



République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement  
Technologique-Skikda



## Département de Technologie Génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur  
d'Enseignement Secondaire

**Etude et simulation de la commande du moteur  
synchrone à aimant permanent (MSAP)**

**Présenté par:**

- Amina Bouleghlem
- Asia Lallouche

**Jury de soutenance**

|                  |                       |              |
|------------------|-----------------------|--------------|
| Rahab Abderrezak | Grade M.C.B Président | ENSET-SKIKDA |
| Senani Fawzi     | Grade M.C.B Encadrant | ENSET-SKIKDA |
| Hadjami Marouane | Grade M.C.B Examineur | ENSET-SKIKDA |

**Année Universitaire 2023/2024**

# Remerciement

Nous remercions dieu, le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas riche sans l'aide et l'encadrement de **Mr Senani Fawzi**, nos remerciements à lui pour la qualité de son encadrement.

Nos remercions s'adresse également à tout nos professeurs qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Enfin, nous remercions avec une profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Et merci à tous....

# الإهداء.....

إلى من كلل العرق جبينه، من بدل الغالي و النفيس

والذي العزيز.

إلى من جعل الجنة تحت أقدامها وسهلت لي الشدائد بدعائها

أمي الغالية.

إلى خيرة أيامي وصفوتها

إخواني.

إلى رفقاء الدرب

صديقاتي.

إلى كل من وقف بقربي حتى أصل إلى ما أنا عليه.

أهديكم هذا العمل المتواضع.

آمنة بولغلم.

# الإهداء.....

إلى والدي الذي أضاء دروبي وطريقي وقدوتي في كل خطوة  
أخطوها.

إلى الإنسانية العظيمة أُمي الحنونة رحمة الله عليها، معنى الحب  
والحنان و التفاني.

إلى إخواني و أخواتي الذين وقفوا معي دائما و ساندوني خلال  
مسيرتي التعليمية.

إلى صديقاتي رفقاء الرحلة.

أهديكم جميعا هذا العمل المتواضع.

آسيا العلوش.

# ملخص

يعتبر المحرك التزامني ذو المغناطيس الدائم (MSAP) المحرك الأكثر شهرة و الأكثر استخداما في المجال الصناعي و ذلك بأفضل أدائه و خصائصه الجيدة.

في هذه المذكرة أجرينا دراسة التحكم الشعاعي (VC) على الألة (MSAP) المغذاة عن طريق عاكس ثلاثي الطور ثنائي المستوى متحكم فيه عن طريق تقنية عرض النبضة (MLI) بالاعتماد على برنامج (MATLAB/SIMULINK).

في البداية قدمنا نظرة عامة على الماكنة (MSAP) بعدها و في الجزء الثاني قمنا بدراسة و نمذجة الماكنة في النظامين ثلاثي المحاور abc و ثنائي المحاور لبارك و كذلك استنتجنا معادلة الحالة لهذه الماكنة إضافة لذلك قمنا بنمذجة عاكس الجهد و طريقة التحكم فيه بتقنية عرض النبضة (MLI) و للتحقق من النماذج الرياضية السابقة لهذه الماكنة من خلال عدة حالات (الاختبار في الفراغ, الحمل, عكس اتجاه الدوران).

أخيرا و من أجل اظهار فعالية التقنية المدروسة قمنا المحاكاة العددية لتقنية التحكم الشعاعي للماكنة MSAP مع تنظيم السرعة باستخدام المنظمات (PI) من خلال عرض و مناقشة النتائج لعدة حالات اختبار الفراغ, اختبار الحمل و اختبار عكس اتجاه دوران السرعة, النتائج المعروضة أظهرت فعالية و بساطة هذه التقنية.

## الكلمات المفتاحية

الألة التزامنية ذو المغناطيس الدائم, التحكم الشعاعي, تقنية عرض النبضة, عاكس (موج), منظمات PI.

# Résumé

Grâce à ses performances et ses qualités le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) est considéré parmi les moteurs les plus connus et les plus utilisés dans le domaine industriel.

L'étude réalisée dans ce mémoire basé sur l'application de technique vectorielle à la MSAP alimenté par un onduleur à deux niveaux contrôlé par la technique MLI à l'aide du logiciel Matlab / Simulink.

Nous avons présenté d'abord un aperçu général sur la MSAP puis dans la deuxième partie nous avons étudié et modélisé la MSAP dans le repère abc, biphasé dq de Park et d'équation d'états ainsi que l'onduleur de tension à deux niveaux et sa commande MLI et la validation du modèle par simulation pour visualiser l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques pour des essais effectués à savoir l'essai à vide, en charge et inversion de sens de rotation.

Finalement la troisième partie le principe de la commande vectorielle de la MSAP en utilisant des régulateurs PI avec réglage de la vitesse de rotation est étudiée et simulée. Afin de montrer l'efficacité et la simplicité de la commande vectorielle appliquée à la MSAP des résultats de simulation sont présentés et discutés à l'aide du logiciel Matlab/Simulink pour des différents fonctionnements à vide, en charge et inversion de sens de rotation.

## Mots clés

MSAP, CV, MLI, Onduleur, PI.

# Abstract

Because of its performance and qualities, the permanent magnet synchronous motor (PMSM) is considered among the best-known and most used motors in the industrial field.

The study carried out in this dissertation based on the application of vector control (VC) technique to the PMSM powered by a two-level inverter controlled by the PWM technique using Matlab / Simulink software.

We first presented a general overview of the PMSM then in the second part we studied and modeled the PMSM in the abc frame, two-phase d q of Park and equation of states as well as the two-level voltage inverter and its PWM control and validation of the model by simulation to visualize the evolution of the electrical and mechanical quantities for tests carried out, namely the empty test, no load, under load and reversal of direction of speed. Finally, the third part, the principle of vector control of the PMSM using PI regulators with rotation speed adjustment is studied and simulated. In order to show the effectiveness and simplicity of vector control applied to the PMSM simulation results are presented and discussed using Matlab/Simulink software for different operations at no load, under load and reversal of direction of speed.

## **Keywords**

PMSM, VC, PWM, Inverter, PI.

# Listes des Figures

## **Chapitre I : Généralité sur la machine synchrone à aimant permanent**

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Figure. I.1  | Classification des machines synchrones                                       | 4  |
| Figure. I.2  | Différents types des moteurs synchrones à aimants permanents                 | 5  |
| Figure. I.3  | Caractéristiques magnétiques des matériaux utilisés comme aimants permanents | 7  |
| Figure. I.4  | La Machine synchrone à aimant permanent                                      | 8  |
| Figure. I.5  | Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux                           | 9  |
| Figure. I.6  | Différents types des aimants permanents                                      | 9  |
| Figure. I.7  | Représentation de la machine synchrone à aimant permanent                    | 11 |
| Figure. I.8  | Stator et rotor de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)            | 12 |
| Figure. I.9  | Courbe de fonctionnement de la MSAP  | 13 |
| Figure. I.10 | Différentes catégories pour une MSAP   | 13 |
| Figure. I.11 | Machine synchrone à aimants permanents montés en surface                     | 14 |
| Figure. I.12 | Machine synchrone à aimants permanent insérés                                | 15 |
| Figure. I.13 | Machine synchrone à aimants permanent enterrés                               | 15 |
| Figure. I.14 | Machine synchrone à aimants permanent chapeautés                             | 16 |
| Figure. I.15 | Alimentation par commutateur de courant                                      | 18 |
| Figure. I.16 | Alimentation par un onduleur de tension                                      | 18 |

## **Chapitre II : Modélisation de l'association MSAP-Onduleur de tension**

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figure. II.1 | Schéma de la Modèle de la machine synchrone dans le repère triphasé             | 19 |
| Figure. II.2 | Représentation de la MSAP dans les repères triphasé (a, b, c) et diphasés (d-q) | 22 |
| Figure. II.3 | Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d, q)                              | 23 |
| Figure. II.4 | Schéma de la MSAP dans le repère (d, q)   | 27 |
| Figure. II.5 | Schéma bloc d'un onduleur   | 28 |
| Figure. II.6 | Schéma de l'association MSAP-onduleur de tension à deux niveaux                 | 29 |
| Figure. II.7 | Schéma d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux                         | 29 |

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Figure. II.8  | Schéma équivalent de l'onduleur commandé par la technique MLI | 30 |
| Figure. II.9  | Vitesse de rotation   | 31 |
| Figure. II.10 | Couple électromagnétique                                      | 32 |
| Figure. II.11 | Courant quadrature  | 32 |
| Figure. II.12 | Courant direct  | 33 |
| Figure. II.13 | Courants triphasés des phases (a, b et c)                     | 33 |
| Figure. II.14 | Courant de la phase a   | 34 |
| Figure. II.15 | Vitesse de rotation   | 34 |
| Figure. II.16 | Couple électromagnétique                                      | 35 |
| Figure. II.17 | Courant direct.   | 35 |
| Figure. II.18 | Courant quadrature  | 36 |
| Figure. II.19 | Courants triphasés des phases (a, b et c)                     | 36 |
| Figure. II.20 | Courant de la phase a   | 37 |

**Chapitre III : Application de la technique vectorielle pour contrôler la MSAP**

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Figure. III.1  | Schéma de principe du découplage de la MSAP similaire à la MCC | 42 |
| Figure. III.2  | Principe de la commande vectorielle de la MSAP                 | 44 |
| Figure. III.3  | Modèle de la MSAP quand Id est nul.                            | 45 |
| Figure. III.4  | Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP            | 47 |
| Figure. III.5  | Schéma descriptif des couplages                                | 48 |
| Figure. III.6  | Découplage par compensation                                    | 49 |
| Figure. III.7  | Découplage de la machine synchrone à aimants                   | 49 |
| Figure. III.8  | Commande découplée   | 50 |
| Figure. III.9  | Boucle de régulation du courant Iq                             | 51 |
| Figure. III.10 | Boucle de régulation du courant Id                             | 51 |
| Figure. III.11 | Boucle de régulation du la vitesse                             | 51 |
| Figure. III.12 | Vitesse de rotation et sa référence                            | 52 |
| Figure. III.13 | Couple électromagnétique                                       | 53 |
| Figure. III.14 | Courant quadrature et son référence                            | 53 |
| Figure. III.15 | Courant direct et son référence                                | 54 |
| Figure. III.16 | Courants triphasés des phases (a, b et c)                      | 54 |

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Figure. III.17 | Courant de la phase a                          | 55 |
| Figure. III.18 | Vitesse de rotation et sa référence            | 55 |
| Figure. III.19 | Zoom de la vitesse de rotation et sa référence | 56 |
| Figure. III.20 | Couple électromagnétique                       | 56 |
| Figure. III.21 | Courant quadrature et son référence            | 57 |
| Figure. III.22 | Courant direct et son référence                | 57 |
| Figure. III.23 | Courants triphasés des phases (a, b et c)      | 58 |
| Figure. III.24 | Courant de la phase a                          | 58 |

## Liste des tableaux

|             |   |   |
|-------------|---|---|
| Tableau I.1 | Comparaison des différents types de moteurs électriques synchrones. | 6 |
|-------------|---|---|

Listes des Symboles et Notations

Les symboles

|                    |   |                                |
|--------------------|---|--------------------------------|
| $V_s$              | La tension statorique   | V                              |
| $I_s$              | Le courant statorique   | A                              |
| $\theta$           | Angle sur l'axe d et l'axe q                                      | °                              |
| $\omega$           | La pulsation électrique entre le bobinage statorique et Rotorique | rad/s                          |
| $P$                | Nombre de pair de pôles de la MSAP                                | -                              |
| $f_{e.m}$          | Force électromotrice  | N                              |
| $f_{m.m}$          | Force magnétomotrice  | N                              |
| $\Omega_r$         | La vitesse de rotation de la MSAP                                 | rad/s                          |
| $\varphi_s$        | Le flux du stator   | W <sub>b</sub>                 |
| a, b, c            | Indices correspondant aux trois phases de la machine              | -                              |
| d, q               | Indices indiquant le repère d-q tournant avec le champ tournant   | -                              |
| $I_q$              | Le courant statorique sur l'axe q                                 | A                              |
| $I_d$              | Le courant statorique sur l'axe d                                 | A                              |
| $V_d, V_q$         | Tensions statorique dans le repère de PARK sur les axes d et q    | V                              |
| $[V_s]$            | Matrice tension statorique dans le repère (abc)                   | V                              |
| $[\varphi_s]$      | Vecteur flux statorique dans le repère (abc)                      | W <sub>b</sub>                 |
| $C_{em}$           | Couple électromagnétique  | N.m                            |
| $[\varphi_f]$      | Vecteur flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statorique | W <sub>b</sub>                 |
| $[L_s]$            | Matrice inductance stator   | H                              |
| $V_{dq}$           | Tension dans le repère dq   | V                              |
| $I_{dq}$           | Courant dans le repère dq   | A                              |
| $L_d, L_q$         | Inductances statorique sur l'axe dq                               | H                              |
| $f$                | Le coefficient de frottement                                      | N.m.s/rad                      |
| $C_r$              | Couple résistant  | N.m                            |
| $J$                | Inertie de la machine   | K <sub>g</sub> .m <sup>2</sup> |
| $[P(\theta)]$      | La matrice de PARK  | -                              |
| $[P(\theta)]^{-1}$ | La matrice inverse de PARK  | -                              |
| $V_{abc}$          | Tension dans le repère abc  | V                              |
| $I_{abc}$          | Courant dans le repère abc  | A                              |
| $\varphi_{abc}$    | Flux dans le repère abc   | W <sub>b</sub>                 |
| $f_p$              | La fréquence de la porteuse                                       | Hz                             |

## Listes des Symboles et Notations

|                          |   |     |
|--------------------------|---|-----|
| $f_r$                    | La fréquence de la référence              | Hz  |
| $V_r$                    | Le rapport de l'amplitude de la modulante | -   |
| $V_p$                    | La valeur crête de la porteuse            | -   |
| m                        | L'indice de modulation                    | -   |
| r                        | Le taux de modulation                     | -   |
| [R]                      | Matrice résistance du stator              | ohm |
| PI                       | Régulateur proportionnel-intégral         | -   |
| P                        | Régulateur proportionnel                  | -   |
| I                        | Régulateur intégrale                      | -   |
| $K_p, K_i$               | Gains proportionnel-intégral              | -   |
| $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ | Les tensions composées                    | V   |

### Notations

|        |  |
|--------|--|
| MSAP   | Machine synchrone à aimant permanent                       |
| MCC    | Machine à courant continu                                  |
| MSRB   | Moteur synchrone à rotor bobiné                            |
| MSRV   | Moteur synchrone à réluctance variable                     |
| MSAPMS | Machines synchrones à aimants permanents montés en surface |
| MSAPI  | Machines synchrones à aimants permanents insérés           |
| MSAPE  | Machines synchrones à aimants permanents enterrés          |
| MSAPC  | Machines synchrones à aimants permanents chapeautés        |
| CV     | Commande vectorielle                                       |
| DTC    | Commande directe de couple                                 |
| GTO    | Thyristor à extinction par la gâchette                     |
| MOSFET | Transistor à effet de champ à grille métal-oxyde           |
| IGBT   | Transistor bipolaire à grille isolée                       |
| MLI    | Modulation de largeur d'impulsion                          |

# Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction générale</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre I : Généralité sur la machine synchrone à aimant permanent</b>               |           |
| <b>I.1 Introduction</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>I.2 Machines Synchrones</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>I.3 Classification des machines synchrones</b> .....                                  | <b>3</b>  |
| <b>I.4 Les différents types des moteurs synchrones</b> .....                             | <b>4</b>  |
| <b>I.4.1. Moteur synchrone à rotor bobine (MSRB)</b> .....                               | <b>4</b>  |
| <b>I.4.2. Moteur synchrone à aimant permanent (MSAP)</b> .....                           | <b>5</b>  |
| <b>I.4.3. Moteur synchrone à reluctance variable (MSRV)</b> .....                        | <b>5</b>  |
| <b>I.4.4. Choix des moteurs électriques</b> .....  | <b>6</b>  |
| <b>I.5 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents</b> .....            | <b>6</b>  |
| <b>I.6 Définition de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)</b> .....            | <b>7</b>  |
| <b>I.7 Les Aimants permanents</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>I.7.1. Définition des aimants permanents</b> .....                                    | <b>8</b>  |
| <b>I.7.2. Propriété des aimants permanents</b> .....                                     | <b>8</b>  |
| <b>I.7.3. Les différents types des aimants permanents</b> .....                          | <b>9</b>  |
| <b>1. Les terres rares</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>2. Les ferrites</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>3. Les aimants métalliques (Alnico)</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>I.8 Description de la machine synchrone à aimant permanent</b> .....                  | <b>10</b> |
| <b>I.9 Constitution du moteur synchrone à aimant permanent (MSAP)</b> .....              | <b>11</b> |
| <b>I.9.1. Stator</b> .....   | <b>11</b> |
| <b>I.9.2. Rotor</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>I.10 Principe de fonctionnement de la MSAP</b> .....                                  | <b>12</b> |
| <b>I.11 Les différentes catégories de la MSAP</b> .....                                  | <b>13</b> |
| <b>I.11.1. Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPMS)</b> ..... | <b>14</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I.11.2. Machine synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI)</b> .....     | <b>14</b> |
| <b>I.11.3. Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE)</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>I.11.4. Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC)</b> ..... | <b>16</b> |
| <b>I.12 Les avantages et les inconvénients de la MSAP</b> .....                  | <b>16</b> |
| <b>I.12.1. Avantages</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>I.12.2. Inconvénients</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>I.13 Les domaines d'application de la MSAP</b> .....                          | <b>17</b> |
| <b>I.14 Différents types d'alimentations de la MSAP</b> .....                    | <b>17</b> |
| <b>I.14.1. Alimentation par commutateur de courant</b> .....                     | <b>18</b> |
| <b>I.14.2. Alimentation par un onduleur de tension</b> .....                     | <b>18</b> |
| <b>I.15 Techniques de commande de la MSAP</b> .....                              | <b>19</b> |
| <b>I.15.1. Commande scalaire</b> .....   | <b>19</b> |
| <b>I.15.2. Commande vectorielle (CV)</b> .....                                   | <b>19</b> |
| <b>I.15.3. Commande directe de couple (DTC)</b> .....                            | <b>19</b> |
| <b>I.16 Conclusion</b> .....   | <b>19</b> |

## **Chapitre II: Modélisation de l'association MSAP-Onduleur de tension**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>II.1 Introduction</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>II.2 Modélisation de la MSAP</b> .....  | <b>20</b> |
| <b>II.3 Hypothèses simplificatrices</b> .....                                    | <b>20</b> |
| <b>II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)</b> ..... | <b>21</b> |
| <b>II.4.1. Modélisation de la MSAP dans le repère triphasé "abc"</b> .....       | <b>21</b> |
| <b>a. Equations électriques</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>b. Equations magnétiques</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>c. Equation du couple électromagnétique</b> .....                             | <b>23</b> |
| <b>II.4.2. Application de la transformation du Park</b> .....                    | <b>23</b> |
| <b>II.4.3. Modélisation de la MSAP dans le repère biphasé 'd q'</b> .....        | <b>25</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| a. Equations électriques et magnétiques en dq -----                                 | 25        |
| b. Equation du couple électromagnétique en dq -----                                 | 27        |
| c. Equation mécanique -----   | 28        |
| <b>II.4.4. Modèle de la MSAP sous forme d'équation d'état -----</b>                 | <b>28</b> |
| <b>II.5 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux -----</b>              | <b>30</b> |
| II.5.1. Définition de l'onduleur -----  | 30        |
| II.5.2. Alimentations en tension d'un l'onduleur associé à un MSAP -----            | 30        |
| II.5.3. Modélisation de l'onduleur de tension -----                                 | 31        |
| II.5.4. Commande par modulation de largeurs d'impulsions (MLI) -----                | 32        |
| <b>II.6 Résultats de simulation -----</b>   | <b>33</b> |
| II.6.1. Alimentation par un réseau triphasé équilibré -----                         | 33        |
| II.6.2. Alimentation par un onduleur de tension -----                               | 36        |
| <b>II.7 Interprétation des résultats de simulation -----</b>                        | <b>39</b> |
| <b>II.8 Conclusion -----</b>  | <b>40</b> |
| <b>Chapitre III: Application de la technique vectorielle pour contrôler la MSAP</b> |           |
| III.1 Introduction -----  | 41        |
| III.2 Commande vectorielle de la MSAP -----   | 41        |
| III.3 Principe de la technique de la commande vectorielle -----                     | 42        |
| III.3.1. Contrôle vectoriel direct-----   | 43        |
| III.3.2. Contrôle vectoriel indirect-----   | 43        |
| III.3.3. Contrôle vectoriel simplifié -----   | 43        |
| III.4 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP -----                         | 44        |
| III.5 Avantages et Inconvénients de la commande vectorielle-----                    | 46        |
| III.5.1. Avantages de la commande vectorielle -----                                 | 46        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>III.5.2. Inconvénients de la commande vectorielle</b> .....  | <b>46</b> |
| <b>III.6 Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP</b> .....                                | <b>46</b> |
| <b>III.7 Stratégie de la technique de découplage</b> .....  | <b>47</b> |
| <b>III.8 Synthèse des différents régulateurs</b> .....  | <b>50</b> |
| <b>III.8.1. Régulateur du courant <math>I_q</math></b> .....  | <b>50</b> |
| <b>III.8.2. Régulateur du courant <math>I_d</math></b> .....  | <b>51</b> |
| <b>III.8.3. Régulateur de la vitesse</b> .....  | <b>51</b> |
| <b>III.9 Résultats de simulation de la commande vectorielle de la MSAP</b> .....                      | <b>52</b> |
| <b>III.9.1. Résultats de simulation en démarrage direct</b> .....                                     | <b>52</b> |
| <b>III.9.2. Résultats de simulation (essais à vide, en charge et inversion du sens de rotation)</b> - | <b>55</b> |
| <b>III.10 Interprétation des simulations de la commande vectorielle de la MSAP</b> .....              | <b>59</b> |
| <b>III.11 Conclusion</b> .....  | <b>59</b> |
| <b>Conclusion générale</b> .....  | <b>60</b> |

***Introduction***  
***Générale***

# Introduction générale

L'énergie électrique est utilisée depuis longtemps pour produire de l'énergie mécanique grâce à des moteurs électriques.

Au fil de temps, cette tendance est appuyé à la fois dans le domaine industriel, actuellement constitue la majeure partie de l'énergie consommée dans l'industrie pour fournir la force motrice.

Une commande précise et continue de la vitesse, du couple et de la position, tout en garantissant la stabilité, la rapidité et le rendement le plus élevé nécessaire pour commander la technologie moderne des systèmes d'entraînement.

La machine à courant continu (MCC) donne des performances satisfaisantes, mais il est pourvu des balais frottant sur le collecteur à lames, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement.

Pour toutes ces raisons, les chercheurs s'orient vers les machines asynchrones et les machine synchrones à aimants, qui sont robustes et ont une construction simple avec un excellent rapport et puissance/masse/volume. C'est pourquoi les machines à courant alternatif remplaçant de plus en plus les machines à courant continu dans de nombreux domaines dont, la traction.....etc.

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inertie ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faibles constantes de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes.

Les MSAP sont largement utilisés dans l'industrie pour le suivi de trajectoires, spécialement dans les applications de fabrication pour les machines-outils ou encore en robotique. Ce type de machines présente de nombreux avantages pour les asservissements de position et de vitesse (simplicité d'installation, souplesse d'emploi, robustesse, gamme de produits très large). Ces moteurs ont une plage de vitesses étendue. Ils ont un couple à l'arrêt important, et un bon rendement. De plus, la mise en œuvre et la commande en boucle ouverte est très simple. Cependant, les opérations en boucle ouverte sont limitées par la potentielle perte de synchronisme.

Avec le développement de l'électronique de puissance, lié à l'apparition de composants interrupteurs rapides, ainsi que le développement des techniques de commande, il est possible de

choisir une structure de contrôle à base des algorithmes très complexes avec un temps de calcul trop long.

La commande à vitesse variable des entraînements électriques a bénéficiée, ces dernières années, d'avancées méthodologiques et technologiques significatives. En effet, les progrès de l'électronique numérique et les développements des composants de puissance permettent aujourd'hui de mettre en œuvre des algorithmes très complexes avec un temps de calcul trop long.

La commande des machines synchrones à aimants permanents s'effectue par plusieurs types des contrôles tels que la commande vectorielle. Dans cette technique, la structure de commande repose sur une modélisation de la machine alimentée par un l'onduleur de tension.

Le travail présenté dans cette mémoire porte sur l'application de la commande vectorielle sur la MSAP (Les courants et la vitesse) avec des régulateurs PI.

Cette mémoire est répartie en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation générale de la MSAP, définition de la MSAP, son principe de fonctionnement, sa description et constitution, ses différentes catégories, ses avantages et inconvénients, les domaines d'application de la MSAP, les types d'alimentation et les techniques de contrôle de la MSAP.

Le deuxième chapitre abordera la modélisation de la MSAP en repère triphasé abc, repère biphasé de Park dq et modèle des équations d'états ainsi la modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux et sa technique de commande MLI et présentation des résultats de simulation pour valider le modèle de la MSAP en dp alimentée par un système triphasé équilibré et onduleur de tension à deux niveaux pour des fonctionnements de la MSAP à vide, en charge et inversion de la vitesse de rotation.

Le troisième chapitre présentera la technique de commande vectorielle appliquée à la MSAP, alimentée par un onduleur triphasé de tension à MLI en utilisant des régulateurs (PI) nous présenterons les résultats de simulation obtenus de cette technique pour différents fonctionnements de la M à vide, en charge et inversion du sens de rotation de la vitesse.

Finalement une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans cette mémoire.

# *Chapitre I*

Généralité sur la machine synchrone à aimant  
permanent

## **I.1 Introduction**

Les moteurs synchrones à aimants permanents se répandent de plus en plus comme actionneurs dans les industries automatisées où ils remplacent les moteurs à courant continu. Ils présentent sur ces derniers l'avantage d'avoir de meilleures performances (en termes de couple massique, par exemple) et de ne pas avoir de collecteur mécanique (ce collecteur possède problèmes d'entretien et de comportement dans les environnements difficiles).

Dans ce chapitre, nous décrirons d'abord les machines synchrones et ses classifications et les différents types des moteurs synchrones, puis nous étudierons la machine synchrone à aimant permanent en générale (définition, les aimants permanents, description, constitution, principe de fonctionnement, les différents catégories de rotor de la MSAP). Nous établirons ensuite les avantages et les inconvénients et les domaines d'application de la MSAP. Enfin, nous terminerons ce chapitre par la présentation des différents types d'alimentation de la MSAP et les techniques de commande de la MSAP.

## **I.2 Machines Synchrones**

L'utilisation des machines synchrones autopilotées dans les entraînements à vitesse variable a fortement augmenté ces dernières années, car ces machines ont des caractéristiques similaires à celles des machines à courant continu, sans présenter les inconvénients liés à la présence du collecteur mécanique (entretien, limitation des vitesses de variation du courant, impossibilité de travailler dans les milieux corrosifs ou explosifs), ce qui exclut l'utilisation de celle-ci pour des gammes de puissance élevée [1].

Les machines synchrones couvrent une large plage de puissance allant de quelques  $\mu\text{W}$  à environ 1GW. A l'origine, les machines synchrones étaient essentiellement des alternateurs alimentés par un courant continu et qui produisaient plus de 99% de l'énergie électrique consommée dans le monde [1], [2].

La machine synchrone qui fonctionne à vitesse variable est actuellement le plus puissant, avec une capacité d'environ 100 MW. Il est conçu pour une soufflerie de la NASA. Pendant les années récentes, le moteur à courant continue est remplacé par la MSAP dans le milieu industriel [1].

## **I.3 Classification des machines synchrones**

Selon le principe de la classification de CHALMERS et de ses collègues, nous pouvons classer les machines synchrones comme l'indique la Figure I.1, les machines synchrones sont classées selon la nature de leur excitation (bobinage, aimant permanent, etc.) et par le rapport de saillance  $\xi=L_q/L_d$  [3].

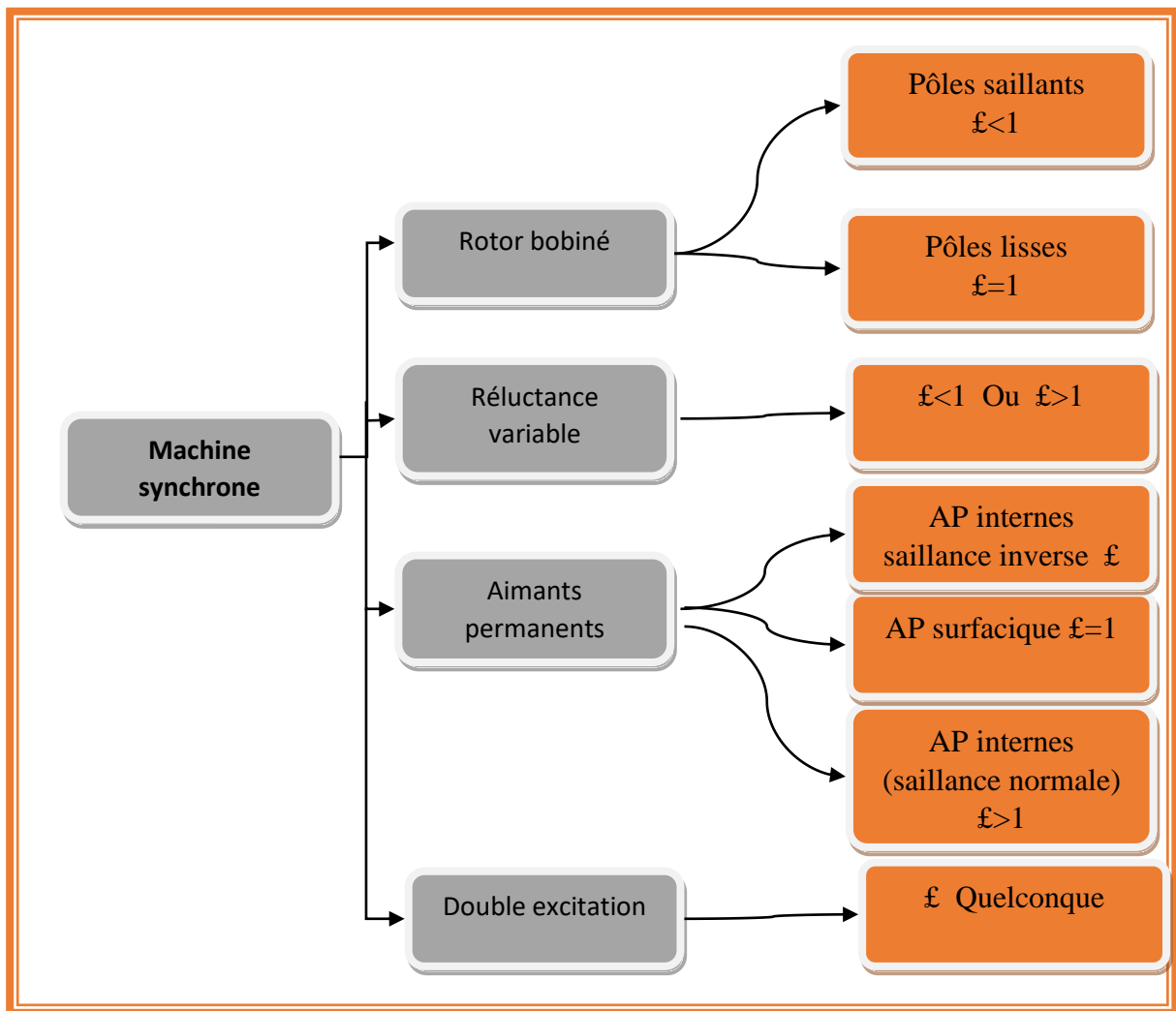


Figure I.1 Classification des machines synchrones

## I.4 Les différents types des moteurs synchrones

Dans le cadre de notre étude nous s'intéressons à la commande du moteur synchrone à aimant permanent (Généralités, modélisation et commande) c'est pour ça nous avons présenté dans cette section les différents types des moteurs synchrones [4].

### I.4.1 Moteur synchrone à rotor bobine (MSRB)

Généralement alimenté par un onduleur en pont à six transistors. C'est le moteur dont les caractéristiques se rapprochent le plus de celles du MCC à excitation indépendante, il permet d'optimiser facilement le rendement (action sur le flux et le courant d'induit). Enfin, le fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur une très large plage de vitesse. Son rotor bobiné est cependant source de pertes et sa vitesse maximale est limitée à 130 m/s environ [4], [5].

### I.4.2 Moteur synchrone à aimant permanent (MSAP)

Il existe de nombreuses façons de disposer les aimants au rotor (en surface insérés ou non entre des pièces polaires, "enterrés" avec ou sans concentration de flux). Si l'objectif est d'obtenir un "fonctionnement à puissance constante", il est nécessaire d'avoir une réaction d'induit importante (judicieusement optimisée) et il est nécessaire d'avoir des aimants "enterrés" ou insérés entre des pièces polaires. Le rendement de tels moteurs est excellent à condition de disposer d'aimants à hautes performances. La technologie Samarium Cobalt ne semble pas avoir un coût compatible avec l'industrie automobile et la technologie Fer-Néodyme-Bore doit encore faire quelques progrès en ce qui concerne la tenue en température et le prix. Ce dernier type d'aimants constitue un espoir important dans le domaine des moteurs électriques. Quant aux ferrites, dont le prix est acceptable en production de grande série, ils confèrent des performances relativement modestes aux MSAP mais ne sont pas à exclure. Les MSAP sont souvent retenus pour les appareils de mesure de précision, robots industriels, machine outils, l'entraînement de véhicules électriques et, particulièrement pour les entraînements directs de roue [6]. Il est toujours alimenté à travers un onduleur triphasé [4], [5]. La Figure I.2 suivante représente les types de moteurs synchrones à aimant permanent les plus courants.

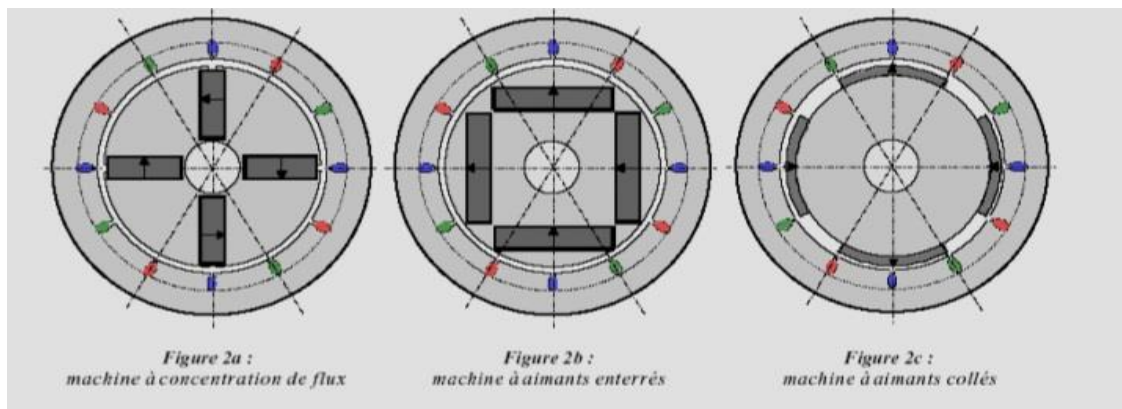


Figure I.2 Différents types des moteurs synchrones à aimants permanents

### I.4.3 Moteur synchrone à reluctance variable (MSRV)

Constitue une solution développée par FIAT. Il s'agit d'un moteur synchrone à bobinage triphasé réparti et alimenté par onduleur triphasé en pont classique. Pour obtenir des performances satisfaisantes aussi bien en terme de couple/pertes, de facteur de puissance que de plage de fonctionnement à puissance maximale constante, il est nécessaire d'avoir un grand rapport des inductances directes sur transverses. Un rapport supérieur ou égal à 10 (satisfaisant) est atteint grâce à la construction de rotors spéciaux dits "axialement laminés".

De tels rotors sont constitués de paquets de tôles intercalés entre des couches amagnétiques et montés axialement de telle façon que le flux, dans l'axe direct, passe aisément d'un pôle à l'autre.

Les performances de ces moteurs sont supérieures à celles des moteurs asynchrones mais cette technologie de rotor reste aujourd'hui délicate à réaliser et il reste à trouver des solutions pour la fabrication en série [4], [5].

**I.4.4 Choix des moteurs électriques**

Le choix du moteur dépend fortement de l'application désirée et selon le cahier de charges défini. En général c'est le couple qui définira le type de moteur. Dans la gamme des moteurs alternatifs, le choix est vaste avec les moteurs synchrones à rotors bobinés, à aimants permanents ou à réluctance variable. Le Tableau (I.1) présente pour chacun d'entre eux, les machines génériques associées argumentées de leurs avantages et inconvénients [4], [7].

**Tab. I.1** Comparaison des différents types de moteurs électriques synchrones.

| <b>Types de Moteurs</b>                       | <b>Avantages</b>   | <b>Inconvénients</b>   |
|---|--|--|
| Moteur synchrone (MS)                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement,</li> <li>- Puissance massique élevée</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fragilité des bagues-balais</li> <li>- Technologie peu courante</li> </ul>  |
| Moteur synchrone à réluctance variable (MSRV) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût moindre</li> <li>- Montée en survitesse aisée</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Surdimensionnement de l'alimentation,</li> <li>- Bruit et vibrations,</li> <li>- Ondulations de couple</li> </ul>               |
| Moteur synchrone à aimant permanent (MSAP)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Technologie devenue courante</li> <li>- puissance massique élevée</li> <li>- pas d'échauffement au rotor</li> <li>- très bon</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ondulations de couple</li> <li>- Coût des aimants</li> <li>- Technologie coûteuse,</li> <li>- Survitesse pénalisante</li> </ul> |

**I.5 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents**

Grâce à l'arrivée sur le marché des nouveaux aimants permanents à hautes performances, comme les aimants en terres-rares, a été à l'origine d'une nouvelle génération de machines synchrones [1], [4]. Jusqu'à l'apparition des composés samarium cobalt, les aimants ont été essentiellement utilisés pour de petits moteurs synchrones [7].

Grâce à l'amélioration des caractéristiques des aimants (Figure. I.1), les machines synchrones à aimants permanents présentent des performances supérieures à celles des machines à rotor bobiné jusqu'à des puissances assez importantes (de 0.5 à 50 kW).

Pour obtenir des performances élevées, la machine synchrone à aimants permanents disposés sur la surface du rotor est la meilleure solution technique ; ceci vaut même pour des puissances plus élevées. Bien entendu le prix des aimants à terres-rares les rend néanmoins moins attractives économiquement [7].

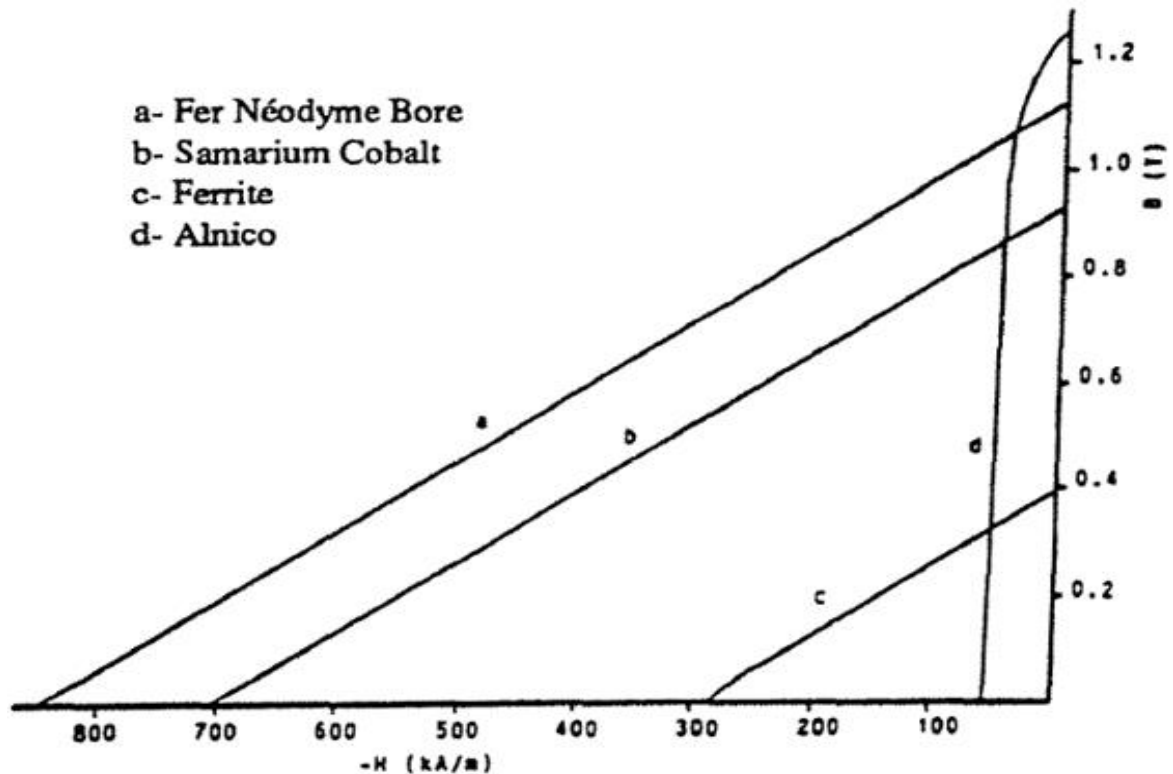


Figure I.3 Caractéristiques magnétiques des matériaux utilisés comme aimants permanents

### I.6 Définition de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

Les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) présentent un stator semblable au stator des différents types des machines électriques triphasées. Le changement du bobinage rotorique par des aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus contrôlable.

Dans les machines à aimants permanents, les aimants sont situés sur la partie tournante. Le stator est constitué d'un enroulement triphasé distribué sinusoïdalement. Concernant son fonctionnement il est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor [8].

La MSAP est une abréviation de Machine Synchrone à Aimant Permanent (Figure I.3), qui regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Ce processus est obtenu grâce au champ magnétique du rotor généré par des aimants ou par circuit d'excitation.

Les premiers aimants permanents ont été utilisés au début du 19<sup>ème</sup> siècle. Ils sont systématiquement utilisés pour des puissances inférieures à 10 kW. Et s'étend vers des capacités élevées qui dépassent le MW [9].

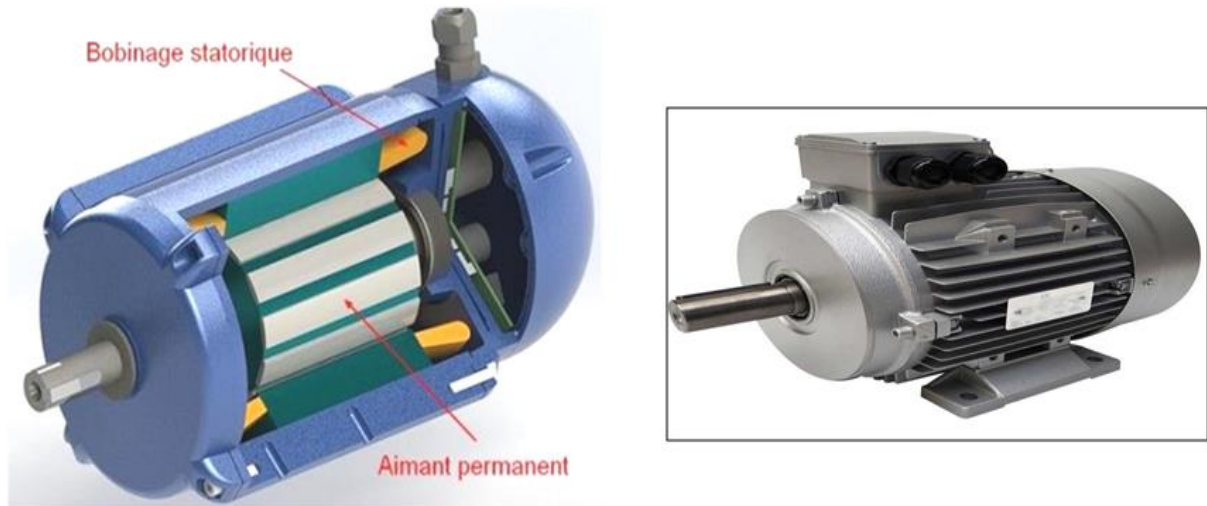


Figure I.4 La Machine synchrone à aimant permanent.

## I.7 Les Aimants permanents

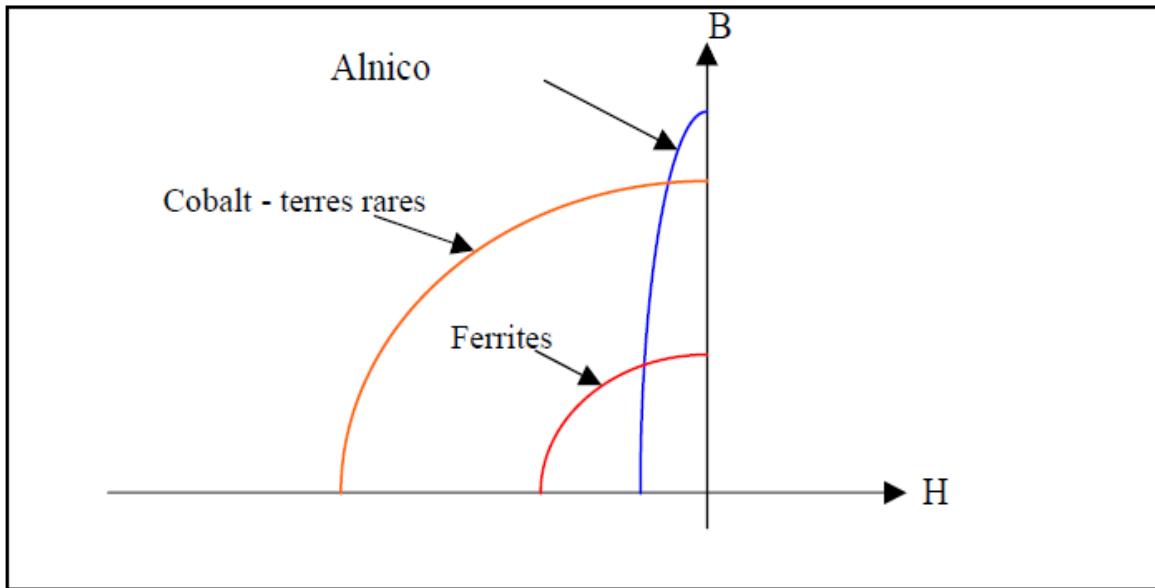
### I.7.1 Définition des aimants permanents

Nous appelons des aimants permanents les corps qui ont la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente, et qui se désaimantent difficilement lorsqu'ils ont été aimantés [10].

Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la des aimantations, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieure [11].

### I.7.2 Propriété des aimants permanents

Le choix des aimants permanents est primordial puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple massique de la machine. Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan (B-H) comme le montre la Figure I.5, cette courbe est caractérisée par [12] :



**Figure I.5 Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux.**

Le choix des aimants permanents est essentiel puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple massique d'un actionneur.

- ✓ L'induction rémanente  $B_r$ , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé.
- ✓ Le champ coercitif de l'induction  $H_cB$ , qu'est le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant n'est stable.
- ✓ Les valeurs  $H_m$  et  $B_m$  du point de fonctionnement optimal  $M$  correspondant à  $(BH)_{max}$  [13].

### I.7.3 Les différents types des aimants permanents

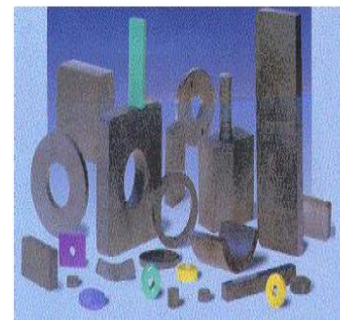
Il existe une grande variété des matériaux pour les aimants permanent, dont les propriétés et les applications sont diverses. Le choix de la nature des aimants d'une machine a une influence non négligeable sur son couple massique et sur la puissance finale des aimants permanents. Nous distinguons trois types d'aimants permanents [14] :



(1) Aimants terres- rares



(2) aimant ferrites



(3) Aimants Alnico

**Figure I.6 Différents types des aimants permanents [14].**

**1. Les terres rares**

Ils sont durs et ont un cycle d'hystérésis large, ils représentent des aimants plus performants avec une induction rémanente élevée et un champ coercitif important. L'inconvénient reste le coût élevé.

Nous distinguons trois familles :

- ✓ Les aimants Samarium Cobalt ;
- ✓ Les aimants au Cobalt avec d'autres éléments de terres rares ;
- ✓ Les aimants au Néodyme-Fer-Bore, [15].

**2. Les ferrites**

Les ferrites sont fabriquées à partir d'oxyde de fer associé au manganèse, au Nickel ou au Zinc, assemblées par frittage (agglomération à chaud). Ce sont des céramiques, c'est-à-dire des produits très durs mais fragiles et peu résistants aux efforts de traction. Ces matériaux sont caractérisés par un champ coercitif assez important et une bonne température de Curie. Le faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité de la production des aimants [15].

**3. Les aimants métalliques (Alnico)**

Ce sont des alliages à base de Fer, Nickel et Aluminium, auxquels on rajoute du cobalt et du Titan, nous voulons améliorer leurs propriétés [15].

**I.8 Description de la machine synchrone à aimant permanent**

Le schéma de la MSAP peut être représenté par trois enroulements a, b et c au stator avec les aimants permanents au rotor. L'alimentation des enroulements statoriques donne naissance à une force magnétomotrice tournante à la vitesse angulaire, le rotor ou la roue polaire à aimants permanents dont le nombre de pôles est égal à celui du stator permet de produire la force magnétomotrice d'excitation, la représentation de la MSAP est illustrée par la Figure I.7 [16]. Les machines synchrones à aimant permanent, utilisées en mode moteurs ou génératrices

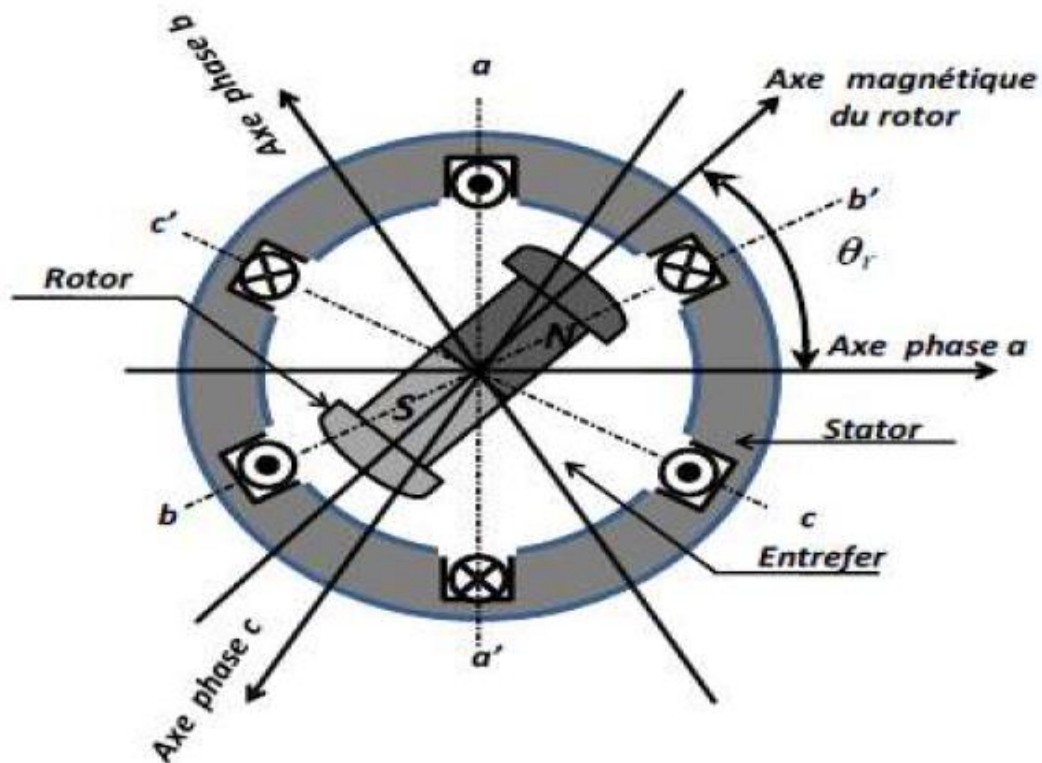


Figure I.7 Représentation de la machine synchrone à aimant permanent

### I.9 Constitution du moteur synchrone à aimant permanent (MSAP)

Le moteur synchrone à aimant permanent se compose de deux parties [2], [6], [17] :

- Une partie mobile où rotor constituant l'induit.
- Une partie fixe où stator portant des enroulements constituant l'inducteur.

La zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer.

#### I.9.1 Stator

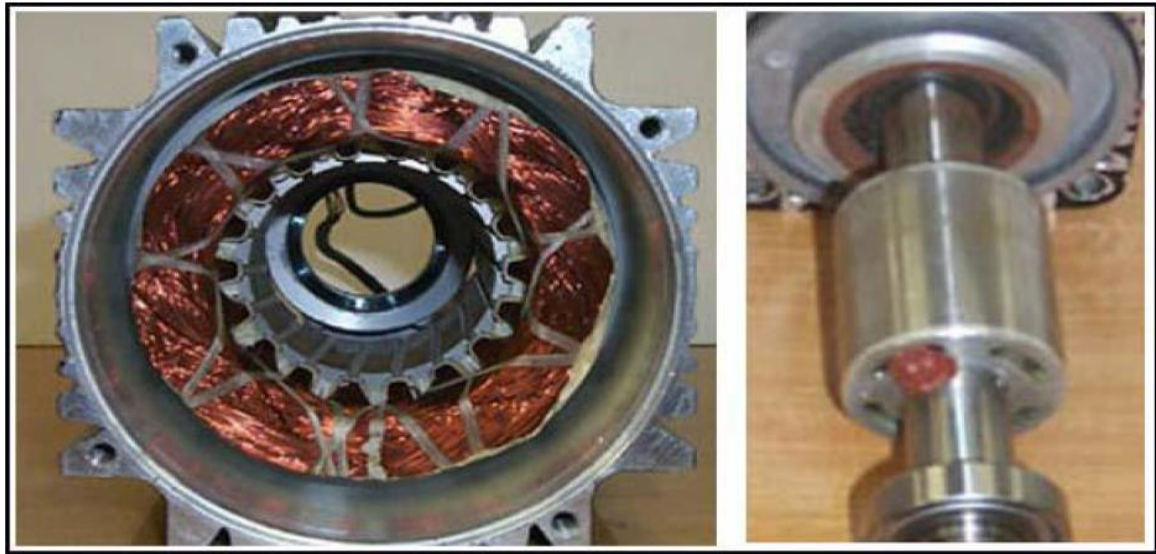
Il est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est logé dans les encoches creusées dans le circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer.

Il est généralement construit en tôle à base d'alliage fer-silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée [14], [17].

#### I.9.2 Rotor

Les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternants pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f-é-m) alternatives [14], [17]. L'interaction des champs rotorique et statorique donne naissance au couple électromagnétique.

La Figure I.8 représente les deux parties (Stator et Rotor) de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) [17].



Stator

Rotor

Figure I.8 Stator et rotor de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP).

### I.10 Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [18].

- ✓ Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [19].
- ✓ Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [20].

La machine étudiée est un moteur, il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. Plus le couple sur l'arbre est élevé plus l'angle de décalage polaire est plus grand. Le rotor décroche du flux tournant dès que cet angle dépasse  $90^\circ$ . La vitesse de rotation du rotor est égale à

la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator. La caractéristique du couple-angle électrique est illustrée dans la figure suivante peut dans ce contexte gagner en puissance massique où l'on augmente la densité de courant [21].

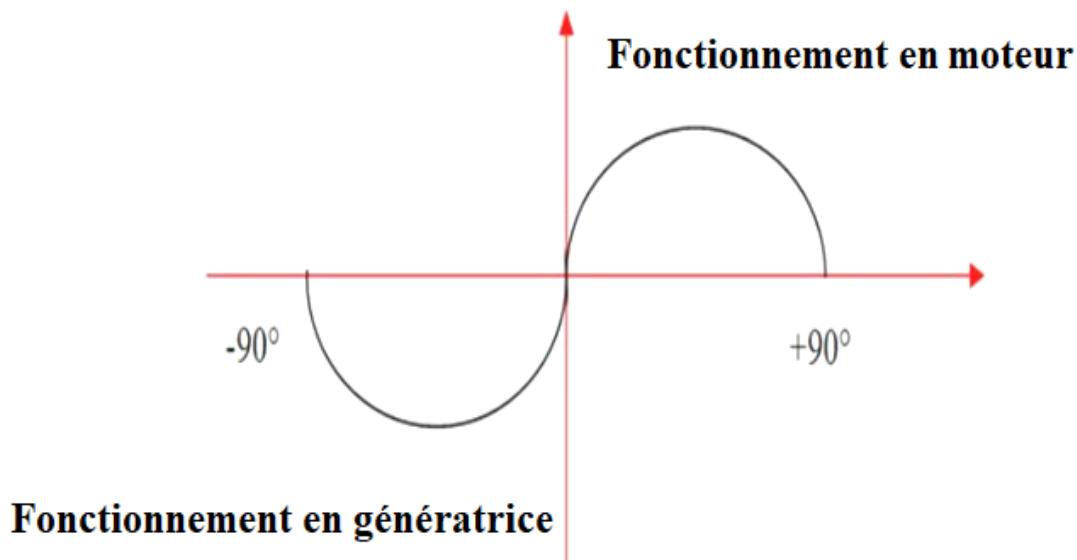


Figure I.9 Courbe de fonctionnement de la MSAP.

### I.11 Les différentes catégories de la MSAP :

Les catégories de machines synchrones à aimants permanents (structures des rotors pour une MSAP), sont classées d'après l'arrangement des aimants dans le rotor Figure I.10 [4], [21]:

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

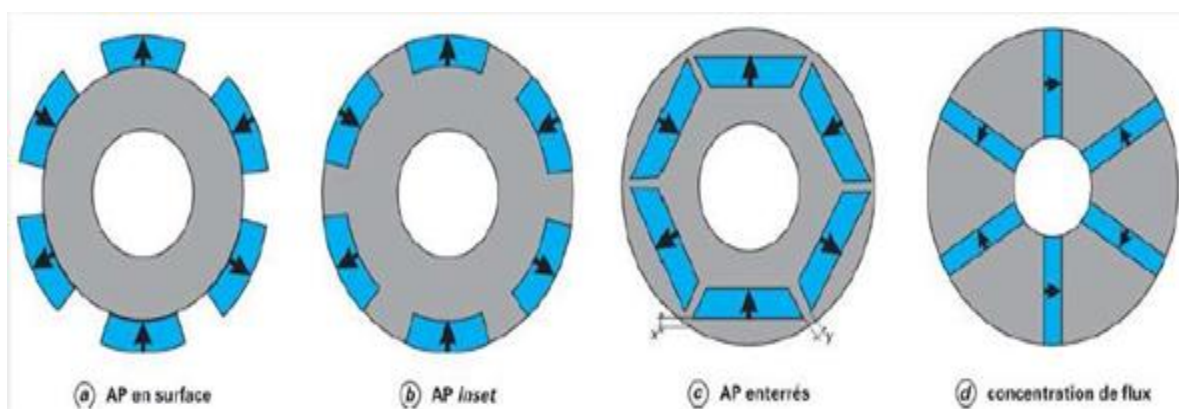


Figure I.10 Différentes catégories pour une MSAP

Les catégories des types de rotor d'une MSAP sont décrites comme suit :

### I.11.1 Machines synchrones à aimants permanents montés en surface

Les aimants permanents à aimantation radiale sont montés directement sur la surface, qui peuvent se décoller en grande vitesse. C'est pourquoi ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure est la plus simple à fabriquer et commander et réaliser et économique, cette machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses [21], [22].

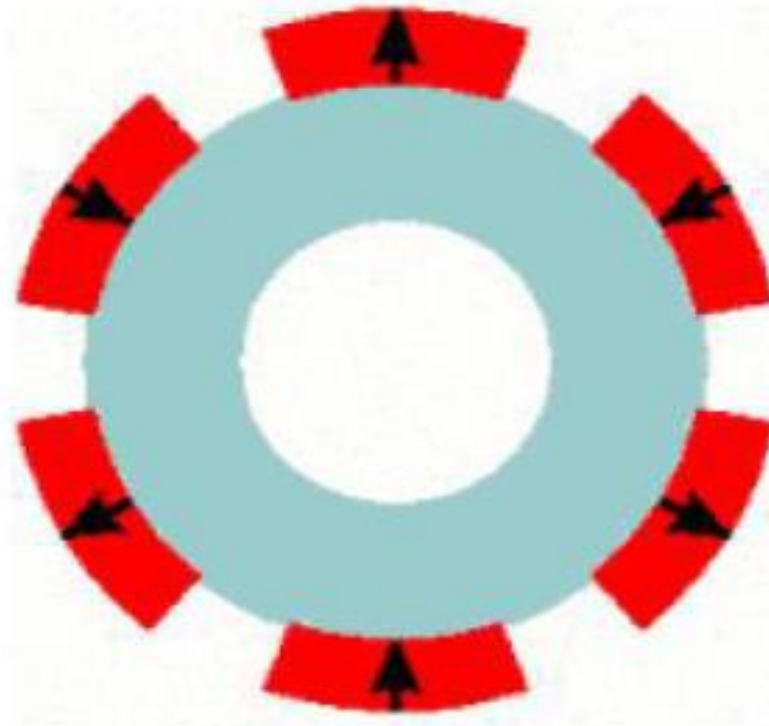
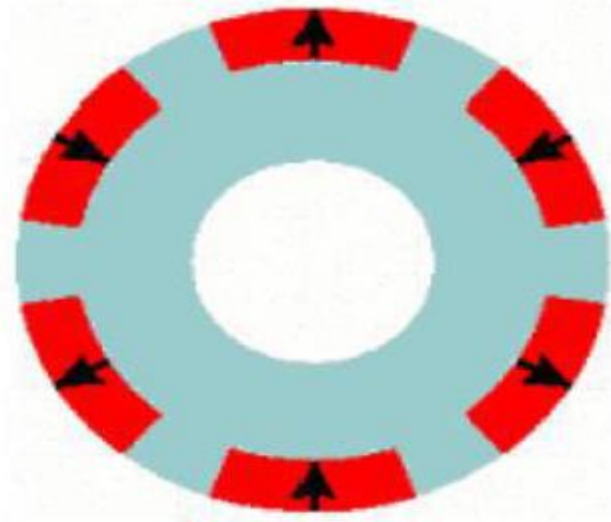


Figure I.11 Machine synchrone à aimants permanents montés en surface

### I.11.2 Machine synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI)

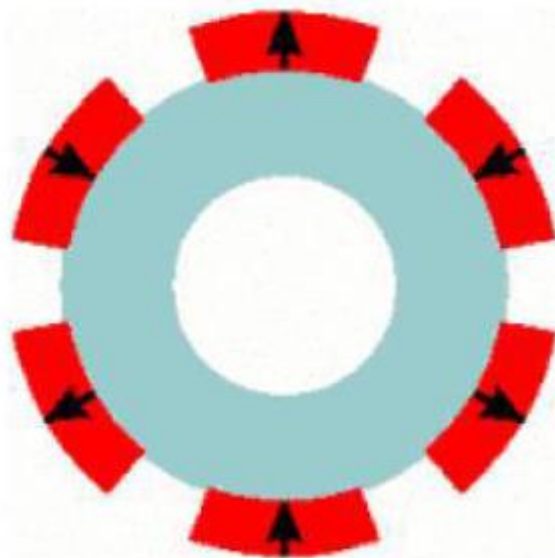
On entaille des encoches dans le rotor pour recevoir les aimants à aimantation radiale (assemblage mécanique). Les parties de fer entre les aimants permanents sont appelées des espaces acs inter polaires qui créent une saillance au rotor. Les caractéristiques de cette structure Protège les aimants de la force centrifuge et aussi utilisées en gammes de très hautes Vitesses [21], [22].



**Figure I.12: Machine synchrone à aimants permanent insérés**

### **I.11.3 Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE)**

Le principe de Cette structure les aimants permanents montés en surface de fer, en fait la disposition à l'intérieur, qui aussi augmenter la saillance plus élevée que cela à aimants insérés (couple du rotor) .Cette configuration Protège les aimants de la force centrifuge C'est pourquoi, Il est utilisées différent applications à grandes vitesses [21], [22].



**Figure I.13 : Machine synchrone à aimants permanent enterrés**

#### I.11.4 Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC)

Cette structure est déduite ainsi que les aimants permanents augmentés en surface. Généralement les pièces polaire placées en acier doux, que veut dire le contrôler de la forme de la f.e.m au stator en agissant sur la pièce cela se fait les pièces polaires, leur utilisation de la machine pour des hautes Vitesses et des couples important [21], [22].

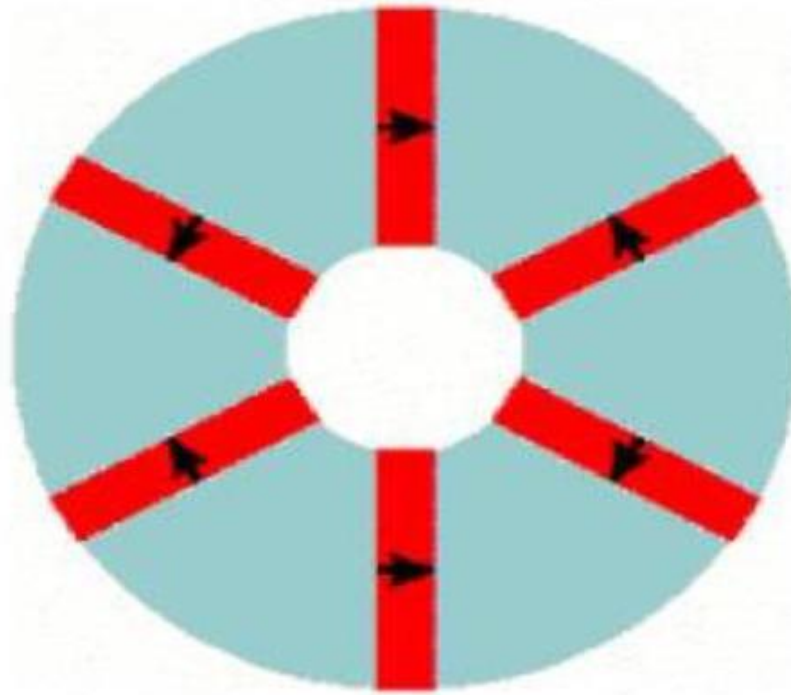


Figure I.14 Machine synchrone à aimants permanent chapeautés

#### I.12 Les avantages et les inconvénients de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines ainsi que des inconvénients [23].

##### I.12.1 Avantages

- ✓ Puissances massives importantes et élevées.
- ✓ capacité à contrôler le facteur de puissance.
- ✓ vitesse constante quelle que soit la charge.
- ✓ mécaniquement plus stable grâce à une construction usinée de manière synchrone avec entrefers.
- ✓ Absence de contacts glissants.
- ✓ grande fiabilité.

### I.12.2 Inconvénients

- ✓ Coût élevé des aimants.
- ✓ Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- ✓ Ne démarre pas automatiquement.
- ✓ Le coût production d'un kilowatt est généralement plus élevé.
- ✓ Le coût d'entretien élevé.
- ✓ La vitesse ne peut pas être régulée.
- ✓ Ondulations de couple.
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure.

### I.13 Les domaines d'application de la MSAP

Nombreuses utilisations des MSAP qui imposent un place dans une large gamme des différentes plages de puissance mais les principaux sont résumés [22], [23] :

- ✓ Industrie.
- ✓ Disque Dur.
- ✓ vie publique.
- ✓ Programmeur Mécanique.
- ✓ Médicale.
- ✓ Propulsion navale.
- ✓ Voiture électrique (Toyota Prius).
- ✓ Recherche et exploration.
- ✓ Transport.
- ✓ Domestique.
- ✓ servomoteurs.

### I.14 Différents types d'alimentations de la MSAP

Il existe deux types de convertisseurs servant à alimenter la MSAP :

- ✓ Le premier type est le cycloconvertisseur qui est directement relié au réseau alternatif. Il a l'inconvénient d'avoir une fréquence des tensions de sortie relativement basse, ce qui limite la vitesse de rotation de la machine, et de nécessiter un nombre élevé de composants et une commande relativement complexe [1].
- ✓ Le deuxième type de convertisseur alimente la machine à partir d'une source de tension ou de courant continu (onduleurs de tension ou commutateurs de courant).

### I.14.1 Alimentation par commutateur de courant

Dans ce type d'alimentation (Figure. I.15) le convertisseur associé au moteur est alimenté par une source de courant continu. Le convertisseur statique peut, grâce à l'ouverture et à la fermeture des interrupteurs, aiguiller ce courant séquentiellement dans les enroulements statoriques de la machine, de telle sorte que son amplitude soit fixée par le courant d'alimentation et que sa fréquence soit proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine [1].

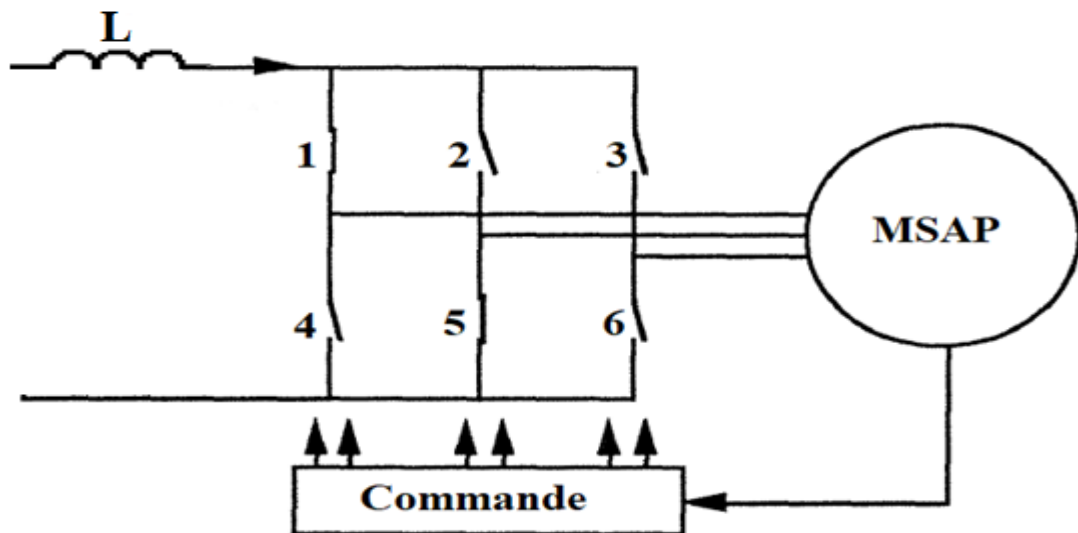


Figure I.15 Alimentation par commutateur de courant

### I.14.2 Alimentation par un onduleur de tension

Les onduleurs de tension permettent d'imposer aux enroulements statoriques de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglables en agissant sur la commande des interrupteurs du convertisseur statique (G.T.O.- Transistors bipolaires, MOSFET, IGBT, .... ) [1].

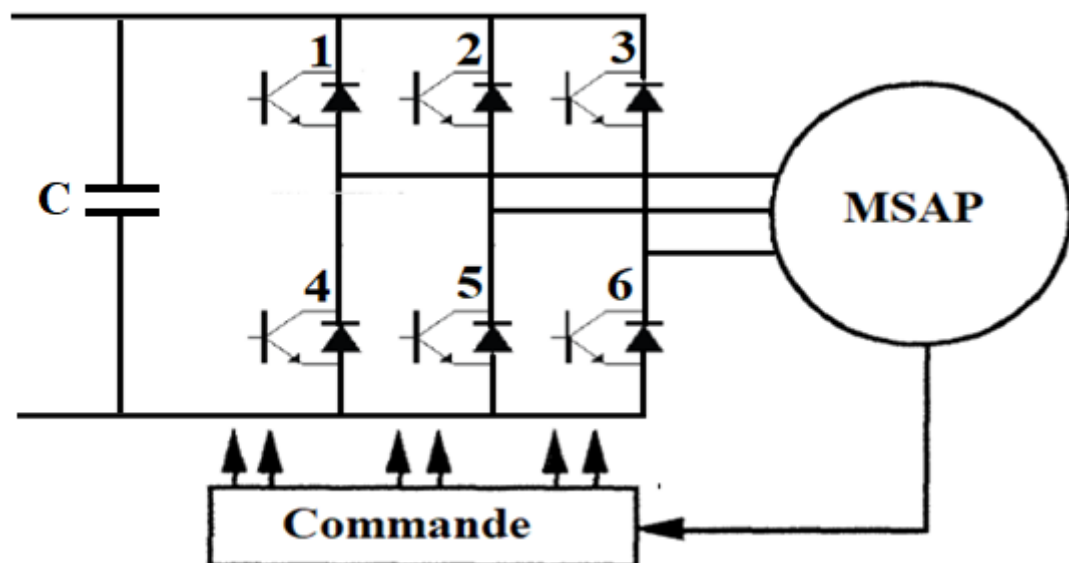


Figure I.16 Alimentation par un onduleur de tension.

## I.15 Techniques de commande de la MSAP

Dans la littérature existent plusieurs méthodes pour commander la machine synchrone à aimant permanent dans cette nous avons cité quelques méthodes parmi-elles :

### I.15.1 Commande scalaire

La commande scalaire est la plus ancienne technique de commande pour les machines à courant alternatif, elle est caractérisée par sa simplicité à implanter, sa simple structure, qui est basée sur le contrôle de flux statorique qu'il faut le maintenir constant.

Les stratégies de contrôle du flux peuvent être directes nécessitent un régulateur de flux et donc un estimateur ou un observateur de ce dernier, ou indirectes n'utilise pas de régulateur de flux. Elle consiste à maintenir le flux constant par l'intermédiaire d'une relation liant la pulsation statorique et les grandeurs électriques de commande (tension et courant de la MSAP) [4].

### I.15.2 Commande vectorielle (CV)

La commande vectorielle a été établie au début des années 70 par F. Blaschke, L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu (MCC), c'est-à-dire un modèle linéaire et un commande séparé, [4], cette commande c'est l'objectif par la suite de notre étude.

### I.15.3 Commande directe de couple (DTC)

Le contrôle direct du couple (DTC) a été introduit par I.TAKAHASHI en 1985 à partir de la méthode du flux orienté et du principe du moteur à courant continu. Il a proposé de remplacer le découplage à travers la transformation vectorielle par un contrôle non linéaire tel que les états de commutation de l'onduleur soient imposés à travers un pilotage indépendant du flux statorique et du couple électromagnétique du moteur [4].

## I.16 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord présenté brièvement les différents types des machines synchrones en particuliers les moteurs synchrones. Ensuite, nous avons établi un aperçu général sur la machine synchrone à aimant permanent nous présentons la définition, les aimants permanents, la description, la constitution, principe de fonctionnement et les différents types du rotor de la MSAP. Nous avons également présentés les avantages, les inconvénients et les domaines d'application de la MSAP et enfin nous avons terminé ce chapitre par les différents types d'alimentation et de commande de la MSAP.

Dans le chapitre suivant, nous traiterons le modèle de la MSAP dans le repère triphasé (abc), repère biphasé et les équations d'états ainsi le modèle de l'onduleur de tension à deux niveaux.

# *Chapitre II*

Modélisation de l'association MSAP-  
Onduleur de tension

## II.1 Introduction

Les machines électriques sont, en général, modélisées par des équations non linéaires.

Ce non linéarité est dû aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent du temps. Un changement de variable est souvent utilisé afin de diminuer la complexité de ce modèle dynamique, par la réduction du nombre de variables et l'élimination de la position du rotor dans les coefficients des équations différentielles. Dans ce cas, les conditions du régime permanent peuvent être déterminées beaucoup plus facilement et l'analyse de stabilité se fait plus aisément, ainsi que la synthèse du contrôle.

Ce chapitre traite la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dans un repère triphasé (abc), dans un repère biphasé à l'aide de la transformation de Park (dq), puis le modèle sous forme d'équation d'états de la MSAP sera présenté ainsi la modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux et son contrôle à l'aide de la technique MLI et à la fin des résultats des simulations seront présentés et interprétés pour valider le modèle de la MSAP pour deux types d'alimentations de la MSAP (Réseau électrique triphasé équilibré et onduleur de tension).

## II.2 Modélisation de la MSAP

La modélisation est un système physique et implique la représentation mathématique de son comportement, et la plus utilisée pour réaliser le comportement de la MSAP, et est un processus qui consiste à représenter les données de la MSAP sous une forme qui facilite l'analyse et l'interprétation. Cette méthode est nécessaire car la voie de simulation permet une bonne connaissance de son modèle dynamique et aussi est dépendant de la méthode que l'on appelle « CEMC » des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés, le système de CEMC est représenté par des bobinages du stator de la machine (a, b, c) par circuits électriques comme les (inductances, résistances) et les couplages magnétiques d'une part (flux magnétique) et aussi la prise en compte de l'équation mécanique (calcul du couple électromagnétique). Ce processus permet d'adapter la machine MSAP à des contextes variés et d'optimiser ses performances. La modélisation d'un moteur synchrone à aimants permanents est identique à celle d'une machine synchrone classique sauf que l'excitation en courant continu attachée au rotor est remplacée par le flux de l'aimant [3].

## II.3 Hypothèses simplificatrices

Le modèle établi lors de l'exploitation du système est basé sur des phénomènes physiques et peut être pris en compte partiellement ou totalement. Pour un grand nombre d'hypothèses, le modèle sera simple.

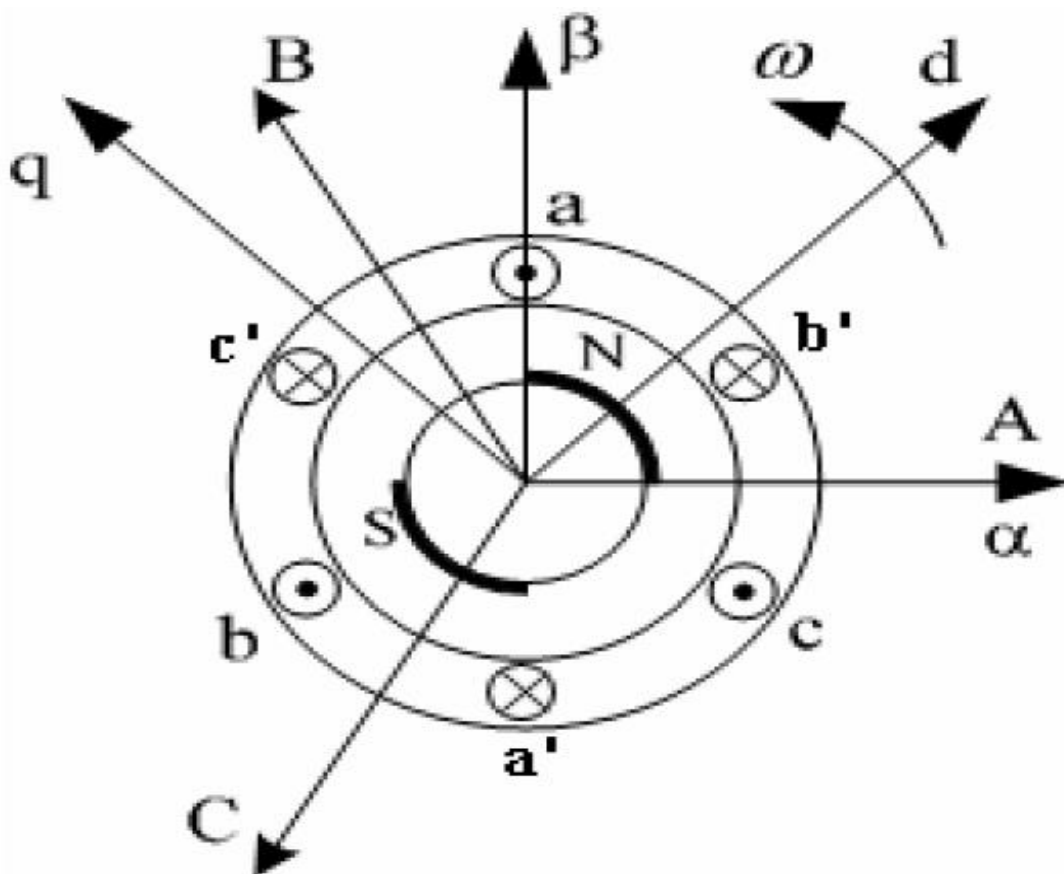
Dans ce cas, pour établir le modèle mathématique nous devons nous tenir compte de quelques hypothèses simplificatrices suivantes présentées ci-dessous [7], [8] :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé, ce qui fait que le flux magnétique est exprimé en fonction linéaire du courant de phase. La saturation magnétique ne sera pas considérée dans nos équations.
- L'effet de la température sur les résistances est négligeable, ainsi que l'effet de peau, qui augmente les résistances et réduit les inductances.
- L'hystérésis et les pertes par courants de Foucault dans les composants magnétiques ne sont pas prises en compte.
- La distribution des forces électromotrices, le long de l'entrefer est supposée sinusoïdale.
- La symétrie de la machine.

## II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

### II.4.1 Modélisation de la MSAP dans le repère triphasé "abc"

La MSAP est représentée à la Figure II.1 par ses trois enroulements statoriques dans l'espace électrique [4], [9], [24] :



**Figure II.1** Schéma de la Modèle de la machine synchrone dans le repère triphasé.

La modélisation d'une MSAP défini trois types d'équations : électrique, magnétique et électromagnétique [3].

### a. Equations électriques

Les équations électriques triphasées c'est-a dire comprend le fonctionnement de la machines dans un repère lié des tensions et des flux et des courants statoriques, sont écrits avec les notations vectorielles comme suite :  $[V_s] [\varphi_s] [i_s]$

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices citées précédemment, les équations de la MSAP s'écrivent comme suit [4], [25], [26], [27] :

Les équations de la tension statoriques sont données par :

$$[V] = [R]. [I] + \frac{d}{dt} [\varphi] \quad (\text{II.1})$$

### b. Equations magnétiques

Les équations du flux statoriques (équations magnétiques) peut être exprimé sous forme matricielle comme suit [4], [25], [26], [27] :

$$[\varphi] = [L][I] + [\varphi_f] \quad (\text{II.2})$$

Avec:

$$[V] = [V_a \ V_b \ V_c]^T \quad : \text{Vecteur tension statorique}$$

$$[I] = [I_a \ I_b \ I_c]^T \quad : \text{Vecteur courant statorique}$$

$$[\varphi] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T \quad : \text{Vecteur de flux statorique}$$

$$[\varphi_f] = [\varphi_{af} \ \varphi_{bf} \ \varphi_{cf}]^T \quad : \text{Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice Résistance statorique.}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice Inductrice statorique.}$$

$$[\varphi_f] = \begin{bmatrix} \text{Cos}(\theta) \\ \text{Cos}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{Cos}\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad : \text{Vecteur flux engendré par l'aimant}$$

Où:

$\varphi_f$  : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

$\theta$  : Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé défini par :

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

$$\text{Et : } \omega = p \cdot \Omega_r \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\omega$  : La pulsation électrique.

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

$\Omega_r$  : La vitesse de rotation de la MSAP (rotor).

Les équations électriques doivent être complétée par les expressions du couple électromagnétique et de la vitesse mécanique.

### c. Equation du couple électromagnétique

La connaissance du couple électromagnétique de la machine est importante pour l'étude de la machine et sa commande et définir l'équation mécanique qui prend la forme suivante l'équation [4]:

$$C_{em} = [i_s]^T \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{d[L_{ss}]}{d\theta} [i_s] + \frac{1}{2} \frac{d\varphi_{sf}}{d\theta} \right] \quad (\text{II.5})$$

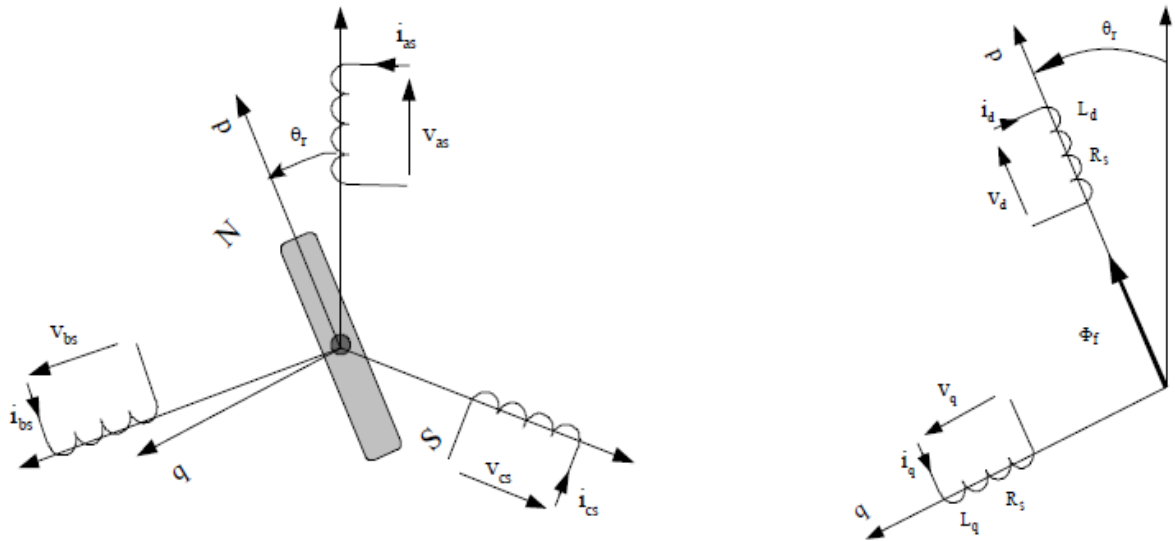
Nous remarquons que le système présenté par l'équation (II.1) engendre des équations fortement non-linéaires et couplées. Pour simplifier ce modèle, la majorité des travaux dans la littérature préfèrent utiliser une transformation vers un système biphasé.

#### II.4.2 Application de la transformation du park

La transformation de Park est souvent appelée transformation à deux axes. Physiquement, l'application de cette transformation à la MSAP correspond à une transformation des trois bobines (statoriques) à deux bobines équivalentes reprenant les mêmes considérations ou aspects en termes de f.m.m, de flux, de couple ou du moins une image qui leur sera parfaitement proportionnelle [28], [29].

Il s'agit essentiellement de convertir les signaux triphasés (a, b et c) en deux signaux continus (d, q), l'axe direct (d) et l'axe de quadrature arrière (q). Ce passage mathématique transforme trois bobines fixes du stator décalées de  $\frac{2\pi}{3}$  en deux bobines virtuelles équivalentes sur le rotor, décalées de  $\frac{\pi}{2}$ . L'aimant se situe sur l'axe d [9].

À un système triphasé quelconque (a, b, c) on associe un système biphasé (d, q), comme le montre la Figure II.2



**Figure II.2** Représentation de la MSAP dans les repères triphasé (a, b, c) et diphasés (d-q).

Nous définissons une matrice unique de transformation pour les courants, les tensions et les flux.

Elle conserve l'invariance de la puissance et est orthogonale. De plus, on fait l'hypothèse que toutes les grandeurs homopolaires sont nulles.

La transformation qui traduit ce passage du système triphasé (a, b, c) au système biphasé (d,q) est donnée par [30]:

- La transformation de Park est définie comme suit :

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)][X_{abc}] \quad (II.6)$$

- La matrice de transformation de Park est donnée :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

En appliquant la transformation (II.8) au système (II.1), nous aurons :

$$[V_{dq}] = [P][V_{abc}] \quad (II.8)$$

$$[I_{dq}] = [P][I_{abc}] \quad (II.9)$$

$$[\varphi_{dq}] = [P][\varphi_{abc}] \quad (II.10)$$

La transformation de Park inverse est définie par :

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)^T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

### II.4.3 Modélisation de la MSAP dans le repère biphasé 'd q'

Le schéma de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dans le repère biphasée, issue de la transformation de Park est illustré par la Figure II.3 [31].

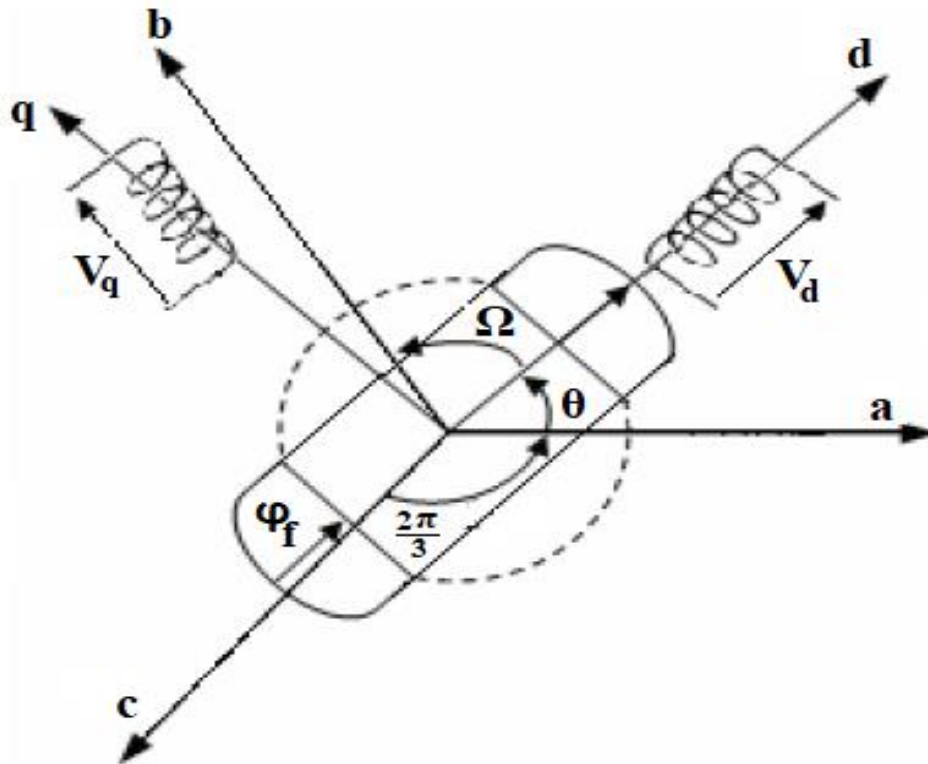


Figure II.3 Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d, q).

#### a. Equations électriques et magnétiques en dq

En appliquant la transformation (II.7) au système (II.1), nous aurons :

$$[V_{dq}] = [P(\theta)][V_{abc}] = [P(\theta)][R][I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \quad (\text{II.12})$$

Ensuite, nous basons sur (II.12) et (II.2), nous obtenons :

$$[V_{dq}] = [P(\theta)][R][P(\theta)]^{-1}[I_{dq}] + [P(\theta)][P(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} [\varphi_{dq}] + [P(\theta)] \left( \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) [\varphi_{dq}] \quad (\text{II.13})$$

Du moment que [R] est diagonale, alors :

$$[P(\theta)][R][P(\theta)]^{-1} = [R] \quad (\text{II.14})$$

Nous utilisons :

$$[P(\theta)] \left( \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Et à l'aide de l'équation (II.14), nous pouvons déduire les équations de Park sous forme vectorielle comme suit :

$$[V_{dq}] = [R][I_{dq}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{dq}] + P\Omega_r [\varphi_{dq}] \quad (\text{II.16})$$

Ou :

$$[V_{dq}] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix},$$

$$[I_{dq}] = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix},$$

$$[\varphi_{dq}] = \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix},$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}.$$

D'ou les équations électriques du modèle dq de la MSAP après la transformation de Park sont données par :

$$\begin{cases} V_d = RI_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega \varphi_q \\ V_q = RI_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Et la transformation (II.7) appliquée à (II.2) nous trouvons :

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

D'ou les équations du flux du modèle dq de la MSAP après la transformation de Park sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$L_d, L_q$  : Les inductances d'axes directe et en quadrature

D'ou les équations du flux du modèle dq de la MSAP après la transformation de Park sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Nous reprenons les équations (II.17) et (II.20), précédente nous pouvons écrire le modèle de la MSAP en dq :

$$\begin{cases} V_d = RI_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - \omega L_q I_q \\ V_q = RI_q + L_q \frac{d}{dt} I_q + \omega(L_d I_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

### b. Equation du couple électromagnétique en dq

Selon la transformation du Park l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II.22})$$

Nous remplaçons  $V_d, V_q$  par leurs expressions dans l'expression (II.22) nous aurons :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left( \left( RI_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - \frac{d\theta}{dt} (L_q I_q) \right) I_d + \left( RI_q + L_q \frac{d}{dt} I_q + \frac{d\theta}{dt} (L_d I_d + \varphi_m) \right) I_q \right) \quad (\text{II.23})$$

$$P(t) = \frac{3}{2} \left( R(I_d^2 + I_q^2) + \left( L_d I_d \frac{d}{dt} I_d - \frac{d\theta}{dt} (L_q I_q I_d) \right) + \left( L_q I_q \frac{d}{dt} I_q + \frac{d\theta}{dt} (L_d I_d I_q + \varphi_f I_q) \right) \right) \quad (\text{II.24})$$

$$P(t) = \frac{3}{2} \left( R(I_d^2 + I_q^2) + (\varphi_d - \varphi_f) \frac{d}{dt} I_d - \frac{d\theta}{dt} (\varphi_q I_q) + \left( (\varphi_q) \frac{d}{dt} I_q + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d - \varphi_f) I_q + \varphi_f I_q \right) \right) \quad (\text{II.25}).$$

Nous trouvons à la fin :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left( R(I_d^2 + I_q^2) + I_d \frac{d}{dt} \varphi_d + I_q \frac{d}{dt} \varphi_q + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d) \right) \quad (\text{II.26})$$

- $\frac{3}{2} (R(I_d^2 + I_q^2))$ : Représente la puissance dissipée en pertes joules dans les enroulements du stator.
- $(I_d \frac{d}{dt} \varphi_d + I_q \frac{d}{dt} \varphi_q)$ : Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.
- $\frac{d\theta}{dt} (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d)$ : Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P\Omega_r = \omega \text{ et } P_{em} = C_{em} \omega$$

L'équation du couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_{em} = P(\varphi_d I_q - \varphi_q I_d) \quad (\text{II.27})$$

$$C_{em} = P \left( (L_d - L_q) I_q I_d + I_q \varphi_f \right) \quad (\text{II.28})$$

Les stratégies de commande modernes telle que la commande vectorielle (VC), et la commande directe du couple (DTC), sont de découpler les grandeurs électriques du moteur afin de disposer de variables de contrôle indépendantes [31], [32].

Cas particulier pour la machine à pôles lisses ( $L_d=L_q$ )

$$C_{em} = P\phi_f I_q \quad (\text{II.29})$$

### c. Equation mécanique

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique délivré par le moteur.

$C_r$  : Couple résistant.

$f$  : Coefficient de frottement.

$J$  : Moment d'inertie du moteur.

#### II.4.4 Modèle de la MSAP sous forme d'équation d'état

Pour présenter un modèle d'état il faut définir les tensions ( $V_d, V_q$ ), le flux, les courants statoriques ( $I_d, I_q$ ) et le couple  $C_r$  [32].

Nous prenons les tensions et le flux comme grandeurs de commande, les courants statoriques comme variables d'état et le couple résistant comme perturbation.

Nous pouvons écrire le système sous forme d'équations d'état :

$$[X] = [Y][X] + [Z][V] \quad (\text{II.31})$$

$[Y]$ : Matrice fondamentale qui caractérise le système.

$[X]$  : Matrice d'entrée.

$[V]$  : Vecteur de commande.  $[V] = [V_d \ V_q \ \phi_f]$

$[X]$  : Vecteur d'état.

$$[X] = [I_d \ I_q]^t$$

Donc :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega \frac{L_d}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega \frac{L_d}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix}, \quad [Y] = [Y_1] + \omega[Y_2] = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_d} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_d}{L_d} \\ \frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix}, \quad [Z] = [Z_1] + \omega[Z_2] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_q} \end{bmatrix}$$

La forme d'équation d'état est donnée comme suit :

$$[i] = ([Y_1] + \omega[Y_2])[I] + ([Z_1] + \omega[Z_2])[V]$$

Avec,

$$\begin{cases} C_{em} = P(I_q \phi_f + L_d I_q I_d - L_d I_q I_d) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - f \omega \end{cases}$$

A partir de (II.28), (II.30) et (II.32), le modèle de le MSAP dans le repère de Park peut être présenté par la Figure II.4.

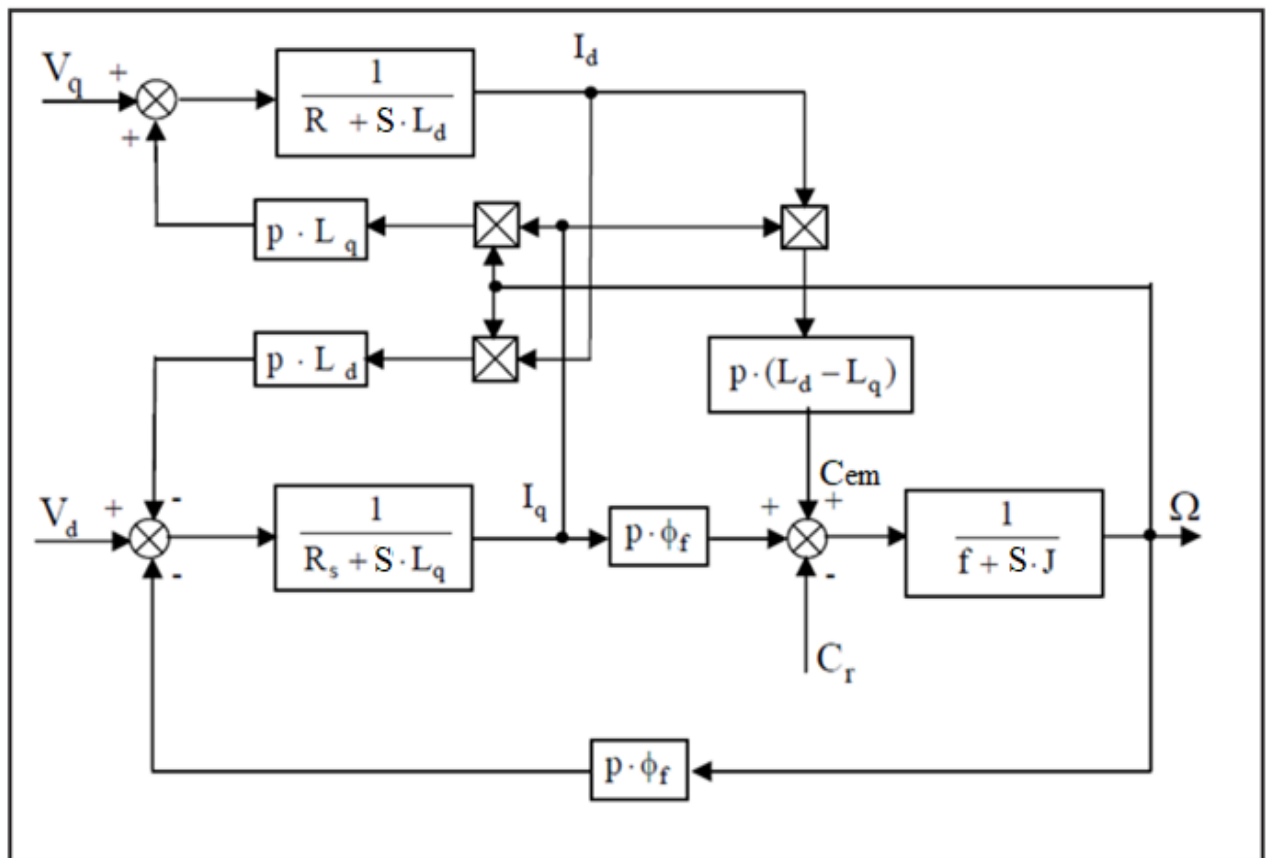


Figure II.4 Schéma de la MSAP dans le repère (d, q).

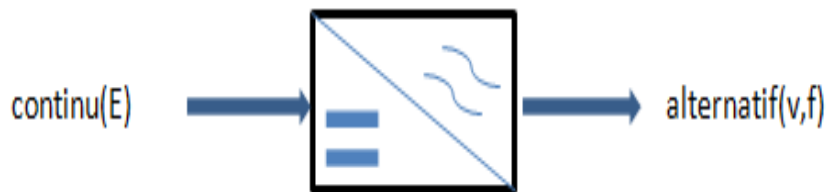
## II.5 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

### II.5.1 Définition de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de continue vers l'alternatif (DC/AC) qui alimenté par une source continue, est constitué de trois bras formé d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence, le convertisseur statique est commande par employée la stratégie (MLI).

Nous distinguons plusieurs types d'onduleurs [33]:

1. Selon la source :
  - Onduleurs de tension.
  - Onduleurs de courant.
2. Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc...).
3. Selon le nombre de niveaux (2,3, etc...).



**Figure II.5:** Schéma bloc d'un onduleur.

### II.5.2 Alimentations en tension d'un l'onduleur associé à un MSAP

La Figure II.6 s présente un schéma d'alimentation pour la MSAP par un onduleur de tension à deux niveaux que nous appelons le convertisseur statique

Avec :

$T_a$  et  $T_b$  Sont des transistors.

$$T_a = Th_1, Th_2, Th_3$$

$$T_b = Th_4, Th_5, Th_6$$

$S_a$  et  $S_b$  Sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que :

Si  $S_a = 1$ , l'interrupteur  $T_a$  est passant et  $T_b$  est ouvert.

Si  $S_b = 0$ , l'interrupteur  $T_a$  est ouvert  $T_b$  est o est passant.

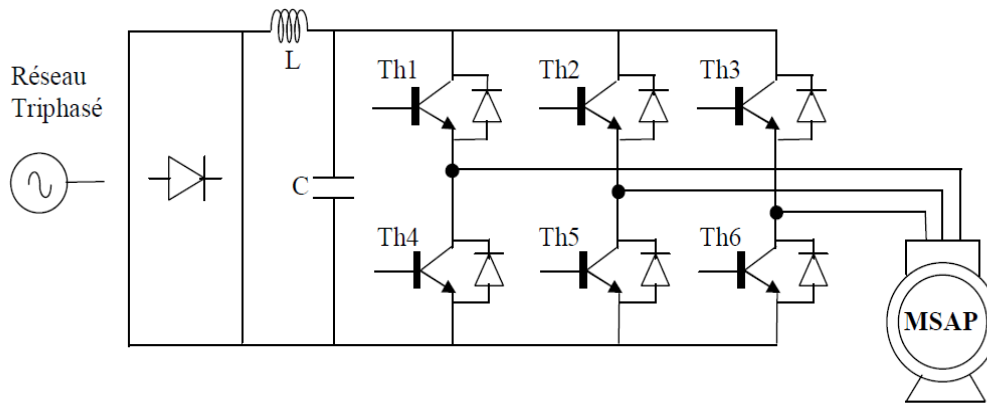


Figure II.6 Schéma de l'association MSAP-onduleur de tension à deux niveaux.

**II.5.3 Modélisation de l'onduleur de tension :**

L'onduleur de tension triphasé on obtient à six interrupteurs électroniques et on associés des transistors de types bipolaires, MOSFET ou IGBT et aussi des diodes en tête bêche, ou encore des thyristors équipés de circuit d'extinction en plus du dispositif d'amorçage, la source de tension continu est obtenue à partir d'un pont redresseur [34].

La Figure II.7 montre le schéma d'un onduleur de tension triphasé à niveaux.

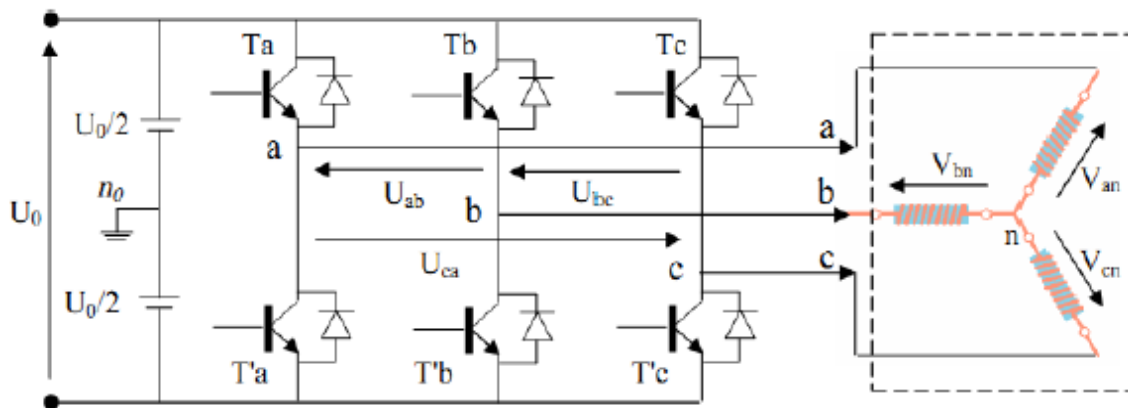


Figure II.7 Schéma d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

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

$$U_{ab} = V_{an} - V_{bn} = U_0(S_a - S_b) \tag{II.33}$$

$$U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = U_0(S_b - S_c) \tag{II.34}$$

$$U_{ca} = V_{cn} - V_{an} = U_0(S_c - S_a) \tag{II.35}$$

Les tensions  $V_{an}V_{bn}V_{cn}$  forment un système de tension triphasé équilibrée  $V_{an} + V_{bn} + V_{cn}=0$

Alors :

$$V_{an} = \frac{U_0}{3} (2S_a - S_b - S_c) \tag{II.36}$$

$$V_{bn} = \frac{U_0}{3} (2S_b - S_a - S_c) \tag{II.37}$$

$$V_{cn} = \frac{U_0}{3} (2S_c - S_a - S_b) \tag{II.38}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{II.39}$$

Il reste à déterminer les fonctions, celles-ci dépendent de la stratégie de commande de l'onduleur. L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. Ce convertisseur on intéressera dans de travail à la commande modulation de largeur d'impulsions (MLI).

### II.5.4 Commande par modulation de largeurs d'impulsions (MLI)

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques de l'onduleur servent à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine.

La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI en français et PWM ou Pulse Width Modulation en anglais) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe (en général une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct [35].

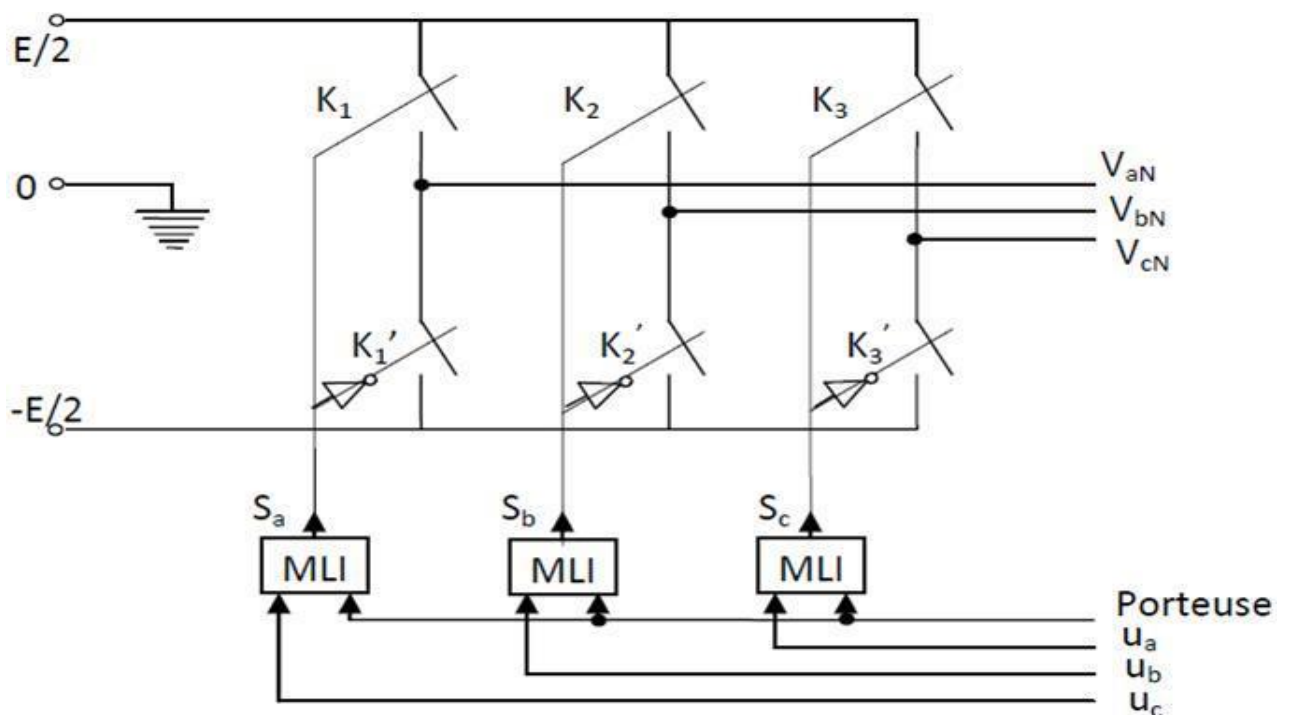


Figure II. 8 Schéma équivalent de l'onduleur commandé par la technique MLI.

Deux paramètres caractérisent cette commande :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{II.40})$$

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{II.41})$$

$m$  :  $L'$ indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence  $f_p$  de la porteuse et la fréquence  $f_r$  de la référence.

$r$ : Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante  $V_r$  à la valeur crête  $V_p$  de la porteuse.

## II.6 Résultats de simulation

Pour valider le modèle de la MSAP en dq étudié et modéliser de cette chapitre nous traduisons le modèle mathématique de la MSAP par pour deux régimes d'alimentation : Alimentation par réseau électrique équilibré et Alimentation par un onduleur de tension deux niveaux et pour différents fonctionnements (à vide, en charge et inversion de la sens de rotation).

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

Les paramètres de la MSAP sont indiquées à l'annexe A.

### II.6.1 Alimentation par un réseau triphasé équilibré

Les résultats de simulation présentés pour la MSAP pour un démarrage direct, alimentée un réseau électrique triphasé équilibré. Un démarrage à vide est effectué jusqu'à l'instant  $t = 0.5s$ , puis à  $t = 0.5s$  en appliquant un couple résistant  $C_r = 5 \text{ N.m}$  et en inversant le sens de rotation en charge à  $t = 1s$ , et enfin l'élimination de la charge à l'instant  $t = 1.5s$ .

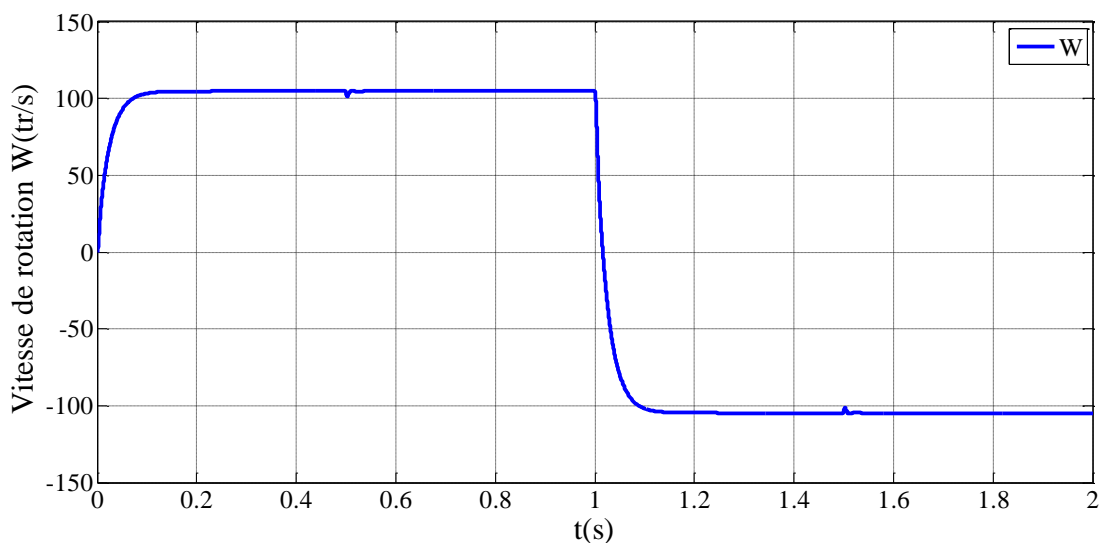


Figure II. 9 Vitesse de rotation.

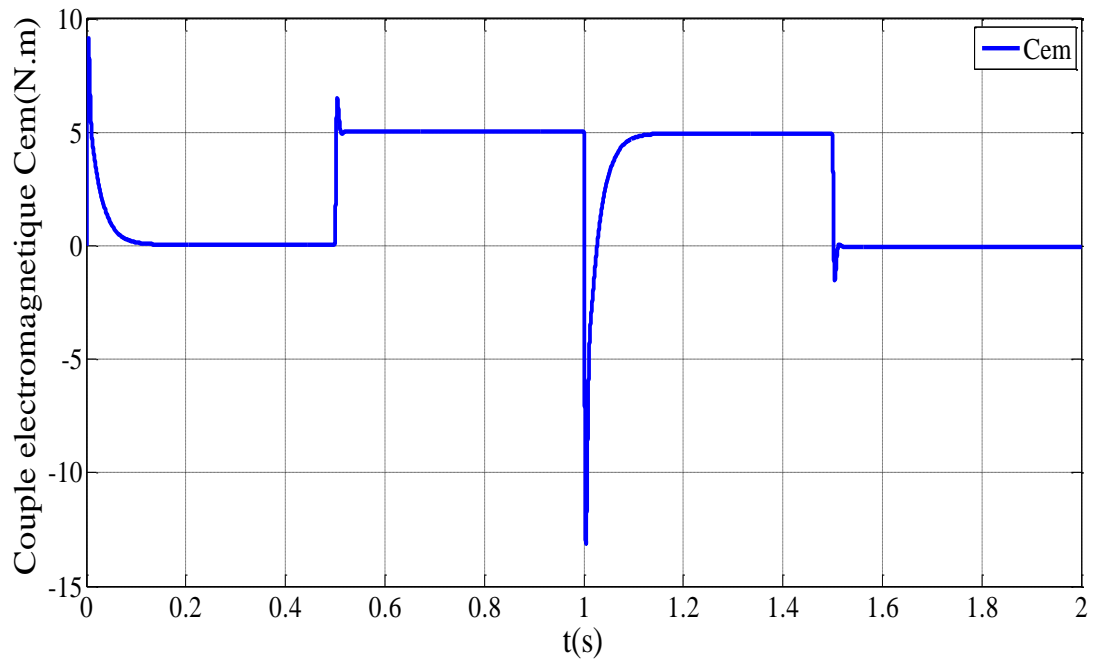


Figure II. 10 Couple électromagnétique.

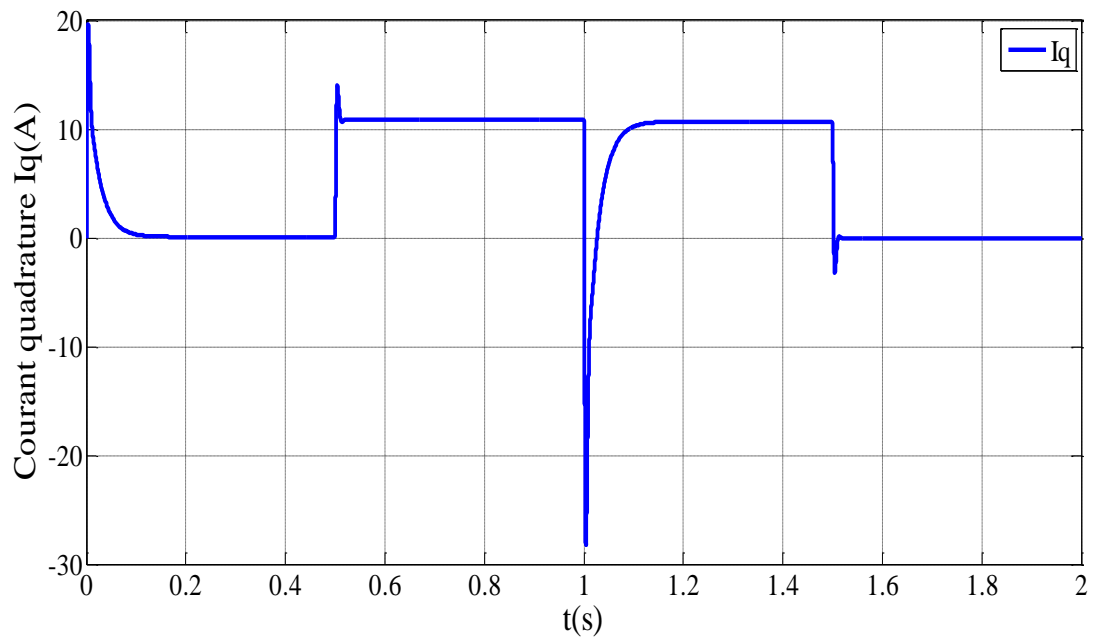


Figure II. 11 Courant quadrature.

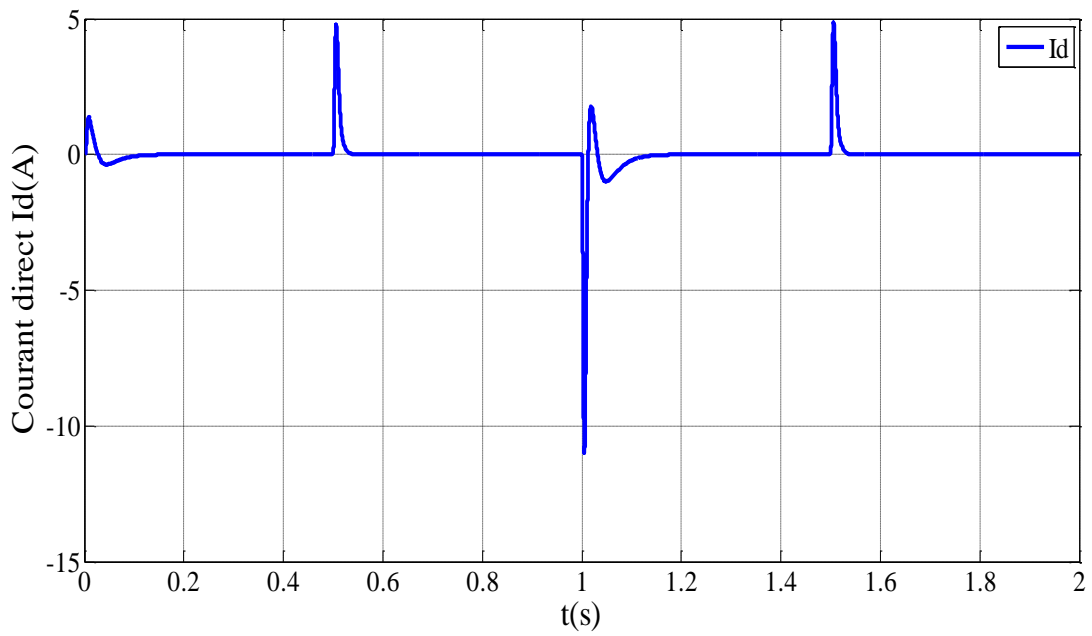


Figure II. 12 Courant direct.

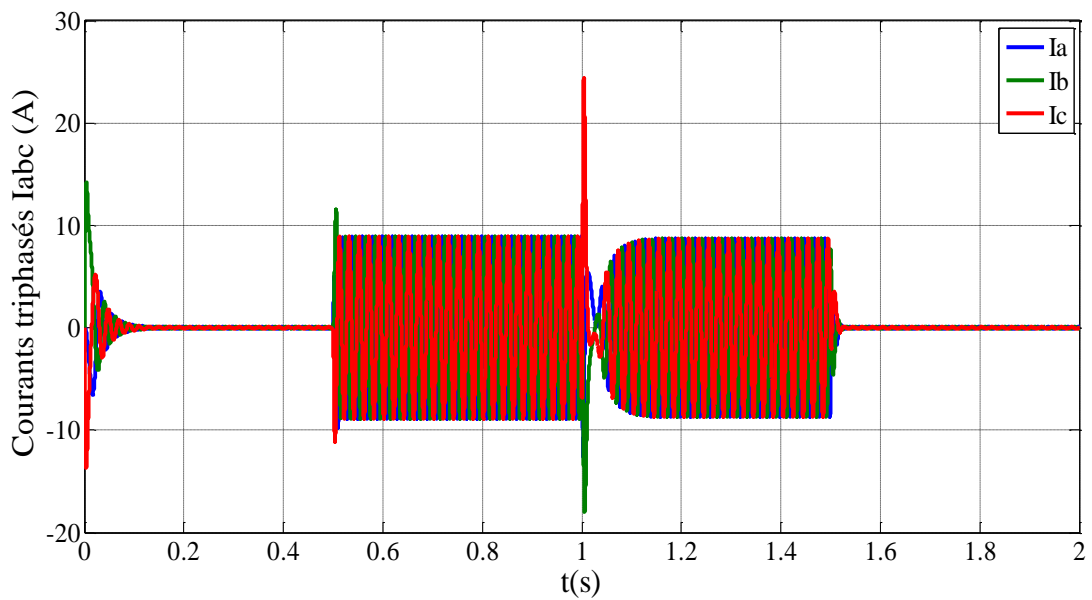


Figure II. 13 Courants triphasés des phases (a, b et c).

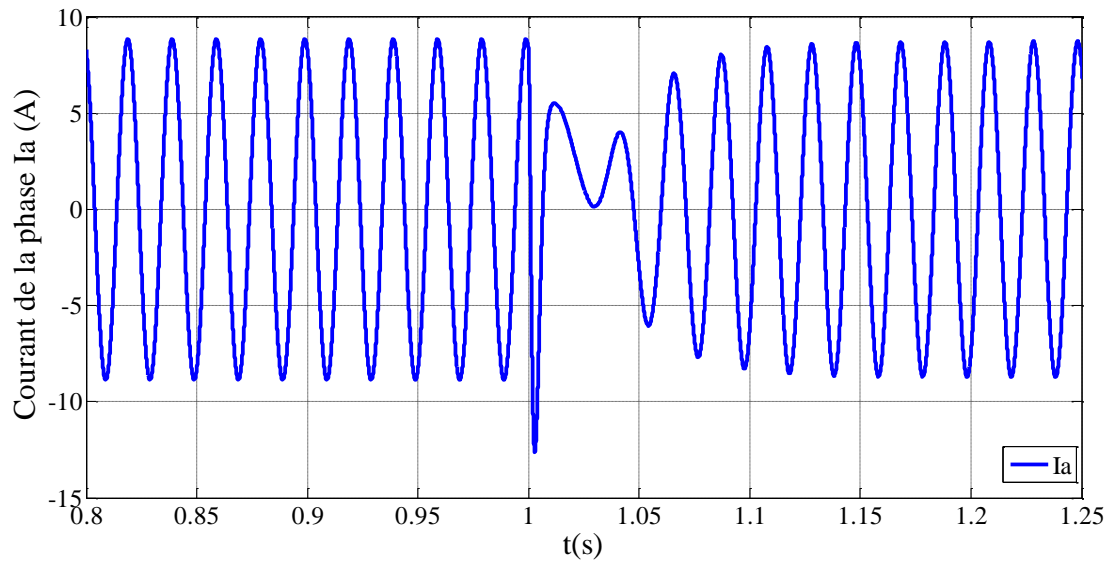


Figure II. 14 Courant de la phase a.

### II.6.2 Alimentation par un onduleur de tension

Les résultats de simulation présentés pour la MSAP pour un démarrage direct, alimentée à travers un onduleur de tension commandé par la technique MLI. Un démarrage à vide est effectué jusqu'à l'instant  $t = 0.5s$ , puis à  $t = 0.5s$  en appliquant un couple résistant  $C_r = 5 \text{ N.m}$  et en inversant le sens de rotation en charge à  $t = 1s$ , et enfin l'élimination de la charge à l'instant  $t = 1.5s$ .

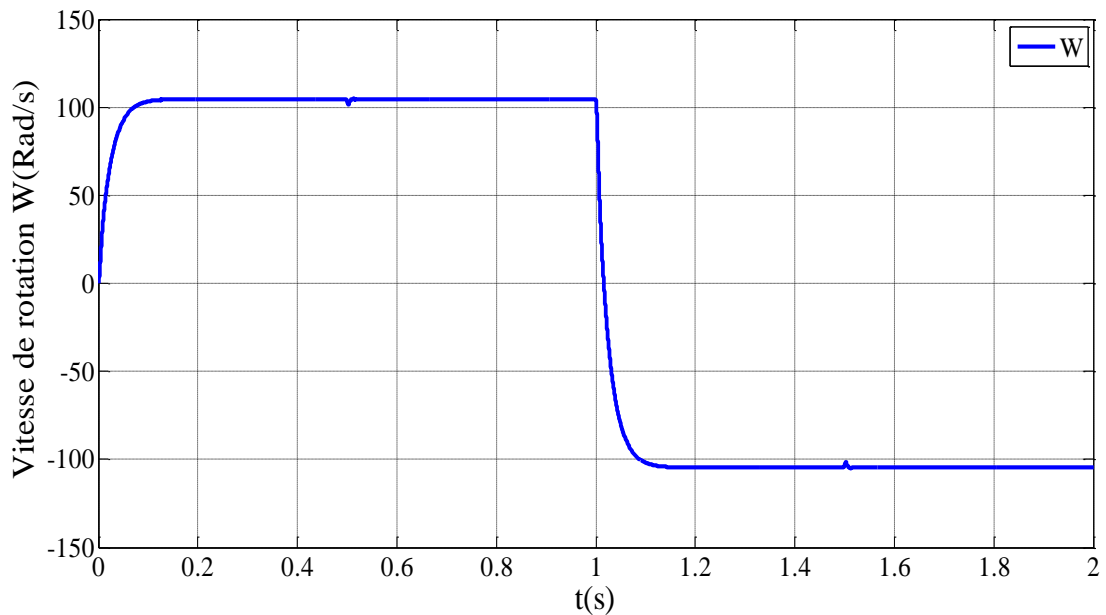


Figure II. 15 Vitesse de rotation.

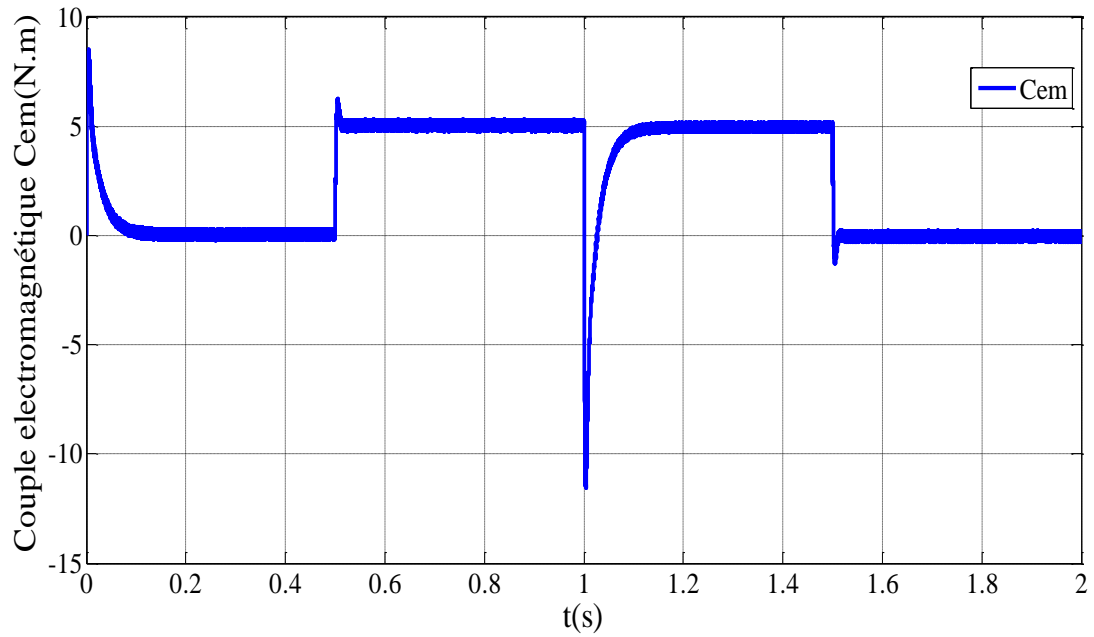


Figure II. 16 Couple électromagnétique.

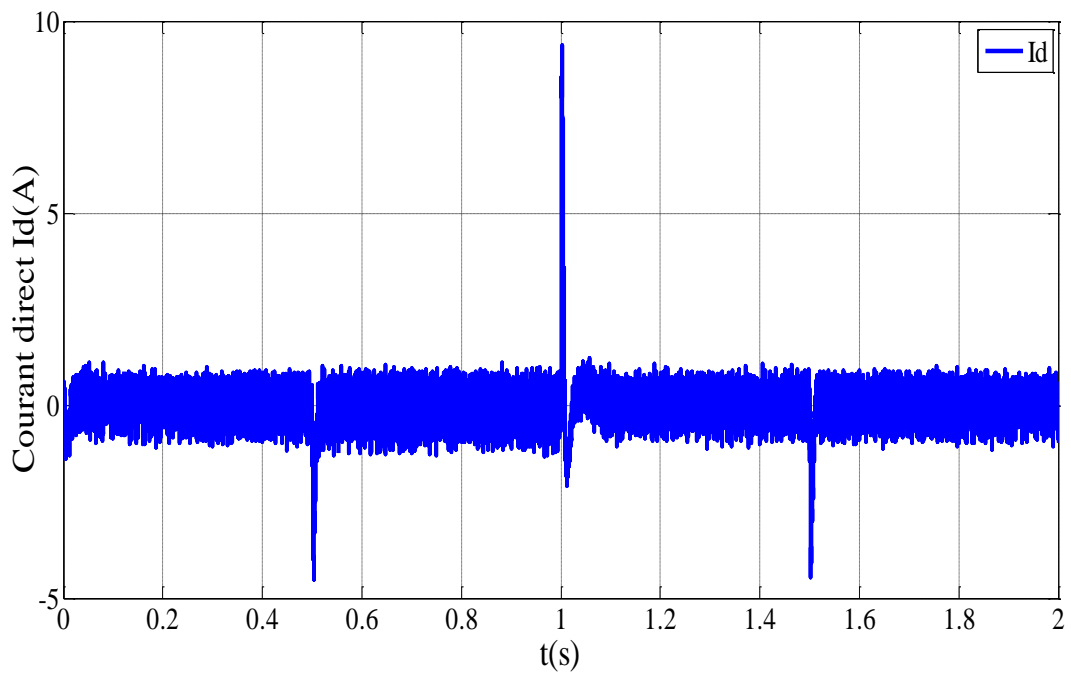


Figure II. 17 Courant direct.

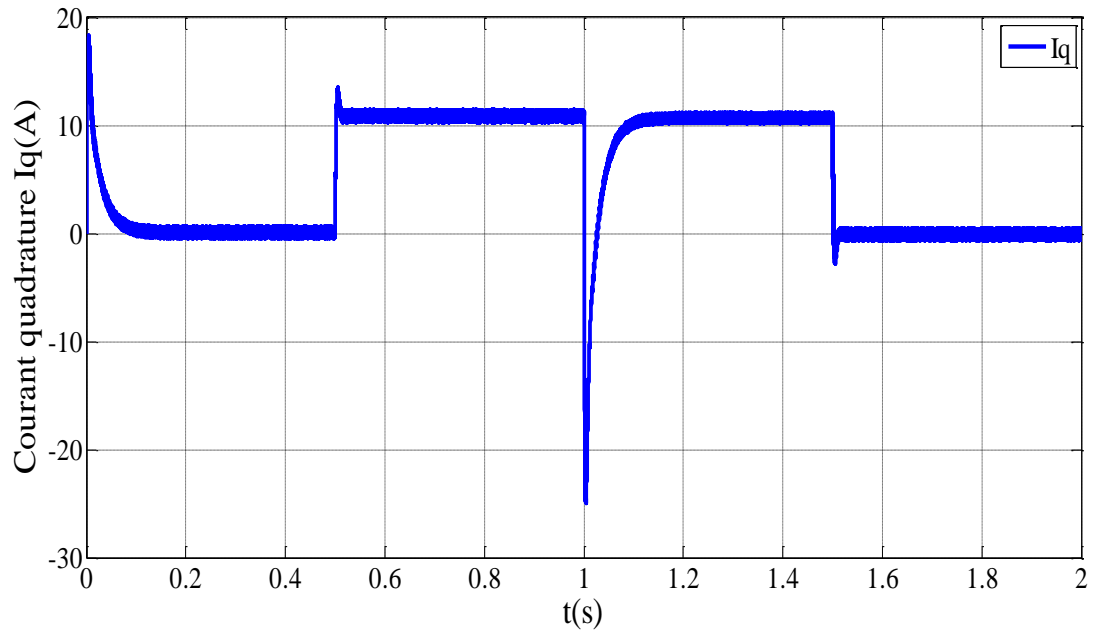


Figure II. 18 Courant quadrature.

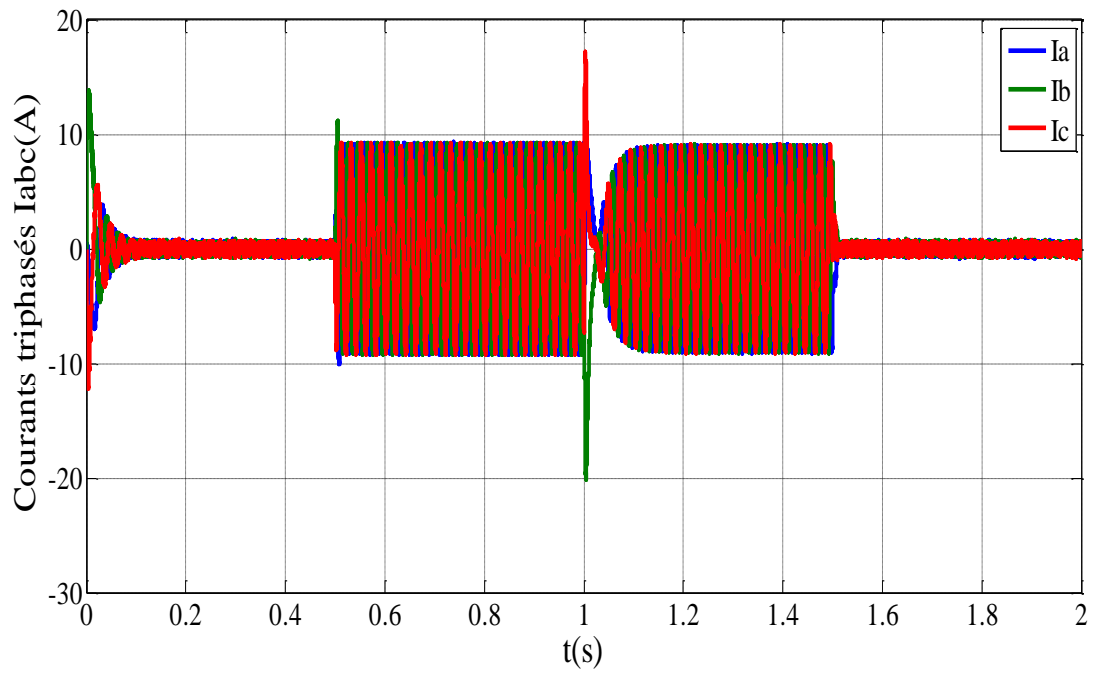


Figure II. 19 Courants triphasés des phases (a, b et c).

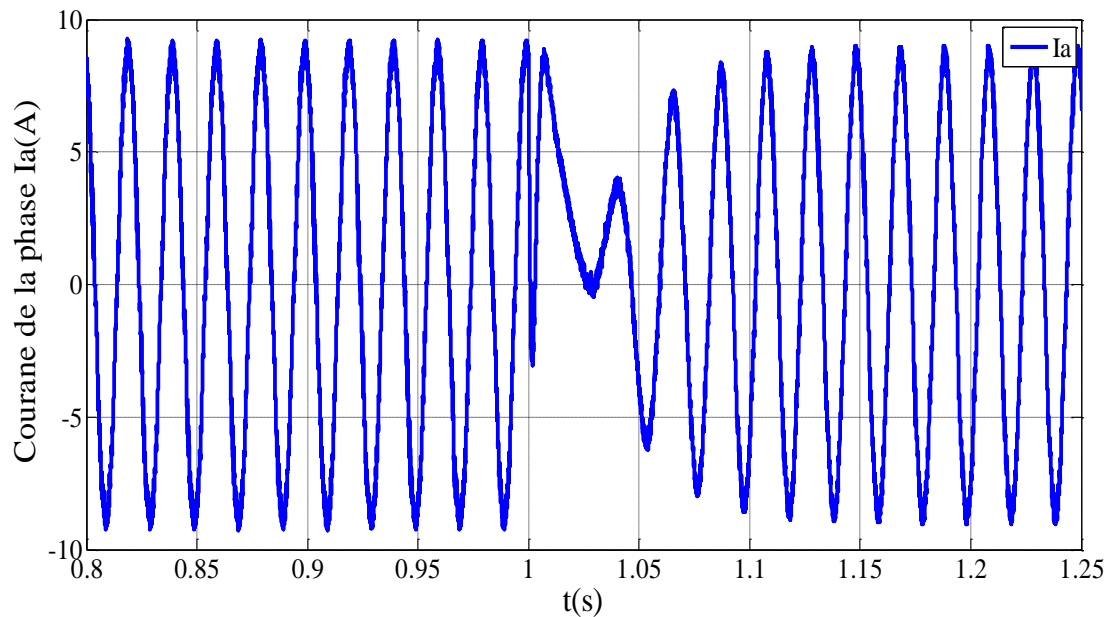


Figure II. 20 Courant de la phase a.

## II.7 Interprétation des résultats de simulation

Les Figures II.9, II.15, II.10, II.16, II.11, II.17, II.12, II.18, II.13, II.19 et II.14, II.20 représentent l'évolution des variables fondamentales de la MSAP, la vitesse de rotation, le couple électromagnétique, les composantes du courant directe et en quadrature du courant et, les courants triphasé 'a b c) et le courant de la phase a respectivement.

Nous constatons que les résultats obtenus du la MSAP alimenté par un réseau triphasé équilibré et de la MSAP alimenté par un onduleur sont similaires, sauf que la présence de l'onduleur engendre des ondulations qui affectent le fonctionnement de la machine, ces ondulations sont due au harmonique provenant de la nature non-linéaire de l'onduleur.

En fonctionnement à vide de la MSAP, nous notons un appel excessif du courant lors de la mise sous tension du moteur en régime transitoire qui ce stabilise pour donner lieu à une forme sinusoïdale d'amplitude constante.

La vitesse oscille dans le régime transitoire jusqu'à se stabilise au régime permanent à une valeur fixe qui correspond à la vitesse à la vitesse de synchronisme 104.7 rad/s (1000 tr/min).

Nous notons les oscillations du couple instantané lors de la mise sous tension. A la fin de la phase de démarrage, le couple s'annule puisque le moteur n'est pas chargé.

En charge, une perturbation du couple ( $C_r = 5 \text{ Nm}$ ), est appliquée à la MSAP (à l'instant  $t = 0.5\text{s}$  et  $t=1.5 \text{ s}$ ). Le couple électromagnétique se stabilise finalement à la valeur du couple de charge, évidemment nous observons une perturbation de la vitesse de rotation avant qu'il stabilise a nouveau à la vitesse de synchronisme de  $104.7 \text{ rad/s}$  ( $1000 \text{ tr/min}$ ).

Nous remarquons également une augmentation de l'amplitude des courants statoriques.

Selon l'équation du couple électromagnétique (II.28) sa forme est dérivée de la forme du courant en quadrature  $I_q$ .

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dans le référentiel triphasé abc nous prenons en considération des hypothèses simplificatrices, puis nous avons présenté la transformation du Park qui permet le passage du repère abc au repère biphasé dq pour rendre le modèle de la MSAP simple et contrôlable. Ensuite nous modélisons la MSAP dans le repère dp de Park et aussi nous montrons le modèle d'état de la MSAP et nous avons également présenté la modélisation de l'onduleur de tension et de sa commande à MLI sinus triangle.

A la fin de ce chapitre pour valider le modèle étudié nous avons simulé le modèle de la machine synchrone à aimant permanent alimenté à travers un réseau électrique triphasé équilibré, ainsi alimenté à travers un onduleur de tension à deux niveaux pour différents types de fonctionnement (à vide, en charge et inversion du sens de rotation de la vitesse de rotation).

Afin d'obtenir des performances statiques et dynamiques élevés nous appliquons un control vectoriel qui sera l'objectif étudier dans le chapitre suivant.

# *Chapitre III*

Application de la technique vectorielle  
pour contrôler la MSAP

### III.1 Introduction

Le modèle de la MSAP que nous avons utilisé au chapitre précédent est un système multi variable, non linéaire et fortement couplé entre les variables d'entrées (tension,..), les variables de sorties (Couple, vitesse et courants) et les variables internes de la machine comme le flux, le control donc de la MSAP est difficile.

Pour passer cette difficulté nous avons étudié une technique de commande vectorielle. Cette dernière basée sur un réglage classique Proportionnel–Intégral (PI), associe des termes de compensation qui permettent de séparer l'axe d, de l'axe q.

Ce chapitre présente l'application de la commande vectorielle à la MSAP es courants direct et quadrature sont contrôlés indépendamment ainsi la vitesse de rotation sera contrôlé à l'aide de régulateur PI.

Des résultats de simulation seront présentés pour montrer les performances de la technique étudiée pour des modes fonctionnement à vide, charge et inversion du sens de rotation.

### III.2 Commande vectorielle de la MSAP

Les principes généraux des commandes vectorielles des machines synchrones sont les mêmes que ceux des moteurs asynchrones, mais les spécifiés dépendent de la technologie utilisée (machines à rotor bobiné à pôles lisses, à réluctance variable directe ou inversée, à aimants montés en surface ou enterré). La difficulté de commander une machine synchrone réside dans le fait que le modèle mathématique de PARK est non linéaire multi-variable et fortement couplé [6].

La commande vectorielle est une technique de contrôle largement utilisée pour les machines synchrones à aimants permanents, en raison de ses performances élevées et de sa robustesse. Cette technique permet de découpler le contrôle du flux et du couple de la machine ce qui offre une grande flexibilité et une précision accrue.

Cette technique repose sur la transformation des variables physiques (courants et tensions) dans un repère d'orientation du flux [6].

Ce repère tourne à la vitesse du champ magnétique généré par les aimants permanents. Dans ce repère, les composantes du courant statorique sont décomposées en deux composantes :

Composante d : contrôle de flux magnétique dans la machine

Composante q : contrôle de couple électromagnétique

L'objectif de la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu (MCC) à séparée, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé. Ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique [6].

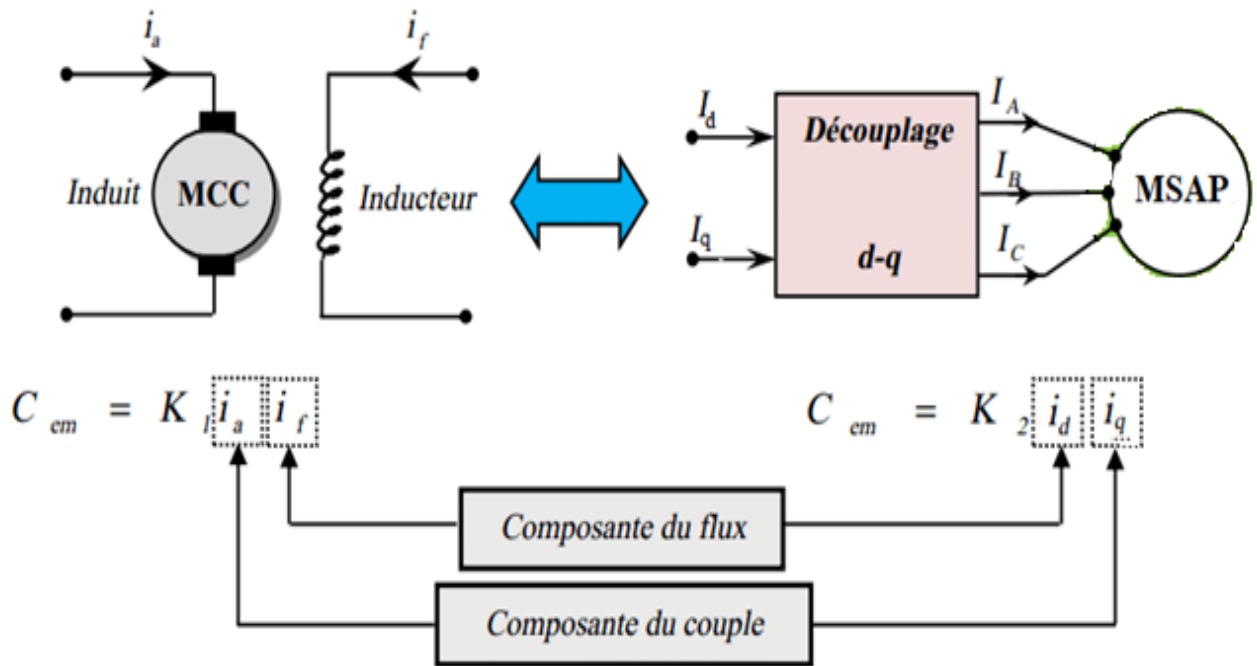


Figure III.1 Schéma de principe du découplage de la MSAP similaire à la MCC.

### III.3 Principe de la technique de la commande vectorielle

Quel que soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ou de position). Le contrôle du couple de moteur est nécessaire, en fonction des deux variables  $I_d$  et  $I_q$ .

Le principe d'orientation du flux rotorique dans le MSAP est similaire à celui utilisé dans les machines asynchrones. Nous utilisons la référence de Park convertie en d-q et orientons le flux rotorique selon l'axe d. la différence réside dans la nature du MSAP qui possède des aimants permanents dans son rotor. Pour simplifier la commande, nous fixons souvent le courant  $I_d$  de manière à ce que le couple soit proportionnel à  $I_q$  [10].

Dans les machines à rotor lisse ( $L_d = L_q$ ), ou le couple ne dépend que la composante en quadrature  $C_{em} = P \cdot \varphi_{sf} \cdot I_q$ , la valeur optimale du courant direct est évidemment zéro ( $I_d = 0$ ) mais pour pôles saillants elle peut être fixée à une valeur qui correspond au couple maximal à courant maximal [10].

Il existe trois types de commande vectorielle :

- Commande vectorielle directe.
- Commande vectorielle indirecte.
- Commande vectorielle simplifiée.

### III.3.1 Contrôle vectoriel direct

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase et celle-ci doit être vérifiée quel que soit le régime transitoire effectué. Une première possibilité est de mettre des capteurs de flux dans l'entrefer et de mesurer directement les composantes  $\varphi_{ra}$  et  $\varphi_{rb}$  de manière à en déduire l'amplitude et la phase [36].

Les capteurs, mécaniquement fragiles, sont soumis à des conditions sévères dues aux vibrations et aux échauffements. La précision de la définition du flux dépend des paramètres inductifs affectés par la saturation du circuit magnétique. D'autre part, les signaux captés sont entachés de bruits engendrés par les encoches et nécessitent des filtres ajustables. La mesure directe permet de connaître exactement la position du flux. Ce mode de contrôle garantit un découplage correct entre le flux et le couple quel que soit le point de fonctionnement [36].

Toutefois il nécessite l'utilisation d'un moteur équipé de capteurs de flux, ce qui augmente considérablement le coût de sa fabrication et rend plus fragile son utilisation.

### III.3.2 Contrôle vectoriel indirect

Dans cette méthode, on ne régule pas le flux rotorique, on a donc besoin ni de capteur, ni d'estimation ou d'observateur de flux. Si l'amplitude du flux rotorique réel n'est pas utilisée, sa position doit être connue pour effectuer les changements de coordonnées. Ceci exige la présence d'un capteur de la position ou de la vitesse du rotor [36].

Une mauvaise information sur la vitesse peut nuire à la détermination de la position du flux dans la commande indirecte. En plus, cette commande est très sensible aux variations paramétriques et en particulier la constante de temps rotorique c'est-à-dire  $Rr$  qui intervient sur la définition de  $\omega_s$ .

### III.3.3. Contrôle vectoriel simplifié

L'intérêt d'une commande simplifiée est de réduire la complexité de l'algorithme de commande et par conséquent la réduction du coût de sa réalisation pratique mais tout en gardant des performances élevées.

Le courant  $Iq$  est donc maintenu nul, pour autant que le découplage soit parfaitement réalisé.

Le courant  $Id$  peut être déterminé soit en appliquant la transformation de Park sur les courants triphasés, soit estimé à partir de la tension de commande (afin de réduire les bruits de mesure) et la mesure de vitesse.

L'estimation de courant  $Iq$  est obtenue à partir du modèle du moteur synchrone supposé parfaitement découpler [36].

### III.4 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP

Le modèle de commande vectorielle de la MSAP alimenté en tension est donné par les équations électriques, l'équation mécanique et l'équation du couple électromagnétique suivantes [8] :

$$V_d = RI_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - L_q \omega I_q \quad (\text{III.1})$$

$$V_q = RI_q + L \frac{d}{dt} I_q + L_d \omega I_d + \varphi_f \omega \quad (\text{III.2})$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\omega = p \cdot \Omega_r$$

$$C_{em} = p(L_d - L_q)I_d I_q + \varphi_{sf} \quad (\text{III.4})$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAP est un système multi- variable, non linéaire et fortement couplé que Le but essentielle de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leurs comportements statiques et dynamiques grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu [37].

La stratégie de la commande vectorielle consiste à maintenir la courant  $i_d$  nul et à réguler la vitesse par  $I_q$  ou  $V_q$ , la machine étudiée est à pôles lisses, qui représentée dans le courant statoriques dans le référentiel de Park est maintenu calé sur l'axe q ( $I_s = I_q$ ) [37].

Cette technique permet d'éliminer le problème de couplage entre les axes «d» et «q».

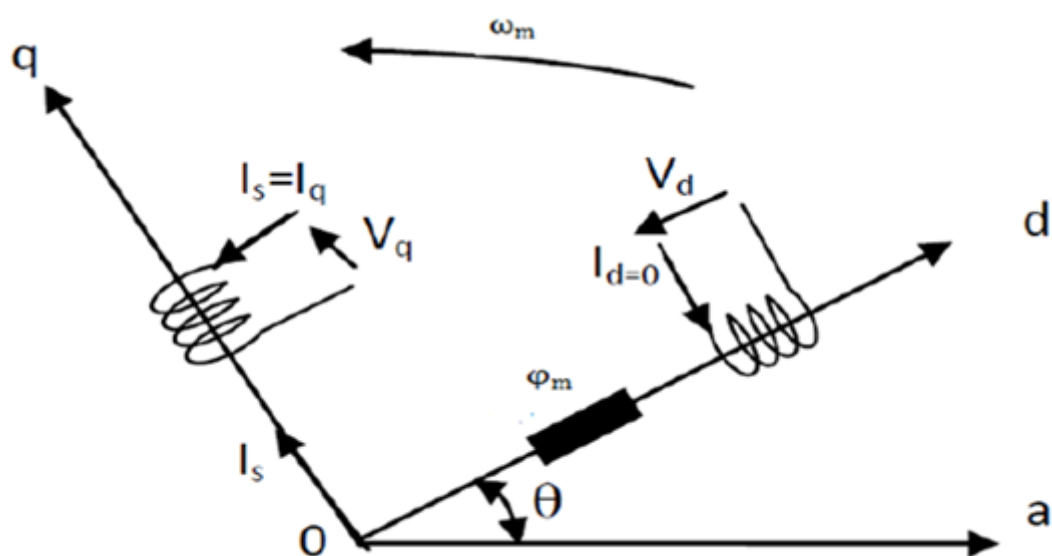


Figure III.2 Principe de la commande vectorielle de la MSAP.

La commande vectorielle sert alors à contrôler les deux composantes ( $I_d$ ) et ( $I_q$ ) du courant statorique en imposant les tensions ( $V_d$ ) et ( $V_q$ ) qui conviennent. Pour imposer ces tensions il suffit d'imposer les tensions de référence ( $V_{dref}$ ) et ( $V_{qref}$ ) à l'entrée de l'onduleur. A l'aide des régulateurs, nous allons obtenir des courants de référence ( $I_{dref}$ ) et ( $I_{qref}$ ).

L'application de la commande vectorielle nécessite que l'axe de la composante  $I_q$  soit en quadrature par rapport au flux rotorique. Par conséquent, la composante  $I_d$  du courant statorique doit être colinéaire au flux rotorique. Si le courant  $I_d$  est dans la même direction que le flux rotorique, le flux statorique suivant l'axe 'd' s'ajoute au flux des aimants, ce qui donne une augmentation au flux d'entrefer (sur excitation).

D'autre part, si le courant  $i_d$  est négatif, le flux statorique sera en opposition à celui du rotor, ce qui donne une diminution du flux d'entrefer (sous excitation). Le courant  $I_d$  doit être nul, lorsque le système travaille à couple constant [38].

Le système des équations de la MSAP sera réduit aux équations suivantes :

$$V_d = -L_q \omega I_q \tag{III.5}$$

$$V_q = R I_q + L \frac{d}{dt} I_q + \varphi_f \omega \tag{III.6}$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \tag{III.7}$$

$$C_{em} = p I_q \varphi_{sf} \tag{III.8}$$

Le flux est constant, le couple électromagnétique est directement proportionnel à  $I_q$ .

Lorsque le courant  $I_d$  est nul, le modèle de la MSAP est réduit au modèle équivalent à la machine à courant continu à excitation séparée comme illustré par la Figure. III.3 :

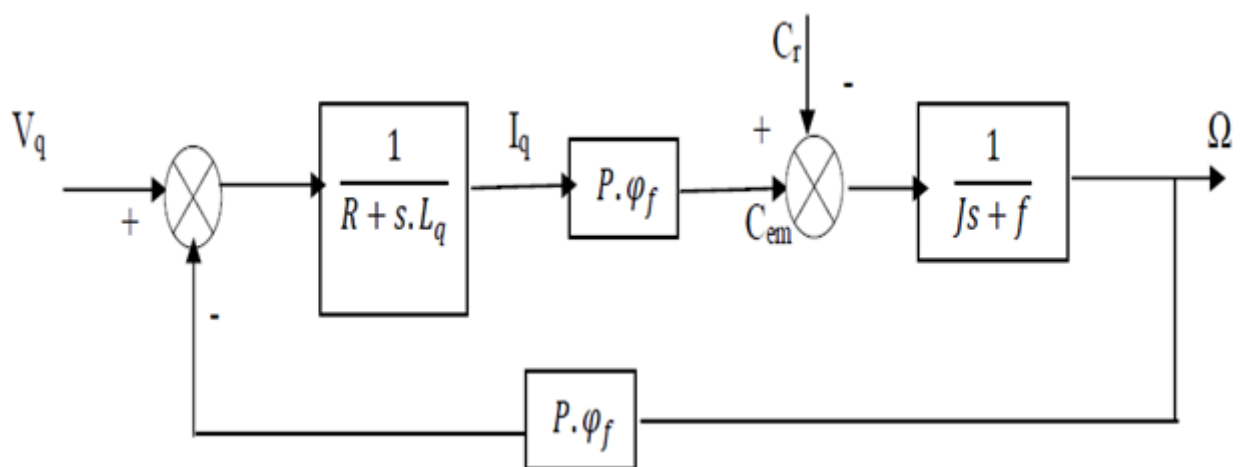


Figure III.3 Modèle de la MSAP quand  $I_d$  est nul.

### III.5 Avantages et Inconvénients de la commande vectorielle

#### III.5.1 Avantages de la commande vectorielle

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

#### III.5.2 Inconvénients de la commande vectorielle

- La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande quand nous ne mesurons pas cette vitesse.
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique
- De mauvais paramètres entraînent une erreur sur le couple.
- Coûteuse (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP).

### III.6 Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP

La référence du courant direct  $I_{dref}$  est fixée égale à zéro et la sortie du régulateur de vitesse  $I_{qref}$  constitue la référence du couple  $C_{emref}$ . Les références des courants  $I_{qref}$  et  $I_{dref}$  sont comparées séparément avec les courants réels mesurés de la machine  $I_d$  et  $I_q$ .

Les erreurs des courants sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références  $V_{dref}$  et  $V_{qref}$ .

Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant  $I_{qref}$ . Cette référence est limitée au courant maximal. Par contre, le courant  $I_{dref}$  est imposé nul dans ce cas.

Les sorties du Bloc de découplage  $V_{dref}$  et  $V_{qref}$  passent par une transformation biphasé vers triphasé se qui nous donne les trois tensions de référence  $V_{aref}$ ,  $V_{bref}$  et  $V_{cref}$  de la commande MLI, et qui doit comparés avec une porteuse triangulaire pour générer les signaux de l'onduleur à MLI.

La Figure III.4 représente le schéma global de la commande vectorielle en vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d, q) [4].

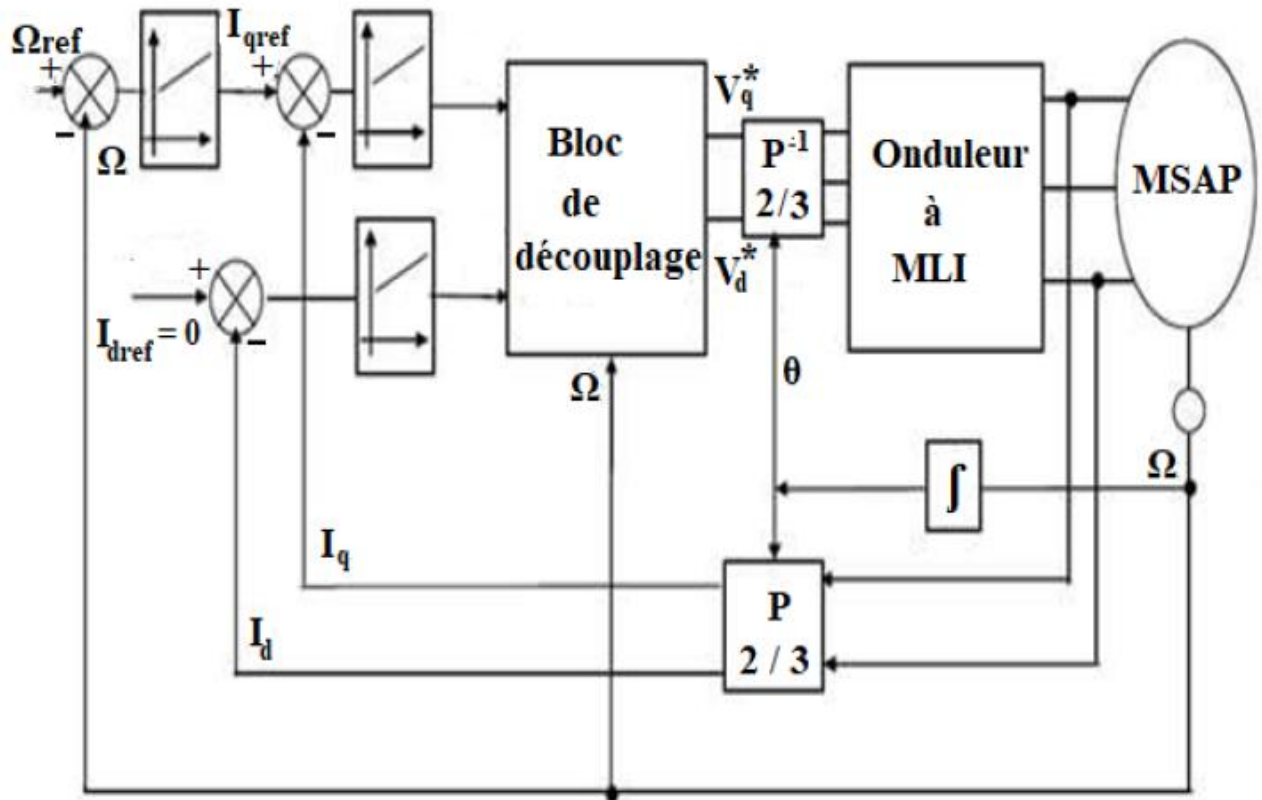


Figure III.4 Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP

### III.7 Stratégie de la technique de découplage

Pour commander le moteur permanent, il est impératif de contrôler le couple, celui-ci dépendant uniquement des composantes des courants statoriques dans le repère d-q il faut maîtriser ceux-ci. Comme il est loisible de le remarquer, les courants  $I_d$  et  $I_q$  dépendent simultanément des grandeurs d'entrée  $V_d$  et  $V_q$ . Nous avons ici à un système multi variable 2 entrées 2 sorties coupler. Afin de pouvoir mettre en place des commandes mono variables nous allons à partir des équations régissant le régime dynamique du moteur rechercher une contre réaction non linéaire qui découple le système [4] :

Les tensions électriques suivant les axes ( $d$ ,  $q$ ) peuvent être écrites sous les formes suivantes :

$$V_d = (L_d \frac{dI_d}{dt} + RI_d) - \omega L_q I_q \quad (\text{III.9})$$

$$V_q = (RI_q + L_q \frac{dI_q}{dt}) + \omega (L_d I_d + \varphi_f) \quad (\text{III.10})$$

La Figure III.5 représente le schéma descriptif de découplage des courants  $I_d$  et  $I_q$ .

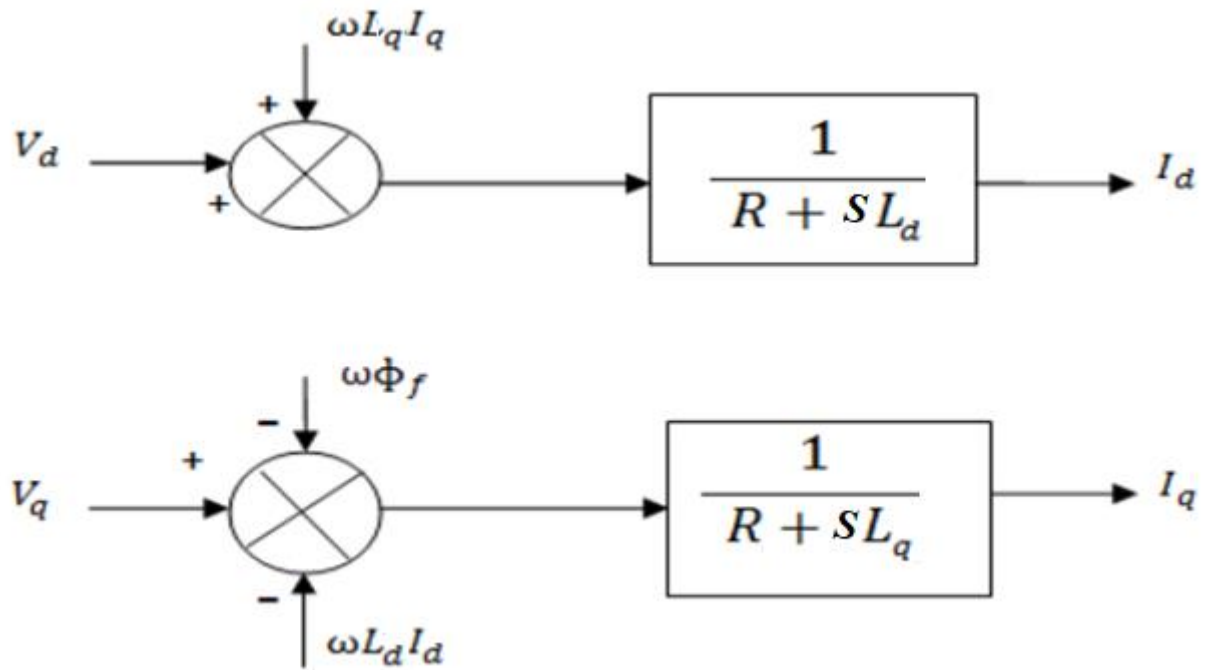


Figure III.5 Schéma descriptif des couplages.

Pour découpler les courants  $I_d$  et  $I_q$  nous avons utilisé dans notre étude la méthode de compensation, Cette méthode permet d'écrire les équations de la MSAP et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.

Donc pour découpler l'évolution des courants  $I_d$  et  $I_q$  par rapport aux commandes nous allons définir des termes de compensations  $E_d$  et  $E_q$  tel que [4], [12] :

Pour la première composante du courant nous aurons :

$$V_d + \omega L_q I_q = R I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} = V_{d1} = V_d - E_d \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$E_d = -\omega L_q I_q = -\omega \phi_q \quad (\text{III.12})$$

Pour la seconde composante :

$$V_q + \omega L_d I_d - \omega \phi_f = R I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} = V_{q1} = V_q - E_q \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$E_q = \omega L_d I_d + \omega \phi_f = \omega \phi_d \quad (\text{III.14})$$

Nous avons donc les courants " $I_d$ " et " $I_q$ " sont découplés.

Le courant  $I_d$  ne dépend que de  $V_{d1}$  et  $I_q$  ne dépend que de  $V_{q1}$ .

Avec les nouvelles entrées  $V_{d1}$  et  $V_{q1}$ , nous pouvons à partir des équations différentielles (III.11) et (III.13) définir deux transmittances mono-variables :

$$\frac{I_d}{V_{d1}} = \frac{1}{R+sL_d} \tag{III.15}$$

$$\frac{I_q}{V_{q1}} = \frac{1}{R+sL_q} \tag{III.16}$$

Avec :

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

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

Le schéma de la Figure. III.6 représente le découplage par compensation [38], [39] :

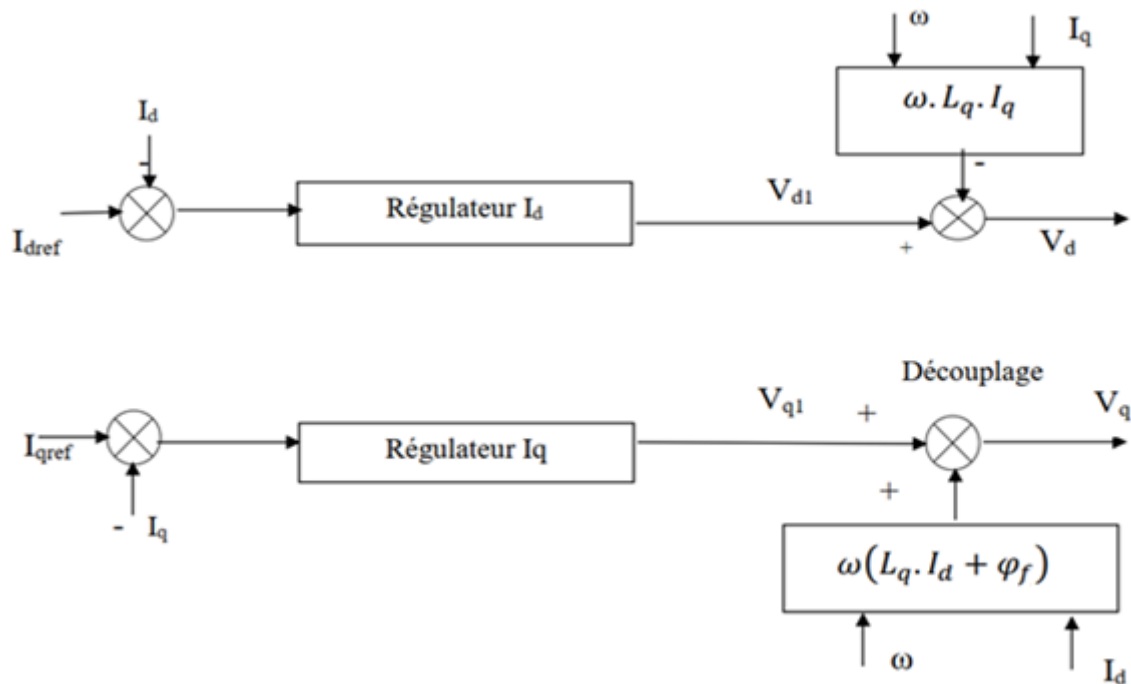


Figure III.6 Découplage par compensation.

Avec ce découplage nous obtenons le schéma bloc suivant [40] :

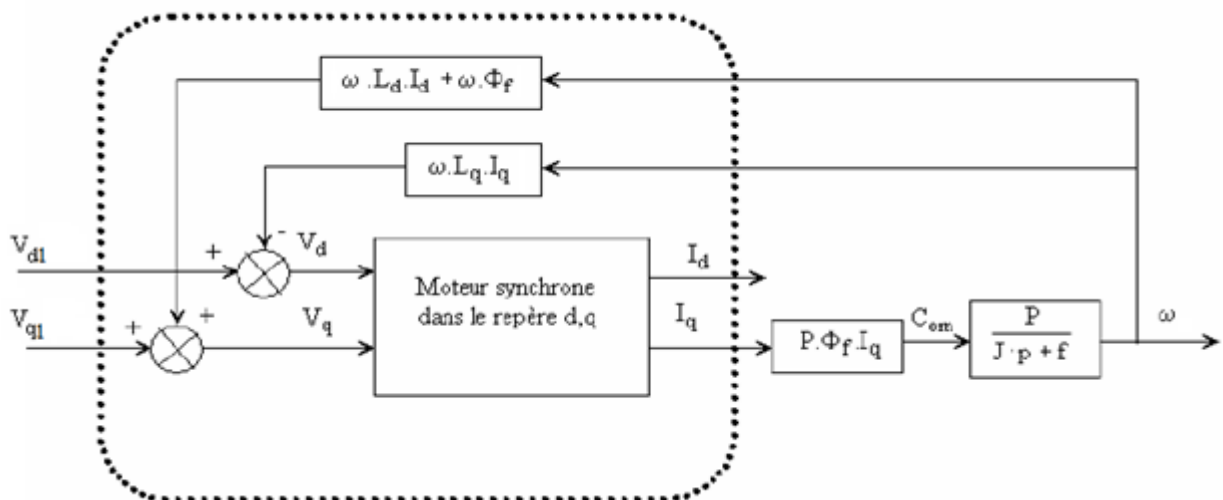


Figure III.7 Découplage de la machine synchrone à aimants.

Le moteur à synchronisme à aimant permanent et son découplage revient donc à avoir 2 transmittances du premier ordre dont les nouvelles grandeurs de commande sont  $V_{d1}$  et  $V_{q1}$ , le schéma bloc devient alors [40] :

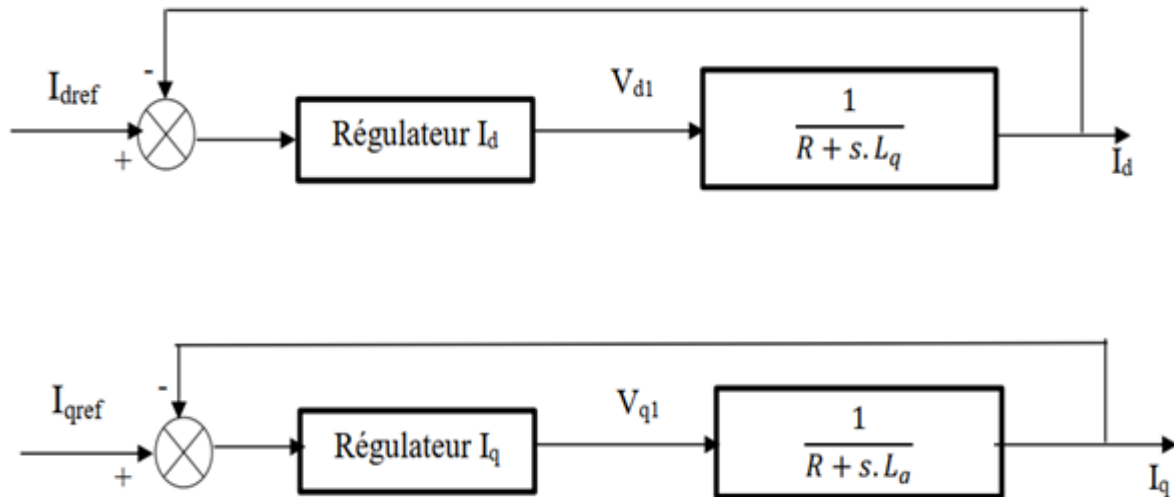


Figure III.8 Commande découplée

### III.8 Synthèse des différents régulateurs

La régulation est effectuée à l'aide des régulateurs de type PI (proportionnelle, intégrale). Les algorithmes, même les plus performants, sont toujours une combinaison de ces actions. Nous avons adopté un régulateur proportionnel intégral (PI). Dont le coefficient intégral  $K_i$  sert de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée donc de réduire le dépassement. Comme le terme proportionnel  $K_p$  permet le réglage de la rapidité du système et donc le temps de réponse.

La référence du courant direct  $I_{dref}$  est fixée à zéro. Le système est équipé d'une boucle de régulation de vitesse qui permet la création d'une référence de courant et la sortie du régulateur de la vitesse forme la référence de couple  $C_{emref}$  [8].

Les références des courants  $I_{dref}$  et  $I_{qref}$  sont comparées séparément avec les courants réels de la machine  $I_d$  et  $I_q$  respectivement.

Un bloc de découplage génère les tensions de références  $V_{dref}$  et  $V_{qref}$ , les courants sont appliquées à l'entrée des régulateurs.

#### III.8.1 Régulateur du courant $I_q$

La commande de la MSAP s'effectue contrôlant les courants  $I_d$  et  $I_q$ , le système est composé d'une boucle de régulation de vitesse peuvent être synthétisés que moyen des techniques classiques développées pour les systèmes linéaires [8].

Le schéma fonctionnel de la boucle du courant  $I_q$  ( $I_q = \frac{V_{q1}}{R+sL_q}$ ) est représenté par la Figure. III.9.

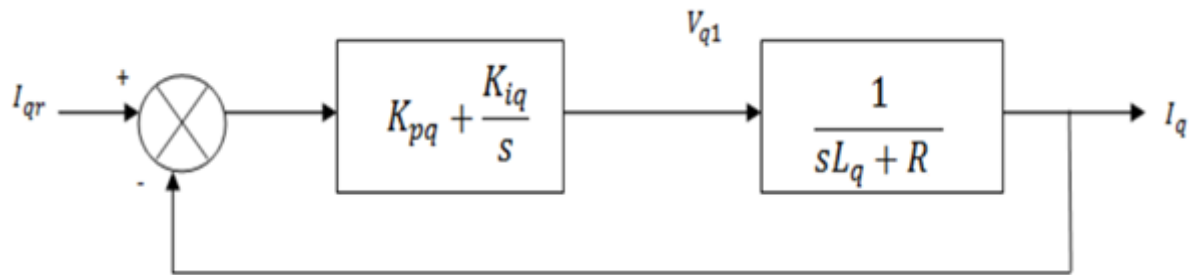


Figure III.9 Boucle de régulation du courant  $I_q$

$K_{pq}$ ,  $K_{iq}$  : Gains proportionnel et intégral du régulateur du courant  $I_q$

### III.8.2 Régulateur du courant $I_d$

Pour la régulation du courant  $I_d$ , nous suivons la même procédure utilisée pour la régulation du courant  $I_q$ . Le schéma fonctionnel de la boucle du courant ( $I_d = \frac{V_{d1}}{R+sL_d}$ ) est représenté par la Figure. III.10 [8].

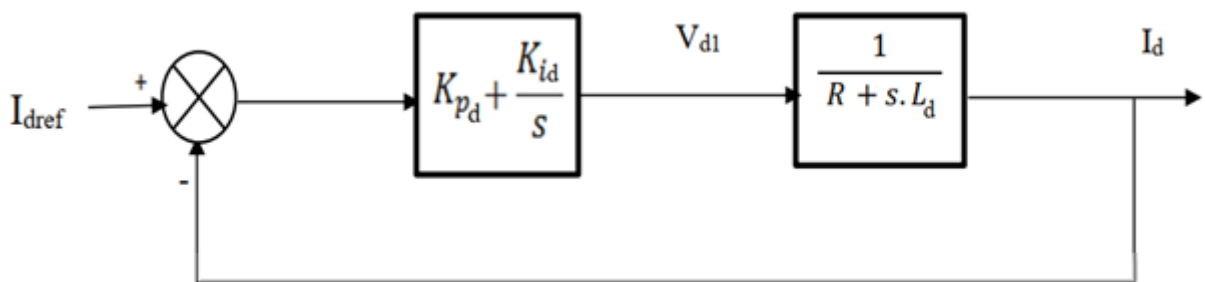


Figure III.10 Boucle de régulation du courant  $I_d$

$K_{pd}$ ,  $K_{id}$  : Gains proportionnel et intégral du régulateur du courant  $I_d$ .

### III.8.3 Régulateur de la vitesse [8]

Le schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse est donné par:

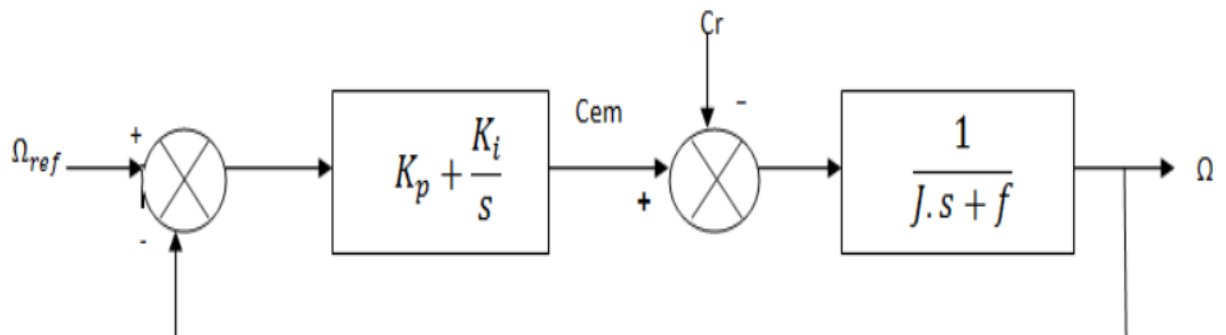


Figure III.11 Boucle de régulation du la vitesse.

$K_p$ ,  $K_i$  : Gains proportionnel et intégral du régulateur de la vitesse.

Généralement les coefficients  $K_i$  et  $K_p$  du régulateur PI sont ajustables, dans certain le calcul exact de ces coefficients ne donne pas de bons résultats.

### III.9 Résultats de simulation de la commande vectorielle de la MSAP

Les résultats de simulation présentée par la suite sont réalisés à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK sur un moteur synchrone à aimants permanents alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux commandé selon le principe de la technique MLI.

Les paramètres de la MSAP utilisé pour la simulation sont donnés à l'annexe A. Nous avons effectué deux types de fonctionnement du moteur le premier à vide et en charge et le deuxième à vide, en charge et inversion de la sens de rotation.

#### III.9.1 Résultats de simulation en démarrage direct

Nous effectuons un démarrage à vide de la MSAP jusqu'à à l'instant  $t = 1s$  nous appliquons un échelon de couple résistant de valeur  $C_r = 5 N.m$ .

La consigne de vitesse est égale à la vitesse de synchronisme de  $104.7 \text{ rad/s}$  ( $1000 \text{ tr/min}$ ).

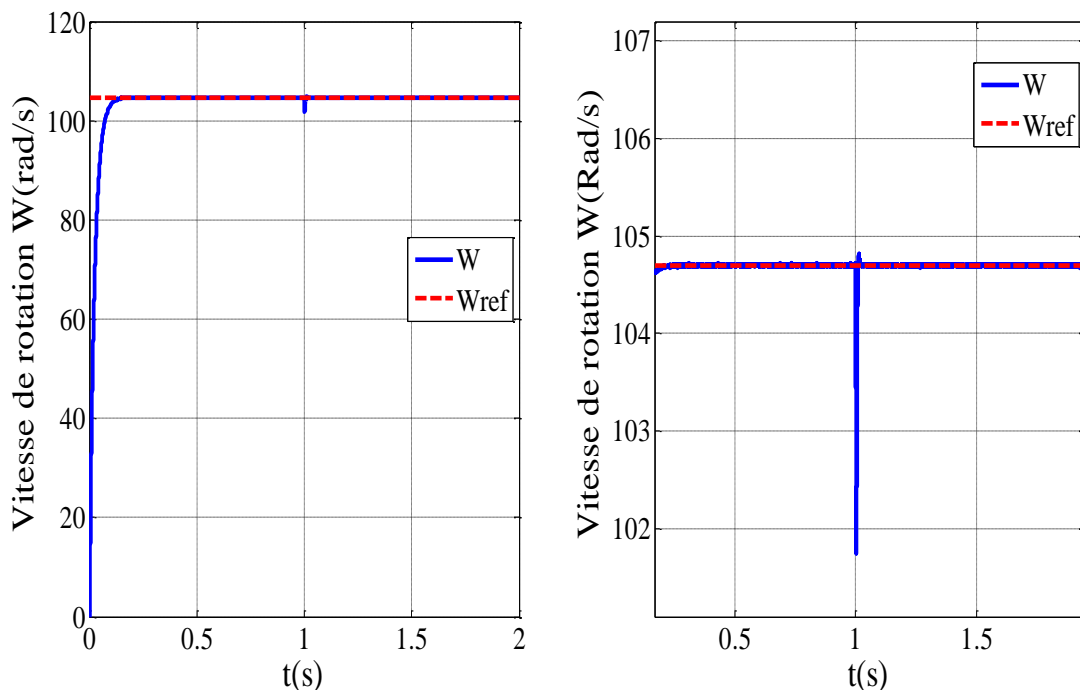


Figure III. 12 Vitesse de rotation et sa référence.

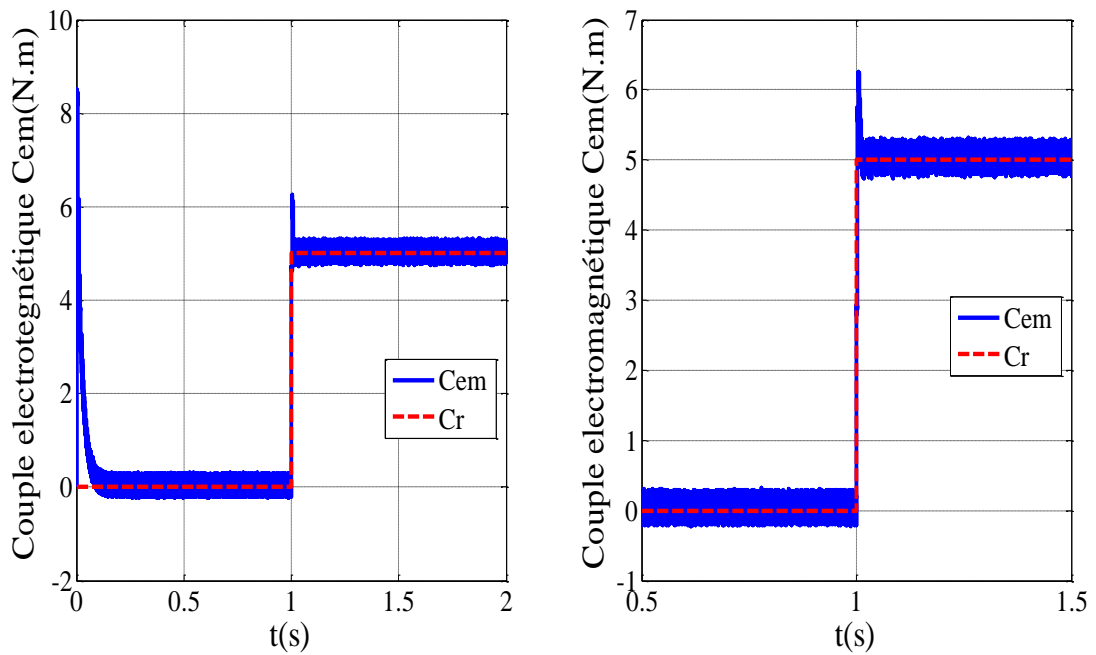


Figure III. 13 Couple électromagnétique.

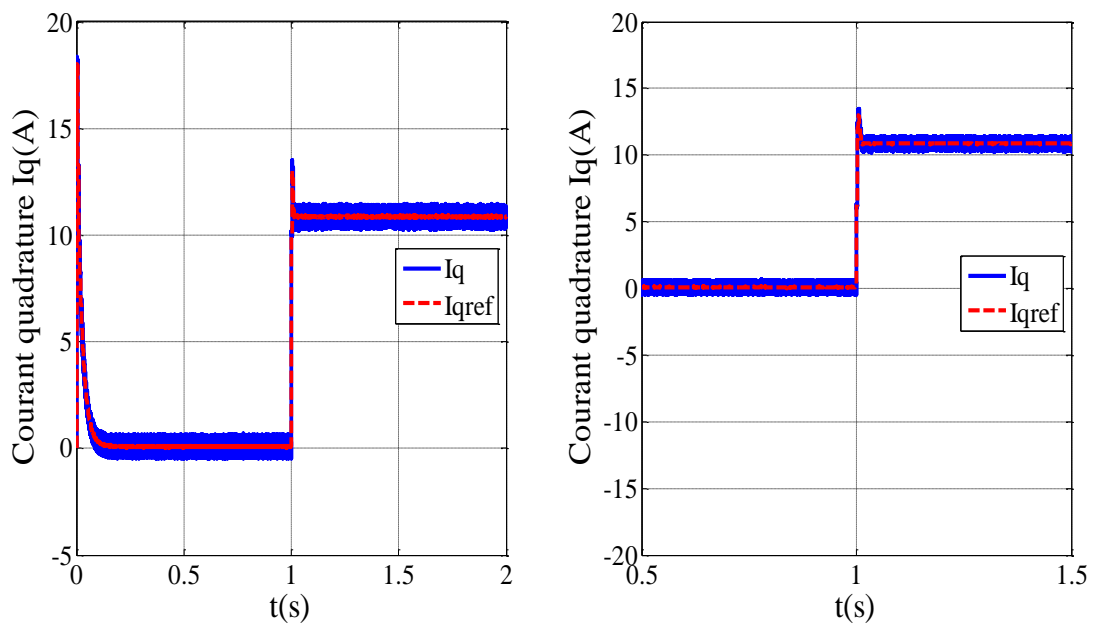


Figure III. 14 Courant quadrature et son référence.

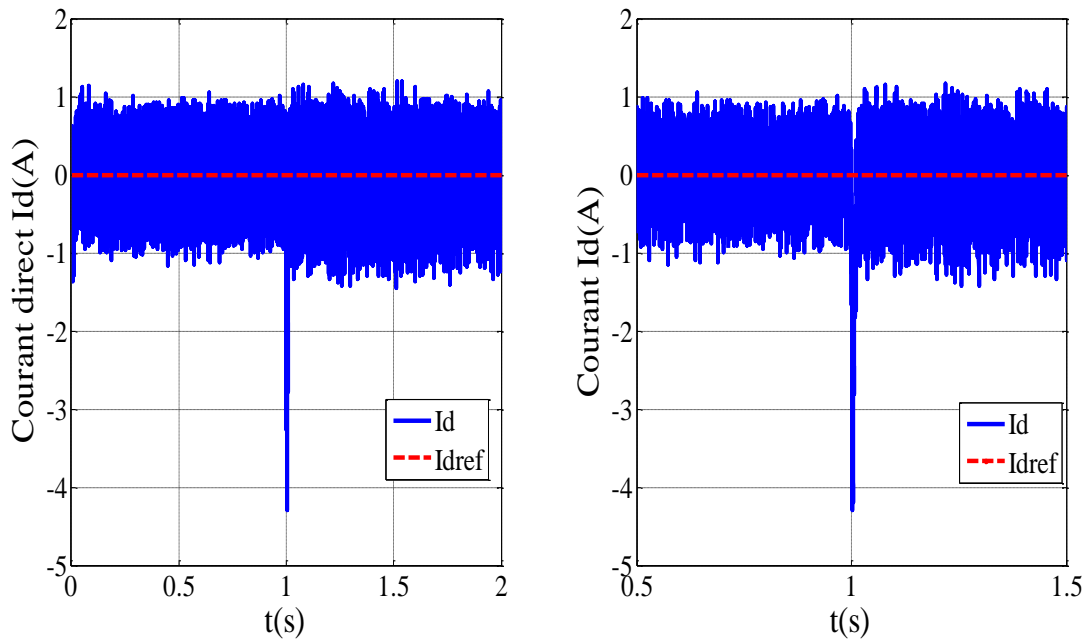


Figure III. 15 Courant direct et son référence.

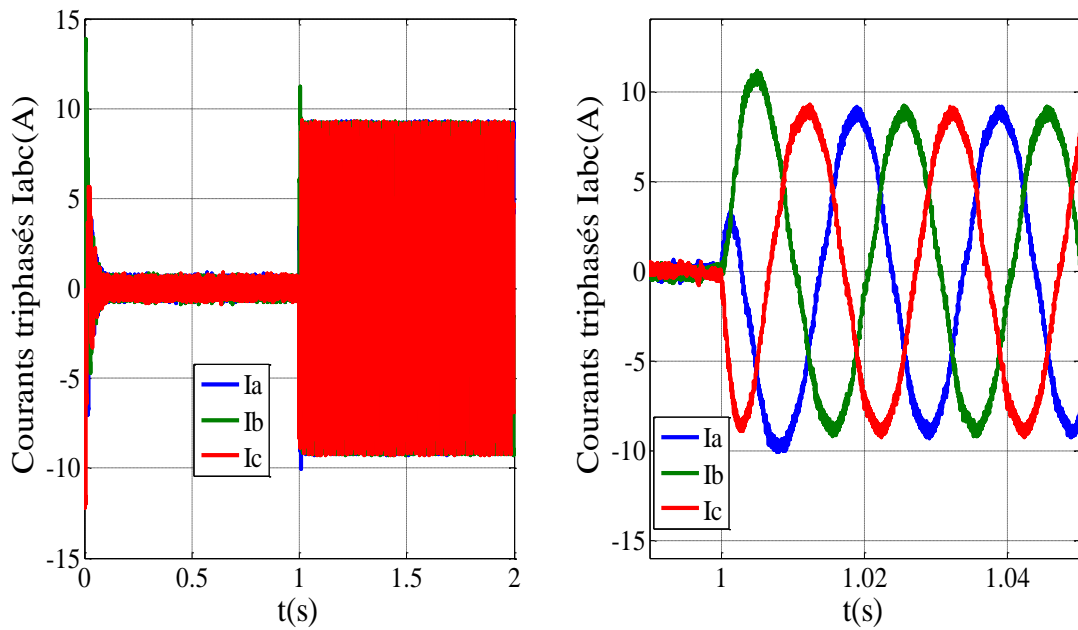


Figure III. 16 Courants triphasés des phases (a, b et c).

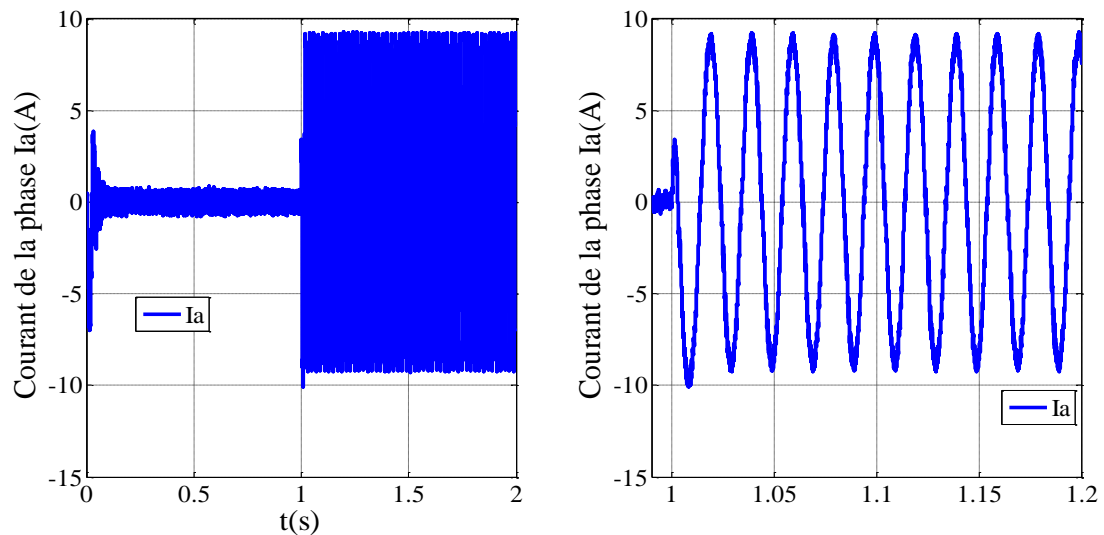


Figure III. 17 Courant de la phase a.

### III.9.2 Résultats de simulation (essais à vide, en charge et inversion du sens de rotation)

Nous effectuons un démarrage à vide de la MSAP jusqu'à à l'instant  $t = 1$  s nous appliquons un échelon de couple résistant de valeur  $C_r = 5$  N.m.

La consigne de vitesse est égale à la vitesse de synchronisme de 104.7 rad/s (1000 tr/min).

Nous effectuons un démarrage à vide de la MSAP puis nous appliquons un échelon de couple de résistant de valeur  $C_r = 5$  N.m à l'instant  $t = 0.5$  s jusqu'à l'instant  $t = 1.5$  s nous éliminons la charge.

La consigne de vitesse est de 104.7 rad/s (1000 tr/min) jusqu'à l'instant  $t = 1$  s, puis le sens de rotation est inversé à une vitesse égale à -104.7 rad/s (-1000 tr/min).

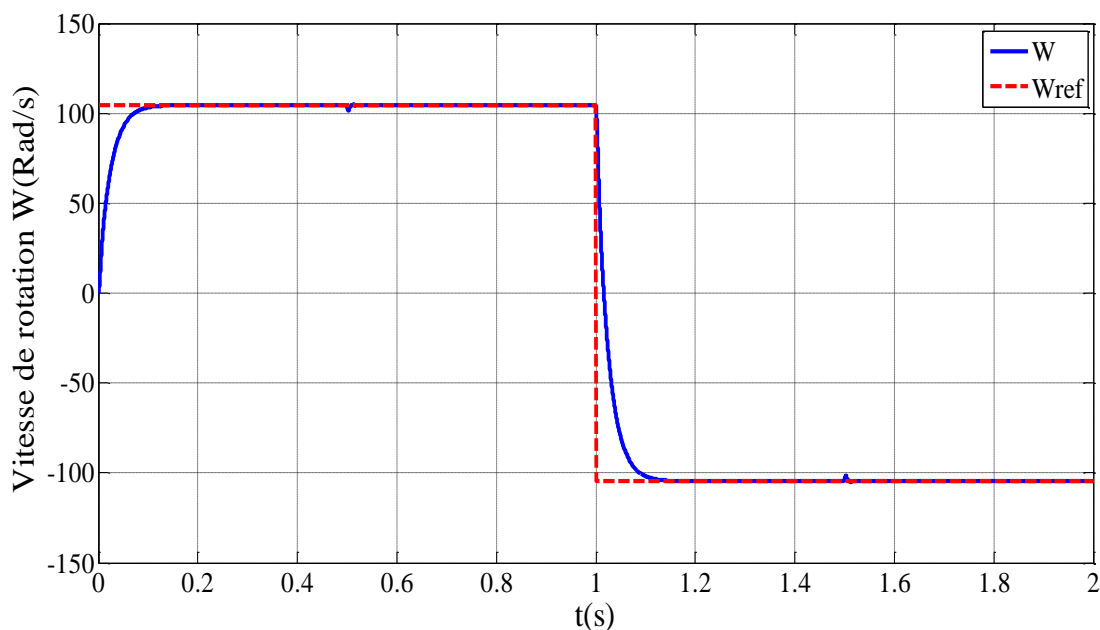


Figure III. 18 Vitesse de rotation et sa référence.

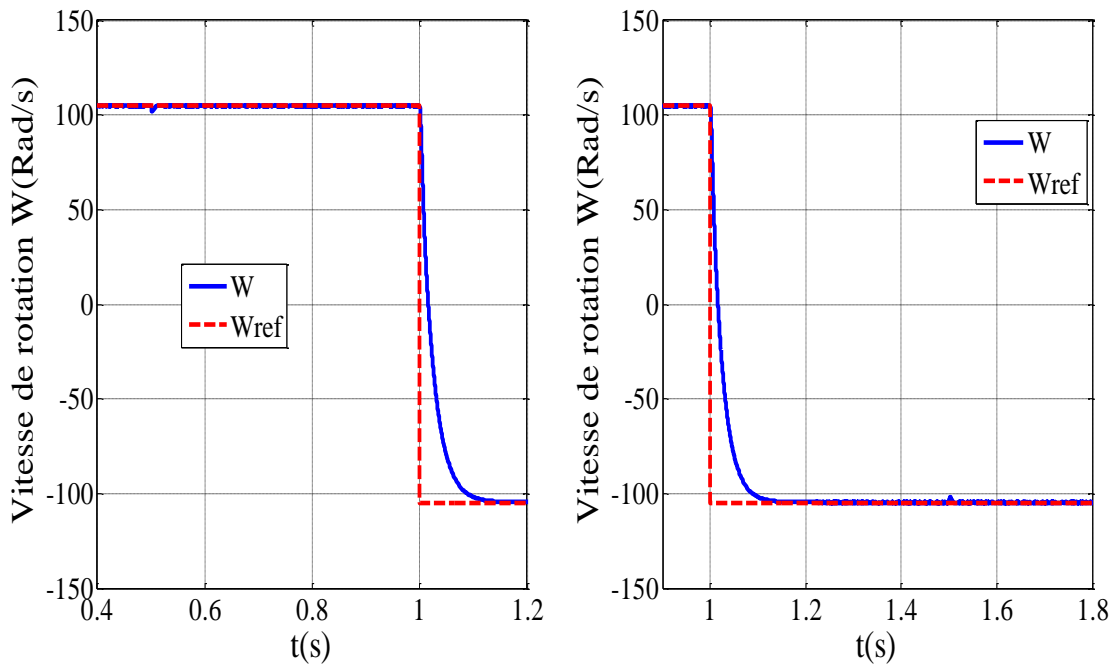


Figure III. 19 Zoom de la vitesse de rotation et sa référence.

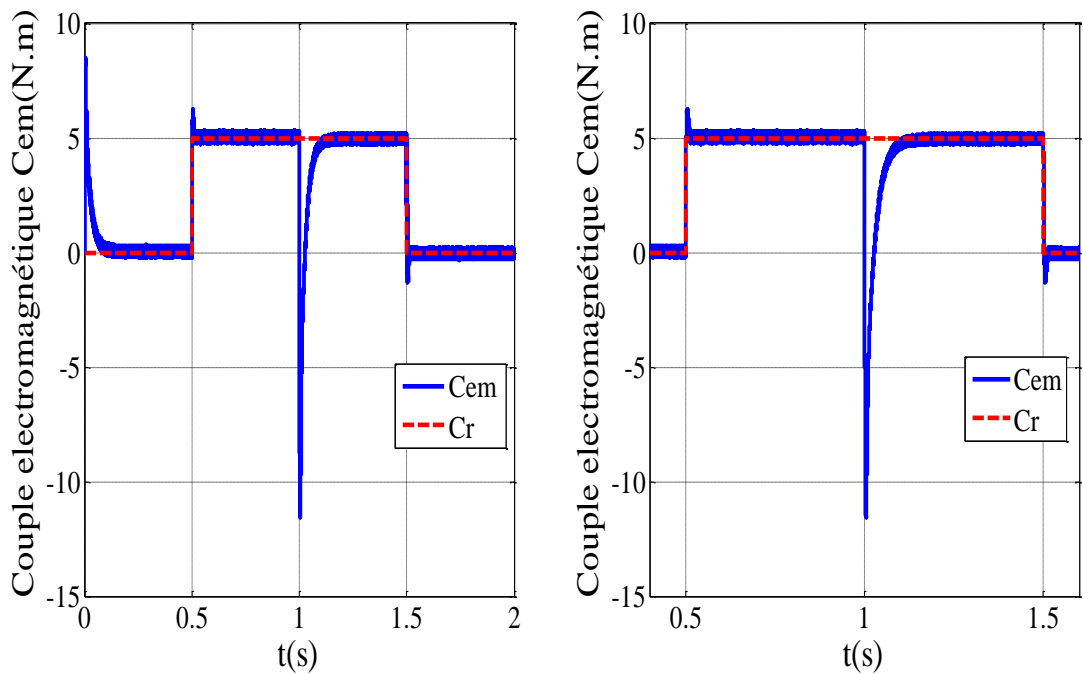


Figure III. 20 Couple électromagnétique.

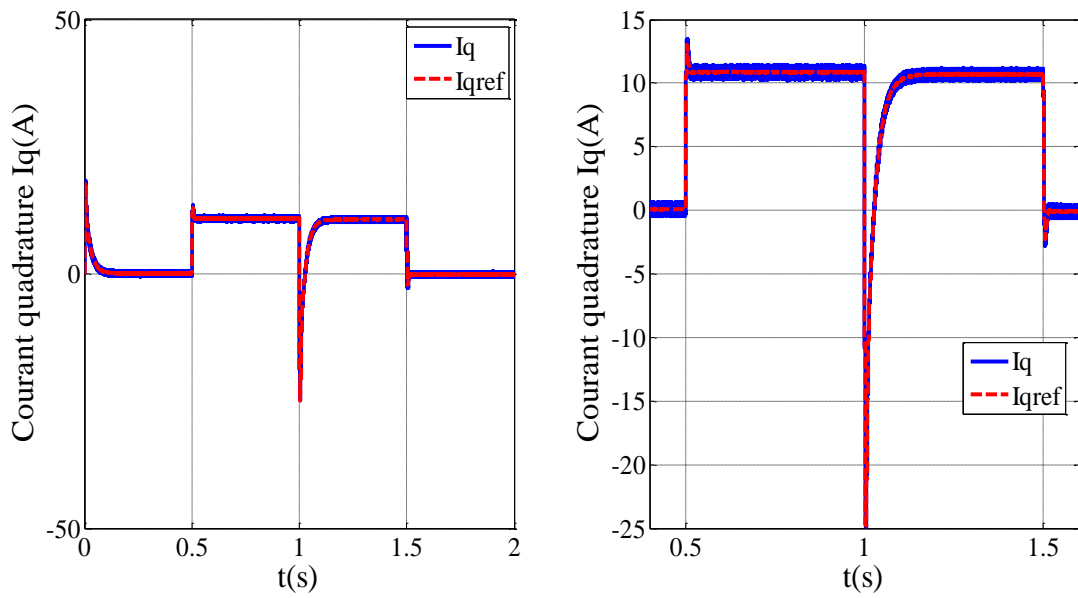


Figure III. 21 Courant quadrature et son référence.

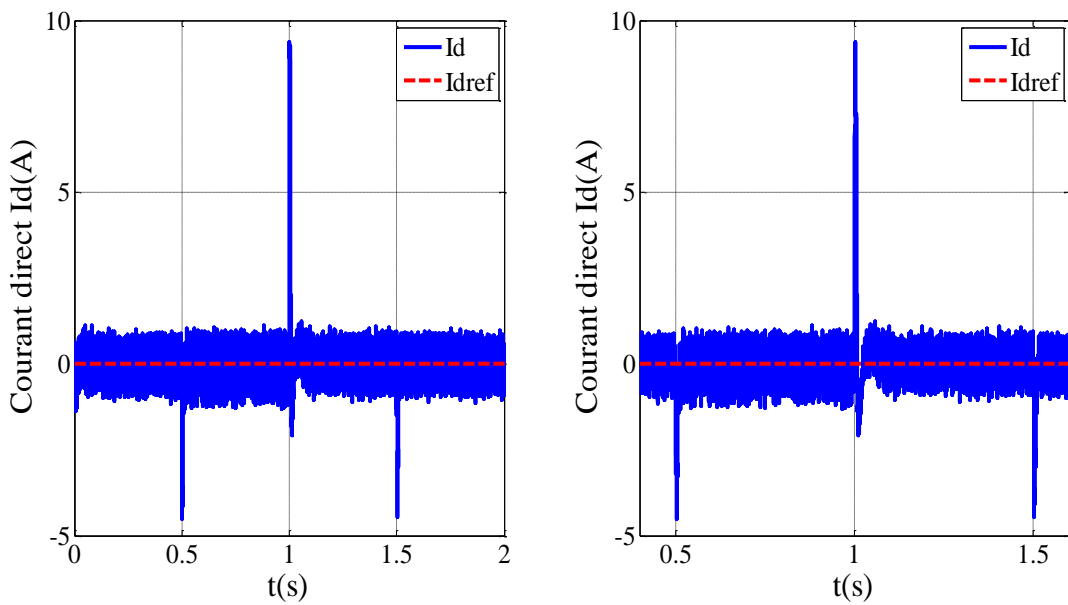


Figure III. 22 Courant direct et son référence.

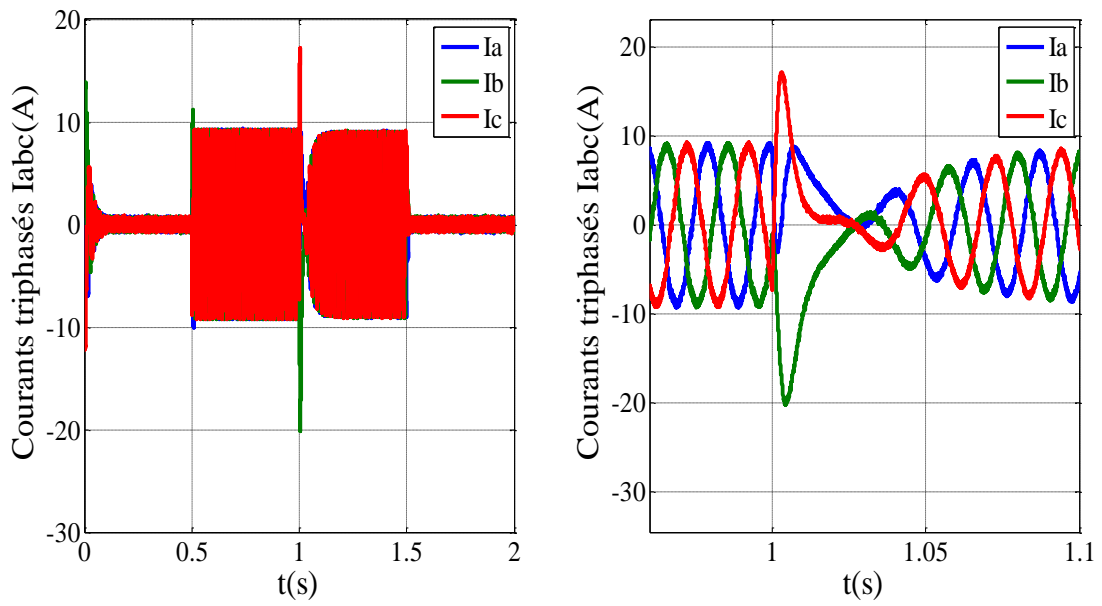


Figure III. 23 Courants triphasés des phases (a, b et c).

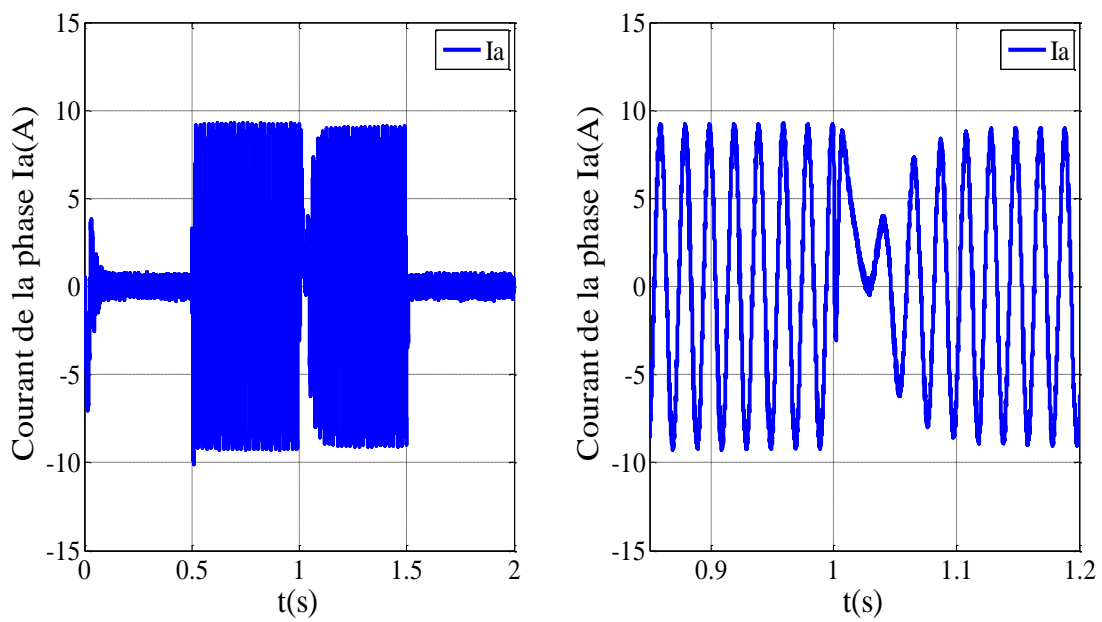


Figure III. 24 Courant de la phase a.

### III.10 Interprétation des simulations de la commande vectorielle de la MSAP

Les Figures III.12, III.18, III.19, III.13, III.20, III.14, III.21, III.15, III.22, III.16, III.23 et III.17, III.24 représentent l'évolution la vitesse de rotation et sa référence, le couple électromagnétique et le couple résistant, les composantes du courant directe, quadrature et ses références du courant et les courants triphasé (a b c) et le courant de la phase a respectivement.

L'allure de la vitesse suit parfaitement sa référence qui est atteinte rapidement sans dépassement avec une petite perturbation lorsque nous appliquons un couple résistant à  $t = 0.5s$  et son élimination à  $t = 1.5s$ . Le temps de réponse est acceptable environ  $0.2s$ . L'effet de la perturbation est rapidement éliminé et que le couple électromagnétique se stabilise à la valeur du couple de résistant  $5 \text{ N.m}$ , une réaction négative est observée lors de l'inversion du sens de rotation et puis le couple rejoint son trajectoire de référence.

La réponse des deux composantes du courant direct et quadrature suit parfaitement ses références et montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la MSAP le couple est commandé par une action sur le courant  $I_q$  alors que  $I_d$  est fixé égale  $= 0 \text{ A}$  (similaire à la commande d'une machine à courant continu).

### III. 11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et analysé les propriétés statiques et dynamiques de la commande vectorielle de la MSAP alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux avec réglage de la vitesse de rotation. Le réglage de la vitesse de la MSAP par le régulateur PI donne de bons résultats, réponse rapide de la vitesse et sans dépassement.

Les résultats de simulation obtenus pour réglage de la vitesse et le contrôle séparément des composantes des courants direct et quadrature sont très satisfaisants de point de vue erreur de réglage, robustesse et stabilité du système global dans n'importe quelle condition de fonctionnement (vide, charge, inversion de sens de rotation).

La commande vectorielle présente plusieurs avantages tel que, la précision importante, stabilité et simplicité, temps de réponse très faible.

*Conclusion*  
*Générale*

# Conclusion générale

La machine synchrone à aimant permanent (MSAP) en mode moteur s'est imposée dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction; par contre sa simulation est difficile, car le modèle est fortement non linéaire.

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à la modélisation, commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) en utilisant des régulateurs PI alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux contrôlé par la technique MLI, et la régulation de vitesse et simulation par le logiciel MATLAB/SIMULINK.

L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est se concrétiser à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu (MCC), c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique.

Dans la première partie de cette mémoire nous avons présenté à un aperçu général sur la machine synchrone aimant permanent (MSAP) après avoir présenté les différents types de machines synchrones à aimants permanents, la principe, la structure et la constitution et les différentes catégories de la MSAP ainsi que différentes possibilités d'alimenter celles-ci à travers d'un onduleur triphasé de tension à deux niveaux, nous avons établi quelques technique pour contrôler la MSAP.

Dans le deuxième chapitre, nous sommes traités la modélisation de la MSAP dans le repère triphasé abc, le repère de Park biphasé d q, et la modèle d'équation d'état. Cette modélisation permet la mise sous forme d'équation d'état la MSAP alimentée par un onduleur de tension. Le modèle de la MSAP en dp a été validé par simulation dans un environnement MATLAB/SIMULINK pour des fonctionnements de la MSAP à vide, en charge et inversion de la sens de rotation afin de visualiser l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques (couple, vitesse, courants).

Dans le dernier chapitre, nous avons abordé l'application de la technique vectorielle à la MSAP pour assurer le réglage de la vitesse de rotation et les composants des courants direct et quadrature à l'aide des correcteurs PI pour différentes types fonctionnements de la MSAP (à vide, en charge et inversion de sens de rotation). Des résultats de simulation sont présentés et discutés pour montre la justesse du modèle abordé et les performances de technique utilisé.

Finalement, nous pouvons conclure que la commande vectorielle de la MSAP montre de bonnes performances rapidité de réponse, stabilité et simplicité, sans dépassement, sans erreur statique et un rejet de perturbation instantané en suivi et en régulation de la vitesse, mais l'inconvénient principal de la commande vectorielle est la dépendance des paramètres de la machine.

*Références*  
*Bibliographiques*

## Références bibliographiques

- [1] **A. Saeed**, « Contrôle vectoriel des machines synchrones à aimants permanents: identification des paramètres et minisation des ondulations de couple », Doctorat de l'I.N.P.L ; Institut National Polytechnique de Lorraine ; 1995.
- [2] **H. Bensaadi**, «Commande DTC-SVM d'une machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Magister, Université de BATNA soutenu le 24 mai 2012.
- [3] **L. Daniel**, «Etude de conception d'un système de commande pour une machine synchrone à aimant permanent utilisée en propulsion », Mémoire de maitrise Université de Québec, soutenu le 03-12-2008.
- [4] **K Nebti**, «Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone », Thèse de Doctorat, Université Constantine 1 soutenu le 14-12-2010.
- [5] **T Zidemal**, « Modèle de prédiction et de commande de la machine synchrone à aimants permanents » », Mémoire de maitrise Université de Québec, Avril 2015.
- [6] **J Belhadj**, « Commande directe en couple d'une machine asynchrone- structures d'observation- application aux systèmes multimachines-multiconvertisseurs», Thèse Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 7 juillet 2001.
- [7] **Y Alhassoun**, « Etude et mise en œuvre de machines à aimantation induite fonctionnant à haute vitesse », Thèse de Doctorat, institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [8] **F Locment**, « Conception et modélisation d'une machine synchrone à 7 phases à aimants permanents et flux axial : commande vectorielle en modes normal et dégradé», Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille décembre 2006.
- [9] **A. Khlaief**, « Contribution a la commande vectorielle sans capteur mecanique des machines synchrones à aimants permanents (MSAP)», Thèse Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 2012.
- [10] **L Gasc**, « Conception d'un actionneur à aimants permanents et à faibles ondulations de couple pour assistance de direction automobile, approches par la structure et par la commande», Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.

- [11] **A Kaddouri**, « Etude d'une commande non- linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse doctorat de Philosophie (PHD), université LAVAL Québec, novembre 2000.
- [12] **A. Aissa**, «Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone a aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet a modes glissants», Magister en électrotechnique Université de Batna 2003.
- [13] **B. Zegueb**, «Commande d'une Machine Synchrone a Aimants Permanents Sans Capteur de Vitesse. Utilisation d'Un Observateur Non Lineaire», Magister en Electrotechnique, Université de Batna 2008.
- [14] **M. Koteich**, «Modelisation et Observabilité des Machines Electriques en vue de la commande sans capteur mecanique», Doctorat en Automatique, Ecole Doctorale N° 580 Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC), Université Paris-Saclay, 2016.
- [15] **A. Talaoubrid**, «Etude des performances dynamiques de la commande sans capteur de position associée a un contrôle DTC d'une machine synchrone à aimants permanents», Magister en Electrotechnique, USTHB 2011.
- [16] **L M'hamed, H Said, M Benyounes**, «Commande par modèle interne avec observateur d'une machine synchrone à aimants permanents», ACTA Electrotehnica Volume 50. No. 2, Pp. 137-145, 2009.
- [17] **B Tounsi**, "Etude comparative de groupes électrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanents et conversion statique», Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, Janvier 2006.
- [18] **M R Zolghardi**, «Contrôle direct du couple des actionneurs synchrones", Thèse de doctorat Grenoble, France 1997.
- [19] **S. Rafa**, «Etude Comparative entre la Commande Vectorielle et la Commande Directe de Couple d'une Machine Synchrone a Aimants Permanents», Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2008.
- [20] **F Benchabane**, «Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering», Mémoire de Magister, Université Mohamed khider de Biskra, 2005.
- [21] **G. pongo nyoumea**, « Modèles d'identification et de commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à aimant permanent », Mémoire de Maitrise, Université Québec, Avril 2018.

- [22] **M.hadef** , «contrôle direct du couple des machines synchrones avec et sans capteur mécanique», Mémoire de magister en Electrotechnique, université de Bejaia, 2002.
- [23] **A. Fonseca**, «Comparaison de machines à aimants permanents pour la traction de véhicules électriques et hybrides», PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.
- [24] **N senhaji et A chalabi**, « commande du moteur synchrone à aimants permanents par backstepping » Mémoire de master, Université abou bekr belkaid, soutenu le 14-06-2015.
- [25] **A benayache et I benzid**, « simulation d'une machine synchrone à aimant permanent », Mémoire de master, Université Abderrahmene Mira de Béjaia ,2018.
- [26] **S slimani**, « Modélisation des MSAP par la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés en vue du diagnostic de court-circuit inter-spores et de désaimantation », Master Academique, Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou, soutenu le 03 juillet 2017.
- [27] **M Abdelatif**, « Commande dynamique d'une machine synchrone a aimants permanents alimentee en tension», Master en Electrotechnique, Université Mohamed Bougara Boumerdes, 2016.
- [28] **S Guy, S Eddie**, « Modélisation et commande des moteurs triphasés ". Ellipses Edition Marketing S.A, 2000.
- [29] **J.M Retif**, « Commande vectorielle des machines asynchrones & synchrones», 5ème Année GE Option ISIP, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Edition 2008.
- [30] **G. Buche**, « Commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel Matlab/Simulink», Mémoire du diplôme d'ingénieur, C.N.A.M Grenoble, Mars 2001.
- [31] **S Denis**, « commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanents », Mémoire Master, Université Saad Dahlab Blida, 2016.
- [32] **D.Abdellah**, « commande vectorielle de la MSAP en utilisant la technique MLI vectorielle » , Mémoire Master, Université Oum-El-Bouaghi 2021.
- [33] **F Henri**, «onduleurs de tension, structures /application/principes», Techniques de l'ingénieur D3176.2002
- [34] **F. Berrezzek**, «Etude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone», Mémoire magister en Electrotechnique, Université Badji Mokhtar , Annaba,2006.
- [35] **F Labrique, G Segurier, R Bausier**, «Les convertisseurs de électronique de puissance», Volume 4 : La conversion continu Alternatif, Lavoisier 1995.

- [36] **T Zidemal**, « Modèle de prédiction et de commande de la machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de maîtrise, Université de Québec, Avril 2015.
- [37] **A benabdallah et A Miloudi**, « développement de capteurs logiciels de vitesse et de position pour la commande de la machine synchrone à aimants permanents », Mémoire Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi bordj bou arréridj, 2021.
- [38] **A Hamichi et F Benkerrou**, «Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent », Mémoire Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2015.
- [39] **I Abidi**, « Commande à vitesse variable d'une machine synchrone à aimant permanent », Mémoire Master en Electrotechnique, Université bordj badji mokhtar Annaba, 2019.
- [40] **N senhaji et A chalabi**, « commande du moteur synchrone à aimants permanents par backstepping », Mémoire Master en Electrotechnique , Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2015.

# *Annexes*

# Annexes

## Annexe A Paramètres de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) étudiés [4].

|                                      |                           |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Tension statorique nominale $V_s$    | 230 V / 400 V             |
| Vitesse de rotation nominale $N_s$   | 1000 tr/min               |
| Fréquence nominale statorique $f_s$  | 50 HZ                     |
| Résistance statorique $R$            | 1.4 $\Omega$              |
| Inductance cyclique statorique $L_d$ | 0.0066 H                  |
| Inductance cyclique rotorique $L_q$  | 0.0066 H                  |
| Moment d'inertie $J$                 | 0.00176 Kg.m <sup>2</sup> |
| Coefficient de frottement $f$        | 0.00388 N.s/rd            |
| Flux des aimants $\phi_f$            | 0.1564 Wb                 |
| Nombre de paires de pôles $p$        | 3                         |

## Annexe B Transformations TRIPHASEE–DIPHASEE [30]

### B.1. Transformation de Clarke ou de Concordia

#### Passage du système triphasé fixe au système diphasé fixe

Les transformations de Clarke et de Concordia permettent (l'une ou l'autre) de passer d'un repère triphasé équilibré  $abc$  à un repère diphasé  $\alpha\beta$ . Ce qui est très intéressant puisque l'objectif de la commande vectorielle est de parvenir à commander séparément les deux grandeurs **flux et couple** qui seront chacune, associée à un axe.

L'objectif de toute commande de machine étant le transfert maximum de puissance (entre la machine et sa charge).

#### 1. Transformation de Clarke

Cette transformation ( $\alpha\beta 0$ ) n'est pas normée, par conséquent elle ne conserve pas la puissance, mais conserve les amplitudes. Les matrices de Clarke et Clarke inverse sont :

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (B.1); \quad [C]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (B.2)$$

#### Remarques

La matrice de Clarke n'est pas normée par conséquent, son inverse n'est pas égale à sa transposée.

Si le système des tensions est équilibré, la matrice de Clarke, se réduit à :

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

#### 2. Transformation de Concordia

Cette transformation ( $\alpha\beta 0$ ) normée, elle conserve la puissance mais pas les amplitudes.

Les matrices de Concordia et Concordia inverse, sont :

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (B.4); \quad [C]^{-1} = [C]^T = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (B.5)$$

#### Remarques

La matrice de Concordia est normée par conséquent, son inverse est égal à sa transposée. Si le système des tensions est équilibré, la matrice de Concordia, se réduit à :

$$[c_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (B.6)$$

## Annexe C Calcul des régulateurs [8]

### C.1 Régulateur du courant $I_q$

Les gains du régulateur PI du courant quadrature pour un temps de réponse donné seront calculés comme suivante :

$$t_r = 3 \frac{R_s}{K_{iq}} \quad (\text{C.1})$$

$$k_{iq} = 3 \frac{R_s}{t_r} \quad (\text{C.2})$$

$$\frac{K_{pq}}{K_{iq}} = \frac{L_q}{R_s} \quad (\text{C.3})$$

$$k_{pq} = 3 \frac{L_q}{t_r} \quad (\text{C.4})$$

### C.2 Régulateur du courant $I_d$

Les gains du régulateur PI du courant direct pour un temps de réponse donné seront calculés comme suivante :

$$t_r = 3 \frac{R_s}{K_{id}} \quad (\text{C.5})$$

$$k_{id} = 3 \frac{R_s}{t_r} \quad (\text{C.6})$$

$$\frac{K_{pd}}{K_{id}} = \frac{L_d}{R_s} \quad (\text{C.7})$$

$$k_{pd} = 3 \frac{L_d}{t_r} \quad (\text{C.8})$$

### C.3 Régulateur de la vitesse $\omega$

Les gains du régulateur PI de la vitesse de rotation pour un temps de réponse donné seront calculés comme suit :

$$t_r = 3 \frac{f}{K_i} \quad (\text{C.9})$$

$$k_i = 3 \frac{f}{t_r} \quad (\text{C.10})$$

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{J}{f} \quad (\text{C.11})$$

$$K_p = 3 \frac{J}{t_r} \quad (\text{C.12})$$

## **Annexe D Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK™ [30]**

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les "Toolboxes") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.

Des modules temps réel, développés autour des produits dSPACE (Real Time Interface, TRACE, COCKPIT) sont également proposés et rendent l'environnement de travail particulièrement attractif : l'utilisateur dispose en effet de tous les outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision.

Les simulations proposées sont réalisées sous MATLAB/SIMULINK™.