adaptabilité et rendement élevé. Parmi eux, la qualité de la tension de sortie de l'onduleur est améliorée en utilisant un onduleur multiniveau. L'architecture basée sur des onduleurs multiniveaux apporte des avantages indéniables à la conversion DC/AC, notamment dans les

applications de forte puissance. Cependant, la plupart des systèmes photovoltaïques ont des charges à basse tension.

B. Application dans les énergies éoliennes

Compte tenu de la place occupée par la production d'énergies renouvelables, notamment les éoliennes. La combinaison de convertisseurs multiniveaux permet d'améliorer la forme d'onde en utilisant différents niveaux de tension injectés au point de connexion commun des éoliennes à vitesse variable pour éviter la déconnexion des éoliennes du réseau. Ces convertisseurs permettent de traiter les harmoniques et sont associés à des filtres (filtrage actif ou passif).

II.3.2. Les avantages et les inconvénients de l'onduleur multiniveaux

Tout composant ou dispositif a ses avantages et ses inconvénients tirés de son fonctionnement. Les recherches scientifiques essaient de multiplier les avantages et diminuer les inconvénients et de cette façon le fonctionnement s'améliore et la robustesse des systèmes se renforce. Dans ce qui suit on cite quelques avantages et inconvénients des onduleurs multiniveaux.

A. Les avantages [21AA], [20RF]

Dans un onduleur multiniveaux, la répartition de la tension est obtenue de manière naturelle, ce qui permet à chaque semi-conducteur de commuter indépendamment des autres en régime permanent. Cela rend le convertisseur plus robuste et efficace lors de la commutation. L'amplitude de la tension de commutation est réduite, de sorte que la commutation est plus gérable. Accédez à des applications plus puissantes. Un meilleur compromis entre performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (temps, pertes et fréquence de commutation).

B. Les inconvénients

Les convertisseurs multiniveaux impliquent généralement un nombre plus élevé d'interrupteurs et de composants (pour les topologies *Neutral Point Clamped* et *Flying Capacitor*, le nombre de composants est fonction du carré du nombre de niveaux). Leur coût et leur complexité sont inévitablement plus élevés, ce qui peut être gênant pour une production de masse (ex : convertisseurs de véhicules électriques). Un grand nombre de commutateurs peut causer des problèmes de contrôle, bien que le contrôle soit présent, il est généralement plus complexe que les convertisseurs traditionnels.

II.4. Topologie d'un onduleur multicellulaire à quatre niveaux

Chaque bras de l'onduleur multicellulaire à quatre niveaux (OM4N) se compose de trois batteries et de six commutateurs comme le montre la figure suivante qui compare entre un bras d'un OM4N et celui d'un onduleur de base ($E=V_c$)

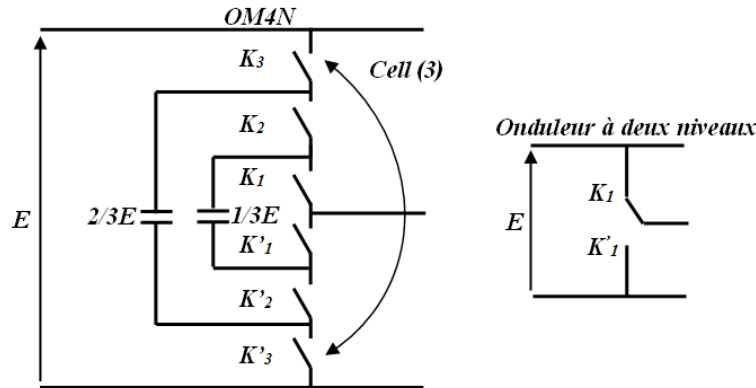


Figure II.3: Présentation d'un bras pour l'onduleur deux niveaux et celui du OM4N.

Les tensions de sortie de l'OM4N sont exprimées en fonction des états des interrupteurs et la tension continue par la formule suivante :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{V_c}{9} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

En combinant les six états de commutation sur le même bras, les tensions à quatre niveaux de phase différents sont donc plus grandes que les vecteurs de tension en sortie du OM4N que les vecteurs fournis par les deux autres onduleurs, soit $4^3 = 64$ vecteurs. Cela inclut des vecteurs redondants (similaires) et 37 vecteurs indépendants formant trois hexagones concentriques. Le diagramme de l'espace de tension dans le plan (α, β) est représenté sur la figure ci-dessous. Le vecteur-tension au centre de l'hexagone est nul (000, 111, 222, 333) [14MB].

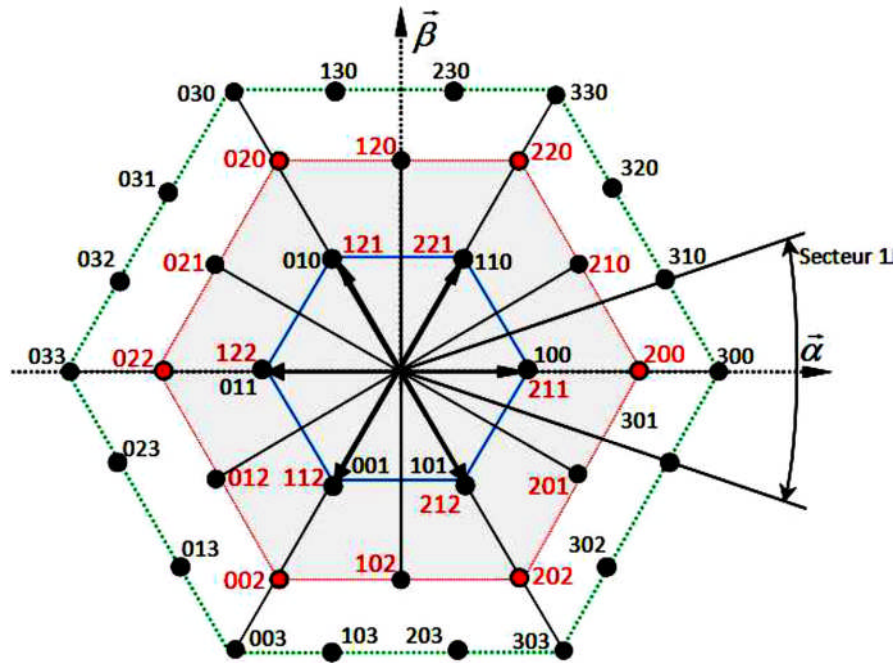


Figure II.4: Les états des interrupteurs d'un (OM4N).

II.5. Conclusion

En conclusion, l'onduleur multiniveaux est un appareil avancé présentant de nombreux avantages en termes de qualité de l'alimentation et d'efficacité énergétique lors de son fonctionnement en convertissant l'énergie DC en AC, bien qu'il ait certaines limites, son utilisation dans les applications industrielles et grand public est en augmentation, et son développement continu devrait conduire à des nouvelles améliorations en termes de performances et de fiabilité.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'onduleur standard à deux niveaux et delà nous avons présenté aussi l'un des onduleurs multiniveaux qui est le multicellulaires à quatre niveaux. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la technique de commande DTC afin de l'appliquer pour entraîner un MSAP.

Chapitre III

La commande DTC appliquée au MSAP

III.1 Introduction

La DTC est une technologie basée sur la direction du flux statorique, sans utiliser de capteurs mécaniques, en mesurant le courant et la tension statorique pour calculer les grandeurs de contrôle telles que le flux statorique et le couple électromagnétique. De plus, ce contrôle ne nécessite pas l'application d'un contrôle de modulation de largeur d'impulsion (MLI) à l'onduleur, ni le découplage du flux et du couple par la direction du champ. Dans ce chapitre, nous présentons ses bases et ses principes.

III.2. Principe de la commande DTC

Son principe est de sélectionner directement le vecteur-tension adéquat à l'état de fonctionnement du moteur qui est déterminé par calcul de l'écart de couple et de flux par rapport à leurs références. Ces écarts seront normalisés en utilisant des comparateurs à hystérésis. Selon cette normalisation qui donne 0 et 1 pour le flux et -1,0 et 1 pour le couple et en connaissant le numéro de secteur où le vecteur de flux se trouve, le vecteur-tension est alors déterminé en fonction des états des interrupteurs de l'onduleur. Un vecteur-tension est alors sélectionné d'après la table de vérité qu'on a expliquée précédemment; aucune modulation de largeur d'impulsion n'est requise ; l'un des six vecteurs de tension est appliqué tout au long de la période d'échantillonnage. Un schéma fonctionnel de cette technique est illustré par la figure III.1 qui montre les estimateurs de flux et de couple, et les régulateurs de couple et les deux comparateurs d'hystérésis utilisés.

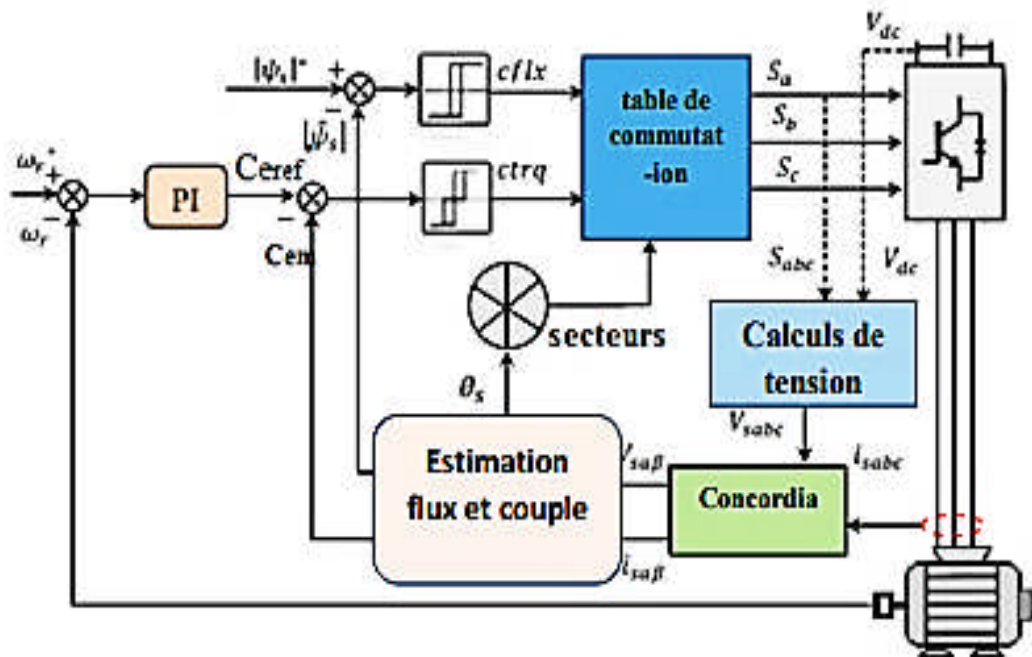


Figure III.1: Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple du MSAP [18BA].

III.3. Avantages et inconvénients de la commande DTC

Bien que la commande DTC soit une commande vectorielle simple est très répandue dans les applications industrielles, elle a ses avantages et ses inconvénients pendant son fonctionnement. Dans ce qui suit nous citons quelques avantages et inconvénients rencontrés dans cette commande [20BC].

III.3.1. Avantage

- Pas de calculs nécessaires dans le rotor ni dans le repère rotorique (d, q) ;
- Pas de calcul nécessaire de MLI ;
- Pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle ;
- Réponse dynamique très rapide.

III.3.2. Inconvénient

- Problèmes à basse vitesse ;
- Nécessité de disposer des estimations de flux statorique et du couple ;
- Oscillations du couple et du flux ;
- Fréquence de commutation variable (utilisation des régulateurs à hystérésis).

III.4. Algorithme de la commande DTC

Monsieur *Takahashi* a d'abord proposé la stratégie de commande DTC basée sur les algorithmes suivants [04BM], [16HB] :

- Estimer le flux et le couple à partir des mesures précédentes;
- Echantillonner le domaine temporel avec une période T_s réduite ;
- A chaque période d'échantillonnage T_s , le courant de ligne et la tension de phase sont mesurés. Eventuellement, ces tensions peuvent être reconstituées à partir du bus continu (U_c) et les séquences de commutation ;
- L'erreur enregistrée entre le flux réel (estimé) et le flux de référence est introduite dans un régulateur à hystérésis à deux niveaux; l'erreur enregistrée entre le couple réel (estimé) et le couple de référence est introduite dans un régulateur à trois niveaux (éventuellement à 2 niveaux) ;
- Sélection de la séquence de l'onduleur de V_0 à V_7 selon la localisation du vecteur de flux dans le plan (α, β) et les états logiques des variables binaires. La localisation du flux est repérée dans les six secteurs angulaires à 60° du plan (α, β) . A chaque

secteur angulaire correspond une séquence V_{si} , donnée conformément par l'étoile à six cotés selon que l'on a une augmentation du flux (ou sa diminution) et une augmentation du couple (ou sa diminution).

III.5. Principe du contrôle du couple et flux statorique

La DTC est basée sur l'estimation de flux statorique et du couple électromagnétique afin de les comparer à leur références et prendre la décision d'appliquer le vecteur-tension adéquat pour augmenter ou diminuer les grandeurs à commandées.

III.5.1. Contrôle du flux statorique

Dans un référentiel lié au stator (α, β) on peut écrire :

$$\bar{V}_S = R_s \bar{I}_S + \frac{d}{dt} \bar{\varphi}_S \quad (III.1)$$

Le flux statorique est donc :

$$\bar{\varphi}_S = \int_0^t (\bar{V}_S - R_s \bar{I}_S) dt + \bar{\varphi}_{S0} \quad (III.2)$$

Où : φ_{s0} est le vecteur flux à l'instant $t = 0$.

Dans le cas où on applique un vecteur de tension non nul dans un intervalle de temps $[0, T_s]$, le terme $R_s I_S$ peut être négligeable donc :

$$\varphi_S(t) = V_S T_S + \varphi_{S0} \quad (III.3)$$

$$\Delta \bar{\varphi}_S = \varphi_S - \varphi_{S0} = \bar{V}_S T_S \quad (III.4)$$

L'équation (III.4) implique que l'extrémité du vecteur flux $\varphi_S(t)$ se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur de la tension appliquée V_S comme il est illustré sur la figure (III.2)

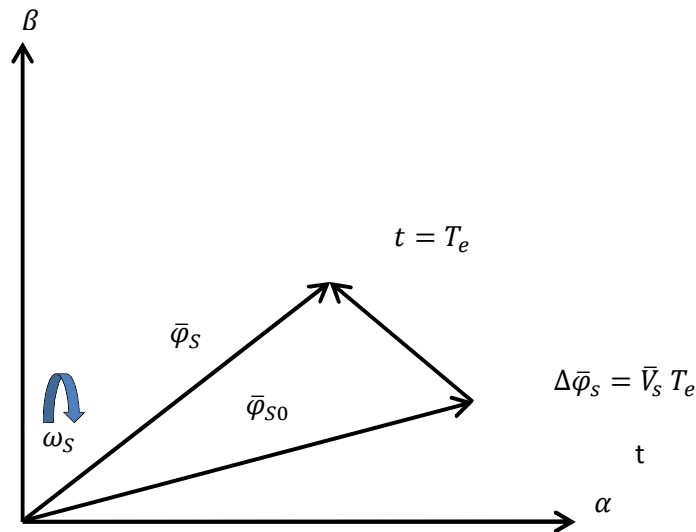


Figure III.2: Evolution de l'extrémité de φ_s pour $R_s I_S$ négligeable [18KI].

III.5.2. Contrôle du couple électromagnétique

Le couple est exprimé par :

$$C_e = K(\bar{\varphi}_s \times \bar{\varphi}_r) = k \|\bar{\varphi}_s\| \|\bar{\varphi}_r\| \sin(\delta) \quad (III.5)$$

Avec :

- φ_s est le vecteur de flux statorique ;
- $\bar{\varphi}_r$ est le vecteur de flux rotorique ramené au stator ;
- δ est l'angle entre les vecteurs des flux statorique et rotorique.

III.6. Choix des vecteurs de tension

En choisissant le vecteur approprié, il est possible de contrôler la fin du flux et de le déplacer de sorte que l'amplitude du vecteur de flux magnétique reste dans une certaine plage. L'extrémité du vecteur flux doit tracer une trajectoire ronde, pour cela, le vecteur de tension appliqué doit toujours rester perpendiculaire au vecteur flux. Lorsque le vecteur de flux est dans la zone numérotée i , les deux vecteurs \bar{V}_i et \bar{V}_{i+3} ont le composant de flux le plus important. De plus, leur effet sur le couple dépend de vecteurs de flux dans la zone [18KI].

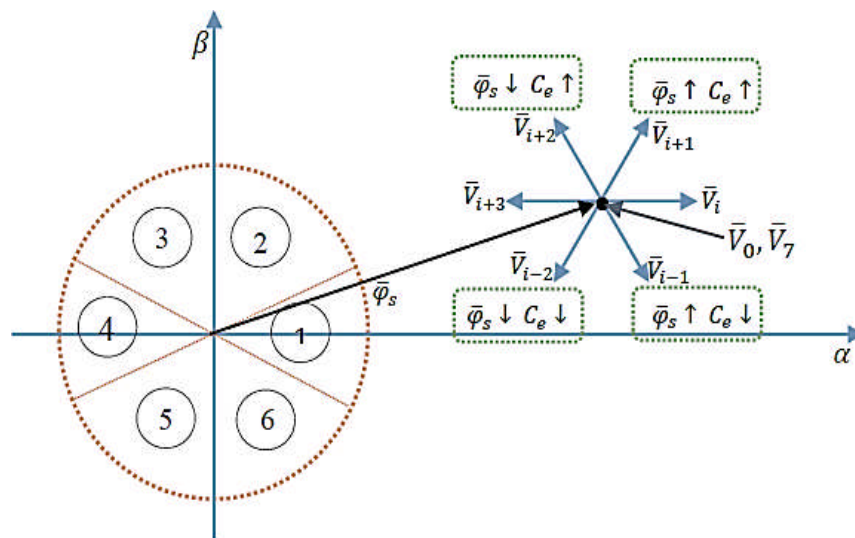


Figure III.3: Choix du vecteur de tension.

Le choix du vecteur \bar{V}_s dépend de :

- la position de $\bar{\varphi}_s$ dans le référentiel fixe (α, β) ;
- la variation souhaitée pour le module de $\bar{\varphi}_s$;
- la variation souhaitée pour le couple ;
- sens de rotation de $\bar{\varphi}_s$.

Lorsque le flux se trouve dans une zone i , le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs de tensions suivants :

- Si \bar{V}_{i+1} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_S$ croit et C_e croit
- Si \bar{V}_{i+2} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_S$ décroît et C_e croit;
- Si \bar{V}_{i-1} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_S$ croit et C_e décroît;
- Si \bar{V}_{i-2} est sélectionné alors $\bar{\varphi}_S$ décroît et C_e décroît;
- si \bar{V}_0 et \bar{V}_7 sont sélectionnés on aura une décroissance du couple alors que le module du flux $\bar{\varphi}_S$ reste inchangée.

III.7. Estimation du Flux et du Couple

Le principe du DTC a été décrit dans son ensemble. Cependant, en saisissant la description ; Les paramètres du système de contrôle sont le couple et l'amplitude du flux du stator. Le système de contrôle dépend de la précision de l'estimation de ces valeurs [18KI].

III.7.1. Estimation du flux statorique

L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques (courants et tensions) [16HB].

$$\bar{\varphi}_S = \int_0^t (\bar{V}_S - \bar{R}_S \bar{I}_S) dt \quad (III.6)$$

On obtient les composantes α et β du vecteur $\bar{\varphi}_S$

$$\begin{cases} \varphi_{S\alpha} = \int_0^t (V_{S\alpha} - R_S I_{S\alpha}) dt \\ \varphi_{S\beta} = \int_0^t (V_{S\beta} - R_S I_{S\beta}) dt \end{cases} \quad (III.7)$$

On obtient les tensions $V_{S\alpha}$ et $V_{S\beta}$ à partir des commandes (S_a, S_b, S_c) et de la mesure de la tension E en appliquant la transformée de Concordia

$$\bar{V}_S = V_{S\alpha} + jV_{S\beta} \quad (III.8)$$

$$\begin{cases} V_{S\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} E \left[S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right] \\ V_{S\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} E (S_b - S_c) \end{cases} \quad (III.9)$$

De même les courants I_α et I_β sont obtenus à partir de la mesure des courants réels I_{Sa}, I_{Sb} et I_{Sc} ; ($I_{Sa} + I_{Sb} + I_{Sc} = 0$) et par application de la transformation de Concordia:

$$\bar{I}_S = I_\alpha + j I_\beta \quad (III.10)$$

$$\begin{cases} I_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{Sa} \\ I_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{Sb} - I_{Sc}) \end{cases} \quad (III.11)$$

Le module du flux statorique s'écrit:

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad (III.12)$$

L'angle α_s entre le référentiel (α, β) est le vecteur $\overline{\varphi_s}$ est égal à :

$$\alpha_s = \arctan \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \quad (III.13)$$

III.7.2. Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir de l'équation (I.10) comme on peut utiliser l'estimation des composantes de flux et la mesure des composantes du courant comme suit :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\varphi_{s\alpha} I_{s\beta} - \varphi_{s\beta} I_{s\alpha}) \quad (III.14)$$

III.8. Élaboration de la table de commutation

Nous construisons la table de vérité à partir des erreurs de flux et de couple $\Delta\varphi_s$ et ΔC_e , et Dépend de la position du vecteur flux stator ($N=1, \dots, 6$). Diviser le plan complexe en six, les La séquence de commande de commutation correspondant aux différents états de l'onduleur Les grandeurs de contrôle $\Delta\varphi_s$ et ΔC_e suivent la logique du comportement du flux et du couple Vis pour application vecteur tension stator ; la table III.1 résume l'action combinée de chaque configuration sur le flux statorique et le couple électromagnétique [14BM], [16HB].

	AUGMENTATION	DIMINUTION
φ_s	$V_{i-1}, V_i \text{ et } V_{i+1}$	$V_{i+2}, V_{i+3} \text{ et } V_{i-2}$
C_e	$V_{i+1} \text{ et } V_{i+2}$	$V_{i-1} \text{ et } V_{i-2}$

Table III.1 : Table de commutation.

III.9. DTC associée à un onduleur multicellulaire à quatre niveaux

Dans la DTC conventionnelle (à deux niveaux de tension) les erreurs du couple et du flux sont directement utilisées pour choisir l'état de commutation sans distinguer entre une erreur très grande ou relativement petite. par ailleurs d'états de commutation choisie pour une grande erreur qui se produit au démarrage ou lors de variation des consignes du couple et du flux et la même que dans le fonctionnement normal. Cela implique évidemment, une réponse médiocre, les performances du système peuvent être améliorées, si on sélectionne un vecteur-tension selon la valeur de l'erreur du couple et du flux ainsi que la position du flux dans l'espace de son évolution [14BM].

L'alimentation par un onduleur multicellulaire à quatre niveaux (OM4N) permet de délivrer

64 vecteurs-tensions, ce qui améliore les performances du système et nous permet de répondre aux besoins du fonctionnement plus précisément.

III.9.1. DTC appliquée à un MSAP alimentée par OM4N

Afin de réaliser une DTC appliquée au MSAP alimentée par un OM4N, nous devons élaborer la table de commutation mettant en œuvre au mieux les possibilités de l'onduleur.

Nous inspirant des parties précédemment développées dans ce chapitre, nous considérerons certains mécanismes comme acquis [14BM]. Certains points, redondant avec l'étude du contrôle appliqué au MSAP alimenté par un onduleur à deux niveaux de tension, ne seront pas repris si les conclusions sont identiques. Ainsi seuls l'apport de l'utilisation d'un OM4N de tension sera traité. Nous exposerons par la suite la table de commutation la plus adéquate.

III.9.2. Correcteur du couple a sept niveaux

Un comparateur à hystérésis à sept niveaux (3, 2, 1, 0, -1, -2, -3), permet de contrôler le MSAP dans les deux sens de rotation, en générant soit un couple positif, ou un couple négatif. Ce comparateur est représenté par la figure suivante [14BM] :

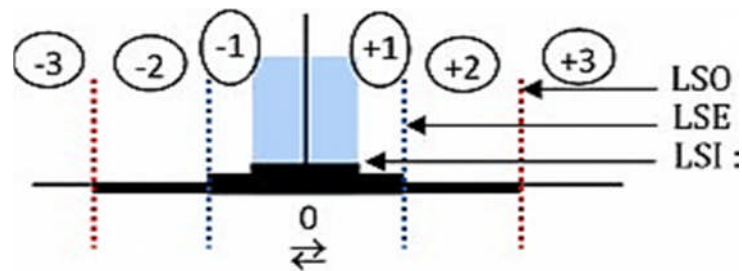


Figure III.4: Correcteur du couple à hystérésis à sept niveaux [14BM].

Tels que :

LSO : Limite Supérieure Ordinaire de la bande d'hystérésis ;

LSE : Limite Supérieure Exceptionnelle ;

LSI : Limite Supérieure Intérieure.

III.9.3. Construction de la commutation

Le tableau ci-dessus montre la séquence correspondante à chaque position du vecteur flux. L'espace vectoriel de tension fourni par OM4N n'est pas symétrique à ces secteurs, ce qui complique la recherche d'un vecteur de tension approprié.

Par exemple dans le deuxième secteur, le vecteur choisi pour le changement de flux nul n'est pas la seule solution, d'autres vecteurs peuvent être choisis [20BK]. La table ci-dessous permet à la DTC de commander le moteur quel que soit le régime de sa vitesse, différemment à ce que proposent la majorité des études sur cet onduleur [14BM].

$\Delta\varphi_s$	ΔT_e	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
1↑	3	330	130	031	033	013	103	303	301	310
	-3	303	301	310	330	130	031	033	013	103
	2	320	230	030	032	023	003	203	302	300
	-2	302	300	320	230	030	032	023	003	203
	1	310	330	130	031	033	013	103	303	301
	-1	301	310	330	130	031	033	013	103	303
	0	200	320	230	020	032	023	002	203	302
0	3	120	020	032	012	103	203	302	301	330
	-3	102	202	301	210	230	130	031	023	003
	2	120	020	032	012	103	203	302	301	330
	-2	102	202	301	210	230	130	031	023	003
	1	120	020	032	012	103	203	302	301	330
	-1	102	202	301	210	230	130	031	023	003
	0	000	000	000	000	000	000	000	000	000
-1↓	3	030	032	023	003	203	302	300	320	230
	-3	003	203	302	300	320	230	030	032	023
	2	031	033	013	103	303	301	310	330	130
	-2	013	103	303	301	310	330	130	031	033
	1	021	012	002	203	302	200	320	230	020
	-1	002	203	302	200	320	230	020	021	012
	0	122	013	103	212	301	310	221	130	031

Table III.2: Table de commutation proposée pour un OM4N [14BM].

III.10. Conclusion

La stratégie de commande DTC proposée par *Takahashi* est une méthode d'entraînement simple à implanter et ne nécessite pas un capteur de vitesse ni une MLI appliquée à l'onduleur. Le flux du stator et le couple électromagnétique sont commandés via un système fortement lié au stator, ce système n'est influé que par une seule grandeur paramétrique qui est la résistance statorique. Dans ce chapitre, nous avons illustré le principe de la DTC et son implémentation a été bien expliquée. Nous avons aussi modélisé l'onduleur OM4N et présenté sa table de commutation qui sera utilisée à la place de la table conventionnelle. Dans le chapitre suivant, nous allons montrer les résultats d'une simulation sous Simulink/Matlab d'une DTC conventionnelle comparée à celle qui utilise un OM4N appliquée au MSAP triphasé.

Chapitre IV

Résultats de simulation

IV.1 Introduction

Simulink est un logiciel de simulation et de modélisation des systèmes dynamiques développé par la société américaine the *MathWorks*. C'est un environnement graphique composé de blocs de construction peut créer une plate-forme de simulation multi-domaines pour la vérification et l'optimisation du système. Le logiciel est largement utilisé dans l'industrie, notamment dans l'automobile, l'aérospatiale et la communication numérique.

Simulink s'intègre à Matlab, offrant un accès immédiat aux nombreux outils de développement d'algorithmes, de visualisation et d'analyse de données de Matlab, Nous utiliserons Simulink pour simuler et évaluer les performances de la commande DTC appliquée au MSAP dont les modèles sont déjà montrés dans les chapitres précédents.

IV.1.1. Paramètres et grandeurs utilisés dans cette étude (SI)

Il est utile de déclarer les conditions et les diverses grandeurs utilisées dans cette étude. Le tableau ci-dessous récapitule ces données :

Facteur /Grandeur	Condition / Valeur
Méthode numérique	Runge-Kutta
Tension de bus continu E	700
Pas d'échantillonnage h	10^{-5}
Bande d'hystérésis de couple	6×10^{-3}
Bande d'hystérésis de flux	0 pour DTC-S et 10^{-3} pour OM4N
Paramètres du MSAP	
Nombre de paires de pôles	4
Résistance R_s	1.09
Inductances statoriques	0.0124
Flux magnétique permanent	0.1821
Inertie	4.15×10^{-4}

Table IV.1 : Grandeurs et Paramètres.

IV.2. Structure de simulation

Le schéma de l'ensemble des parties constituant le système étudié est donné par la figure suivante :

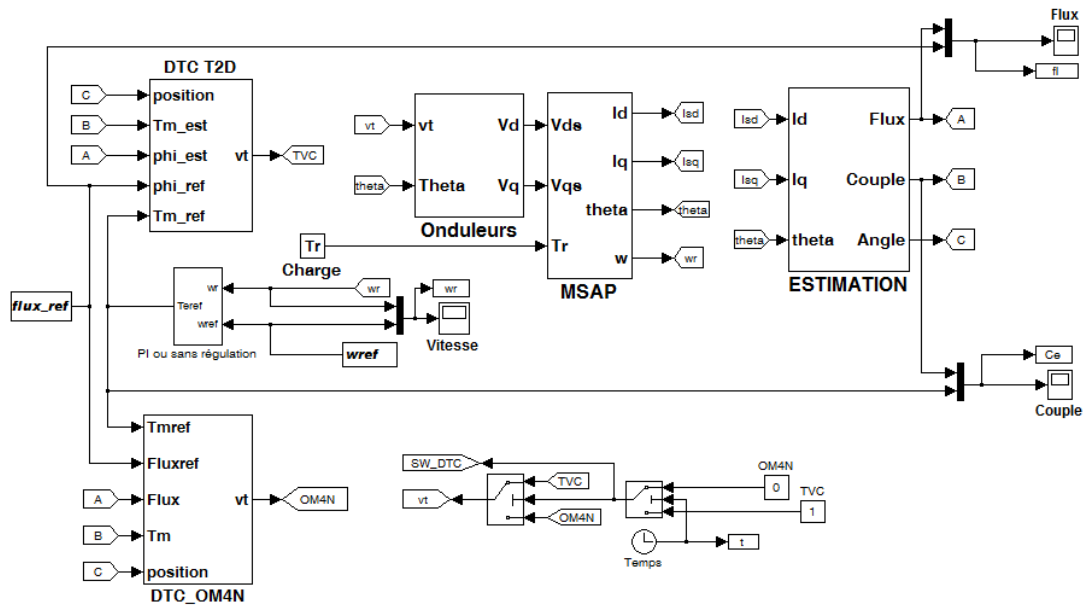


Figure IV.1: Schéma global de la commande DTC avec les deux blocs de DTC simple et avec OM4N.

La simulation nous permet de basculer entre les deux onduleurs grâce à un commutateur réglé par l'horloge de la simulation. Ce commutateur fixe l'instant exact où nous désirons utiliser l'un ou l'autre onduleur. Dans notre étude on a fixé le temps de simulation à 0.2 s, nous commençons par une DTC simple ensuite nous basculons à l'onduleur multicellulaire à quatre niveaux. Nous pouvons ainsi visualiser facilement tout changement du comportement de la commande et voir ainsi l'influence de l'utilisation des onduleurs utilisés.

IV.2.1. Détail des blocs

Dans ce qui suit on va détailler les blocs du modèle développé pour cette étude.

A, Bloc du MSAP :

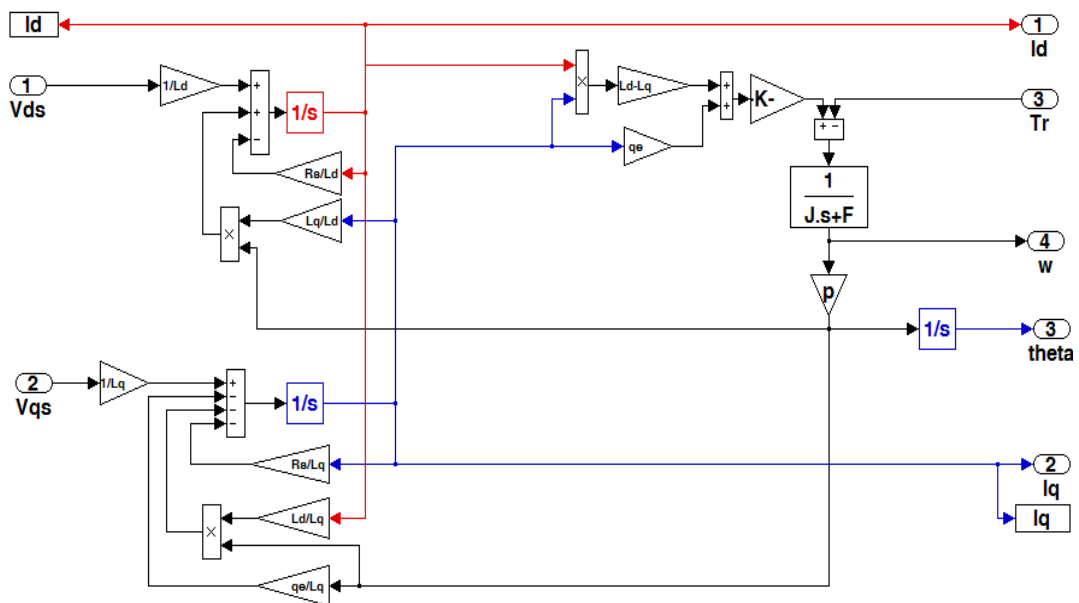


Figure IV.2: Bloc du modèle du MSAP.

B, Bloc de la TVC :

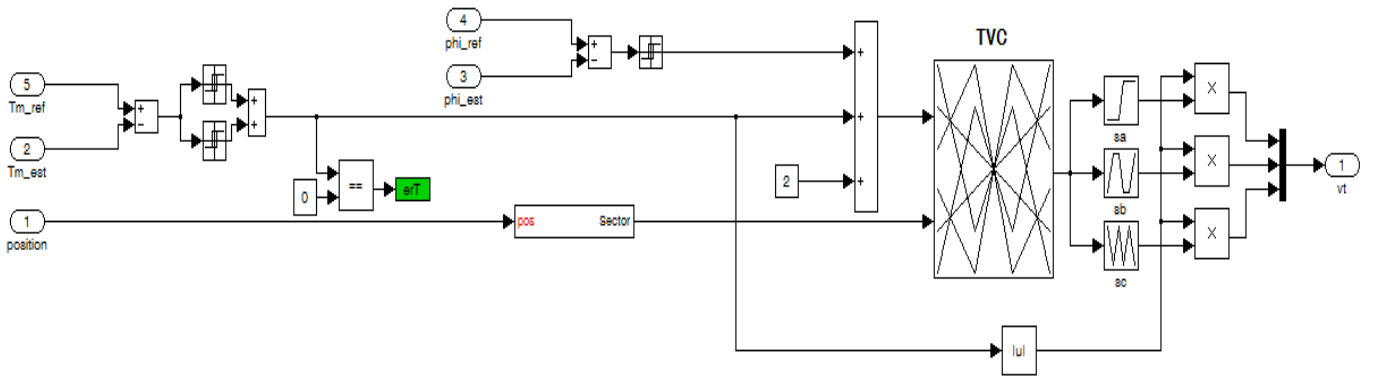


Figure IV.3: Bloc de la TVC.

La table de vérité contient six colonnes représentant les numéros des secteurs et quatre lignes correspondant aux états des écarts de flux et de couple sans l'état zéro du couple. Pour fixer les bandes d'hystérésis convenables, nous testons le passage de l'écart de couple par le zéro afin d'utiliser la séquence nulle et maintenir le couple dans sa bande de fluctuation. Nous fixons un temps de simulation de 0.2 s. La figure obtenue en traçant **erT** est la suivante :

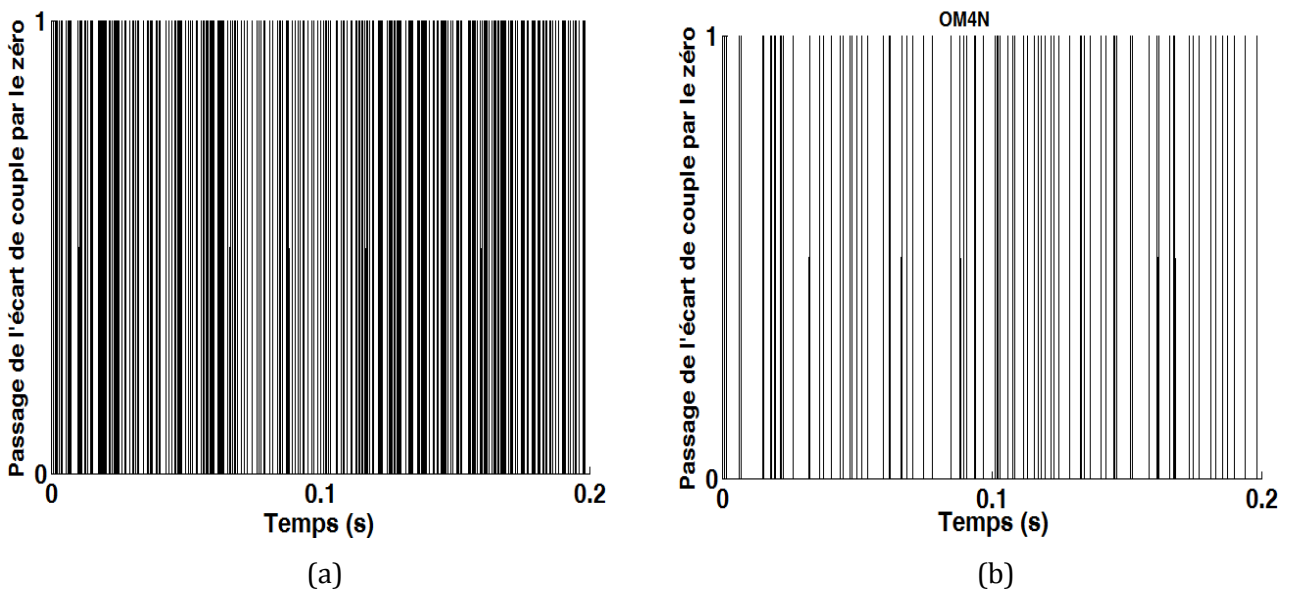


Figure IV.4: Passage de l'écart de couple par le zéro : (a) DTC simple, (b) DTC avec OM4N.

Ce résultat montre que le couple passe par le zéro autant de fois dans une DTC simple que dans une DTC associée à l'OM4N. Le passage par le zéro indique l'utilisation des vecteurs-tensions nuls afin de maintenir le couple dans sa bande de fluctuation.

C, Bloc de l'OM4N :

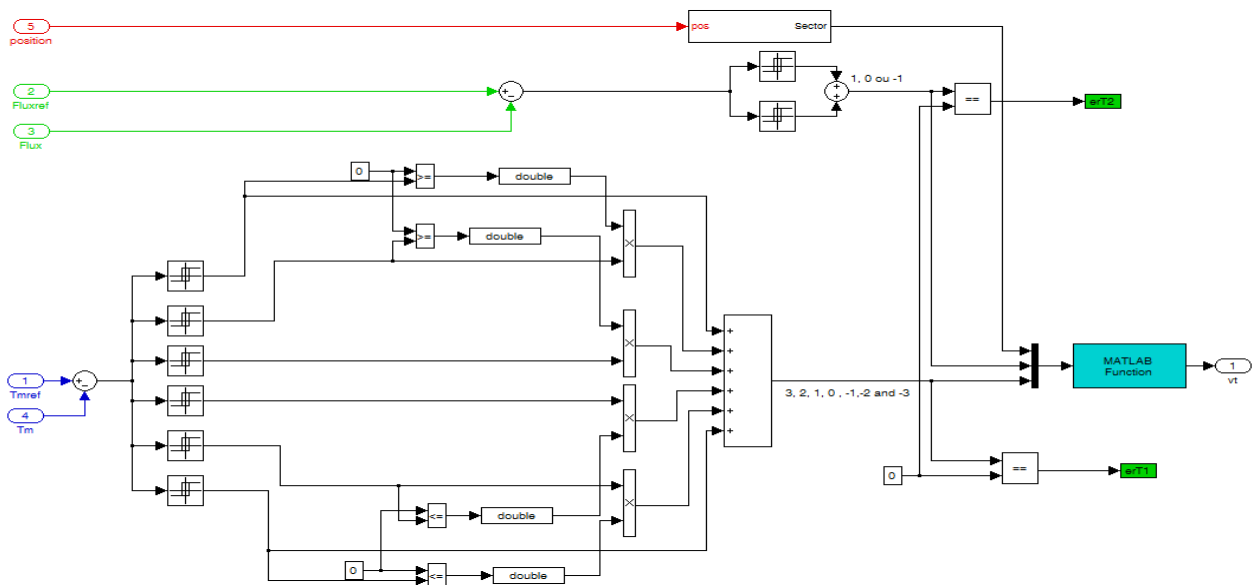


Figure IV.5: Bloc de l'OM4N.

Il est clair dans ce bloc que l'écart de flux est normalisé par un comparateur d'hystérésis à trois niveaux au lieu de deux niveaux pour la DTC simple et que celui du couple est à sept niveaux face à trois niveaux en cas d'une DTC simple. La table de commutation tellement large qu'on a préféré d'utiliser un fichier script appelé par Simulink au lieu d'utiliser look table ce qui simplifie l'implantation.

Les deux blocs pour numérotter les zones sont donnés comme suit :

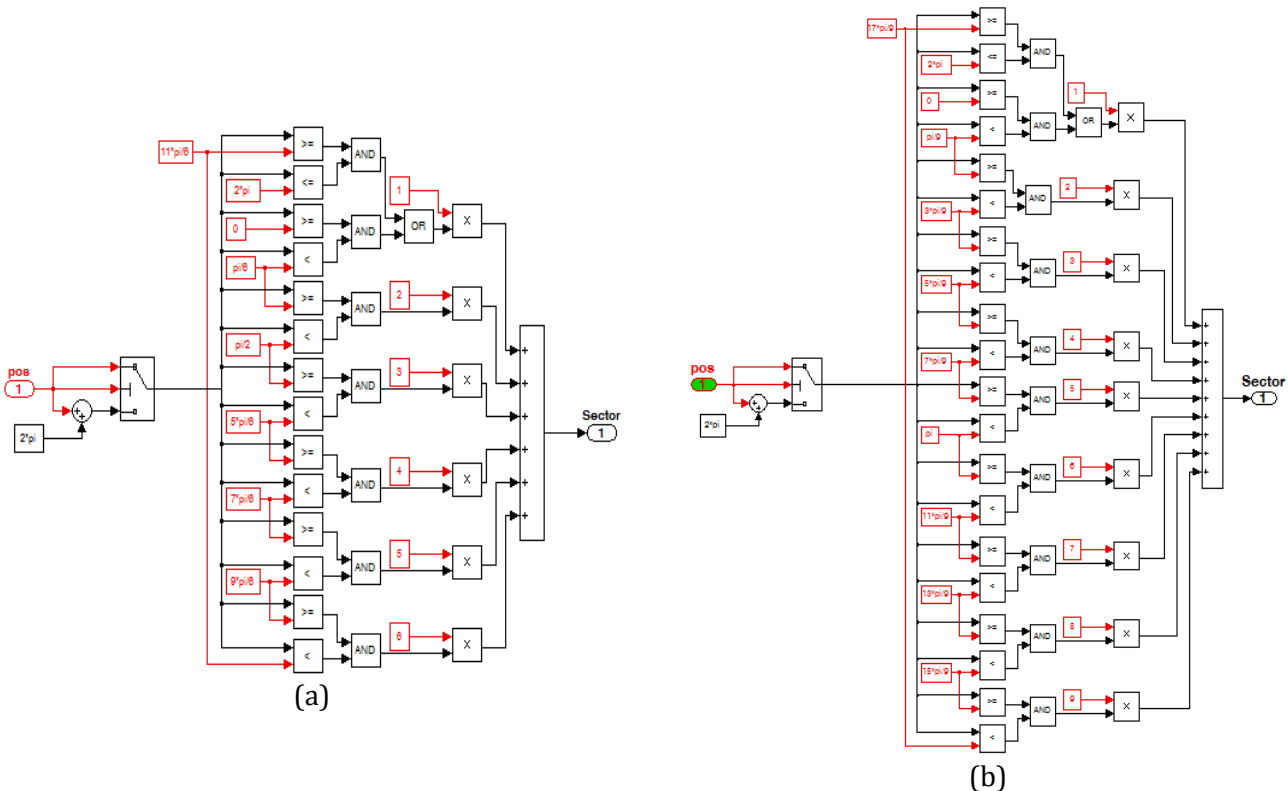


Figure IV.6: Les blocs pour numérotter les secteurs : (a) DTC simple, (b) pour OM4N.

Ces deux blocs montrent que dans une DTC simple on a six secteurs alors que pour l'OM4N l'espace vectoriel est divisé en neuf secteurs.

D, Bloc des onduleurs :

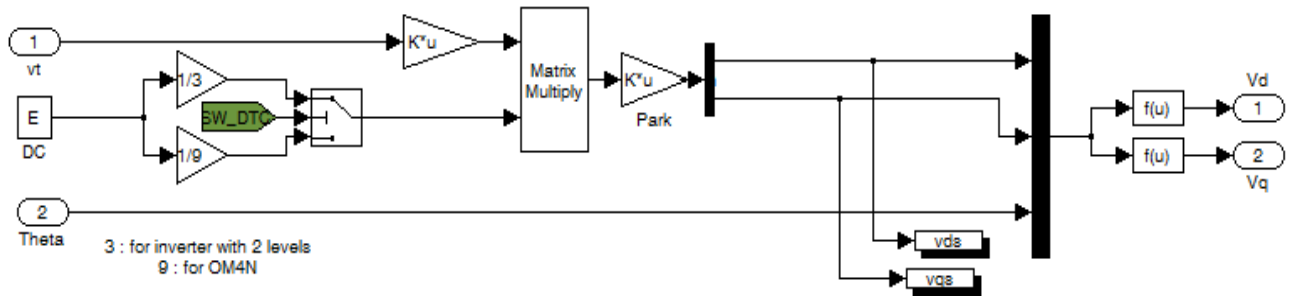


Figure IV.7: Tensions délivrées par les deux onduleurs dans le plan $\alpha\beta$.

La modélisation des deux onduleurs ne diffère que dans le coefficient multiplié par la tension du bus continu E et qui $1/3$ pour l'onduleur à deux niveaux et $1/9$ pour l'OM4N, ainsi que les états des interrupteurs qui prennent 1 et 0 pour l'onduleur à deux niveaux et 3, 2, 1 et 0 pour l'OM4N.

E, Bloc d'estimation du flux avec sa position et du couple :

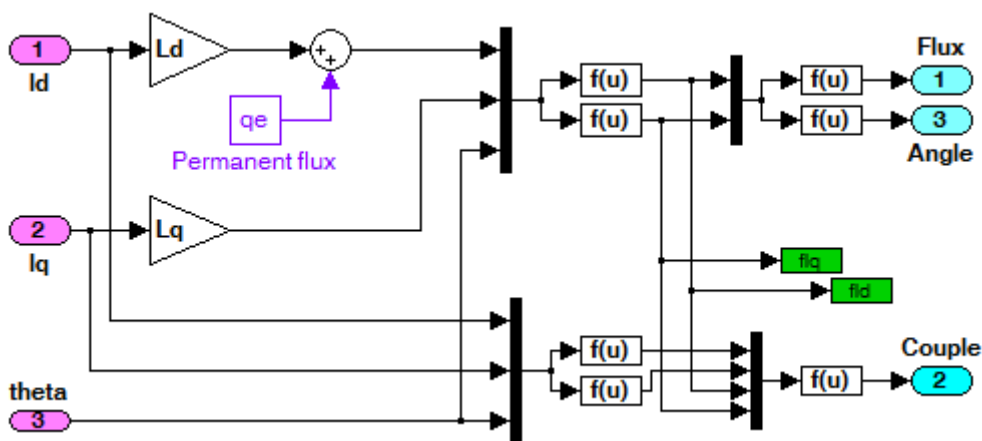


Figure IV.8: Bloc d'estimation de flux, de sa position et du couple.

IV.3. Résultats de simulation

Maintenant, nous allons présenter les allures des grandeurs commandées dans les deux cas de la DTC. Ce qui nous intéresse est les secteurs occupés par le flux, les vecteurs-tensions des deux onduleurs, le couple, le flux ainsi que le courant absorbé dans une phase statorique.

A, Les secteurs occupés :

On simule une DTC simple de puis une DTC à OM4N. Les secteurs occupés seront comme suit :

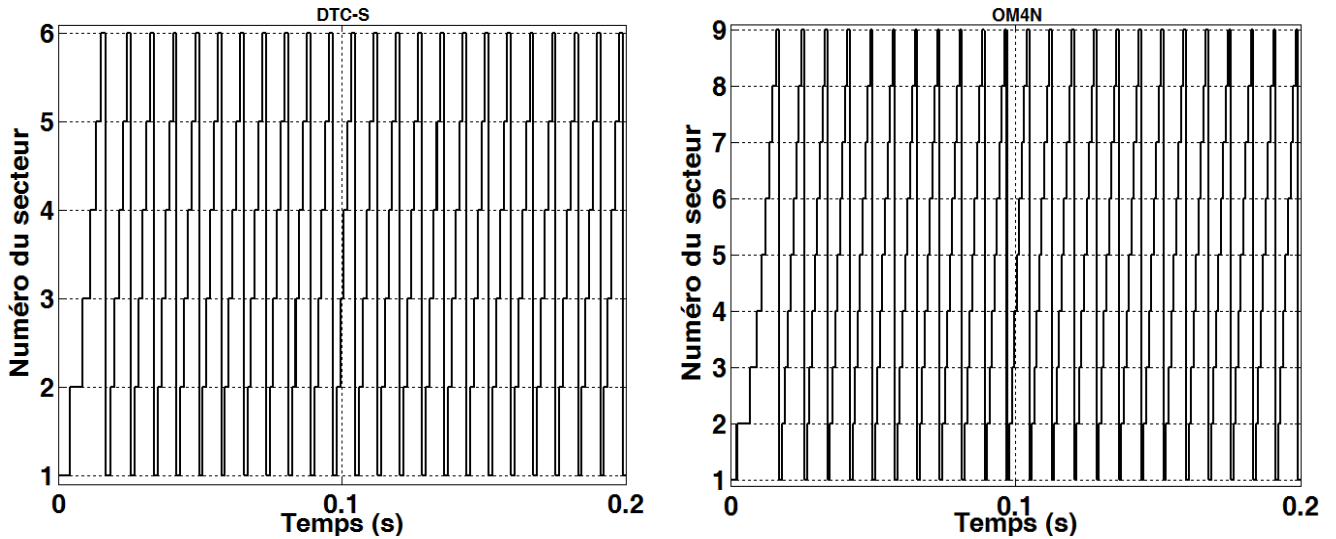


Figure IV.9: Secteurs occupé par le vecteur de flux lors d'une DTC simple et avec OM4N.

B, Les vecteurs-tensions produits par les deux onduleurs :

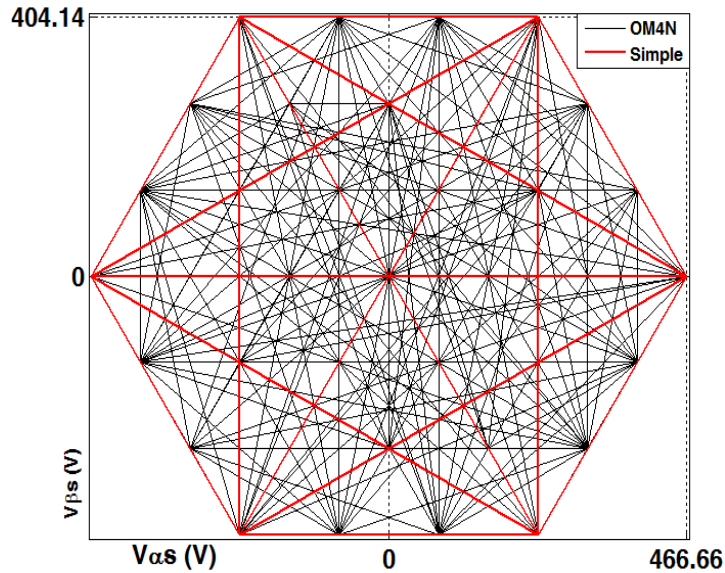


Figure IV.10: Vecteurs-tensions délivrés par les deux onduleurs.

Il bien clair que le nombre des vecteurs de tension est assez grand de l'OM4N par rapport à l'onduleur à deux niveaux. Ce nombre permet de préciser l'application des vecteurs-tensions les plus adéquats pour chaque cas de régulation.

C, Le couple électromagnétique :

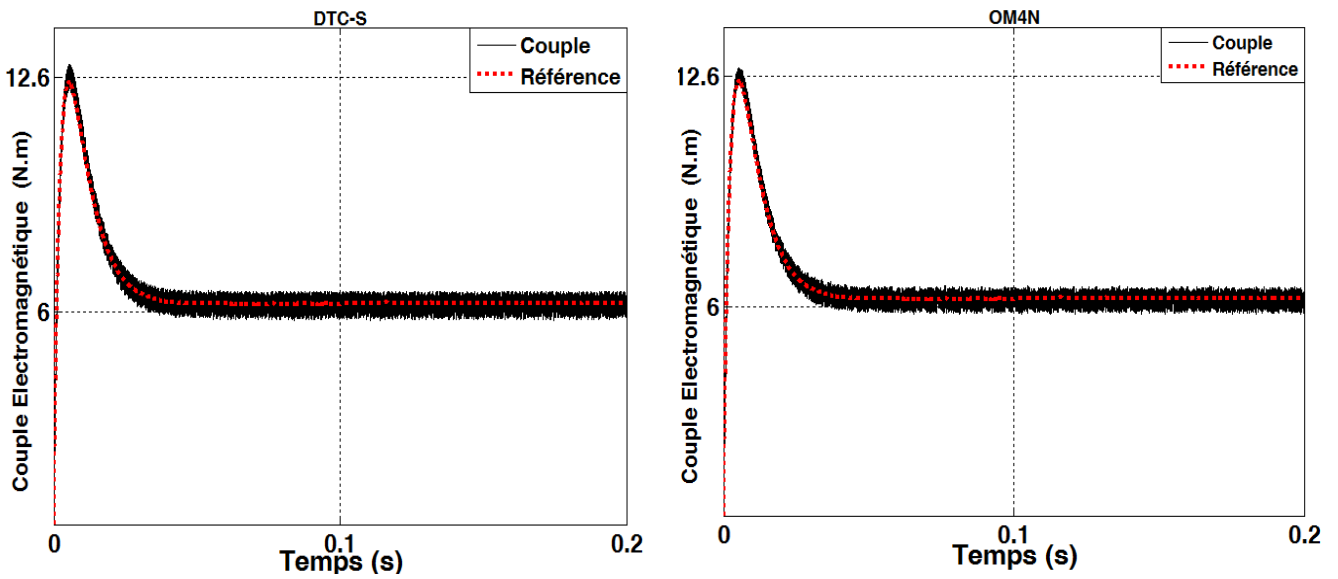


Figure IV.11: Evolution du couple électromagnétique.

La figure précédente montre que l'utilisation d'un onduleur multicellulaire à 4 niveaux abaisse les ondulations mais d'une valeur petite.

D, Le flux magnétique :

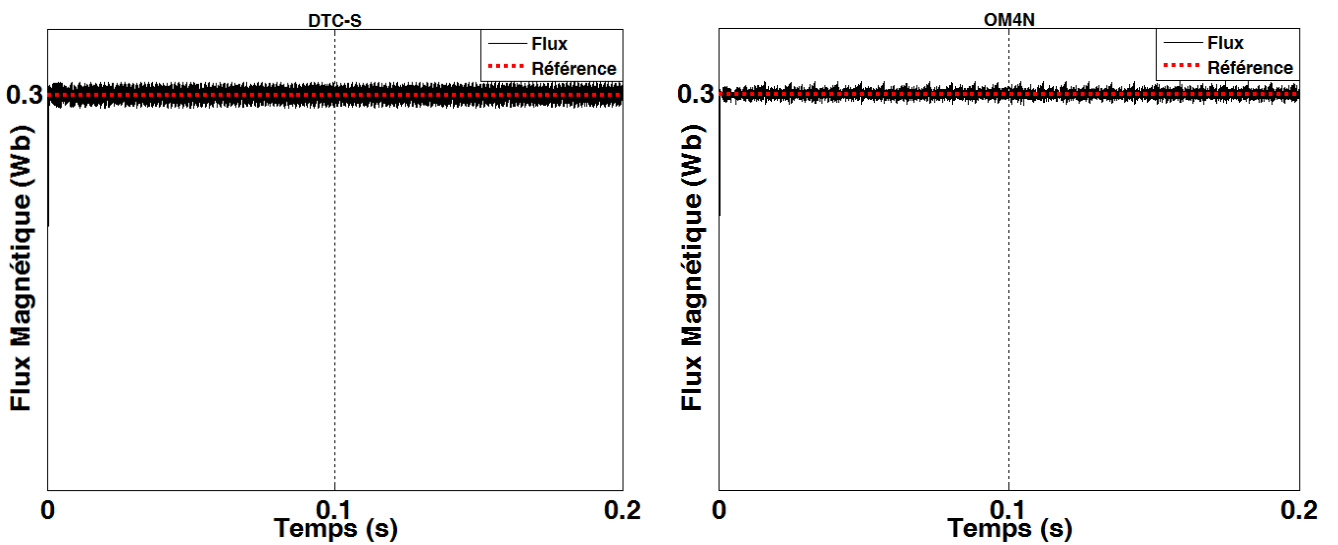


Figure IV.12: Evolution du flux magnétique statorique.

L'évolution de l'amplitude de flux magnétique statorique montre une bonne amélioration car les ondulations sont bien amorties en utilisant l'OM4N.

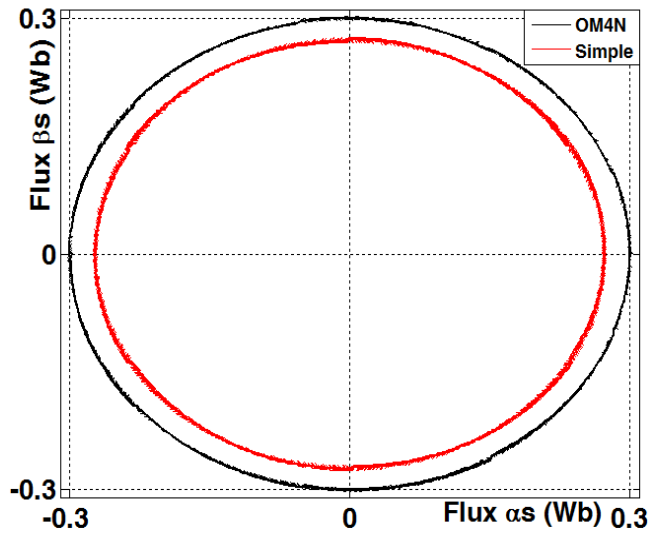


Figure IV.13: Trajectoire du vecteur de flux magnétique dans l'espace ($\alpha\beta$).

Dans cette figure nous avons tracé la trajectoire de flux et pour visualiser les deux cas nous avons divisé les deux composantes dans le cas de la DTC simple par 1.1 afin de tracer les deux cas sur la même figure. Nous pouvons constater que la présence de l'OM4N a affiné les fluctuations du flux.

E, Le courant d'une phase statorique :

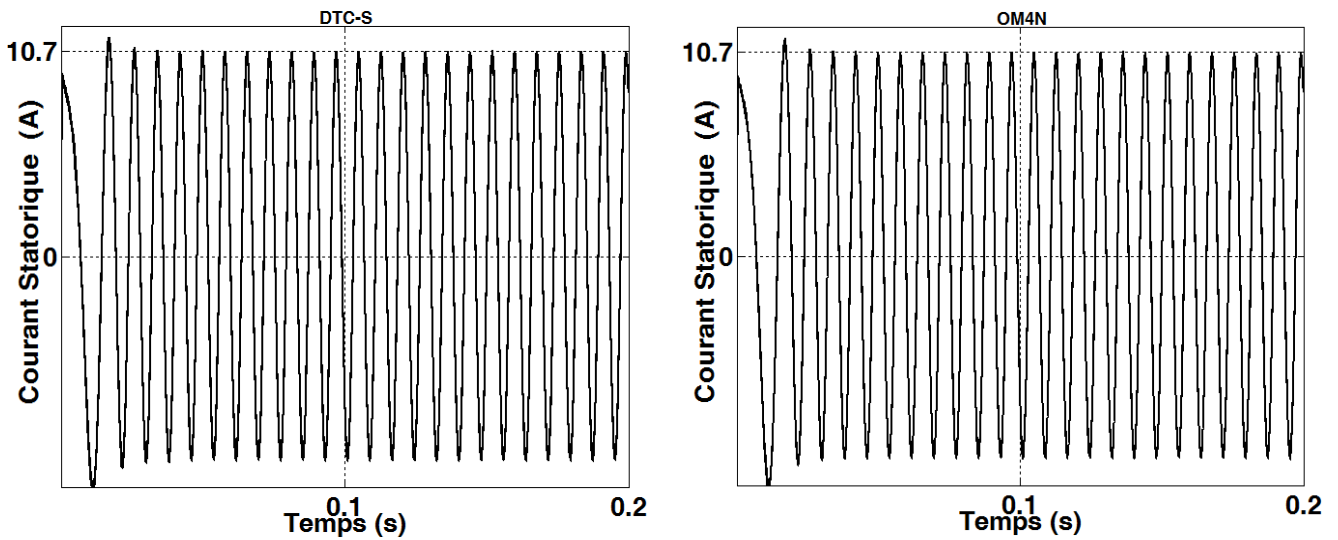


Figure IV.14: Evolution du courant d'une phase du MSAP.

L'évolution du courant absorbé dans une phase statorique montre qu'il n'est pas affecté par l'utilisation de l'OM4N, car nous avons la même allure dans les deux cas. Cela est justifié par le fait que le courant prend sa valeur selon la charge alimentée par l'onduleur alors que la charge dans notre étude qui est le MSAP n'a pas été changée et que sa charge entraînée est fixée pendant toute la simulation ($C_r = 6 \text{ N.m}$ en plus de couple de frottement).

IV.4. Conclusion

Arrivant à la fin de cette étude, et d'après les résultats obtenus, nous pouvons confirmer que l'utilisation d'un onduleur multiniveaux comme l'OM4N entraîne une amélioration bien visible dans les ondulations de couple et de flux plus spécialement. Les ondulations qui viennent en tête des inconvénients de la commande DTC sont trouvées amorties et cela dans la condition d'une fixation de la bande d'hystérésis du couple alors que l'onduleur multiniveaux donne la possibilité de varier cette bande pour affiner en plus les fluctuations, mais nous avons voulu prendre l'étude comparative dans les mêmes conditions. Les résultats obtenus sont satisfaisants et conformes à ce qui est dans les littératures. Nous suggérons de faire une étude sur l'effet de la bande d'hystérésis et de trouver une solution pour déterminer la meilleure qui donne le maximum d'optimisation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce travail vise à étudier le comportement de moteurs électriques commandés par des techniques de commande connues dans le domaine des entraînements électriques. Notre choix est d'appliquer un contrôle direct de flux et de couple appelé DTC aux moteurs synchrones à aimants permanents. Les DTC sont connus par des fluctuations indésirables qui provoquent des vibrations mécaniques pouvant endommager les mécanismes et interférer avec les systèmes acoustiques. Une des solutions proposées pour réduire l'impact de cet inconvénient est d'utiliser des onduleurs multiniveaux. Ceux-ci nous permettent de fournir plusieurs vecteurs-tensions qui peuvent être adaptés pour des situations où un onduleur à deux niveaux ne le permettrait pas, apportant ainsi une amélioration en réduisant l'ondulation rencontrée.

Nous avons commencé par donner une modélisation du MSAP écrite dans le repère statorique, puis dans le chapitre deux, nous avons présenté un aperçu sur les onduleurs de tension. Au chapitre trois, la DTC classique a été exposée dans les deux cas d'étude.

Dans le dernier chapitre, nous avons illustré les résultats obtenus par simulation. D'après ces résultats, nous avons constaté que l'utilisation d'un onduleur multicellulaire à quatre niveaux abrégé OM4N n'améliore que peu les grandeurs commandées si on garde les mêmes conditions du système simulé. Sachant que l'OM4N peut délivrer tant de tensions au MSAP avec une réponse plus rapide, ce qui nous laisse penser que l'amélioration sera plus attractive si on réduit les bandes d'hystérésis des grandeurs commandées.

Donc, Nous suggérons à la fin de ce travail d'étudier l'impact de la bande d'hystérésis en utilisant l'OM4N et de trouver les paramètres qui peuvent pousser en plus l'amélioration.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [21AA] Abdelkrim Abdellatif, "Etude et simulation d'un onduleur de tension pont en H multi-niveaux en cascade", Mémoire de Master, Université Larbi Tebessi, Tebessa, Algérie, 2021.
- [20TS] Taouch Soulef, "Commande et réalisation d'un convertisseur multiniveaux", Mémoire de Master, Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, 2020.
- [20RF] Rjeb Fethi, "Commande d'onduleur multiniveaux asymétrique application à la conduite de la machine asynchrone double étoile", Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2020.
- [20BK] Belhouari Khadra, "Étude d'une DTC appliquée à un MAS alimenté par un onduleur multicellulaire à quatre niveaux", Mémoire de Master, Université Amar Telidji, Laghouat, Algérie, 2020.
- [20BC] Bousnoubra Chouaib, "Commande DTC d'un moteur synchrone à aimants permanents avec estimation de la vitesse en utilisant le filtre de KALMAN", Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, 2020.
- [20BA] Bougossa Abdelali et Laggoun ali, "Modélisation et Conception de Moteur synchrone à Aiment Permanant (MSAP)", Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2020.
- [19OS] Okbaoui Sidiali, "Réalisation et commande d'un onduleur triphasé à deux niveaux", Mémoire de Master, Université Amar Telidji, Laghouat Algérie, 2019.
- [19AS] Abdelaziz Saad, "Commande et implémentation d'un onduleur de tension triphasé", Mémoire Master, Université Mohammed Boudiaf, Msila, 2019.
- [18KI] Khelif Ibtissam, "La Commande Directe du Couple d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)", Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2018.
- [18BA] Belahbib Abdelhakim, "Commande DTC-SVM de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) par l'utilisation des régulateurs PI du flux et du couple", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2018.
- [17ZM] Zeggare Mourad, "Fonctionnement en mode dégradé d'un onduleur multi niveaux application au filtre actif parallèle", Mémoire de Master, Université Mohammed Boudiaf, M'sila, Algérie, 2017.
- [16HB] Houra Belkacem, "Commande DTC Prédictive de la MSAP", Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, 2016.
- [14HZ] Hafida Zerari, "Optimisation énergétique d'un moteur synchrone à aimants permanents", Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, Algérie, 2014.
- [14MB] Mokhtari Bachir, "DTC Intelligente Appliquée à la Commande De La Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat en Sciences, Université hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2014.
- [13HO] Hafsi Ouafa, "Commande Floue Optimisée sans capteur de vitesse par DTC d'un Moteur Synchrone à aimants permanents basée sur un modèle de référence adaptatif", Mémoire de Master, Université Amar Telidji, Laghouat, Algérie, 2013.