

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. Mira – BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique

Mémoire

Présente en vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option

Machines Electriques

Thème

***Etude des Machines Synchrones à
Bobinage Concentré***

Présenté par :

Mr.: AIT AMOKRANE Moussa
Mr.: SOUAMA Abdenour

Proposé et dirigé par :

Mr : Aouzellag Djamel

Mr : Elyazid Amirouche

Promotion 2021

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant qui nous a fourni l'aide et la confiance pour réaliser ce travail.

Nos remerciements à nos promoteurs Mr Aouzellag Djamel et Mr Amirouche Elyazid pour leur aide et leurs conseils avisés et leurs remarques qui nous ont permis de présenter notre travail dans sa meilleure forme.

Nous remercions également tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Nous remercions toute l'équipe mécanique de SONATRACH, et surtout Mr Aouzellag Rachid. Ainsi que l'équipe du hall de technologie et du bloc haute tension.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Moussa et Abdenour

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*À mes très chers parents, qui m'ont aidé durant mes études la profonde gratitude,
leurs consécration et leurs sacrifices.*

À mes frères Nacer eddine, Riad, et mes sœurs Hanane, Nabila.

À mon cousin Souhil, et tout mes amis qui m'ont aidé durant ce projet.

Mes dédicaces ne seront pas complètes sans cité ma chère femme SARAH.

MOUSSA

Je dédie ce modeste travail

*À mes très chers parents, qui m'ont aidé durant mes études la profonde gratitude,
leurs consécration et leurs sacrifices.*

À mes frères et sœurs,

Abdenour

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Classification des machines synchrones	3
I.3. Constitution des machines synchrones	4
I.3.a. Stator.....	4
I.3.b. Rotor.....	4
I.3.c. Organes mécaniques	5
I.4. Bobinage des machines synchrones.....	6
I.4.a. Bobinage croisé réparti.....	6
I.4.b. Bobinage croisé concentré.....	6
I.4.c. Bobinage concentré autour des dents (non-croisé).....	7
I.5. Fonctionnement des machines synchrones	9
I.5.a. Machine synchrone à rotor bobiné	10
I.5.b. Propriétés de la machine à rotor bobiné	11
I.6. Machines synchrones à aimants permanents	11
I.6.a. Classification des aimants permanents dans la MSAP.....	12
I.6.b. Aimants permanents	14
I.6.c. Caractéristiques générales des aimants permanents	15
I.6.d. Différents types d'aimants permanents	15
I.6.e. Domaines d'utilisation des MSAP	17
I.6.f. Avantages et inconvénients des MSAP.....	17
I.7. Conclusion	18
Chapitre II. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	19
II.1. Introduction.....	19

II.2. Hypothèses simplificatrices	19
II.3. Mise en équations de la machine synchrone dans le repère réel (abc)	19
II.3.a. Équations Électriques	20
II.3.b. Équations mécaniques.....	22
II.4. Transformation dans le repère (abc) vers le repère (dq0).....	23
II.4.a. Principe de transformation (dq0).....	23
II.4.b. Équation électrique dans le référentiel (dq0)	24
II.4.c. Équation mécanique dans le référentiel (dq0).....	25
II.5. Schéma fonctionnel de la MSAP	25
II.6. Conclusion	26
Chapitre III. Conception, identification et simulation de la machine synchrone à aimants permanents	27
III.1. Introduction	27
III.2. Conception du support.....	27
III.2.a. Support arrière.....	27
III.2.b. Support avant	28
III.2.c. Axe de la machine	28
III.2.d. Plan assemblage.....	29
III.3. Description de notre machine.....	29
III.3.a. Rotor.....	29
III.3.b. Stator.....	30
III.4. Identification des paramètres de la MSAP	30
III.4.a. Mesure des résistances de l'enroulement statorique	31
III.4.b. Détermination du nombre de paires de pôles et du flux des AP.....	33
III.4.c. Détermination des différentes inductances de la MSAP.....	35
III.5. Bobinage de la machine.....	38
III.6. Essais en charges de la MSAP.....	39

III.6.a. Charge résistive.....	39
III.6.b. Charge inductive.....	41
III.7. Simulation de la MSAP sous l'environnement MATLAB/Simulink.....	42
III.7.a. Essai à vide.....	43
III.7.b. Essai en charge résistive	44
III.7.c. Essai en charge inductive	44
III.8. Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	48

Nomenclature

MS: Machine Synchrone

MCC : Moteur à courant continu

MSAP: Machine Synchrone à Aimants Permanents

MSRB: Machine Synchrone à Rotor Bobiné

FEM : Force Electromotrice

AP : aimants permanents

NdFeB : Néodyme Fer Bore

Sm_xCo_y : Samarium Cobalt

P : nombre de paires de pôles

(a b c) : Axe liés aux enroulements triphasés

(dq0) : Axe de référentiel de Park

v_a v_b v_c : Tensions statoriques de phase (abc) [V]

i_a i_b i_c : Courants statoriques de phase (abc) [A]

Ψ_{abc} : Flux de phase (abc) [Wb]

v_{dq0} : Tensions dans le référentiel (dq0) [V]

Ψ_{dq0} : Flux dans le référentiel (dq0) [Wb]

i_{dq0} : Courants dans le référentiel (dq0) [A]

L_d , L_q et L₀ : Les inductances dans le référentiel (dq0) [H]

Ψ_{APdq0} : Flux dans le référentiel (dq0) [Wb]

r : Résistance du stator [Ω]

L_s : Inductance du stator [H]

L_{sf} : Inductance de fuite du stator [H]

m : Inductance magnétisante du stator [H]

L_aL_bL_c : Inductances des bobinages statoriques de phase (abc) [H]

M_{ab}M_{bc}M_{ac} : Mutuelles entre les bobinages statoriques de phase (abc) [H]

C_{em} : Couple électromagnétique [N.m]

J : Inertie totale des parties tournantes [$A \cdot m^{-2}$]

C_r : Couple résistant [N.m]

f : Coefficient de frottement visqueux

$[T(\theta)]$ et $[T(\theta)]^{-1}$: Matrices de passage directe et inverse

Φ_{APabc} : Flux engendré par les aimants de phase a,b,c [Wb]

B_e : Induction dans l'entrefer [T]

H_e : Champ magnétique dans l'entrefer [A/m]

B_r : Induction rémanente [T]

H_{cb} : Champ coercitif [A/m]

H_{cj} : Champ coercitif de polarisation [A/m]

$(B \cdot H)_{max}$: Valeur énergétique de l'aimant par unité de volume

μ : Perméabilité magnétique du matériau [$H \cdot m^{-1}$]

μ_0 : Perméabilité magnétique de vide [$H \cdot m^{-1}$] $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$

f : Fréquence [Hz]

Ω : Vitesse de rotation

N : Vitesse nominale

θ : Position électrique du rotor

ω : Pulsation électrique

E : Amplitude de la tension à vide

V_{eff} : Tension efficace

I_{eff} : Courant efficace

$e(\%)$: Erreur relative

Liste des figures

Figure I-1 Classement des machines synchrones	3
Figure I-2 Différents stators des machines synchrones	4
Figure I-3 Différents rotors des machines synchrones	5
Figure I-4 (a) Roulements ;(b) Arbre d'induit ;(c) Roulement monté dans la machine	5
Figure I-5 Bobinage croisé réparti	6
Figure I-6 Exemple d'un bobinage croisé concentré	7
Figure I-7 Exemples d'un bobinage concentré autour des dents (non-croisé)	8
Figure I-8 Configurations principales du bobinage concentré au tour des dents	9
Figure I-9 Rotor à pôles lisses	10
Figure I-10 Rotor à pôles saillants	11
Figure I-11 Aimants en surface	12
Figure I-12 Aimants insérés	13
Figure I-13 Aimants enterrés	13
Figure I-14 Aimants à concentration de flux	14
Figure I-15 Cycle d'hystérésis	14
Figure I-16 Courbe de désaimantation	15
Figure I-17 Courbes de désaimantation des AP	16
Figure II-1 Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère (abc)	20
Figure II-2 Différents couples qui agissent sur le rotor	22
Figure II-3 Représentation de la transformation	23
Figure II-4 Schéma bloc d'une MSAP	26
Figure III-1 Support et palier arrière de la machine	28
Figure III-2 Support avant	28
Figure III-3 Axe de la machine	29
Figure III-4 Plan d'assemblage	29
Figure III-5 Rotor	30
Figure III-6 Stator	30
Figure III-7 Quelques appareils de mesure utilisée	31
Figure III-8 Résultat d'essai sur l'oscilloscope (GW istek GDS-3354)	31
Figure III-9 Montage aval	32
Figure III-10 Tension à vide en fonction de la vitesse de rotation	34
Figure III-11 : Schéma pour déterminer l'inductance mutuelle	35

Figure III-12 Branchement des bobines de trois dents de la phase as	38
Figure III-14 Schéma de montage (charge résistive).....	39
Figure III-13: Bobinage complet de la MSAP.....	40
Figure III-15 Courbe de la tension en fonction du courant cas des charges résistives.....	41
Figure III-16 Schéma de montage (charge inductive).....	41
Figure III-17 : Courbes des deux essais des tensions en fonction des courants de charge.....	42
Figure III-18 : Schéma bloc pour l'essai à vide.....	43
Figure III-19 Allures des tensions à vide.....	43
Figure III-20 Courbe des tensions statoriques en fonction des courants cas de charge résistive	44
Figure III-21 : Schéma bloc pour l'essai Inductive	44
Figure III-22 Courbes des deux essais des tensions en fonction des courants de charge.....	45
Figure III-23 Courbes des deux essais des erreurs en fonction des courants de charge.....	46

Liste des tableaux

Tableau III.1 Valeurs mesurées des tensions et des courants et calculées des résistances	32
Tableau III.2 Valeurs mesurées et calculées par l'essai à vide	33
Tableau III.3 Valeurs mesurées de la FEM et de la vitesse et calculées du flux	34
Tableau III.4 Mesures des tensions et des courants pour les trois phases	35
Tableau III.5 Valeurs des inductances mutuelles	37
Tableau III.6 Valeurs des inductances (L_a , L_b , L_c) en Henry	38
Tableau III.7 Mesures par l'essai en charge résistive.....	41
Tableau III.8 Mesures par l'essai en charge inductive	42
Tableau III.9 Résultats obtenus V_{eff} et I_{eff}	44
Tableau III.10 Résultats obtenus 'essai pour une charge inductive'	45
Tableau III.11 Erreurs dans les essais (inductive et résistive).....	46

Introduction générale

Depuis toujours les Hommes n'ont cessé d'innover, de développer et d'améliorer leurs outils afin de remédier aux exigences du quotidien et d'améliorer leurs conditions de vie [1].

Et avec l'avènement de la révolution industrielle, les machines ont joué un rôle pas des moindres dans ce domaine. D'ailleurs de nos jours, on ne peut concevoir une économie développée sans impliquer des industries mettant en œuvres des machines robustes et fiables.

La plus ancienne des machines électriques industrielles - la machine à courant continu - était très utilisée (particulièrement comme actionneur), ceci du fait que son fonctionnement est d'une grande simplicité, de même que sa modélisation, mais surtout ses bonnes performances statiques et dynamiques. Cependant, la fragilité du système balai collecteur a toujours été son principal inconvénient, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions. C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des machines électriques à courant alternatif afin d'écarter cet inconvénient.

La machine à courant alternatif la plus utilisée dans l'industrie pour les applications du type servomoteur (robotique, machines-outils, etc.) est la machine synchrone à aimants permanents. Elle présente un couple massique important et un bon rendement par rapport aux autres types de machines. Son mode de contrôle est simple car le repère de commande est directement lié au rotor.

Dans ce contexte, ce mémoire vise à étudier une machine synchrone à aimants permanents. Une machine réelle est étudiée, puis une méthodologie d'identification des paramètres est appliquée sur la machine. Les données pratiques ainsi recueillies sont comparées à un modèle mathématique simulé en utilisant l'environnement Matlab/Simulink. Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les machines synchrones en général, et sur les machines synchrones à aimants permanents en particulier, leur constitution et leur principe de fonctionnement et leurs domaines d'applications. Cet aperçu s'étalera aussi sur les aimants permanents utilisés. Une partie du chapitre sera consacrée aux différents types de bobinage utilisés dans les machines électriques à courant alternatif.

Dans le deuxième chapitre, on présentera un modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère réel (abc). La transformation de Park

INTRODUCTION GENERALE

permettra d'obtenir le modèle d'état dans le repère virtuel ($dq0$). Cette étape est primordiale pour une meilleure compréhension de la machine.

Dans le troisième chapitre, l'histoire de la machine étudiée sera présentée et la conception de ses pièces manquantes sera aussi expliquée. Par la suite, une démonstration des méthodes utilisées pour l'identification de ses paramètres sera développée, à savoir, du flux, du nombre de paires de pôles, ainsi que les différentes inductances et la résistance du stator. Finalement, une étude comparative entre les résultats obtenus avec les essais pratiques et ceux de la simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink sera effectuée.

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

I.1. Introduction

La machine synchrone (MS) est un système électrique permettant de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique « génératrice » et inversement « moteur ». Elle est surtout connue pour ses applications en alternateur, mais elle sert également en moteur dans un certain nombre de domaines. Depuis longtemps, les moteurs synchrones sont utilisés dans des applications de forte puissance à vitesse fixe, mais les progrès dans les domaines de l'informatique, de la commande et de l'électronique de puissance leur permettent actuellement d'être présents en vitesse variable. L'arrivée d'aimants performants (à terre rare) a permis de développer les actionneurs synchrones de différentes gammes de puissance avec des couples ou puissances massiques importants, qui associés à l'électronique, ont des qualités analogues à celles des moteurs à courant continu, sans en avoir les inconvénients [4].

Dans ce chapitre, nous présenterons un bref aperçu sur les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ainsi que leur constitution. Cet aperçu s'étale sur les différents types de rotor et les matériaux pour aimants permanents (AP), structures des MSAP et leurs domaines d'applications et les différents types de bobinages.

I.2. Classification des machines synchrones

Les MS peuvent être classées selon la nature de leur excitation (bobinage ou AP) et par leur rapport de saillance : $\xi = L_q / L_d$. Leur classement est indiqué dans la figure I.1, sachant que L_d et L_q sont les inductances sur les axes directe et en quadrature, respectivement [5].

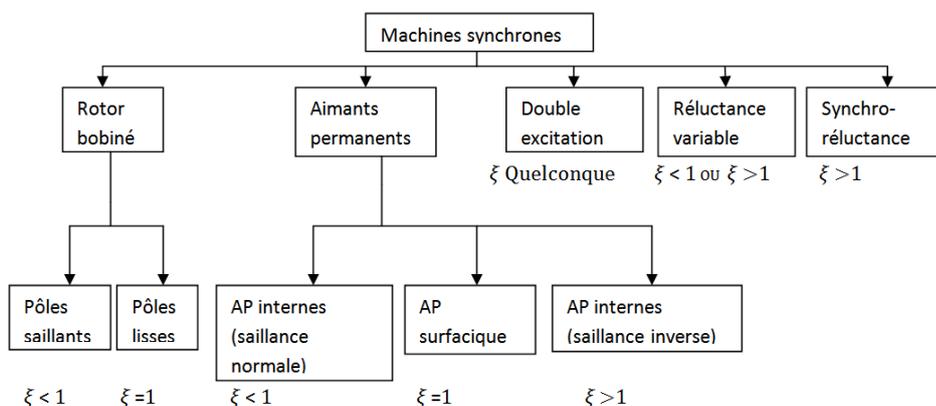


Figure I-1 Classement des machines synchrones

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

I.3. Constitution des machines synchrones

Pratiquement toutes les machines électriques tournantes qui transforment l'une en l'autre les énergies mécanique et électrique sont des machines tournantes qui comportent toujours un organe fixe dénommé stator et un organe mobile dénommé rotor. Ces deux organes sont séparés par un entrefer.

I.3.a. Stator

C'est une partie fixe, appelée induit, où se trouvent les enroulements liés à la source. Il est semblable au stator de toutes les machines électriques triphasées. Il est constitué de plusieurs bobines réparties dans les encoches statoriques. On distingue, deux catégories de bobinage couramment utilisées, le bobinage distribué et le bobinage concentré, la figure I.2 ci-dessus représente deux stators avec différents bobinages.



a)

b)

Figure I-2 Différents stators des machines synchrones:
a) - bobinage distribué; b) - bobinage concentré

I.3.b. Rotor

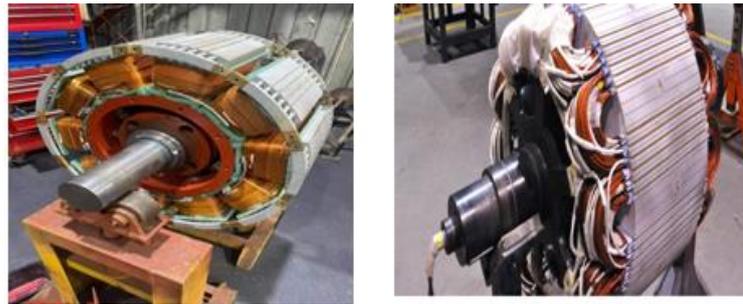
Les différents types des moteurs électriques asynchrones ou synchrones ne se distinguent que par le rotor, c'est la partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique. Il est constitué soit d'aimants permanents, d'un électroaimant ou de double excitation (excitation hybride).

Le rotor de ces machines peut être à pôles lisses ou à pôles saillants. Une machine, à pôles lisses, a un entrefer considéré comme constant alors qu'une machine à pôles saillants possède un entrefer variable.

On retrouve des machines synchrones à pôles lisses dans les applications où la vitesse de rotation est élevée et les machines à pôles saillants interviennent sur des applications à basse vitesse de rotation avec des puissances plus importantes [6].

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

La figure I.3 illustre des rotors de deux MS à pôles saillants et à pôles lisses.



a) à pôles saillants

b) à pôles lisses

Figure I-3 Différents rotors des machines synchrones

I.3.c. Organes mécaniques

A. Arbre

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Voir la figure I.4. Il est généralement réalisé en acier moulé ou forgé. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre [7].

B. Roulements

Les roulements représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine (arbre), voir la figure I.4. Ils permettent d'assurer une bonne rotation du rotor.

En général, ils sont composés d'une bague interne, d'une bague externe, d'un organe de roulement (constitué le plus souvent de billes maintenues dans une cage ou de rouleaux) ainsi que d'un dispositif de lubrification [8].

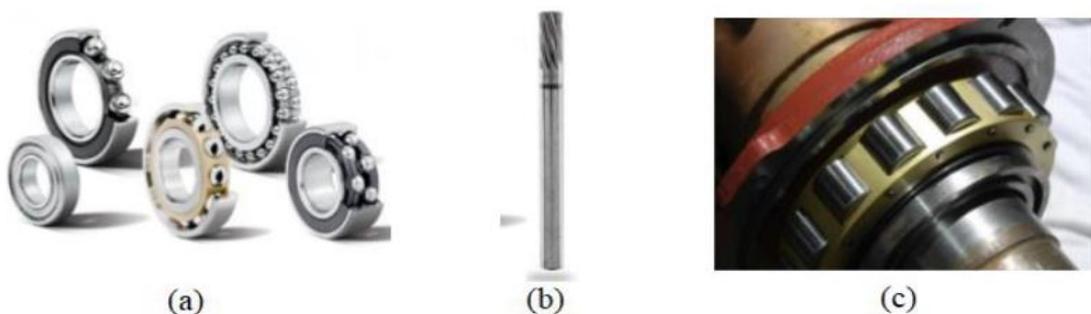


Figure I-4 (a) Roulements ;(b) Arbre d'induit ;(c) Roulement monté dans la machine

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

I.4. Bobinage des machines synchrones

Une catégorie statorique est basée essentiellement sur le type du bobinage inséré dans les encoches du stator. Dans la suite, les configurations connues du bobinage des machines électriques sont illustrées et comparées [9].

I.4.a. Bobinage croisé réparti

Pendant longtemps les bobinages polyphasés répartis (habituellement 3 phases) ont été largement utilisés dans l'industrie pour les machines électriques conventionnelles. Le mot réparti signifie le fait que chaque pôle statorique (c'est-à-dire l'ensemble de bobines dédiées à capter le flux d'un pôle rotorique) est réparti entre plusieurs encoches (supérieures à 2). Cette répartition bien connue dans le domaine industriel, permet de réduire les effets parasites dans la machine comme le bruit, les pertes, et l'ondulation de couple et de tension. Dans la figure I.5, on trouve l'illustration graphique d'un bobinage 3-phases croisé réparti, où le pôle statorique est réparti sur 4 encoches. Une photo d'un stator bobiné est également montrée comme exemple dans cette figure.

En général, le bobinage réparti comprend des bobines où chacune est installée dans deux encoches non-adjacentes, afin de couvrir un pôle rotorique entier. Ce fait impose le croisement entre les différentes bobines donnant le nom bobinage croisé à ce type du bobinage.



Figure I-5 Bobinage croisé réparti

I.4.b. Bobinage croisé concentré

Le bobinage croisé peut être également concentré (non-réparti), lorsque les bobines qui appartiennent au pôle statorique sont installées uniquement entre deux encoches non-adjacentes.

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

Grâce à son facteur de bobinage plus élevé, ce type de bobinage permet d'obtenir des machines plus compactes avec plus de couple volumique que dans le cas du bobinage réparti. Pourtant, il y a plus d'effets nocifs qui accompagnent les machines fournies avec un tel bobinage concentré. La figure I.6 représente le bobinage croisé concentré.

Cependant, le fait que chaque bobine dans la configuration du bobinage conventionnel croisé soit installée entre deux encoches non-adjacentes, conduit à deux inconvénients principaux [10]:

- Les têtes des bobines inutiles (sauf pour reboucler le circuit), sont longues, prenant plus d'espace et ajoutant plus de pertes à effet Joule, ce qui réduit le couple et l'efficacité volumique de la machine ;
- La procédure complexe de fabrication, d'entretien, et de recyclage, car le croisement des bobines reste toujours une contrainte majeure pour de telles procédures.



Figure I-6 Exemple d'un bobinage croisé concentré

I.4.c. Bobinage concentré autour des dents (non-croisé)

Dans le bobinage concentré autour des dents, toutes les bobines sont installées entre deux encoches adjacentes, ce qui mène vers une structure simple sans croisement.

Grâce aux nombreux avantages offerts par ce type de bobinage, il a fait l'objet de beaucoup d'intérêt au cours des dernières années.

Un des avantages les plus remarquables dans le bobinage concentré autour des dents est le fait que les têtes des bobines sont courtes, comme le montrent les exemples dans la figure I.7. Cette propriété permet aux machines fournies avec tel bobinage d'obtenir [10,11]:

- Un couple volumique plus élevé, grâce à la structure plus compacte ;

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

- Un coût de fabrication moins élevé, dû à la suppression d'une quantité inutile de cuivre et une aptitude à la réparation et au recyclage plus élevée.

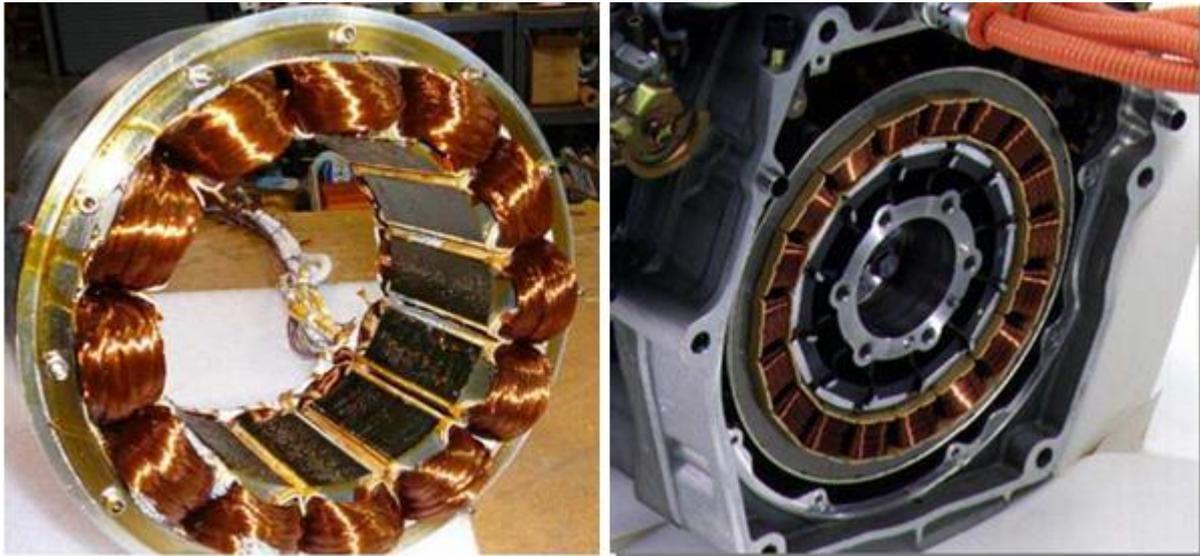


Figure I-7 Exemples d'un bobinage concentré autour des dents (non-croisé)

Alors, le bobinage concentré autour des dents peut largement réduire la complexité de fabrication. Cela diminue le coût et permet de réparer et entretenir facilement les machines électriques, ce qui est d'une grande importance dans le domaine automobile [11]

Bien entendu, le bobinage concentré autour des dents peut aussi générer des contraintes de réalisation comme la nécessité pour le bobinage de supporter des rayons de courbure élevé sans dégradation des isolants lors de la fabrication [12].

Enfin, deux configurations principales se trouvent pour les structures avec bobinage concentré autour des dents:

- Bobinage à simple couche : lorsqu'une seule bobine se trouve dans une encoche, ou autrement dit lorsque les dents sont bobinées en alternance (une dent sur deux), comme on peut le constater dans la figure I.8 (a);
- Bobinage à double couche : lorsque deux bobines différentes se trouvent dans une même encoche. Dans ce cas, toutes les dents sont bobinées comme le montre la figure I.8 (b).

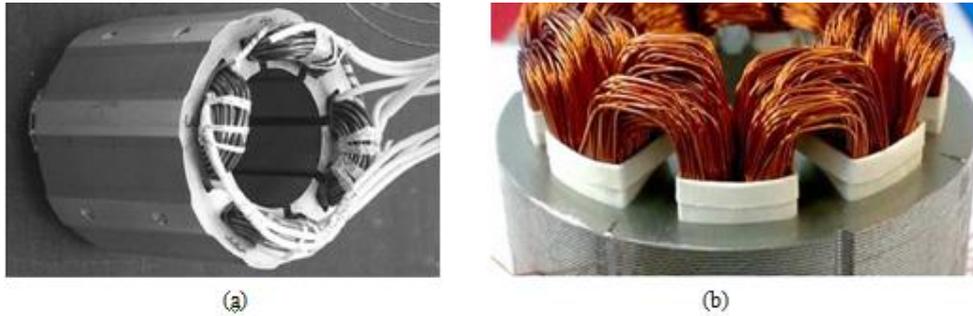


Figure I-8 Configurations principales du bobinage concentré au tour des dents :
(a) Bobinage à simple couche, (b) Bobinage à double couche

I.5. Fonctionnement des machines synchrones

Historiquement, ces machines étaient essentiellement utilisées en génératrice, mais le développement de l'électronique de puissance rend maintenant possible le fonctionnement en moteur. On pourra toujours distinguer un organe destiné à créer le flux magnétique et que l'on désignera pour cette raison sous le nom "Inducteur" et un organe portant les conducteurs qui sont le siège de forces électromotrices sous l'effet des phénomènes d'induction et que l'on désigne par le nom "Induit".

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

Le rotor, composé de $2p$ pôles magnétiques, va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que le champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc $:\Omega = \omega/p$; avec $\omega = 2\pi f$.

Le synchronisme des champs magnétiques induit et inducteur impose une procédure spécifique de démarrage.

- En mode moteur : Un moteur synchrone ne peut démarrer directement à pleine tension depuis le réseau de fréquence $f=50\text{Hz}$ (Car le rotor a une vitesse nulle au démarrage $\Omega \neq \omega$). Pour une alimentation directe en 50 Hz, il faudrait donc au préalable amener le moteur à la vitesse nominale par un moteur auxiliaire puis connecter l'alimentation ou bien avec d'autres modes de démarrage à savoir en mode autopilotage ou bien en mode asynchrone (la MS doit avoir l'enroulement amortisseur).
- En mode alternateur (pour les machines à rotor bobiné essentiellement) : Avant de connecter la machine synchrone au réseau, il faut lancer le rotor à la vitesse

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

de synchronisme par un moteur annexe, puis en modulant le courant d'induction, amener la tension, créée par l'alternateur à la même valeur que la tension et la fréquence du réseau, le même ordre des phase et un déphasage proche de zéro [13].

I.5.a. Machine synchrone à rotor bobiné

Dans le cas des machines à rotors bobiné, le rotor supporte un bobinage monophasé alimenté par un courant continu tandis que le stator est équipé d'un bobinage polyphasé à courant alternatif.

L'obtention d'un couple de valeur moyenne non nulle, passe alors par la vérification de condition de synchronisme qui impose une égalité stricte entre la vitesse du champ tournant statorique et la vitesse du champ tournant rotorique [14].

A. *Machine synchrone à rotor bobiné à pôles lisses*

Plutôt adaptées pour des applications de forte puissance et grande vitesse, le bobinage est dans ce cas logé dans des encoches pratiquées dans la masse du rotor et fermées par des clavettes en acier amagnétique, comme montré sur la figure I.9.

Les têtes de bobines inductrices sont maintenues en place par des frettes en acier amagnétique, l'entrefer étant d'épaisseur constante. Seule la répartition des encoches et leur remplissage constitue un paramètre structurel jouant sur la forme d'onde des FEM attendues.

Une disposition appropriée permet d'obtenir des tensions sinusoïdales à très faible taux d'harmonique [15,16].



Figure I-9 Rotor à pôles lisses

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

B. Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants

Pour les MS à pôles saillants, les bobines inductrices sont montées autour de noyaux polaire massifs ou feuilletés, voir la figure I.10.

Pour ces machines, le rotor est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Elles sont utilisées pour des applications qui nécessitent une simplicité de constitution [17].



Figure I-10 Rotor à pôles saillants

I.5.b. Propriétés de la machine à rotor bobiné

Parmi les avantages des MS à rotor bobiné, on constate un bon rendement; très supérieur à celui de tous les autres types des machines asynchrones. Avec une vitesse rigoureusement constante. En plus de son fonctionnement en moteur avec un bon facteur de puissance ou en compensateur pour fournir ou consommer de l'énergie réactive.

Malheureusement, cette machine a besoin d'une source à courant continu pour assurer l'excitation, et elle peut démarrer qu'à des faibles charges. Et dans le cas d'une surcharge brusque ou d'une chute de tension importantes du réseau la MSRB peut décrocher [14].

I.6. Machines synchrones à aimants permanents

Les progrès réalisés dans le domaine des matériaux à AP à haute énergie, à savoir les Néodyme Fer Bore (NdFeB) et les Samarium Cobalt (Sm_xCo_y), et les avancées technologiques réalisées dans le domaine de l'électronique de puissance ont permis aux MSAP de connaître durant ces dernières décennies un essor important [15].

Tout d'abord, les MSAP ont commencées à se répandre comme actionneurs dans les industries automatisées en remplacement des moteurs à courant continu. Ensuite, les MSAP

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

ont commencées à être utilisées dans les applications de plus forte puissance comme la traction électrique, la propulsion marine et la génération d'électricité à savoir les énergies éolienne et hydrolienne [15].

I.6.a. Classification des aimants permanents dans la MSAP

On constate que la construction de la MSAP a le même stator que la machine à rotor bobiné mais on a plusieurs configurations du rotor. Leur classification globale en termes de placement des aimants permanents (AP) est la suivante [18]:

- **Aimants en surface**

Pour ces types de machines, les AP sont placés sur la surface du rotor, ils sont aimantés radialement, comme montré sur la figure I.11.

Cette configuration du rotor est la plus utilisée, le principal avantage de ce type est sa simplicité, donc faible coût de fabrication par rapport à d'autres machines à AP.

Les réactances synchrones de l'axe d et l'axe q sont pratiquement les mêmes.

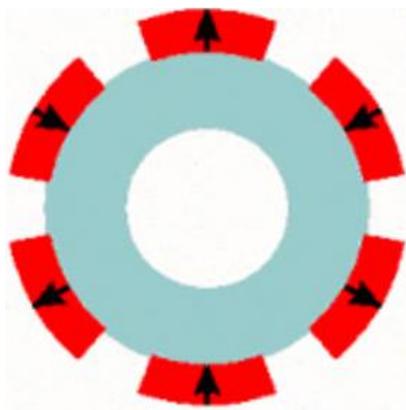


Figure I-11 Aimants en surface

- **Aimants insérés**

Comme des machines avec AP en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor.

Toutefois, les ouvertures entre les AP sont remplies avec le fer, comme montré sur la figure I.12. Le fer entre les AP crée une saillance inverse et donne un couple réactant en plus du couple des AP. La réactance synchrone de l'axe q est légèrement supérieure à celle dans l'axe d.

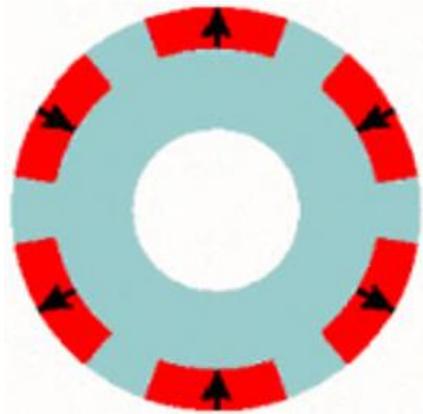


Figure I-12 Aimants insérés

- **Aimants enterrés**

Les MSAP enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor et aimantés radialement, voir la figure I.13, du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe d est plus petite que celle de l'axe q. Les AP de cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges.

Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses.

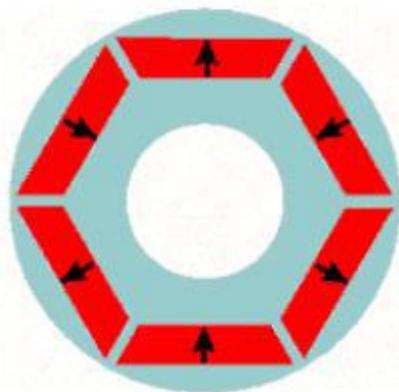


Figure I-13 Aimants enterrés

- **Aimants à concentration de flux**

Une autre façon de placer les AP dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor tel que montré par la figure I.14.

Ici, les AP sont aimantés dans le sens de la circonférence. Les pôles magnétiques se forment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des AP.

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux générés par les AP dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les MSAP intérieurs, les AP de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques.

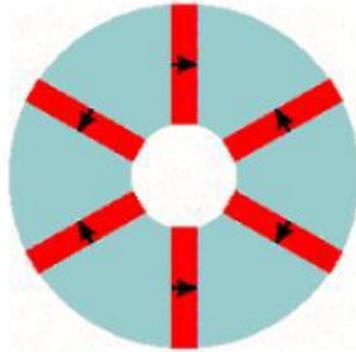


Figure I-14 Aimants à concentration de flux

I.6.b. Aimants permanents

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (figure I.15) et forment deux grandes familles.

La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants permanents » car leur aimantation ne varie que très peu pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur [19].

La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe.

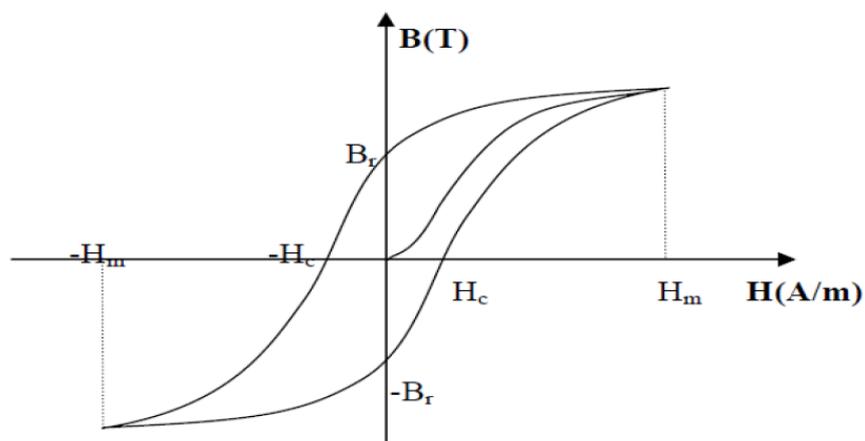


Figure I-15 Cycle d'hystérésis

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

I.6.c. Caractéristiques générales des aimants permanents

L'état de fonctionnement d'un aimant se situe dans le deuxième quadrant de son cycle d'hystérésis, voir la figure I.16.

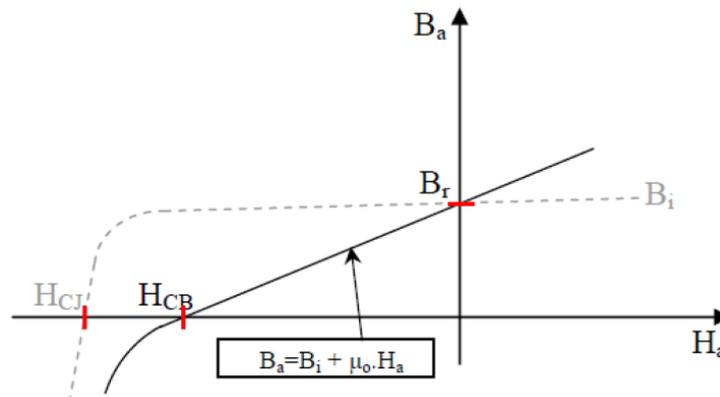


Figure I-16 Courbe de désaimantation

Les AP sont caractérisés par plusieurs paramètres qui sont déterminants pour les applications industrielles. Ces paramètres sont [19]:

- L'induction résiduelle (ou rémanente) B_r , qui indique la puissance potentielle de l'aimant et détermine la section normale nécessaire au passage de flux utile pour le maintien du flux d'entrefer ;
- le champ coercitif, (H_{cb}), représentant le champ démagnétisant capable d'annuler l'induction résiduelle et, dont la valeur est d'autant plus élevée que l'aimant est plus stable ;
- le champ coercitif de polarisation (H_{cj}), qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau. La démagnétisation est totale et irréversible ;
- le produit d'énergie $(B \cdot H)_{max}$: Valeur énergétique de l'aimant par unité de volume.

En plus des propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître les propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix ainsi que le point de Curie (température au-delà de laquelle l'aimant perd ses propriétés magnétiques).

I.6.d. Différents types d'aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses.

Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types [19] :

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

- Les Alnico: aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel-Cobalt. Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de par leur composition métallique, ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés ;
- Les Ferrites: aimants permanents, formés de matériaux de la famille des céramiques et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques. Ils sont caractérisés par une faible induction rémanente mais ont un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie ;
- Les alliages métaux – terres rares: ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des MS. La version la plus courante est l'alliage samarium-cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor. Ce qui permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé.

La figure I.17 donne les courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.

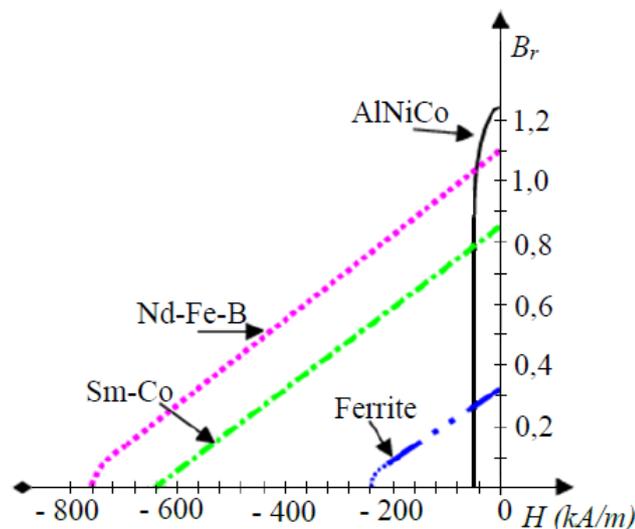


Figure I-17 Courbes de désaimantation des AP

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

I.6.e. Domaines d'utilisation des MSAP

C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- Les équipements domestiques (machine à laver) ;
- Les équipements de technologie de l'information (DVD drives) ;
- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements ;
- Voiture électrique (Toyota Prius) ;
- Les servomoteurs ;
- Les applications robotiques ;
- La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins ;
- Les applications de l'énergie éolienne.

I.6.f. Avantages et inconvénients des MSAP

A. *Avantages*

Les MSAP présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines [20,21]:

- Une inertie (ou poids) plus faible qu'avec un rotor bobiné. On a alors une puissance massique plus importante que les autres moteurs électriques. Cela peut être intéressant lorsque le problème d'encombrement ou de poids est important (par exemple, la Toyota Prius est équipée d'un moteur synchrone à AP) ou lorsqu'on a besoin d'une dynamique importante (servomoteur en robotique) [20];
- Un rendement amélioré grâce à l'absence de consommation dans le rotor ;
- Un entretien réduit dû à l'absence du système bagues/balais ou collecteur/balais.

B. *Inconvénients*

- Cout plus élevé des aimants ;
- Induction non réglable (difficulté de réglage à forte vitesse sans des pertes plus importantes) ;
- Risque de démagnétisation des aimants en cas d'une charge inductive et d'un court circuit;
- La commande relativement complexe de ces moteurs qui était autrefois un frein, ne pose plus actuellement de problème grâce à l'augmentation des performances de l'électronique et de l'informatique.

Chapitre I. Généralités sur les machines synchrones

I.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter un bref aperçu sur les machines synchrones en général et sur les MSAP en particulier. Cet aperçu s'étale sur les matériaux et les différentes structures des aimants sur le rotor et les différents types de bobinages, et enfin ses avantages et ses inconvénients ainsi que ses domaines d'applications.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.

Chapitre II. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Chapitre II. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

II.1. Introduction

L'étude du comportement d'une machine électrique est une tâche difficile et nécessite avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés [22,23].

Parmi les machines à courant alternatif utilisées, la machine synchrone à aimants permanents reste un bon candidat pour l'utilisation industrielle. Son choix devient attractif et concurrent par rapport à celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents. La machine qu'on a étudiée, c'est une machine synchrone triphasée multipolaire (nombre de paires de pôle est élevé).

Dans ce chapitre, on présentera la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. On définira les équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la MSAP tout en spécifiant le modèle à utiliser pour modéliser notre système d'équations. Cependant, on exploitera la transformation de Concordia, suivie de la matrice de rotation de Park.

II.2. Hypothèses simplificatrices

Avant de développer le modèle mathématique, nous nous imposons quelques hypothèses simplificatrices. Cela permet une étude et une exploitation plus aisée. Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus simple sera le modèle mais on s'éloigne plus de la réalité. Ces hypothèses sont exploitées dans la majorité des références, [24,25] :

- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligées ;
- Les couplages capacitifs entre les enroulements ainsi que l'effet de peau sont négligés ;
- Le circuit magnétique n'est pas saturé ;
- Le système de tension est équilibré ;
- La distribution des forces électromotrice, le long de l'entrefer, est supposée sinusoïdale ;
- L'effet de la température sur les résistances est négligé.

II.3. Mise en équations de la machine synchrone dans le repère réel (abc)

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et ces courants, nous considérons le modèle de la machine synchrone idéal [26].

Chapitre II. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La figure II.1 donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents :

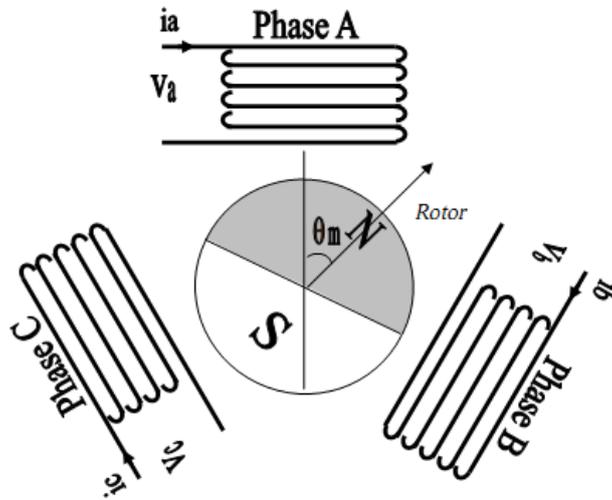


Figure II-1 Schéma équivalent d'une MSAP dans le repère (abc)

À partir de la figure II.1, nous écrivons les équations statoriques de la machine synchrone, en notation matricielle.

II.3.a. Équations Électriques

L'équation triphasée de la tension dans le référentiel fixe (abc), s'écrit comme suit :

$$v_{abc} = r i_{abc} + \frac{d\varphi_{abc}}{dt} \quad (\text{II.1})$$

On définit les vecteurs de la tension, du courant et du flux dans le repère (abc) comme suit :

$$v_{abc} = [v_a \ v_b \ v_c]^t$$

$$i_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^t$$

$$\varphi_{abc} = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$$

Les résistances de la machine s'écrivent sous forme matricielle comme suit : $r = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$

Avec r_s : Résistance d'une phase statorique.

L'équation triphasée du flux de l'entrefer de la machine dans le référentiel fixe (abc), s'écrit comme suit :

$$\varphi_{abc} = \varphi_{APabc} + L_s(\theta) i_{abc} \quad (\text{II.2})$$

Où

Chapitre II. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

φ_{APabc} : est le vecteur flux engendré par les aimants définis par :

$$\varphi_{APabc} = \Psi_{AP} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Avec θ est la Position électrique du rotor définie par : $\theta(t) = \int_0^t p\Omega_r dt$ et $\omega_e = p\Omega_r$

Tel que : Ω_r : Vitesse de rotor ; p : Nombre de paire de pôle; ω_e : Pulsation électrique.

La matrice d'inductance statorique de la machine est d'écrite par [30]:

$$L_s(\theta) = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

L'équation générale de l'inductance propre d'une phase statorique s'écrit comme suit :

$$L_n(\theta) = L_{s0} + L_{s2} \cos(2\theta + \theta_n) \quad (\text{II.5})$$

Avec : $n = a, b, \text{ ou } c$

Le terme constant L_{s0} peut être exprimé comme la somme de l'inductance de fuite du stator L_{sf} et l'inductance magnétisante du stator m .

$$L_{s0} = L_{sf} + m \quad (\text{II.6})$$

Avec L_a, L_b et L_c sont des inductances propres dans les phases (abc) respectivement, ces équations sont exprimées comme suit [31] :

$$\begin{cases} L_a = L_{s0} + L_{s2} \cos(2\theta) \\ L_b = L_{s0} + L_{s2} \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ L_c = L_{s0} + L_{s2} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

L'équation d'inductance mutuelle entre deux phases i et j s'écrit comme suit [31] :

$$M_{ij}(\theta) = m \cos(\theta_i - \theta_j) + L_{s2} \cos(2\theta + \theta_i + \theta_j) \quad (\text{II.8})$$

Tel que : $(i, j) = (a, b, c)$ avec $(i \neq j)$, et θ_i et θ_j sont les angles de déphasage des phases i et j respectivement par rapport à la phase A.

Et les mutuelles entre les bobinages statoriques sont exprimées par :

$$\begin{cases} M_{ab} = \frac{-1}{2} m + M_{s2} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{bc} = \frac{-1}{2} m + M_{s2} \cos(2\theta) \\ M_{ac} = \frac{-1}{2} m + M_{s2} \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

L'équation de tension, peut maintenant être écrite de manière plus détaillée :

$$v_{abc} = r i_{abc} + \frac{d\varphi_{APabc}}{dt} + \frac{d(L_s(\theta)i_{abc})}{dt} \quad (\text{II.10})$$

II.3.b. Équations mécaniques

Si on néglige le frottement sec, le couple électromagnétique fourni est transmis à la charge et d'autre part, sert à l'accélération du rotor et à la compensation du frottement visqueux. Selon la loi de Newton, l'équation fondamentale de la mécanique est:

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_{em} - C_r - f \Omega_r \quad (\text{II.11})$$

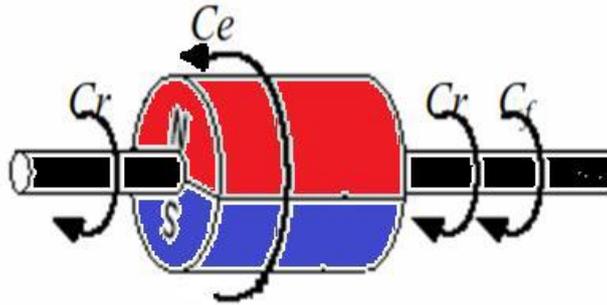


Figure II-2 Différents couples qui agissent sur le rotor

Avec : C_{em} : Couple électromagnétique délivré par la machine ; J : Inertie totale des parties tournantes ; C_r : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine ; f : Coefficient de frottement visqueux, Ω_r : Vitesse de rotor.

Et le couple électromagnétique s'exprime de la manière suivante :

$$C_{em} = p [i_{abc}]^t \left[\frac{1}{2} \frac{d[L_s(\theta)]}{d\theta} [i_{abc}] + \frac{d[\varphi_{APabc}]}{d\theta} \right] \quad (\text{II.12})$$

Pour simplifier le système d'équations dans le repère (abc), on utilise la transformation de Park. C'est une transformation appliquée aux variables réelles (tensions, courants et flux), permet d'obtenir des variables fictives appelées les composantes dq0.

Chapitre II. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Du point de vue physique, cette transformation est interprétée comme étant une substitution des enroulements immobiles (abc) par des enroulements (dq0) tournants avec le rotor. Cette transformation ne facilite pas seulement les solutions des équations mais aussi facilite l'application et la mise en œuvre de la commande [27,28].

II.4. Transformation dans le repère (abc) vers le repère (dq0)

Le modèle synchrone dans le référentiel (abc) étant fortement couplé, et aboutit à des équations différentielles à coefficients variables, le but des transformations matricielles est de le simplifier. Cette simplification réduit l'ordre de système.

II.4.a. Principe de transformation (dq0)

La transformation de Concordia suivit par la rotation de Park est un outil mathématique qui consiste à transformer le système triphasé en un système diphasé tournant. Ce passage mathématique transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor. L'aimant se situe sur l'axe d [29].

Les variables et les paramètres sont alors représentés dans un référentiel à deux axes: l'axe direct (d) et l'axe en quadrature arrière (q) perpendiculaires. L'angle θ entre les deux repères est appelé angle de Park. La figure(II.3) montre le principe de la transformation.

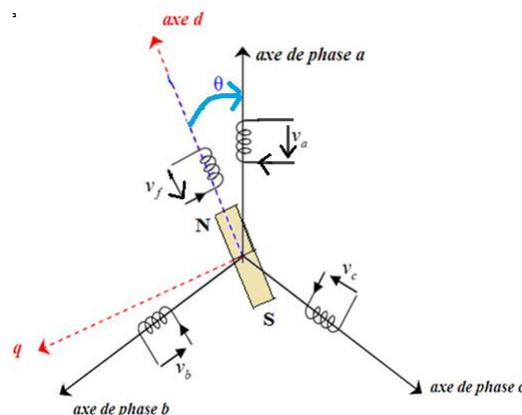


Figure II-3 Représentation de la transformation

La transformation de Park modifiée est définie par :

$$\begin{cases} [X_{dq0}] = [T(\theta)] [X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [T(\theta)]^{-1} [X_{dq0}] \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Avec : $[T(\theta)]$ et $[T(\theta)]^{-1}$ sont les matrices de passage directe et inverse, qui sont données par :

$$[T(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$[T(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

II.4.b. Équation électrique dans le référentiel (dq0)

Les vecteurs v_{abc} , i_{abc} , φ_{abc} et φ_{APabc} sont remplacés dans l'équation (II.10) par leurs expressions en fonction des vecteurs v_{dq0} , i_{dq0} , φ_{dq0} et φ_{APdq0} .

$$[T(\theta)]v_{abc} = [T(\theta)]ri_{abc} + [T(\theta)] \frac{d\varphi_{abc}}{dt} \quad (II.14)$$

$$[T(\theta)]\varphi_{abc} = [T(\theta)]L_s(\theta)i_{abc} + [T(\theta)]\varphi_{APabc} \quad (II.15)$$

Avec la transformation dans le référentiel (dq0), on obtient les équations de la tension et du flux comme suit :

$$v_{dq0} = ri_{dq0} + \frac{d\varphi_{dq0}}{dt} + [T(\theta)] \frac{d[T(\theta)]^{-1}}{dt} \varphi_{dq0} \quad (II.16)$$

$$\varphi_{dq0} = L_{dq0} i_{dq0} + \varphi_{APdq0} \quad (II.17)$$

Où :

$$[T(\theta)]L_s(\theta)[T(\theta)]^{-1} = L_{dq0} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

Les expressions mathématiques des inductances L_d , L_q et L_0 sont données par :

$$\begin{cases} L_d = L_{s0} + \frac{m}{2} + \frac{3}{2}L_{s2} \\ L_q = L_{s0} + \frac{m}{2} - \frac{3}{2}L_{s2} \\ L_0 = L_{s0} - m \end{cases} \quad (II.19)$$

On déduit enfin la forme finale des équations de la MSAP dans le référentiel (dq0) avec i_d , i_q et i_0 comme variables d'état:

$$\frac{di_{dq0}}{dt} = \frac{1}{L_{dq0}} (v_{dq0} - \omega_e j \varphi_{APdq0} - \frac{d\varphi_{APdq0}}{dt} - (r_s + \omega_e j L_{dq0}) i_{dq0}) \quad (\text{II.20})$$

Où :

$$j = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Si on néglige la variation de l'amplitude du flux des AP c'est-à-dire ($\frac{d\varphi_{APdq0}}{dt} = 0$), alors les équations peuvent maintenant être écrites sous forme d'un système d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (v_d - r_s i_d + \omega_e L_q i_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (v_q - r_s i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_{AP}) \\ \frac{di_0}{dt} = \frac{1}{L_0} (v_0 - r_s i_0) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II.4.c. Équation mécanique dans le référentiel (dq0)

L'équation de mouvement reste toujours la même que celle dans le repère naturel. Finalement l'expression du couple développé par la machine s'écrit :

$$\frac{d}{dt} \Omega_r = \frac{1}{J} \left\{ \left(p [(L_d - L_q) i_d i_q] + \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_{AP} i_q \right) - C_r - f \Omega_r \right\} \quad (\text{II.22})$$

II.5. Schéma fonctionnel de la MSAP

D'après les équations (II.21) et (II.22) et en négligeant la composante homopolaire, on obtient le schéma bloc d'une MSAP, donnée dans la figure II.4.

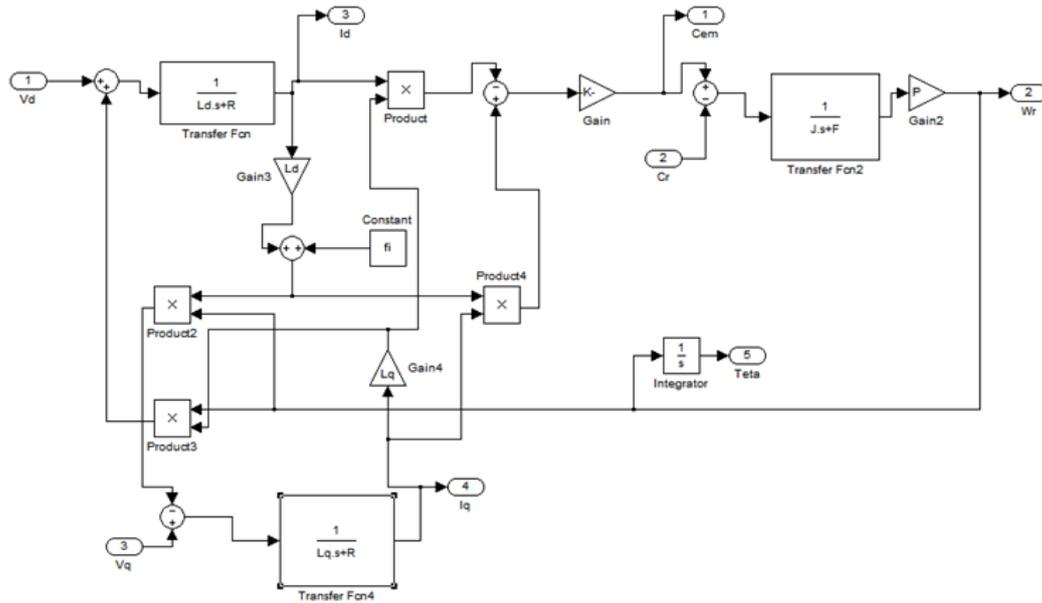


Figure II-4 Schéma bloc d'une MSAP

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation mathématique de la machine synchrone à aimants permanents dans deux repères réels (abc) et virtuel (dq0). Le modèle triphasé est de nos jours rarement utilisé à cause de sa complexité et du fort couplage de ses équations. On a montré qu'à l'aide de la transformation de Concordia suivie par la rotation de Park, le modèle devient plus simple. Les équations obtenues par la transformation du repère (abc) vers le repère (dq0) sont établies. Enfin, nous avons utilisé ce modèle pour la simplification de ces équations et de représenter le modèle de la MSAP dans le repère d'axe (dq0) pour faciliter l'étude et la simulation de la MSAP.

Le chapitre suivant sera consacré à la conception, l'identification et la simulation de la MSAP étudiée.

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la machine synchrone à aimants permanents

III.1. Introduction

La machine étudiée dans ce travail provient d'une machine à laver de la dernière génération, récupérée par nos encadreurs. Elle est destinée à fonctionner en mode moteur multipolaire à attaque directe (sans réducteur mécanique). Elle n'est initialement constituée que d'un stator intérieur bobiné et d'un rotor extérieur à AP. Afin de l'utiliser, il est donc indispensable de concevoir un support adéquat, lui permettant de tourner librement tout en étant bien fixée sur la table d'essai. Donc, il est primordial de simuler cette machine pour la validation de son modèle mathématique et la vérification des valeurs de ses paramètres après la phase d'identification et pour prévoir son comportement dans les cas extrêmes.

III.2. Conception du support

Afin d'aligner le stator et le rotor, et fixer solidement la machine sur la table d'essai, plusieurs pièces doivent être fabriquées manuellement. D'abord, on a conçu un arbre pour cette machine, qui est solidaire au rotor et soutenu par deux paliers. Il doit avoir une longueur suffisamment grande pour traverser la machine et s'accoupler au moteur à courant continu à excitation shunt d'entraînement. Deux paliers avant et arrière sont conçus, dont les hauteurs correspondent à la hauteur de l'arbre du moteur d'entraînement. Et enfin, comme le stator de la machine est creux, un support arrière en forme de 'L' est fabriqué aussi, il se fixe sur le palier arrière, et permet à la machine d'être fixée sur la table d'essai.

III.2.a. Support arrière

Le but de cette fabrication nous accorde l'opportunité de fusionner le support et le palier arrière comme le montre la figure III.1 et voici leurs dimensions :

Le palier arrière qu'on a conçu pour le relier avec le stator, est fixé avec 5 trous de diamètre 8 mm et on l'a centré avec un trou de 23.5 mm pour insérer un roulement. Il est fait en aluminium pour réduire le poids de la machine.

Le deuxième support est en acier sous forme de L. Il est composé de deux trous de 8.5 mm afin de le fixer sur les rails de la table d'essai, et 5 trous de 8 mm pour le fixer sur le palier arrière qui permettra au stator de rester immobile pendant la mise en marche de la machine.

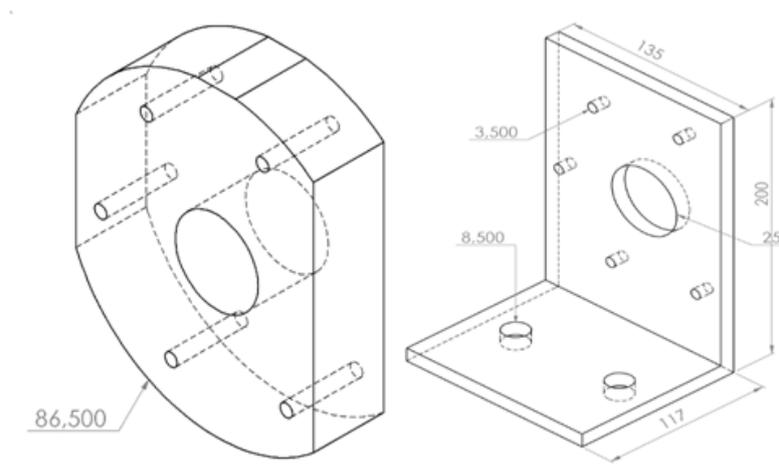


Figure III-1 Support et palier arrière de la machine

III.2.b. Support avant

Ce support est un logement de roulement sous forme de L (voir la figure III.2), il est en acier, possédant deux trous de 8.5 mm pour le fixer au deuxième rail et un trou de 23.5 mm inséré avec un deuxième roulement pour fixer l'axe de la machine.

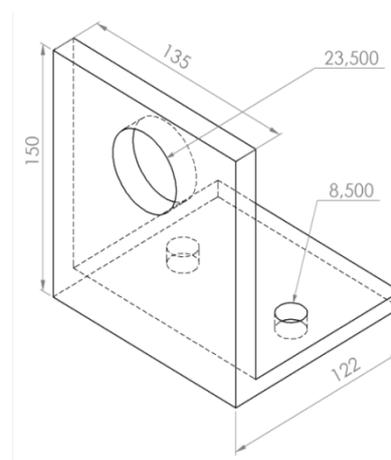


Figure III-2 Support avant

III.2.c. Axe de la machine

L'axe de la machine est sous forme cylindrique en acier, de longueur 20 cm et un diamètre de 2 cm, permettra d'aligner le stator et le rotor de la machine et de s'accoupler au moteur d'entraînement comme montré sur la figure III.3.

De plus, on a construit des dents avec le même diamètre que celui de rotor pour que l'axe soit solidaire à ce dernier.

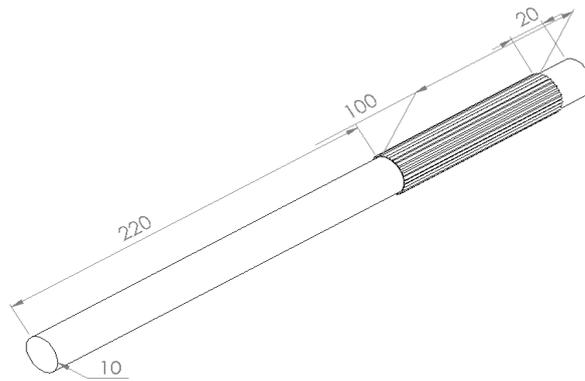


Figure III-3 Axe de la machine

III.2.d. Plan assemblage

Après avoir fabriqué les pièces manquantes de la machine, l'assemblage est simulé numériquement comme illustré dans la figure III.4.

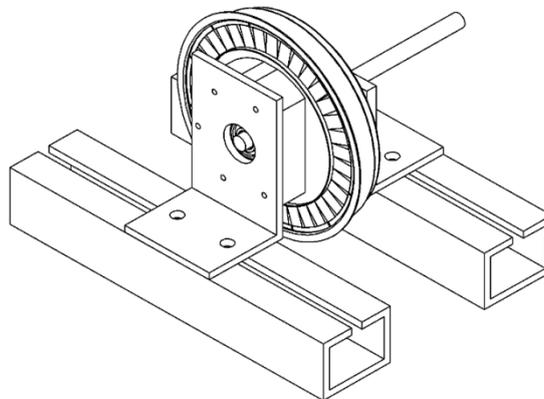


Figure III-4 Plan d'assemblage

III.3. Description de notre machine

III.3.a. Rotor

La machine est de type rotor extérieur, composé de 12 aimants en surface, qui sont montés le long de la circonférence intérieure du rotor (voir la figure III.5).

Cette configuration confère à la machine plusieurs avantages. En effet le diamètre du rotor, plus grand que les machines conventionnelles à flux radial, permet un nombre de paires de pôles plus élevé et un couple plus grand. Pendant la rotation, les forces centrifuges exercent une pression sur les AP rendant leur détachement improbable.



Figure III-5 Rotor

III.3.b. Stator

Le stator, comportant 36 dents, est composé d'un enroulement triphasé de 36 bobines (12 pour chaque phase) en étoile. Les bobines de chaque phase sont connectées en série. La figure III.6 illustre le stator de la machine.



Figure III-6 Stator

On constate alors que cette machine est une machine synchrone à aimants permanents multipolaire.

III.4. Identification des paramètres de la MSAP

Afin d'identifier les paramètres de la MSAP, on a conçu un banc d'essai constitué d'une MCC à courant continu à excitation shunt de 3 kW couplée à la génératrice à étudier afin de l'utiliser pour l'entraînement. Plusieurs essais sont effectués pour identifier les différents paramètres de la MSAP (voir la figure III.7), en utilisant quelques appareils de mesure, à savoir:

- Ampèremètres et pince ampérométrique pour mesurer les courants et la fréquence de ces courants;
- Voltmètres pour mesurer les tensions;
- Stroboscope pour mesurer la vitesse.



Figure III-7 Quelques appareils de mesure utilisée

Avant de commencer les essais d'identification sur la génératrice à étudier, on a entraîné la GSAP à une vitesse faible pour vérifier la forme de la tension induite d'une phase statorique, puisqu'elle peut être de la forme sinusoïdale ou trapézoïdale. Pour cela, on a utilisé un oscilloscope pour visualiser la forme de la FEM induite. Le résultat de cet essai est illustré sur la figure III.8.

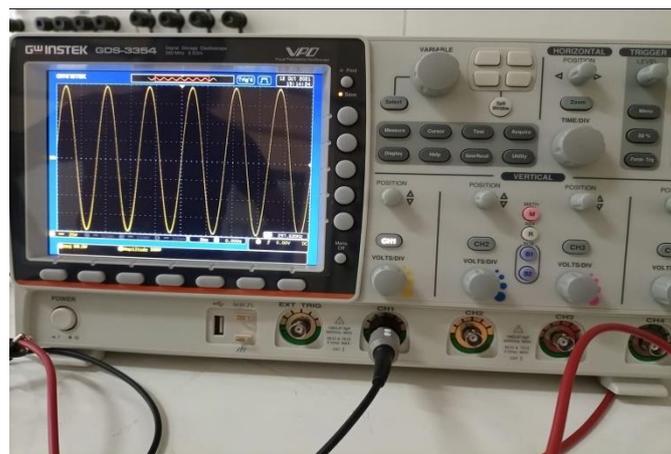


Figure III-8 Résultat d'essai sur l'oscilloscope (GW instek GDS-3354)

On conclut que la forme de la FEM est sinusoïdale.

III.4.a. Mesure des résistances de l'enroulement statorique

La mesure des résistances est réalisée par la méthode voltampère-métrique. On a réalisé le montage aval (voir la figure III.9) car la résistance est de faible valeur. On alimente une seule phase de la MSAP en courant continu. Puis, on obtient les différentes valeurs des

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

tensions et des courants. Pour déterminer la valeur de la résistance, on applique la relation suivante :

$$R = \frac{V}{I} \quad (III.1)$$

Schéma de montage

L'essai nécessite une source faible d'alimentation en continu variable, un voltmètre et un ampèremètre.

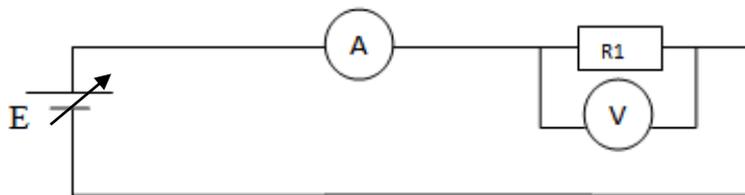


Figure III-9 Montage aval

On obtient les mesures des tensions et des courants qui sont mentionnés sur le tableau III.1, on calcule les différentes résistances de l'induit (R_a , R_b et R_c) pour chaque essai et on donne directement la valeur moyenne des quatre essais pour chaque phase.

Tableau III-1 Valeurs mesurées des tensions et des courants et calculées des résistances

N° de la phase	Valeurs mesurées					Valeurs calculées
						$R_{moy} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{V_i}{I_i}$
Phase A	V_a (V)	10.47	7.4	6.08	4.05	$R_{moy_a} = 5.283 \text{ } (\Omega)$
	I_a (A)	1.99	1.4	1.15	0.76	
Phase B	V_b (V)	9.5	7.18	5.38	3.82	$R_{moy_b} = 5.260 \text{ } (\Omega)$
	I_b (A)	1.81	1.36	1.02	0.73	
Phase C	V_c (V)	10.69	8.61	3.81	0.63	$R_{moy_c} = 5.322 \text{ } (\Omega)$
	I_c (A)	2.01	1.61	0.72	0.12	

D'après la relation (III.1), on obtient la valeur moyenne de la résistance d'une phase statorique: $R_s = 5.28 \text{ } \Omega$.

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

III.4.b. Détermination du nombre de paires de pôles et du flux des AP

Le nombre de paires de pôles et le flux des aimants permanents sont parmi les paramètres essentiels de la machine.

Pour déterminer le nombre de paires de pôles, on a réalisé deux méthodes : l'essai à vide et fonctionnement en pas à pas.

Après avoir calculé le nombre de paires de pôles et avec les valeurs mesurées en essai à vide, on détermine le flux des aimants permanents.

La MSAP est entraînée par un MCC et elle est fonctionnée à vide. On a branché trois voltmètres aux bornes des trois phases de la machine afin de mesurer les tensions simples statoriques, puis on a varié la vitesse manuellement par action sur la tension du MCC. Ensuite, on a relevé les valeurs de la vitesse avec un stroboscope ainsi que les valeurs de la fréquence de la tension avec un fréquencemètre. Les résultats des différentes mesures sont reportés dans le tableau III.2.

Finalement, on a déterminé le nombre de paires de pôles avec la relation suivante :

$$p = \frac{60 f}{N} \quad (\text{III.2})$$

Tableau III.2 : Valeurs mesurées et calculées par l'essai à vide

Valeurs mesurées	N (tr/min)	511	799	900	997	1100	1250
	V _a (V)	93	145	163	181	200	227
	V _b (V)	93	145	163	181	200	227
	V _c (V)	93	145	163	181	200	227
	F (Hz)	204.4	319.6	360	398.8	440	500
Valeurs calculées	Rapport = V/ N	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181	0.181
	$p = \frac{60 f}{N}$	24	24	24	24	24	24

À partir du tableau III.2, on constate que la valeur de nombre de paires de pôles égale à $p = 24$ et le rapport de tension sur la vitesse de rotation (V/N) est constante, comme il est illustré sur la figure III.10.

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

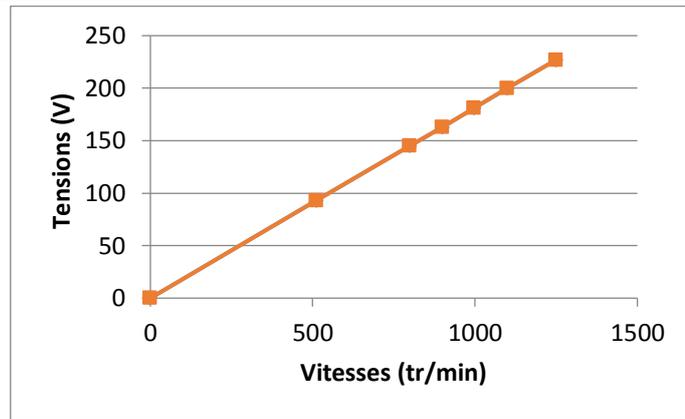


Figure III-10 Tension à vide en fonction de la vitesse de rotation

On a pu déterminer le nombre de paires de pôles avec une deuxième méthode, pour cela on a alimenté une phase de notre machine par un courant continu, puis on a fait tourner le rotor manuellement pour compter le nombre de pas de rotation, et donc on a relevé le nombre de paires de pôles qui est égal à 24.

À partir de la valeur du nombre de paires de pôles, on a pu donc déterminer la valeur du flux des aimants permanents avec les relations suivantes :

$$e = \frac{d\phi}{dt} \tag{III.3}$$

Tel que :

$$\sqrt{2}E = \omega_e \Psi_{Ap}$$

E est l'amplitude de la tension à vide, c'est-à-dire la FEM induite par les AP.

On converti la vitesse en rad/s par l'équation : $\Omega = \frac{\pi}{30} N$

On obtient alors l'équation permettant de calculer le flux des aimants permanents par la relation suivante :

$$\Psi_{Ap} = \frac{\sqrt{2}E}{p \Omega} \tag{III.4}$$

Tableau III.3 : Valeurs mesurées de la FEM et de la vitesse et calculées du flux

E_{eff} (V)	93	145	163	181	200	227
N (tr/min)	511	799	900	997	1100	1250
Ω (rad/s)	53.51	83.67	94.24	104.40	115.19	130.89
Ψ_{Ap} (Wb)	0.1024	0.1021	0.1019	0.1022	0.1023	0.1022

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

Finalement, on a pu déduire la valeur moyenne des flux des AP :

$$\Psi_{Ap \text{ moy}} = 0.1022 \text{ Wb} \quad (\text{III.5})$$

III.4.c. Détermination des différentes inductances de la MSAP

• Inductance mutuelle

Pour déterminer l'inductance mutuelle, on a alimenté une seule phase de la machine en courant alternatif, puis on a mesuré les tensions aux bornes des deux autres phases. La figure III.11 montre le schéma du montage.

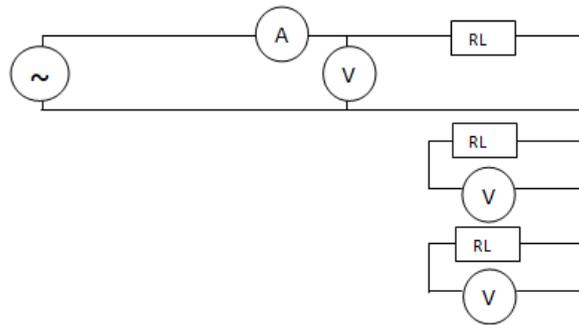


Figure III-11 : Schéma pour déterminer l'inductance mutuelle

A partir de ce montage, on a obtenu les différentes valeurs mesurées des tensions et des courants. Ces mesures sont données dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Mesures des tensions et des courants pour les trois phases

Essai dans la phase 'A'			Essai dans la phase 'B'			Essai dans la phase 'C'		
$V_a=15.16$	$V_b=3.95$	$V_c=3.95$	$V_a=4.3$	$V_b=16.5$	$V_c=4.3$	$V_a=4.35$	$V_b=4.35$	$V_c=16.55$
$I_a=1.86$	$I_b=0$	$I_c=0$	$I_a=0$	$I_b=2$	$I_c=0$	$I_a=0$	$I_b=0$	$I_c=2$
$V_a=11.1$	$V_b=2.90$	$V_c=2.90$	$V_a=3.55$	$V_b=14$	$V_c=3.55$	$V_a=3.15$	$V_b=3.15$	$V_c=12.1$
$I_a=1.41$	$I_b=0$	$I_c=0$	$I_a=0$	$I_b=1.70$	$I_c=0$	$I_a=0$	$I_b=0$	$I_c=1.5$
$V_a=9.50$	$V_b=2.35$	$V_c=2.35$	$V_a=3.05$	$V_b=12$	$V_c=3.05$	$V_a=2$	$V_b=2$	$V_c=8.4$
$I_a=1.20$	$I_b=0$	$I_c=0$	$I_a=0$	$I_b=1.50$	$I_c=0$	$I_a=0$	$I_b=0$	$I_c=1$
$V_a=8.4$	$V_b=2$	$V_c=2$	$V_a=2.05$	$V_b=8.40$	$V_c=2.05$	$V_a=1.35$	$V_b=1.35$	$V_c=5.8$
$I_a=1$	$I_b=0$	$I_c=0$	$I_a=0$	$I_b=1$	$I_c=0$	$I_a=0$	$I_b=0$	$I_c=0.7$

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

D'après les résultats de mesures, on a utilisé la relation suivante entre les phases A, B et C pour calculer les inductances mutuelles.

$$\begin{cases} v_a = r_{i_a} + L_a \frac{di_a}{dt} + m_{ab} \frac{di_b}{dt} + m_{ac} \frac{di_c}{dt} \\ v_b = r_{i_b} + L_b \frac{di_b}{dt} + m_{ba} \frac{di_a}{dt} + m_{bc} \frac{di_c}{dt} \\ v_c = r_{i_c} + L_c \frac{di_c}{dt} + m_{ca} \frac{di_a}{dt} + m_{cb} \frac{di_b}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Quand la phase A est alimentée, les valeurs des tensions v_b et v_c sont déduites :

$$\text{La phase A } (i_a \neq 0, \text{ et } i_b = i_c = 0) : \begin{cases} v_b = m_{ba} \frac{di_a}{dt} \\ v_c = m_{ca} \frac{di_a}{dt} \end{cases}$$

Quand la phase B est alimentée, les valeurs des tensions v_a et v_c sont déduites :

$$\text{La phase B } (i_b \neq 0, \text{ et } i_a = i_c = 0) : \begin{cases} v_a = m_{ab} \frac{di_b}{dt} \\ v_c = m_{cb} \frac{di_b}{dt} \end{cases}$$

Quand la phase C est alimentée, les valeurs des tensions v_a et v_b sont déduites :

$$\text{La phase C } (i_c \neq 0, \text{ et } i_b = i_a = 0) : \begin{cases} v_a = m_{ac} \frac{di_c}{dt} \\ v_b = m_{bc} \frac{di_c}{dt} \end{cases}$$

Finalement, les relations des inductances mutuelles ($m_{ab}, m_{ba}, m_{ac}, m_{bc}, m_{cb}, m_{ca}$) sont déterminées en résolvant les équations ci-dessus en utilisant la transformation de Laplace des trois relations précédentes, tel que:

$$\text{La phase A : } \begin{cases} m_{ba} = \frac{v_b}{\omega I_a} \\ m_{ca} = \frac{v_c}{\omega I_a} \end{cases}$$

$$\text{La phase B : } \begin{cases} m_{ab} = \frac{v_a}{\omega I_b} \\ m_{cb} = \frac{v_c}{\omega I_b} \end{cases}$$

$$\text{La phase C : } \begin{cases} m_{ac} = \frac{v_a}{\omega I_c} \\ m_{bc} = \frac{v_b}{\omega I_c} \end{cases}$$

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

Après les calculs des différentes valeurs des inductances mutuelles, les résultats obtenus sont résumés dans le tableau (III.5).

Tableau III.5 : Valeurs calculées des inductances mutuelles en Henry

Essai dans la phase 'A'	Essai dans la phase 'B'	Essai dans la phase 'C'
$m_{ba} = 0.006763$ $m_{ca} = 0.006763$	$m_{ab} = 0.006847$ $m_{cb} = 0.006847$	$m_{ac} = 0.006926$ $m_{bc} = 0.006926$
$m_{ba} = 0.00655$ $m_{ca} = 0.00655$	$m_{ab} = 0.00665$ $m_{cb} = 0.00665$	$m_{ac} = 0.006687$ $m_{bc} = 0.006687$
$m_{ba} = 0.006236$ $m_{ca} = 0.006236$	$m_{ab} = 0.006475$ $m_{cb} = 0.006475$	$m_{ac} = 0.006369$ $m_{bc} = 0.006369$
$m_{ba} = 0.006369$ $m_{ca} = 0.006369$	$m_{ab} = 0.006528$ $m_{cb} = 0.006528$	$m_{ac} = 0.006141$ $m_{bc} = 0.006141$

Donc à partir du tableau III.5, on a déterminé l'inductance mutuelle moyenne m_{moy} et la valeur de 'm' comme suit :

$$m_{moy} = 0.006545 \text{ H}$$

$$m_{moy} = m \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)$$

$$m = 0.01309 \text{ H}$$

• Inductances propres

A partir de la figure III.11 et les valeurs de mesure dans le tableau III.4, on a déterminé les inductances propres (L_a, L_b, L_c), en utilisant les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = ZI_a \\ V_b = ZI_b \\ V_c = ZI_c \end{cases} \quad (III.7)$$

Avec l'impédance d'une phase statorique est :

$$Z = \frac{V}{I} = \sqrt{r^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (III.8)$$

On développe les relations précédentes (III.7) et (III.8), pour déduire les relations des inductances (L_a, L_b, L_c) dans les trois phases A, B et C.

Quand la phase A est alimentée, la valeur de l'inductance L_a est déduite:

$$\text{La phase A : } L_a = \sqrt{\frac{1}{\omega^2} \left(\frac{V_a^2}{I_a^2} - r^2 \right)}$$

Quand la phase B est alimentée, la valeur de l'inductance L_b est déduite:

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

$$\text{La phase B : } L_b = \sqrt{\frac{1}{\omega^2} \left(\frac{v_b^2}{i_b^2} - r^2 \right)}$$

Quand la phase C est alimentée, la valeur de l'inductance L_c est déduite:

$$\text{La phase C : } L_c = \sqrt{\frac{1}{\omega^2} \left(\frac{v_c^2}{i_c^2} - r^2 \right)}$$

Après les calculs, on a obtenu les différentes valeurs des inductances (L_a, L_b, L_c), les résultats sont illustrés dans le tableau (III.6).

Tableau III.6 : Valeurs calculées des inductances (L_a, L_b, L_c) en Henry

Essai dans la phase 'A'	Essai dans la phase 'B'	Essai dans la phase 'C'
$L_{a1} = 0.0198$	$L_{b1} = 0.0202$	$L_{c1} = 0.0203$
$L_{a2} = 0.0186$	$L_{b2} = 0.0201$	$L_{c2} = 0.0194$
$L_{a3} = 0.0188$	$L_{b3} = 0.0191$	$L_{c3} = 0.0208$
$L_{a4} = 0.0208$	$L_{b4} = 0.0208$	$L_{c4} = 0.0203$
$L_{a\text{moy}} = 0.0195$	$L_{b\text{moy}} = 0.0201$	$L_{c\text{moy}} = 0.0202$

Finalement, on a déduit la valeur finale de l'inductance propre à partir le tableau III.6, comme suit : $L_{\text{moy}} = 0.0199 \text{ H}$

III.5. Bobinage de la machine

La machine qu'on a étudiée contient 36 bobines, les trois phases sont alimentées en série et couplées en étoile. Le bobinage de la machine est illustré sur la figure III.13.

Pour les trois phases, l'entrée de chaque bobine est la sortie de la bobine précédente, comme illustré sur la figure III.12. Cette configuration permet de garder le nombre de spire important.

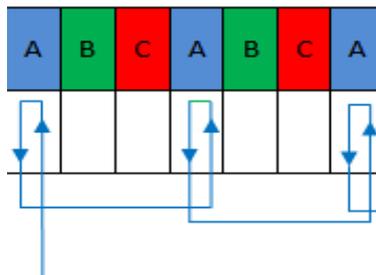


Figure III-12 Branchement des bobines de trois dents de la phase as

À partir des constatations visuelles et les relevés qu'on a effectués sur le stator, on a pu déterminer les différents paramètres du bobinage de la MSAP :

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

Nombre de dents statoriques : $Z = 36$

Nombre de phases : $m = 3$

Nombre de paires de pôles : $p = 24$

Pas polaire : $\tau_p = \frac{Z}{2p} = 0.75$

Nombre d'encoches par pôle et par phase : $q = \frac{Z}{2pm} = 0.25$

Écart angulaire en degré électrique, entre deux encoches : $\alpha = \frac{2\pi p}{z} = 4.189 \text{ rd}$

Écart angulaire entre deux phases : $\varphi = \frac{2\pi}{m} = \frac{2\pi}{3}$

III.6. Essais en charges de la MSAP

III.6.a. Charge résistive

Pour l'essai en charge résistive, la machine est alimentée avec une puissance mécanique fournie par MCC, puis on a inséré pour chaque enroulement un ampèremètre et un voltmètre pour mesurer les tensions et les courants des trois phases.

Le schéma de montage est illustré sur la figure III.14.

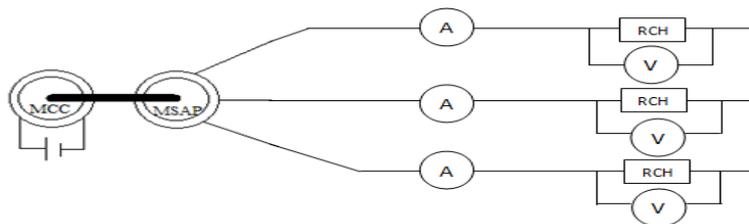


Figure III-13 Schéma de montage (charge résistive)

Pour chaque essai, on a ajusté la machine à sa vitesse nominale de 1400 tr/min. Pour obtenir les différentes valeurs des tensions et des courants entre les trois phases. Les mesures sont illustrées sur le tableau (III.7).

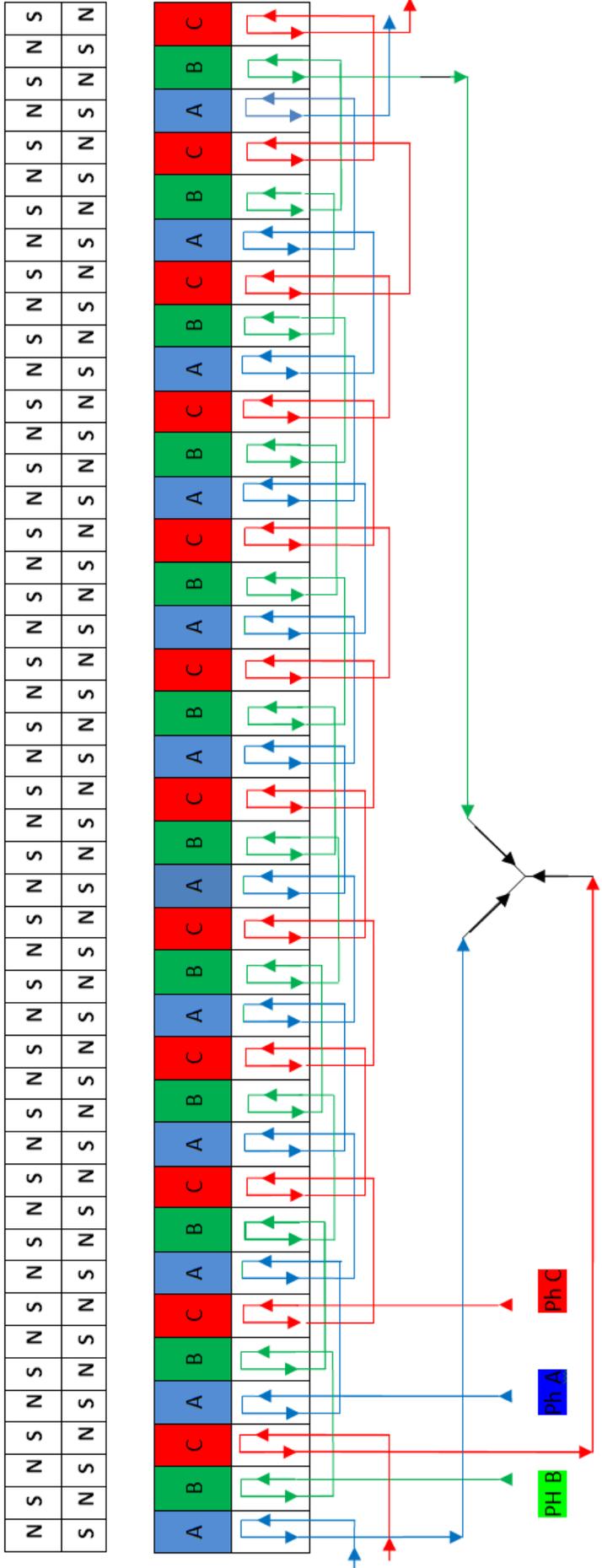


Figure III-14 Bobinage complet de la MSAP

Tableau III.7 : Mesures par l'essai en charge résistive

Valeurs mesurées	V_{Rch1} (V)	263	255	250	245	234	222	205	192
	I_{Rch1} (A)	0	0.21	0.32	0.54	0.74	1	1.3	1.45
	V_{Rch2} (V)	263	255	250	245	234	222	205	192
	I_{Rch2} (A)	0	0.21	0.32	0.54	0.74	1	1.3	1.45
	V_{Rch3} (V)	263	255	250	245	234	222	205	192
	I_{Rch3} (A)	0	0.21	0.32	0.54	0.74	1	1.3	1.45
Valeurs calculées	$R_{ch} = \frac{V}{I}$ (Ω)	0	1214.285	781.25	453.703	316.216	222	157.692	132.413

A partir des résultats de mesure, on a tracé la courbe des tensions en fonction des courants $V(I)$ (voir la figure III.15).

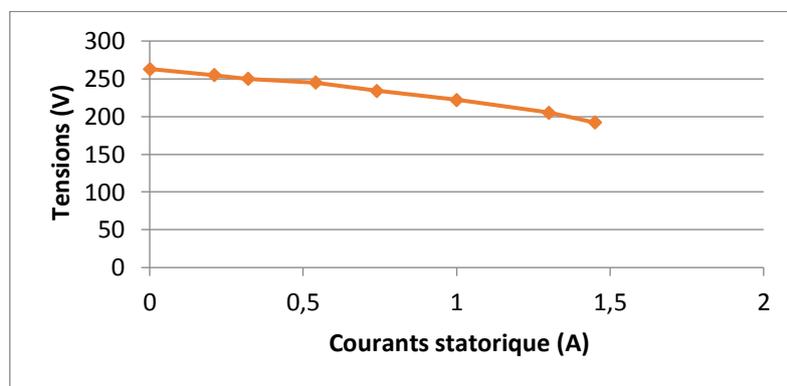


Figure III-16 Courbe de la tension en fonction du courant cas des charges résistives

On remarque que la tension diminue légèrement lorsque le courant augmente à cause de la chute de tension ohmique des phases statoriques

III.6.b. Charge inductive

C'est le même montage que le précédent, juste qu'on a remplacé la charge résistive par une charge inductive, comme on le voit sur la figure III.16.

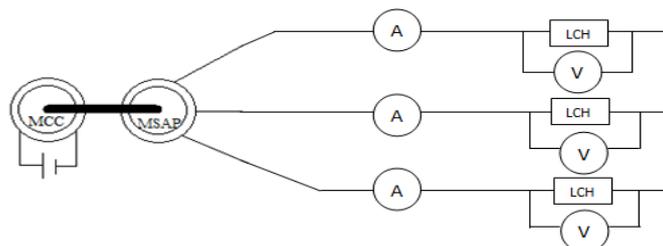


Figure III-17 Schéma de montage (charge inductive)

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

On a obtenu les différentes valeurs des tensions et des courants comme indiqué sur le tableau III.8, et au cours de la manipulation on a fait l'ajustement pour avoir une vitesse nominale de 1400tr/min.

Tableau III.8 Mesures par l'essai en charge inductive

N° de la phase	Valeurs mesurées										
	Phase A	V _a (V)	260	240	203	195	185	178	170	165	145
I _a (A)		0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.12	1.88
Phase B	V _b (V)	260	240	203	195	185	178	170	165	145	73
	I _b (A)	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.12	1.88
Phase C	V _c (V)	260	240	203	195	185	178	170	165	145	73
	I _c (A)	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.12	1.88

D'après les résultats de mesure, on a tracé la courbe des tensions en fonction des courants pour la charge inductive avec l'allure de la charge résistive, pour bien observé d'une manière plus claire les tensions des deux charge comment elles diminuent. Les courbes des deux essais sont présentées dans la figure(III.17):

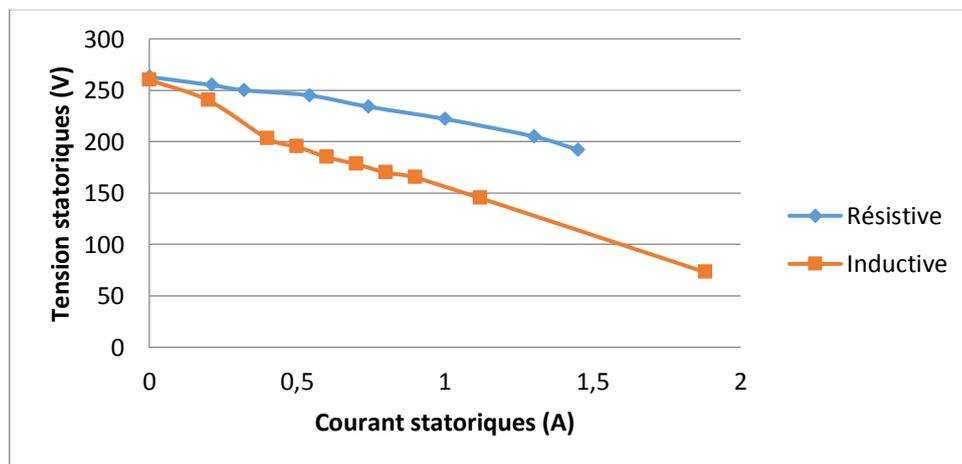


Figure III-18 : Courbes des deux essais des tensions en fonction des courants de charge

D'après la figure III.17, on remarque que la tension de la charge inductive diminue plus sévèrement à cause du flux des aimants permanents par rapport à la charge résistive lorsque le courant augmente. Donc la charge inductive démagnétise les aimants permanents.

III.7. Simulation de la MSAP sous l'environnement MATLAB/Simulink

La simulation d'une machine électrique est une phase primordiale pour la validation de son modèle mathématique et la vérification des valeurs de ses paramètres après la phase d'identification. Les progrès réalisés en informatique et en génie de logiciels permettent de

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

prévoir les performances et d'envisager l'optimisation technique d'identification et de commande. Ainsi la simulation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre, elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce qu'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir le comportement de la machine dans des cas extrêmes.

Dans cette section, on implémente le modèle MATLAB/Simulink de la MSAP, afin de valider les modélisations définies dans le chapitre II.

III.7.a. Essai à vide

On a simulé sur MATLAB avec une grande résistance, ($R_{ch}=90000 \Omega$), entraîné a une vitesse nominale (1400 tr/min). On a trouvé la tension $V_{eff} = 254.3 (V)$.

Le schéma bloc illustré sur figure III.18.

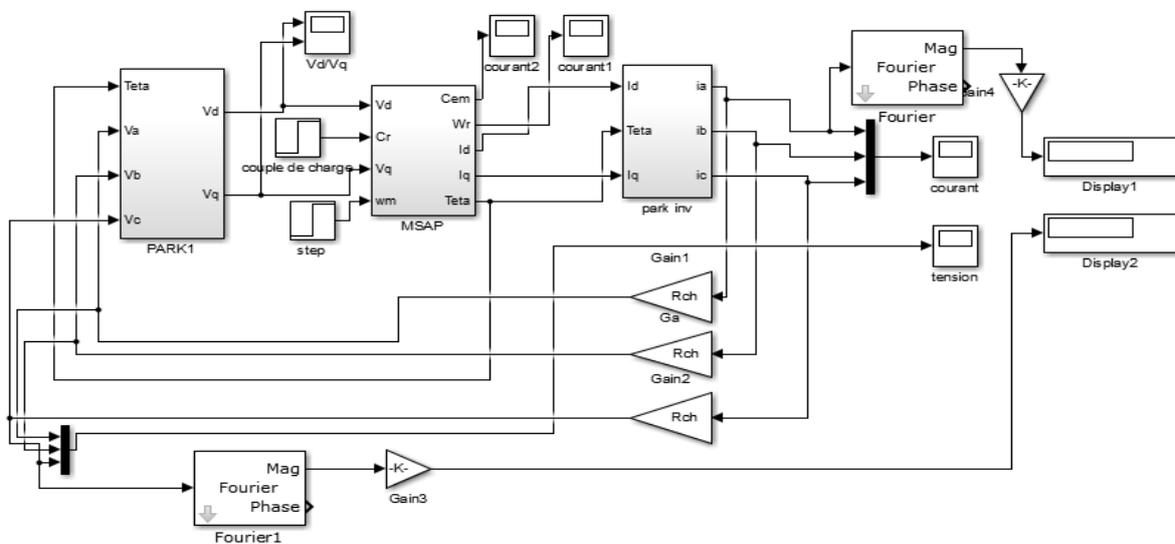


Figure III-19 : Schéma bloc pour l'essai à vide

Après la simulation, on a obtenu l'allure de la tension montrée sur les figures III.19.

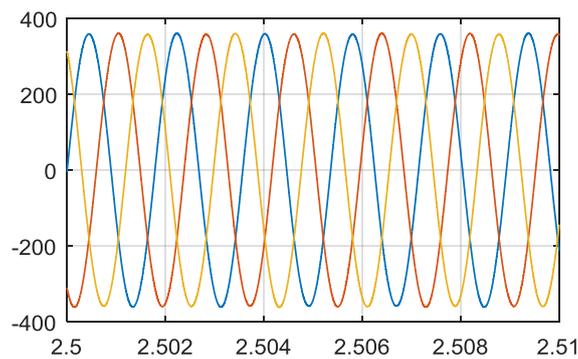


Figure III-20 Allures des tensions à vide

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

III.7.b. Essai en charge résistive

On a varié les valeurs de la résistance (R_{ch}) dans le schéma bloc réalisé sous MATLAB/Simulink pour obtenir les mêmes valeurs du courant comme dans l'essai pratique (voir la figure III.18). Puis on a relevé les résultats résumés dans le tableau (III.9).

Tableau III.9 : Résultats obtenus V_{eff} et I_{eff}

V_{eff}	252.8	251.4	246.9	240.3	230.7	216.8	210.9
I_{eff}	0.21	0.32	0.54	0.74	1	1.3	1.45

D'après les résultats de mesure, on a tracé la courbe V(I) (Voir la figure(III.20)) :

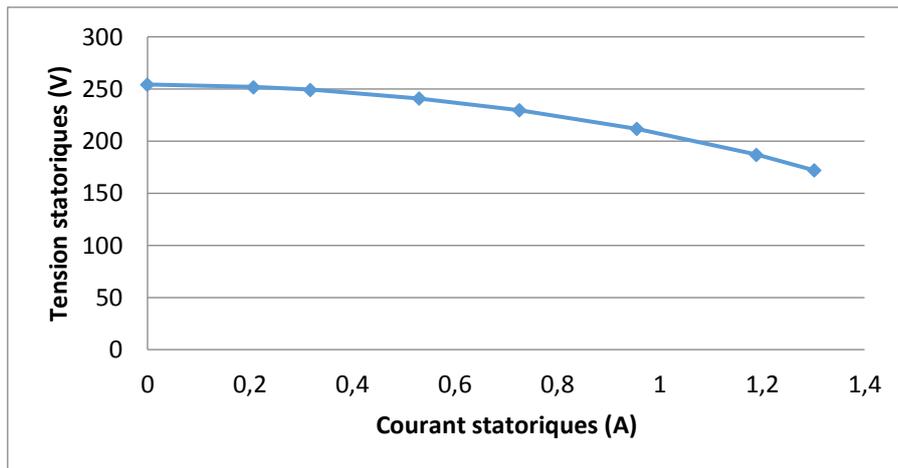


Figure III-21 Courbe des tensions statoriques en fonction des courants cas de charge résistive

III.7.c. Essai en charge inductive

On a varié les valeurs de l'inductance (L_{ch}) dans le schéma bloc réalisé sous MATLAB/Simulink pour obtenir les mêmes valeurs du courant comme dans l'essai pratique (voir la Figure (III.21)).

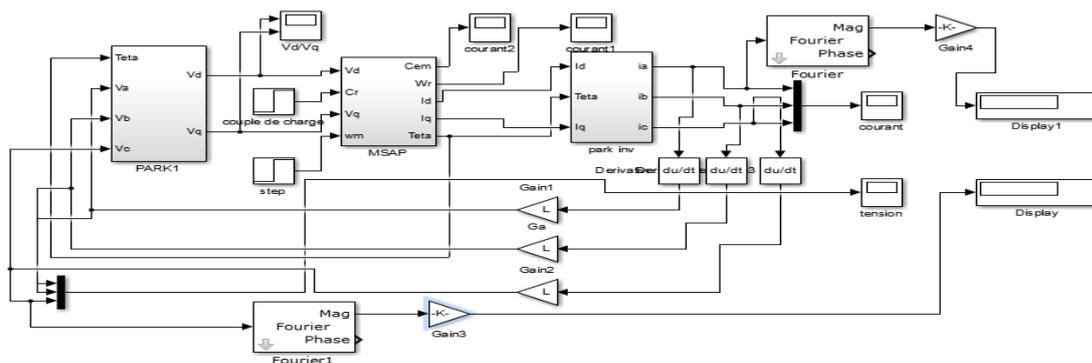


Figure III-22 : Schéma bloc pour l'essai Inductive

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

Après la simulation, on a relevé les résultats obtenu sur le tableau (III.10) suivant :

Tableau III.10 : Résultats obtenus ‘essai pour une charge inductive’

V (v)	79.32	149.8	169.9	179.6	189.6	198	207.5	217.9	235.8
I (A)	1.88	1.12	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2

D’après les résultats de mesure, les courbes des deux simulations sont présentées dans la figure(III.22):

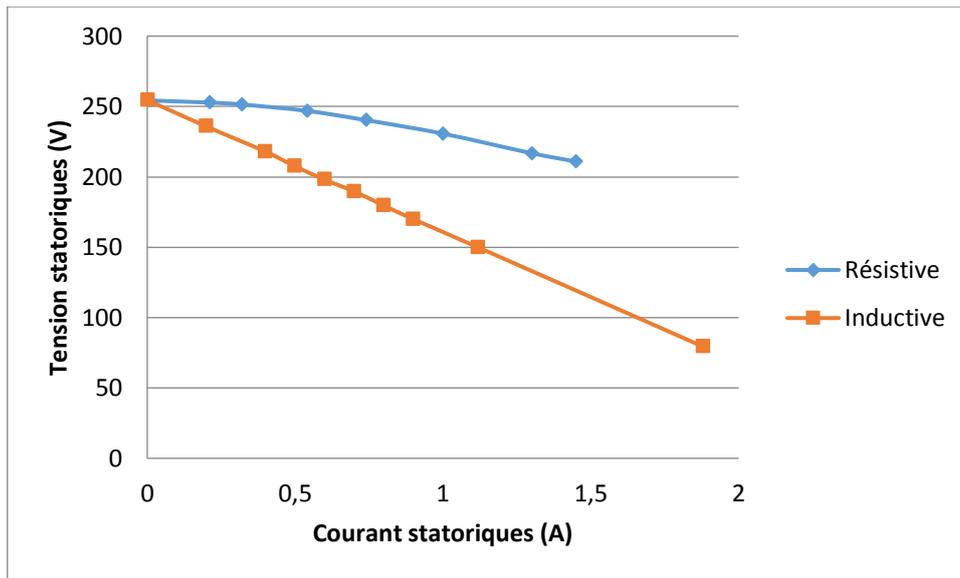


Figure III-23 Courbes des deux essais des tensions en fonction des courants de charge

D’après les résultats et les allures obtenus, on a constaté qu’il y a une légère différence entre les résultats calculés et mesurés. Donc on a pu déduire l’erreur relative à partir de la relation suivante :

$$e(\%) = \frac{|v_{cal} - v_{mes}|}{|v_{cal}|} 100 \quad (III.9)$$

v_{cal} : Valeur de la tension obtenue dans l’essai pratique (réel);

v_{mes} : La valeur de la tension obtenue dans la simulation MATLAB.

Après calcul, les erreurs dans l’essai en charge inductive et résistive sont résumées dans le tableau (III.11).

Chapitre III. Conception, identification et simulation de la MSAP

Tableau III.11 : Erreurs dans les essais (inductive et résistive)

Erreurs dans l'essai cas des charges inductives										
e (%)	0	1.75	7.33	6.4	7	6.5	5.6	2.9	3.3	8.6
I (A)	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.12	1.88
Erreurs dans l'essai cas des charges résistives										
e (%)	0	1.09	0.56	0.77	2.6	3.9	5.7	9.8		
I (A)	0	0.21	0.32	0.54	0.74	1	1.3	1.45		

A partir des résultats obtenus, on a tracé les allures pour les deux essais dans la figure III.23.

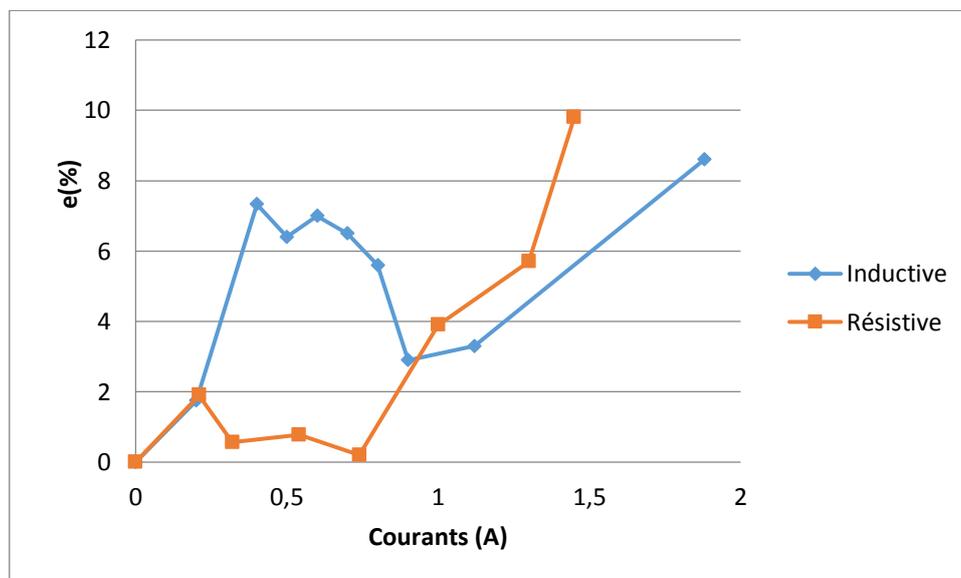


Figure III-24 Courbes des deux essais des erreurs en fonction des courants de charge

On peut constater une légère différence entre les résultats obtenus par les essais pratiques et ceux avec simulation (à cause des appareils de mesures et des erreurs de lecture).

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude de la machine étudiée. Nous avons réalisé un banc d'essai, sur lequel nous avons effectué l'identification des paramètres de la MSAP ainsi que d'autres essais pratiques. En exploitant ses résultats, nous avons utilisé ses paramètres d'identification dans la simulation et nous avons aussi effectué des essais à vide et en charge sur la machine étudiée pour les mêmes conditions. Les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés sur l'étude des machines synchrones en général et les machines synchrones à aimants permanents en particulier, ces constitutions et ces principes de fonctionnement. Les exigences de plus en plus pointues de la technologie ont fait que les machines à aimants permanents sont de plus en plus utilisées, plus particulièrement dans des applications industrielles exigeantes en encombrement et en puissance, de plus dans la production de l'énergie électrique.

Durant ce travail, on a présenté la modélisation de la MSAP dans un système triphasé réel et dans un système biphasé fictif de Concordia, suivi par la rotation de Park. Comme il sera important de noter que le choix du référentiel et les transformations triphasées / biphasées permettront d'obtenir quelques simplifications des équations.

Malgré les points positifs qu'on a abordés sur notre travail, néanmoins nous avons rencontré quelques difficultés, tel que le manque de précision des certains appareils de mesure et des limites techniques. Et encore, le manque des petites charges et la perturbation de la charge capacitive. On a dû éliminer cet essai qui était important à identifier.

Finalement, en espérant que cette machine sera un bénéfice pour notre université en général et a nos futur étudiants en particulier.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. K. Belghitri « Contribution à la modélisation par la méthode des réseaux de reluctances (MRR) d'une machine à reluctance variable ». Cours, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf USTOMB 2015.
- [2] J. Lau, M. N. UDDIN « Adaptive backstepping based nonlinear control of an IPMSM drive». Thèse de Doctorat, Department of Electrical Engineering, Lakehead University, Canada, IEEE 2004.
- [3] L. Ben Amor, L. A. Dessaint, M. Ghribi and O. Akhrif, « Adaptive NonLinear Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor ». Thèse de Doctorat, Ecole de Technologie Supérieure, Canada, IEEE 1994.
- [4] J.Niard, J.Claude, J.Pierre) «Electricité. Machines électriques et électronique». Livre, France 1999.
- [5] D. PRIETO « Modélisation et optimisation des machines synchro-réductantes à aimants permanents et de leur électronique». Thèse de Doctorat, Ecole doctorale STITS, Paris, France 2015.
- [6] C. Bourrasset, « Gestion intelligente des Transferts d'énergie d'un pylône d'éclairage public autonome ». Thèse de Doctorat, Poly Tech Clermont-Ferrand, France 2010.
- [7] Y. Nacera, « Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter-spores et des cassures de barres et d'anneaux ». Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2009.
- [8] B. Aubert, « Détection des courts-circuits inter-spores dans les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France 2014.
- [9] Bassel ASLAN « conception de machines polyphasées à aimants permanents et bobinage concentré à pas fractionnaire avec large plage de vitesse ». Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'art et métiers, paris tech, France 2013.
- [10] J. Cros, P. Viarouge « Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings ». Livre, IEEE Trans. Energy Convers, Quebec,Canada 2002.

- [11] F. Magnussen, C. Sadarangani « Winding factors and Joule losses of permanent magnet machines with concentrated windings ». Thèse de Doctorat, Madison, WI, USA 2003.
- [12] H. Akita, Y. Nakahara, N. Miyake, T. Oikawa « New core structure and manufacturing method for high efficiency of permanent magnet motors ». Thèse de Doctorat, Salt Lake City, UT, USA 2003.
- [13] S. Hamecha « étude et commande d'une éolienne a base d'une machine synchrone à aimant permanent » Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2013.
- [14] H. Kadour « étude de la machine synchrone autopilotée : modélisation et simulation » Thèse de Doctorat, spécialité électrotechnique, l'université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2012.
- [15] B. Multon « Historique des machines électriques et plus particulièrement des machines à réluctance variable». Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, France 2012.
- [16] W. Zhenwei « Conception Optimal d'un entraînement électrique pour la chaine de traction d'un véhicule hybride électrique ». Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France 2012.
- [17] R. Le doeuff ,M E. Zaim, M F.benkhoris, M. machmoum « Machines électriques tournantes ». Livre, Université Polytech'Nantes, France 2009.
- [18] R. Saou «modélisation et optimisation de machines à aimants permanents : Machines à double saillances et à inversion de flux», thèse de doctorat, Université de Béjaia, 2008
- [19] B. BOUKAIS «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat, Université mouloud Mammeri Tizi-ouzou 2012
- [20] A.F. Jawad « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents ». Thèse de Doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, France 2008.
- [21] A. Kaddouri « Etude d'une commande non- linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents ». Thèse doctorat, Québec, Canada 2000.

- [22] A. Benbrahim, «Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse de Magistère Université de Batna 2009.
- [23] A. Kaddouri « Étude d'une Commande Non Linéaire Adaptative d'une machine Synchrone à Aimants Permanents ». Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada 2000.
- [24] A. Ameer « commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimant permanent dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissant ». Magister en Électrotechnique, Université de Batna 2005.
- [25] A. barkat, S. tnani, «analyses of synchronous machine modeling for simulation ». Thèse de Doctorat. University of Poitiers, France 2010.
- [26] M. Koteich « Commande Vectorielle Sensorless Des Moteurs Brushless De Mini-Drones » Mémoire fin d'étude, The french Aerospace LAB, France 2012.
- [27] A. kaddouri « Etude d'une commande non-linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents ». Thèse de doctorat, Université Laval Canada 2000.
- [28] S. MuftahZeid « An Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive ». Thesis for the degree of Master, Memorial University of Newfoundland, Canada 1998.
- [29] M.T. Latreche « Commande Floue De La Machine Synchrone A Aimant Permanant (MSAP) Utilisée Dans Un Système Eolien » Mémoire de Magister, Université ferhat abbas de Setif (UFAS) 2012.

