

N° Ordre...../DGM/FSI/UMBB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Spécialité : Electromécanique

THEME

Comparaison de la motorisation par moteur à courant continu et par servomoteur synchrone sur un tour à commande numérique.

Présenté par :

- ❖ BOUROUBA Yasmine
- ❖ AKLIL Ryma

Promotrice :

D^r CHEKARI Tassadit

Encadrant :

M^rIFRENE Ahmed

Promotion 2021- 2022

ملخص

يقدم هذا البحث دراسة لمقارنة محرك التيار المباشر مع محرك التيار المترجم قبل البدء في هذا المقارنة يجب علينا دراسة المحركات الكهربائية كخطوة أساسية لذلك ركزنا على نمذجة التحكم في محرك مكانة مترجمة ذات مغناط دائمة موصول بمحول (متناوب_مستمر) من أجل معرفة الاداء الديناميكي للمحرك المختار ثم استخدمنا استراتيجية التحكم على مكانة باستخدام منظمات لجعلها متطابقة مع محرك التيار المستمر ذو اثاره مستقلة و جرى اختبار اداءها في اضطرابات مختلفة اظهرت نتيجة المحاكاة المتحصل عليها كفاءة اداء المحرك المقترح .و اضافة الى ذلك ، يتوقع من خلال نتائج عمليات المحاكاة في إطار فرضية السياسات المنسقة أن تتلاشى الاختلافات العالمية على نحو سليم، مع إبقاء الوضع الخارجي للأصول والخصوم في الاقتصادات الرئيسية منضبطا، مما سيفضي بدوره إلى دعم زيادة استقرار أسعار الصرف.

كلمات مفتاحية : محرك مترجم ذات مغناط دائمة التعديل، التحكم بتوجيه التدفق، محاكاة آلة التيار، آلة أدوات TBM26/32.

Abstract

This thesis, presents a comparison study between Direct Current Motor Engine and the synchronous servo motor. Before starting this comparison, the study of the electric motors is a primordial step. For that, our work was focused on the modeling of the control of the synchronous machine with permanent magnets (PMSM), powered by a control converter using PWM technique in order to know the dynamic performance of the chosen motor. Subsequently, we used the flux orientation command strategy of PMSM with PI regulators to make it identical to the separately excited motor current content, after that, it's performance was tested for different disturbances. The simulation results obtained showed that the behavior of MSAP can be assimilated to that of MCC when the vector command is applied.

Key words: Permanent magnet synchronous motor, PWM, Field oriented control, direct current machine, tools machin TBM26/32.

Résumé

Ce mémoire, présente une étude de comparaison de la motorisation par moteur à courant continu et la motorisation par servomoteur synchrone sur un tour à commande numérique. Avant d'entamer cette comparaison, l'étude des moteurs électriques est une étape primordiale. Pour cela, notre travail a été axé sur la modélisation de la commande de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) , alimentée par un onduleur de tension contrôlé par la technique MLI en vue de connaître les performances dynamiques de moteur choisi. Par la suite, on a utilisé la stratégie de la commande vectorielle de la MSAP avec des régulateurs PI pour le rendre identique au moteur à courant continu à excitation séparée, puis on a testé ses performances aux différentes

perturbations. Les résultats de simulation obtenus ont montré que le comportement de MSAP peut être assimilé à celui de MCC lorsque la commande vectorielle est appliquée.

Mots clés : Machine synchrone à aimants permanents, MLI, Commande vectorielle, Moteur à courant continu, Machine à outil TBM26/32.

Remerciement

Remerciements

En premier lieu, nous remercions « Dieu Tout Puissant » de nous avoir donné la santé, la patience, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos familles pour leur aide précieuse, notre encadreur M^{me} CHEKARI Tassadit pour ses conseils et orientations tout le long de notre projet de fin d'étude.

Nous remercions aussi l'ensemble du personnel de l'entreprise SNVI, en particulier notre encadreur M^r IFRENE Ahmed qui nous a accueilli toute la durée de notre stage pratique.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

BOUROUBA YASMINE

AKLIL RYMA

Dédicaces

Dédicaces

Je Dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien tout au long de mes études.

A mes très chers frères : abd-elrazek, alaadine, abd-elmalek

A ma binôme Yasmine et leurs familles

A tous mes chers amis de loin ou de près, pour leur encouragement permanent et leur soutien moral.

A tous ceux qui ont veillé à mon instruction

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Avec l'expression de tous mes sentiments et mon respect,

Je dédie ce modeste travail.

RYMA

Dédicaces

Tout d'abord, je voudrais remercier tout ce que Dieu m'a donné.

*Je dédie mes chers parents pour tous leur sacrifices, leur amour, leur
tendresse,*

Leur soutien tout au long de mes études.

A mes très chers frères : Khaled, Ncer Eddine, fares ;

A ma binôme Ryma ;

*Je souhaite adresser mes remerciements distingués et toute ma gratitude aux
Personnes qui ont contribué et aidé à la réalisation de ce travail de fin de
master.*

*A tous mes chers amis et mes camarades et leurs familles, pour leur
Encouragements permanant et leur soutiens moral.*

Merci...

YASMINE

Sommaire

| | |
|--|----|
| Remerciements | |
| Dédicaces | |
| Liste des Figures | |
| Liste des Tableaux | |
| Liste d'abréviations | |
| Introduction générale..... | 1 |
| Préambule : Présentation de l'entreprise SNVI | |
| Introduction..... | 3 |
| 1.Historique de l'entreprise | 3 |
| 2.Mission..... | 4 |
| 3.Objectifs..... | 5 |
| 4.Organigramme générale de l'entreprise SNVI | 6 |
| 5.Filiale véhicule industrielle de Rouïba | 7 |
| 6.Produit | 8 |
| 7.Organigr'ame de la filiale véhicule industrielle de Rouïba | 9 |
| Chapitre I : Etude technologie de la machine | |
| I.1 Introduction | 10 |
| I.2 Centre d'usinage à commande numérique | 10 |
| I.2.1 Tournage | 10 |
| I.2.2 Fraisage..... | 10 |
| I.3 Machine TORNOS TBM 26/32 | 11 |
| I.3.1 Poupée fixe | 12 |
| I.3.2 Tourelle..... | 14 |
| I.3.3 Coulisse..... | 16 |
| I.3.4 Combiné..... | 17 |
| I.3.5 Pupitre opérateur | 17 |
| I.3.6 Boutons de commande | 18 |
| I.4 Axes..... | 23 |
| I.5 Problématique | 24 |
| Chapitre II : Généralités sur les machine électriques | |
| II.1 Introduction | 25 |

| | |
|--|----|
| II .2 principe de fonctionnement | 25 |
| II .2.1 fonctionnement Moteur | 25 |
| II .2.2 Fonctionnement en génératrice | 25 |
| II .3 Type de moteur électrique | 26 |
| II.4 Moteur à Courant Continu (MCC) | 27 |
| II.4.1 principe de fonctionnement..... | 28 |
| II.4.2 Constitution du moteur à courant continu :..... | 28 |
| II.4.3 Types des moteurs à courant continu..... | 32 |
| II.4.4 Avantages et inconvénients du moteur à courant continu | 35 |
| II.5 Rendement..... | 35 |
| II.6 Machine à courant alternatif..... | 36 |
| II.7 Machine asynchrone | 36 |
| II.8 moteur pas à pas..... | 40 |
| II.9 Machine synchrone | 42 |
| II.9.2 Construction de la machine synchrone | 42 |
| II.10 Servomoteurs synchrones | 44 |
| II.10.1 Types de Machine Synchrone à Aiment Permanents (MSAP)..... | 44 |
| II.10.2 Avantages et inconvénients du MSAP..... | 45 |
| II.11 Différent démarrage des moteurs | 46 |
| II.9.1 Démarrage direct..... | 46 |
| II.9.2 Démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche..... | 46 |
| II.9.3 Utilisation d'un procédé de démarrage | 47 |
| II.12 Comparaison générale entre les types des moteurs électriques | 48 |
| II.13 Conclusion..... | 49 |
| Chapitre III: Modélisation de MSAP -MCC | |
| III .1 Introduction..... | 50 |
| III.2 Machine synchrone..... | 50 |
| III.3 Principe de fonctionnement de la MSAP : | 50 |
| III.2.1 interne des aimants permanents | 51 |
| III.3 Type de rotors de la machine MSAP | 51 |
| III.4 Domaines d'application avantages et inconvénients de MSAP | 52 |
| III.5 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents..... | 53 |

| | |
|--|----|
| III.5.1 Mise en équations de la machine dans le repère (abc) | 53 |
| III.6 Application de la transformation de Park à la machine MSAP..... | 57 |
| III.7 Modélisation de MSAP sous la forme d'états de la machine MSAP | 59 |
| III.9 Alimentation de la machine MSAP..... | 61 |
| III.9.1 L'onduleur | 61 |
| III.9.2 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux | 63 |
| III.9.3 Onduleur de Tension à MLI :..... | 65 |
| III.9.1 Description d'un moteur à courant continu | 66 |
| III.9.2 Modélisation mathématique de MCC..... | 68 |
| Chapitre IV : Commande vectorielle et résultats de simulation | |
| IV.1 Introduction..... | 70 |
| IV.2 Principe de la commande vectorielle | 70 |
| IV.2.1 Découplage par compensation | 71 |
| IV.2.2 Description du système global | 72 |
| IV. 3 Simulation de la machine MSAP | 73 |
| IV. 3. 1 Simulation de la dynamique de la MSAP | 73 |
| IV.4 Simulation de la MSAP en boucle fermée | 75 |
| IV. 5 simulations de la machine MCC..... | 80 |
| IV.5.1 Simulation de la dynamique de la MCC en boucle ouverte..... | 81 |
| IV.5.2 Simulation de la dynamique un couple de charge de le MCC en boucle ferme | 82 |
| IV.6 conclusion | 84 |
| Conclusion générale | 85 |
| Références | 87 |
| Annexe..... | 89 |

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 : Eléments principaux de la TORNOS TBM26/32..... | 11 |
| Tableau I.2 : Caractéristiques de la machine TBM 26/32..... | 12 |
| Tableau I. 3 : Caractéristiques des éléments composants de la poupée..... | 14 |
| Tableau I.4 : Boutons de commande..... | 19 |
| Tableau II.1 caractéristique de MCC | 29 |
| Tableau II.2 : Différents types de moteurs et leur caractéristique..... | 49 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Organigramme général de l'entreprise SNV..... | 6 |
| Figure 2 : Organigramme de la VIR (document interne de l'entreprise) | 9 |
| Figure I.1 : Machine commande numérique de type TORNOS TBM 26/32..... | 11 |
| Figure I.2 : Mécanisme vis-crou..... | 12 |
| Figure I.3 : Fonctionnement de la poupée..... | 13 |
| Figure I. 4 : Tourelle de la TORNOS TBM26/32..... | 13 |
| Figure I.5 : Schéma de fonctionnement de la tourelle..... | 16 |
| Figure I.6 : Combiné de la TORNOS TBM26/32..... | 17 |
| Figure I.7 : Pupitre opérateur..... | 18 |
| Figure I.8 : Boutons de commande..... | 19 |
| Figure I.9 : Schéma général de la machine..... | 21 |
| Figure I.10 : Principe de la Codeur..... | 22 |
| Figure I.11 : Principe de fonctionnement..... | 22 |
| Figure I.12 : Répartition générale des axes..... | 23 |
| Figure II.1 : Représentation des quatres quadrants du couple et de la vitesse..... | 26 |
| Figure II.2 : Classification générale des moteurs électriques..... | 27 |
| Figure II.3 : Principe fonctionnement de M.C.C..... | 28 |
| Figure II.4 : Constitution moteur à courant continu..... | 29 |
| Figure.II.5 : Composants de l'inducteur..... | 29 |
| Figure II.6 : Stator à aimant permanent..... | 30 |
| Figure II.7 : Induit d'un moteur à courant continu..... | 30 |
| Figure II.8 : Collecteur | 31 |
| Figure II.9 : Balais | 32 |
| Figure II.10 : Moteur à excitation indépendante | 32 |
| Figure II.11 : Moteur C.C excitation shunt | 33 |
| Figure II.12 : Moteur C.C excitation composée | 33 |
| Figure II.13 : Moteur C.C excitation série | 34 |
| Figure II.14 : Moteur défaillant de la TORNOS TBM 26 et sa plaque signalétique | 35 |
| Figure II.15 : Rendement | 36 |
| Figure II.16 : Machine asynchrone..... | 36 |
| Figure II.17 : Dessin expérimental de principe de fonctionnement..... | 38 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure II.118 : Stator de la machine asynchrone..... | 39 |
| Figure II.19 : Rotor bobiné..... | 39 |
| Figure II.20 : Rotor à cage d'écureuil..... | 40 |
| Figure II.21 : principe de fonctionnement..... | 41 |
| Figure II.22 : Principe de fonctionnement synchrone..... | 42 |
| Figure II.23 : Stator de la machine..... | 43 |
| Figure II.24 : Rotor..... | 43 |
| Figure II.25 : Schéma principal du servomoteur synchrone..... | 44 |
| Figure II.26 : Types des rotors de la MSAP..... | 45 |
| Figure II.27 : Circuit de puissance..... | 46 |
| Figure II.28 : Circuit de commande..... | 46 |
| Figure II.29 : Couplage étoile et triangle..... | 47 |
| Figure II.30 : Démarrage par élimination des résistances statoriques..... | 48 |
| Figure III.1 : Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents..... | 50 |
| Figure III.2 : Différentes structures de rotors MSAP..... | 52 |
| Figure III.3 : Schéma de la MSAP dans le repère abc..... | 54 |
| Figure III.4 : Différents couples agissent sur le rotor..... | 56 |
| Figure III.5 Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d, q) | 57 |
| Figure III.6 : Alimentation de la Machine synchrone à aimants permanent..... | 62 |
| Figure III.7 : Représentation d'un onduleur triphasé de tension à deux niveaux | 64 |
| Figure III.8 : Principe de la commande MLI ST..... | 67 |
| Figure III.9 : Schéma d'un moteur à courant continu..... | 68 |
| Figure III.10 : Modèle électrique équivalent du rotor du MCC..... | 68 |
| Figure III.11 : Modèle électrique équivalent du stator du MCC..... | 68 |
| Figure III.12 : Schéma électrique d'une machine à excitation séparée..... | 69 |
| Figure. IV.1 : Principe de la commande vectorielle..... | 70 |
| Figure IV.2 : Découplage par compensation..... | 72 |
| Figure. IV.3 : Commande découplée..... | 72 |
| Figure. IV.4 : Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP..... | 73 |
| Figure IV.5 : Modèle de la MSAP dans le repère de Park..... | 74 |
| Figure IV.6 : Résultats de simulation de la MSAP dans le repère de Park..... | 74 |
| Figure IV.7 : schéma du régulateur PI..... | 76 |
| Figure IV.8 : boucle de régulation de la vitesse | 76 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure IV.9 : Boucle de régulation du courant I_q | 77 |
| Figure IV.10 : Boucle de régulation du courant I_d | 78 |
| Figure IV.12 : Evolution des grandeurs de la machine MSAP pour différentes valeurs de la vitesse de référence..... | 78 |
| Figure IV.11 : Schéma bloc global de la commande vectorielle | 78 |
| Figure IV.13 : Evolution des grandeurs de la machine MSAP à vide ensuite en charge..... | 79 |
| Figure IV.14 : Modèle de simulation de le MCC..... | 81 |
| Figure IV.15 : Résultats de simulation de MCC en boucle ouverte..... | 82 |
| Figure IV.16 : Schéma de régulation du MCC | 82 |
| Figure IV.17 : Résultats de simulation de MCC en boucle fermée..... | 83 |

Liste des symboles et abréviations

| Symbole | Signification | Unité |
|------------------------|--|-------------------|
| T | Temps | sec |
| V_{dref} | Tension de référence | V |
| I_{dref} | Courant de référence | A |
| S | Operateur de LAPLACE | / |
| φ_d, φ_q | Flux des axes d et q | |
| V_d, V_q | Tensions des axes d et q | V |
| I_d, I_q | Courants des axes d et q | A |
| L_d, L_q | inductance des axes d et q | H |
| X_{dq0} | Vecteur de la variable X dans le repéré de Park | / |
| X_{abc} | Vecteur de la variable X dans le repéré triphasé | / |
| $P(\theta)^{-1}$ | Matrice de passage inverse de Park | / |
| $P(\theta)$ | Matrice de passage direct de Park | / |
| U_0 | Tension continue appliquée à l'onduleur | V |
| F | Coefficient de frottement visqueux | N.m.s/rad |
| θ | Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé | / |
| J | Moment d'inertie des parties tournantes ramenées à l'arbre de moteur | Kg/m ² |
| P | Nombres des paires des pôles | / |
| C_r | Couple résistant | N.m |
| C_{em} | Couple électromagnétique délivre par le moteur | N.m |
| ω | Vitesse de rotation de la machine | rad/s |
| ω_e | Vitesse électrique | rad/s |
| Φ_f | Vecteur flux engendre par l'aimant | Wb |
| [Ls] | Matrice inductance stator | H |
| R_s | Résistance d'enroulement statorique | Ohms |
| [Rs] | Matrice résistance stator | Ohms |
| [Is] | Vecteur courant statorique | A |
| [Vs] | Vecteur tension statorique | V |
| MCC | Moteur a courant continue | |
| MSAP | Moteur synchrone a aiment permanant | |

Introduction générale

Après la découverte du lien entre l'électricité et le magnétisme en 1821 par le chimiste Danois Hans Christian Oersted, les physiciens britanniques Michael Faraday et Peter Barlow avaient fait dès l'année suivante la démonstration de dispositif transformant un courant électrique en un mouvement. En 1871, le physicien belge Zénobie Gramme présentait à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu. En 1887, le physicien serbe Nikola Tesla déposait le premier brevet du moteur électrique actuel à courant alternatif [8].

Les moteurs à courants continus sont très utilisés dans l'industrie (surtout dans les machines à outils) car ils sont faciles à modéliser vu le découplage naturel entre le flux et le couple ce qui rend leur commande est très facile mais la présence du système collecteur balais, qui s'use rapidement, nécessite une maintenance périodique ; de ce fait, le Moteur à Courant Continu (MCC) est généralement remplacé par la machine synchrone à aimant permanent qui permet la suppression des bagues et des balais, ce qui réduit les problèmes de maintenance [17].

L'association de ces machines avec des convertisseurs statiques a trouvé de nombreuses applications, par exemple les machines synchrones qui sont de plus en plus utilisées comme servomoteurs en remplacement des machines à courant continu.

La commande souvent adaptée aux convertisseurs statiques est la stratégie Modulation par Largeur d'Impulsion (MLI). Plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer à la sortie de l'onduleur une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmonique possible. Pour l'onduleur de notre système de commande nous utilisons la technique de la modulation vectorielle. Le principe de cette méthode est la détermination des portions de temps (durée de modulation) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension durant la période d'échantillonnage [7]. Cette commande rapprochée permet des extinctions des composants du convertisseur et de minimiser les harmoniques des tensions appliquées au moteur.

Pour un entraînement à courant alternatif performant on préfère une stratégie de commande évoluée, il en existe plusieurs pour les machines électriques à courant alternatif et pour la MSAP, le contrôle par flux orienté est une méthode appropriée pour satisfaire des performances élevées. Il introduit un découplage entre le flux et le couple et assure une caractéristique de réglage mécanique similaire à celle d'un moteur à courant continu à

Introduction générale

excitation séparée. La qualité de la commande vectorielle dépend en grande partie des caractéristiques dynamiques et statiques de l'onduleur [22].

Dans le cadre de la préparation de notre mémoire de fin d'études, nous avons choisi la Société Nationale de Véhicules Industrielles (SNVI) et plus exactement sa filiale de Rouïba (VIR). Les responsables de cette dernière nous ont proposé le thème portant sur : « La comparaison de la motorisation par moteur à courant continu et par servomoteur synchrone sur un tour à commande numérique ».

Notre travail consiste à réaliser une étude comportant les chapitres suivants :

- Le premier chapitre sera consacré à l'étude technologique du centre d'usinage dans lequel seront cités ses éléments, parties principales et la problématique rencontrée.
- Quant au deuxième chapitre, il sera consacré à l'étude générale des moteurs électriques parmi lesquels figure le moteur défaillant (moteur à courant continu à aimant permanent), puis son remplacement par un moteur synchrone à aimant permanent.
- Le troisième chapitre comportera deux parties ; dont la première sera consacrée à l'étude et la modélisation détaillée de la machine synchrone à aimant permanent dans le repère (abc), puis à l'aide de la transformation de Park on obtiendra le modèle dans le repère (dq) ; cette étape est primordiale car elle permettra non seulement une meilleure connaissance de la machine mais aussi prépare efficacement le terrain à l'application des lois de commande qu'on souhaiterait mettre en place. La deuxième partie sera consacrée à la modélisation de l'onduleur de tension et de sa commande MLI.
- En fin, Le dernier chapitre sera consacré à la commande vectorielle (FOC) et son application à la MSAP et le modèle de simulation. La théorie de cette commande permettra d'assimiler la machine synchrone à aimant permanent à une machine à courant continu à excitation séparée.

Ce chapitre sera consacré à établir les tests de simulation de :

- L'ensemble convertisseur statique-MSAP et ses résultats,
- La stratégie commande vectorielle et ses résultats.
- Simulation en boucle ouverte et en boucle fermée de la MCC.

Les résultats qui seront obtenus après ces simulations permettront de comparer le comportement de la MSAP et celui de MCC à excitation séparée afin de confirmer que les mêmes caractéristiques peuvent être obtenus en utilisant le MSAP et le MCC.

Introduction

La Société nationale des véhicules industriels, ou SNVI, anciennement Société nationale de construction mécanique (SONACOME), est un constructeur de véhicules industriels et de bus situé à Alger, en Algérie. Il conçoit et fabrique des véhicules utilitaires moyens et lourds, des bus pour le transport urbain et interurbain et des véhicules spéciaux comme les camions anti-incendie, tout-terrain ou pour le secteur militaire et la protection civile.

1. Historique de l'entreprise :

La SNVI (Société National des Véhicules Industriels) a été créé sous le sigle SONACOME [1].

- **De 1957 à 1966 :**

Implantation de la société française BERLIET pour la construction en juin 1957 d'une usine de montage de véhicules "poids lourds" à 30 km à l'est d'Alger, plus exactement à Rouïba.

- **De 1967 à 1980 :**

En 09/08/1967, fut créée la SONACOME (Société Nationale de Construction Mécanique) par Ordonnance n° 67-150. Le schéma organisationnel adopté pour la SONACOME regroupe dix (10) entreprises autonomes.

- **De 1981 à 1994 :**

La SNVI (Entreprise Nationale de Véhicules Industriels) devient une entreprise publique socialiste (EPS). La SNVI est née à l'issue de la restructuration de la SONACOME par le décret 81-342 du 12/12/1981, sa création lui consacra un statut d'entreprise socialiste à caractère économique régit par les principes directifs de la Gestion Socialiste des Entreprises (GSE).

- **De 1995 à 2011 :**

En Mai 1995, la SNVI a changé de statut juridique pour devenir une Entreprise Publique économique régie par le droit commun : elle est alors érigée en Société Par Actions (SPA), au capital social de 2,2 milliards de Dinars et devient, alors un groupe industriel.

- **De 2011 à Janvier 2015 :**

Au mois d'Octobre 2011, la SNVI a changé de statut juridique pour devenir un Groupe qui se composé d'une Société Mère et de quatre filiales.

- **De Février 2015 à ce jour :**

Suite à la réorganisation du Secteur Public Marchand de l'Etat en date du 23 Février 2015, l'EPE FERROVIAL et toutes ses participations a été rattachée au Groupe SNVI comme 5ème Filiale. Ainsi, le groupe SNVI se compose d'une société mère avec des :

- Directions Centrales,
- Direction Centrale Commerciale et son réseau
- Division Rénovation Véhicules Industriels DRVI à Sidi-Moussa,

Et avec les filiales suivantes :

- Filiale Fonderie de Rouïba,
- Filiale Véhicules Industriels de Rouïba,
- Filiale Carrosseries Industrielles de Rouïba,
- Filiale Carrosseries Industrielles de Tiaret,
- Filiale Constructions de Matériels et Equipements Ferroviaires « FERROVIAL » d'Annaba.

2. Mission :

La SNVI, Entreprise Nationale de véhicules industriels est chargée dans le cadre du plan national de développement économique et social : production, l'exportation, la distribution, la maintenance des véhicules industriels, la recherche et le développement. Par véhicules industriels, on désigne :

- Les camions,
- Les autobus,
- Les autocars,
- Les camions spéciaux,
- Les remorques et semi-remorques.

Et d'une manière générale, tous les véhicules destinés au transport routier des personnes, des biens et des matières d'une charge utile supérieure à 1,5 tonnent.

En outre, la SNVI est chargée d'assurer et de promouvoir les activités d'après-vente et d'assister également les gros utilisateurs de ses produits dans la mise en place de leurs propres moyens de maintenance.

- La SNVI est caractérisée par une :
- Très grande spécialisation et une intégration verticale,
- Disposition d'une grande variété de produits,

- Présence sur l'ensemble du territoire national d'où une intégration économique appréciable.

3. Objectifs :

A. Satisfaire les besoins nationaux en véhicules industriels :

- Maximiser la production
- Acquérir rapidement une gamme de technologie (taux d'intégration élevé, grand nombre de produits).
- Rationaliser l'emploi.
- Utiliser les techniques performantes et adaptées.

B. Combler l'écart entre la production et la demande :

- Commercialiser les véhicules industriels fabriqués localement.
- Assurer la disponibilité de la pièce de rechange de la gamme SNVI
- Assurer le service après-vente.

C. Minimiser le prix des produits et de service en assurant sa rentabilité :

- Minimiser le prix de revient.
- Financer le développement de l'entreprise.

D. Formation des hommes :

Pour pouvoir assurer ses missions, la SNVI prend en charge le volet formation lui permettant de disposer en permanence d'un personnel qualifié pour la prise en charge des activités de l'entreprise.

E. Contribuer au progrès économique et social :

- Assurer l'implantation industrielle et commerciale sur l'ensemble du territoire.
- Assurer la disponibilité des produits sur l'ensemble du territoire au prix uniforme

4. Organigramme général de l'entreprise SNVI :

L'organigramme général de l'entreprise SNVI est donné par Figure (1) [1].

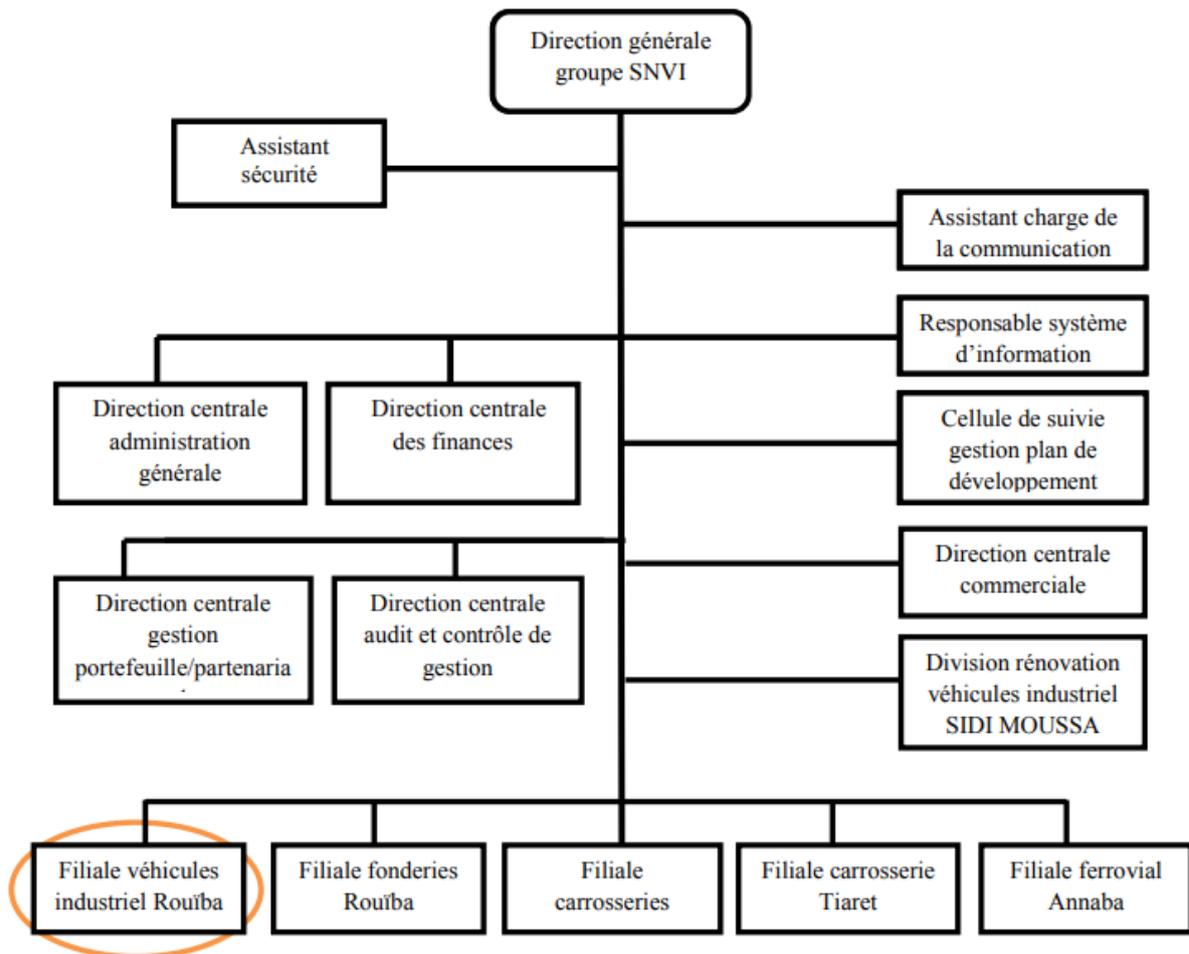


Figure 1 : Organigramme général de l'entreprise SNVI [1].

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, notre stage s'est déroulé dans la filiale « Véhicules industriels de Rouïba ».

5. Filiale Véhicules Industriels de Rouïba

Créé en Juillet 1970, le Complexe des Véhicules Industriels de Rouïba (VIR), érigé en Filiale le 1^{er} janvier 2011, faisant partie du groupe industriel SNVI est l'unique fabricant de véhicules industriels en Algérie.

Situé à 10 minutes de l'aéroport d'Alger et à 30 minutes du port, le complexe produit des camions de 6,6 à 26 tonnes de poids total en charge, des tracteurs routiers, des autocars et des autobus en mettant en œuvre des technologies et des techniques d'élaboration telles que : l'estampage à chaud (forge), l'emboutissage, l'usinage, le taillage d'engrenage, la rectification et les traitements thermiques. La capacité de production installée est de 4 500 véhicules/an.

Sa superficie est égale à 746 980 m² dont la répartition est comme suit :

- Bâtiments de production :
 - Couverte = 157 278 m²
 - Non couverte = 164 258 m²
- Zone de stockage = 177 318 m²
- Annexes = 23 451 m²
- Autres (BNA, etc...) = 24 763 m²
- Espaces verts = 64 830 m²
- Voiries = 102 000 m²

Cette filiale regroupe cinq (05) centres de production :

- Tôlerie et Emboutissage : production des longerons pour cadres châssis, des cabines et des pièces de liaisons,
- Forge : Obtention de bruts par déformation plastique à chaud,
- Montage Camions : assemblage des camions,
- Montage Autocars et Autobus : production des caisses, treillis et assemblage des cars & bus et produit également des pièces en polyester et sièges.
- Mécanique : production des ponts, des essieux, des directions et des pièces de liaisons.

A. Centre de Tôlerie Emboutissage :

Il permet l'obtention des pièces de Tôlerie par déformation plastique à froid. Il produit les cabines de camions, les longerons, traverses de châssis, traitement de surfaces ainsi que la production d'autres pièces, sous-ensembles élémentaires pour les centres de production et de montage. En amont se situent les opérations de débitage par l'utilisation des cisailles, plieuses et machines à découpe au plasma et par immersion.

B. Forage :

Il permet l'obtention des pièces par déformation plastique à chaud ; dans ce centre sont forgés à partir de barres d'aciers des :

- Arbres de boites
- Corps d'essieux
- Pignons
- Coulisseaux

- Fourchettes de boîtes de vitesses
- Fusées
- Leviers

Les procédés utilisés sont : le forgeage par déformation au choc, le forgeage par étirement ou refoulement, le traitement thermique.

B. Centre montage camions

Dans ce centre s'effectue l'assemblage des Camions routiers, Camions chantier, Camions tous terrains et des Tracteurs routiers.

D. Montage Autocars et Autobus

Dans ce centre s'effectue l'assemblage des autocars, autobus et sont réalisés les soubassements, les carcasses et les pièces de tôlerie.

E. Centre mécanique

Dans ce centre sont usinés à partir des barres laminées des bruts de forges, bruts de fonderie et des organes (Ponts, Essieux, boîtes de vitesses, boîtier de direction ainsi que diverses pièces).

Tous ces organes sont assemblés après usinage dans ce centre.

6. Produits :

A. Camions :

- K66 ; K120
- M120 ; M230
- TB260 ; TB350
- B350 ; B260
- C260

B. Cars :

- Safir (49L6)

C. Minicars :

- 38L6

D. Bus :

- 100V8

E. Minibus :

- 70L6

7. Organigramme de la filiale véhicules industriels de Rouïba [1].

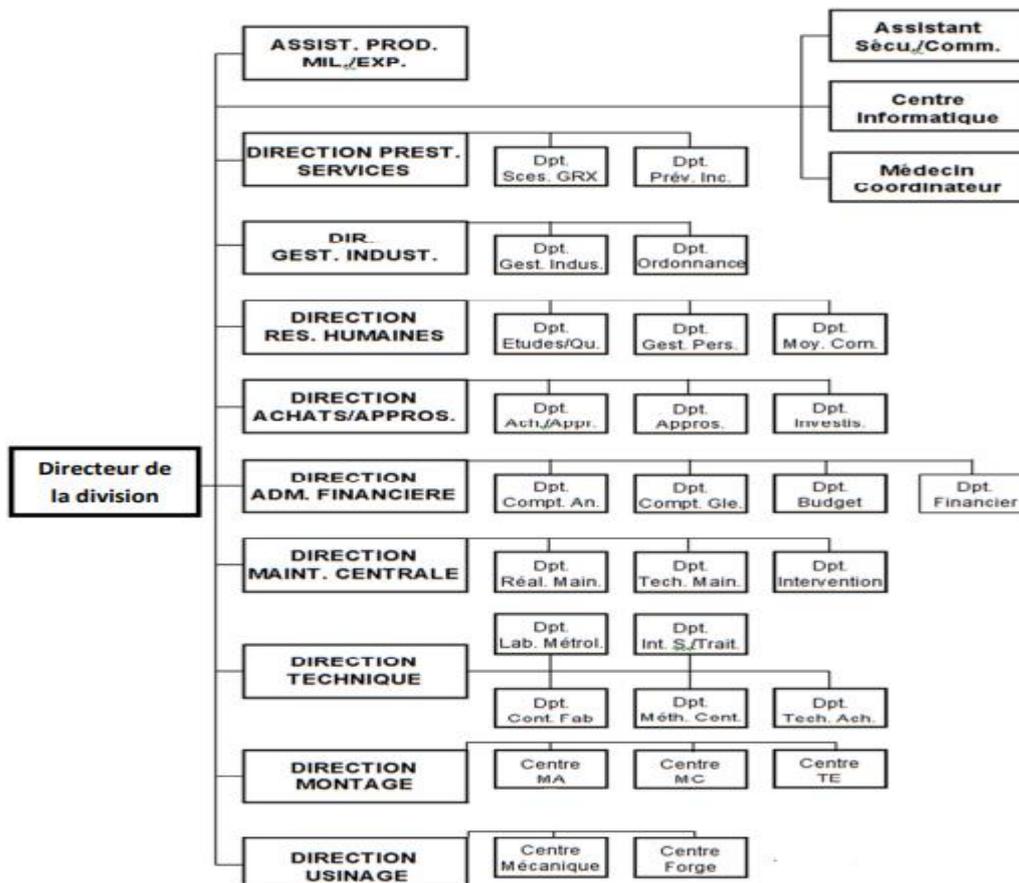


Figure 2 : Organigramme de la VIR [1].

Le niveau SNVI (VIR) dispose de plusieurs machines-outils et de plusieurs centres d'usinage dont le centre de tournage/fraisage TORNOS TBM 26/32. Le stage de notre projet de fin d'étude se déroulera au centre d'usinage de la filiale véhicule industriel Rouïba afin de trouver des solutions pour faire fonctionner les machines-outils ; il nous a été proposé par l'autre pour étudier la machine TORNOS TBM 26/32.

I.1 Introduction

Dans un environnement hautement concurrentiel, les entreprises s'efforcent constamment à réduire leurs coûts de fabrication. Les pièces à usiner se complexifient et les machines industrielles de haute technologie peuvent être associées à plusieurs opérations d'usinage classiques telles que le tournage, les fraiseuses et les perçages à tête fraisée [2].

L'usinage est l'étape d'enlèvement de matière et de création de pièces. Il s'agit d'une opération de base dans la fabrication de produits pour l'industrie mécanique. Les moyens de production associés à ces opérations d'usinage sont des machines-outils ou des centres d'usinage [3].

Les machines-outils à Commande Numérique (CN) sont des machines composées de plusieurs éléments pour effectuer les différentes opérations sur les pièces comme le tournage, le fraisage, etc. Dans le domaine de la fabrication de machines, le terme "commande" désigne tout matériel et logiciel ayant la capacité de donner des instructions de mouvement à tous les éléments d'une machine-outil.

I.2 Centre d'usinage à commande numérique

Un centre d'usinage est une machine-outil qui effectue automatiquement des opérations de fraisage, de perçage et de taraudage. Il y a un magasin d'outils avec un changeur automatique et peut être équipé d'un chargeur de pièces automatique. Toutes ces fonctions sont gérées par un ou plusieurs systèmes électroniques programmables (CN, calculateur, automate programmable, etc.) [3].

I.2.1 Tournage

Le tournage est un procédé de fabrication par enlèvement de matière (coupe) mettant en jeu des outils à arête unique, la pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe) qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement de translation appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

I.2.2 Fraisage

Le fraisage est un procédé de fabrication dans lequel l'enlèvement de matière sous forme de copeaux résulte de la combinaison de deux mouvements : la rotation de l'outil de coupe d'une part, et l'avancement de la pièce à usiner d'autre part.

I.3 Machine TORNOS TBM 26/32

La TORNOS TBM 26/32 est un centre d'usinage (tour à broche mobile) disposant de 8 axes destinés à la fabrication des pièces par enlèvement de matière. Cela consiste en Plusieurs parties et éléments, comme ce montre la figure (I.1), les éléments sont listes dans le tableau (I.1).



Figure I.1 : Machine à commande numérique de type TORNOS TBM 26/32.

Tableau I.1 : Eléments principaux de la TORNOS TBM26/32

| N° | Désignation |
|----|-------------------------|
| 1 | La poupée fixe |
| 2 | La tourelle |
| 3 | La coulisse |
| 4 | Le combine |
| 5 | Le pupitre opérateur |
| 6 | Les boutons de commande |

Les principales caractéristiques de la machine TBM26/32 sont montrées sur le Tableau (I.2).

Tableau I.2 : Caractéristiques de la machine TBM 26/32

Chapitre I Étude technologique de la machine TBM 26/32

| | |
|------------------------------|--|
| Dimension maximum des barres | Profil rond \varnothing : 32 mm Profil carre, sur plats : 22 mm Profil hexagonal, sur plats : 27 mm |
| Langueurmaximale de tournage | En un serrage : 296 mm |
| Pincepoupée | Marque : SCHAUBLIN Type : F37 Article : N° 740 \varnothing du corps : 37 mm Longueur : 92 mm |
| Pince de canon tournant | Marque : TORNOS- BECHLIER Type : 2.001.90 \varnothing du corps : 44 mm Longueur : 166 mm |
| Nombre de tours poupée | Variable par, commande moteur a courant continu : 100 a 5000 t/min |
| Outilssurtourelle | Nombre d'outils transversaux : 8 Section carrée des outils : 20*20 mm Outilstournants (en option) : 4 maximums |
| Puissance de la machine | Puissance active : 26 KW Puissance installée : 52 KVA |

I.3.1 Poupée fixe

C'est un organe du tour, portant la broche et les engrenages qui permettent d'obtenir les différentes vitesses[3].

- **Broche** : Arbre creux recevant le mouvement de rotation du moteur et dont l'extrémité sert au montage des différents plateaux ou mandrins. ; lorsque la broche tourne, le mandrin est entraîné en translation Figure (I.2).
- **Mandrin** : Accessoire servant à assujettir la pièce en cours d'usinage.

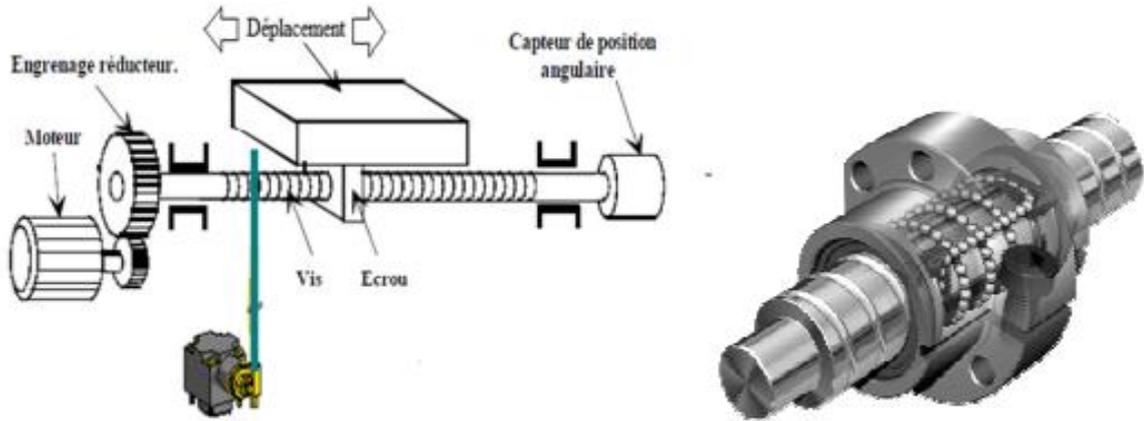


Figure I.2 : Mécanisme vis-écrou.

I.3.1.1 Principe de fonctionnement de la broche

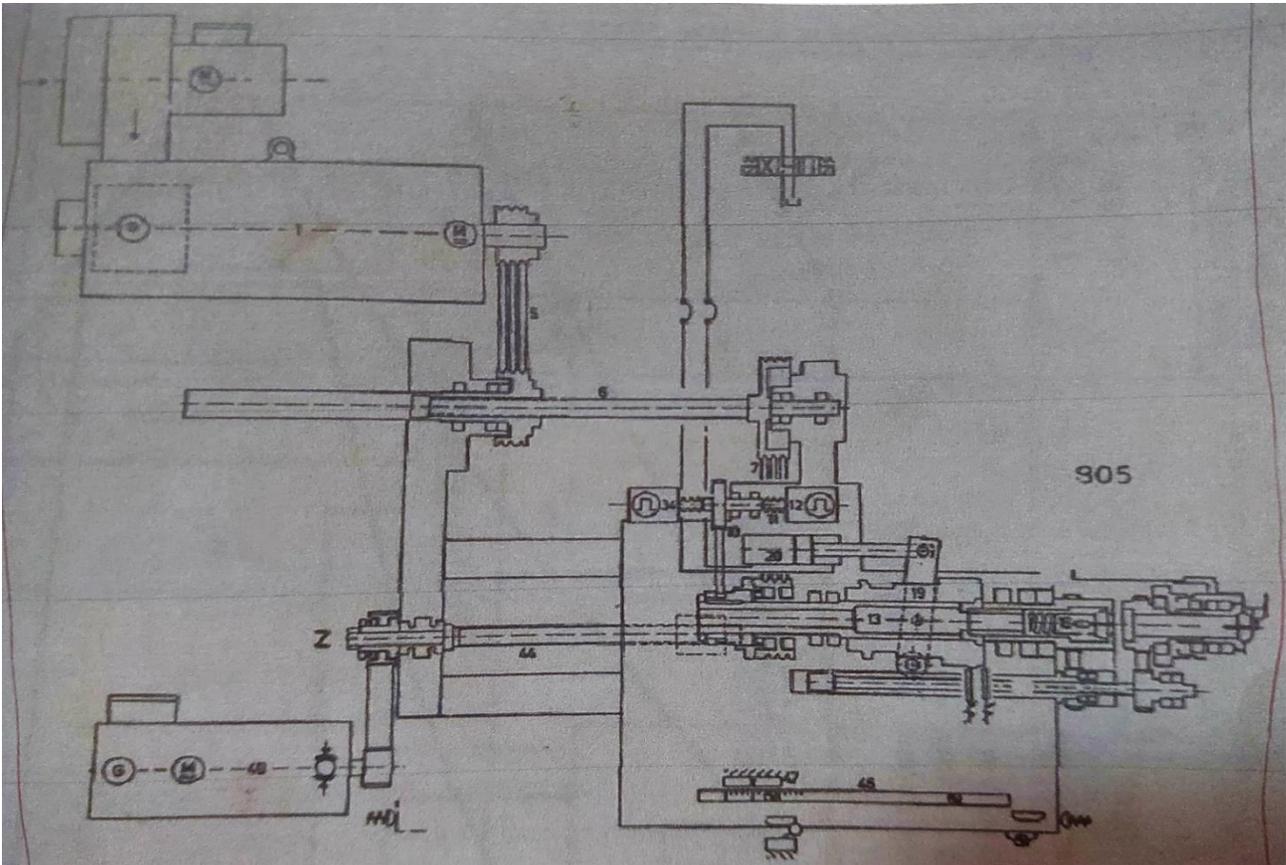


Figure I.3 : Fonctionnement de la poupée.

Chapitre I Étude technologique de la machine TBM 26/32

La machine TBM 26/32 est équipée d'une poupée de construction modulaire. La matière est serrée dans la broche poupée 13 figure (I.3) à l'aide de la pince 16 dont la fermeture et l'ouverture se réalise par un dispositif de serrage à billes 19 à commandé hydraulique 20.

La rotation de la broche poupée issue un moteur principal 1 à courant continu est transmis à l'aide des courrois trapézoïdale 5 et 7 par l'intermédiaire du renvoi 6. Le tachymètre (G) monte sur le moteur principal contrôle la vitesse de rotation de la broche poupée d'après les indications fournies par le capteur rotatif incrémental 12. Le capteur est accouplée à la broche poupée par son arbre avec accouplement 11 est le jeu de poulies avec courroie crantée.

Le déplacement de la poupée s'effectue au moyen de la vis à rouleaux 44 actionne par le moteur 40 à courant continu. Sa position est contrôlée à l'aide de capteur linéaire incrémental 47 et de sa règle 46.

Concernant l'arrêt de positionnement angulaire de la broche poupée se référer manuel d'utilisation TBM 26/32 [4].

Tableau I. 3 : Caractéristiques des éléments composants de la poupée

| | |
|---|---|
| Moteur principale à courant continu SIEMENS | Type IGG5116 – OKZ40 – 6HUL Vitesse maxi : 5000 t/min Puissance maxi : 10 ,5 KW |
| Dynamo tachymètre | Tachi |
| Courroie | GATE POLYFLEX 3*11 M 1400 |
| Courroie | GATE POLYFLEX 3*11M 925 |
| Broche poupée | n. maxi 5000 t/min |

I.3.2 Tourelle

Comme le montre la figure (I.4), c'est un bloc en acier, situé sur le chariot porte-outil ; ce dernier c'est un organe du tour situé sur le chariot transversal.

Chariot transversal : Organe du tour qui se déplace sur le corps du trainard suivant une direction perpendiculaire à l'axe de rotation de la broche.



Figure I. 4 : Tourelle de la TORNOS TBM26/32.

I.3.2.1 Principe de fonctionnement de la tourelle

La figure (I.5) montre le schéma de la tourelle.

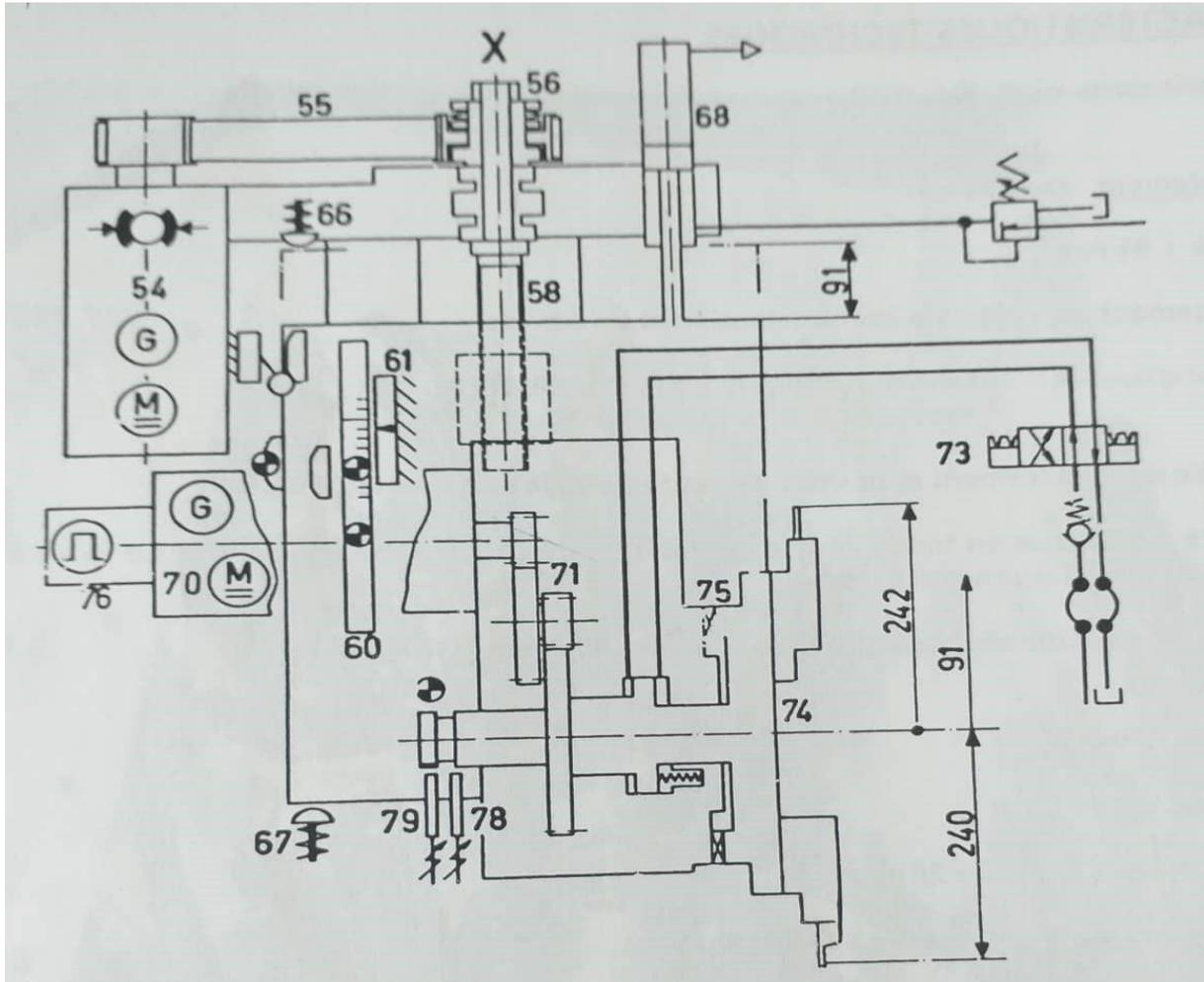


Figure I.5 : Schéma de fonctionnement de la tourelle.

Le déplacement de la tourelle porte outils s'effectue au moyen de la vis à billes Figure (I.5) actionnée par le moteur à courant continu 54 et la courroie crantée. Sa position est contrôlée laide de capteur linéaire incrémental 61 et de sa règle 60.

Dans son déplacement, la tourelle est assistée par un piston hydraulique 68 de compensation de poids et par une sécurité mécanique en fin de course composée d'un limiteur de couple 56 sur la vis à billes et des limiteurs caoutchouc arrière 66 et avant 67.

L'indexage de la tourelle 74 pour le changement d'outils est commandé pour le moteur à courant continu 70 et le train d'engrenages 71. La position adéquate et transmise par l'intermédiaire du capteur rotatif incrémental 76 [4].

I.3.3 Coulisse

C'est un organe de centre d'usinage équipé d'un outil servant à couper la pièce à la fin d'usinage.

I.3.4 Combiné

C'est un bloc en acier, conçu pour réaliser les opérations de fraisage et portant des broches dont l'extrémité sont fixés sur les outils de fraisage il est représenté sur la figure (I.6).



Figure I.6 : Combiné de la TORNOS TBM26/32.

I.3.5 Pupitre opérateur

Permet le dialogue entre l'homme et la machine permettant la mise au point des programmes pièce à l'aide du système clavier-écran ; c'est aussi le moyen de moduler certains paramètres tels que les vitesses d'avance ou les vitesses de la broche.

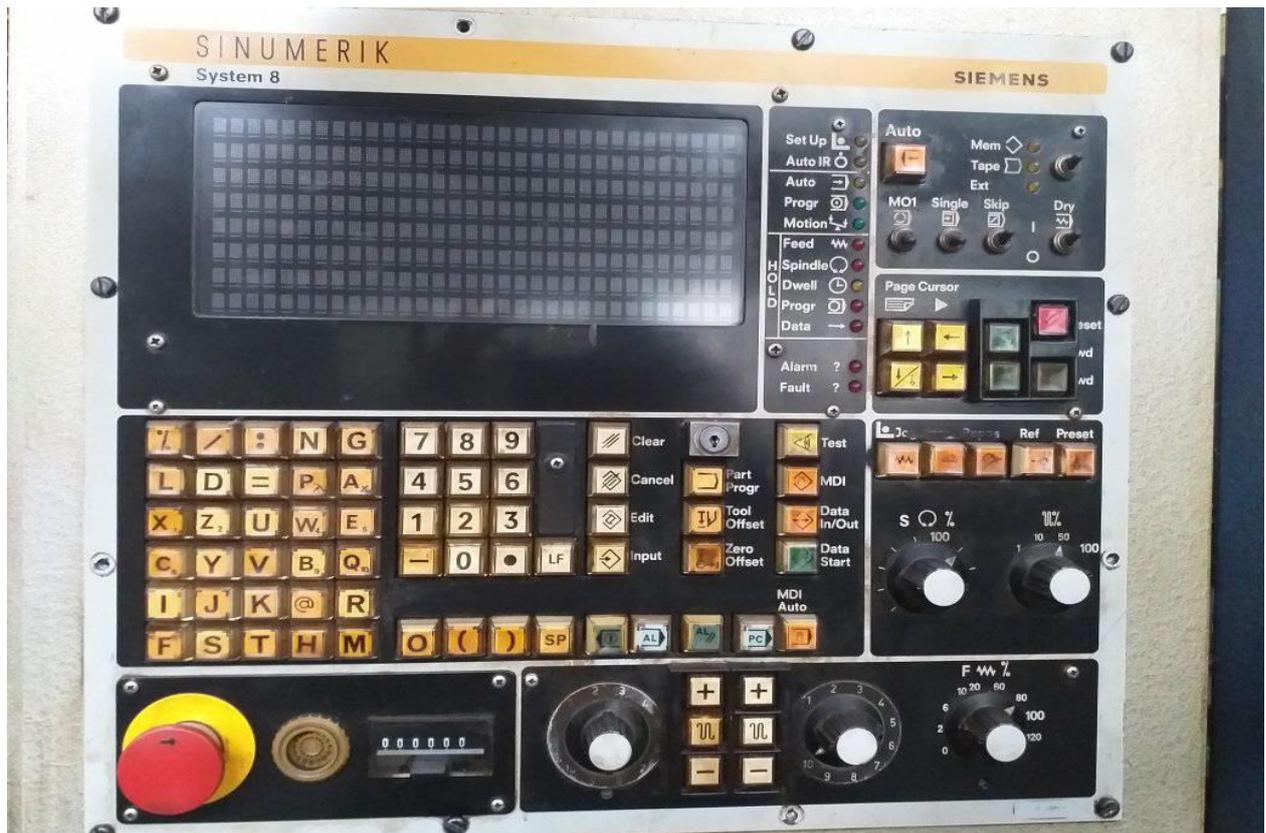


Figure I.7: Pupitre opérateur

I.3.6 Boutons de commande

Les boutons actionnent un circuit électrique mais peuvent également être utilisés dans un élément complètement mécanique. Figure (I.8) représente les boutons de commande de TBM 26/32.

Chapitre I Étude technologique de la machine TBM 26/32

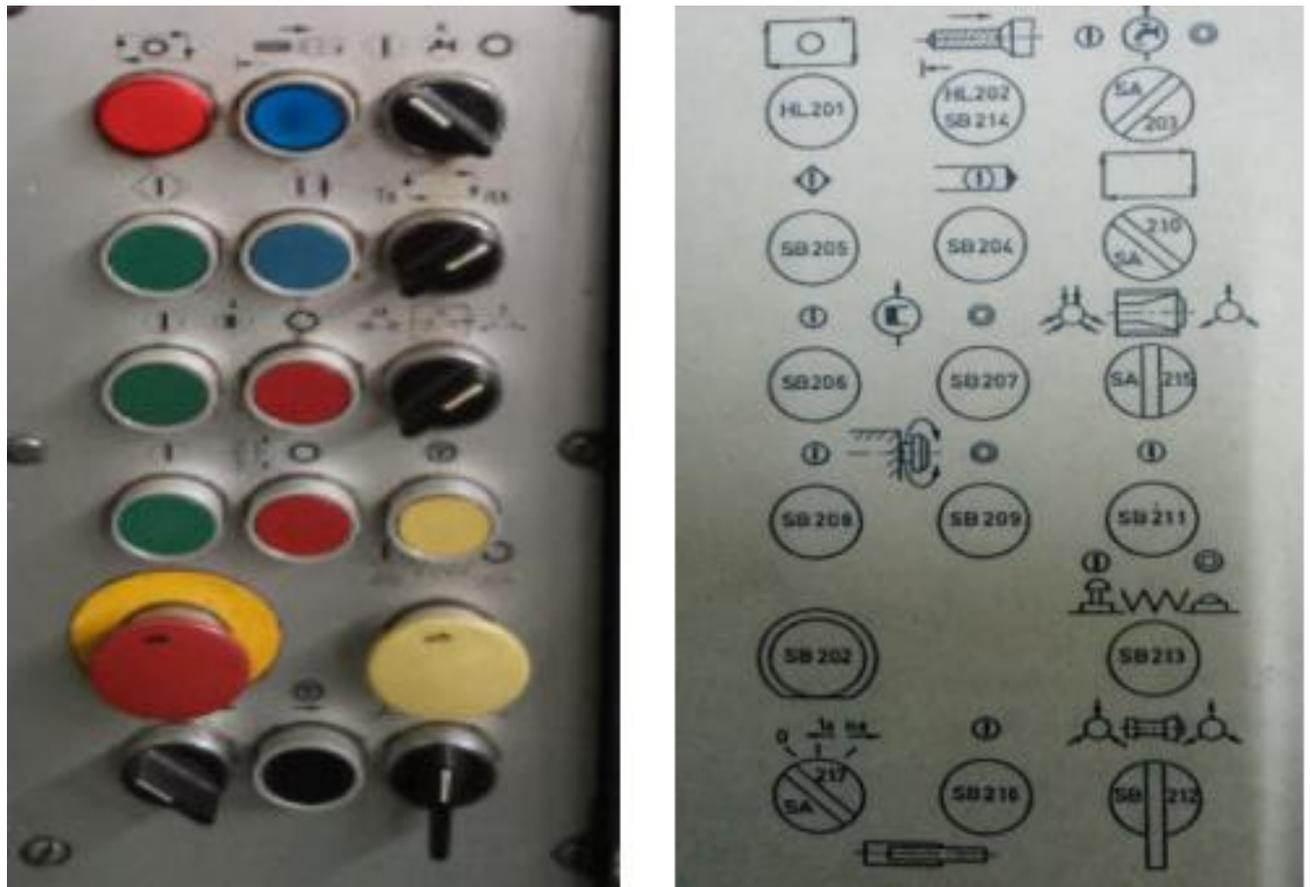


Figure I.8 : Boutons de commande.

Tableau I.4 : Boutons de commande

| Bouton | Fonction |
|-----------------|--|
| HL 201 | signal rouge de la lampe : arrêt ampoule |
| HL 202 / SB 214 | Bouton poussoir simulation filetage / Fin filetage |
| SA 203 | Sélecteur d'enclenchement de la lubrification |
| SB 205 | Bouton poussoir d'enclenchement C.N |
| SB 204 | Bouton poussoir Start cycle C.N |
| SA 210 | Sélecteur en mode pièce par pièce ou répète |
| SB 206 | Bouton poussoir d'enclenchement hydraulique |
| SB 207 | Bouton poussoir déclenchement hydraulique |
| SA 215 | Sélecteur canon ouvert ou fermé |

Chapitre I Étude technologique de la machine TBM 26/32

| | |
|--------|---|
| SB 208 | Bouton poussoir d'enclenchement de M121 et M131 |
| SB 209 | Bouton de déclenchement des moteurs de M121 et M131 |
| SA 217 | Sélecteur en mode automatique |
| SB 211 | Bouton poussoir pointage des avances |
| SB 202 | Bouton coup de poing d'arrêt d'urgence |
| SB 213 | Bouton coup de poing d'arrêt des avances et pointages |
| SB 212 | Sélecteur (ouverture / fermeture) pince poupée |
| SB 216 | Bouton poussoir avance pas à pas LNS |

La Figure (I.9) représenté le schéma général de la machine TORNOS TBM 26 /32, elle est dotée de plusieurs capteur et codeur.

Chapitre I Étude technologique de la machine TBM 26/32

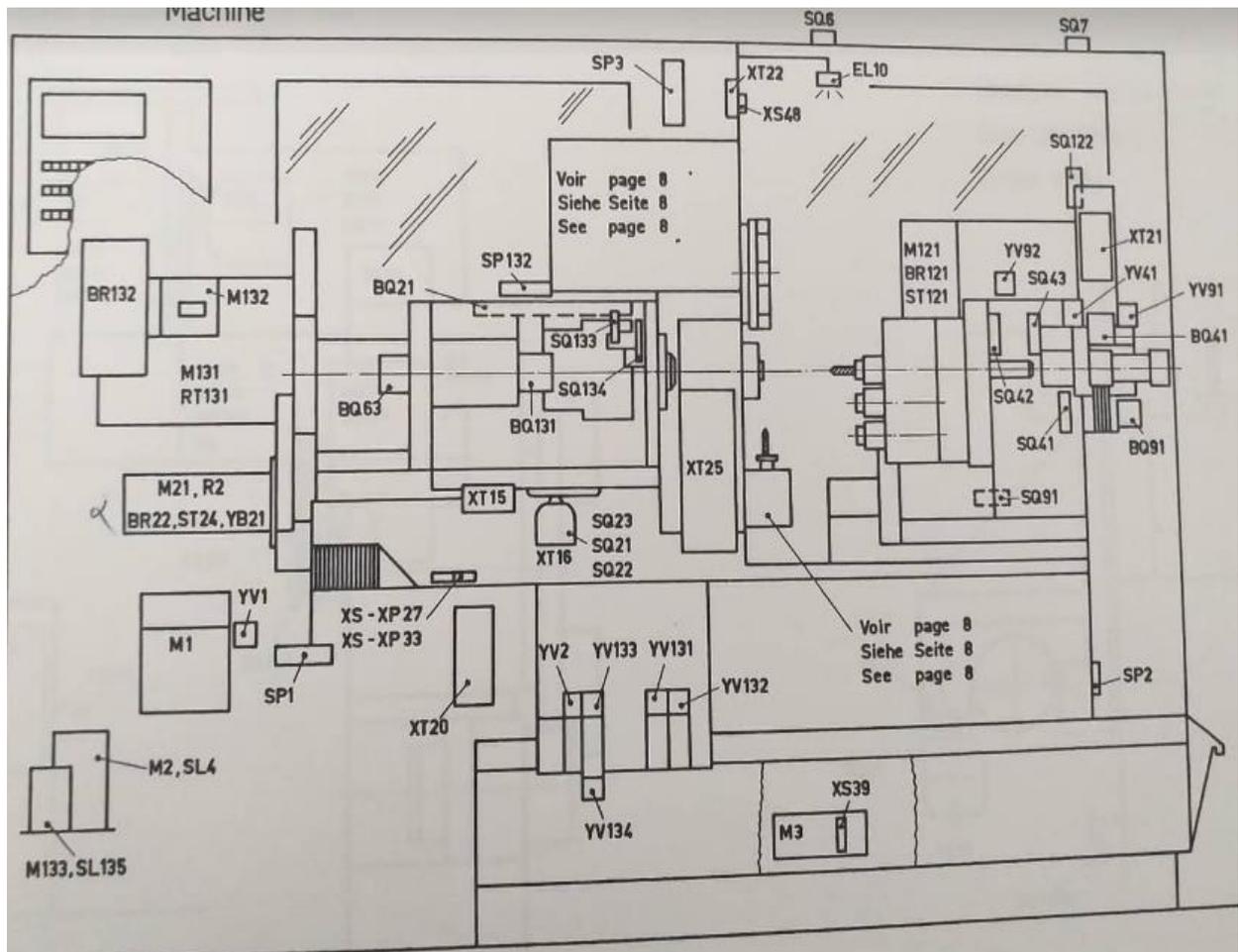


Figure I.9 : Schéma général de la machine.

• Capteur

Le capteur est un organe de prélèvement d'information qui permet de transformer une grandeur physique à un signal électrique.

Les capteurs sont divisés en deux types :

- Si un capteur est activé par l'application d'une alimentation en tension en générant un signal de sortie ; alors, ce capteur est désigné comme actif.
- Si un capteur fonctionne sans alimentation en tension supplémentaire, ce capteur est caractérisé comme étant passif.

Il existe différents types des capteurs dans la TBM 26/32 comme

- Le capteur à chute de pression est un capteur fin de course (total ou parallèle) de vérin il détecte la chute de pression dans la chambre à l'échappement lorsque la tige arrive en fin de course.
- Le capteur à fuite à bille est un capteur par action mécanique.

Chapitre I Étude technologique de la machine TBM 26/32

- **Codeur**

Les systèmes de détection conventionnels (interrupteurs et détecteurs de position) ne fournissent que des informations de type TOR (Tout Ou Rien) ; ainsi, ils ne répondent que partiellement aux besoins d'information contrairement aux codeurs optiques qui permettent de donner des informations sur la position d'un mobile, sa vitesse...etc.

Les codeurs sont liés mécaniquement à un arbre d'entraînement et comprend un disque solidaire monté sur l'arbre-moteur, ce disque comporte une succession de zones opaques et transparentes. La lumière émise par des LED traverse les fentes du disque, créant sur des diodes photosensibles (ou des phototransistors) un signal analogique.

Ce signal est converti en un signal numérique ou logique (selon le type de codeur) qui est transmis à l'unité de traitement de l'information [5].

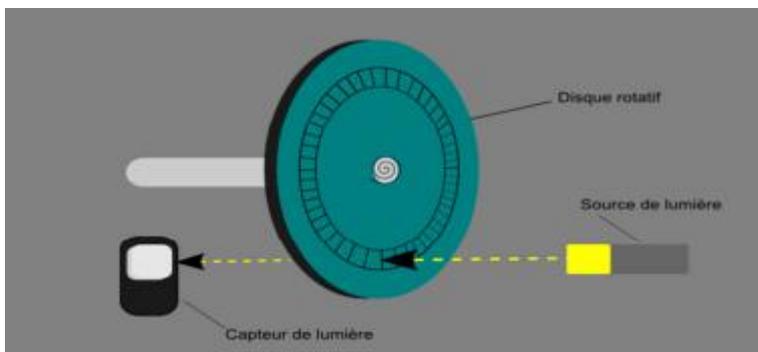


Figure I.10 : principe de laCodeur.

Le principe de fonctionnement des phototransistors (capteur de lumière) est le suivant :

- Si la lumière arrive sur le transistor : il se ferme.
- Si la lumière est bloquée : le transistor reste bloqué

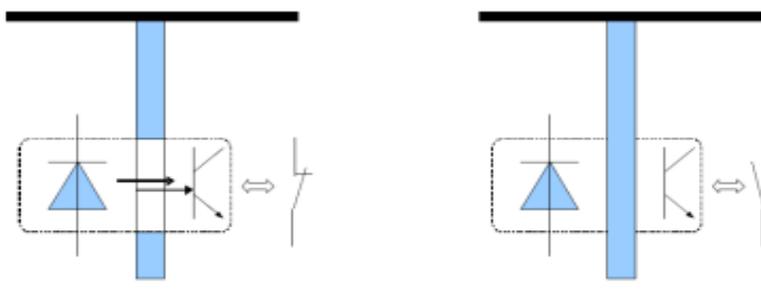


Figure I.11 : Principe de fonctionnement.

Pour la TBM 26/32 on trouve

- le codeur incrémentale est destiné à des applications où l'information de position et obtenus par mesure de déplacement de l'objet.

Chapitre I Étude technologique de la machine TBM 26/32

- le codeur numérique de position est destiné à des applications pour lesquelles on souhaite obtenir l'information de position sans traitement par la partie commande.

I.4 Axes

Un axe sur une machine-outil est un ensemble qui gère un des mouvements d'avance de l'outil par rapport à la pièce. Il est composé d'une partie commande et d'une partie opérative ; Cette dernière est généralement constituée par [3] :

- Un modulateur d'énergie (c'est le pré actionneur),
- Un moteur (c'est l'actionneur),
- Un mobile (c'est l'élément dont on veut commander le déplacement),
- Un système de transformation de mouvement entre le moteur et le mobile
- Capteurs (généralement un capteur de vitesse et un capteur de position).

La TORNOS TBM26 est un centre à 8 axes ; ils sont illustres sur la Figure (I.12) :

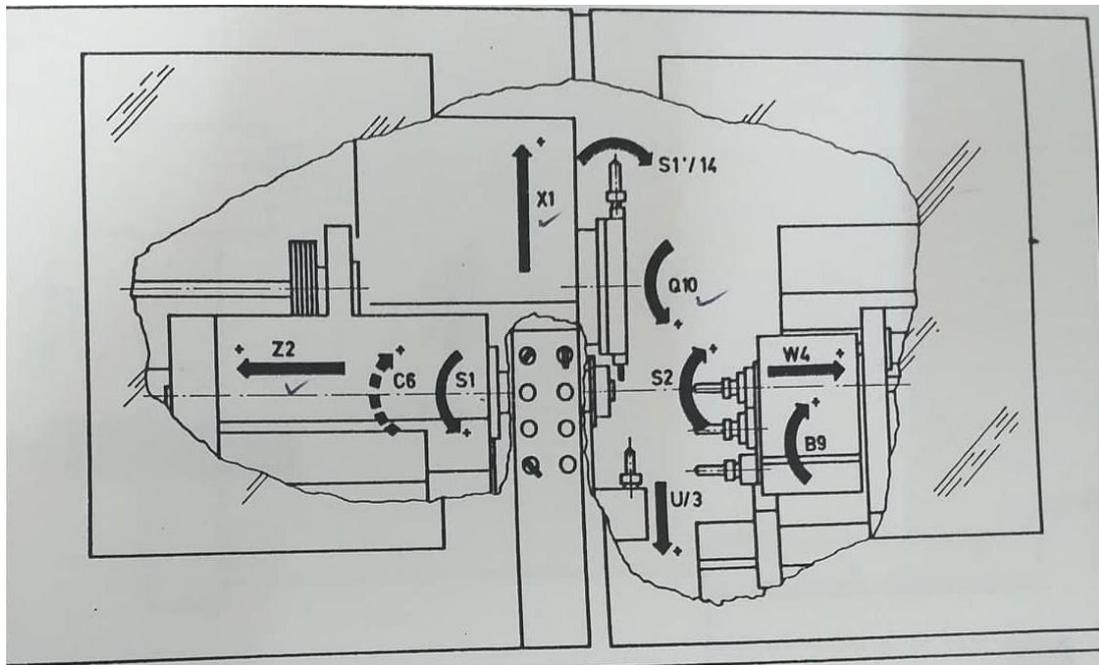


Figure I.12 : Répartition générale des axes.

Les axes ainsi que les tableaux sont comme suit :

- Axe Z : Avance longitudinale poupée.
- Axe S1 : Rotation de la broche poupée.
- Axe X : Avance transversale tourelle.

Chapitre I Étude technologique de la machine TBM 26/32

- Axe Q : Rotation de la tourelle.
- Axe W : Avance longitudinale de la broche du combiné
- Axe B : Rotation du combiné
- Axe S2 : Rotation de la broche de combiné
- Axe U : Avance de coulisse transversale

I.5 Problématique

Actuellement cette machine est en arrêt (en panne) à cause de la défaillance des moteurs d'axes :

- Moteur de rotation d'outils tournant sur l'axe Q
- Moteur de l'avance transversale de la tourelle (Avance longitudinale poupée) sur l'axe X.
- Moteur de position déplacement de la poupée sur l'axe Z

Ces trois moteurs sont types à courant continu et ne peut pas être remplacé par des moteurs neuf car cette série n'est plus fabriquée est donc introuvable sur le marché les pièces de rechanges obsolète.

L'importance du centre d'usinage et particules la machine TBM 26/32 dans la production des pièces au niveau de le SNVI, ce thème nous a été proposé par l'entreprise dans le cadre de notre projet de fin d'étude, ceci, afin de à réaliser une étude qui nous permet de choisir et tester d'autres moteurs électriques qui pourraient remplacer les moteurs défaillants.

I.6 Conclusion

Cette entreprise nous a proposé ce thème dans le cadre de notre projet de fin d'étude, Dans ce chapitre, nous sommes guidés à étudier la machine TBM 26/32 en présentant son principe de fonctionnement et la source de sa panne. Nous somme internés alors à remplacer les moteurs défaillants par d'autres existants et qui seront étudiés en détail dans le chapitre suivant.

II .1 Introduction

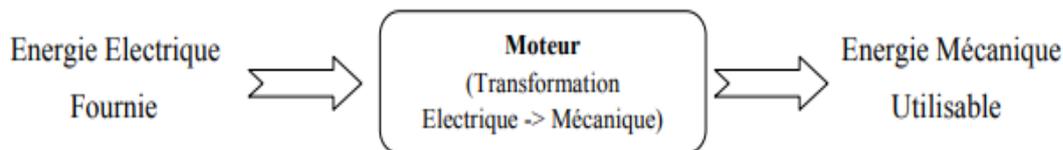
De nos jours les moteurs électriques, sont les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires. Etant donné cette importance telle que citée ci-dessus ; nous allons présenter dans ce chapitre, une étude relative aux moteurs électriques et servomoteurs à savoir leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques.

II .2 principe de fonctionnement

La machine électrique est une machine réversible qui peut fonctionner comme moteur ou génératrice.

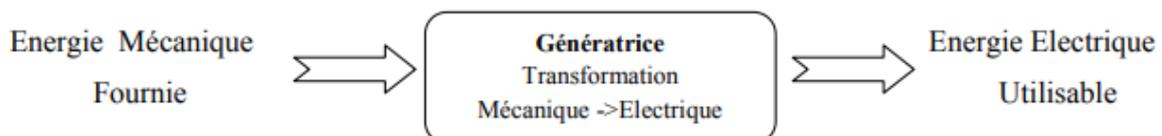
II .2.1 fonctionnement Moteur

Le fonctionnement de la machine est basé sur l'obtention d'un effort mécanique par action d'un champ magnétique sur un circuit électrique traversé par un courant fourni par une source extérieure.



II .2.2 Fonctionnement en génératrice

La machine transforme l'énergie mécanique en énergie électrique dont le fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par déplacement relatif de celui-ci et d'un champ magnétique à l'aide d'un engin d'entraînement mécanique. Selon le courant électrique induit, continu ou alternatif, la machine génératrice sera appelée dynamo ou alternateur [6].



Dans notre travail, nous allons s'intéresser a des machines électriques en mode moteur électrique.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

II .2.3 Fonctionnement dans lesquarts quadrants

Le fonctionnement du moteur peut être représenté dans le repère $C_{em}=f(\omega)$. Comme suit

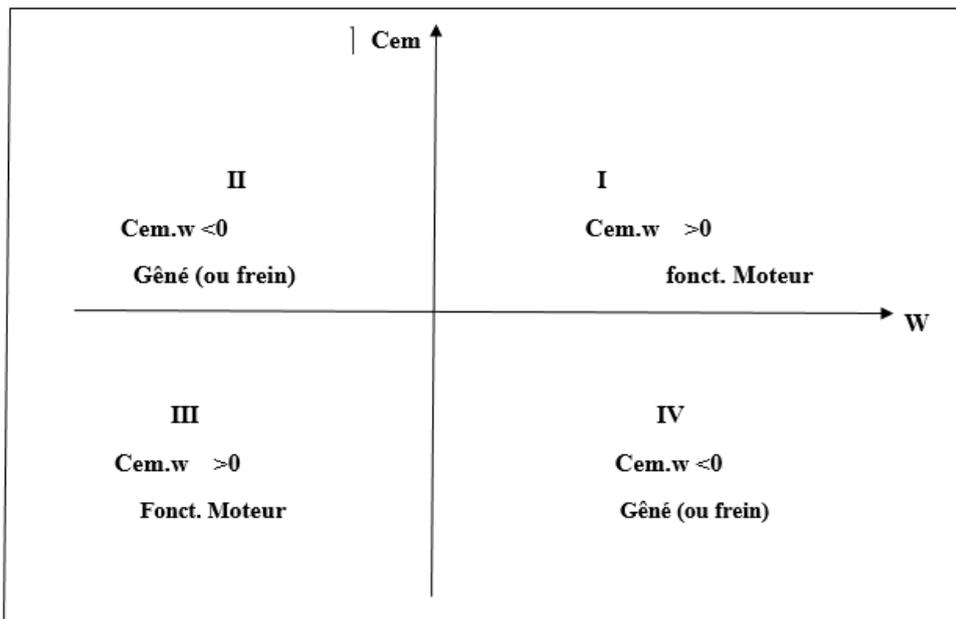


Figure II.1 : Représentation des quatre quadrants du couple et de la vitesse.

- Premier quadrant : Le moteur fonctionne dans le sens direct. Le couple et la vitesse sont positifs.
- Deuxième quadrant : Le moteur fonctionne en sens inverse (vitesse négative) et le couple est positif (période de freinage ou récupération)
- Troisième quadrant : Le moteur fonctionne en sens inverse et le couple est négatif.
- Quatrième quadrant : Le couple est négatif et la vitesse est positive (période de freinage ou récupération).

II .3 Type de moteur électrique

Généralement, les machines électriques se composent de deux parties essentielles :

- Stator (partie fixe)
- Rotor (partie tournante)

Ces deux parties sont séparées par un entrefer, qui peut être constant, on parle alors de machines à pôles lisses, ou variable dans le cas des machines à pôles saillants.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

La conception et la fabrication rotor et stator définissent le type de machine et ses caractéristiques propres d'où l'on distingue plusieurs catégories de machines électriques selon [6].

- Leur alimentation statorique : continue ou alternative.
- Leur rotor : bobiné excité, bobiné en court-circuit, à aimant permanent, à réluctance variable, à cage, etc.
- Leur entrefer : pôles lisses ou saillants.

Les forces d'attraction ou de répulsion au sein des machines électriques sont dues à l'interaction de deux champs magnétiques, l'un créé par l'enroulement du stator et l'autre par l'enroulement du rotor. La différence entre les types des machines venant de la façon dont sont créés ces champs magnétiques et de la manière dont on les fait agir l'un sur l'autre. Pour les machines synchrones et asynchrones, il est créé un champ magnétique, tournant dans l'espace du stator.

Le schéma de la figure (II.2) présente les moteurs le plus couramment utilisés à l'heure actuelle ; chaque type possède ses propres caractéristiques qui le rendent adapté à des applications particulières.

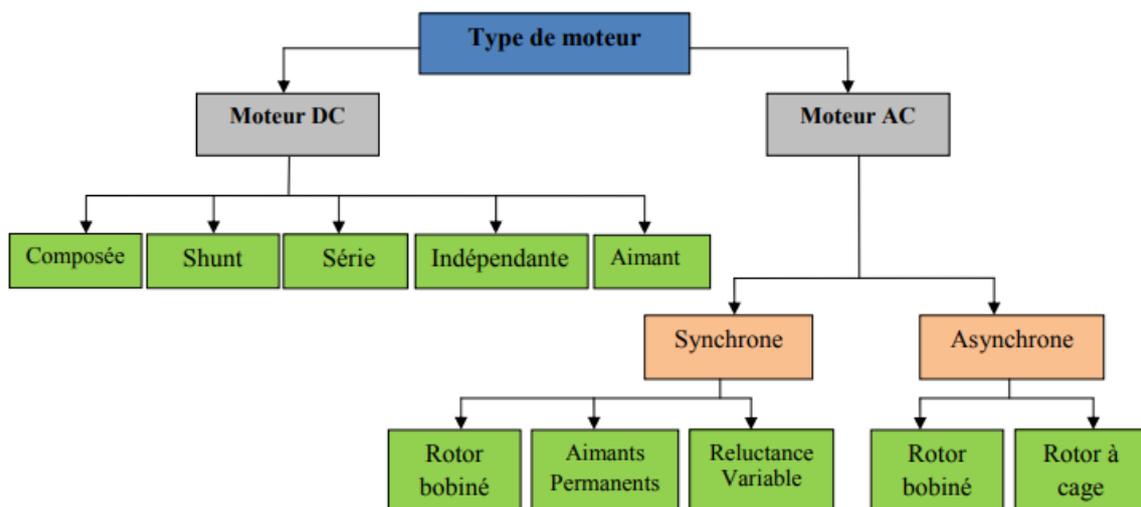


Figure II.2 : Classification générale des moteurs électriques.

Les moteurs électriques sont généralement classés selon le type du réseau électrique dans lequel le moteur est relié : moteurs à courant continu (DC) et des moteurs à courant alternatif (CA). Les moteurs avec alimentation AC sont subdivisés en deux synchrones et asynchrones.

II.4 Moteur à Courant Continu (MCC)

Le moteur à courant continu est fréquemment employé en automatisme (en robotique). Il est alimenté par une tension continue.

II.4.1 principe de fonctionnement

L'inducteur qui peut être un aimant permanent ou un électroaimant crée un champ magnétique fixe. L'induit est alimenté en courant continu, et est immergé dans le champ magnétique créé par le stator d'après la loi de LAPLACE, ses spires sont alors soumises à des forces électromotrices, le résultante engendre la rotation d'induit. Ce principe est illustré sur la figure (II.8) [11].

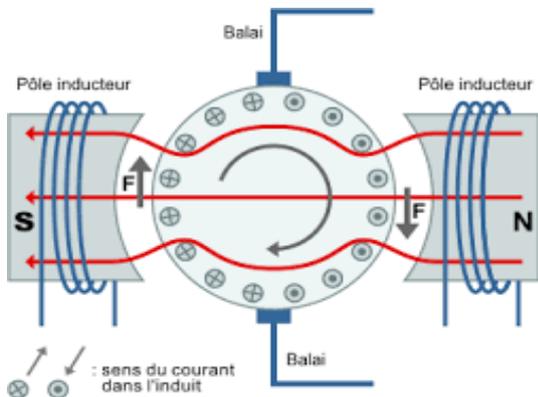


Figure II.3 : Principe fonctionnement de M.C.C

II.4.2 Constitution du moteur à courant continu :

La machine à courant continu comprend quatre parties principales [7]

- Une partie fixe : l'inducteur.
- Une partie tournante : le rotor sur lequel est bobiné l'induit.
- Un dispositif permettant de relier le circuit d'induit à un circuit extérieur : le collecteur
- Les balais (Les charbons).

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

Exemple Moteur a courant continu

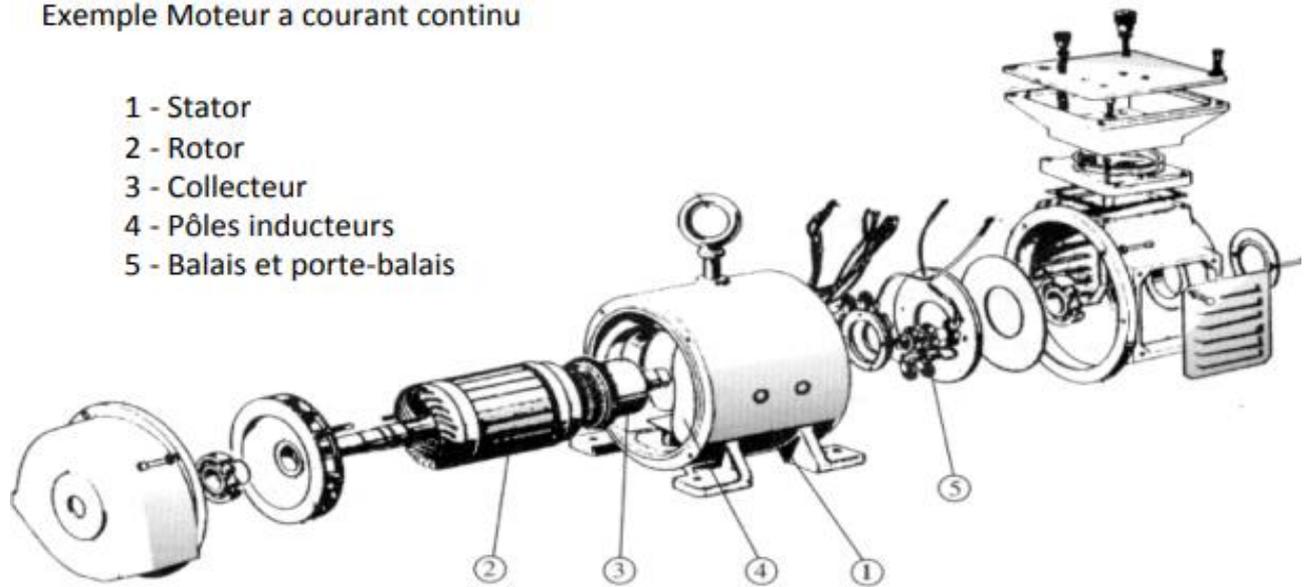


Figure II.4 : Constitution moteur à courant continu.

Tableau II.1 : caractéristiques de moteur à courant continu

| | |
|---|------------------------|
| 1 | Stator |
| 2 | Rotor |
| 3 | Collecteur |
| 4 | Poles inducteurs |
| 5 | Balais et porte-balais |

II.4.2.1 Inducteur (stator)

Le stator, qui crée le champ magnétique inducteur dans la machine, il est constitué par [8,9]



Figure.II.5 : composants de l'inducteur.

- a. Une culasse: en fonte ou en acier coulé : elle représente la carcasse de la machine, elle comporte toutes les parties fixes et aux extrémités, les deux paliers dans lesquels tourne l'induit. Elle referme le circuit magnétique de la machine.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

- b. Pôles principaux : Ils sont formés de tôles munis de noyaux polaires en acier coulé et vissés à la culasse. Ils sont en nombre pair et servent de support aux bobines inductrices avec une présence d'encoches destinées à l'enroulement compensateur et des trous qui servent à l'assemblage.
- c. Les bobines inductrices : sont placées autour des pôles dont leurs ampères-tours produisent le flux. Elles sont montées (bobines) en série et bobinées de façon que l'un des épanouissements polaires soit un pôle Nord et l'autre Sud.
- d. les pôles auxiliaires ou pôles de commutation : sont des pièces polaires, étroites en série avec induit, destinés à réduire les étincelles aux balais.

Il existe un type de moteurs à courant continu qui n'est pas constitué d'un inducteur bobine et qui est remplacé par un aimant : ce sont les moteurs DC à aimant permanent.



Figure II.6: stator à aimant permanent.

II.4.2.2 Induit (rotor)

C'est la partie tournante (rotor) du moteur figure (II.7) qui est le siège d'une force électromagnétique F.E.M induite, qui est soumise à l'action d'un couple électromagnétique. Il tourne dans un champ magnétique fixe et sera donc le siège de pertes par hystérésis et par courants de Foucault.



Figure II.7: induit d'un moteur à courant continu.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

L'induit est constitué de tôles découpées à la presse, isolées les unes des autres par une mince pellicule de vernis et assemblées. Pour réduire les pertes par hystérésis, ces tôles sont en acier ou silicium. Sur la périphérie de l'induit se trouvent des encoches dans lesquelles se logent les conducteurs de l'induit. Le morceau de tôle restant entre deux encoches s'appelle une dent. Le diamètre extérieur de l'induit est à peine inférieur au diamètre intérieur de l'inducteur : quelques millimètres seulement constituent les entrefers [8].

II.4.2.3 Collecteur

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica comme le montre la figure (II.8). Il est monté sur l'arbre de la machine mais isolé de ce dernier. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur [10].

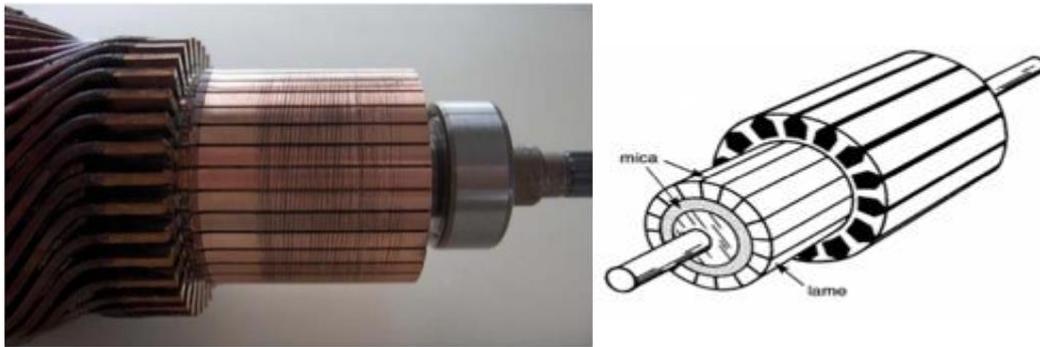


Figure II.8 : Le Collecteur

II.4.2.4 Balais

Les balais figure (II.9) permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur. Lors de la construction des premières machines à courant continu, les balais étaient constitués de fils de cuivre, d'où le nom de balais. Les balais (aussi appelés « charbon ») sont en carbone (on choisit souvent le graphite).

D'une part, ce matériau possède une bonne conductivité et d'autre part, le frottement du couple cuivre/carbone est faible ; ce qui empêche l'usure prématurée du collecteur.

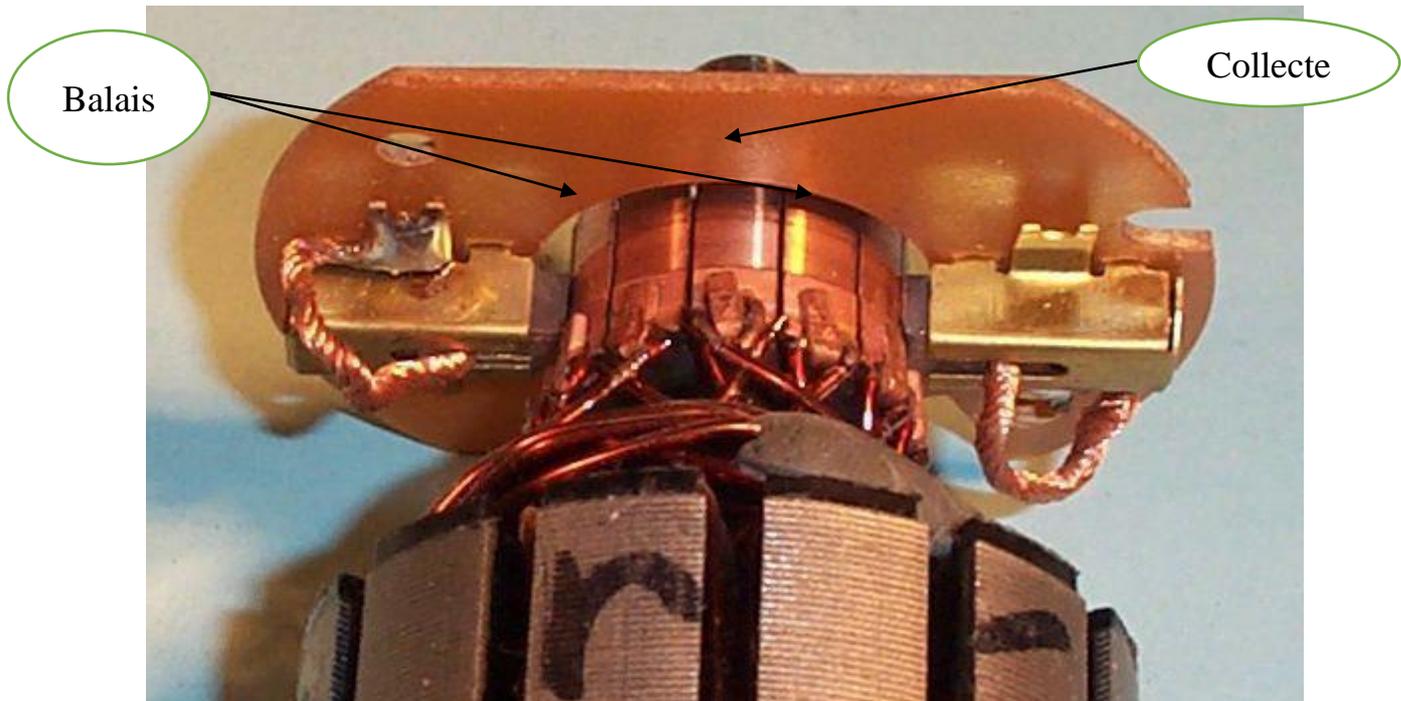


Figure II.9 : les balais

II.4.3 Types des moteurs à courant continu

Selon la façon dont il est alimenté le circuit inducteur on distingue quatre types d'excitation :

II.4.3.1 Excitation indépendante (ou séparée)

Aucun point commun entre le circuit inducteur et celui de l'induit. L'énergie électrique nécessaire à la magnétisation est fournie par une source extérieure de tension continue [11].

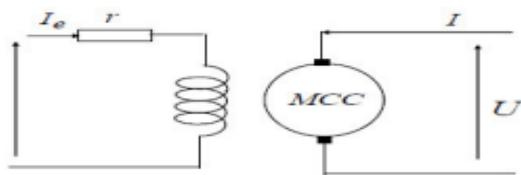


Figure II.10 : Moteur à excitation indépendante.
On trouve ce type de MCC dans les :

- ✓ Machines-outils.
- ✓ Moteur de broche, d'axe.
- ✓ Machines spéciales.

• Caractéristiques

- ✓ L'inducteur est alimenté par une source indépendante.
- ✓ Grande souplesse de commande.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

- ✓ Large gamme de vitesse.
- ✓ Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement.

II.4.3.2 Excitation dérivation (ou shunt)

Le circuit inducteur est en parallèle avec le circuit d'induit. Le nombre de spires des bobines inductrices est élevé [12].

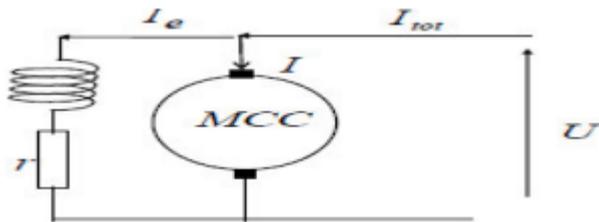


Figure II.11 : Moteur C.C excitation shunt.

Ce type de MCC est utiliser dans :

- ✓ Les machines-outils, et les appareils de levage (ascenseur).
- **Caractéristiques**
 - ✓ L'inducteur et l'induit sont branchés en parallèle.
 - ✓ Vitesse constante quel que soit la charge.
 - ✓ Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse.

II.4.3. 3 Excitation composée (compound)

Le moteur comporte un inducteur de dérivation, placé en parallèle avec l'induit ; ce dernier étant en série avec l'inducteur série de la machine. [12]

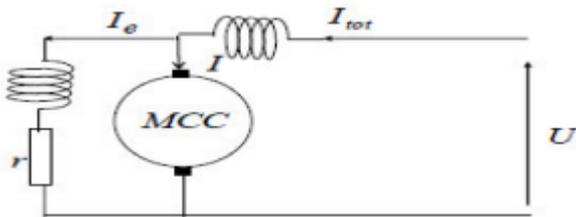


Figure II.12 : Moteur C.C excitation composée.

Ce moteur est utiliser dans les :

- ✓ petit moteur à démarrage direct.
- ✓ ventilateur.
- ✓ pompes.
- ✓ machines de laminaires.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

- ✓ Volants d'inertie.
- **Caractéristiques**
- ✓ L'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle.
- ✓ Entraînements de grande inertie.
- ✓ Couple très variable avec la vitesse.

II.4.3.4 Excitation série

Le circuit inducteur est en série avec celui de l'induit [12].

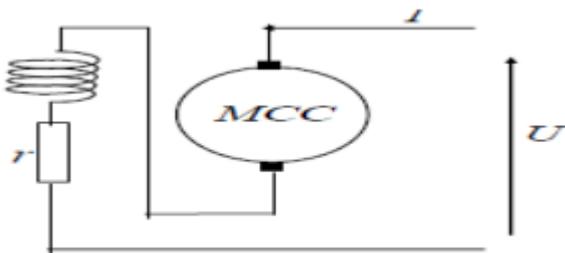


Figure II.13 : Moteur C.C excitation série.

On trouve ce type de MCC dans les :

- ✓ Engins de levage (grues, palans, ponts roulants).
- ✓ Ventilateurs.
- ✓ Pompes centrifuges.
- ✓ Traction.

- **Caractéristiques**

- ✓ L'inducteur connecté en série avec l'induit.
- ✓ Le moteur série est un autorégulateur de puissance.
- ✓ possède un fort couple de démarrage mais risque l'emballement à vide.
- ✓ Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation.
- ✓ Le couple résistant croît rapidement avec la vitesse.
- ✓ La vitesse décroît quand la charge augmente.
- ✓ Supporte bien les surcharges.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

II.4.3.5 Excitation aimants permanents

L'excitation du rotor par des aimants placés au stator Figure (II.13) Ce type des moteur est le même que celui du moteur défaillant dont est muni la TORNOS TBM 26 (Moteur M11) de marque SIEMENS «» dont les caractéristiques suivantes :



Figure II.14: Moteur défaillant de la TORNOS TBM 26 et sa plaque signalétique.

II.4.4 Avantages et inconvénients du moteur à courant continu

Les avantages et les inconvénients de MCC sont résumés comme suit

- **Avantage** : essentiellement en peut résumer comme suit
 - Commande facile de la vitesse qu'est proportionnelle à la tension.
 - Commande facile de couple utile qu'est proportionnelle à la charge.
 - Connexion directe sur batteries possible
 - Couple au démarrage réglable et important.
- **Inconvénients** : on peut les résumer dans les points suivants
 - Nécessité d'une maintenance périodique (usure du collecteur et des balais),
 - Contact électrique imparfait, cause des arcs électriques qui usent rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation.
 - Inertie importante (rotor bobiné),
 - Echauffements importants.

II.5 Rendement

Le rendement du moteur est donné par :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Où P_a est la puissance absorbée par le moteur.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

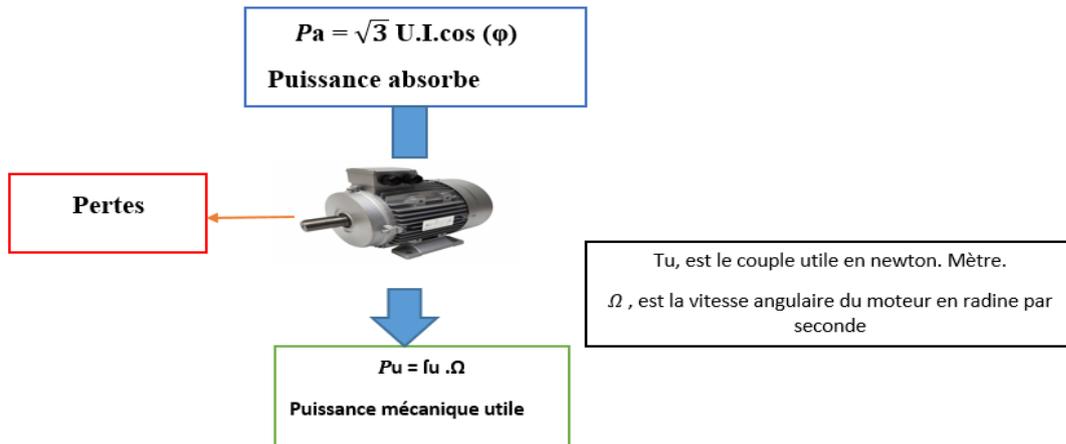


Figure II.15 :schéma de rendement.

II.6 Machine à courant alternatif

Les machines à courant alternatif sont des machines employées le plus fréquemment dans l'industrie et possèdent plusieurs avantages. Par rapport aux machines à courant continu : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile.

II.7 Machine asynchrone

Le moteur asynchrone figure (II.16) est alimenté par une tension alternative monophasée ou triphasée.

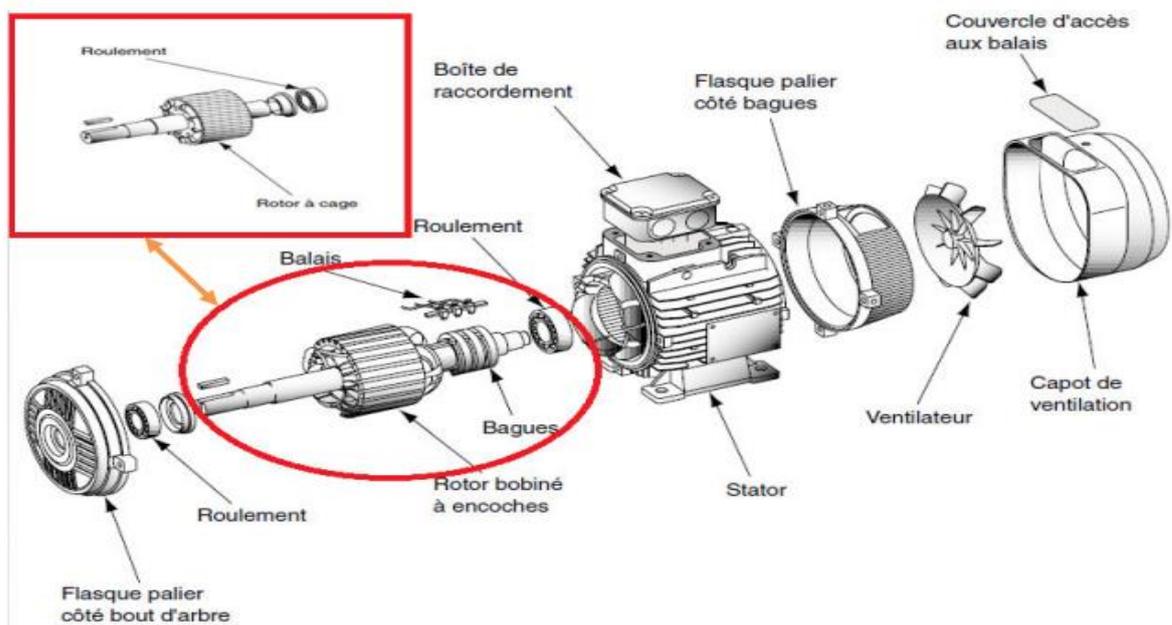


Figure II.16: Machine asynchrone.

II.7.1 Principe de fonctionnement

Ce champ magnétique tournant crée un flux magnétique $d\Phi = B \cdot dS$ à travers le rotor en cage d'écureuil de la machine asynchrone.

D'après la loi de Lenz, cette variation de champ magnétique génère une force électromotrice

$E = - \frac{d\Phi}{dt}$ entre les barreaux court-circuit du rotor, et un courant induit circule dans ces barreaux.

La circulation de ce courant induit dans le champ magnétique crée alors une force de Laplace sur les barreaux, qui se traduit finalement par un couple moteur. Il est important de remarquer que ce couple n'existe que grâce à l'induction, créée à la suite de la différence de fréquence entre le champ magnétique tournant et le rotor. On introduira donc la notion de «glissement» qui traduit cette différence de fréquence.

On appelle pulsation de synchronisme la pulsation du champ magnétique dans un stator alimenté à une fréquence f , et disposant de p paires de pôles :

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

Pour que les phénomènes inductifs puissent avoir lieu, nous avons vu qu'il est nécessaire qu'il y ait une différence de pulsation entre le rotor et le champ magnétique. C'est le glissement, défini par :

$$G = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

En fonctionnement moteur, le glissement est positif (le rotor tourne à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme), et le fonctionnement est dit «hyposynchrone». La différence de pulsation fait que, du point de vue du rotor, ce dernier voit un champ magnétique à une fréquence.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

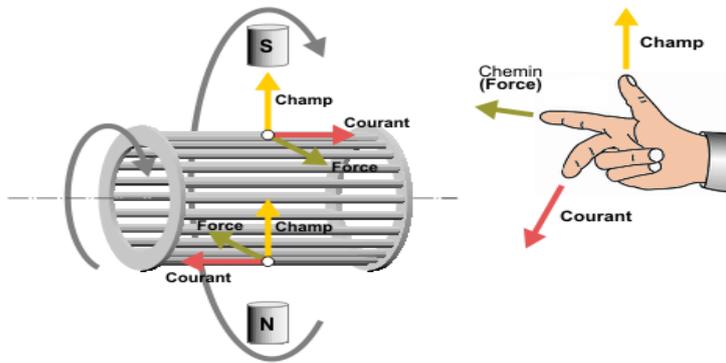


Figure II.17 : Dessin expérimental de principe de fonctionnement.

II.7.2 Glissement

Le couple moteur ne peut exister que si un courant induit circule dans la spire. Ce couple est déterminé par le courant qui circule dans la spire et qui ne peut être que s'il existe une variation de flux dans cette spire. Il faut donc qu'il y ait une différence de Vitesse entre la spire et le champ tournant. C'est la raison pour laquelle un moteur électrique

Fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé "moteur asynchrone". La différence entre la vitesse de synchronisme (N_s) et celle de la spire (N) est appelée glissement (G) et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme :

$$G = \frac{N_s - N}{N_s} * 100$$

G : le glissement

N_s : la vitesse de rotation synchronisme du champ tournant (tr/s)

N_r : la vitesse de rotation de rotor. Le glissement en régime établi est variable suivant la charge du moteur et selon le niveau de la tension d'alimentation qui lui est appliqué. Il est d'autant plus faible que le moteur est peu chargé et il augmente si le moteur est alimenté en dessous de la tension nominale correspondant à la fréquence d'alimentation.

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator

$$N_s = 50f/p$$

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

II.7.3 Constitution de la machine asynchrone

Le moteur asynchrone possède deux parties distinctes

II.7.3.1 Stator

Le stator comporte en fait un circuit magnétique entièrement feuilleté en forme de couronne dont la périphérie intérieure est entaillée régulièrement d'un certain nombre d'encoches identiques. Dans ces encoches viennent se placer les faisceaux des conducteurs formant l'enroulement statorique.

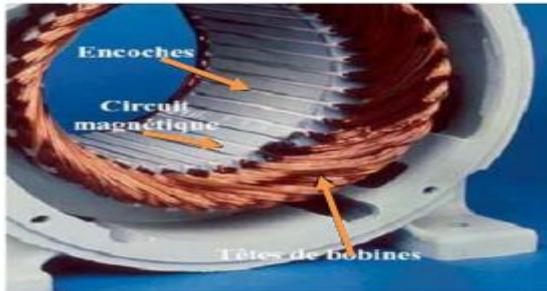


Figure II.18 : Stator de la machine asynchrone.

II.7.3.2 Rotor

Le rotor n'est relié à aucune alimentation sauf dans le cas d'un moteur à rotor bobiné. Il tourne à la vitesse de rotation Ω il existe plusieurs type de rotor, les plus utilisés dans l'industrie sont :

II.7.3.2.1 Rotor bobiné

Le rotor porte des enroulements dans lequel doit circuler les courants induits. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais, ce dispositif permet de modifier les propriétés électromagnétiques du moteur.



Figure II.19 : Rotor bobiné.

II.7.3.2.2 Rotor à cage d'écureuil

Ce rotor est constitué de barres conductrices très souvent en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. On dit que le rotor est en court-circuit. Sa résistance électrique est très faible.



Figure II.20 : Rotor à cage d'écureuil.

II.7.4 Les avantages et les inconvénients

Les moteurs asynchrone à plusieurs avantages et inconvénients qui on peut résumer comme suit :

Avantages

Il Ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone comme :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Possibilité de variation de la vitesse de rotation.

• Inconvénients

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).

II.8 moteur pas à pas

Les moteurs pas à pas sont très employés dans les périphériques informatiques (entraînement du papier dans une imprimante ou positionnement de la tête de lecture duun disque dur) et sur certaines applications de robotique.

Ils permettant essentiellement d'obtenir un positionnement très précise : à chaque fois que le moteur reçoit une impulsion électrique de commande, son axe effectué une rotation d'un angle déterminer (de moins de 1 degré à plusieurs degrés selon le moteur).

Ces moteurs sont d'une très grande précision et présente une fiable usure mécanique. Leur commande suffisant par une suite d'impulsion électrique, il nécessitant d'être alimenté par un circuit électrique spécifique.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

II.8.1 principe de fonctionnement

Les moteurs pas à pas sont généralement constitués de deux bobines et d'un rotor. Le rotor est souvent un aimant permanent (mais il peut être d'une autre constitution). Les deux bobines peuvent créer un champ magnétique dont l'orientation dépend de leur alimentation.

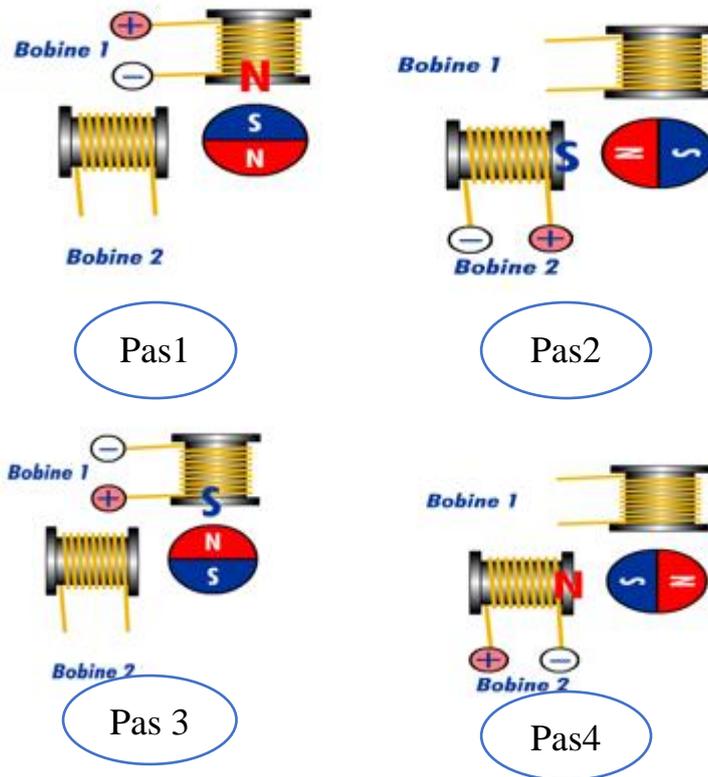


Figure II.21 : principe de fonctionnement.

Pas n° 1 : la bobine 1 est alimentée afin de présenter le pôle nord au rotor ; La bobine 2 n'est pas alimentée ; le rotor tourne pour s'orienter vers ce pôle nord.

Pas n° 2 : la bobine 2 est alimentée afin de présenter le pôle sud au rotor ; La bobine 1 n'est pas alimentée ; le rotor poursuit sa rotation pour s'orienter vers ce pôle sud.

Pas n° 3 : la bobine 1 est maintenant alimentée avec une polarité inverse de la fois précédente afin de présenter le pôle sud au rotor ; la bobine 2 n'est plus alimentée ; le rotor poursuit sa rotation pour s'orienter vers ce pôle sud.

Pas n° 4 : la bobine 2 est maintenant alimentée avec une polarité inverse de la fois précédente afin de présenter le pôle nord au rotor ; la bobine 1 n'est plus alimentée ; le rotor poursuit sa rotation pour s'orienter vers ce pôle nord [9].

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

II.9 Machine synchrone

C'est une machine à courant alternatif, le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique inducteur est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique d'induit est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre les deux parties (l'inducteur et l'induit)[13].

II.9.1 principe de fonctionnement

Le stator alimenté par un système de tension triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse f/p tours par secondes avec f fréquence d'alimentation des bobinages statoriques, et p le nombre de paires de pôles.

Le champ rotorique composé de p aimants permanents va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que le champ tournant. La vitesse de rotation de rotor est donc

Le rotor du moteur synchrone crée un champ magnétique (champ inducteur) accroché par le champ tournant du stator. Le champ magnétique rotorique suit le champ tournant du stator avec un retard θ proportionnel à la charge [14].

$$\Omega = \omega / p$$

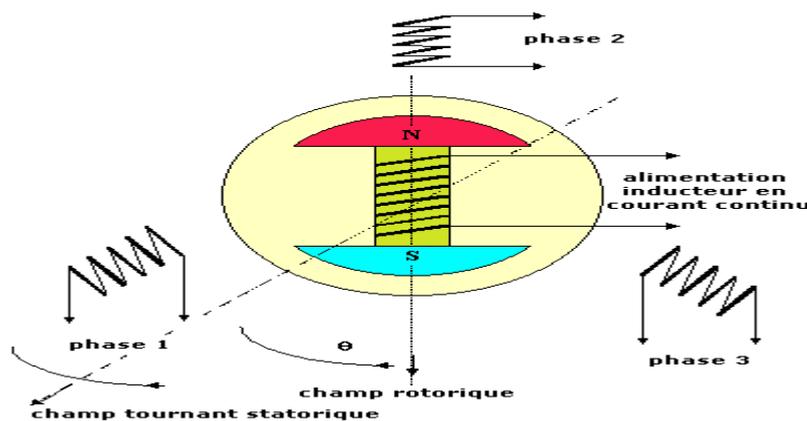


Figure II.22 : Principe de fonctionnement synchrone.

II.9.2 Construction de la machine synchrone

Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par l'entrefer.

II.9.2.1 Stator

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

Le stator comprend une carcasse et un circuit magnétique généralement constitués de tôles d'acier au silicium et d'un bobinage triphasé analogue à celui d'un moteur asynchrone alimenté en courant alternatif triphasé pour produire un champ tournant [15].

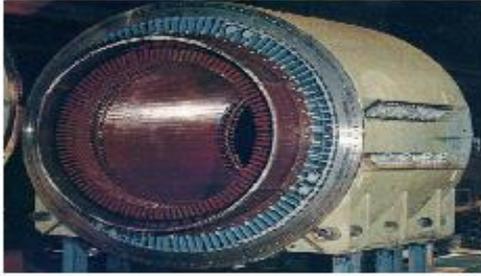


Figure II.23 : Stator de la machine.

II.9.2.2 Rotor

C'est la partie tournante de la machine (appelé aussi roue polaire) ayant pour rôle de générer le champ d'induction (inducteur). Il doit porter le même nombre de paires de pôles que le stator. Le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. A l'extérieur du rotor, on trouve des enroulements qui doivent être alimentés par une source de tension continue pour des machines de moyenne et de grande puissance ou par des aimants permanents dans le cas de machines de faible puissance pour créer le champ inducteur.



Figure II.24 : Le rotor.

II.9.3 Avantages et inconvénients

La machine synchrone a des avantages et des inconvénients qui peuvent résumer comme suit :

- **Avantages**

Les principaux avantages de la machine synchrone sont :

- Vitesse de rotation constante

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

- Possibilité de fournir des tensions triphasées équilibrées de fréquence stables.

- **Inconvénients**

Les inconvénients principaux de la machine synchrone sont :

- Démarrage non autonome.
- Elle est également plus coûteuse à réaliser que la plupart des machines asynchrones.

II.10 Servomoteurs synchrones

Un servomoteur est un système motorisé capable d'atteindre des positions prédéterminées puis de la maintenir. La position dans le cas d'un moteur rotatif est une valeur d'angle et dans le cas d'un moteur linéaire est une distance on utilise des différents moteurs électriques dans notre cas on utilise des moteur synchrone à aimant permanent.

Les servomoteurs étudiés portent les boucles d'asservissements de vitesse par dynamo tachymétrie et de position par résolveur ou codeur. Ils offrent une grande dynamique, stabilité, précision ...etc.

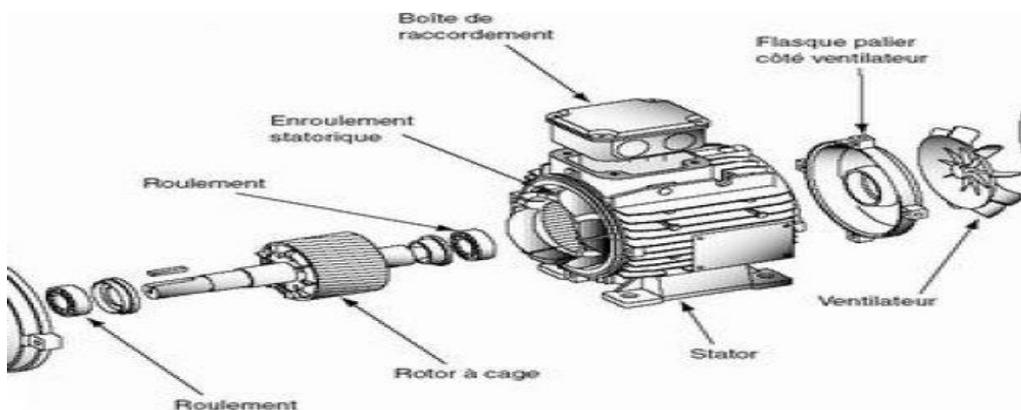


Figure II.25: Schéma principal de servomoteur synchrone [13].

II.10.1 Types de Machine Synchrone à Aimant Permanents (MSAP)

Suivant les dispositions des aimants de rotor, on distingue

II.10.1 Machine à pôle lisse

On a intérêt de les doter d'une aimantation radiale, tangentielle entre pôles, les aimants peuvent avoir également une aimantation mixte ou aimantation tournante. Ces structures sont intéressantes pour un fonctionnement autopiloté, car elles présentent une faible inductance de phase et une réaction d'induit réduit, ce qui favorise ainsi une commande plus simple.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

II.10.1.2 Machine à pôle saillants

La saillance est obtenue par l'addition de pièces polaires ou inter polaires, qui raccourcissent nettement les lignes de flux selon les deux axes d et q respectivement suivant la position directe et la position en quadrature, ce qui augmente la valeur de l'inductance contrairement aux machines à inducteur bobine où la saillance est inversée c'est-à-dire, que l'inductance selon l'axe q est supérieure par rapport à celle suivant l'axe d on peut obtenir plusieurs catégories d'inducteurs à pôle saillants.



a).Rotor à pôles lisses



b).Rotor à pôles saillants

Figure II.26 : les types des rotors de la MSAP

II.10.2 Avantages et inconvénients du MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines :

- **Avantages de la M.S.A.P**

- Puissances massives importantes et élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Pas des pertes résistives au rotor, ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- Suppression des bagues et des ballais, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Supporter des surcharges et un bon comportement en accélération et en freinage.
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement en survitesse.

- **Inconvénients de la MSAP**

- Coût élevé des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

II.11 Différent démarrage des moteurs

Le branchement du moteur au réseau électrique peut se réaliser par :

II.9.1 Démarrage direct

Si le courant de démarrage n'entraîne pas la détérioration des enroulements du moteur ou l'installation accompagnant. Le moteur synchrone est branché directement au réseau d'alimentation et le démarrage s'effectue en n seul temps. Le courant de démarrage peut atteindre 4 à 8 fois le courant nominal du moteur. Le couple de démarrage est important, peut atteindre 1,5 fois le couple nominal.

II.9.2 Démarrage direct semi-automatique à deux sens de marche

On veut démarrer un moteur synchrone triphasé dans deux sens de rotation par un bouton poussoir S1 pour le sens 1, par un bouton poussoir S2 pour le sens 2 et un bouton poussoir SU pour l'arrêt.

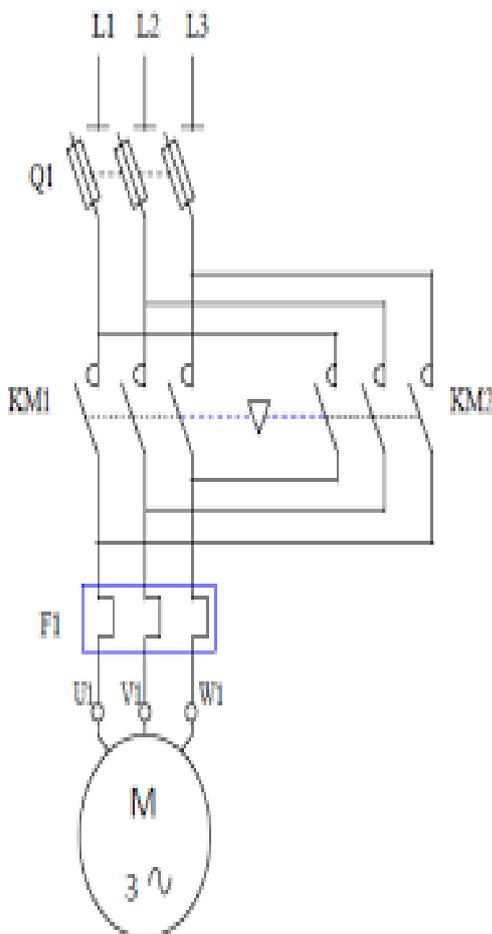


Figure II.27 : Circuit de puissance

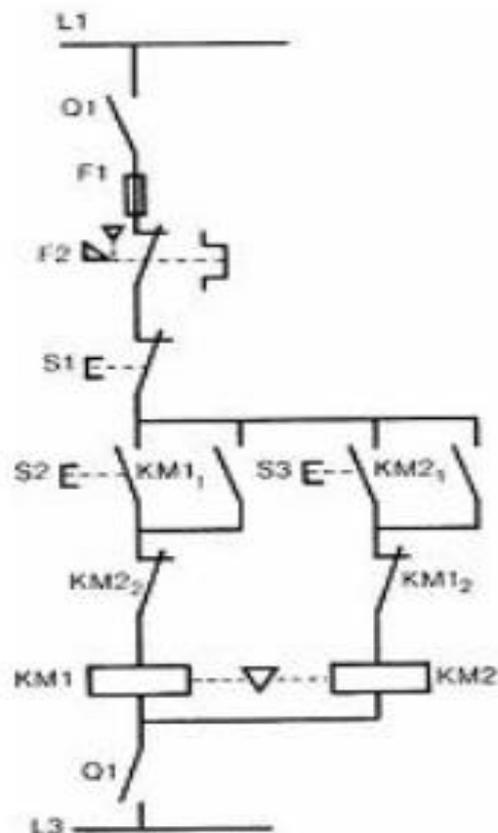


Figure II.28 : Circuit de commande

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

II.9.3 Utilisation d'un procédé de démarrage

S'il y a risque de détérioration des enroulements du moteur ou l'installation accompagnant.

II.3.1 Démarrage étoile-triangle

Le démarrage s'effectue en deux temps :

Des un premier temps : chaque enroulement du stator est alimenté sous une tension réduite en utilisant le couplage triangle. Ce temps est le temps nécessaire pour que la vitesse du moteur atteigne environ 80% de sa vitesse nominale.

Des un deuxième temps : chaque enroulement du stator est alimenté par sa tension nominale changeant le couplage au triangle.

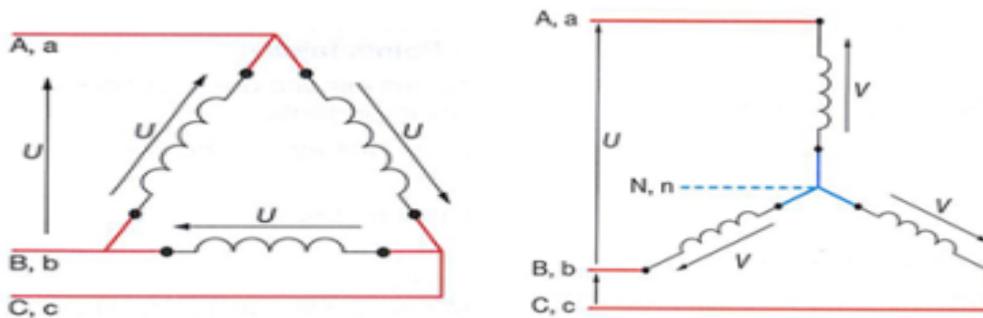


Figure II.29 : Couplage étoile et triangle.

- Utiliser aussi bien au primaire qu'au secondaire on trouve la tension composée entre phases et aux bornes des enroulements il n'est pas possible de sortir le neutre.
- Utiliser aussi bien au primaire qu'au secondaire on trouve la tension simple aux bornes d'un enroulement et la tension composée entre phases. Le point commun des enroulements peut être utilisé comme neutre.

II.9.3.2 Démarrage étoile-triangle semi-automatique à deux sens de marche

Ces contacts auxiliaires sont appelés contacts de verrouillage électrique. De même le symbole en triangle placé entre les deux bobines KM1 et KM2 représente le verrouillage mécanique empêchant un contacteur de se fermer si l'autre y est déjà.

II.9.3.3 Démarrage par élimination des résistances rotoriques

Ce type de démarrage est utilisé pour les moteurs à rotor bobiné dont les enroulements sont couplés en triangle, et les trois sorties sont soudées à des bagues taxées sur l'arbre du moteur auxquels on peut insérer des résistances à l'aide de balais frotteurs. Ce démarrage consiste à alimenter le stator du moteur par la tension nominale et éliminer les résistances rotoriques en plusieurs temps (5 temps au minimum).

Des un premier temps : on insère la totalité des résistances dans les enroulements du rotor.

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

Des un deuxième temps : on diminue la résistance du circuit rotor en éliminant une partie des résistances insérée.

Des un troisième temps on élimine toute la résistance rotorique en court-circuitant l'enroulement du rotor.

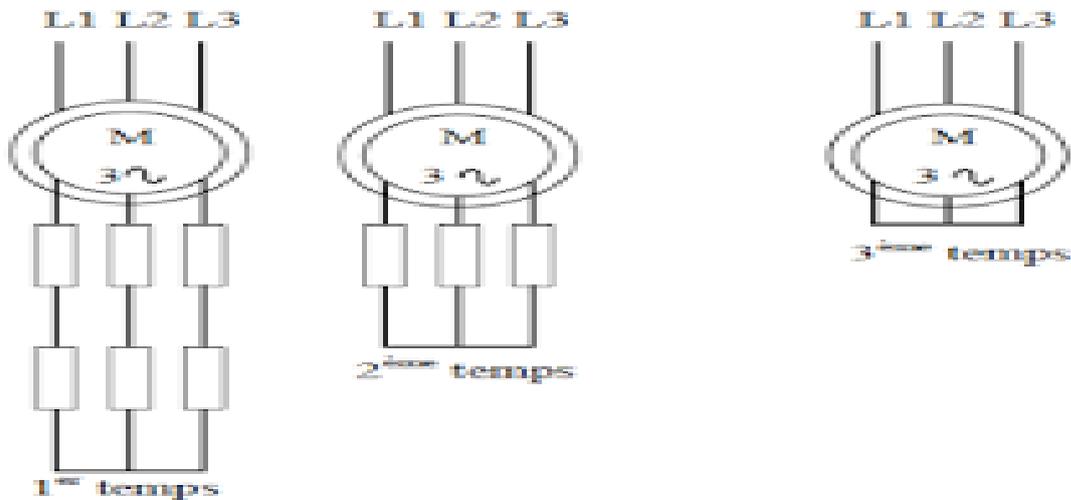


Figure II.30 : Démarrage par élimination des résistances statoriques.

II.10.4 Démarrage électrique

Permettre le démarrage et éventuellement la variation de vitesse du moteur tout en le protégeant contre toute les sur intensités et emballement.

II.12 Comparaison générale entre les types des moteurs électriques

Dans cette section, on présenter en tableauspictulatif des différents moteurs existants ainsi que leur des caractéristiques principales.

Tableau II.2 :Différents types de moteurs et leurs caractéristiques [13].

Chapitre II Généralités sur les machines électriques

| Moteur | Variante | Puissance ou couple nominaux usuels | Vitesse maximale | Performances | | | | Contraintes | | Durée de vie |
|--------------------|---------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------------|------------|------------|------------|---|-----------|----------------------|
| | | | | Position | Vitesse | Couple | Dynamique | Installation | Entretien | |
| Courant continu | disque | < 5 kW | 3000 tr/mn | bonne | très bonne | moyenne | très bonne | pas de moteur étanche | balais | moyenne (collecteur) |
| | cloche | < 200 W | 6000 tr/mn | bonne | très bonne | moyenne | très bonne | pas de moteur étanche | balais | moyenne (collecteur) |
| | couple | 20 N.m | 3000 tr/mn | bonne | très bonne | très bonne | très bonne | pas de moteur étanche | balais | moyenne (collecteur) |
| Courant alternatif | pas-à-pas | 20 N.m | très dépendante de la charge | très bonne | moyenne | bonne | moyenne | aucune | aucun | très élevée |
| | synchrone | 200 Nm | 20000 tr/mn | excellente | excellente | excellente | très bonne | aucune | aucun | très élevée |
| | asynchrone | 20 kW | 6000 tr/mn | excellent | excellente | bonne | moyenne | pertes au rotor | aucun | très élevée |
| | linéaire asynchrone | 6000 N | 600 m/mn | excellente | bonne | bonne | moyenne | ■ montage mécanique délicat, ■ pertes au primaire et au secondaire | aucun | élevée |
| | linéaire synchrone | 9000 N | 600 m/mn | excellente | excellente | excellente | très bonne | ■ montage mécanique délicat, ■ pertes au primaire | aucun | élevée |
| | piézo-électrique rotatif | 5 W | 50 tr/mn | excellente | excellente | excellente | très bonne | aucune | aucun | faible |
| | piézo-électrique linéaire | 600 N | 100 mm/s | excellent | excellente | excellente | très bonne | aucune | aucun | faible |

II.13 Conclusion

Après la réalisation de cette étude sur les machines électriques et après avoir présenté leurs fonctionnements, leurs avantages, inconvénients et en tenant compte de l'orientation des responsables de l'entreprise (SNVI), notre choix est porté sur le remplacement des trois moteurs défaillant (SIEMENS) par des moteurs synchrone à aimant permanents ayant les mêmes caractéristiques (Schneider) ; pour cela, le chapitre qui suit portant sur la modélisation servira à vérifier puis à valider le modèle adopté de la machine synchrone, à aimant permanent.

III .1 Introduction

Les moteurs à courant continu garantissent depuis longtemps la majeure partie de fonctionnement des équipements industriels (robots et machines-outils). Cependant, l'existence du système balais collecteur a toujours été un inconvénient majeur limitant la puissance et la vitesse, engendre des dysfonctionnements fréquents et difficulté d'entretien. .. Pour ces raisons, l'utilisation d'un moteur électrique à courant alternatif s'avère nécessaire pour se débarrasser de ces lacunes

Moteur synchrone à aimant permanents restent un bon choix par rapport aux moteurs asynchrones

Nous allons étudier ce moteur d'une manière très détaillée tout en présentant ses avantages et inconvénients. Par la suite, nous allons présenter la modélisation de la machine à aimant permanent (MSAP) [13-14].

III.2 Machine synchrone

La machine synchrone est une machine électrique a courant alternatif

III.3 Principe de fonctionnement de la MSAP :

Le principe du moteur à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines statoriques sont alimentées en courant alternatif. Le champ créé par les enroulements oriente le rotor constitué par des aimants.

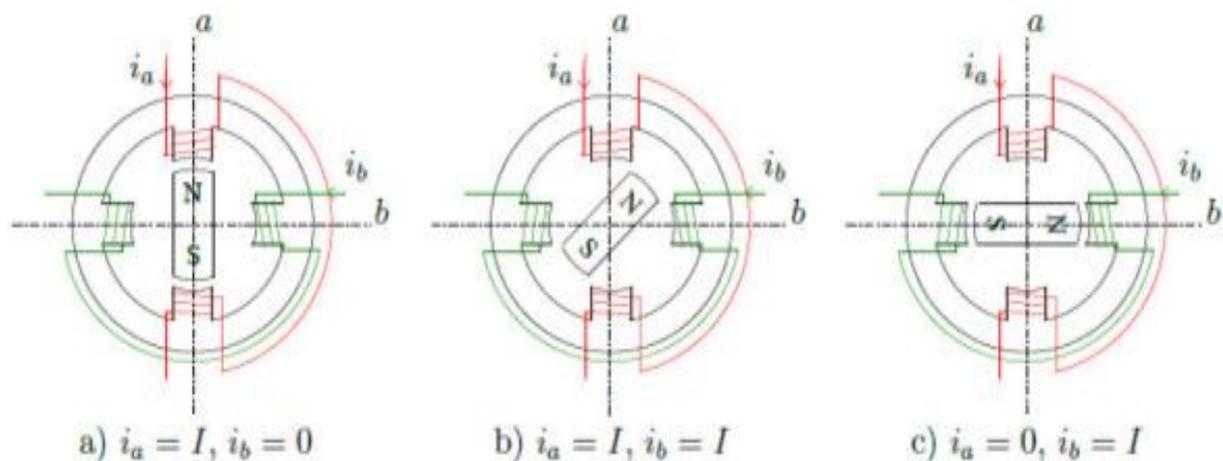


Figure III.1 : Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents. [18]

La Figure(III.1) représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator comportant une paire de pôles. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. On définit un "pas" élémentaire θ_p comme étant le

déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à une autre phase.

Pour cette structure nous obtenons $\theta_p = 90^\circ$, cela correspond au passage de la Figure (III.2 a) à la Figure (III.2 c). Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois Figure (III.2 b). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure.

III.2.1 interne des aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques permet aux MSAP d'être de plus en plus utilisées dans différents domaines de l'industrie. La densité de puissance massique élevée, le rendement élevé, l'augmentation de la constante thermique et l'augmentation de la fiabilité (due à l'absence des contacts glissants bagues-ballais de ces machines) leurs permettent de concurrencer fortement les machines asynchrones et les machine à courant continu.

Les aimants permanents utilisés dans les machines synchrone ont pour fonction principale la création du flux inducteur. Ils doivent permettre l'obtention d'une puissance massique élevée, ce qui réduit le volume de la machine. D'autre part, une faible sensibilité à la température est également indispensable, ce qui limite la désaimantation en fonctionnement normal [15] [16].

Le choix des aimants permanents dépend des facteurs suivants [17] :

- Performance du moteur,
- Poids du moteur,
- Dimension du moteur,
- Rendement du moteur,
- Facteur économique.

III.3 Type de rotors de la machine MSAP

Le rotor de la machine à aimants permanents peut être construit avec plusieurs configurations rotoriques. Leur classification générale se fait selon le placement d'aimants et qui est la suivante :

- Aimants en surface (a)
- Aimants insérés (b)
- Aimants à concentration de flux (c)
- Aimants enterrés (d)

Ce type de machines est utilisé dans les centrales hydrauliques (faible vitesse linéique), le rotor comporte $2p$ pôles, sa vitesse de rotation se calcule par : $N_s=f/p$ (tr/s). (a, b)

Ce type de machines est utilisé surtout pour les grandes vitesses (turboalternateurs des centrales nucléaires), donc elles ont 3, 2 ou 1 pair de pôles. Ces machines nécessitent un moteur d'entraînement rapide qui se spécifie par les turbines à vapeur dans les centrales thermiques par exemple ; ces machines génératrices de courant portent le nom de turbo-alternateur. (c, d)

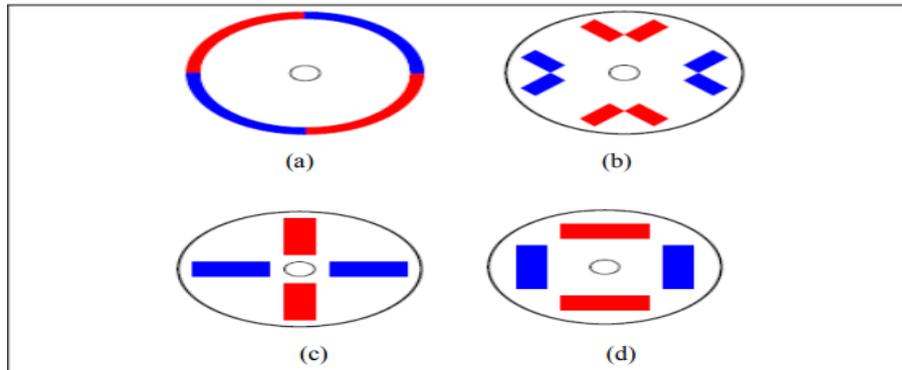


Figure III.2 : différentes structures de rotors MSAP.

III.4 Domaines d'application avantages et inconvénients de MSAP

Le moteur synchrone peut être utilisé dans de nombreuses applications comme :

- les automobiles,
- les équipements de technologie de l'information (DVD drives),
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste),
- les applications robotiques,
- la production d'électricité,
- les propulsions des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins,
- les machines-outils,
- les applications de l'énergie de l'éolienne.

• Avantages

L'utilisation des aimants permanents à la place des bobinages d'excitation offrent beaucoup d'avantage : [17] [19] [20]

- suppression de l'alimentation du rotor (absence du contact bagues balais).
- Moins des pertes de cuivre provenant surtout du stator.
- Facteur de puissance et rendement du moteur améliorés.
- Une faible Inertie et un couple massique élevé.

- Une meilleure performance dynamique.
- Construction et maintenance plus simple.
- Absence d'échauffement au rotor et absence des pertes Joules.

- **Inconvénients**

Cependant les inconvénients de la MSAP on peut citer :

- Coût élevé des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

III.5 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP est nécessaire pour l'étude de sa commande dans les différents régimes de fonctionnements transitoire et permanent. Les hypothèses simplificatrices usuelles adoptées dans la modélisation de la machine, données dans la majorité des références sont :[30] [31].

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique,
- La distribution sinusoïdale de le F.M.M créée par les enroulements du stator,
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau,
- L'effet d'encoche est négligeable,
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

III.5.1 Mise en équations de la machine dans le repère (abc)

La Figure (III.3) donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents.

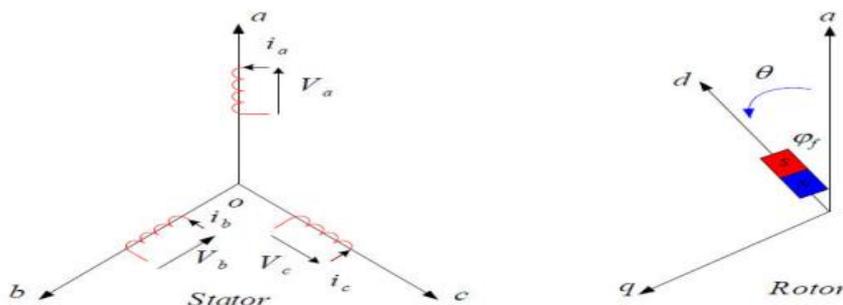


Figure III.3 : Schéma de la MSAP dans le repère abc.

Le comportement de la machine est entièrement défini par trois types d'équations à savoir

:

- Equations électriques,
- Equations magnétiques,
- Equations mécaniques.

❖ **Equations électriques**

Les équations électriques du stator d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents sans amortisseurs s'écrivent :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi] \tag{III.1}$$

Ou :

$[V_s] = [V_a V_b V_c]$ vecteur tensions statorique

$[I_s] = [I_a I_b I_c]^t$ vecteur courants statorique

$[\varphi] = [\varphi_a \varphi_b \varphi_c]$ vecteur flux totaux

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \quad : \text{Matrice des enroulements statoriques.}$$

❖ **Equations magnétiques**

Les flux totaux sont exprimés par :

$$[\varphi] = [L_s] [I_s] + [\varphi_f] \tag{III.2}$$

Ou :

$$[L_s] = \begin{pmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{pmatrix} \quad : \text{Matrice inductance du stator}$$

Avec

M : Inductance mutuelle entre deux phases statorique.

La, Lb, Lc : Inductance propre d'une phase statorique.

Et :

$[\varphi_f abc] = [\varphi_f a \varphi_f b \varphi_f c]^t$: Vecteur flux crée par l'aimant travers l'enroulement statorique.

$$[\varphi_f] = \varphi_f \varphi_f \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix}$$

$$\cos\left(\Phi + \frac{2\pi}{3}\right)$$

φ_f : Le flux induit par l'aimant permanent.

φ : Angle entre l'axe d et l'axe de référence(a) dans le système triphasé défini par

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega_e dt \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Et : } w_e = p w_r \quad (\text{III.4})$$

Avec :

w_e : La vitesse électrique.

p : Le nombre de paires de pôle.

w_r : La vitesse de rotation de rotor.

En introduisant (III.2) dans (III.1) on aura

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_s] [I_s] + [\varphi_f]) \quad (\text{III.5})$$

❖ Equations mécaniques

La dernière équation importante qui complète le modèle de la MSAP est l'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine est :

$$C_{em} - C_r - F_f w_r = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (\text{III.6})$$

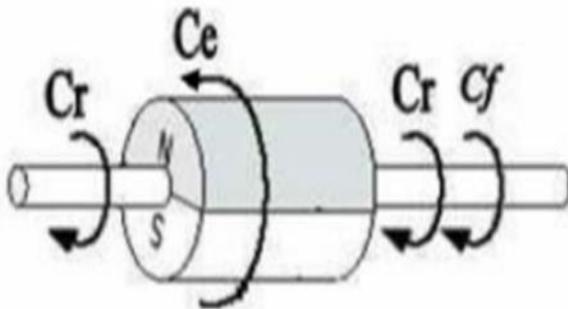


Figure III.4 : Différents couples agissent sur le rotor.

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

C_r : Couple résistant ou de charge.

F_f : Coefficient de frottement visqueux.

J : Moment d'inertie du moteur.

On remarque que le système (III.4) engendre des équations fortement non-linéaires et couplés. Pour simplifier ce problème de non linéarité du système d'équations différentielles, on fait des

changements de variables qui réduisent la complexité de ce système. Dans les machines électriques triphasées, ce changement de variable consiste à transformer les trois enroulements relatifs aux trois phases (a b c) à des enroulements orthogonaux (d, q), tournant à une vitesse ω_r .

III.5.2 Transformation de Park

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques et toriques à un système cartésien d'axes, (d, q).

Dans le repère classique il y a trois axes (a, b, c) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Habituellement, l'axe (a) est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, on a toujours un seul axe (correspondant à la direction de l'aimantation) pour la machine synchrones à aimants permanents (Φ) donne la position du rotor par rapport au stator.

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs à $(\pi/2)$ dans l'espace et alimentés par des courants à $(\pi/2)$ dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les l'axes (d) et (q), où dans le cas de la MSAP (figure III.5) l'axe (d) est orienté suivant le rotor.

Pour passer du système triphasé, (a, b, c), au système biphasé, (d, q), réciproquement, il faut utiliser les transformations suivantes :

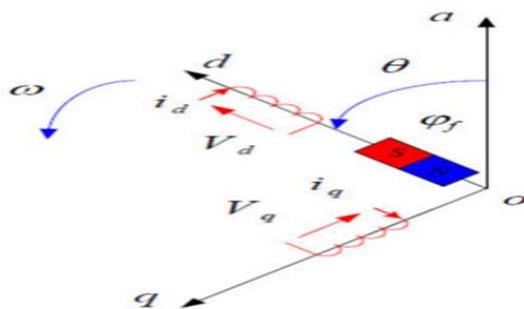


Figure III.5 Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d, q)

- **Du triphasé au diphasé**

L'équation qui traduit le passage du système triphasé (a, b, c) au système diphasé (d, q) est donnée Par :

$$[X_{dqo}] = [p(\Phi)] [X_{abc}] \tag{III.7}$$

Avec

[P (Φ)] : La matrice de passage direct de Park

$$\begin{pmatrix} \cos(\Phi) & \cos(\Phi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Phi - \frac{4\pi}{3}) \\ & & \\ & & \end{pmatrix}$$

$$[P(\Phi)] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sin(\Phi) & -\sin(\Phi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Phi - \frac{4\pi}{3}) \\ & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

Φ : Représente la position du rotor.

$[XX_{abc}]$: Peut-être un courant, une tension ou un flux

Ou :

$$[V_{dqo}] = [P(\Phi)] [V_a V_b V_c]^t$$

$$[I_{dqo}] = [P(\Phi)] [I_a I_b I_c]^t$$

$$[\varphi_{dqo}] = [P(\Phi)] [\varphi] = [\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^t$$

• **Biphasé au triphasé**

La transformation inverse de Park est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées qui est définie par :

$$[X_{abc}] = [P(\Phi)]^{-1} [X_{dqo}] \quad (III.9)$$

$$[P(\Phi)]^{-1} = \begin{pmatrix} \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\Phi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Phi - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\Phi - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\Phi - \frac{4\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (III.10)$$

III.6 Application de la transformation de Park à la machine MSAP.

III.6.1 Equation de tension

En appliquant la transformation de Park au système (III.1) on aura :

$$[V_{d_{ao}}] = [P(\varphi)] [V_s] = [P(\varphi)] [R_s] [I_s] + [P(\varphi)] \frac{d}{dt} [\varphi] \quad (III.11)$$

On sait que :

$$[I_s] = [P(\theta)]^{-1} [I_{dqo}]$$

D'où : (11) découle

$$[V_{d_{ao}}] = [P(\varphi)] [R_s] [P(\varphi)]^{-1} [I_{dqo}] + [P(\varphi)] \frac{d}{dt} [\varphi]$$

Et on a :

$$[P(\varphi)] [P(\theta)]^{-1} = 1$$

D'où :

$$[Vd_{ao}] = [R_s] \cdot [Idqo] + [P(\varphi)] \frac{d}{dt} ([P(\varphi)]^{-1} [\varphi d_{qo}])$$

$$[Vd_{ao}] = [R_s] \cdot [Id_{ao}] + [P(\varphi)] \left(\frac{d}{dt} ([P(\varphi)]^{-1}) [\varphi d_{ao}] + \left(\frac{d}{dt} [\varphi d_{ao}] \cdot [P(\varphi)]^{-1} \right) \right)$$

$$[Vd_{ao}] = [R_s] \cdot [Id_{ao}] + [P(\varphi)] \left(\frac{d}{dt} ([P(\varphi)]^{-1}) [\varphi d_{ao}] + \left(\frac{d}{dt} [\varphi d_{ao}] \cdot [P(\varphi)]^{-1} [P(\varphi)] \right) \right)$$

Et on sait que :

$$[P(\varphi)] \left(\frac{d}{dt} ([P(\varphi)]^{-1}) \right) = \frac{d\varphi}{dt} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Et } \frac{d\varphi}{dt} = \omega_s$$

D'où :

$$[Vd_{ao}] = [R_s] \cdot [Id_{ao}] + \omega_s \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot [\varphi d_{ao}] + \frac{d}{dt} [\varphi d_{qo}]$$

$$\begin{pmatrix} Vd \\ Vq \\ Vo \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Id \\ Iq \\ Io \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \omega_s \begin{pmatrix} \varphi d \\ \varphi q \\ \varphi o \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi d \\ \varphi q \\ \varphi o \end{pmatrix} \quad (\text{III.12})$$

En déduit :

$$Vd = R_s i_d + \frac{d\varphi d}{dt} - \omega_e \varphi q \quad (\text{III.13})$$

$$Vq = R_s i_q + \frac{d\varphi q}{dt} + \omega_e \varphi d$$

$$V_o = R_s I_o + \frac{d\varphi o}{dt}$$

III.6.2 Equation de flux

D'après les équations (III.5) et la transformation de Park et de Park inverse nous avons :

$$[\varphi_{dq}] [P(\varphi)]^{-1} [\varphi_{abc}] = [L] [Idq] + [\varphi_{f_{abc}}] \quad (\text{III.14})$$

$$[\varphi_{dq}] [[P(\varphi)]^{-1}] [L] [[P(\varphi)]^{-1}] [Idq] + [\varphi_{f_{abc}}]$$

$$[\varphi_{dq}] + [L_s] [Idq] + [\varphi_f]$$

$$= \begin{pmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_f \\ 0 \end{pmatrix}$$

D'où

Avec :Ld : Inductances d`axes directes.

Lq : Inductances d`axes en quadrature.

En remplaçant les expressions des flux φd et φq dans le système (III.14), nous obtenons :

$$\begin{aligned} V_d &= R_s i_d + L_d \frac{d i_d}{dt} - \omega_e L_q I_q \\ V_q &= R_s I_q + L_q \frac{d I_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \phi_f) \end{aligned} \quad (III.15)$$

III.6.3 Equation de puissance et de couple électromagnétique :

Le calcul de couple électromagnétique de MSAP se base sur la connaissance de la puissance instantanée P(t) qui s'exprime par :

$$P(t) = V_a \cdot I_q + V_d I_d + V_c I_c \quad (III.16)$$

Dans le référentiel de Park, cette puissance s'écrit [21].

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_a \cdot I_a + V_a \cdot I_q) \quad (III.17)$$

En remplaçant les courants et les tensions dans cette expression par leurs similaires dans le système (d, q), La puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de Park devient :

$$P(t) = \frac{3}{2} [P_{\omega r} ((L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f I_q) + R_s (I_d^2 + I_q^2) + (I_d L_d \frac{d I_d}{dt} + I_q L_q \frac{d I_q}{dt})] \quad (III.18)$$

Cette puissance est composée de :

- Puissance perdue par effet joule : $P_j = \frac{3}{2} R (I_d^2 + I_q^2)$ (III.19)
- Puissance électromagnétique : $P_{em} = \frac{3}{2} [P_{\omega r} (L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f I_q]$ (III.20)
- La variation d'énergie magnétique emmagasinée :
 - $P(t) = \frac{3}{2} (I_d L_d \frac{d I_d}{dt} + I_q L_q \frac{d I_q}{dt})$ (III.21)

La connaissance du couple électromagnétique est essentielle pour l'étude de la machine et sa commande. L'expression de ce couple est exprimée par :

$$C_{em} = \frac{p_{em}}{\omega_r} \quad (III.22)$$

Donc on aura :

$$C_{em} = \frac{3P}{2} [(L_d - L_q) I_d I_q + [\phi_f I_q]] \quad (III.23)$$

III.7 Modélisation de MSAP sous la forme d'états de la machine MSAP

On cherche à obtenir un système d'équations écrit sous forme d'équations d'états qui sera de type :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax(t) + Bu \\ Y &= Cx(t) \end{aligned} \quad (III.24)$$

X : Vecteur d'état ;

U : Vecteur de commande ;

A : Matrice d'état ;

B : Matrice de la commande ;

C : Matrice de sortie.

- En développant le système d'équations (III.15) on peut déduire la forme finale des équations du MSAP dans le référentiel (d-q) :

➤ **Représentation d'état dans le repère d-q**

Plusieurs façons sont possibles pour le choix du vecteur d'état, cela dépendra de l'objectif tracé. Pour la MSAP alimentée en tension on choisit le vecteur d'état comme la suite :[22]

- Variables de commande les tensions statoriques V_d, V_q et le flux permanent ϕ_f
- Variables d'état : les courants I_d, I_q ;
- Variables de sortie : Les courants I_d, I_q

En utilisant les équations (III.24) (III.15) après arrangement le système prend la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} P \omega_r I_q + \frac{1}{L_d} V_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{L_d}{L_q} P \omega_s I_d - \frac{\phi_{fabc}}{L_q} P \omega_r + \frac{1}{L_q} V_q \end{cases} \quad (III.25)$$

D'ou :

$$X = \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ \phi_f \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix}$$

Et :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_r \\ \frac{L_d}{L_q} \omega_r & -\frac{R_s}{L_q} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_q} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & \frac{1}{L_q} \omega_r \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_r}{dt} + F_c \omega_r = C_{em} - C_r \\ C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f abc I_q] \\ \Omega_r = \frac{\omega_e}{P} \end{cases} \quad (III.26)$$

III.8 Utilisation de la transformation de Laplace

On appliquant la transformation de Laplace sur (III.25) on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} S \cdot Id = -\frac{R_s}{L_d} I_q + \frac{L_q}{L_d} P_{\omega r} I_q + \frac{1}{L_d} V_d \\ S \cdot I_q = -\frac{R_s}{L_d} I_q + \frac{L_d}{L_q} P_{\omega r} I_q + \frac{\phi f_{abc}}{L_q} P_{\omega r} + \frac{1}{L_q} V_q \end{array} \right. \quad (III.27)$$

$$(III.28)$$

De l'équation (III.27) on obtient :

$$Id \left[S + \frac{R}{L_d} \right] = \frac{L_q}{L_d} P_{\omega r} I_q + \frac{1}{L_d} V_d$$

$$L_d = \frac{P_{\omega r} I_q L_q + V_d}{L_d s + R_s} \quad (III.29)$$

Avec la même méthode on trouve :

$$L_q = \frac{-P_{\omega r} I_q L_q - \phi f_{abc} P_{\omega r} + V_d}{L_q s + R_s} \quad (III.30)$$

Et l'équation de mouvement devient :

$$J \omega_r \cdot S + F_c \omega_r = C_{em} - C_r$$

D'où :

$$\Omega_r = \frac{C_{em} - C_r}{jS + F_c} \quad (III.31)$$

Avec :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_q Id + \phi f_{abc} I_q]$$

III.9 Alimentation de la machine MSAP

Après avoir présenté le modèle mécanique, nous présenterons un système d'entraînement complet dans lequel une machine synchrone à aimants permanents est en cascade avec deux onduleurs. Le convertisseur côté ligne se compose d'un redresseur à diode triphasé et d'un filtre. Le convertisseur de puissance côté machine est un onduleur de tension triphasé. La figure (III.7) montre le schéma de principe de cette association.

III.9.1 L'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif ; il permet d'imposer aux bornes de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande. Il est constitué de trois bras ; chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Les transistors sont shuntés par des diodes de

récupération Celui-ci est schématisé dans la Figure (III.7) Chaque bras de l'onduleur peut être représenté par un interrupteur à deux positions [23].

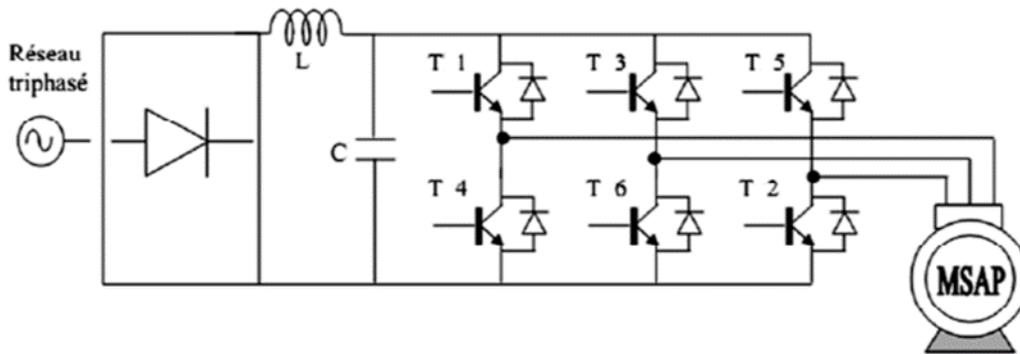


Figure III.6 : Alimentation de la Machine synchrone à aimants permanent

On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source :
 - Onduleurs de tension
 - Onduleurs de courant

Un onduleur de tension est alimenté par un générateur à courant continu du type source de tension. Idéalement, la tension à son entrée a une valeur constante U qui est indépendante du courant i que l'onduleur absorbe ; En pratique, le caractère de "source de tension" du générateur est obtenu en plaçant en parallèle avec ses bornes d'accès un condensateur C de forte valeur ou un filtre L-C.

Le générateur proprement dit est le plus souvent ; Pour respecter la règle de l'alternance des sources, l'onduleur doit alimenter un récepteur à courant alternatif du type source de courant ; En pratique, le caractère de source de courant du récepteur découle de la présence d'inductances série à ses bornes d'accès.

- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc.),
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc.).

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable, la forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semi-

conducteurs contrôlables, puissants, robustes, et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion[27].

- Dans notre cas on s'interne à l'onduleur de tension triphasé à deux niveau

III.9.2 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux

Pour modéliser l'onduleur de tension, on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée qu'il est alimenté de deux générateurs de F.E.M égale à $\frac{U_0}{2}$ Connectés entre eux par un point noté n_0 comme montre sur la figure (Figure III.8).

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an}, V_{bn}, V_{cn} l'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i ($i=a, b, c$). On appelle T_i et T_i' les transistors (supposée comme des interrupteurs idéaux) [24].

On a S_i : $S_i = +1$, Alors T_i est passant et T_i' est ouvert

$S_i = -1$, Alors T_i est ouvert et T_i' est passant

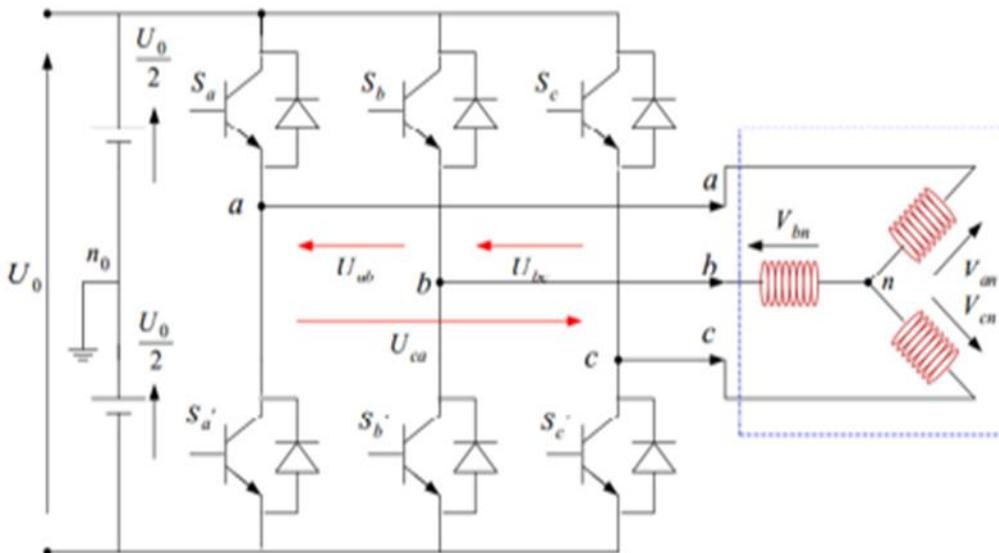


Figure III.7 : Représentation d'un onduleur triphasé de tension à deux niveaux.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions en fonction des signaux de commande S_i ($i= a, b, c$). Et en tenant compte du point fictive n_0 représenté sur la figure (III.7)

$$V_{in_0} = V_{dc} \tag{III.31}$$

Soit " n ", le point neutre du coté alternatif MASP, alors les trois tensions composées : v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} Sont définies par les relations suivantes :

$$u_{ab} = v_{an} - v_{bn}$$

$$u_{bc} = V_{bn} - v_{cn} \text{ (III.32)}$$

$$u_{ca} = v_{cn} - v_{an}$$

La charge constituée par la machine est équilibrée ($v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$), on aura donc :

$$\begin{aligned} v_{an} &= 1/3 [u_{ab} - u_{ca}] \\ v_{bc} &= 1/3 [u_{ab} - u_{ca}] \\ v_{ca} &= 1/3 [u_{ab} - u_{ca}] \end{aligned} \text{ (III.33)}$$

En faisant apparaître le point "n0" les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{aligned} u_{ab} &= v_{an0} - v_{bn0} \\ u_{bc} &= v_{an0} - v_{bn0} \text{ (III.34)} \\ u_{ca} &= v_{an0} - v_{bn0} \end{aligned}$$

En remplaçant (III.33) dans (III.34), on obtient

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{an0} \\ v_{bn0} \\ v_{cn0} \end{pmatrix} \text{ (III.35)}$$

Des relations suivantes :

$$\begin{cases} v_{an0} = v_{an} + v_{nn0} \\ v_{bn0} = v_{bn} + v_{nn0} \\ v_{cn0} = v_{cn} + v_{nn0} \end{cases} \text{ (III.36)}$$

On peut déduire le potentiel entre les points n et n_0 :

$$v_{nn0} = \frac{1}{3} [v_{an0} + v_{bn0} + v_{cn0}] \text{ (III.37)}$$

L'utilisation de l'expression (III.31), permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \text{ (III.38)}$$

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie des tensions les plus sinusoïdales possibles, à cet effet, différentes méthodes sont utilisées pour commander les interrupteurs d'un onduleur. La stratégie la plus utilisée est la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI).

III.9.3 Onduleur de Tension à MLI :

Le principe général de La commande MLI consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale en une tension sous forme de créneaux successifs générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). [30]

Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, de fréquence Φ représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, appelé signal de la porteuse, de fréquence Φ^1 qui est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs des sorties de l'onduleur ; telle que, lorsque le signal de référence est au-dessus du signal de la porteuse ; l'impulsion de sortie est 1 et lorsqu'il est au-dessous de la porteuse, L'impulsion de sortie est égale à 0.

Donc le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

Si $U_r > U_p$ $S(t) = 1$ Si non $S(t) = 0$

U_r la tension de référence avec $f=50$ Hz

U_p la tension de porteuse avec $f=1$ KHz

$S(t)$ est le signal MLI résultant

Il existe plusieurs stratégies de modulation de largeurs d'impulsions :

- MLI triangulé-sinusoïdale
- MLI à hystérésis
- MLI vectorielle ...etc.

Chacune d'elle doit obéir à un algorithme bien défini mais toutes sont conçues pour générer une source de tension la plus sinusoïdale possible à la sortie de l'onduleur.

Dans notre étude, on utilisera MLI triangulé-sinusoïdale

- **Modulation de Largeur d'impulsions Sinus-Triangle**

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de

commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdales déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ à la même fréquence f . Comme à la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, donc elle comporte des harmoniques, seules responsables des parasites ce qui engendre des pertes supplémentaires.

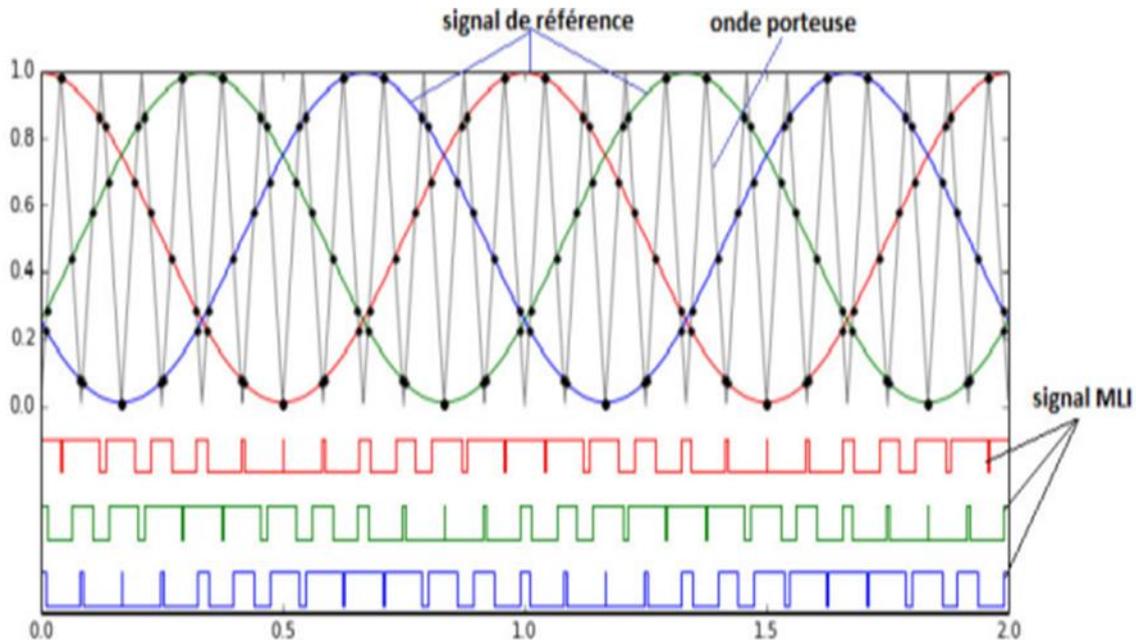


Figure III.8 : Principe de la commande MLI ST

III.9 Machine à courant continu

Un moteur à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie à partir d'une installation électrique, parcourue par un courant continu, en énergie mécanique.

III.9.1 Description d'un moteur à courant continu

Un moteur électrique MCC est constitué

- D'un stator qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents à stator, se trouve la partie porte balais et les balais assurant les contacts électriques avec le rotor. Il est aussi appelé inducteur.
- D'un rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité dans chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en

quadrature avec le flux statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément induit

- D'un collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Il est monté sur l'arbre de la machine mais isolé de ce dernier. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur
- Les balais permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur. Lors de la construction des premières machines à courant continu, les balais étaient constitués de fils de cuivre, d'où le nom de balais [6].

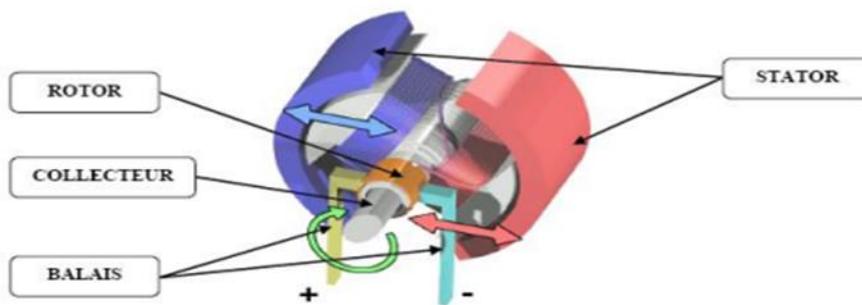


Figure III.9 : schéma d'un moteur à courant continu

Dans notre étude, on utilise le MCC à excitation séparée ou l'induite et l'inducteur sont alimentés par des sources séparées.

Le modèle électrique équivalent de l'induit est donné par la figure, où E_a représente la force électromotrice ; L_a représente l'inductance équivalente de l'enroulement d'induit ; R_a représente-la

Résistance équivalente de l'induit (résistance des fils du bobinage et résistance de contact au niveau des balais).

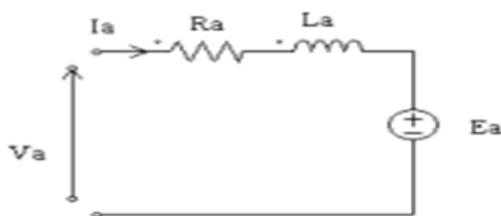


Figure III.10 : Modèle électrique équivalent du rotor du MCC.

Le schéma électrique équivalent de l'inducteur est donné sur la figure (III.2), où L_f représente l'inductance équivalente de l'enroulement inducteur ; R_f représente la résistance équivalente de l'inducteur (résistance des fils du bobinage)

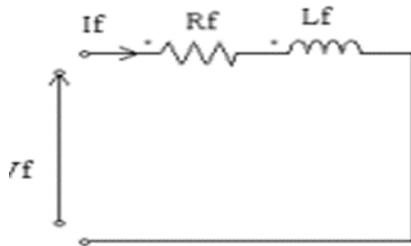


Figure III.11 : Modèle électrique équivalent du stator du MCC.

III.9.2 Modélisation mathématique de MCC

Selon le schéma de la figure, un moteur électrique à courant continu est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques.

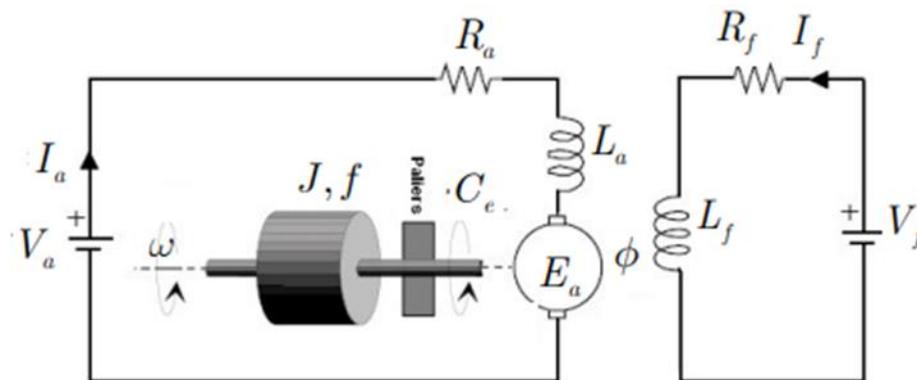


Figure III.12 : Schéma électrique d'une machine à excitation séparée.

D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, On peut écrire les équations de MCC comme suit [26].

• **Equation de l'inducteur (excitation) :**

$$L_f \frac{dI_f}{dt} = -R_f I_f + V_f \quad (\text{III.1})$$

• **Equation de l'induit :**

$$L_a \frac{dI_a}{dt} = -R_a I_a - E_a + V_a \quad (\text{III.2})$$

Ou'

$$E_a = K\phi\omega \quad (\text{III.3})$$

Avec ω vitesse de rotation en radians/seconde. Le flux est une fonction linéaire du courant d'excitation :

$$K\phi = M I_f$$

$$E_a = M_{fd} \cdot I_f \cdot W \quad (\text{III.4})$$

M : Inductance mutuelle

• **Equation de couple**

On l'obtient à partir de la puissance électromagnétique

$$P = C_e \cdot \omega = I_a E_a$$

$$C_{em} \cdot \omega = I_a \cdot M_{fd} \cdot I_f \cdot \omega \quad (\text{III.5})$$

$$C_{em} = I_a \cdot M_{fd} \cdot I_f \quad (\text{III.6})$$

• Equation mécanique

$$J \frac{d\omega}{dt} = -f \omega + C_e - C_r \quad (\text{III.7})$$

Où C_r est le couple résistant imposé par la charge, J le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et f le coefficient de frottement

On suppose que la commande de la machine se fait par l'induit ce qui donne un courant constant au niveau de l'inducteurs :

$$I_f = cst$$

$$E_a = M_{fd} \cdot I_f \cdot \omega = k \cdot \omega \quad (\text{III.8})$$

$$C_{em} = I_a \cdot M_{fd} \cdot I_f = K \cdot I_a \quad (\text{III.9})$$

L'équation de la machine devient :

$$L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a \cdot I_a + E_a$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + f \omega(t) = C_{em} - C_r$$

$$E_a = K \omega(t)$$

$$C_{em} = K \cdot I_a \quad (\text{III.10})$$

Conclusion :

Nous avons présenté les principales notions relatives à la MSAP et MCC ainsi que leurs modélisations sous forme de modèle d'état. Le modèle de la MSAP a été établi dans le repère de Park dans le but de linéariser le système et faciliter l'étude. Nous avons étudié ce moteur d'une manière très détaillée tout en présentant ses avantages et inconvénients.

IV.1 Introduction

Le modèle MSAP, présenté dans le troisième chapitre, est non linéaire multivariable et fortement interactif entre les variables d'entrée de la machine telles que la tension et la fréquence et les variables de sortie telles que le couple et la vitesse. Par conséquent, il est difficile de contrôler la machine synchrone [28]. Pour contrecarrer cette difficulté et obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu à excitation séparée, Blaschke et Hasse, en 1972, ont proposé une technique de commande dite commande vectorielle appelée aussi commande par orientation de flux FOC (Field Oriented Control) [29]. L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire obtenir un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique [14, 29].

Après avoir présenté le principe de la commande vectorielle, des simulations des grandeurs de la MSAP et du MCC ont été effectuées sur le logiciel Matlab/Simulink. Interprétation et conclusion sur les résultats obtenus est effectué.

IV.2 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle consiste à orienter le courant suivant l'axe « q ». Ainsi, le couple électromagnétique peut être contrôlé par une seule composante du courant, donc il faut maintenir « I_d » nul et assurer le contrôle par la composante quadrature « I_q ». Ceci revient à maintenir le courant statorique en quadrature avec le flux inducteur, ce qui donne un couple maximal comme le montre la Figure (IV.1). Le principal flux de la machine est généré par les aimants du rotor. La plus simple Commande pour une machine synchrone à aimant permanents est de maintenir le courant direct « I_d » nul et de réguler la vitesse par le courant « I_q » via la tension « V_q », ceci vérifie le principe de la machine à courant continu.

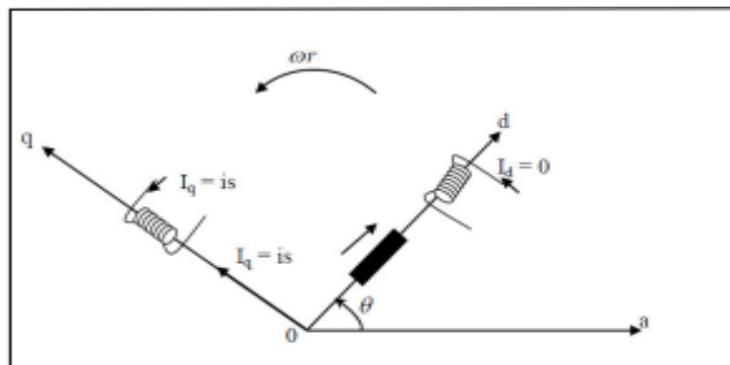


Figure. IV.1 : Principe de la commande vectorielle

L'expression du couple électromagnétique est

$$C_{em} = \frac{3P}{2} [(L_d - L_q) I_d I_q + \varphi_f I_q] \text{ (IV.1)}$$

En annulant le courant I_d , le couple électromagnétique devient comme suit :

$$C_{em} = \frac{3P}{2} \varphi_f I_q \text{ (IV.2)}$$

IV.2.1 Découplage par compensation

La compensation donc, a pour but de découpler les axes d et q afin d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi calculer aisément les coefficients des régulateurs. Le principe de ce découplage par compensation revient à définir deux nouvelles variables de commande e_d , e_q représentée dans la Figure (IV.3) telle que [29] :

$$V_{q1} \equiv \begin{cases} V_{d1} = V_{d1} - e_d \\ V_{q1} + e_q \end{cases} \text{ (IV.3)}$$

Avec :

$$V_{d1} = L_d \frac{dI_d}{dt} + R_s I_d \text{ (IV.4)}$$

$$V_{q1} = L_q \frac{dI_q}{dt} + R_s I_q$$

D ou :

$$\begin{cases} e_d = \omega_e L_q I_q \\ e_q = \omega_e (L_d I_d + \varphi_f) \end{cases} \text{ (IV.5)}$$

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 V_{q1} .

A partir de l'équation (IV.7) les courant I_d et I_q s'écrivent :

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{R_s + s L_d} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + s L_q} \end{cases} \text{ (IV.6)}$$

Les courants I_d et I_q sont découplés : le courant I_d ne dépend que de V_{d1} alors que I_q dépend uniquement de V_{q1} . La figure (IV.3) représente le schéma fonctionnel du système.

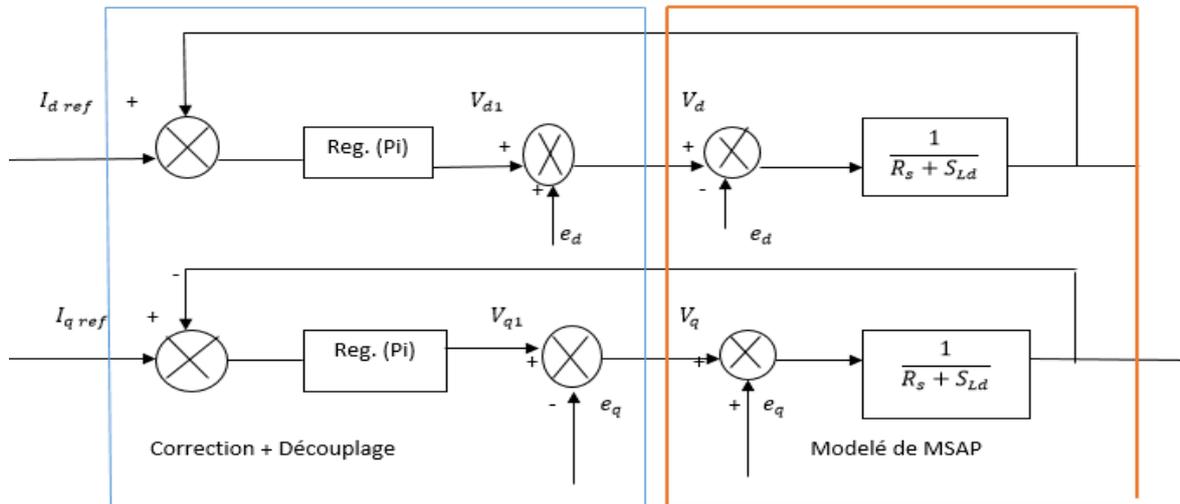


Figure IV.2 : Découplage par compensation.

Les actions sur les axes d et q sont donc découplés et représentées par la Figure (IV.4)

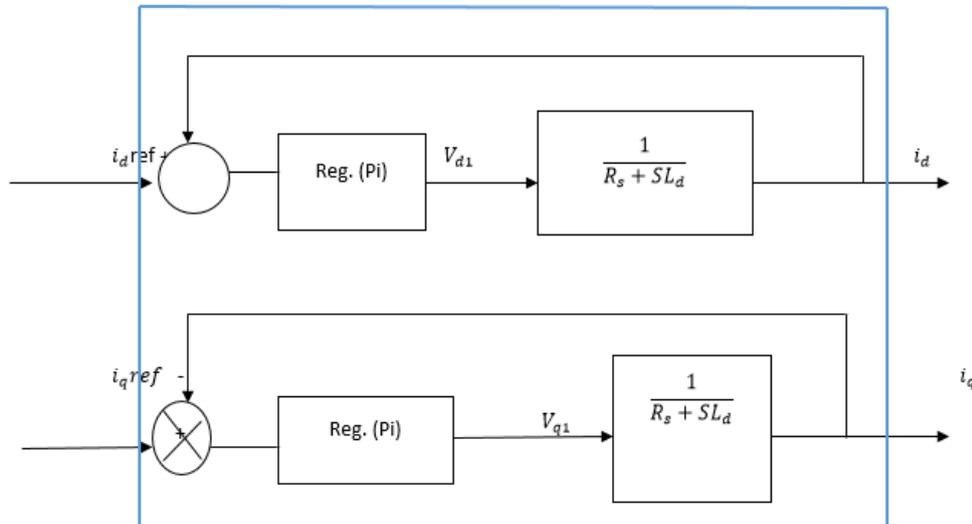


Figure. IV.3 : Commande découplée.

IV.2.2 Description du système global

Le contrôle de la vitesse de la machine demande une commande simultanée de deux Variables I_d et I_q . La Figure (IV.5) représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandée par orientation du flux dans le repère (d, q).

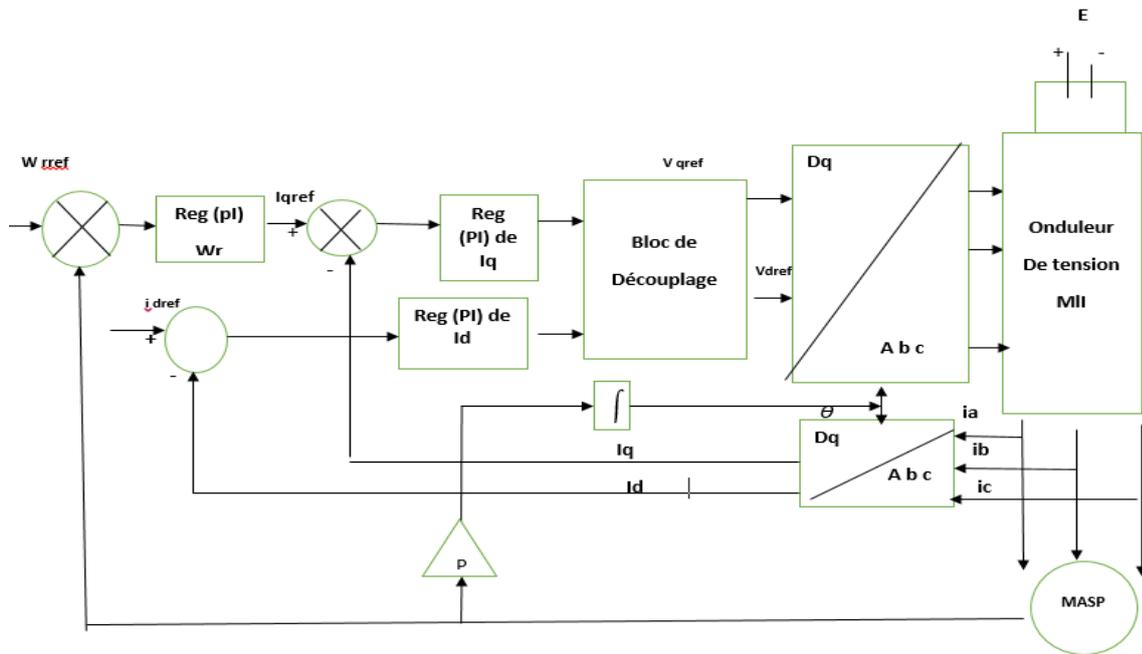


Figure. IV.4 : Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP.

La machine étant découplée selon deux axes (d, q), la régulation sur l'axe « d » est faite par une seule boucle, tandis que la régulation sur l'axe « q » est faite par deux boucles en cascades l'une interne pour réguler le courant et l'autre externe pour réguler la vitesse.

La vitesse est régulée à travers la boucle externe, la sortie de son régulateur permet de générer le courant de référence « I_{qref} » qui est comparé à la valeur du courant « I_q » issue de la mesure des courants réels et leur erreur appliquée à l'entrée du régulateur du courant « I_q ». En parallèle avec cette boucle, on trouve une boucle de régulation du courant « I_d » qui est maintenu à zéro. Les sorties des régulateurs de courant « I_d » et « I_q » sont appliquées à un bloc de découplage qui permet de générer les tensions de référence V_{qref} et V_{dref} par passage du repère (d, q) au repère (a, b, c) qui nous donne les trois tensions de référence $V_a V_b V_c$ de la commande MLI de l'onduleur de tension.

IV. 3 Simulation de la machine MSAP

La simulation est de valider le modèle adopté de la machine synchrone à aimant permanent et d'analyser le comportement lorsque la machine est alimentée par le réseau électrique. Les paramètres de la machine étudiée sont donnés dans l'annexe.

IV. 3. 1 Simulation de la dynamique de la MSAP

Le modèle de la MSAP dans le repère de Park est schématisé par la Figure (IV.5)

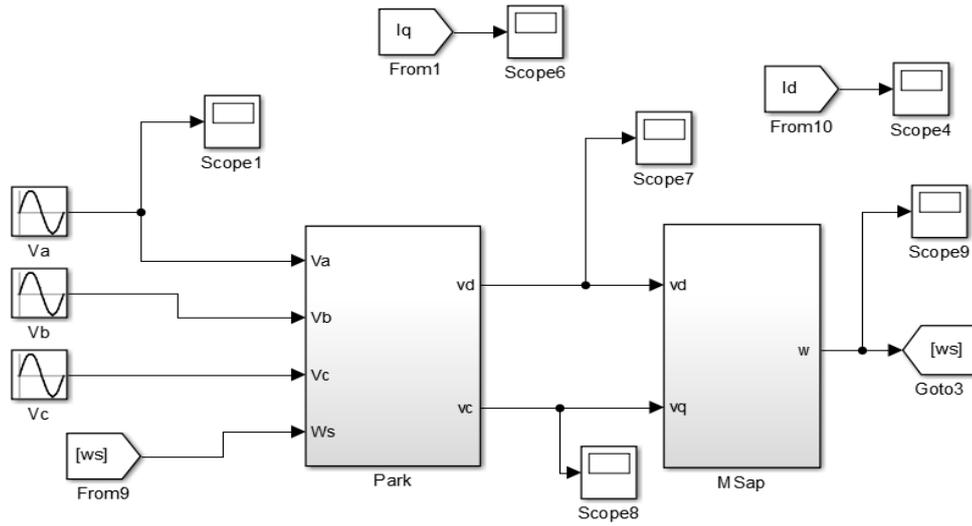


Figure IV.5 : Modèle de la MSAP dans le repère de Park

Les résultats de simulation obtenus à vide et ensuite en charge avec un couple de charge $C_r = 3 \text{ N.m}$

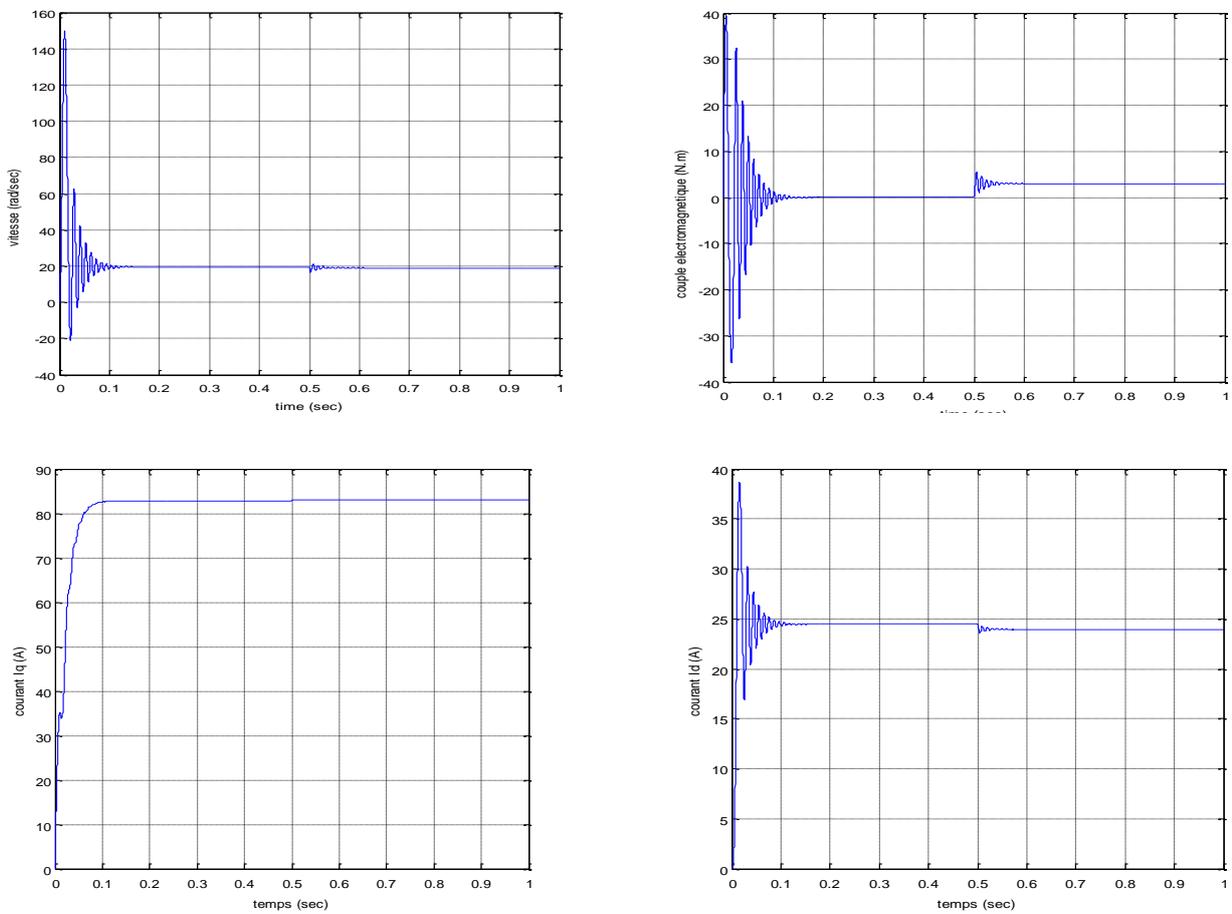


Figure IV.6 : Résultats de simulation de la MSAP dans le repère de Park

Les résultats de simulation obtenus de la Figure (IV.6) montrent qu'au démarrage à vide, on remarque une augmentation de la vitesse et du couple pendant une durée très courte, après la période du régime transitoire où le couple et la vitesse présentent des oscillations se stabilisent aux valeurs nominales. Concernant les caractéristiques des courants, au démarrage la machine fait un appel à un courant important (I_d), après on remarque une diminution puisque la machine possède le régime fonctionnel normal. A l'instante $t=0.5$ (s), on applique un couple charge $C_r=3$ N.m et on remarque une augmentation dans les caractéristiques du couple et le courant I_q après se stabilisent aux nouvelles valeurs.

On a pu observer aussi que les performances ne sont pas bonnes surtout au démarrage et lors de l'application de la perturbation due au couple de charge. Donc, pour obtenir des performances statiques et dynamiques élevées, on a appliqué la commande vectorielle à la machine étudiée.

IV.4 Simulation de la MSAP en boucle fermée

Nous avons simulé l'association onduleur-MSAP, pour un démarrage à vide puis on applique un couple résistant de 3 N.m. L'onduleur est commandé par MLI sinus-triangle.

IV.4.1 Calcul des régulateurs PI

Le rôle des régulateurs est de maintenir une grandeur de sortie égale à la grandeur de référence imposée malgré la présence des perturbations internes ou externes. Lorsque le découplage entre l'axe « d » et l'axe « q » est réalisé, la régulation est effectuée à l'aide des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI). L'action intégrale a pour effet de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée. L'action proportionnelle permet le réglage de la rapidité du système. Le régulateur (PI) est la mise en parallèle des actions proportionnelle et intégrale [33,34].

La fonction de transfert $C(s)$ du contrôleur PI est :

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} \right) \quad (IV.8)$$

Où :

K_p : Gain proportionnel.

K_i : Gain intégral.

Le régulateur PI est donné par la figure suivante :

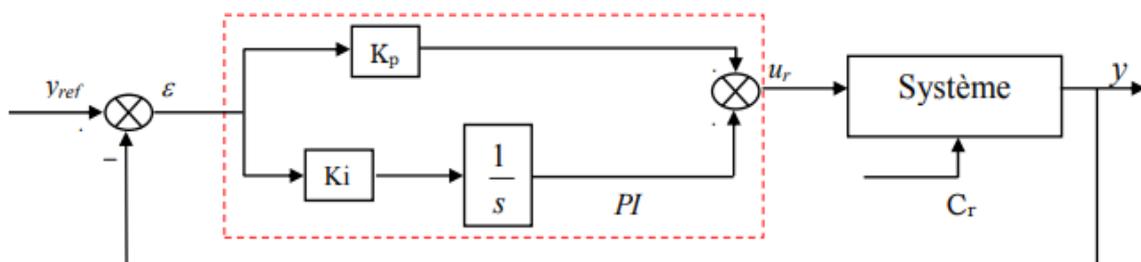


Figure IV.7 : schéma du régulateur PI

IV.4. 1. 1 Calcul de régulateur de vitesse

En annulant le courant I_d , le couple est

$$C_{em} = \frac{2}{3} p \phi I_q = K I_q \text{ (IV.9)}$$

L'équation mécanique et l'équation (IV.9) permettent de schématiser la boucle de régulation de la vitesse comme suit

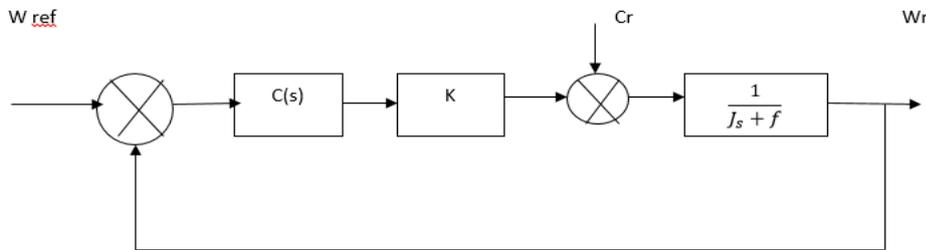


Figure IV.8 : boucle de régulation de la vitesse

On suppose $Cr=0$ $C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$

On utilise la méthode de compensation de pôle, on trouve.

$$T_i = \frac{J}{f}$$

$$K_p = \frac{T_i f}{\tau_{bf} k}$$

τ_{bf} : Constant de temps désiré en boucle fermée

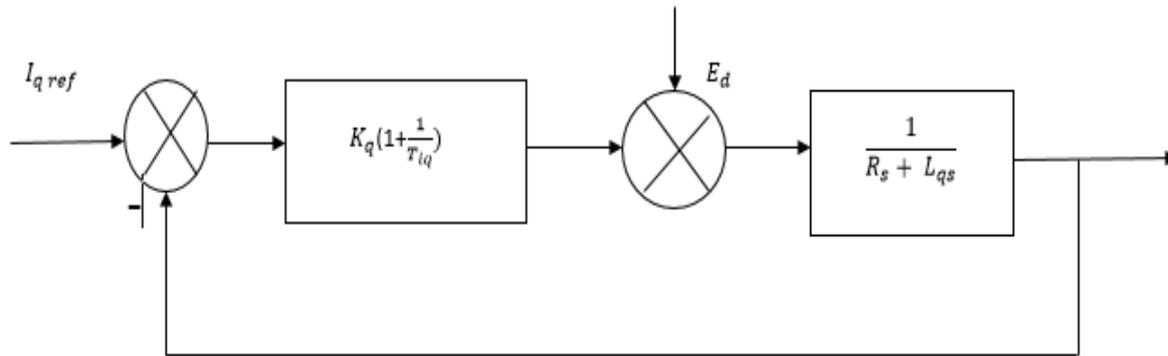
La machine est découpée selon les deux axes « d » et « q »

IV .4. 1. 2Boucle de régulation pour Iq

$$V_q (s) = (R_s + L_q s) I_q (s) + \omega_r \phi_f + L_d I_d \omega_r$$

On pose

$$e_d = \omega_r \phi_f + L_d I_d \omega_r$$

Figure IV.9 : Boucle de régulation du courant I_q .

Supposons $e_d = 0$

En utilisant la méthode de compensation de pole

$$T_{i_q} = \frac{L_q}{R_s}$$

$$K_q = \frac{R_s T_{i_q}}{\tau_q}$$

τ_q : Constante de temps désirée pour le courant I_q

IV.4. 1. 3 Régulation du courant I_d

$$V_q(s) = (R_s + L_d s) I_q(s) + \omega_r L_q I_q$$

On pose $e_q = \omega_r L_q I_q$

$$I_q(s) = \frac{V_{d_s} - e_q}{R_s + L_d s}$$

$$T_i = \frac{L_d}{R_s}$$

τ_q : Constante de temps désirée pour le courant I_d

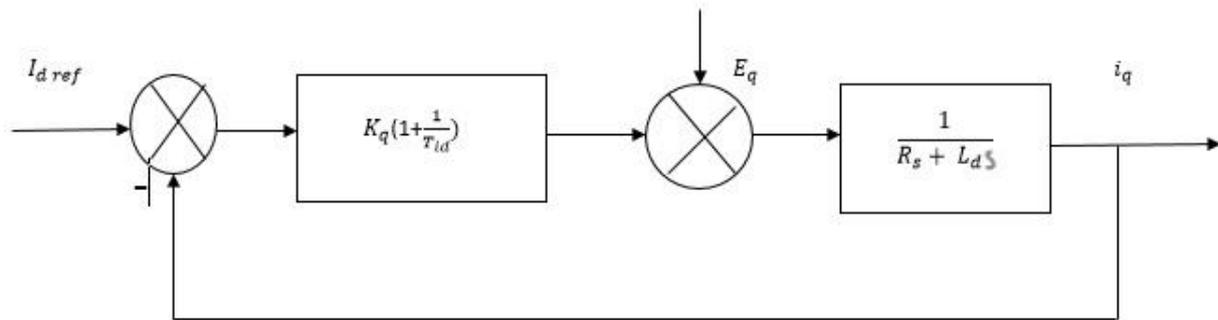


Figure IV.10 : Boucle de régulation du courant Id

Le schéma de simulation complet de la MSAP est donné sur la Figure (IV.11)

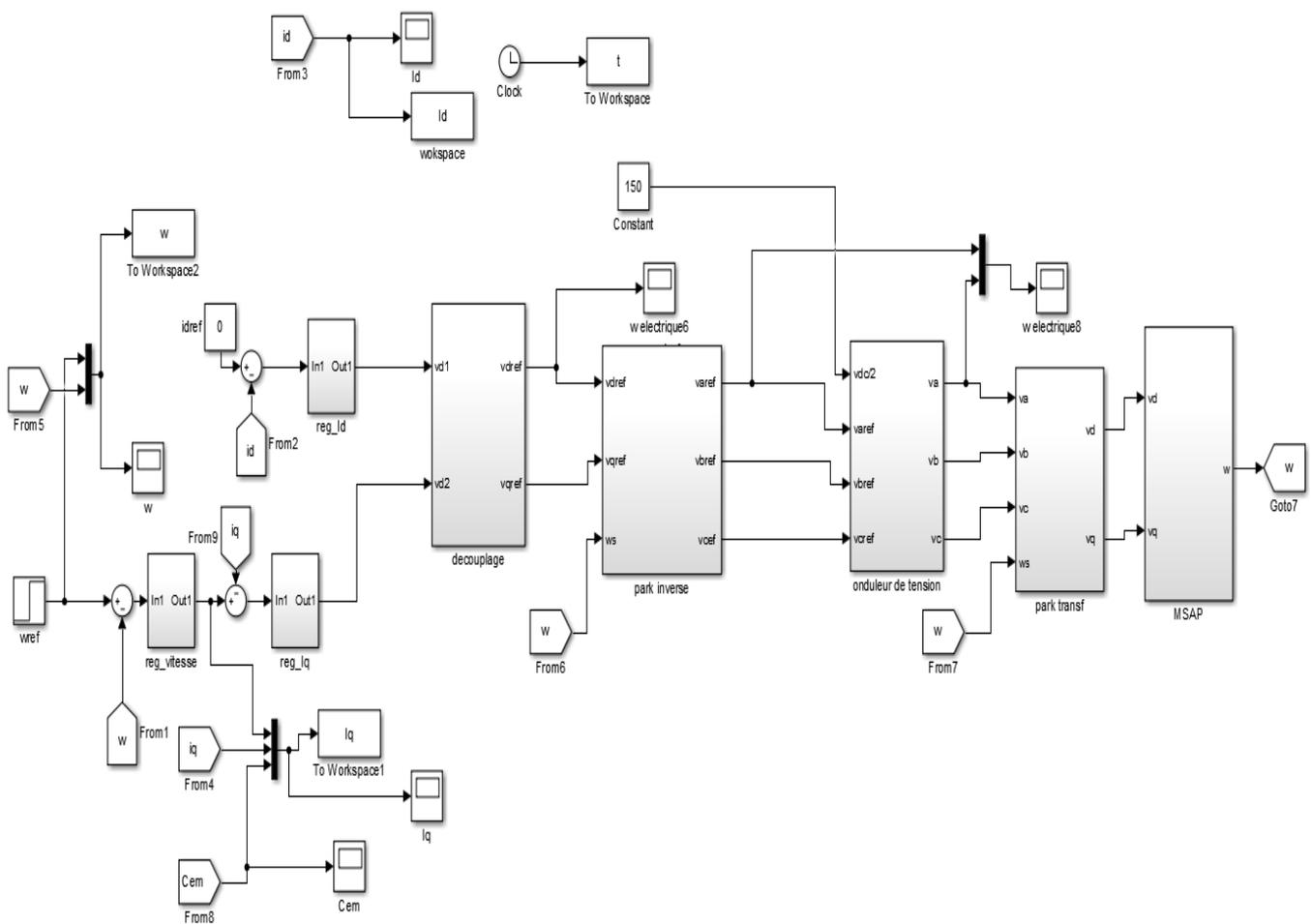


Figure IV.11 : Schéma bloc global de la commande vectorielle

IV.4.2.3 Résultats de simulation de MSAP en boucle fermée

➤ Les résultats de simulation suivants sont obtenus pour les valeurs suivantes de vitesse $w_{ref} = 314 \text{ rad/sec}$; Ensuite à $t = 1.5 \text{ s}$, $w_{ref} = 471 \text{ rad/sec}$

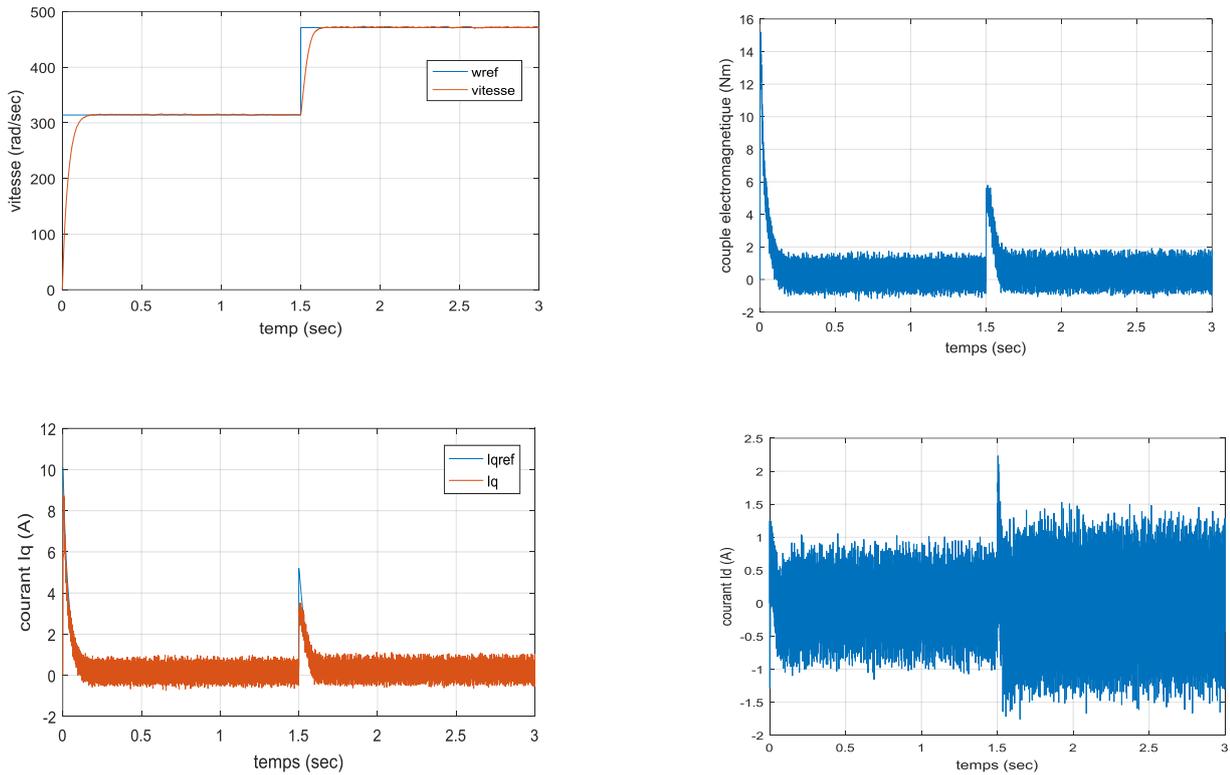


Figure IV.12 : Evolution des grandeurs de la machine MSAP pour différentes valeurs de la vitesse de référence

Les résultats de simulation de la Figure (IV.12) montre que le moteur change la vitesse selon la vitesse de référence imposant en certains temps initiale et $t=1.5 \text{ s}$; comme en a utiliser la commande vectorielle et toujours maintenue à zéro et le courant I_q et C_{em} qui sont proportionnelle augmente dans l'amplitude selon la vitesse de référence compose a chaque instant .

➤ Les résultats de simulation suivant sont obtenus à vide ensuite en charge avec

$C_r = 3 \text{ Nm}$ appliqué à l'instant $t=1,5 \text{ s}$ et pour une vitesse de référence

$$w_{ref} = 314 \text{ rad/sec}$$

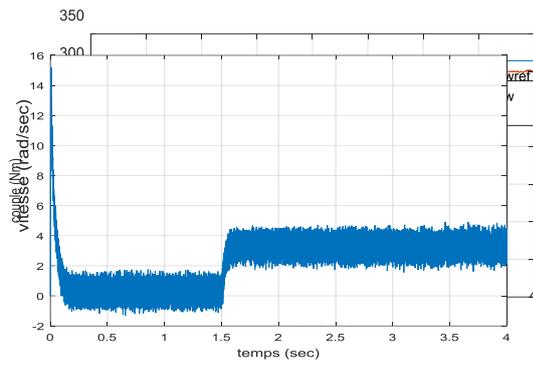
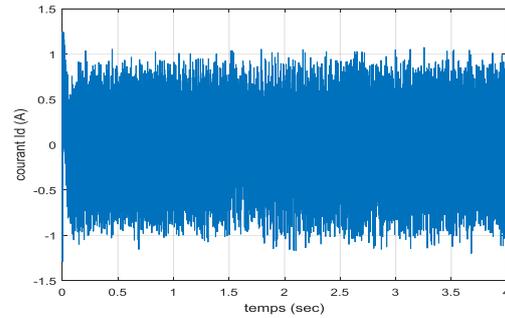
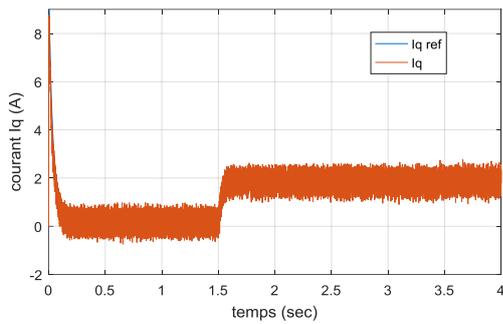


Figure IV.13 : Evolution des grandeurs de la machine MSAP à vide ensuite en charge



D’après Les résultats de simulation de la Figure(IV.13) on a que le contrôleur PI de la boucle de la vitesse compose les files de couple de charge a l’instant $t=1.5$ set ramener le moteur a la vitesse et la vitesse référence 314 rad/sec .Les contrôleurs PI des boucles de courant Id et Iq maintenu toujours les courant valeur impose mm a la présence d’un couple de charge en va aussi que C_{em} et Iq on a toujours proportionnelle comme l’imposant le principe de commande vectorielle .

IV. 5 simulations de la machine MCC

En appliquant la transformée de la place au modèle de la machine MCC (équation (III.10)), on trouve :

$$\begin{cases} W(s) = \frac{1}{Js + f} (K I_a(s) - C_r) \\ I_a(s) = \frac{1}{R_a + L_a s} (w_a(s) - K w(s)) \end{cases}$$

A partir de ces équations, On trouve le modèle de simulation suivant :

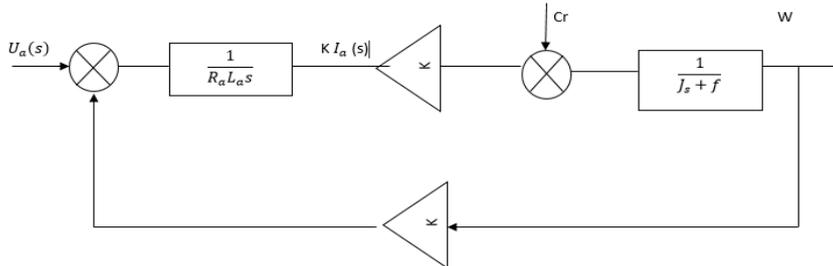


Figure IV.14 : Modèle de simulation de le MCC

Fonction de transfert de le MCC

$$G(p) = \frac{w(s)}{U_a(s)}$$

On suppose : $C_r = 0$

$$G(p) = \frac{W(s)}{U_a(s)} = \frac{K}{(Js+f)(R_a+L_a s)+K^2}$$

Par équivalence avec un système du 2^{eme} ordre donné par : $G'(p) = \frac{G_0}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2h}{\omega_n} s + 1}$

Gain statique : $G_0 = \frac{K}{(F R_a + K^2)}$

Coefficient d'amortissement : $h = \frac{1}{2} \frac{\tau R_a + F L_q}{\sqrt{\tau L_a (f R_a + k^2)}}$

Pulsation naturelle du système : $\omega_n = \sqrt{\frac{f R_a + k^2}{\tau L_q}}$

En utilisant les paramètres de le MCC donnés dans l'annexe, on trouve

IV.5.1 Simulation de la dynamique de la MCC en boucle ouverte

La dynamique de la machine MCC est simulée pour différents valeurs de tension d'induit $U_a = 110, 200, 260$ v et pour $C_r = 10$ Nm appliqué à $t = 25$ s

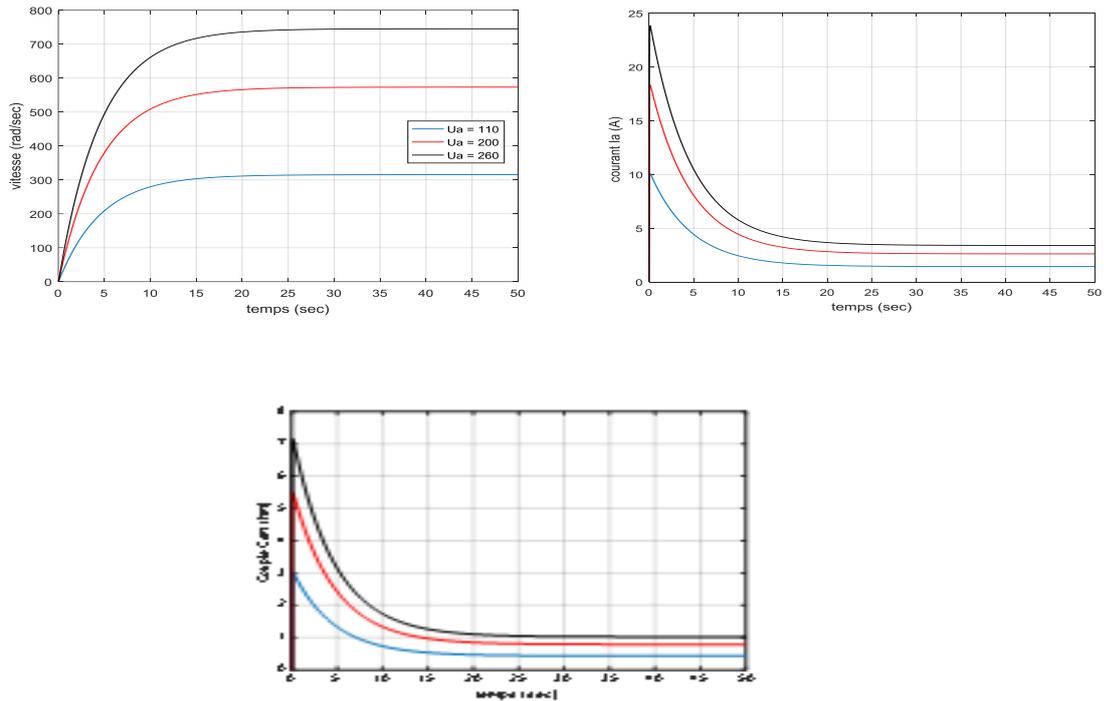


Figure IV.15 : Résultats de simulation de MCC en boucle ouverte

IV.5.2 Simulation de la dynamique un couple de charge de le MCC en boucle ferme

- Le moteur MCC est placé dans une boucle de régulation en série avec un contrôleur proportionnel et un couple de charge $C_r = 1\text{Nm}$ est appliqué à l’instante $t = 5\text{ s}$ pour une vitesse de référence $w_{\text{réf}} = 314\text{rad/sec}$

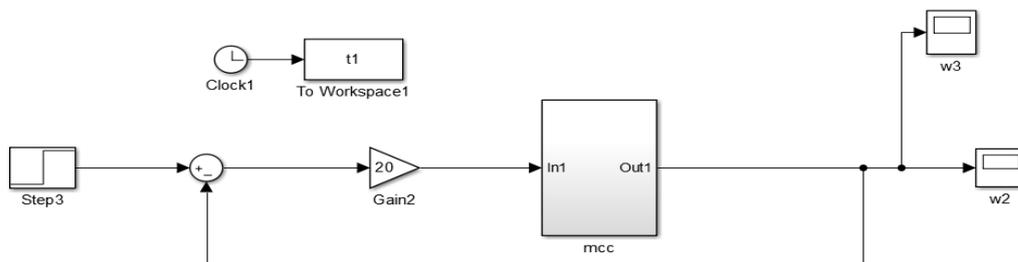


Figure IV.16 : schéma de régulation du MCC

- Les résultats de simulation obtenus pour différentes valeurs du contrôleur proportionnel sont donnés sur la figure (IV.16)

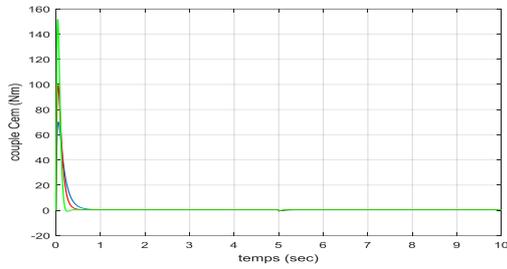
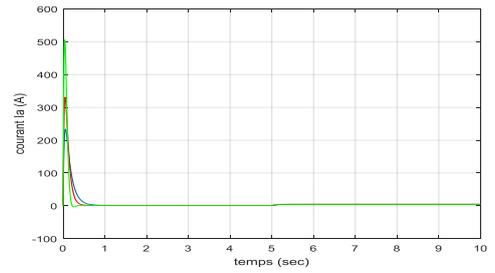
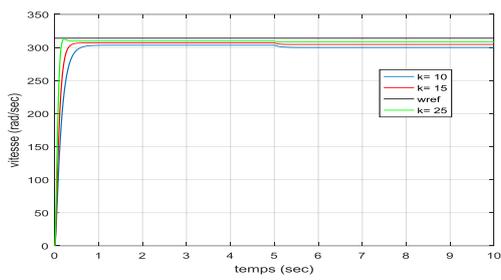


Figure IV.17 : résultats de simulation de MCC en boucle fermée

Interprétation de résultats

D'après la Figure (IV.17) on a remarqué que la vitesse est proportionnelle par conséquent la vitesse augmente et le courant, C_{em} augmente aussi lorsque la tension augmente.

L'utilisation de grandeur de la machine MCC pour plusieurs valeurs proportionnelles.

Chapitre IV commande vectorielle et Résultat de simulation

IV.6 conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de la commande vectorielle par orientation du champ appliquée à la MSAP. Cette stratégie, permet le découplage entre le couple électromagnétique et le flux de la machine ; ceci rend identique la machine synchrone à aimants permanents à la machine à courant continu et assure une commande souple de sa vitesse. Avec cette commande, nous avons pu obtenir un modèle découplé de la machine dont le réglage de la vitesse se fait par des régulateurs PI.

On a présenté les résultats de la simulation numérique, qui ont confirmé le bon comportement de la machine en termes de vitesse, couple électromagnétique et ont montré, aussi, qu'au moment de l'application de la charge, la réponse de la vitesse présente une bonne dynamique. Par conséquent, le modèle dont les paramètres utilisés à la simulation peut convenir et remplacer le moteur défaillant.

Conclusion générale

Notre travail, dans ce mémoire, a consisté à l'étude d'un centre d'usinage de la société Nationale des Véhicules Industriels (SNVI-RVI), sise à Rouïba.

En raison de l'arrêt prolongé de ce centre d'usinage et au regard de son importance dans la production des pièces au niveau de la SNVI (VIR) ; les responsables de cette entreprise nous ont proposé pour notre mémoire de fin d'études le thème : La comparaison de la motorisation par moteur à courant continu est la motorisation par servomoteur synchrone sur un tour à commande numérique.

C'est ainsi dans le premier chapitre, nous avons étudié cette machine pour comprendre son fonctionnement et l'origine de son arrêt. Donc, la problématique a consisté à rechercher et à proposer une solution afin de la rendre opérationnelle. Etant donné que la défaillance résulte du moteur électrique, nous avons consacré dans le deuxième chapitre une étude sur les moteurs électriques.

Après avoir présenté leurs fonctionnements, leurs avantages, inconvénients et en tenant compte de l'orientation des responsables de l'entreprise (SNVI) ; le choix est porté sur le remplacement les trois moteurs défaillants par des moteurs synchrone à aimant permanent ayant les mêmes caractéristiques (annexe).

Après ce choix, dans le troisième chapitre, une étude de comportement dynamique et statique de la machine synchrone à aimants permanents qui exige en général une bonne modélisation mathématique décrivant de façon adéquate son comportement. Cette étude est basée sur le modèle équivalent de Park en tenant compte des hypothèses simplificatrices. En réalité, nous ne pouvons pas utiliser le modèle de la machine sans l'associer au convertisseur statique qui alimente la machine. C'est pour cette raison que nous avons étudié l'onduleur à commandé MLI.

Quant au quatrième chapitre nous avons abordé l'étude de la stratégie de commande Vectorielle (FOC) par orientation du champ appliquée à la MSAP. Cette stratégie permet le découplage entre le couple électromagnétique et le flux de la machine ; ceci rend identique la machine synchrone à aimants permanents à une machine à courant continu et assure une commande souple de sa vitesse. Avec cette commande, nous avons pu obtenir un modèle découplé de la machine dont le réglage de la vitesse se fait par des régulateurs PI. Des résultats de simulation ont été obtenues en utilisant matlab/simulink et ont montré que ,le

Conclusion générale

comportement de la MSAP peut être assimilée à celui de la MCC lorsque la commande vectorielle est adoptée .

- [1] Source : www.snvi.dz
- [2] B.REMACLE : Usinage tournage fraisage. Édition septembre 2014
- [3] Jean-Pierre Cordebois et coll : Fabrication par usinage 2eme édition
- [4] TORNOS bechler TBM 26/32.
- [5] A.BOURBON et M.JOUBARD : Le codeur incrémental.
- [6] M.Koteich ; “Modélisation et observabilité des machines électriques en vue de la commande sans capteur mécanique”. Automatique / Robotique. Université Paris-Saclay, 2016. Français.
- [7] C.CHEVASSU ; Machine à courant continu (Cours et Problèmes).
- [8] B.Bapio ; Machines à courant continu Edition 2010.
- [9] T.schanen “Guide des automatismes”. GDA-DOC-008 version 7
- [10] T.WILDI ; électrotechnique 3eme EDITION.
- [11] <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-a-courant-continu/>
- [12] Y.MOREL ; “La machine à courant continu”.
- [13] A. Benbrahim, “Commande prédictive généralisée d’une machine synchrone à aimants permanents”, Thèse de Magister, Université de Batna, 2009.
- [14] K. Nabti, “Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone”, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [15] F. Benchabane, " Commande en position et en vitesse par mode de glissement d’un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering", Thèse de Magistère, Université de Biskra, 2005.
- [16] L. Litim, " Contrôle Direct du Couple d’une Machine Synchrone à Aimants Permanents sans Capteur Mécanique", Thèse de magistère, Université de Batna, 2008.
- [17] M.MERZOUG , "Etude comparative des performances d’un DTC et d’un FOC d’une machine synchrone à aimants permanents”, mémoire de magister, Université de Batna.
- [18] <https://www.fiches-auto.fr> > articles-auto > électrique
- [19] M. CARRIERE Sébastien, "Synthèse croisée de régulateurs et d'observateurs pour le contrôle robuste de la machine synchrone", Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, année 2010.
- [20] A. BOUDISSA , "Synthèse d'observateurs adaptatifs pour la commande sans capteur de la machine synchrone : application aux véhicules hybride", mémoire de master, Université de Poitiers, France, Année 2010.

Références

- [21] R. Abdessemed, "Modélisation et simulation des machines électriques", Presse de université de Batna, 2011.
- [22] N. Bounasla and K. E. Hemsas, "Second order sliding mode control of a permanent magnet synchronous motor", STA 14th International Conférence on Sciences and
- [23] N. BERNARD «Machine Synchrone : de la Boucle Ouverte à l'Autopilotage» ; Reue3EI, Septembre 2002, PP.24-39.
- [24] M.S.Mahgoun."Application de La Commande Aux Systèmes Linéaires Perturbés". Thèse de Magister 2012.
- [25] R. Abdessemed, "Modélisation et simulation des machines électriques", Presse de université de Batna, 2011.
- [26] F. BERNOTN, "Machines à courant continu : Constitution et fonctionnement". D3555 Techniques de l'Ingénieur.
- [27] ELFERD Hamza et ZEGAAR Mourad a, Mémoire présente pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, option : ingénierie des système électromécaniques, Thème : Fonctionnement en mode dégrade d'un onduleur multi niveaux application au filtre actif parallèle, université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016 /2017.
- [28] T. Toudja, "Commande non linéaire robuste D'un moteur synchrone à aimant permanent", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 09 Février 2008.
- [29] G. Grellet, G. Clerc, "Actionneur Electriques, Principes, Modèles, commande", Eyrolles, 1997.
- [30] KWAKERNAAK – SIVAN : Linear optimal control system, Wiley.
- [31] KAILATH : Linear systems, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
- [32] R. Lateb, "Modélisation Des Machines asynchrones Et synchrones a aimants permanents avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : Application à La Propulsion Marine Par POD ", Thèse de doctorat de L'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2006
- [33] F. Benchabane, " Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattring", Thèse de magistère, Université de Biskra, 2005.
- [34] N.S. Amirouche, "Contribution à la commande adaptative et neuronale d'une machine synchrone à aimants permanents", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.

Annexe

- Paramètres de la machine MCC utilisée en simulation

| | |
|---|--------------------------------|
| Tension l'induit | $U_a = 110 \text{ V}$ |
| Resistance l'induit | $R_a = 10.7 \Omega$ |
| l'inductancel'induit | $L_a = 0.245 \text{ H}$ |
| Tension d'inducteur | $U_e = 125 \text{ V}$ |
| Resistance d'inducteur | $R_e = 125 \Omega$ |
| L'inductanced'inducteur | $L_e = 250 \text{ H}$ |
| Inertie de masse tournantes | $J = 0.045 \text{ Kg.m}^2$ |
| Couple resistant | $C_r = 0.1 \text{ N.m}$ |
| Inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur | $M_{fd} = 0.6 \text{ H}$ |
| Coefficient de frottement | $F = 0.00137 \text{ N.ms/rad}$ |

- Paramètres de la machine MSAP utilisée en simulation

| | |
|---|-------------------------------|
| Tension l'induit | $U_a = 110 \text{ V}$ |
| Résistance statorique | $R_s = 4.23 \Omega$ |
| Inductance longitudinale | $L_d = 0.048 \text{ H}$ |
| Inductance transversal | $L_q = 0.064 \text{ H}$ |
| Moment d'inertie | $J = 0.0051 \text{ Kg.m}^2$ |
| Couple resistant | $C_r = 1.8 \text{ N.m}$ |
| Inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur | $M_{fd} = 0.6 \text{ H}$ |
| Coefficient de frottement | $F = 0.0028 \text{ N.ms/rad}$ |

