



HAL
open science

Caractérisation expérimentale de moteur synchrone à aimants innovants permanents

Sinan Duganyigit

► **To cite this version:**

Sinan Duganyigit. Caractérisation expérimentale de moteur synchrone à aimants innovants permanents. Energie électrique. 2014. dumas-01377552

HAL Id: dumas-01377552

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01377552>

Submitted on 7 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE FRANCHE COMTE

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : ENERGIE

OPTION : Electrotechnique

Par

Sinan DUGANYIGIT

**Caractérisation expérimentale de moteur synchrone à aimants innovants
permanents**

Soutenu le 27 Novembre 2014

JURY

PRESIDENT : Stéphane LEFEBVRE

**MEMBRES : Christophe ESPANET
Stéphane RUDENKO
Thierry MARTIN
François HENRIOT**

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent tout d'abord à Monsieur Christophe ESPANET, professeur des universités, à l'université de Franche-Comté, chercheur à l'institut FEMTO-ST département énergie, pour avoir cru en ma réussite en m'attribuant un sujet de stage, pour avoir été mon tuteur durant mon stage, sa patience, ses précieux conseils et son soutien. A la fois présent et disponible, il a encouragé mes initiatives au travers une grande liberté d'actions qu'il m'a autorisée.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement, toutes les équipes au sein de l'institut de recherche FEMTO-ST, pour leur accueil chaleureux, notamment au sein de l'équipe Machine.

Je n'oublie pas non plus l'aide précieuse que m'ont apportée deux doctorants du département Machine, Mr BENLAMINE Raouf et Mr BERKANI Mohamed, sans qui l'apprentissage des machines aurait été plus long.

Je remercie aussi le FONGECIF. Sans la confiance que m'a accordée cet organisme paritaire, je n'aurais pas pu profiter du Congé Individuel de Formation qui me permet de vous présenter ce mémoire.

Je tiens à remercier également la société ASSYSTEM pour m'avoir autorisé à prendre un Congé Individuel de Formation.

Je remercie tous les membres du jury qui ont accepté d'être présents.

Je suis aussi redevable à tous les enseignants du département électrotechnique du CNAM de Belfort, ainsi qu'à tous le personnel administratif.

Je remercie également toutes les personnes de mon entourage, mes amis, mes frères, Kenan et Hakan, mes belles-sœurs, mes neveux, ainsi que toutes les personnes qui m'ont su donner la motivation de continuer de m'aider et de me soutenir dans cette voie.

Je suis immensément reconnaissant envers mes parents, qui m'ont soutenu tout au long de ma vie. Je leurs dois beaucoup. Qu'ils reçoivent ici ma profonde gratitude pour leurs innombrables sacrifices. Merci.

Je ne peux clore ces remerciements sans une pensée très personnelle à ma moitié, ma femme, Filiz, pour m'avoir soutenu, encouragé et surtout pour avoir su être patiente tout au long de mon cursus, ainsi qu'une grosse pensée à ma joie de vivre, au bonheur de ma vie, à mes deux anges, mes enfants, ma fille Firdevs et mon bonhomme Yusuf, je vous aime très fort.

Liste des abréviations

M.A.S : *Moteur Asynchrone*

M.S.A.P : *Moteur Synchrone à Aimant Permanent*

M.C.C : *Moteur à Courant Continu*

FEMTO-ST : *Franche-Comté Electronique, Mécanique, Thermique et Optique – Sciences et Technologie*

PMSM: *Permanent Magnet Synchronous Motor*

BDCM: *Brushless Direct Current Motor*

AFPM : *Axial Flux Permanent Magnet*

RFPM : *Radial Flux Permanent Magnet*

BLDC: *Brush-Less Direct Current*

kW: *Kilo Watt*

MW : *Méga Watt*

TR : *Terres Rares*

Rpm : *Révolutions per minute*

C.T.P : *Coefficient de température positive*

C.A.N: *Controller Area Network*

F.F.T: *Fast Fourier Transform*

F.é.m.: *Force Electro-Motrice*

Spp : *Sans Pôle polaire*

F.c.é.m. : *Force Contre Electro-Motrice*

Hz : *Hertz*

N.m : *Newton-Mètre*

Br : *Induction rémanente*

Hc : *Champ Coercitif*

Ext : *Extérieur*

F.M.M. : *Force Magnéto-Motrice*

C-C : *Court-Circuit*

Ld : *Inductance dans l'axe d*

Lq : *Inductance dans l'axe q*

Icc : *Courant de Court-Circuit*

F : *Fréquence*

HT : *Hors Taxe*

TGV : *Train à Grande Vitesse*

SmCo: *Samarium-Cobalt*

Nd-Fe-B: *Néodyme – Fer – Bor*

C.N.A.M : *Conservatoire National des Arts et Métier*

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	4
Table des matières	6
Introduction	8
Diagramme de Gantt.....	10
I. GENERALITE SUR LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS.....	12
I.1 MOTEUR SYNCHRONE	12
I.1.1 HISTORIQUE	12
I.1.2 DEFINITION	14
I.2 ETUDE DU MOTEUR SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS	14
I.2.1 INTRODUCTION	14
I.2.2 MOTEUR SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS	15
I.2.3 DIFFERENTES STRUCTURES DE MACHINES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS	16
I.2.3.1 Structure à flux radial (RFPM) :	17
I.2.3.2 Structure à aimant déposé en surface	18
I.2.3.3 Structure à aimants insérés	19
I.2.3.4 Structure à aimants enterrés	19
I.2.3.5 Structure à flux axial (AFPM) :	20
I.2.4 CONFIGURATION DES MACHINES PMSM ET BDCM.....	22
I.2.5 APPLICATIONS DES MACHINES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS	23
I.2.5.1 AVANTAGES	25
I.2.5.2 INCONVENIENTS	25
I.3 AIMANTS PERMANENTS.....	26
I.3.1 DIFFERENTS AIMANTS PERMANENTS	26
I.3.1.1 Hystérésis, champ coercitif, induction rémanente et produit énergétique [06]	29
I.3.1.2 Stabilité des aimants [4]	34
I.4 AUTOPILOTAGE	35
I.4.1 PRINCIPE DE L'AUTOPILOTAGE	35
I.4.2 LES CAPTEURS DE POSITION.....	36
I.4.2.1 Capteur électromagnétique (résolver)	37
I.4.2.1.1 Description	37
I.4.2.1.2 Fonctionnement	37
I.4.2.1.3 Caractéristiques	38
I.4.2.2 Capteur à effet hall	38
I.4.2.2.1 Principe de l'effet hall	38
I.4.2.3 Codeur de position	39
I.4.2.3.1 Introduction	39
I.4.2.3.2 Capteur optiques.....	40
I.4.2.4 Codeur incrémental	40
I.4.2.4.1 Fonctionnement	40
I.4.2.4.2 Caractéristiques des codeurs incrémentaux	41
I.4.2.5 Codeur absolu.....	41
I.5 CONCLUSION	43
II ETUDE DE PROJET	45
II.1 INTRODUCTION.....	45
II.2 PRESENTATION DU BANC D'ESSAI.....	45
II.2.1 LES DIFFERENTS ROTORS	47

II.2.1.1	Rotor à aimants en surface	48
II.2.1.2	Rotor à aimants en forme de «U»	48
II.2.1.3	Rotor à aimants en forme de «I»	49
II.2.1.4	Rotor à aimants en forme de «O»	49
II.2.2	LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DU BANC	50
II.2.2.1	Onduleur d'alimentation et armoire électrique	51
II.3	CONCLUSION	55
III	CARACTERISATION EXPERIMENTALE DE LA M.S.A.P	57
III.1	OBJECTIFS	57
III.2	LES DIFFERENTS ESSAIS	57
III.2.1	ESSAI A VIDE	57
III.2.1.1	Essai à vide pour le rotor à aimant en surface	59
III.2.1.2	Essai à vide pour le rotor à aimant en forme de «U»	61
III.2.1.3	Essai à vide pour le rotor à aimant en forme de «I»	63
III.2.1.4	Essai à vide pour le rotor à aimant en forme de «O»	65
III.2.1.5	Bilan des FFT des quatre rotors à 1100 tr/min	67
III.2.1.6	Bilan des relevés de la f.é.m.	68
III.2.1.7	Comparaison avec le modèle théorique	69
III.2.1.8	Calcul des pertes de puissances mécanique	69
III.2.1.9	Bilan des couples des quatre rotors	73
III.2.1.10	Bilan des puissances des pertes mécaniques	73
III.2.2	CONCLUSION	74
III.2.3	ESSAI EN COURT-CIRCUIT	75
III.2.3.1	Courant de C-C pour le rotor à aimant externe.	76
III.2.3.2	Courant de C-C pour le rotor «I»	77
III.2.3.3	Courant de C-C pour le rotor «U»	78
III.2.3.4	Courant de C-C pour le rotor «O»	79
III.2.3.5	Relevé de l'I _{cc} , calcul du flux à vide et calcul de E	80
III.2.3.6	CALCUL DU FLUX	80
III.2.3.6.1	Calcul du flux à vide pour tous les rotors	80
III.2.3.6.2	Exploitation de l'essai en C-C et calcul de L _d	81
III.2.3.6.3	Comparaison avec le modèle théorique	82
III.2.4	ESSAI EN CHARGE	83
III.2.4.1	PREPARATION AUX ESSAIS EN CHARGE	84
III.2.4.2	Préparation Mise en place des appareils de mesures	86
III.2.4.3	Relevé en Mode moteur, quadrant 1	89
III.2.4.4	Essai en charge pour rotor à aimant externe	91
III.2.4.4.1	V moyen en mode moteur et générateur	94
III.2.4.4.2	Puissance Utile, moteur et générateur	96
III.2.4.4.3	Puissance Absorbée, moteur et générateur	97
III.2.4.4.4	Rendement	100
III.2.4.4.5	Position de l'angle du moteur	102
III.2.5	CONCLUSION	104
	Conclusion Générale	105
	Annexes	109
	Table des figures	123
	Table des tableaux	127
	Bibliographie	128

Introduction

Faisant partie des machines électriques industrielles les plus anciennes, la machine à courant continu reste très utilisée et particulièrement comme actionneur. Ceci tient au fait que son fonctionnement est d'une grande simplicité, de même que sa modélisation, mais surtout ses performances statiques et dynamiques sont exceptionnelles. En effet le couple est le produit vectoriel de deux grandeurs naturellement orthogonales (flux inducteur et courant d'induit) quasiment indépendantes de la vitesse et de la position du rotor. Cependant, la fragilité du système balai collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif afin d'écarter cet inconvénient.

L'apparition des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) dans le monde des actionneurs électriques a joué un rôle crucial dans l'évolution des systèmes électriques. C'est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inertie, ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faible constante de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes (actionneurs de robotique, servomoteur, entraînement à vitesse variable...etc.). Mais le modèle du moteur synchrone à aimants permanents correspond à un système multi variable et fortement couplé, c'est pour cette raison que sa commande est plus complexe que celle d'une MCC.

Des recherches approfondies ont permis de mettre au point des matériaux nouveaux, comme par exemple des aimants à base de terre rare. Ces derniers permettent d'obtenir des machines synchrones qui présentent, par rapport aux autres types de machines, à courant continu, synchrone à excitation électrique et asynchrone beaucoup d'avantages, entre autres, une inertie faible et un couple massique élevé. Elles sont actuellement les mieux classées pour répondre aux exigences des applications, telles que la robotique, les machines-outils, la technologie de l'espace (actionneurs d'aviation, de satellites...) et d'une manière générale dans les systèmes embarqués.

Comme le département Energie de l'insitut FEMTO-ST participe à de nombreux projets collaboratifs avec de grandes entreprises sur la conception innovante de moteurs

électriques à aimants permanents (General Electric, Alstom Transport, Renault...), dans ce cadre, notre mémoire a pour objet la réalisation des caractérisations détaillées d'un moteur synchrone à aimants innovants permanents afin de mettre en place une base de données expérimentales utile pour le développement de recherche futures au sein du laboratoire. La particularité de notre moteur prototype, c'est qu'on a la possibilité d'extraire le rotor et de pouvoir essayer d'autre rotor ayant une implantation des aimants, différentes les uns des autres, afin d'en exploiter les différentes caractéristiques.

Ce mémoire résume notre travail de manière synthétique avec un fort apport expérimental permettant de valider la partie théorique étudié par un doctorant. L'ensemble des travaux présentés dans ce mémoire se résume en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à des généralités de la machine synchrone à aimants permanents tout en se basant sur différentes structures, ses modes d'alimentation et de fonctionnement. Nous verrons aussi, les différents aimants permanents constituant le rotor ainsi que les capteurs de position.

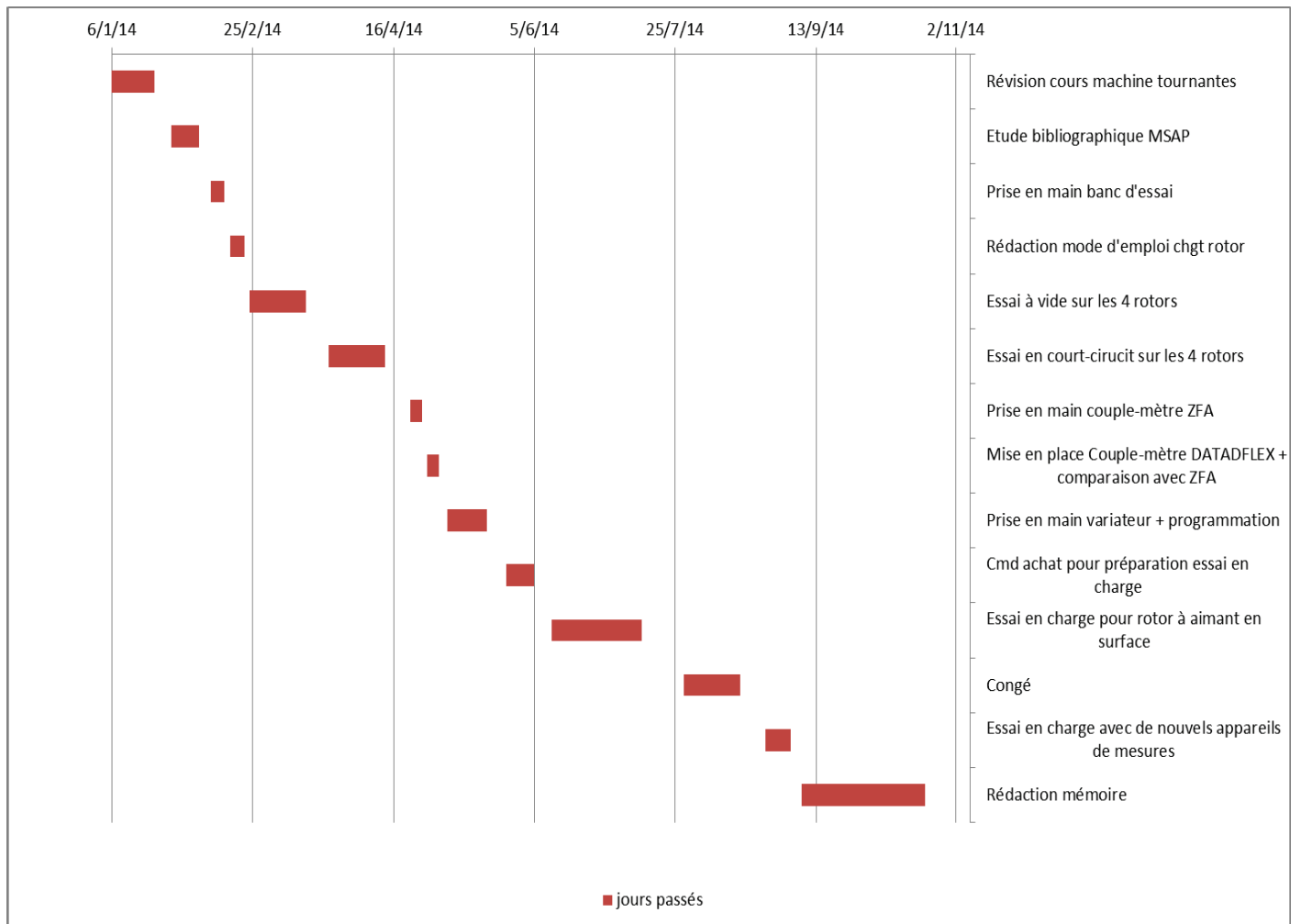
Dans le second chapitre, nous verrons de plus près le banc d'essai composé du moteur synchrone à aimant innovants permanents ainsi que tous les autres éléments constituant le banc, comme les variateurs de vitesses ou encore les différents rotors.

Dans le troisième chapitre nous détaillerons les différents essais effectués, comme les essais à vide, en court-circuit ou encore en charge. Nous détaillerons tous les calculs utiles pour pouvoir déterminer les performances de chaque rotor. Nous verrons aussi les appareils de mesures utilisé ainsi que les courbes de rendement des différents moteurs.

Par la suite, après avoir réunie, tous les résultats expérimentaux des différents modes de fonctionnement de la MSAP, nous interpréterons des résultats obtenus.

Enfin, nous clôturerons par une conclusion générale, concernant le travail effectué, les travaux restant et les difficultés rencontrées.

Diagramme de Gantt



CHAPITRE I

Généralité sur la machine synchrone à aimants permanents

I. Généralité sur la machine synchrone à aimants permanents

I.1 Moteur Synchrone

I.1.1 Historique

Jusque dans les années 1950-1960, les machines synchrones étaient essentiellement utilisées pour la production d'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique en provenance de sources diverses comme les barrages ou encore le gaz, sous la forme d'alternateurs travaillant dans une gamme de puissance allant de quelques watts jusqu'à quelques centaines de mégawatts.

La propriété intrinsèque de ces machines d'avoir une vitesse directement et mathématiquement liée à la fréquence d'alimentation était aussi mise à profit dans des fonctionnements en moteur dans des applications nécessitant un fonctionnement à vitesse rigoureusement constante.

Les moteurs synchrones pouvant produire de l'énergie réactive par surexcitation, ils étaient également mis à contribution en tant que compensateurs synchrones pour corriger le facteur de puissance de certaines installations, faisant ainsi concurrence aux batteries de capacités.

Par rapport à la machine asynchrone, qui était alors considérée comme le moteur industriel le plus standard, la machine synchrone n'occupait donc que des créneaux bien particuliers.

A partir des années 1950-1960, deux évolutions technologiques, initiées depuis quelques années, allaient effectivement s'appliquer dans le domaine des machines électriques et modifier progressivement et inéluctablement cette classification.

La première évolution concernait le développement des semi-conducteurs de puissance qui autorisait la mise au point de convertisseurs statiques permettant d'alimenter les machines à fréquence variable quelles que soient les natures et les caractéristiques de la source de puissance électrique.

Ce type d'alimentation par électronique allait permettre de reproduire avec les machines synchrones les caractéristiques quasi idéales des machines à commutation par balais-collecteur sans avoir les inconvénients et les limitations de cette commutation

mécanique. Pour cela, il suffisait de commander le convertisseur statique à partir de capteurs de position du rotor de manière à assurer en permanence la rotation synchrone du rotor et du champ de l'induit. Ce principe, qualifié d'autopilotage, allait conduire à la mise au point de dispositifs industriels d'entraînement à vitesse variable, dans une gamme de puissance allant de quelques dizaines de kW à la centaine de MW, pour la ventilation, le pompage ou la compression de fluides, la traction ferroviaire (TGV Atlantique), etc.

Grâce à la possibilité de réglage du facteur de puissance, offerte par la machine synchrone, le convertisseur est alors relativement simple puisque constitué de thyristors dont le blocage est assuré directement par les tensions de la machine. Cette simplicité relative, jointe à une grande fiabilité de fonctionnement, a permis à ces entraînements d'être les premiers ensembles convertisseurs-machines à se répandre industriellement dans le domaine des fortes puissances.

La seconde évolution était relative à l'apparition sur le marché d'aimants permanents performants capables de résister à la désaimantation des champs de réactions d'induit présents dans les machines électriques et possédant des inductions rémanentes élevées.

L'excitation des machines synchrones par ces aimants permanents offrait bien sûr l'avantage immédiat d'améliorer leur rendement en supprimant les pertes joules au rotor, mais elle permettait surtout de remettre en cause la structure même des machines synchrones. En effet, on pouvait envisager de disposer les aimants dans l'inducteur de différentes manières, chacune de ces dispositions conférant à la machine des propriétés particulières. Il était ainsi possible de rechercher l'adéquation optimale entre la machine et l'application envisagée.

Grâce à cette variabilité et en association avec les possibilités offertes par l'électronique de puissance et de contrôle, les MSAP et alimentation électronique se sont rapidement disséminées à travers de très nombreuses applications : informatique et péri-informatique (lecteurs de disques durs et de disquettes, imprimantes), productique et robotique (servomoteurs), aéronautiques, traction électrique, etc.

Elles ont commencé et devraient poursuivre la conquête d'autres applications à grande diffusion comme l'électroménager et l'équipement automobile.

Dans ces diverses applications, la machine est également autopilotée et de plus alimentée en courant au moyen d'un onduleur de tension. Ce type d'alimentation permet,

sans autre artifice, un contrôle direct du couple ce qui constitue un avantage supplémentaire de ces machines synchrones à aimants permanents notamment par rapport aux machines asynchrones. Ce contrôle conduit à d'excellentes performances dynamiques, indispensables pour une implantation dans les boucles d'asservissement par exemple [01].

I.1.2 Définition

Toute machine électrique dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation.

Deux modes de fonctionnement sont à distinguer pour les machines synchrones. En mode génératrice, elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor. En mode moteur elle consomme un courant électrique pour faire tourner le rotor à une vitesse déterminé par la fréquence du courant.

Les puissances des machines varient de quelques Watts pour les petits moteurs à plusieurs centaines de mégawatts pour les alternateurs de grande puissance. Par ailleurs, la structure de ces machines reste très semblable. Deux parties sont à distinguer, le stator est constitué d'enroulements triphasés qui par interaction avec le champ magnétique rotorique crée un couple électromécanique, le rotor quant à lui est responsable de générer le champ d'induction.

I.2 Etude du Moteur Synchrone à Aimants Permanents

I.2.1 Introduction

Dans l'industrie, le moteur synchrone à aimants permanents s'impose de plus en plus face au moteur à courant continu dans les applications où l'on cherche des performances dynamiques, statiques et une densité de puissance très élevées [02].

Ce type de moteur s'impose sur le marché en raison de sa simplicité de commande et sa puissance massique élevée, vu que les aimants modernes ont la capacité de produire

une forte induction dans l'entrefer sous un faible volume, ce qui est impossible avec un inducteur bobine [03].

De nombreuses tentatives ont été faites par des chercheurs pour réaliser des moteurs synchrones à aimants, mais ce n'est qu'avec l'apparition des matériaux à fort champ coercitif et induction rémanente assez élevée qu'elles ont pu, réellement se concrétiser [04].

I.2.2 Moteur Synchrone à Aimants Permanents

Par définition, un moteur synchrone est un moteur dont la vitesse de rotation N est liée à la fréquence du réseau f par l'équation suivante [05].

$$f = \frac{pN}{60} \quad 1.1$$

Donc, si la fréquence du réseau est constante, la vitesse du moteur est rigoureusement constante. Elle ne varie ni avec la charge, ni avec la tension de la source [06], c'est cette particularité qui instigue les ingénieurs d'adopter ce type de moteurs lorsque la charge à entrainer doit tourner à une vitesse rigoureusement constante.

Le moteur à aimant permanent est un moteur synchrone, le rotor de ce moteur porte des aimants permanents qui doivent assurer la mission de l'excitation comme la montre la Figure. 1.1.

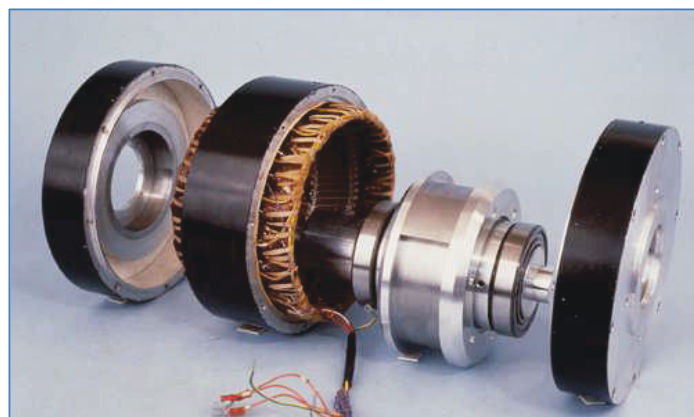


Figure 1.1 : Vue éclatée d'un moteur à aimant permanent, l'aimant « brillant » entoure le rotor en dehors.

Ce type de moteurs englobe une foule série de configurations inspirent leurs nom de la manière de disposition des aimants dans, ou sur le rotor. La Figure. 1.2 montre les topologies les plus familières des rotors disponibles sur le marché.

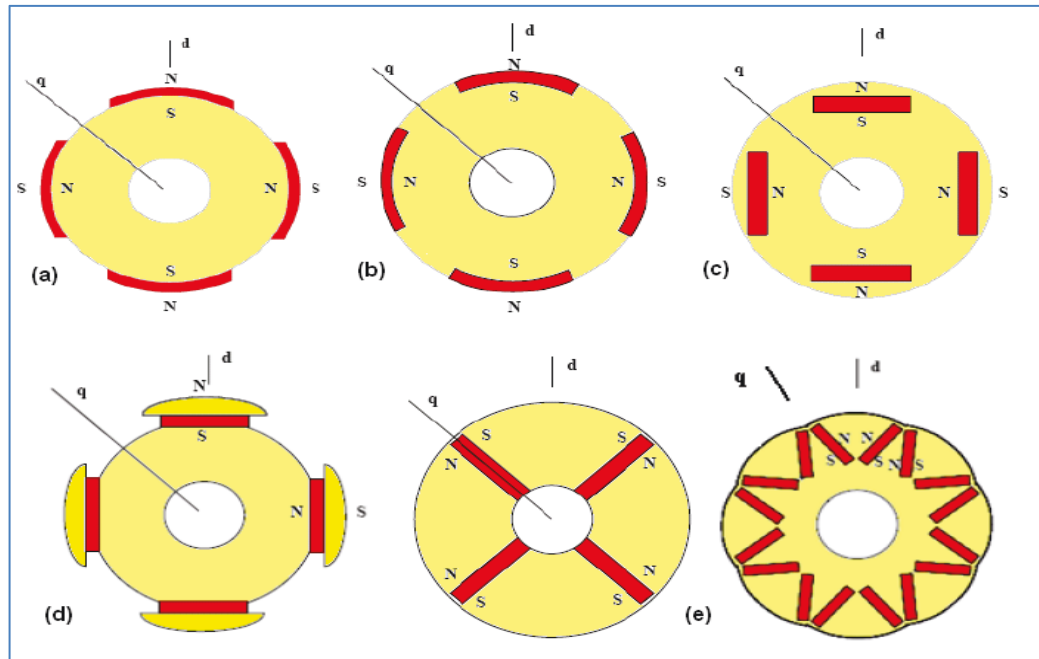
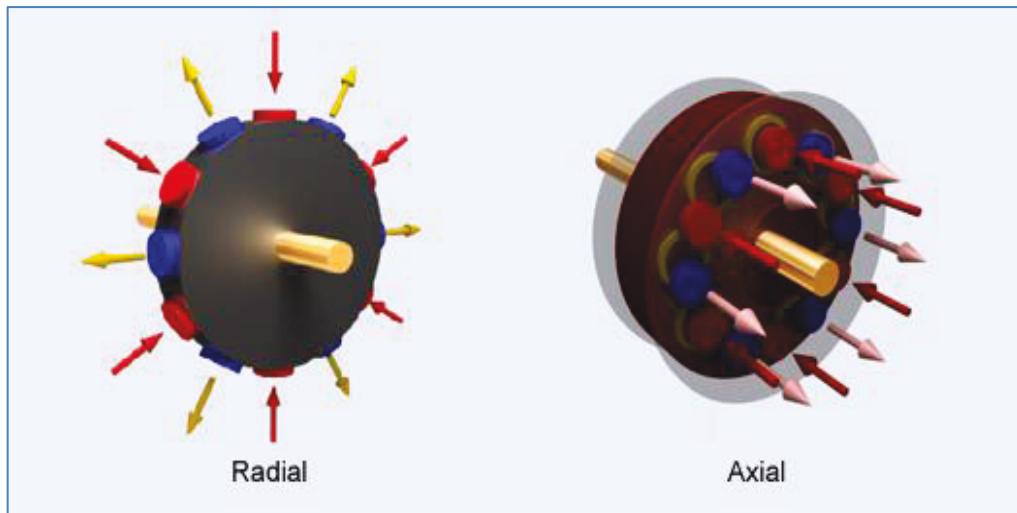


Figure 1.2 : Vue en coupe transversale des rotors des moteurs à aimant permanent, sur les différentes figures colorés en rouge ce sont les aimants, et en jaune, le fer doux. : a) configuration dite sans pièces polaires, b) à aimants insérés, c) à aimants enterrés, d) à épanouissements polaires, e) à concentration de flux.

I.2.3 Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents

Les structures des machines synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). Celles-ci peuvent être alimentées, soit par des courants sinusoïdaux dans le cas des PMSM ou par des courants en créneaux dans le cas des BDCM.

Une vue schématique des deux types de machines à aimants, à flux radial et à flux axial, est donnée par la figure 1.3



a)

b)

Figure 1.3 : Vue schématique des machines : a) à flux radial, (b) à flux axial

I.2.3.1 Structure à flux radial (RFPM) :

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimants la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure 1.4 et 1.5). Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit insérés ou enterrés.

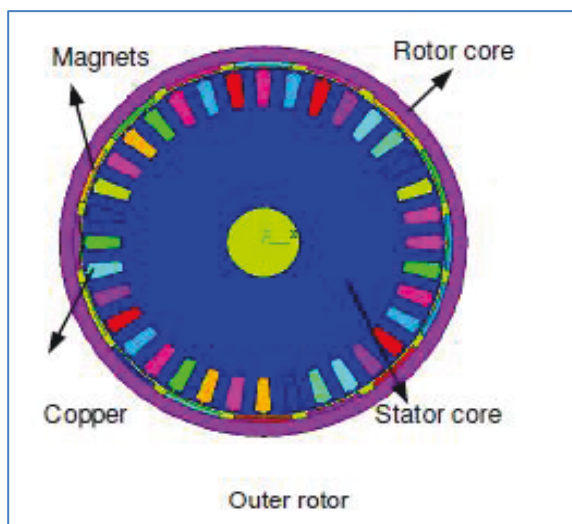


Figure 1.4. Structure à rotor externe

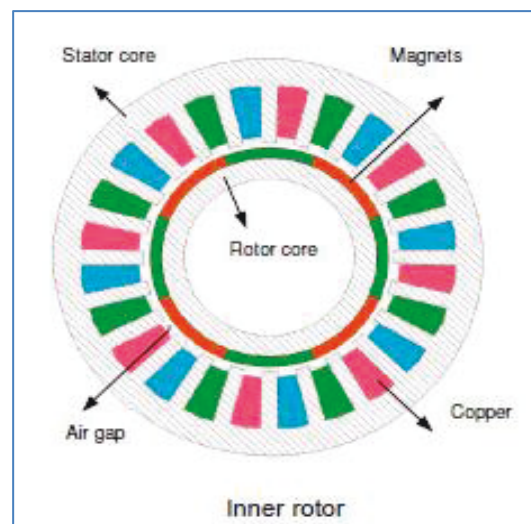


Figure 1.5. Structure à rotor interne

I.2.3.2 Structure à aimant déposé en surface

Elles sont appelées machines à inducteur lisse en raison de leurs aimants déposés au niveau de l'entrefer sur un noyau ferromagnétique lisse (Figure 1.6). Leur aimantation peut-être radiale, tangentielle ou combinée.

La topologie à rotor interne est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et son faible coût de réalisation. Cependant elle présente quelques inconvénients. En effet, les aimants permanents sont exposés aux champs de démagnétisation et sont sujets à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor [07].

La topologie à rotor externe est moins utilisée car elle est plus difficile à réaliser et nécessite plus de volume d'aimant. Elle présente les avantages suivants :

- Un diamètre du rotor, plus grand que pour les machines conventionnelles à flux radial, permettant d'avoir un nombre plus élevé de pôles et un couple plus grand.
- Une meilleure qualité de collage des aimants sur le rotor grâce à la force centrifuge qui pousse les aimants vers l'extérieur, rendant leur détachement presque impossible

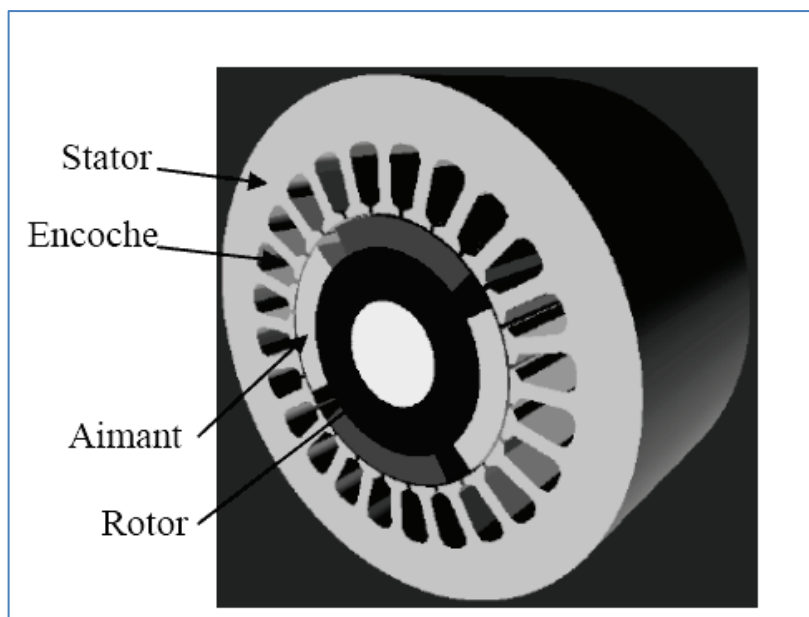


Figure 1.6 : Structure à aimant déposé en surface

I.2.3.3 Structure à aimants insérés

Des aimants de forme simple sont insérés à la surface du rotor, ce qui leur permet d'avoir une bonne tenue mécanique (Figure 1.7). L'espace entre les aimants est couverts par des dents rotoriques créant une saillance inversée ($L_d < L_q$). Cette saillance produit un couple de reluctance aussi important que le couple d'interaction dû aux aimants permanents [08].

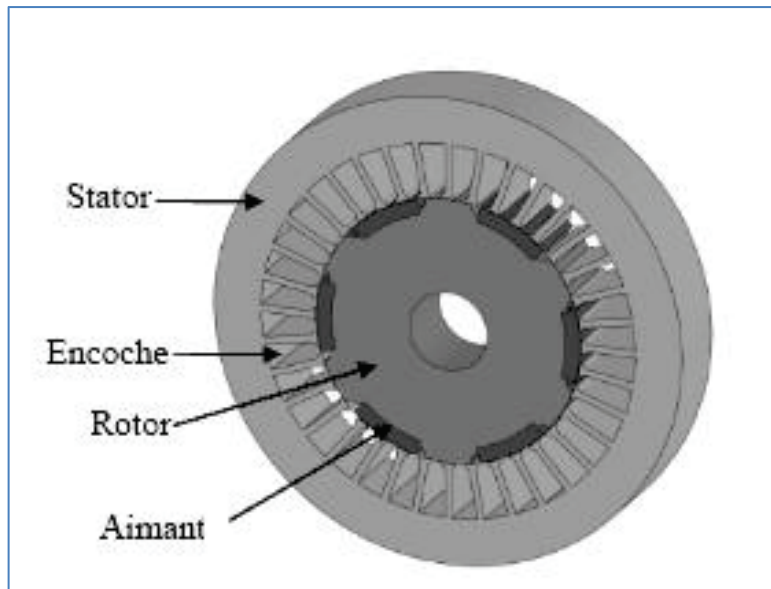


Figure 1.7 : Structure à aimant inséré

I.2.3.4 Structure à aimants enterrés

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor. La robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes. Deux configurations du rotor peuvent être distinguées (Figure 1.8). L'une est à concentration de flux et l'autre à structure classique.

L'avantage de ces deux configurations réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants, permettant ainsi d'assurer des niveaux d'inductions élevées dans l'entrefer [07]. De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la démagnétisation.

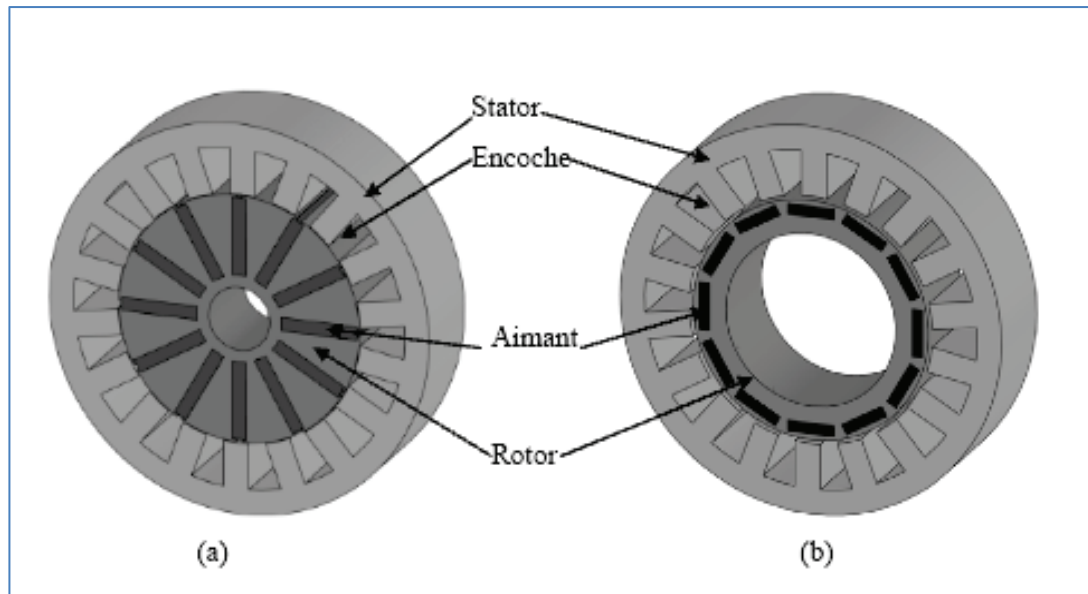


Figure 1.8 : Structure à aimants enterrés : a) avec concentration de flux, (b) structure classique

I.2.3.5 Structure à flux axial (AFPM) :

Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales [07, 09].

Comparées à la structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale. Différentes configurations à flux axial existent : celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (Figure 1.9) et celle à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors (Figure 1.10) ou un seul rotor inséré entre deux stator (Figure 1.11).

L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [08].

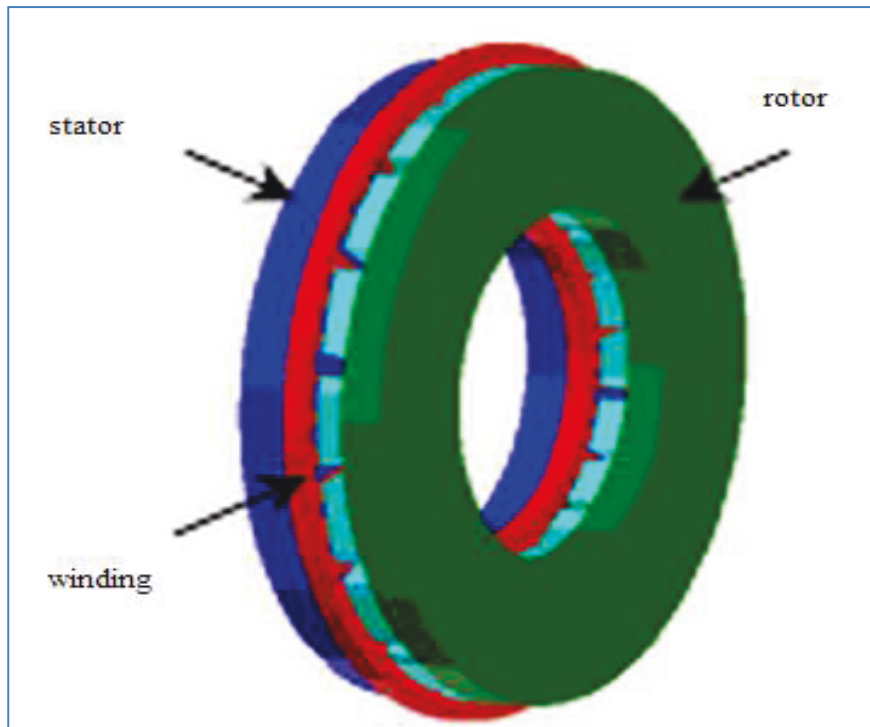


Figure 1.9 : Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator

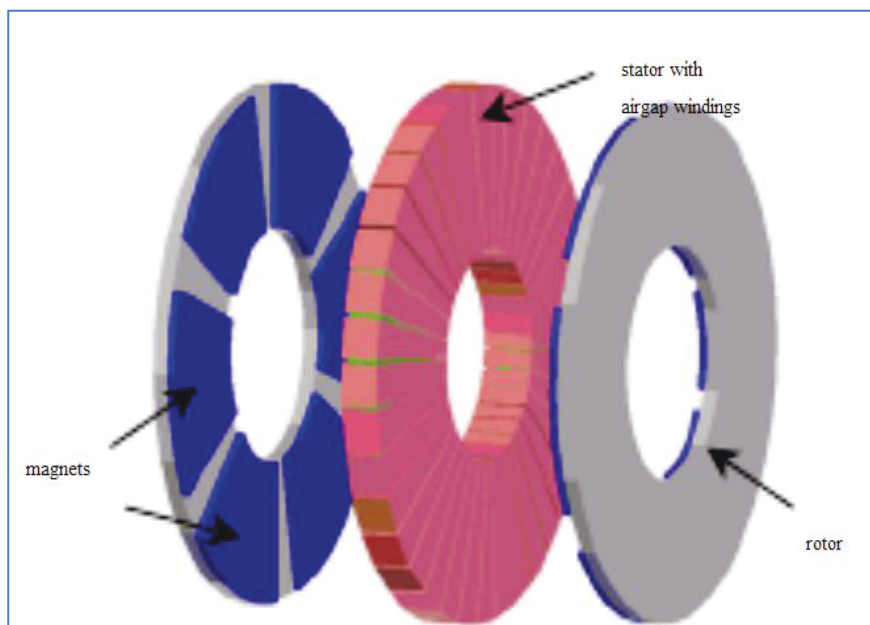


Figure 1.10 : Structure à flux axial avec double rotor et un stator

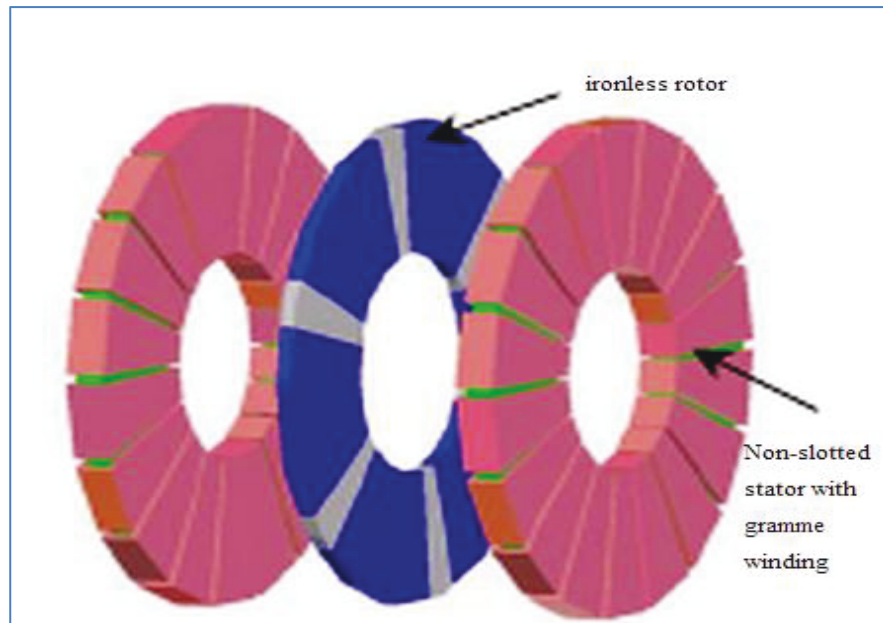


Figure 1.11 : Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor

I.2.4 Configuration des machines PMSM et BDCM

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

- Celle des machines synchrones à aimants permanents à f.c.é.m. sinusoïdale, appelées communément PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), alimentées par des courants sinusoïdaux.
- Celle des machines synchrones à aimants permanents à f.c.é.m. trapezoïdale, appelées communément BDCM ou BLDC (Brushless Direct Current Motor), alimentées par des créneaux de courant de durée égale à 120° ou 180°.

Les PMSM sont généralement utilisées pour assurer un contrôle à haute résolution par l'intermédiaire d'un capteur de position numérique à haute résolution dont le coût peut dépasser celui de la machine [10]. Cette machine développe un couple ne comportant que

de faibles ondulations. Elle trouve son application dans le domaine des machines-outils tel que les polisseuses, fraiseuses, rectifieuses, ect...

Les BDCM nécessitent un capteur de position et une commande plus simple. En effet, pour générer des courants rectangulaires, il suffit de connaître la position du rotor à chaque 60°C, c'est-à-dire 6 fois par période électrique. Les BDCM présentent un couple élevé mais comportent des ondulations importantes qui sont inacceptables dans les applications à grande performances. Ces ondulations sont essentiellement dues à l'effet retardateur des inductances des enroulements du stator lors de la commutation des courants [11, 10].

I.2.5 Applications des machines synchrones à aimants permanents

Ces machines ont trouvé un vaste champ d'applications dans plusieurs domaines (équipement domestique, lecteurs CD, DVD et disques dur d'ordinateur, voiture et vélo électriques, transport, aérospatial, machines-outils, servomoteurs, équipement médical et propulsion des navires). Celles-ci sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts. La figure 1.12 illustre quelques applications de ces machines.



Figure 1.12 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents

I.2.5.1 Avantages

- À puissance nominale, le rendement d'un moteur synchrone est élevé par rapport à un moteur asynchrone ;
- La vitesse d'un moteur synchrone demeure rigoureusement constante, même si la tension d'alimentation ou la charge qu'il entraîne subissent des variations;
- Rapport couple/masse et puissance/masse élevés
- Très bon rendement
- Moindre usure et moins de frais d'entretien (pas de balais, ni de charbons).
- Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence du cuivre et de contacts bagues - balais au niveau de l'inducteur dans ces moteurs.

I.2.5.2 Inconvénients

- Coûts élevés, à cause du prix des aimants
- Problème de tenue en température des aimants (250°C pour le samarium-cobalt)
- Difficulté de défluxage et complexité de son électronique de commande (nécessité d'un capteur de position).

I.3 Aimants Permanents

I.3.1 Différents Aimants Permanents

Par définition : un aimant permanent est un corps qui a la propriété de conserver une très grande aimantation *rémanente*, et qui se désaimante difficilement lorsqu'il a été aimanté. On l'obtient en plaçant le morceau à aimanter dans un champ magnétique intense. Autrefois, on employait presque exclusivement l'acier au carbone trempé, mais la métallurgie moderne a permis de réaliser un grand nombre d'alliages bien supérieurs.

En plus du fer, le constituant principal de ces aimants modernes est soit le chrome, soit le tungstène, soit le nickel. L'aluminium, le cobalt et le titane entrent parfois dans la composition comme éléments secondaires. Citons les plus célèbres comme par exemple l'alnico qui comporte 51 % de fer, 14 % de nickel, 8 % d'aluminium, 24 % de cobalt et 3 % de cuivre [06].

Il est composé d'un alliage de 25 % de samarium, 49 % de cobalt, 12 % de fer, 8 % de cuivre et 6 % de zirconium. Ce deuxième genre d'aimant porte le symbole chimique $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$; à cause de la présence du samarium, il fait partie de la classe des aimants dits à *terre rare*. Cette classe entrecroise également les aimants composés de néodyme, fer bore alias Nd-Fe-B [06].

Concernant les aimants dits *ferrites*, ces derniers sont issus des études approfondies du ferromagnétisme. Composés d'oxydes métalliques comprenant avec l'oxyde ferrique un ou plusieurs oxydes. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une proportion moindre d'oxyde de fer. Ce type d'aimants ont été développés et commercialisés au début des années 50 aux Pays-Bas [04].

Afin de mettre l'évidence entre les différentes caractéristiques principales des aimants, le tableau I.1 s'avère particulièrement utile.

Tableau I.1 : Propriétés des aimants permanents à 20°C [12]

Propriétés	Types d'aimants permanents			
	Alnico	Ferrites	Sm-Co	Nd-Fe-B
Induction rémanente B_r [T]	0.6 à 1.35	0.35 à 0.43	0.7 à 1.05	0.7 à 1.43
Champ coercitif H_c [kA/m]	40 à 130	180 à 400	800 à 1500	800 à 1900
Perméabilité de recul	1.9 à 7	1.05 à 1.15	1.02 à 1.07	1.04 à 1.3
Produit énergétique $(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	20 à 100	24 à 36	140 à 220	80 à 400
Champ de saturation [kA/m]	200 à 600	600 à 1700	1600 à 4000	2000 à 3000
Résistivité [$\mu\Omega\text{cm}$]	47	plus de 10000	86	140 à 160
Dilatation thermique [10 ⁻⁶ /°C]	11.3	13	9	3.4
Coefficient de température de B_r [%/°C]	-0.01 à -0.02	-0.2	-0.045 à -0.05	-0.08 à -0.15
Coefficient de température de H_c [%/°C]	-0.02	0.2 à 0.4	-0.2 à -0.25	-0.5 à -0.9
Température maximale de fonctionnement [°C]	500 à 550	250	250 à 350	80 à 200
Température de Curie [°C]	850	450	700 à 800	310 à 350
Masse volumique [kg/m ³]	7300	4900	8200	7200 à 7500
Prix (€ / Kg)	45	4,5 à 6	220 à 300	80 à 150

La caractéristique magnétique des aimants permanents est représentée dans le second quadrant du plan B-H (Figure. 1.13) :

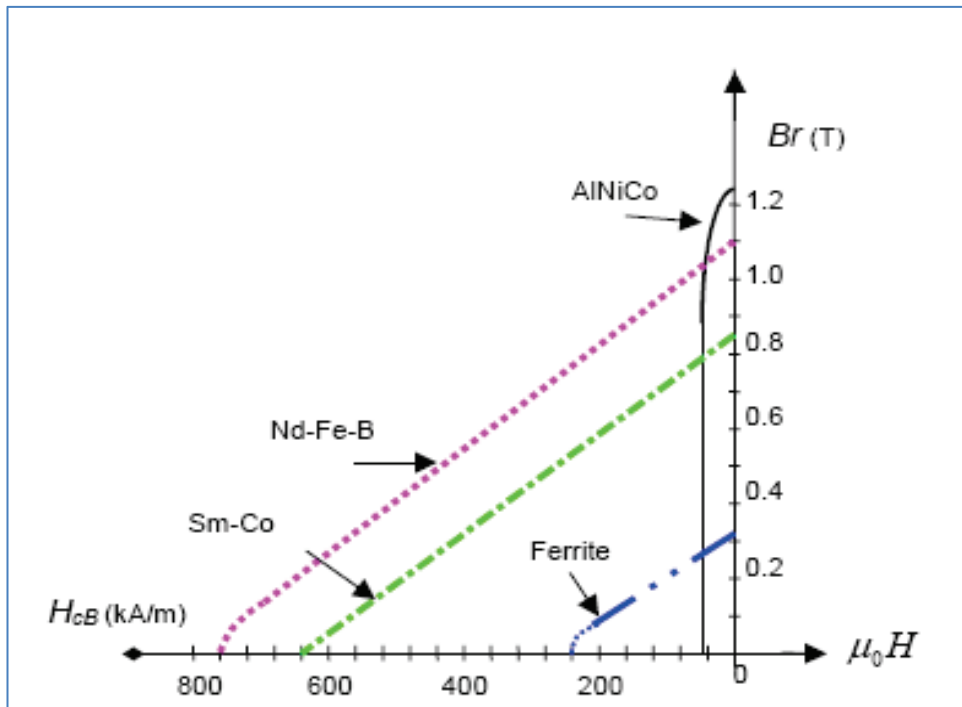


Figure 1.13 : Caractéristiques magnétiques de désexcitation de cinq aimants permanents.

Il existe actuellement des aimants permanents très puissants et plus petit (Figure 1.14) fabriqués avec des alliages complexes à base de fer, nickel, cobalt, cuivre, comme l'alnico, ou des éléments classés dans les terres rares, comme le néodyme.

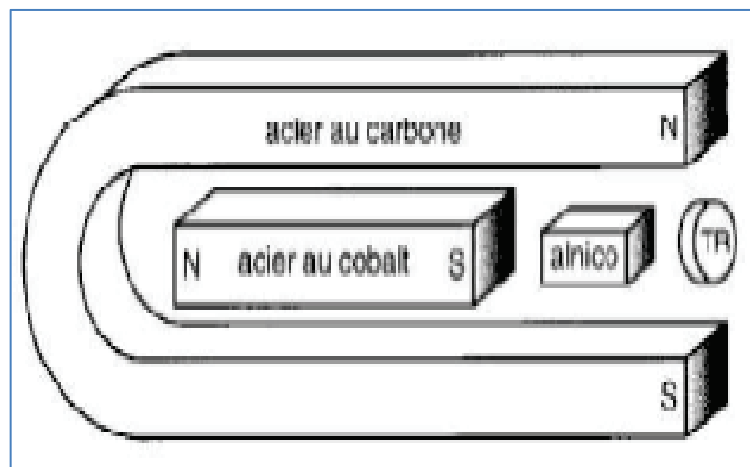


Figure 1.14 : Évolution de la technologie : dimensions relatives de quatre aimants permanents produisant le même flux. L'aimant TR (à terre rare) est 100 fois plus petit qu'un aimant à acier au carbone [06].

I.3.1.1 Hystérésis, champ coercitif, induction rémanente et produit énergétique [06]

D'après la théorie d'Ewing, physicien écossais (1855-1935) qui a apporté une importante contribution à la théorie du ferromagnétisme. Tout se passe comme si un morceau de fer non aimanté était constitué d'un grand nombre des petits aimants élémentaires, tous identiques, orientés au hasard et produisant des champs dans toutes les directions. Les pôles nord et les pôles sud se neutralisent donc, ne donnant ainsi aucun pôle à l'extérieur du morceau de fer. Quand le morceau est placé dans un champ magnétique extérieur, les petits aimants élémentaires s'alignent comme des milliers de petites boussoles. L'orientation des aimants élémentaires est telle que tous leurs pôles nord se dirigent dans le même sens. Les champs magnétiques fournis par chacun d'eux s'ajoutent pour donner un champ magnétique résultant considérable ; il apparaît un pôle nord et un pôle sud aux extrémités du morceau de fer. Dès que le champ magnétique extérieur disparaît, les petits aimants reprennent leur indépendance et s'orientent au hasard, la somme de leurs champs redevient nulle et les pôles du morceau de fer disparaissent.

Si, au lieu du fer doux, on avait placé dans le champ magnétique certaines variétés d'acier, l'aimantation aurait subsisté presque complètement après la suppression du champ. On aurait alors obtenu un aimant permanent artificiel. L'aimantation du fer doux est temporaire, celle de l'acier, permanente. Cette propriété que possède l'acier de retenir son aimantation est mise en évidence quand un tournevis vient en contact avec un aimant permanent : l'aimantation rémanente est suffisamment forte pour que le tournevis puisse soulever des vis et des clous d'acier.

Donc, dans des matériaux spéciaux, les domaines tendent à garder leurs orientations. En effet, par une réaction semblable au frottement, les domaines s'opposent à tout changement d'orientation imposé par un champ extérieur ; de même, une fois orientés, ils essaient de conserver leur orientation en s'opposant de nouveau à tout autre changement. Ce phénomène, qu'on appelle hystérésis, est une propriété commune à tous les matériaux magnétiques. Éluçidons ce phénomène en procédant comme suit : On fait circuler un courant I dans une bobine entourant un tore magnétique (Figure. 1.15a), la densité de flux B dans le circuit magnétique augmente avec le champ magnétique H . Si le flux initial est nul, cette augmentation suit la courbe $0a$ de la Figure. 1.15b, la densité de flux atteignant la valeur B_m pour un champ magnétique H_m

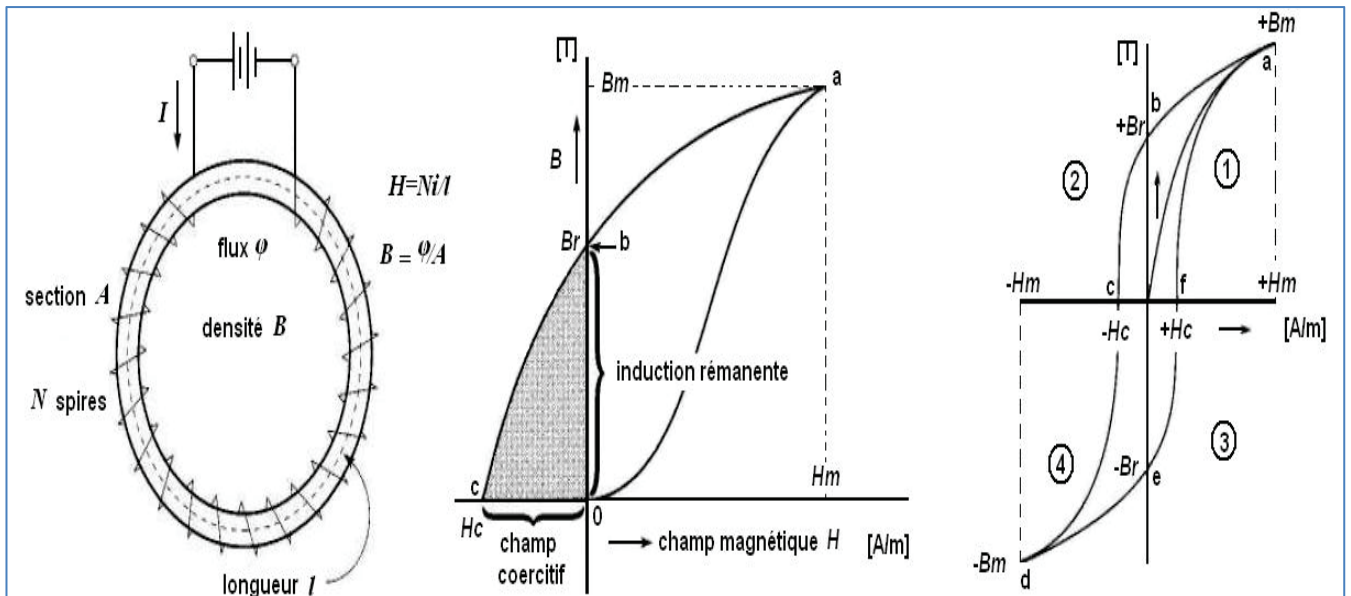


Figure 1.15 : Illustration du cycle d'hystérésis.

Si, maintenant, on fait décroître le courant I , c'est à dire le champ H , jusqu'à zéro, la densité de flux ne suit plus la même courbe, mais une courbe **ab** située au-dessus de **0a**. En effet, quand on réduit le champ à zéro, les domaines que l'on vient d'orienter sous l'influence du champ H tendent à conserver cette orientation. C'est le phénomène d'hystérésis. Donc, lorsque le champ H devient nul, une densité de flux subsiste et conserve une valeur B_r que l'on appelle *densité de flux rémanent ou induction rémanente*.

Si l'on veut faire disparaître complètement ce flux rémanent, il faut renverser le sens du courant dans la bobine et faire croître le champ H jusqu'à une valeur H_c (courbe **bc**). Lorsqu'on décrit la portion de courbe **bc**, les domaines sont contraints de changer d'orientation les uns après les autres, jusqu'à ce que la densité de flux s'annule au point **c**. Le champ magnétique H_c requis pour réduire le flux à zéro s'appelle champ coercitif. Pour réduire la densité de flux de sa valeur B_r jusqu'à zéro, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie. Cette énergie est entièrement convertie en chaleur dans le matériau magnétique. Elle représente le frottement qui se produit lorsque les domaines magnétiques reprennent leur orientation au hasard en passant du point **b** au point **c** sur la courbe. Si l'on continue la procédure, les domaines décrivent un cycle complet (Figure. 1.15c), passant par des densités maximales $+B_m$ et $-B_m$ sous l'effet d'un champ magnétique variant de $+H_m$ à $-H_m$. On obtient une courbe fermée franchissant les quatre quadrants, suivant la séquence **a, b, c, d, e, f, a...**etc.

Certains matériaux jouissent des champs coercitifs énormes : *C'est précisément cette propriété qui distingue les matériaux à aimants permanents des autres matériaux magnétiques.* Les matériaux utilisés pour la fabrication des aimants permanents doivent donc posséder, à la fois, une densité de flux rémanent B_r élevée et un champ coercitif H_c de grande intensité de sorte que l'énergie requise pour les désaimanter soit aussi grande que possible.

Le deuxième quadrant des courbes de désaimantation pour trois types d'aimants permanents, l'Alnico V, l'Indox® et l'acier au carbone sont montrées à la Figure. 1.16. Elles représentent la portion bc de la courbe que nous venons de discuter.

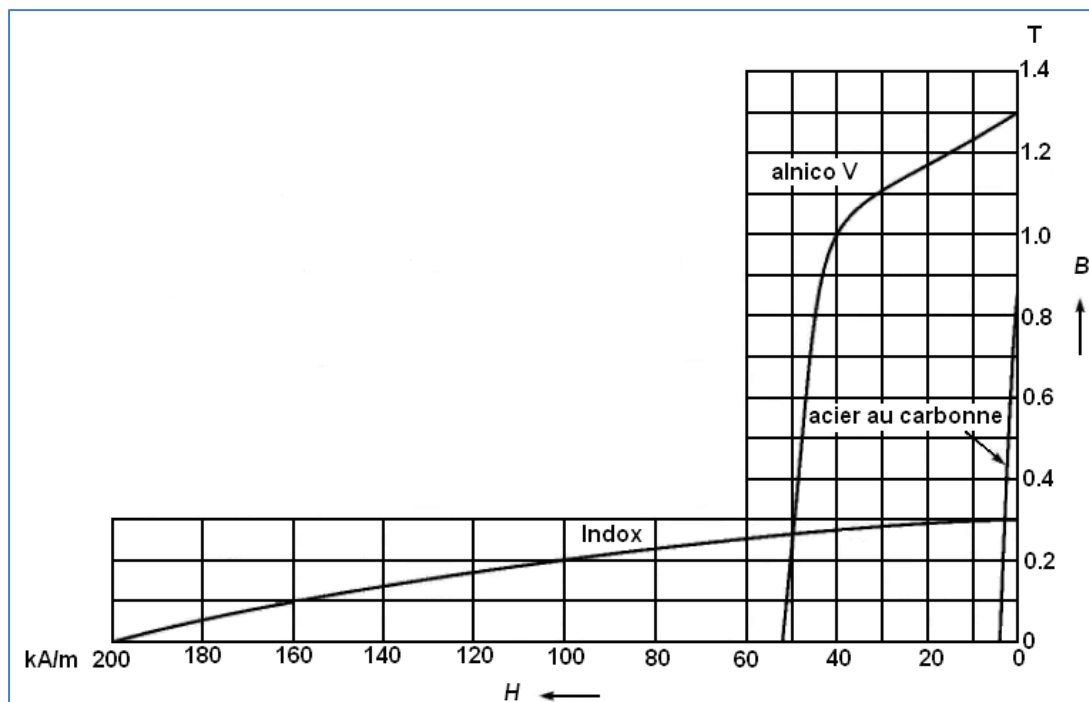


Figure 1.16 : Courbes de désaimantation de trois matériaux utilisés dans les aimants permanents.

On constate que L'Alnico a une densité de flux rémanent de 1,3 T et un champ coercitif de 52 000 A/M. La surface située en dessous de la courbe comprend environ 52 carreaux, ayant chacun une superficie de :

$$1 \text{ carreau} = 10 \text{ kA/m} \times 0.1 \text{ T} = 1000 \text{ A.T/m}$$

L'énergie requise pour désaimanter l'alnico est donc :

$$\text{Énergie} = 52 \times 1000 \text{ A.T/m} = 52 \text{ kJ/m}^3$$

Un aimant permanent en Alnico V est presque 25 fois plus petit qu'un aimant en acier trempé créant le même champ. Découvert par hasard en 1932 par le physicien japonais I. Mishima, l'Alnico, par sa dureté magnétique, a révolutionné l'industrie des dispositifs magnétiques. En effet, pour la première fois, on pouvait réaliser un aimant permanent plus petit qu'un électro-aimant de même force. L'Alnico est extrêmement dur et cassant si bien que l'on peut seulement changer sa forme en meulant les pièces coulées. Depuis quelques années, les aimants les plus puissants sont ceux fabriqués avec du cobalt allié avec l'yttrium ou une des terres rares, comme le néodyme et le samarium. Noter, par exemple, les propriétés B_r et H_c du Recoma® qui sont respectivement 0.8 T et 560 kA/m. Pour un même volume, ils sont 3 fois plus puissants que les meilleurs aimants en Alnico. Le seul inconvénient est leur coût relativement élevé.

Dans la plupart des montages comportant un aimant permanent, on désire produire un flux dans un entrefer dont la longueur et la section sont connues. On peut donc calculer la FMM requise pour l'entrefer et, par conséquent, celle que l'aimant permanent doit produire. Comme la valeur de H n'est pas constante, mais varie avec B , on doit se demander quelle valeur on doit choisir ? En pratique, on choisit le point de la courbe de désaimantation où le produit BH est maximal. On peut prouver en effet que ce choix assure une quantité minimale de matériau magnétique.

Le produit BH en un point correspond à la superficie du rectangle formé à ce point, comme l'indique la Figure. 1.17.

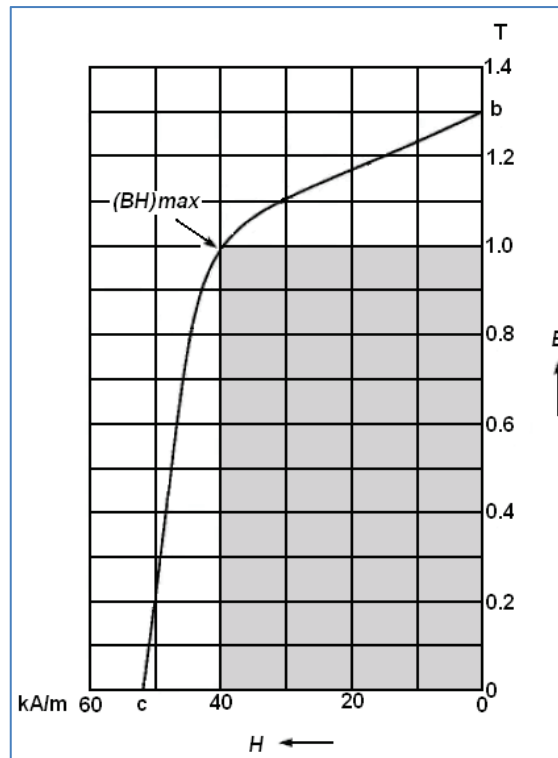


Figure 1.17 : Représentation du point à énergie maximale de l'Alnico V.

À mesure que l'on se déplace sur la courbe bc, il est évident qu'il existe un point unique BH où le rectangle aura une superficie maximale. Le produit (BH) max s'appelle produit énergétique du matériau. Dans le cas de l'Alnico V, ce point correspond à $B = 1 \text{ T}$, $H = 40 \text{ kA/m}$. Le produit énergétique de ce matériau est donc :

$$(BH) \text{ max} = 1 \text{ T} \times 40 \text{ kA/m} = 40 \text{ kJ/m}^3$$

Tout matériau magnétique possède ainsi une valeur de H et une valeur de B optimales assurant la meilleure utilisation du matériau magnétique.

On juge la qualité d'un matériau à aimant permanent à la valeur maximale de son produit énergétique. Pour un champ donné, plus ce produit est grand, plus l'aimant sera petit. Ainsi, l'Alnico V a un produit énergétique $(BH) \text{ max} = 40 \text{ kJ/m}^3$ tandis que l'acier au carbone, utilisé couramment dans les aimants permanents avant 1935, a un $(BH) \text{ max}$ de $1,2 \text{ kJ/m}^3$ seulement. Par conséquent, pour produire un flux quelconque dans un circuit magnétique donné, un aimant permanent en Alnico V est $40/1,2 = 33$ fois plus petit qu'un autre en acier au carbone. Les aimants permanents encore plus puissants composés de néodyme-boron-fer atteignent des produits énergétiques de l'ordre de 380 kJ/m^3 .

Il n'est pas donc difficile de comprendre pourquoi l'acier au silicium n'est jamais employé comme aimant permanent ; son produit énergétique n'est que de 0,005 kJ/m³.

Afin d'épiloguer cette section, un aimant permanent se distingue des autres matériaux magnétiques par la grande surface de la partie **bc** (deuxième quadrant) de sa courbe de désaimantation B-H. La surface comprise sous cette courbe est une mesure de l'énergie requise pour désaimanter l'aimant. Cette courbe passe par trois points caractéristiques de l'aimant : sa densité de flux rémanent B_r , son champ coercitif H_c , et le point où le produit énergétique B-H est maximal.

I.3.1.2 Stabilité des aimants [4]

Le flux produit dans un circuit magnétique par un aimant, n'est pas rigoureusement stable ! Il décroît avec le temps et varie sous l'influence de contraintes extérieures. C'est pourquoi, il nous a paru utile d'ajouter cette section qui a pour objet d'énumérer les origines principales de désaimantation des aimants :

1. Les variations de l'induction peuvent avoir pour origine les modifications de structure de l'alliage qui constitue le matériau magnétique : soit que cette structure soit instable comme les aciers martensitiques, ou les phénomènes de diffusion dans l'état solide provoquent un tel réarrangement des atomes ;

2. Les champs magnétiques extérieurs peuvent modifier l'arrangement des domaines ou l'alignement des moments magnétiques et par suite une réduction de l'induction rémanente ;

3. Les chocs mécaniques contribuent également pour la désaimantation qui reste imperceptible, on estime qu'un aimant sujet à des essais mécaniques retient 99 % de son aimantation originale ;

4. Les expériences effectuées sur des aimants travaillant dans des réacteurs nucléaires ont montré que ces matériaux sont peu sensibles aux irradiations par les neutrons ;

5. L'un des ennemis des aimants : la corrosion qui s'exacerbe lors de la présence des acides et des solutions fortement alcalines ;

6. La présence d'un corps ferromagnétique étrange, tel qu'une masse de fer, au voisinage ou en contact d'un aimant placé ou non dans son circuit magnétique, peut être une cause sérieuse de désaimantation irréversible lorsque cette masse est placée du côté latérale de l'aimant ;

7. À mesure que la température augmente, la densité de flux produite par l'aimant diminue et, à une température élevée (point de Curie), l'aimant perd complètement sa perméabilité de même que ses propriétés d'aimant permanent. Cette haute température provoque en effet une vibration atomique intense qui détruit l'orientation des domaines.

8. Une désaimantation peut avoir un caractère réversible, le retour aux conditions initiales permet alors de retrouver les caractéristiques de l'aimant. Elles peuvent être irréversibles de telle sorte qu'une réaimantation est nécessaire pour obtenir à nouveau les caractéristiques initiales. Dans certains cas, comme pour les modifications structurales, ce retour est impossible par une nouvelle aimantation : la modification est permanente !

Remarque : Pour ce qui concerne notre application (traction électrique), le risque de désaimantation des aimants est introuvable

I.4 Autopilotage

I.4.1 Principe de l'autopilotage

Un moteur synchrone fonctionnant en mode non autopiloté est fortement instable. Parce que la dynamique des parties mécaniques est beaucoup plus lente que celle des parties électriques, une variation trop rapide des courants de l'induit donc du champ statorique, ne permet pas au champ rotorique de s'accrocher. D'autre part, pour une alimentation donnée (amplitude de la tension et du courant), il existe une charge limite au-delà de laquelle la machine ne peut continuer à fournir le couple nécessaire [13].

Une première manière de faire varier la vitesse d'un moteur synchrone est de l'alimenter par des courants de fréquence variable. Cela est assuré par un convertisseur statique, de fréquence variable. Dans ce cas, il est indispensable de contrôler non seulement en amplitude mais aussi en fréquence ou en phase, les caractéristiques

d'alimentation. La machine synchrone excitée de manière indépendante entraîne un capteur de position qui permet :

La détection de la position relative rotor/stator, c'est-à-dire, la position du champ inducteur par rapport au champ induit.

La délivrance de signaux à une fréquence synchronisée avec la fréquence de rotation de la machine. Ces signaux sont mis en forme, amplifiés et isolés par l'intermédiaire de transformateur d'impulsions et envoyés sur les gâchettes de la machine synchrone. On dit que la machine est « autopilotée ». L'alimentation et l'autopilotage des machines synchrones ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans le but d'obtenir un couple uniforme et constant dans une grande gamme de vitesses, et d'établir une commande par microprocesseur simple pour concurrencer les moteurs à courant continu.

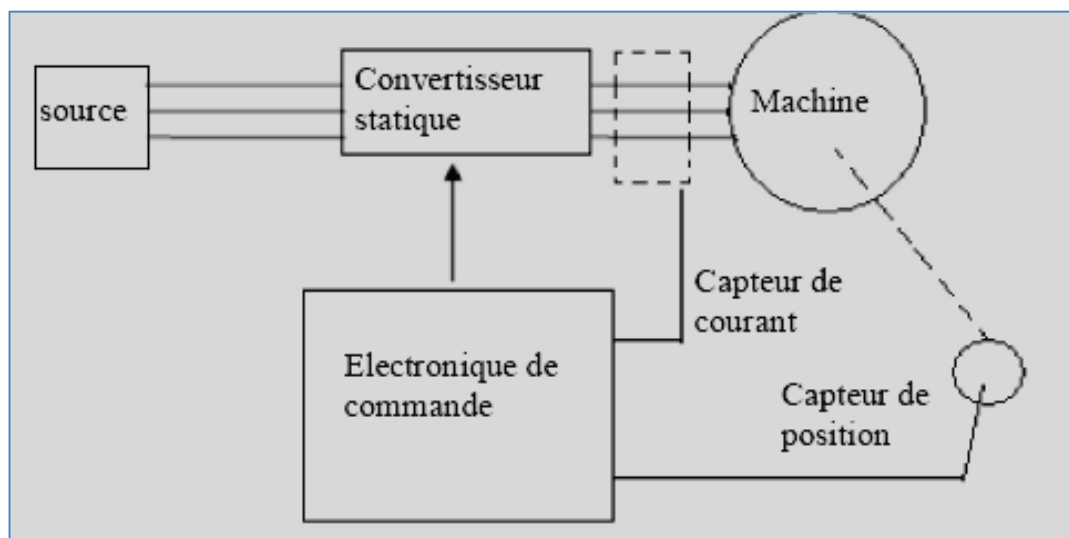


Figure 1.18 : Schéma de Principe D'autopilotage d'une Machine Synchrone

I.4.2 Les capteurs de position

Quel que soit le type de machine et d'alimentation associée, le principe d'autopilotage nécessite la synchronisation des grandeurs électriques d'alimentation avec la vitesse de rotation. Les technologies utilisables passent par la mesure de la position du rotor qui peut être optique ou électromagnétique. Les codages envisageables peuvent être

de type relatif ou absolu, mais l'alimentation de la MSAP requiert la connaissance de la position absolue [14].

I.4.2.1 Capteur électromagnétique (résolver)

I.4.2.1.1 Description

Le résolveur est un capteur de position qui permet de déterminer la position angulaire d'un arbre en rotation. Il est majoritairement utilisé dans les applications d'autopilotage des machines synchrones. Ce dernier doit être associé à un module digitaliseur pour réaliser une commande numérique [15].

I.4.2.1.2 Fonctionnement

Le résolveur comporte deux circuits magnétiques, l'un sur le stator, l'autre sur le rotor, équipé de bobinages. Le stator est formé de deux enroulements en quadrature et le rotor quant à lui n'a qu'un seul enroulement qui est alimenté par une tension alternative par l'intermédiaire d'un transformateur tournant.

Les tensions délivrées par les enroulements statoriques sont des tensions alternatives dont l'amplitude est modulée en fonction de la position du rotor de la forme $(\cos \omega t . \sin \omega t)$ et $(\cos \omega t . \cos \omega t)$. Ces tensions contiennent implicitement l'information de la position du rotor notée ωt [14].

Pour obtenir une information de position numérique, il faut associer au résolveur un système digitaliseur, avec un traitement électronique du signal. L'ensemble doit fournir un codage de la position sur « n » bits. Le rôle du module digitaliseur associé au résolveur est de traiter ces signaux (tension d'alimentation du rotor et tensions délivrées par le stator) de façon à extraire l'information de position sous la forme d'un mot de « n » bits.

Le principe de cette conversion est :

- Générer sous forme numérique un angle φ .
- Comparer cet angle φ à la valeur de θ délivrée sous forme analogique implicite par le résolveur.
- Ajuster en permanence l'angle φ de façon à annuler la différence $t - \varphi$.

Lorsque cette différence est nulle, l'angle φ exprimé sous forme numérique, représente effectivement la position du rotor.

I.4.2.1.3 Caractéristiques

- Par rapport aux capteurs optiques, le résolveur associé au digitaliseur se présente comme une solution intéressante, notamment au niveau de la robustesse et de la tenue en température.
- L'intérêt du capteur résolveur réside dans sa robustesse et sa grande fiabilité.
- Il présente une grande précision
- Ce type de capteur est bien adapté aux commandes purement analogiques.

I.4.2.2 Capteur à effet hall

I.4.2.2.1 Principe de l'effet hall

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est parcouru par un courant I_{ch} et soumis normalement aux grandes faces à un champ d'induction magnétique B , on constate, entre les deux faces parallèles à la direction du courant, l'existence d'une tension appelée tension de Hall (V_h).

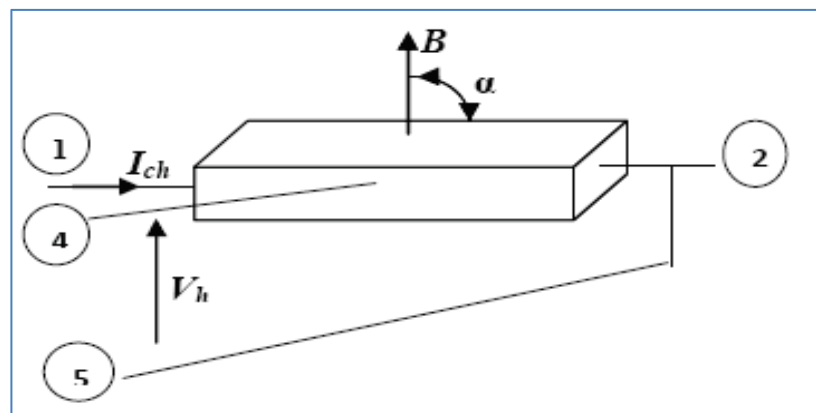


Figure 1.19 : Schéma de principe de la sonde à effet Hall

L'amplitude de cette tension dépend à la fois du courant, du champ B, d'une constante dépendant des caractéristiques du semi-conducteur et de l'angle entre le champ B et la normale de la surface. Un capteur à effet Hall est basé sur ce fonctionnement.

$$V_h = B \cdot I_c \cdot \sin\alpha \quad 1.2$$

L'intégration des sondes dans des circuits intégrés a permis en outre :

- De faciliter la mise en œuvre par les capteurs à 3 fils.
- De disposer des sorties amplifiées
- Ou de disposer des sorties logiques
- Les capteurs à effet hall sont beaucoup utilisés en raison de leur mise en œuvre aisée, de leur petite dimension et de leur précision.

I.4.2.3 Codeur de position

I.4.2.3.1 Introduction

Les informations acquises par les capteurs et délivrées sous forme analogiques, doivent très fréquemment être traitées par des calculateurs digitaux qui assurent l'exploitation rapide et précise, ceci est rendu possible par l'utilisation de convertisseurs analogiques/numériques, qui en recevant le signal du capteur, délivrent au calculateur l'information numérisée.

Dans le cas des déplacements, il est cependant possible de concevoir des capteurs qui assurent de façon immédiate la traduction d'une position linéaire ou angulaire en un mot binaire qui la définit. Cependant comme dans tout dispositif de conversion numérique d'une grandeur, celle-ci se trouve quantifiée : un nombre limité de positions peut être distingués et la résolution est donc toujours finie [16], [17].

I.4.2.3.2 Capteur optiques

Les éléments de choix de ce type de codeur de position interviennent d'une part au niveau de la nature de la détection (photoélectrique par exemple) et du niveau de la qualité de la détection (précision, nombre de points par tour, rapidité). D'un point de vue économique, il apparaît a priori judicieux d'utiliser un type de capteur plus rudimentaire qu'un capteur électromagnétique [14].

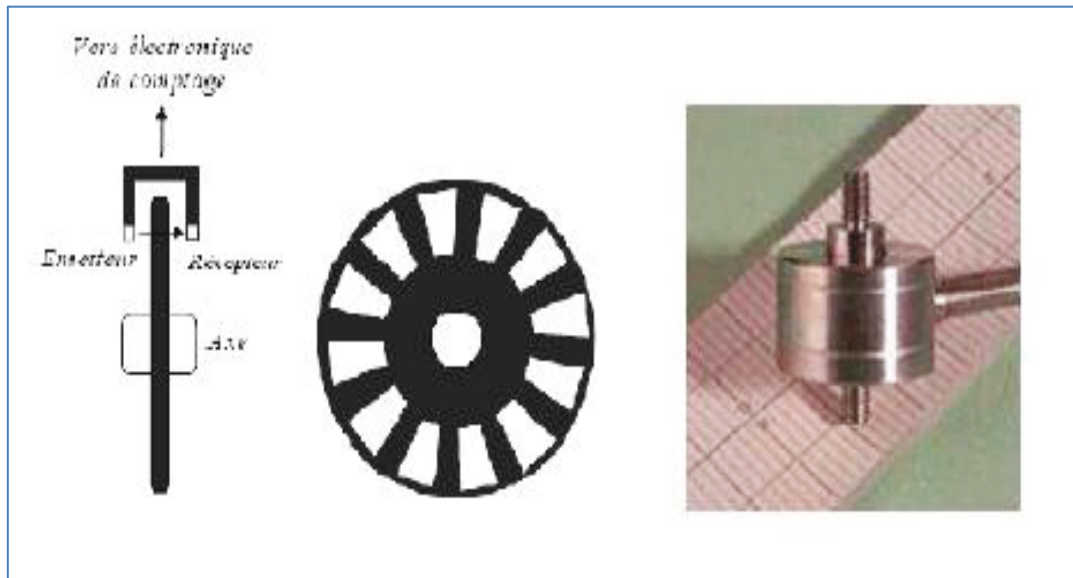


Figure 1.20 : Codeur incrémental et son dispositif de lecture [18]

I.4.2.4 Codeur incrémental

Les codeurs incrémentaux, sont destinés à des applications de positionnement et de contrôle du dépassement d'un mobile par le comptage des impulsions qu'il délivre.

I.4.2.4.1 Fonctionnement

Le codeur optique incrémental (figure 1.21) est un disque divisé en secteurs opaques et transparents. Un émetteur lumineux est placé d'un côté, et un récepteur photosensible de l'autre. Lors de la rotation du disque, un signal digital, dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse, est émis. La plupart des codeurs fournissent deux signaux déphasés d'un quart de période afin de connaître le sens de rotation. Une encoche unique,

située sur le côté droit, fournit un signal permettant de déterminer la position absolue du moteur une fois par tour. Le nombre d'encoches sur un tour varie habituellement entre 100 et 6000, même s'il peut monter bien au-delà.

L'avantage de ce type de composant est son coût réduit, spécialement pour des systèmes à nombre d'encoches peu élevé, mais il faut considérer comme acceptable le fait de ne pas connaître la position absolue du moteur avant un tour complet.

I.4.2.4.2 Caractéristiques des codeurs incrémentaux

Le codeur incrémental est moins performant et moins onéreux, mais il est toutefois utilisé dans bon nombre d'applications : notamment lorsque on cherche des performances standards.

Il est sensible aux coupures du réseau, ce qui entraîne la perte de l'information et cela jusqu'à l'apparition d'un nouveau top zéro.

La fréquence des signaux générés étant généralement élevée, il faudra donc vérifier que le système de traitement est assez rapide pour prendre en compte tous les incréments (impulsions) délivrés par le codeur : car le non comptage d'une impulsion induit une erreur de position qui ne peut être corrigée que par la lecture du top zéro.

Le codeur incrémental semble être le plus simple car il utilise seulement un détecteur et un codage simple. Cependant, dans l'application envisagée, il faut lui adjoindre un système de remise à zéro pour obtenir la position effective du rotor.

I.4.2.5 Codeur absolu

Les disques (figure 1.22) sont divisés en « n » surfaces égales (n secteurs) à l'intérieur desquels se trouve matérialisé le mot binaire associé à la position à traduire selon un code et une technologie déterminés.

Les « n » bits constituant chacun des mots sont matérialisés sur « n » pistes concentriques, (le nombre « n » fixe la résolution du disque).

Contrairement au codeur incrémental, le disque du codeur absolu possède un grand nombre de pistes, chaque piste est munie d'une diode émettrice d'un faisceau lumineux et

d'une diode photosensible. Plus il y a de pistes, plus la lecture angulaire est précise. Une lecture optique permet de déchiffrer les bits. Ces derniers sont dans chaque secteur, qui correspond lui-même à une position du mobile. Le nombre de pistes ou de bits fixe le nombre de positions : 1 piste=2 positions, 2 pistes=4 positions,.....n pistes=2n positions.

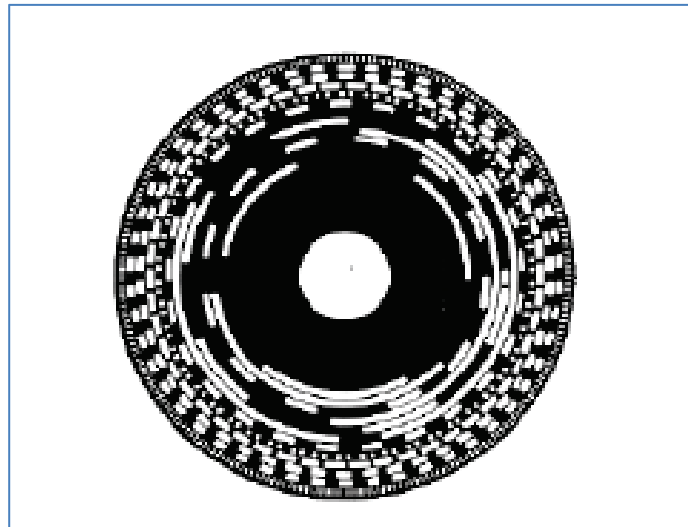


Figure 1.21 : Codeur absolu [15]

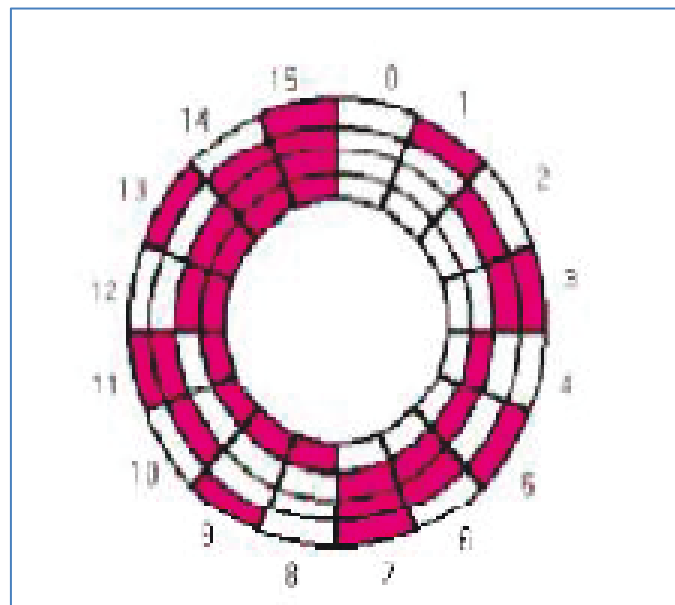


Figure 1.22 : Exemple de codage sur 4 bits [18]

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté succinctement les différentes structures de machines synchrones à aimants permanents. Comme il a été souligné, la classification de ces machines en deux types de catégories, (RFPM ou AFPM) et (PMSM ou BDCM), pour se faire, respectivement, selon la direction du flux (axiale ou radiale) et selon leur mode d'alimentation (sinusoïdale ou en créneaux). Une comparaison entre les machines de type PMSM et celles de type BDCM comportant leurs avantages et leurs limitations a été rapportée. Le présent statut de ces machines montre qu'elles possèdent un potentiel élevé pour une plus large utilisation.

De plus, dans un deuxième temps nous avons traité dans le sujet des aimants permanents : types, spécifications, ainsi que les facteurs contribuant pour les désaimanter ont été présentés également.

Enfin, dans la troisième partie nous avons vu l'autopilotage ainsi que les différents capteurs.

Dans le prochain chapitre on abordera le banc d'essai.

CHAPITRE II

Présentation du banc d'essai

II Etude de projet

II.1 Introduction

Le département Energie de l'institut FEMTO-ST conduit des recherches dans le domaine général de l'énergie et en particulier dans celui de l'énergie électrique. Il participe à de nombreux projets collaboratifs avec de grandes entreprises sur la conception innovante de moteurs électriques à aimants permanents (General Electric, Alstom Transport, Renault...).

Dans ce cadre, le laboratoire dispose de plusieurs machines électriques de puissance réduite (quelques kilowatts) réalisés dans le cadre de ses contrats. Ces machines ont été caractérisées sommairement.

Aussi, dans ce contexte, l'objectif du stage est de réaliser des caractérisations détaillées de ces machines afin de mettre en place une base de données expérimentales utile pour le développement de recherches futures au sein du laboratoire. Ces caractérisations expérimentales seront réalisées afin de comparer les modèles théoriques et les données expérimentales.

Les expérimentations portent sur le moteur synchrone à aimant permanent constituer de rotors géométriquement implanté différemment les uns des autres.

Les modèles théoriques ont été réalisés par une personne réalisant sa thèse sur ce prototype de moteur.

Dans un premier temps, une prise en main du banc d'essai était nécessaire, afin de pouvoir le manipuler sans difficulté, durant les changements des différents types de rotor.

II.2 Présentation du banc d'essai

Le banc est composé d'un moteur asynchrone de 13kW, servant de charge pour des tests en moteur et de moteur d'entraînement pour des tests en mode générateur, d'un prototype de moteur synchrone de 7kW, tous les deux reliés par un accouplement souple, d'un codeur incrémental 1024 pas/tour pour le MAS, d'un capteur de position pour la MSAP et de deux variateurs de vitesse, un pour chaque moteur.

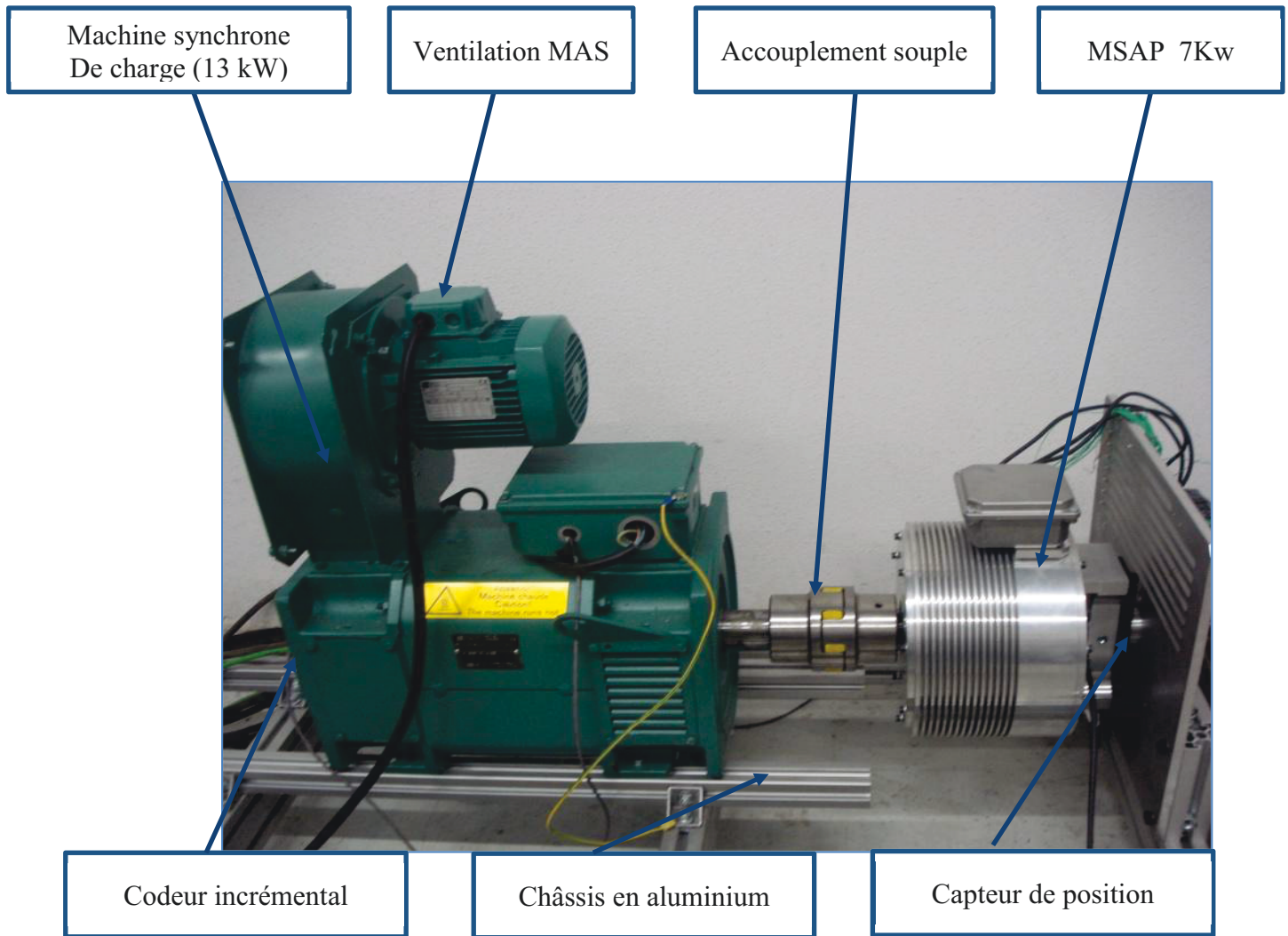


Figure 2.1 : Figure présentant le banc d'essai

Le châssis est conçu à partir de profilés en aluminium dimensionnés pour permettre de résister en torsion aux couples prévus. Il permet d'autre part un réglage aisé autorisant l'ajout ou non d'un capteur de couple ou l'utilisation de machines d'essai différentes.

L'installation est aussi composée de 4 types de rotor. Chaque type de rotor possède un emplacement de ses aimants différents les uns des autres, comme illustré dans la figure 2.2. Les essais vont se porter sur ces différents rotors qui seront vu au chapitre III.



Figure 2.2. Figure présentant les différents types de rotor

II.2.1 Les différents rotors

Lors de la phase de manipulation, comme on était en présence de 4 rotors différents au niveau des implantations des aimants, il fallait connaître le montage et démontage de celui-ci. Pour ce faire, un manuel de manipulation a été conçu afin de pouvoir effectuer le changement du rotor.

Le manuel est fourni en annexe 1.

Pour chaque rotor il fallait effectuer un essai à vide, un essai en court-circuit puis différents essais en charge.

Le premier rotor utilisé est un rotor à aimants en surface (Figure 2.3). Le deuxième rotor, est un rotor à aimants insérés en forme de « U » (Figure 2.5). Le troisième rotor, est un rotor à aimants insérés en forme de « I » (Figure 2.7). Enfin le quatrième rotor, est un rotor à aimants insérés en forme de « O » (Figure 2.9).

II.2.1.1 Rotor à aimants en surface

Le rotor est composé d'aimants se présentant sur la surface de celui-ci. On peut voir qu'on est en présence de 11 paires de pôles sur le rotor. A droite de la photo ci-dessous, on peut voir la forme des tôles empilées.

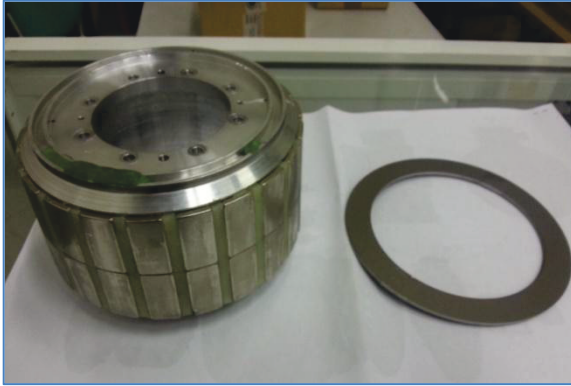


Figure 2.3. Rotor à aimants en surface

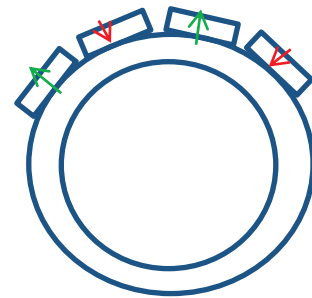


Figure 2.4. Sens des aimants rotors à aimant en surface

II.2.1.2 Rotor à aimants en forme de «U»

Le rotor est composé d'aimants permanents insérés sous forme de « U ». A droite de la photo ci-dessous, on peut voir la forme des tôles empilées. Il y a aussi 11 paires de pôles pour ce rotor.



Figure 2.5. Rotor à aimant en «U»

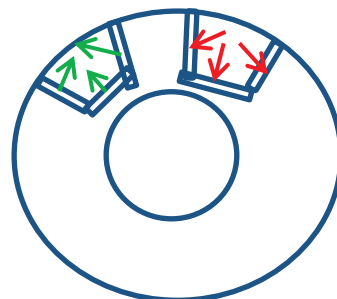


Figure 2.6. Sens des aimants rotors en «U»

II.2.1.3 Rotor à aimants en forme de «I»

Le rotor ci-dessous est composé d'aimants permanents insérés sous forme de « I ». A droite de la photo ci-dessous, on peut voir la forme des tôles empilées. Il y a au total, 11 paires de pôles.

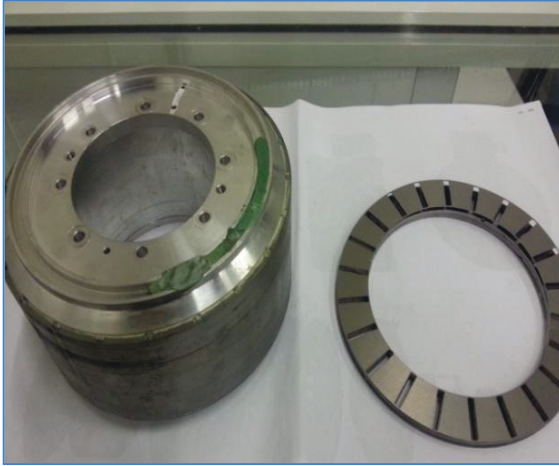


Figure 2.7. Rotor à aimant en «I»

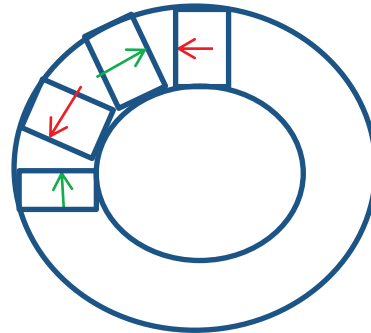


Figure 2.8. Sens des aimants pour rotor en «I»

II.2.1.4 Rotor à aimants en forme de «O»

Le rotor ci-dessous est composé d'aimants permanents insérés sous forme de « O ». A droite de la photo ci-dessous, on peut voir la forme des tôles empilées. Il y a au total, 11 paires de pôles.

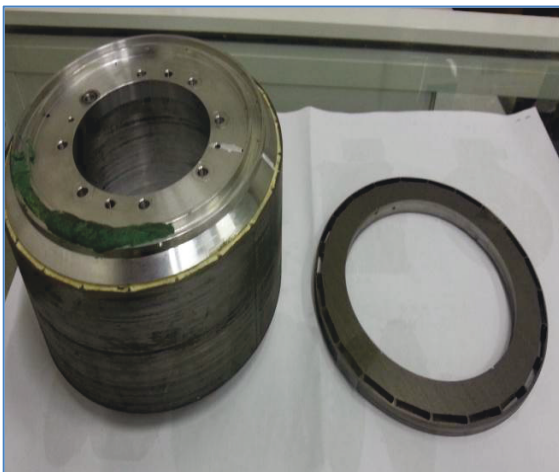


Figure 2.9. Rotor à aimant en «O»

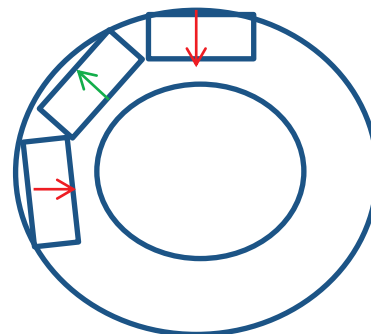


Figure 2.10. Sens des aimants pour rotor en «O»

II.2.2 Les différentes caractéristiques du banc

La machine auxiliaire est une machine asynchrone Leroy Somer de référence CPLS – 132S 0605 IP23 / B3 - A1 - F - A - R dont les principales caractéristiques sont données ci-dessous :

Caractéristiques électriques :

Puissance constante à 13,4Kw

Point nominal : 13,4 Kw / 751 rpm / 27.3Hz / 170Nm / 30.6A sous 360V

Caractéristiques mécaniques :

Fixation moteur avec pattes, position de montage IM1001(IMB3)

Protection thermique par 1 jeu de 3 sondes CTP 150°C

Ventilation forcée radiale en position A (sur le dessus, montée sur palier arrière)

Roulement à rouleaux coté entraînement "DE"

Codeur incrémental 1024 Pts / 5V

Un couple nominal de 170 N.m est garanti dans la plage de vitesse de 0 à 751 tr/min. La zone de défluxage s'étend jusqu'à 1 333tr/min à puissance constante de 13,4Kw.

Le bobinage est adapté pour fournir un couple de 25 Nm à 4200tr/min pendant 30 secs. Le couple transitoire est de 280 Nm pendant 60 sec de 0 tr/min à 751 tr/min toutes les 10mn (avec variateur SP27T). Ces adaptations permettent de couvrir la caractéristique de couple permanent et maximal transitoire de la machine prototype de 0 à 4200 tr/min.

La forme de la caractéristique couple/vitesse et puissance/vitesse de la machine asynchrone est donnée en figure 2.11.

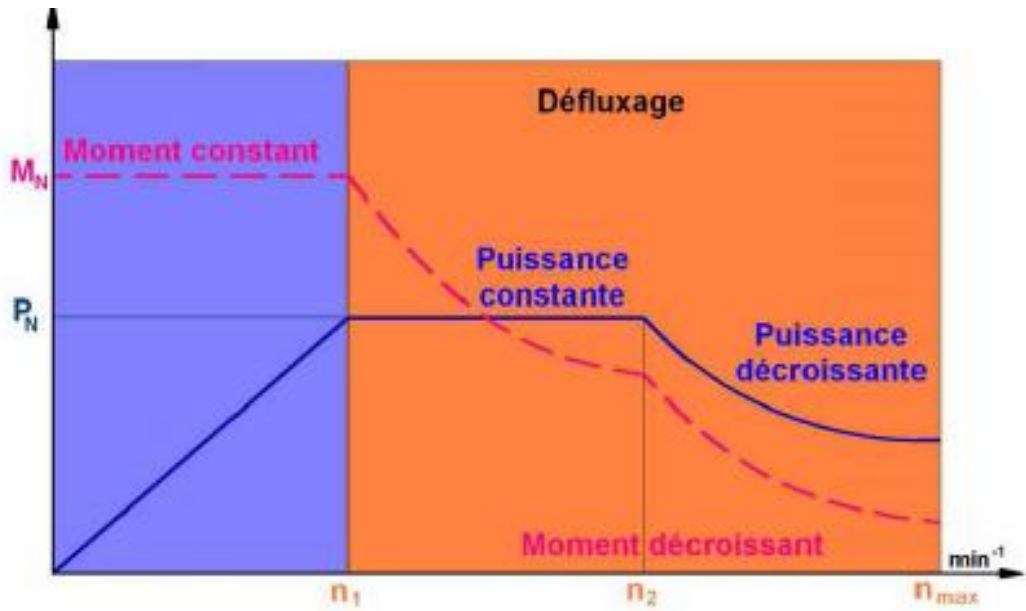


Figure 2.11. Caractéristique couple/vitesse et puissance/vitesse MA

II.2.2.1 Onduleur d'alimentation et armoire électrique

Les machines électriques sont pilotées par des variateurs SP27T dont les principales caractéristiques sont énumérées ci-dessous :

Tableau II.1. Tableau récapitulatif des caractéristiques machines

UNIDRIVE SP			Surcharge Maximum			Surcharge réduite		
Taille	LS	CT	P _{mot} à 400 V (kW)	I _{sp} (A)	Courant Crête (A)	P _{mot} à 400 V (kW)	I _{sp} (A)	Courant Crête (A)
3	SP27T	SP3402	18,5	40	60	22	43	47

Le convertisseur SP27T représenté ci-dessous convient à la fois au pilotage de la machine prototype (MSAP) que de la machine asynchrone de charge, ce qui permet d'interconnecter les deux variateurs par le bus continu sans précautions particulières.

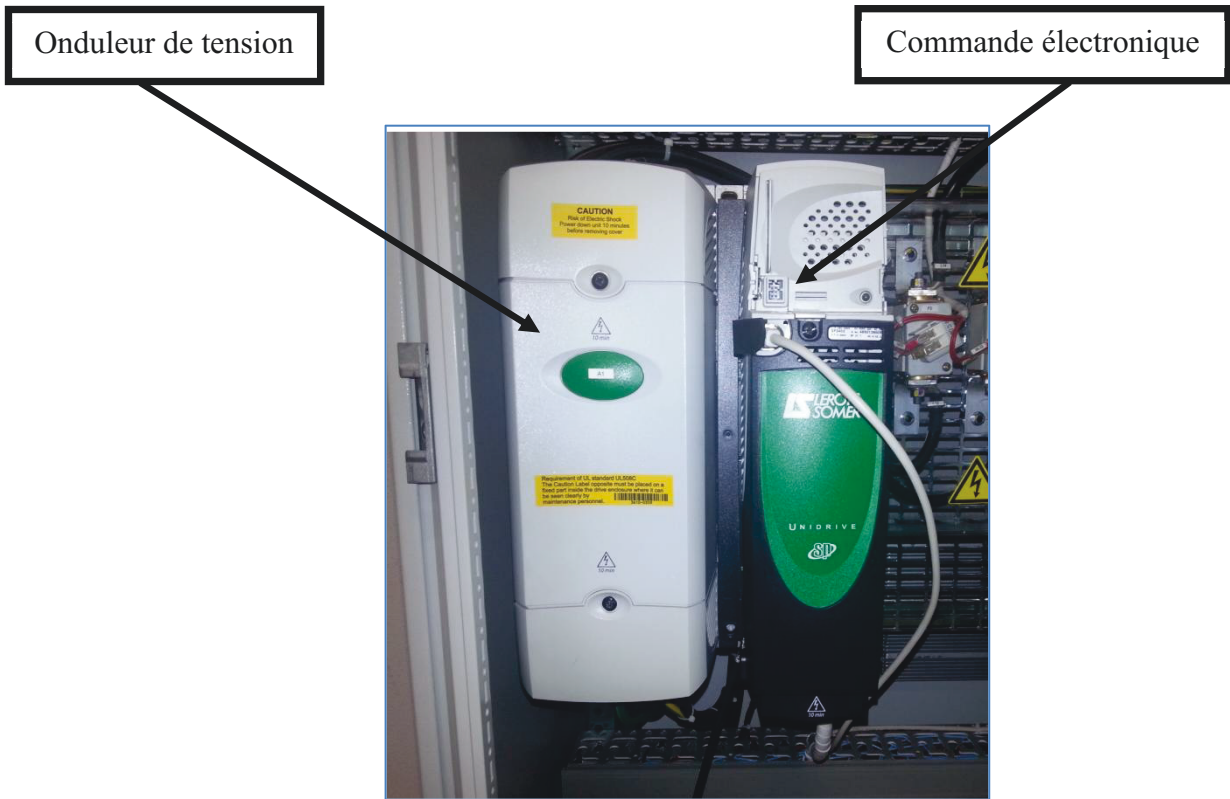


Figure 2.12. Ensemble onduleur et commande

Le principe de connexion ainsi que l'implantation physique sont représentés ci-dessous :

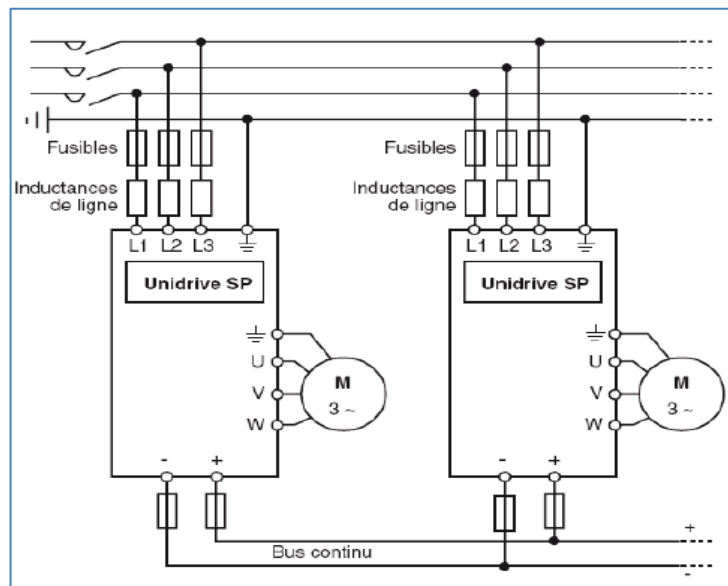


Figure 2.13. Schéma de connexion

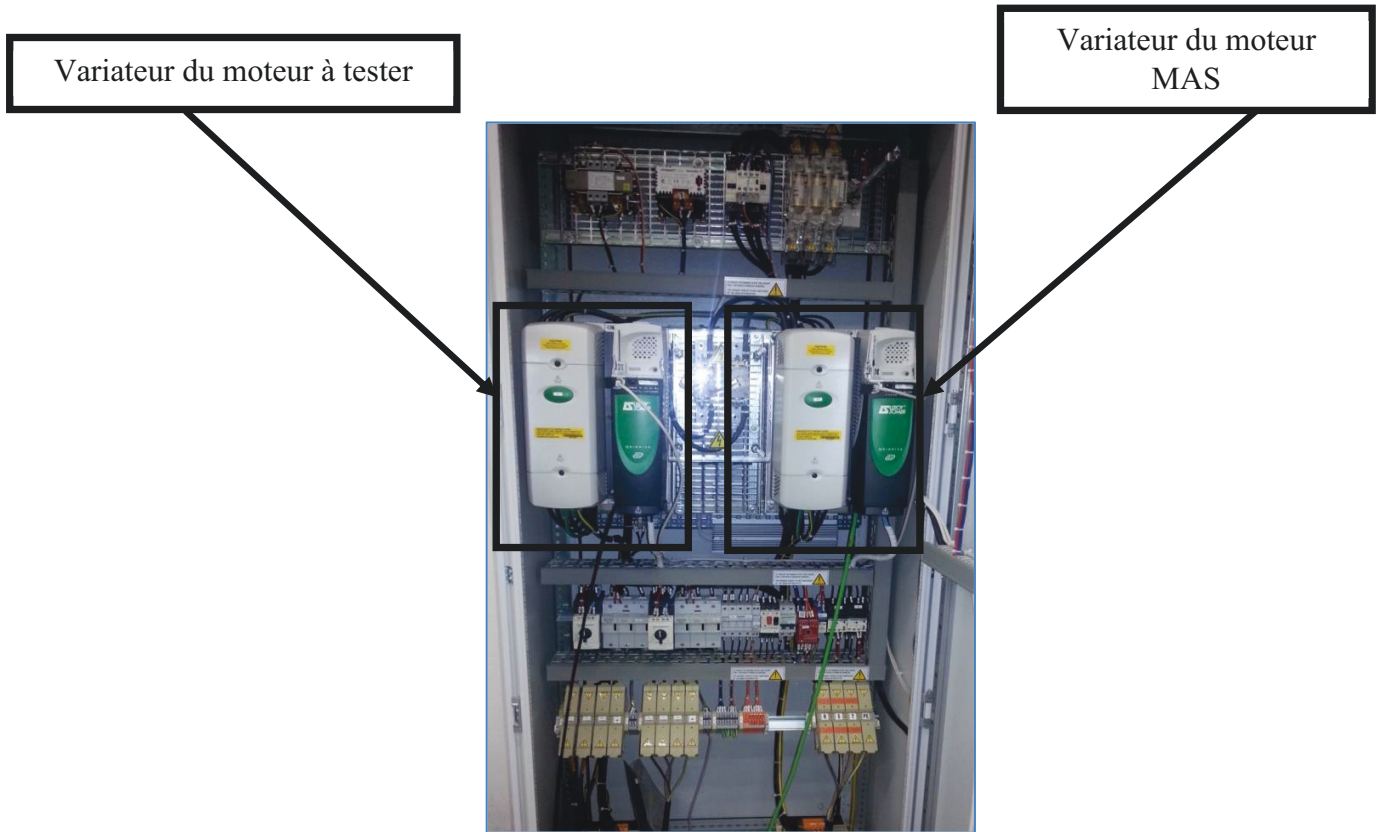


Figure 2.14. Implantation physique

Le couplage par le bus continu des deux convertisseurs permet de minimiser la puissance consommée lors des essais. Des résistances de freinage sont associées aux convertisseurs pour assurer leur sécurité lors des freinages inertiels. Le schéma de principe électronique est représenté ci-dessous.

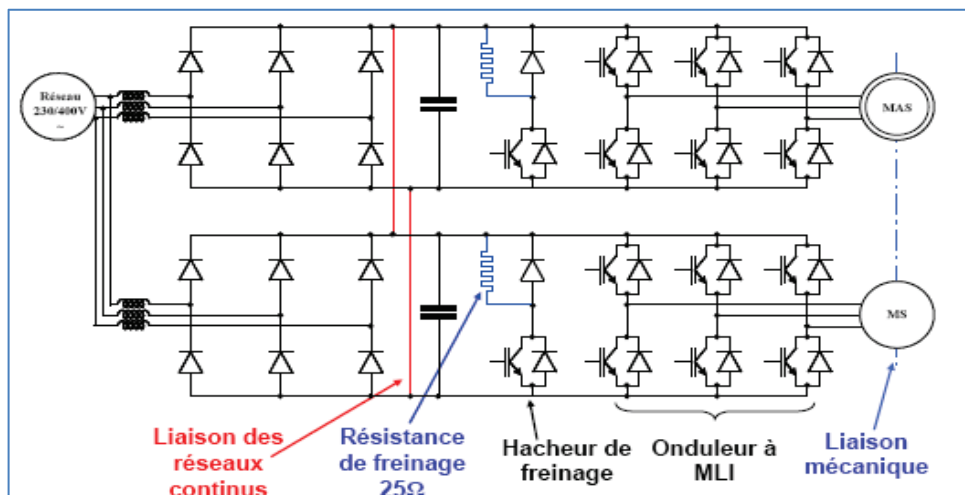


Figure 2.15. Schéma de principe électronique

Les différents composants de l'armoire électrique sont listés ci-dessous (Tableau II.2). Ils permettent principalement d'assurer la protection de l'ensemble, le filtrage harmonique du réseau d'alimentation, le freinage rhéostatique des machines et la communication avec les variateurs par console et par réseau CAN sous protocole CAN Open.

Tableau II.2. Tableau des composants de l'armoire électrique

Filtre RFI	Filtre RFI 62A 400V
Self Réseau	Self de ligne TRI 46A – 0,64 mH
Résistance de freinage	Résistance de freinage 25 Ω - 600 W
Transistor de freinage	Transistor de freinage inclus
Slot Option 1	# N/A
Retour Codeur	Sélectionner l'option si nécessaire
Arrêt d'urgence catégorie 3	Protection Arrêt d'urgence cat.3
Cellule supplémentaire 800 mm	Armoire équipée 2000x800x600 + Toit IP21
Socle 100 mm	Socle 100 x 800
Console LCD variateur, montée en façade	Console LCD / SP déportable
Câble de communication USB	Câble PC USB / RS 485
Interrupteur général	Interrupteur fusibles 125A cmd frontale
Fusibles UR	Lot de 3
Ventilation cellule supplémentaire	Ventilateur IP 54 230m ³ /h 115V 41W
Alimentation protégée VF/ Contacteur	Transformateur 630VA P:230/400V S:2 x115V
Transformateur télécommande	Transformateur 1000VA P:230/400V S : 2 x115V
Relais de sécurité	Modèle de sécurité PREVENTA

II.3 Conclusion

Le banc d'essai ne parait pas complexe à premier abord, il demande néanmoins beaucoup de prudence aux vus des caractéristiques électriques et mécaniques des moteurs, en faisant notamment attention aux points limites de la puissance, au défluxage et surtout en ayant une bonne connaissance de la manipulation des variateurs ainsi que de leurs programmations.

De plus, la manipulation du banc d'essai lors des changements de rotor, demande aussi une attention particulière, afin de ne pas endommager les rotors ainsi que l'axe du moteur.

Nous verrons dans le chapitre prochain l'exploitation des essais sur les différents rotors.

CHAPITRE III

Caractérisation expérimentale de la M.S.A.P

III Caractérisation expérimentale de la M.S.A.P

III.1 Objectifs

L'objectif est de réaliser des caractérisations détaillées d'une machine synchrone à aimant permanent afin de mettre en place une base de données expérimentales pour le développement de recherches futures.

Dans ce contexte, afin d'obtenir les caractérisations souhaitées, l'objectif était d'effectuer des essais à vide, en court-circuit puis finaliser par des essais en charges, suivant plusieurs paliers de vitesse et couple, pour chaque rotor.

Enfin, après chaque essai, nous devons comparer le modèle expérimental au modèle théorique.

III.2 Les différents essais

Dans l'ordre, les essais à vide et en court-circuit, ont été effectués successivement, pour chaque rotor, comme ils nécessitent moins de manipulation. Après avoir effectué ces deux essais, une autre série d'essais en charges a été effectués. En effet, l'essai en charge demande plus de prudence, plus de manipulations et plus de préparation.

III.2.1 Essai à vide

L'essai à vide permet de déterminer les pertes mécaniques, qui ne dépendent que de la fréquence de rotation et les pertes fer qui dépendent de la fréquence et de la valeur maximale du flux. Pour cet essai on a prélevé la f.é.m. aux bornes du MS. Chaque relevé de la f.é.m. a été effectué pour plusieurs paliers de fréquence de rotation. La dernière mesure consiste à effectuer la FFT de la f.é.m. à la vitesse Max. A savoir que la fréquence de rotation Max du MS est de 1100 tr/min. Le couplage de la MS est un couplage étoile.

Toutes les valeurs de FFT ont été traitées sur le logiciel Matlab, afin d'en tirer le fondamental à la vitesse Max, soit 1100 tr/min.

Pour effectuer les essais, on a alimenté la MAS afin d'entraîner la MS par le biais de l'accouplement. Cet essai a été effectué en séparant l'alimentation du moteur synchrone de l'armoire électrique. Chaque palier de fréquence de rotation a été réglé par le biais du variateur du MAS.

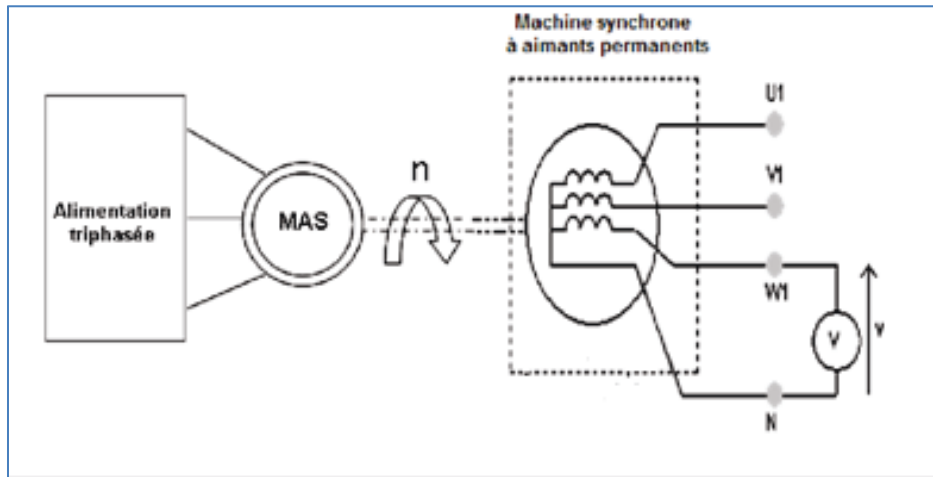


Figure 3.1. Schéma essai à vide



Figure 3.2. Banc, lors de l'essai à vide

Par la suite, pour chaque type de machine, nous avons relevés les f.é.m. à la vitesse Max, nous avons aussi relevés la FFT sur oscilloscope et traité les valeurs sur logiciel Matlab afin de visualiser les rangs harmoniques. Les relevés ont été effectués suivant les paliers suivants: 250tr/min (pour les 3 phases) – 500tr/min – 750tr/min – 1000tr/min – 1100tr/min – FFT 1100tr/min

III.2.1.1 Essai à vide pour le rotor à aimant en surface

On présente dans ce paragraphe les essais à vide suivants le rotor à aimant en surface (Voir figure 2.3). Pour tous les paliers on fera apparaître une seule phase. Les images ont été relevée de l'oscilloscope, puis traiter sur Matlab afin d'en visualiser les rangs harmoniques.

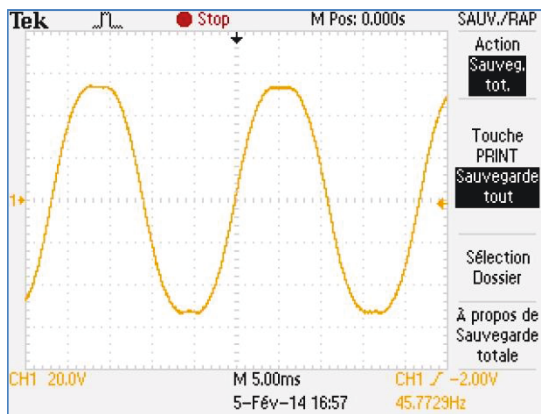


Figure 3.3. 250 tr/min.

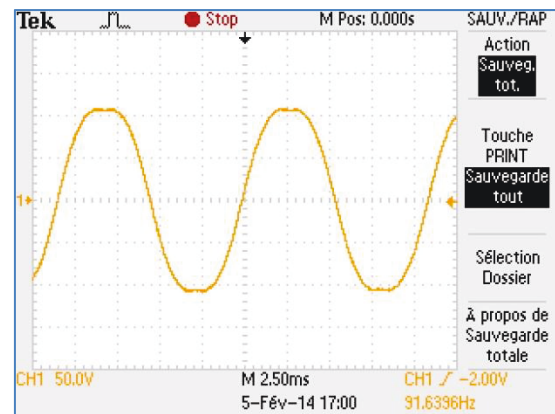


Figure 3.4. 500 tr/min

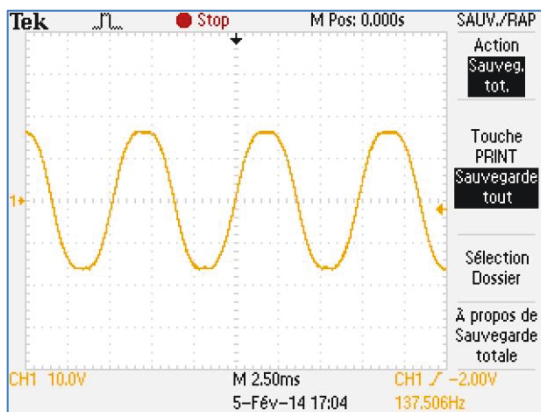


Figure 3.5. 750 tr/min.

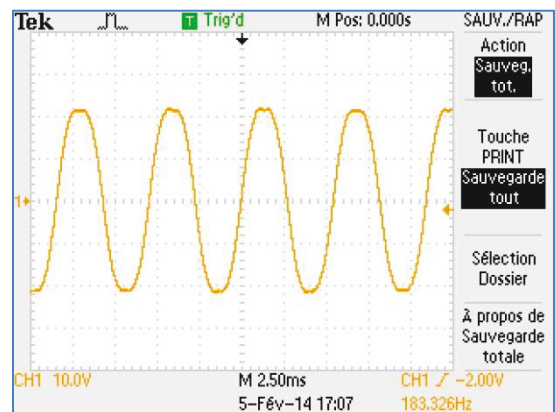


Figure 3.6. 1000 tr/min

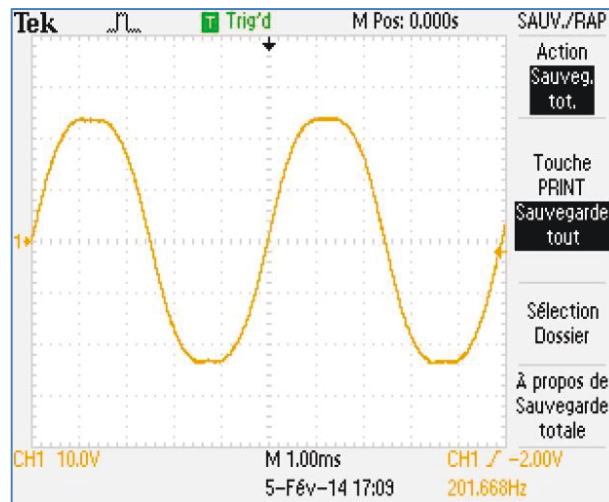


Figure 3.7. 1100 tr/min

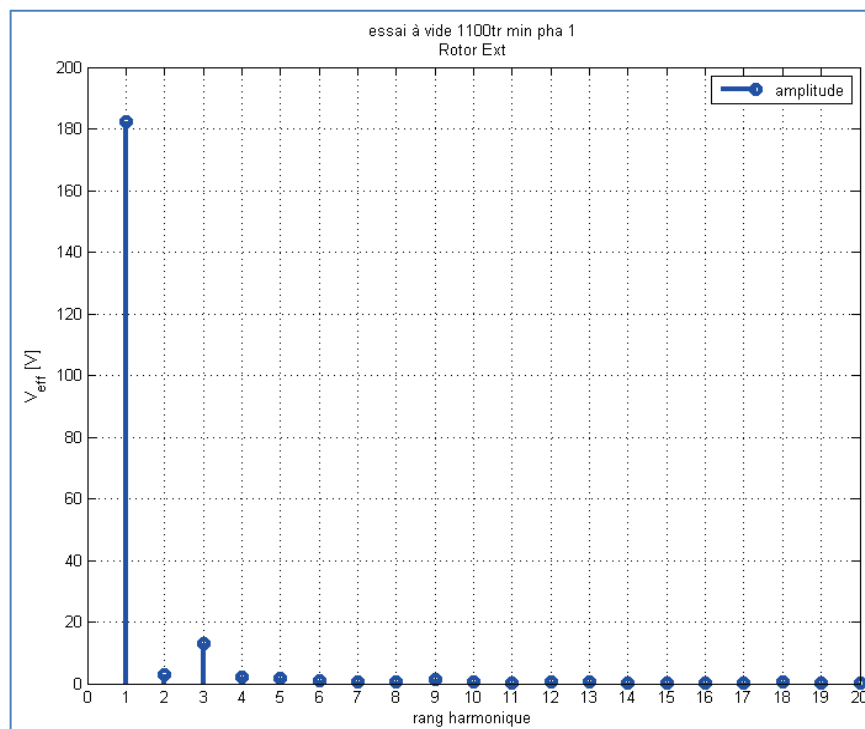


Figure 3.8. Rang Harmonique pour 1100 tr/min

Conclusion essai à vide :

On voit que la courbe de la f.é.m. est quasiment sinusoïdale. Ceci est confirmé par l'étude du contenu harmonique (i.e., décomposition en série de fourrier de la F.é.m.) comme présenté sur la figure 3.8.

Les harmoniques d'ordre supérieures sont négligeables, sauf l'harmonique de rang 3, qui représente 7% de l'amplitude du fondamental.

Calcul :

Valeur de rang 3 = 12,94

Valeur de rang 1 = 183,37

$12,94 / 183,37 = 7 \%$

III.2.1.2 Essai à vide pour le rotor à aimant en forme de «U»

On présente dans ce paragraphe les essais à vide suivants le rotor en forme de «U» (Voir figure 2.5). Pour tous les paliers on fera apparaître une seule phase. Les images ont été relevée de l'oscilloscope, puis traiter sur Matlab afin d'en visualiser les rangs harmoniques.

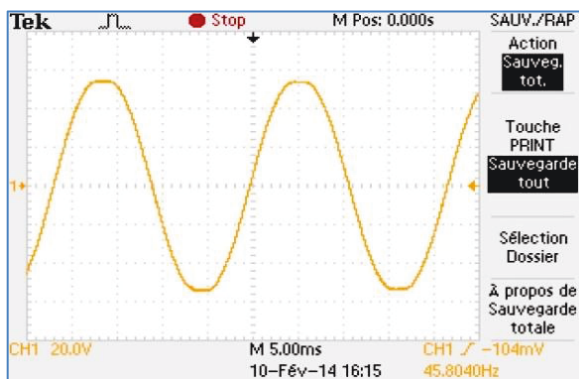


Figure 3.9. 250 tr/min.

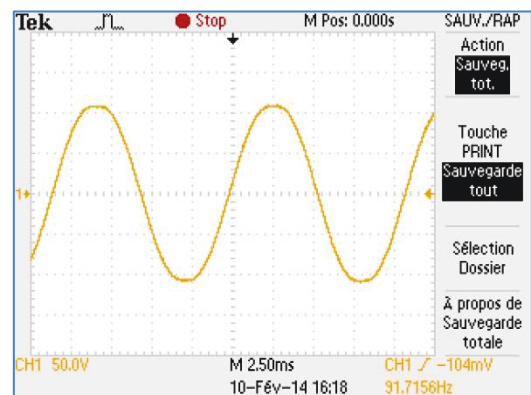


Figure 3.10. 500 tr/min

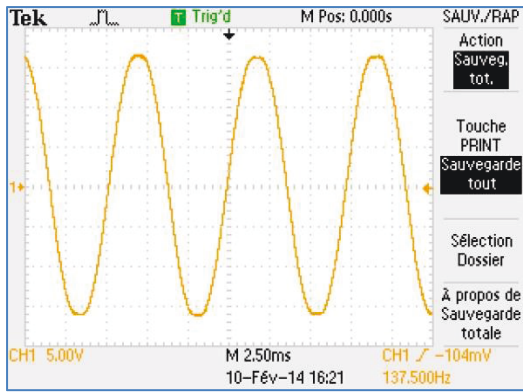


Figure 3.11. 750 tr/min.

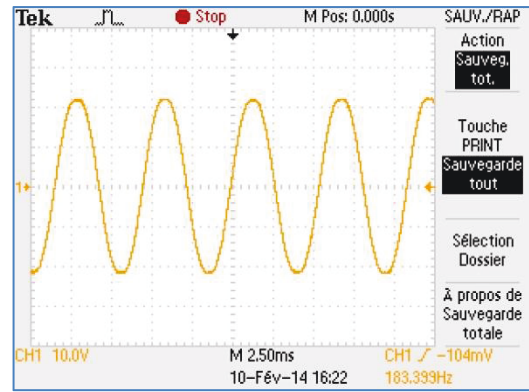


Figure 3.12. 1000 tr/min

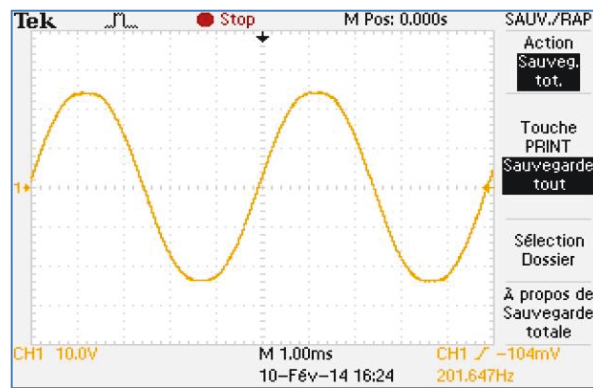


Figure 3.13. 1100 tr/min

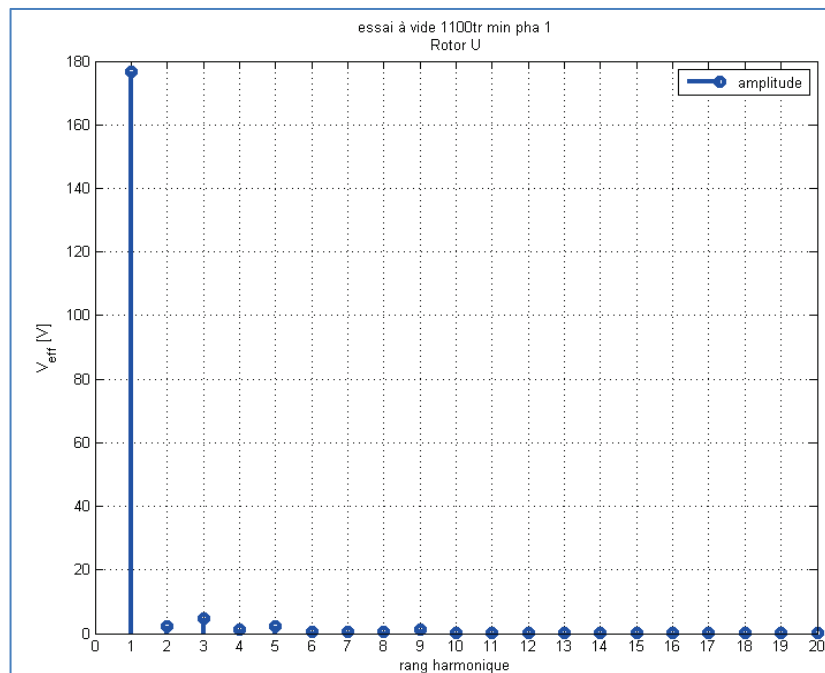


Figure 3.14. Rang Harmonique pour 1100 tr/min

Conclusion :

On voit que la courbe de la f.é.m. est quasiment sinusoïdale. Ceci est confirmé par l'étude du contenu harmonique (i.e., décomposition en série de fourrier de la f.é.m.) comme présenté sur la figure 3.14.

Les harmoniques d'ordre supérieures sont négligeables, sauf l'harmonique de rang 3, qui représente 2,6% de l'amplitude du fondamental.

Calcul :

- Valeur de rang 3 = 4,73
- Valeur de rang 1 = 177,27
- $4,73 / 177,27 = 2,6 \%$

III.2.1.3 Essai à vide pour le rotor à aimant en forme de «I»

On présente dans ce paragraphe les essais à vide suivants le rotor en forme de «I» (Voir figure 2.7). Pour tous les paliers on fera apparaître une seule phase. Les images ont été relevée de l'oscilloscope, puis traiter sur Matlab afin d'en visualiser les rangs harmoniques.

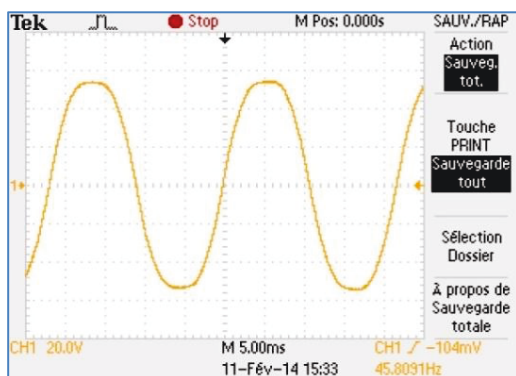


Figure 3.15. 250 tr/min.

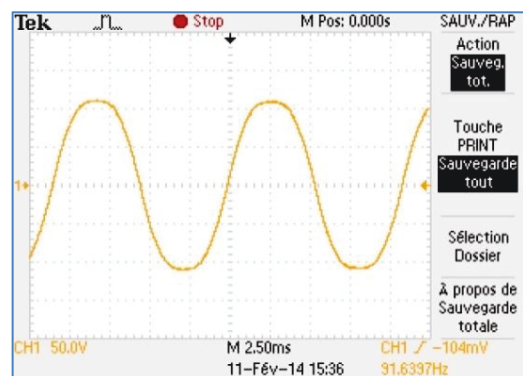


Figure 3.16. 500 tr/min

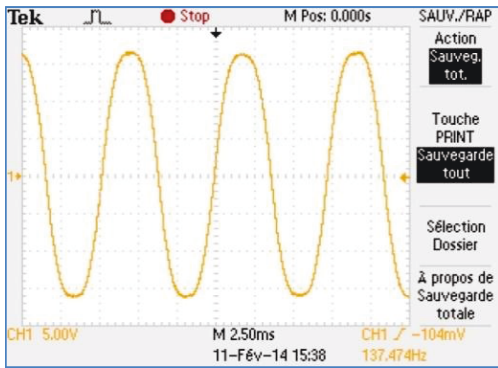


Figure 3.17. 750 tr/min.

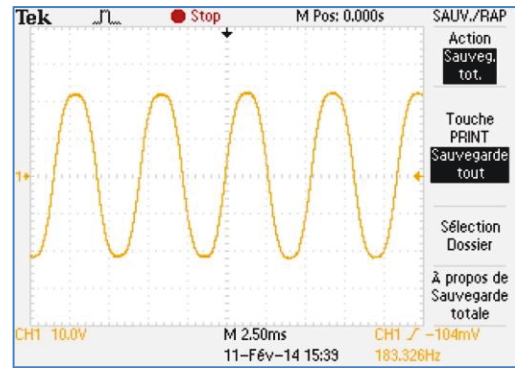


Figure 3.18. 1000 tr/min

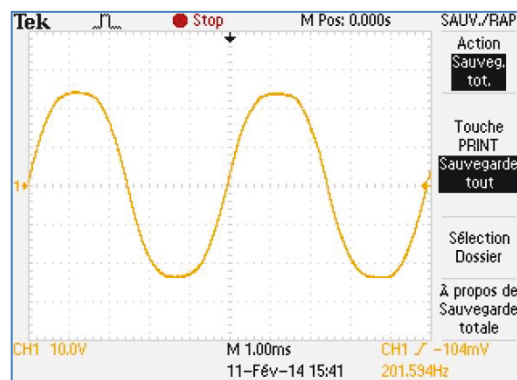


Figure 3.19. 1100 tr/min

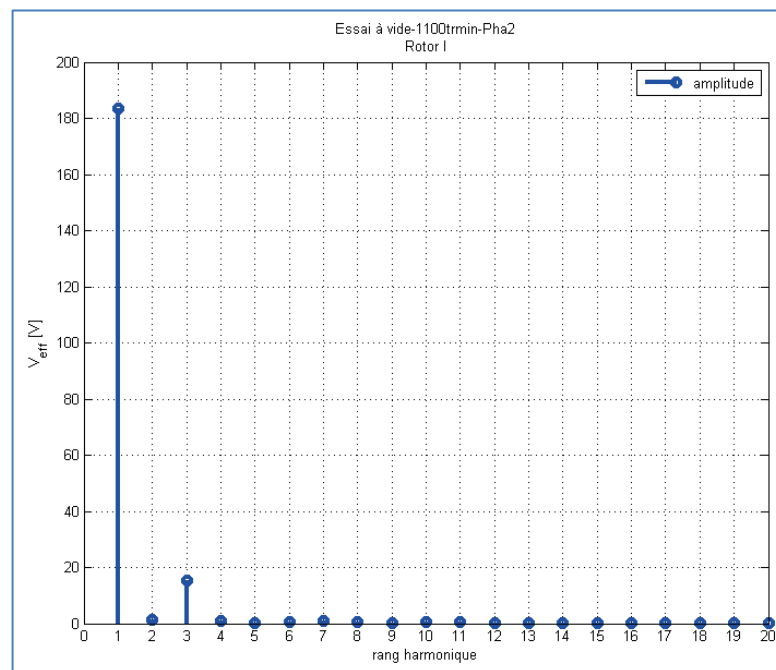


Figure 3.20. Rang Harmonique pour 1100 tr/min

Conclusion :

On voit que la courbe de la f.é.m. est quasiment sinusoïdale. Ceci est confirmé par l'étude du contenu harmonique (i.e., décomposition en série de fourrier de la f.é.m.) comme présenté sur la figure 3.20.

Les harmoniques d'ordre supérieures sont négligeables, sauf l'harmonique de rang 3, qui représente 8,2% de l'amplitude du fondamental.

Calcul :

- Valeur de rang 3 = 15,17
- Valeur de rang 1 = 184,41
- $15,17 / 184,41 = 8,2 \%$

III.2.1.4 Essai à vide pour le rotor à aimant en forme de «O»

On présente dans ce paragraphe les essais à vide suivants le rotor en forme de «O» (Voir figure 2.9). Pour tous les paliers on fera apparaître une seule phase. Les images ont été relevée de l'oscilloscope, puis traiter sur Matlab afin d'en visualiser les rangs harmoniques.

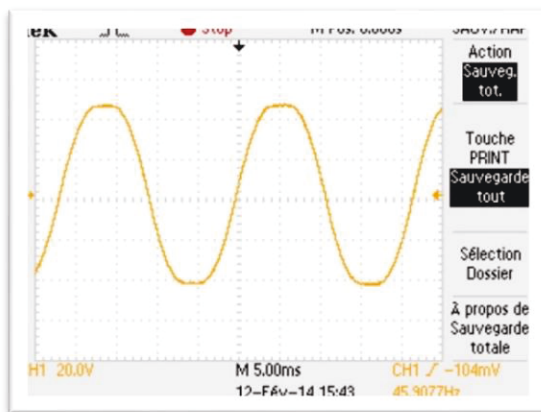


Figure 3.21. 250 tr/min.

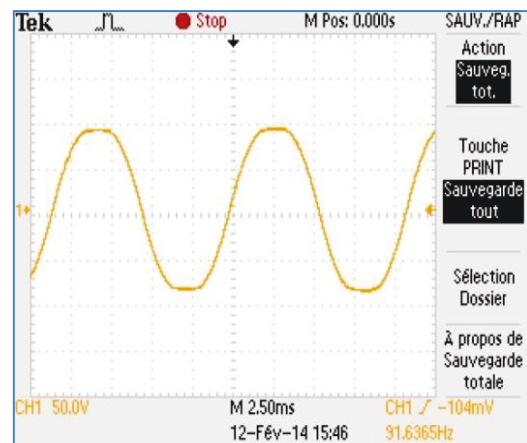


Figure 3.22. 500 tr/min

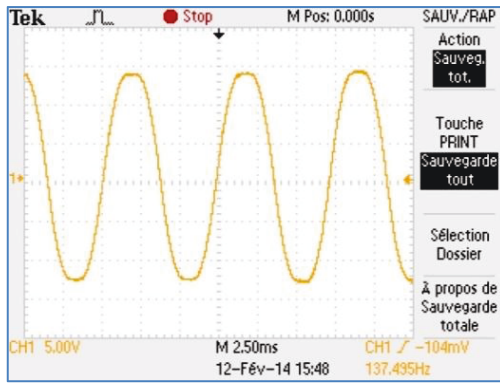


Figure 3.23. 750 tr/min.

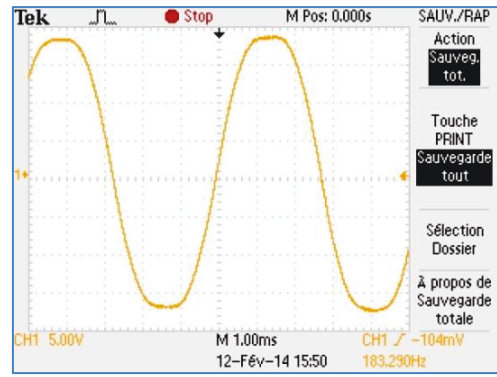


Figure 3.24. 1000 tr/min

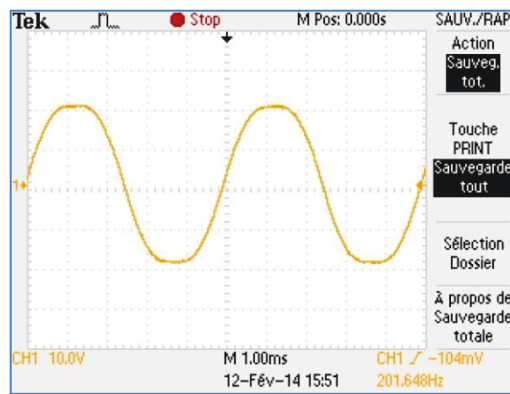


Figure 3.25. 1100 tr/min

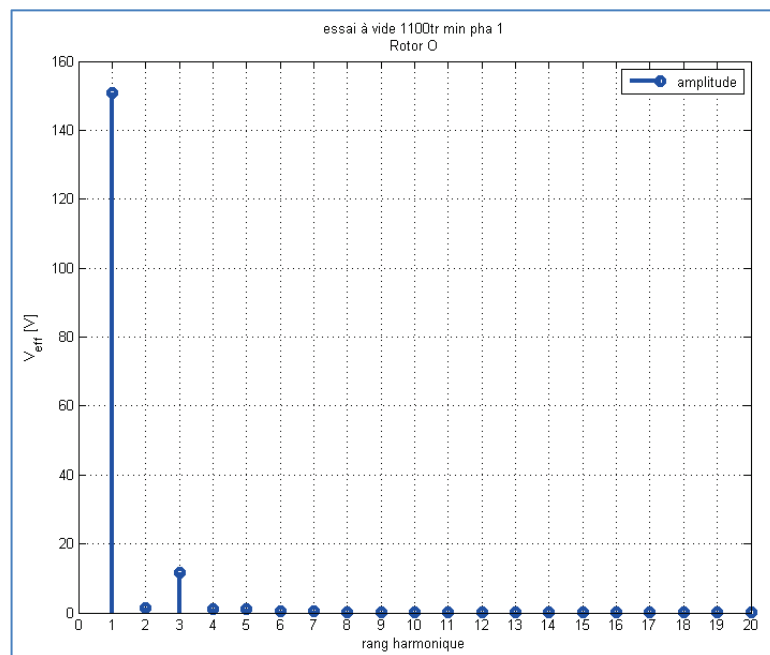


Figure 3.26. Rang Harmonique pour 1100 tr/min

Conclusion :

On voit que la courbe de la f.é.m. est quasiment sinusoïdale. Ceci est confirmé par l'étude du contenu harmonique (i.e., décomposition en série de fourrier de la f.é.m.) comme présenté sur la figure 3.26.

Les harmoniques d'ordre supérieures sont négligeables, sauf l'harmonique de rang 3, qui représente 7,6% de l'amplitude du fondamental.

Calcul :

- Valeur de rang 3 = 11,58
- Valeur de rang 1 = 151,32
- $15,17 / 184,41 = 7,6 \%$

III.2.1.5 Bilan des FFT des quatre rotors à 1100 tr/min

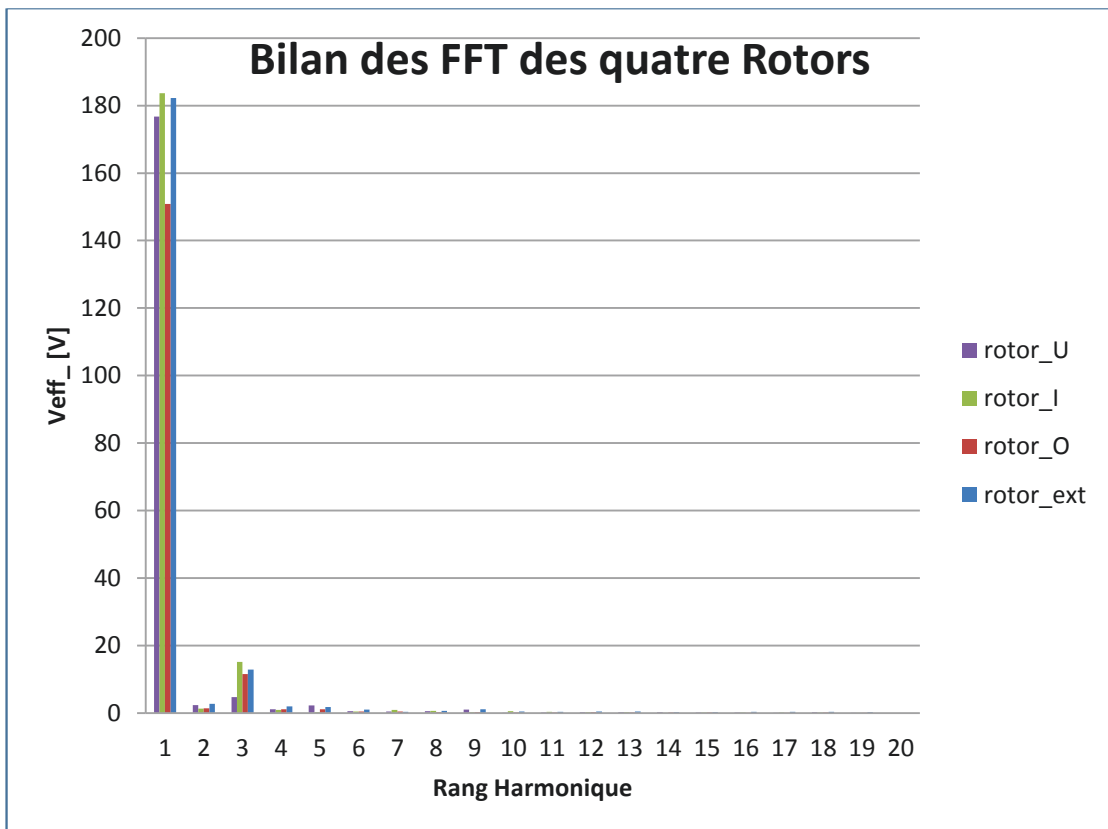


Figure 3.27. Bilan FFT des quatre rotors à 1100 tr/min

III.2.1.6 Bilan des relevés de la f.é.m.

Tableau III.1 Relevés f.é.m.

Rotor en O		Rotor en I		Rotor en U		Rotor en surface	
Tr/min	U en (V)	Tr/min	U en (V)	Tr/min	U en (V)	Tr/min	U en (V)
0	0	0	0	0	0	0	0
250	34.22	250	42	250	40.22	250	41.22
500	67.88	500	84.57	500	79.9	500	82.77
750	101.54	750	126.14	750	120.98	750	124.45
1000	137.17	1000	167.3	1000	161.05	1000	166.17
1100	151.32	1100	184.41	1100	177.27	1100	183.37

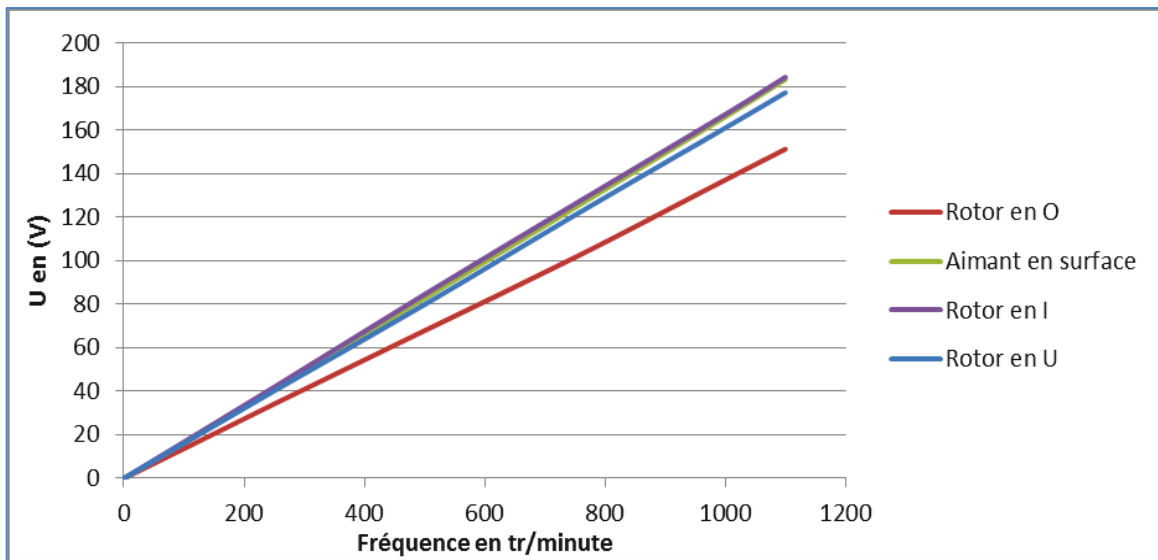


Figure 3.28. Courbes valeurs f.é.m.

En comparant la f.é.m. de la vitesse Max (1100 tr/min) pour les quatre rotors, on s'aperçoit que le rotor en «I» et le rotor à aimant «Ext», on sensiblement la f.é.m. la plus élevée, ce qui signifie qu'ils ont le flux à vide le plus élevé, ceci aura une influence notable sur les performances en couples.

A noter, que les quatre rotors ont la même masse d'aimant.

III.2.1.7 Comparaison avec le modèle théorique

Le tableau ci-dessous illustre la comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques

Tableau III.2 Comparaison des f.é.m. à vitesse nominale N = 1100 tr/min

Grandeurs Topologies	Fondamental de la f.é.m. expérimentale (V)	Fondamental de la f.é.m. numérique (V)	Ecart relatif (%)
Aimants en surface	183.37	176.35	3.9
Aimants en O	151.52	154.99	2.3
Aimants en U	177.27	184.48	4
Aimants en I	184.41	198.20	7.4

D'après le tableau ci-dessus, nous constatons que l'écart relatif en % entre la partie expérimentale et la partie théorique est faible, ce qui veut dire qu'il y a une concordance entre les deux modèles.

III.2.1.8 Calcul des pertes de puissances mécanique

Afin de connaître les couples des rotors, des relevés ont été effectués sur plusieurs paliers. Pour cela il a fallu tenir compte des caractéristiques suivantes :

Valeur du couple en utilisant le ratio de mesure du capteur ZFA:

$$C \text{ (N.m)} = ((200 \times 9,81)) / (10 \times (V) \times 0,135) = 26,487 \times U \text{ (V)}.$$

- 200 : Force de traction compression en kg
 - 9,81 : Force de la pesanteur en m/s
 - 10 : Incertitude mesure
 - 0,135 : Coefficient
- C = 26,487 x 0,135. Valeur en N.m

- Caractéristique du capteur de pesage, traction-compression : ZFA 200 kg
- Caractéristique du conditionneur du signal analogique : CPJ / CPJ 2S. Le capteur du signal analogique est configurée est réglée pour fournir une tension analogique de +/- 10V – 4/20 mA

Les relevés ont été effectués à vide. :

Pour pouvoir relever la valeur de U(V), nous avons relié les fils du capteur de couple à un voltmètre, puis nous avons effectué le calcul ci-dessus, afin d’obtenir le couple en N.m.

Les calculs de la puissance (perte mécanique) ont été effectués en tenant compte de la vitesse en radian/seconde et du couple en N.m.

Exemple de calcul de la puissance pour une vitesse à 1100 tr/min, rotor Ext:

- $3,363849 \times 1100 \times 2\pi/60 = 387,48 \text{ W}$.

Par la suite, nous avons calculé les pertes mécaniques, pour les quatre rotors.

En plus des quatre rotors, nous avons essayé de déterminer les pertes en l’absence de rotor.

Tableau III.3. Tableau du couple pour le rotor EXT

ROTOR EXT			
Vitesse ▾	tension du couple ▾	Couple ▾	Puissance ▾
tr/min	U (V)	C (N.m)	W
0	0.0881	2.3335047	0
100	0.124	3.284388	34.39403071
200	0.1247	3.3029289	69.17638112
250		3.2504	85.09527301
300	0.1202	3.1837374	100.0200603
400	0.1209	3.2022783	134.1367198
500	0.1236	3.2737932	171.4154111
600	0.1258	3.3320646	209.3597934
700	0.1241	3.2870367	240.9523748
750		3.2954	258.8201108
800	0.1223	3.2393601	271.3799971
900	0.1226	3.2473062	306.0513991
1000	0.1276	3.3797412	353.9256708
1100	0.127	3.363849	387.4875879

Tableau III.4. Tableau du couple pour le rotor O

ROTOR O			
Vitesse ▾	tension du couple ▾	Couple ▾	Puissance ▾
tr/min	U (V)	C (N.m)	W
0	0	0	0
100	0.0813	2.1533931	22.55027981
200	0.0837	2.2169619	46.43194146
300	0.0857	2.2699359	71.31213948
400	0.0872	2.3096664	96.74707993
500	0.0881	2.3335047	122.1820204
600	0.0902	2.3891274	150.1133018
700	0.0904	2.3944248	175.5205051
800	0.0932	2.4685884	206.8079782
900	0.0919	2.4341553	229.4137322
1000	0.0943	2.4977241	261.5610561
1100	0.0963	2.5506981	293.8193285

Tableau III.5. Tableau du couple pour le rotor I

ROTOR I			
Vitesse ▾	tension du couple ▾	Couple ▾	Puissance ▾
tr/min	U (V)	C (N.m)	W
0	0.0845	2.2381515	0
100	0.0903	2.3917761	25.04662075
200	0.0945	2.5030215	52.42315971
300	0.0942	2.4950754	78.38510547
400	0.0997	2.6407539	110.6156407
500	0.101	2.675187	140.0724638
600	0.1023	2.7096201	170.250452
700	0.1034	2.7387558	200.7612857
800	0.1072	2.8394064	237.8735543
900	0.1111	2.9427057	277.3434783
1000	0.1092	2.8923804	302.8893672
1100	0.1113	2.9480031	339.585579

Tableau III.6. Tableau du couple pour le rotor U

ROTOR U			
Vitesse	tension du couple	Couple	Puissance
tr/min	U (V)	C (N.m)	W
0	0.0971	2.5718877	0
100	0.0951	2.5189137	26.3780026
200	0.1024	2.7122688	56.8056249
300	0.1096	2.9029752	91.1996556
400	0.1063	2.8155681	117.938241
500	0.1085	2.8738395	150.473884
600	0.1082	2.8658934	180.069393
700	0.112	2.966544	217.459033
800	0.1146	3.0354102	254.29393
900	0.1152	3.0513024	287.578476
1000	0.1194	3.1625478	331.181231
1100	0.1146	3.0354102	349.654154

Tableau III.7. Tableau du couple sans rotor

SANS ROTOR			
Vitesse	tension du couple	Couple	Puissance
tr/min	U (V)	C (N.m)	W
0	0.0626	1.6580862	0
100	0.0702	1.8593874	19.47145932
200	0.0705	1.8673335	39.10934137
300	0.0705	1.8673335	58.66401205
400	0.0705	1.8673335	78.21868274
500	0.0707	1.8726309	98.05072464
600	0.0712	1.8858744	118.4929832
700	0.0714	1.8911718	138.6301334
800	0.0715	1.8938205	158.6563352
900	0.0712	1.8858744	177.7394748
1000	0.0707	1.8726309	196.1014493
1100	0.0717	1.8991179	218.7626776

III.2.1.9 Bilan des couples des quatre rotors

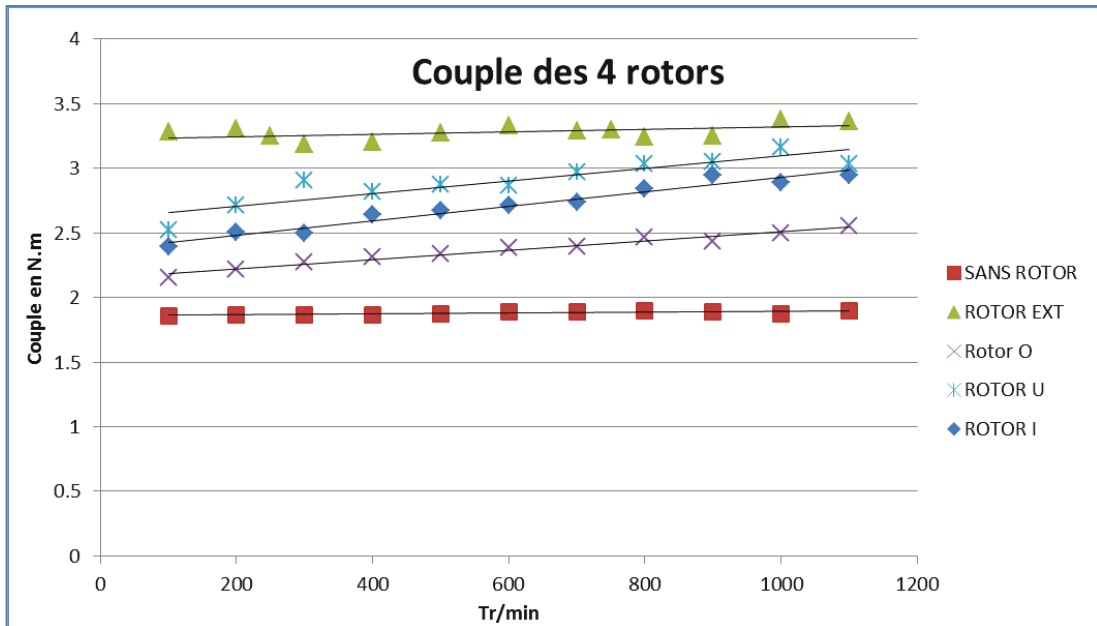


Figure 3.29. Bilan des couples des quatre rotors

III.2.1.10 Bilan des puissances des pertes mécaniques

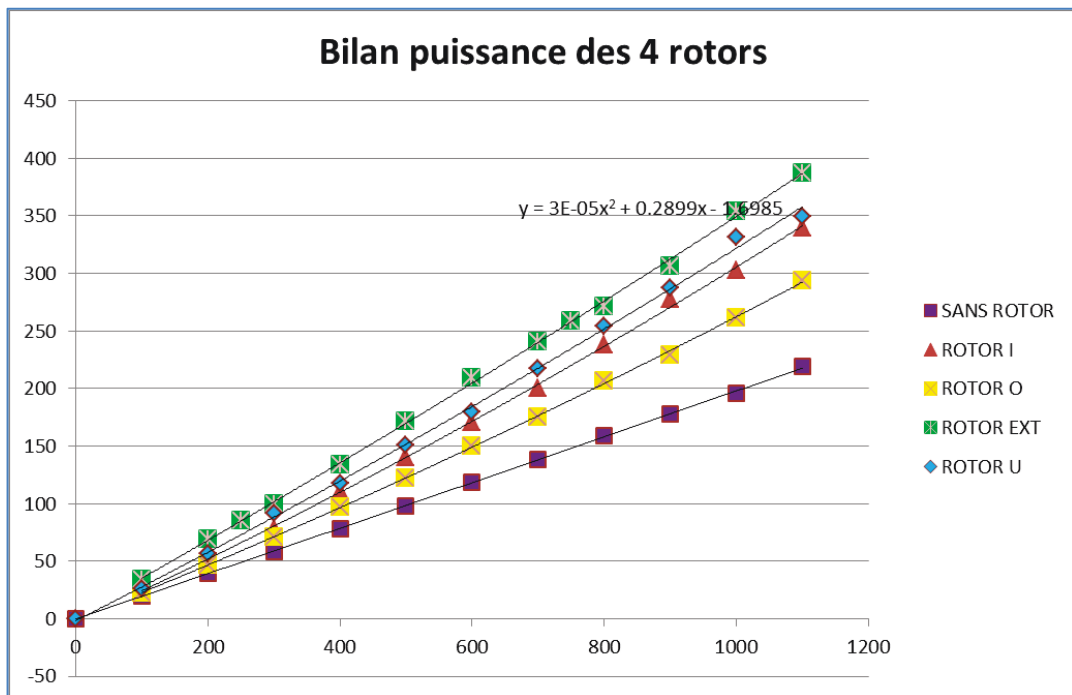


Figure 3.30. Bilan des pertes mécaniques

III.2.2 Conclusion

Nous pouvons constater que le rotor à aimant extérieur a plus de pertes mécaniques que les autres du fait que ses aimants se situent en surface. Cela est dû au mouvement aérodynamique qui vient se frotter aux aimants en surface.

Concernant les 3 autres rotors, comme ils ont la même surface, leur perte est sensiblement identique.

III.2.3 Essai en court-circuit

L'essai en court-circuit permet de déterminer l'inductance L_d (il s'agit de donner de machine). Pour cet essai on a prélevé le courant aux bornes de la MS. Chaque mesure du courant a été effectuée pour plusieurs paliers de vitesse en fonction du courant nominal. A savoir que le courant nominal est de 15A. Le couplage de la MS est un couplage étoile.

Pour effectuer les essais, on a alimenté la MAS venant entrainer la MS par le biais de l'accouplement. Cet essai a été effectué en séparant l'alimentation du moteur synchrone de l'armoire électrique. Enfin les trois phases ont été court-circuitées

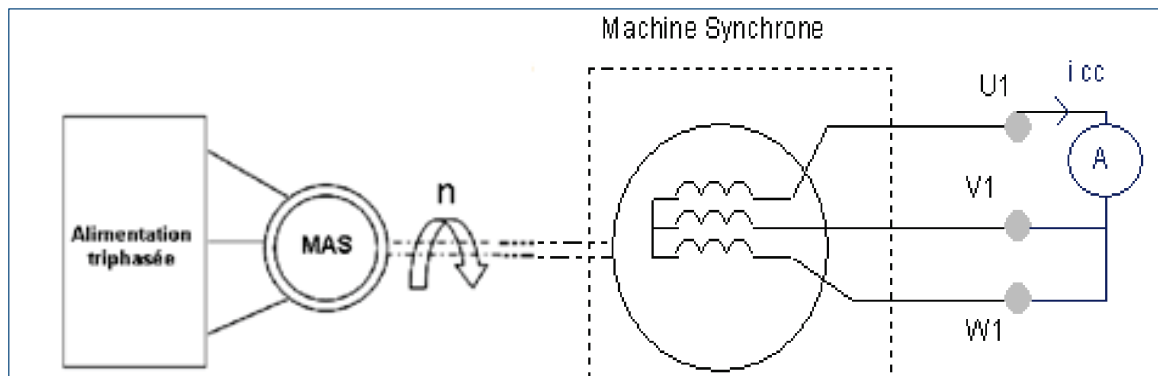


Figure 3.31. Schéma de l'essai en court-circuit

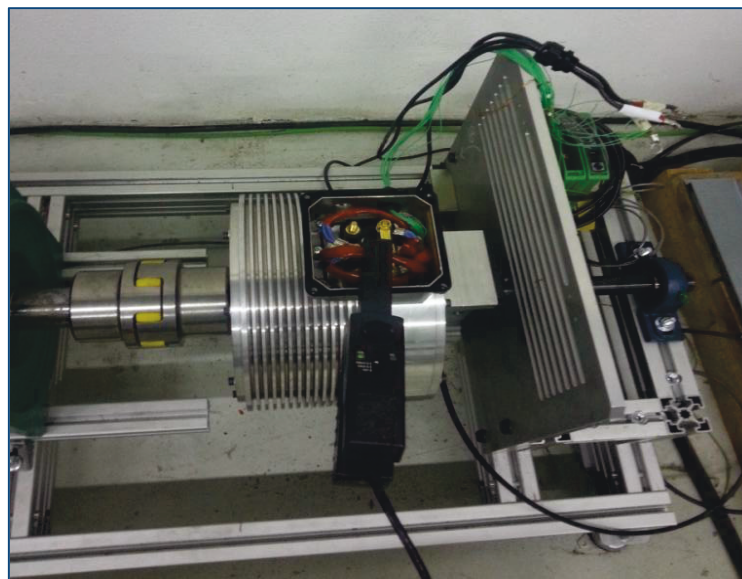


Figure 3.32. Sonde de courant sur les phases court-circuitées

III.2.3.1 Courant de C-C pour le rotor à aimant externe.

Nous avons relevés pour les essais en C-C, les courants pour plusieurs paliers de courant et relevé la vitesse. Les relevés ci-dessous, sont les relevés suivant le rotor à aimant en surface (Voir Figure 2.3), représentant la forme du courant. Pour chaque palier de courant, on fera apparaître une seule phase.

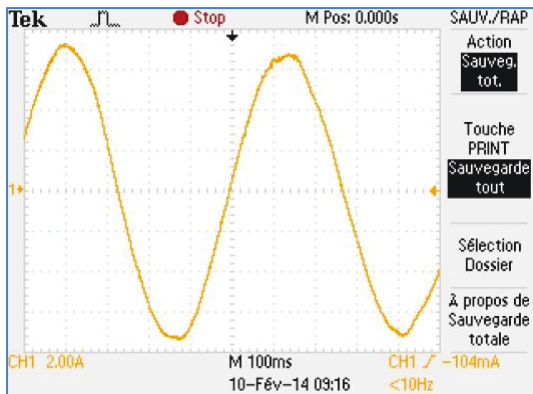


Figure 3.33. 5A- Phase 2- 10tr/min

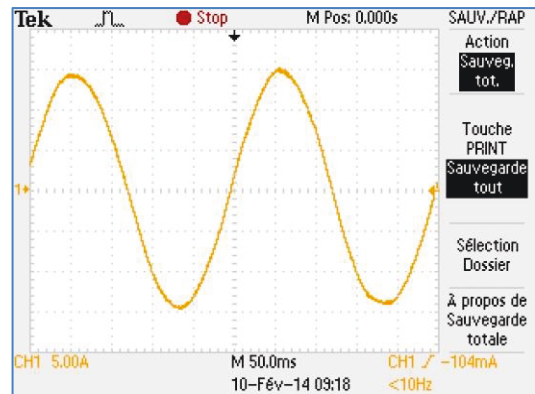


Figure 3.34. 10A- Phase 2- 21,5tr/min

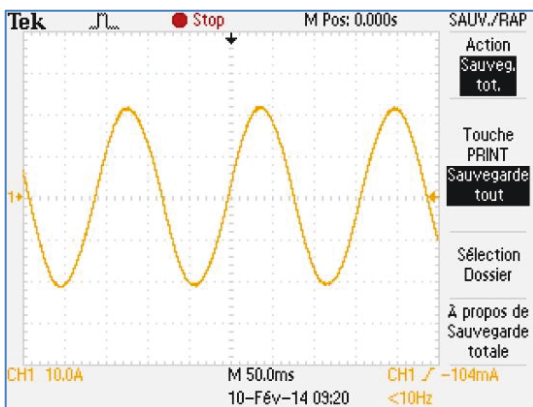


Figure 3.35. 15A-Phase 2- 34 tr/min.

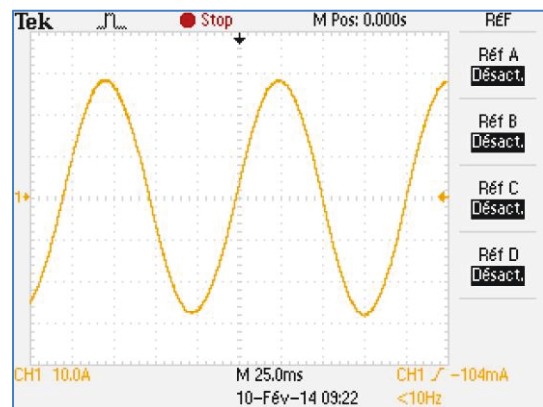


Figure 3.36. 20A-Phase2-53 tr/min

Constat: A partir de 52tr/min (~ 16A), la rotation du rotor devient instable, il avance par à-coups.

III.2.3.2 Courant de C-C pour le rotor «I»

Les relevés ci-dessous, sont les relevés suivant le rotor en forme de «I» (Voir Figure 2.7), représentant la forme du courant. Pour chaque palier de courant, on fera apparaître une seule phase.

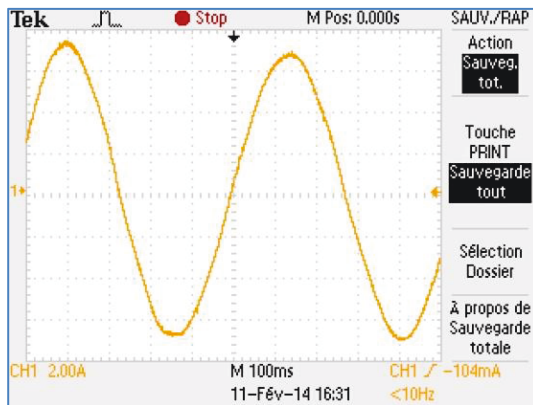


Figure 3.37. 5A- Phase 2- 11,36 tr/min

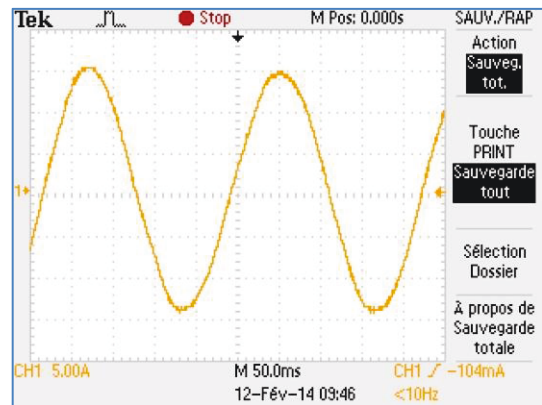


Figure 3.38. 10,3A- Phase 2- 23,68 tr/min

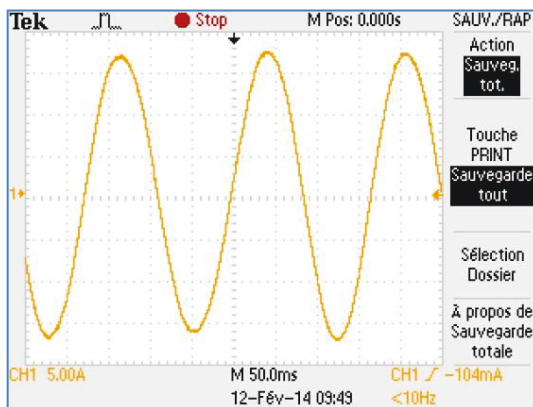


Figure 3.39. 11,9A- Phase 2- 31,5 tr/min

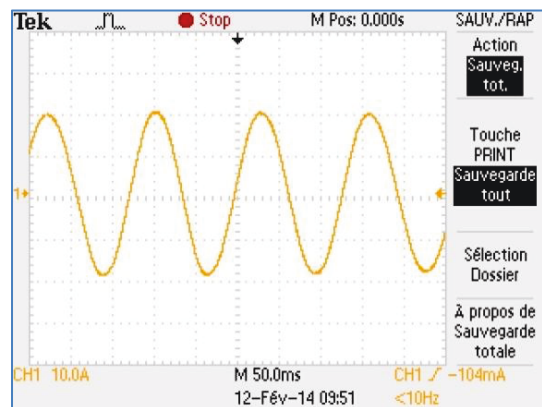


Figure 3.40. 13,9A- Phase 2- 41,5 tr/min

Constat: A partir de 42tr/min (~ 14A), la rotation du rotor devient instable, le moteur tourne par à-coups.

III.2.3.3 Courant de C-C pour le rotor «U»

Les relevés ci-dessous, sont les relevés suivant le rotor en forme de «U» (Voir Figure 2.5), représentant la forme du courant. Pour chaque palier de courant, on fera apparaître une seule phase.

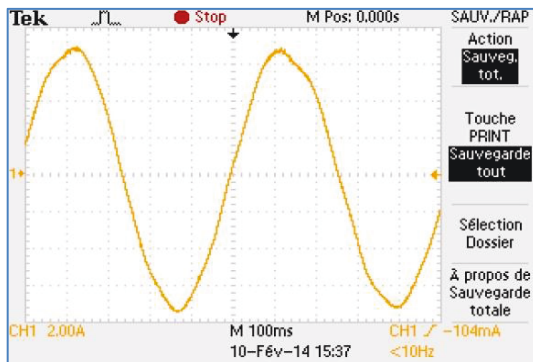


Figure 3.41. 5A- Phase 2- 10,4 tr/min

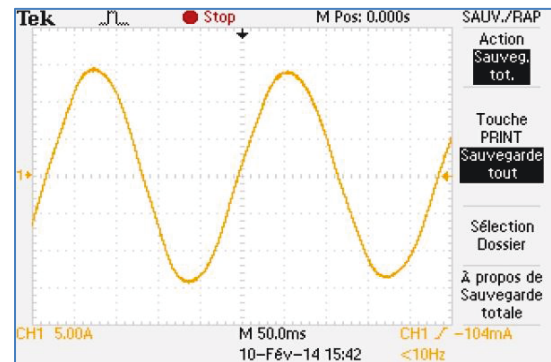


Figure 3.42. 10 A- Phase 2- 23,3 tr/min

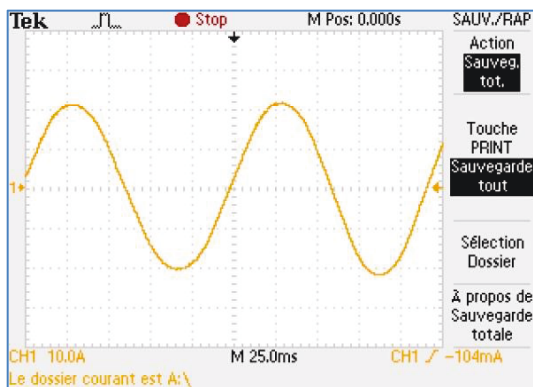


Figure 3.43. 15A- Phase 2- 45 tr/min

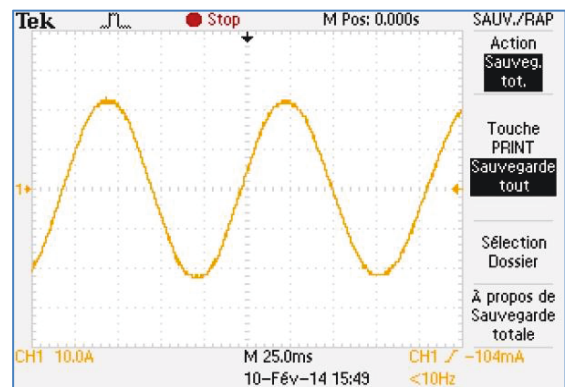


Figure 3.44. 16A- Phase 2- 52 tr/min

Constat: A partir de 52tr/min (~ 16A), la rotation du rotor devient instable, le moteur tourne par à-coups.

III.2.3.4 Courant de C-C pour le rotor «O»

Les relevés ci-dessous, sont les relevés suivant le rotor en forme de «O» (Voir Figure 2.9), représentant la forme du courant. Pour chaque palier de courant, on fera apparaître une seule phase.

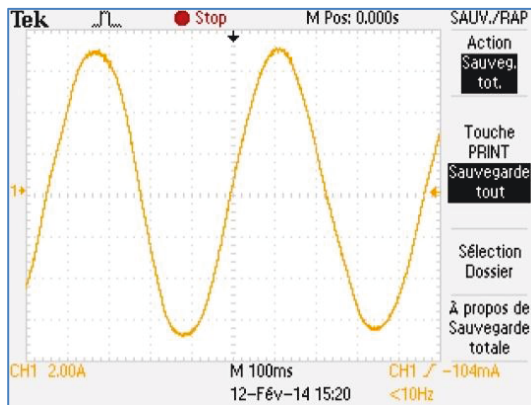


Figure 3.45. 5A- Phase 2- 12 tr/min

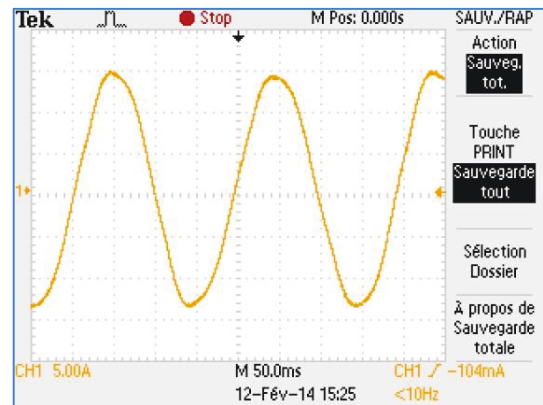


Figure 3.46. 10 A- Phase 2- 28 tr/min

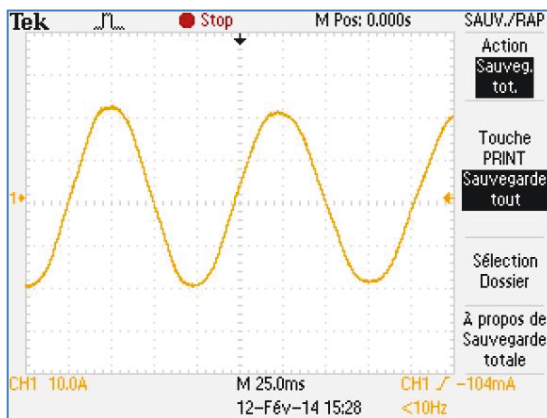


Figure 3.47. 15A- Phase 2- 52 tr/min

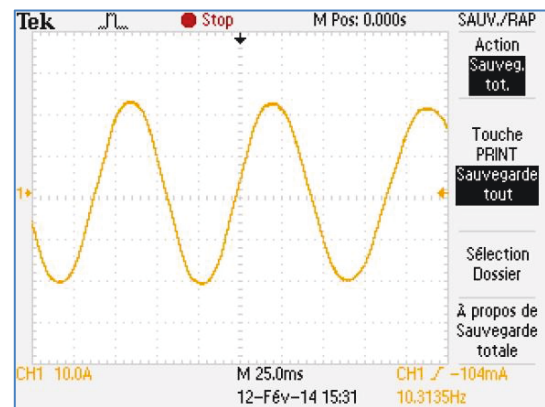


Figure 3.48. 15,7A- Phase 2- 60 tr/min

Constat: A partir de 60 tr/min (~ 15,7A), la rotation du rotor devient instable, le moteur tourne par à-coups.

III.2.3.5 Relevé de l'icc, calcul du flux à vide et calcul de E

Afin de pouvoir obtenir l'inductance L_d , on calcule d'abord le flux à vide suivant le tableau du relevé des essais à vide « III.1 », ensuite on exploite l'essai en C-C pour chaque rotor.

III.2.3.6 Calcul du flux

III.2.3.6.1 Calcul du flux à vide pour tous les rotors

Dans un premier temps, nous avons calculé le flux à vide pour chaque rotor, en appliquant la formule suivante :

$$E = p\Omega\phi \quad 3.1$$

- Pour E, on prend la tension correspondant au nombre de tr/min pour les essais à vide
- $P = 11$ (Nombre de pair de pôle)
- $\Omega = \text{Rad/s}$. Il faut prendre le nbr de tr/min et le multiplier par $2\pi/60$
- $\Phi = \text{en Wb}$
- **Exemple pour 500tr/min on a 82,77 V (Tab. III.1.)**
- $82,77 = (11 \times (500 \times 2\pi/60)) \times \phi$
- $82,77 = 581,35 \times \phi$
- $\Phi = 82,77 / 581,35$
- $\Phi = 0,142 \text{ Wb}$ soit 142 mWb

Ainsi, après avoir appliqué la formule 3.1, les valeurs du flux à vide pour chaque rotor sont :

- Rotor à aimant en «O» = $\Phi = 0,117$ Wb soit 117 mWb
- Rotor à aimant en «I» = $\Phi = 0,146$ Wb soit 146 mWb
- Rotor à aimant en «U» = $\Phi = 0,138$ Wb soit 138 mWb

III.2.3.6.2 Exploitation de l’essai en C-C et calcul de Ld

Pour les vitesses de fonctionnement considéré pour cet essai, les f.é.m. correspondant à cet essai sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

Par la suite on applique la formule ci-dessous afin d’obtenir l’inductance Ld.

Calcul de Ld :

$$Ld = \frac{1}{\omega I} \sqrt{\left(\frac{E1}{Icc1}\right)^2 - R1^2} \quad 3.2$$

R = Résistance d’une phase : 0,33 Ω entre Phase/Neutre

ω = Fréquence de rotation en tr/s. Ex pour 10tr/min : $(10tr/min \times 2\pi/60) \times 11$

Ld = Henry

Tableau III.8. Tableau de calcul de Ld

Rotor aimant en surface				Rotor en «O»				Rotor en «I»				Rotor en «U»			
I (A)	Tr/min	E (V)	Ld (mH)	I (A)	Tr/min	E (V)	Ld (mH)	I (A)	Tr/min	E (V)	Ld (mH)	I (A)	Tr/min	E (V)	Ld (mH)
5	10	1,63		5	12	1,61		5	11,36	1,91	14,7	5	10,4	1,65	
10,2	21,5	3,51	3,89	10	28	3,77	5,65	10,3	23,68	3,98	7,36	10	23,3	3,70	6,23
15	54	8,83	7,79	15	52	7	5,50	11,9	31,5	5,29	8,20	15	45	7,15	6,63
20	53	8,66	4,59	15,7	60	8,08	5,71	13,9	41,5	6,97	7,89	15,9	52	8,26	6,69

III.2.3.6.3 Comparaison avec le modèle théorique

Nous avons ci-dessous, le tableau de comparaison des inductances cycliques à une vitesse donnée, entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales

Tableau III.9. Comparaison des inductances cycliques à une vitesse donnée

Grandeurs Topologies	N (tr/min)	I_{cc} (A)		L_c (mH)	
		Expérimentale	Numérique	Expérimentale	Numérique
Aimants en surface	53	20	23.36	4.59	4.08
Aimants en O	60	15.7	18.08	5.71	5.51
Aimants en U	52	15.9	19.05	6.69	6.43
Aimants en I	41.5	13.9	17.49	7.89	7.16

D'après le tableau ci-dessus, nous constatons que l'écart relatif en pourcentage entre la partie expérimentale et la partie théorique est faible, ce qui veut dire qu'il y a une concordance entre les deux modèles.

Nous avons vu précédemment que pour avoir l'inductance L_d , il a fallu calculer le flux à vide, pour déterminer l'inductance L_d , qui sera utilisé par la suite pour les essais en charge seulement pour les rotors à aimants enterrés.

III.2.4 Essai en Charge

Le but des essais en charge et de connaître la caractérisation couple/vitesse est de déterminer le rendement de la machine tout en calculant les différentes pertes.

Pour effectuer les essais en charge, il faut pouvoir travailler dans le mode des 4 quadrants (Figure 3.49), soit en moteur soit en générateur. Pour cela, le moteur synchrone à aimants permanents, a été relié au variateur de vitesse qui lui est réservé. Toutes les valeurs importantes ont été renseignées tel que, la vitesse max, le courant nominal, la tension nominale ou encore le nombre de paires de pôles dans les paramètres du variateur de vitesse, afin de pouvoir le programmer dans les quatre quadrants. Pour notre moteur synchrone, le variateur a été programmé en mode servomoteur, afin de pouvoir intervenir seulement sur le couple du moteur.

On a effectué une opération identique pour le moteur asynchrone, qui lui, est programmé en boucle ouverte, pour seulement intervenir sur la vitesse afin d'entraîner le moteur synchrone.

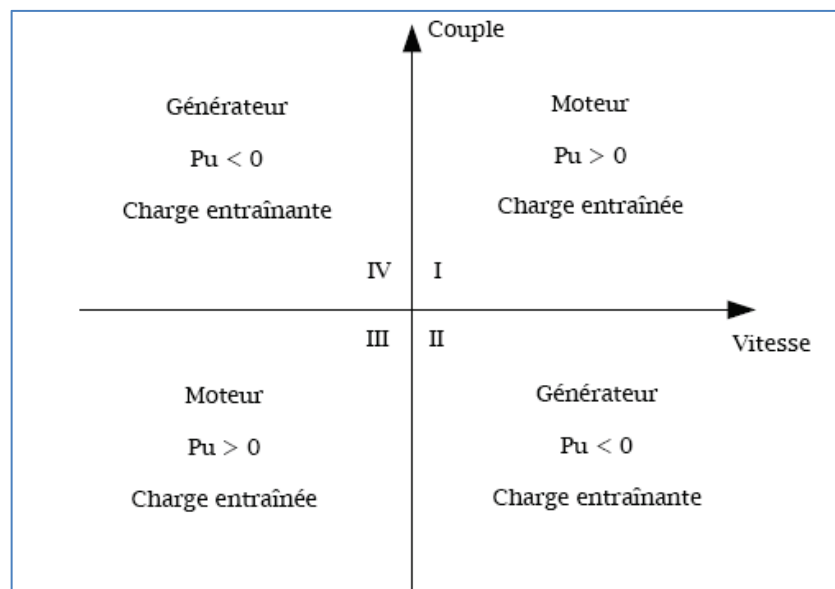


Figure 3.49. Mode des quatre quadrants

III.2.4.1 Préparation aux essais en charge

Avant d'effectuer les essais en charge il était important de configurer les variateurs de la machine synchrone et asynchrone. Pour cela une prise en main du mode d'emploi ainsi que du logiciel d'exploitation étaient nécessaires. Les variateurs SP27T sont représentés comme dans la figure 2.14. La configuration des deux variateurs est présentée en annexes 2.

Autre point important, s'agissant d'essais en charge, Il était important de sécuriser le lieu entre le banc d'essai et la personne réalisant les essais et d'adopter d'autre point de sécurité et de fiabilité.

En effet, le moteur peut s'emballer et venir à casser à tout moment lors des essais en charges.

Pour cela nous avons tout d'abord listé tous les points important. Ensuite nous avons sollicité les personnes concernées pour la réalisation de chaque étape.

Liste des points :

- Mettre en place une plaque en polycarbonate permettant de faire protection entre la machine et l'humain.

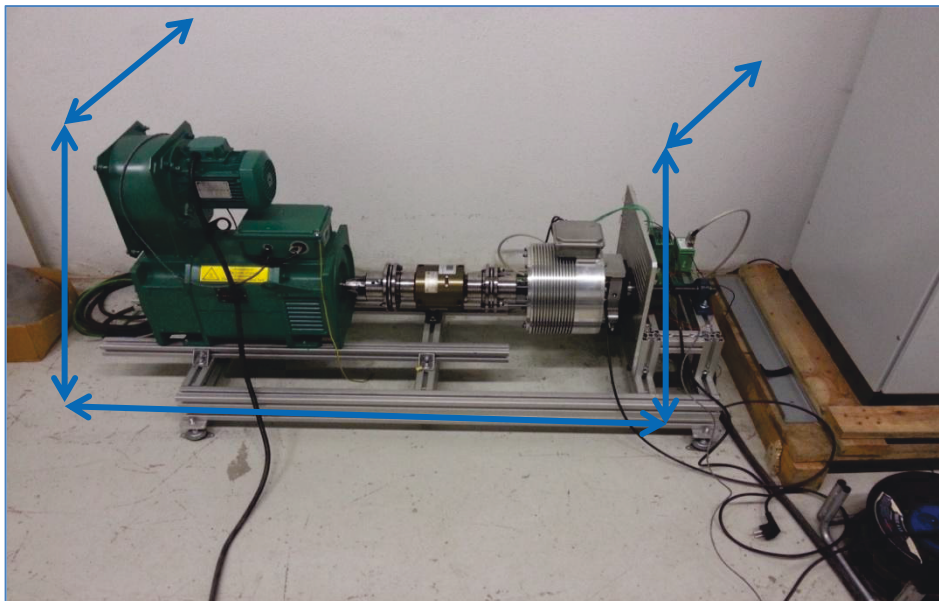


Figure 3.50. Pose plaque polycarbonate

- Mettre en place un support au pied de l'installation pour poser les appareils de mesures afin de faciliter la lecture et afin d'avoir un meilleur esthétique.

Le total pour la pose de la plaque en polycarbonate est estimé à 398,51 HT

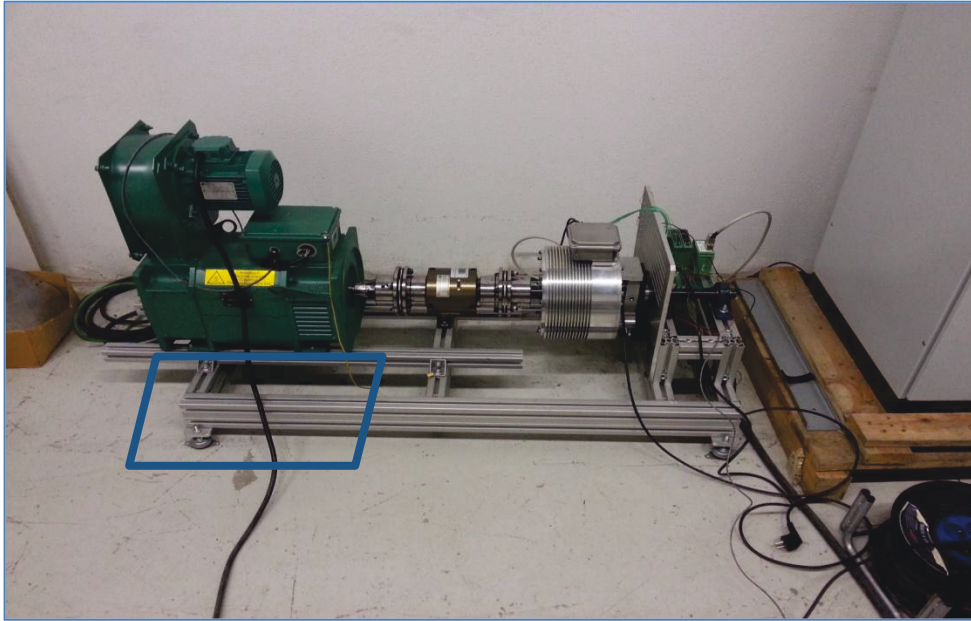


Figure 3.51. Support appareils mesures

- Venir bloquer le capteur de couple par une tige filetée reliant le capteur au rail du châssis. Lorsque l'axe tourne le capteur suit aussi le mouvement et peut emporter avec lui le câble et venir l'arracher si celui-ci n'est pas fixé. Le capteur de couple est libre de l'axe reliant les moteurs.

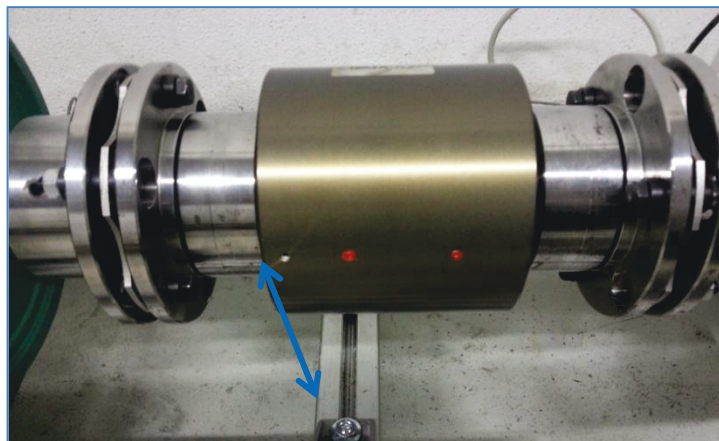


Figure 3.52. Pose tige filetée

- Mettre en place un disjoncteur pour la sécurité du ventilateur de la MAS en cas de surintensité. En effet, celui-ci était directement raccordé à la source sans sécurité. Le coût du disjoncteur est de 53.06 € Hors taxe + câble 1.5 mm² à 34.08 € HT.

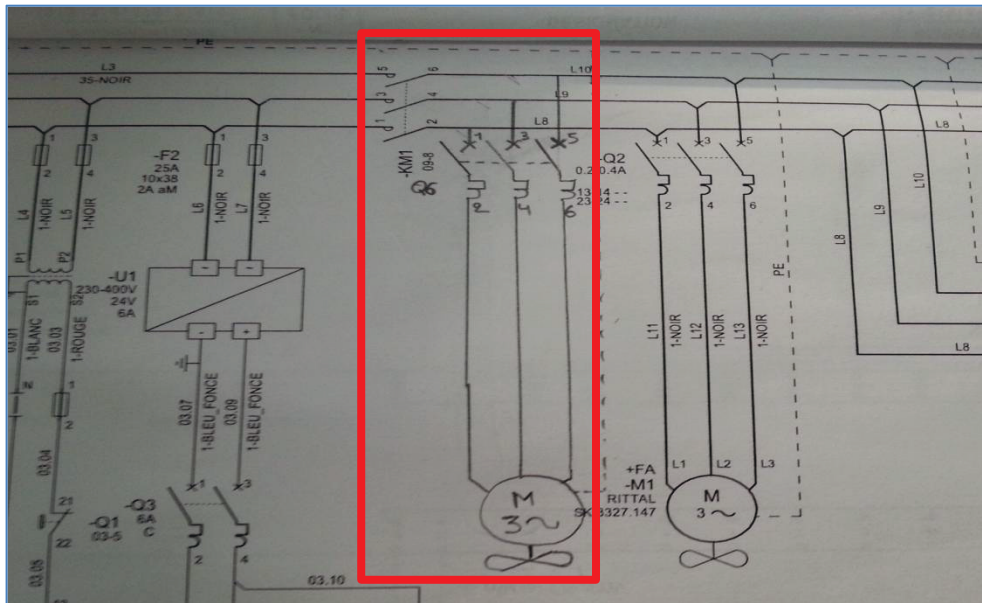


Figure 3.53. Ajout disjoncteur

Le total de la préparation est estimé à 485.65 € HT

III.2.4.2 Préparation Mise en place des appareils de mesures

Un autre point important est la préparation du matériel de mesures.

En effet, afin de pouvoir lire la tension, le courant et la puissance sur chaque phase, nous avons installé un analyseur de puissance qui effectuait le relevé de ces informations, automatiquement, par le biais des sondes de courants.

Pour pouvoir utiliser l'analyseur de puissance, il a fallu lui associer trois sondes de courant. Une commande d'achat a été effectuée pour ces trois sondes pour un total de 990 € TTC.

Avant d'utiliser l'analyseur de puissance sur le banc d'essai, il a fallu essayer sur une charge résistive afin d'être sûr que les valeurs affichées soient correctes.

Aussi, nous avons installé et câblé les sondes PT100 du moteur à une centrale de mesure, Graphtec GL450, afin de pouvoir visualiser la température en temps réel durant les

essais en charge, afin de ne pas détériorer le moteur lorsque la limite de la température est atteinte, $\approx 80^{\circ}\text{C}$.



Figure 3.54. Sondes de courants



Figure 3.55. Analyseur de puissance



Figure 3.56. Charge resistive



Figure 3.57. Graphtec GL450

Comme effectué avec la charge résistive afin de conforter nos valeurs, nous avons effectué la même opération pour le couple-mètre (ZFA). Pour cela nous avons mis en place un deuxième couple-mètre (DATAFLEX, Figure 3.58) sur l'axe, entre les deux moteurs associé à des accouplements.

Les caractéristiques des couples-mètres sont les suivantes :

- Couple nominal : -500 à +500 N.m

- Bande passante : 16 kHz (permet la mesure des ondulations de couple)
- Vitesse maximale : 6000 tr/min
- Précision : ± 2.5 N.m ($\pm 0.5\%$ du couple nominal)

Pour déterminer la valeur exacte du couple nous avons appliqué la formule suivante:

$$C \text{ (N.m)} = 100 \times (V \text{ mesurée} - V_0) \quad 3.3$$

L'ensemble capteur de couple accouplement est représenté ci-dessous :

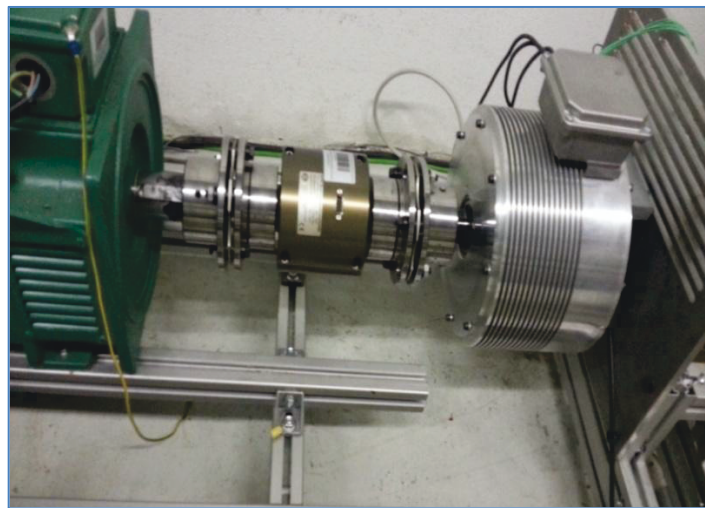


Figure 3.58. Capteur de couple KTR DATAFLEX 42/500

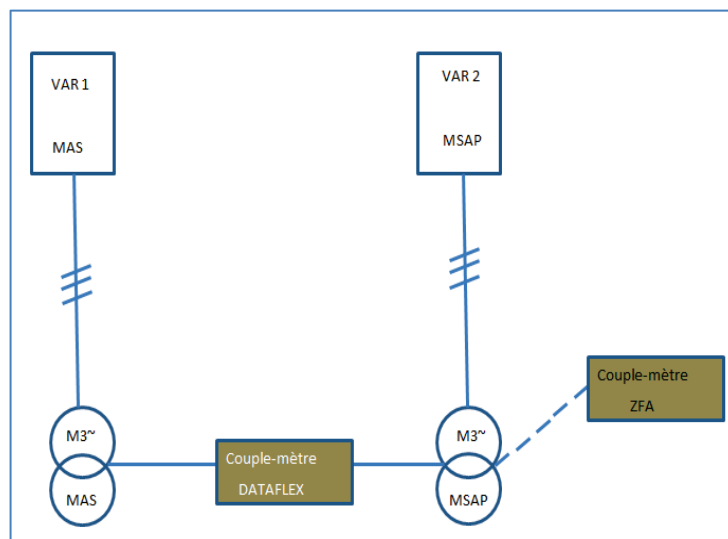


Figure 3.59. Synoptique d'installation

III.2.4.3 Relevé en Mode moteur, quadrant 1

Après installation des deux couples-mètre, nous avons relevé les valeurs (tension, vitesse, Puissance absorbé...) pour le rotor à aimant en surface, pour un palier de 500tr/min, par palier de couple de 10 %, dans les deux modes de fonctionnement, des 2 quadrants, moteur et générateur.

Les relevés (Tableau III.10 et III.11) consistaient à comparer les valeurs des deux couples-mètres suivant le mode moteur du quadrant N°1 et mode générateur du quadrant N°2 (Figure 3.60).

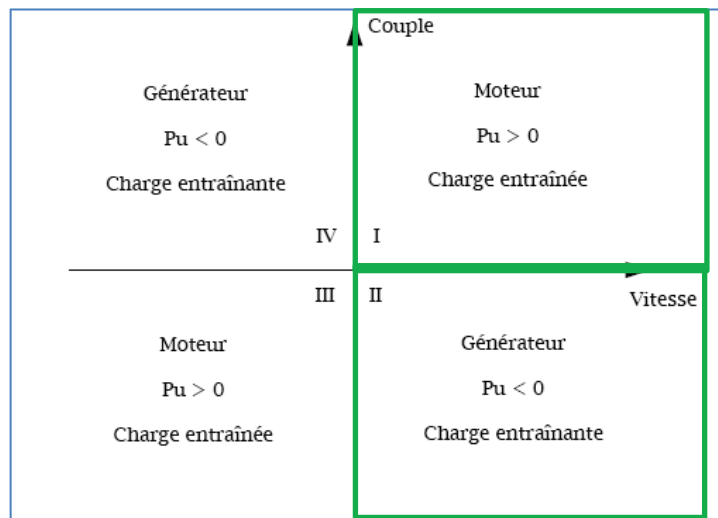


Figure 3.60. Mode de fonctionnement

Tableau III.10 : Tableau des différentes valeurs Mode générateur

Fréquence rpm	Couple en %	Couple-mètre ZFA U(V)	Couple-mètre ZFA après calcul en N.m	Puissance mécanique	Couple-mètre DATAFLEX U(V)	Couple-mètre DATAFLEX après calcul en N.m	Puissance mécanique	Pabs 5.03	
								MAS	MS
500	0	0.167	4.423329	231.604965	4.17	0	0	0.62	0
500	-10	0.086	2.277882	119.269623	4.23	6	314.159265	0.26	0.39
500	-20	0.341	9.032067	472.917922	4.29	12	628.318531	-0.13	0.81
500	-30	0.59	15.62733	818.245085	4.35	18	942.477796	-0.47	1.23
500	-40	0.84	22.24908	1164.9591	4.42	25	1308.99694	-0.79	1.65
500	-50	1.1	29.1357	1525.54168	4.47	30	1570.79633	-1.13	2.1
500	-60	1.34	35.49258	1858.38714	4.54	37	1937.31547	-1.46	2.55
500	-70	1.59	42.11433	2205.10116	4.56	39	2042.03522	-1.8	3
500	-80	1.84	48.73608	2551.81518	instable	#VALEUR!	#VALEUR!	-2.1	3.46

Tableau III.11 : Tableau des différentes valeurs Mode moteur

Fréquence rpm	Couple en %	Couple-mètre ZFA U(V)	Couple-mètre ZFA après calcul en N.m	Puissance Mécanique	Couple-mètre DATAFLEX U(V)	Couple-mètre DATAFLEX après calcul en N.m	Puissance Mécanique	Pabs 5.03	
								MAS	MS
500	0	0.13	3.44331	180.29129	4.32	17	890.1179185	0.57	0
500	10	0.37	9.80019	513.1367485	4.23	26	1361.356817	0.96	0.32
500	20	0.63	16.68681	873.7193285	4.2	29	1518.436449	1.35	0.64
500	30	0.88	23.30856	1220.433348	4.14	35	1832.595715	1.73	0.95
500	40	1.14	30.19518	1581.015928	4.09	40	2094.395102	2.11	1.28
500	50	1.39	36.81693	1927.729947	4.03	46	2408.554368	2.51	1.55
500	60	1.64	43.43868	2274.443966	3.975	51.5	2696.533694	2.91	1.8
500	70	1.88	49.79556	2607.289425	3.92	57	2984.513021	3.31	2.08
500	80	2.12	56.15244	2940.134883	3.9	59	3089.232776	3.76	2.37

Graphique des comparaisons des valeurs des deux couples-mètres.



Figure 3.61 : Courbes des deux couples-mètres mode Moteur

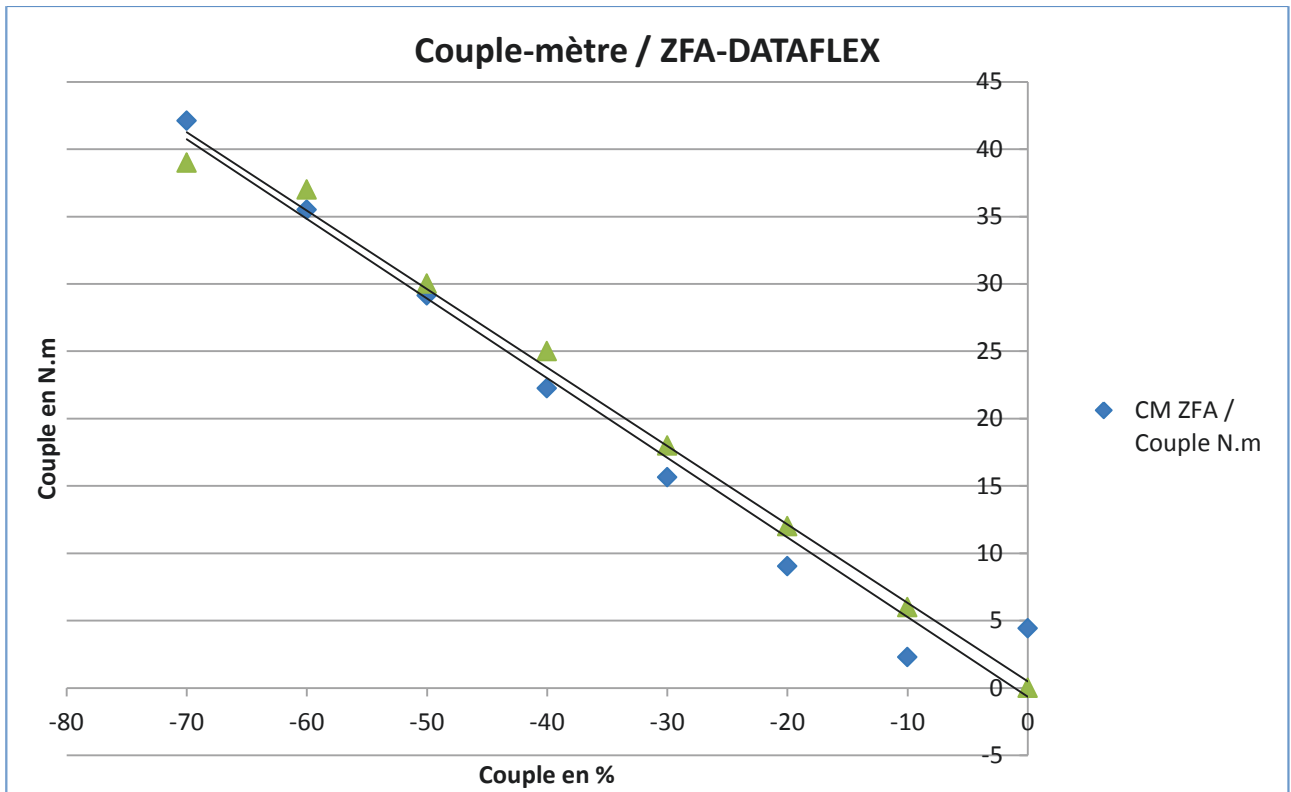


Figure 3.62 : Courbes des deux couples-mètres mode Générateur

Une fois avoir comparé les résultats, des deux couple-mètres, on a constaté une légère différence du fait de sa position sur le banc.

Néanmoins les valeurs trouvées confirment, la possibilité de se fier au couple-mètre ZFA. De plus, comme nous étions sûrs, que la valeur transmise était fiable, nous avons utilisé seulement le couple-mètre ZFA.

Enfin, après avoir préparé le banc, nous avons effectué les essais en charge et les relevés, décrits dans le chapitre suivant.

III.2.4.4 Essai en charge pour rotor à aimant externe

Avant de commencer les relevés nous avons défini des étapes pour effectuer les relevés. L'essai a été réalisé sur le rotor à aimant extérieur.

Chaque étape comporte un palier de vitesse ou il a fallu effectuer les relevés de la puissance pour chaque phase, les relevés de la tension pour chaque phase, les courants de chaque phase, la valeur du couple-mètre est ce, pour des couples allant de 10 % à 160 %.

Ces essais ont été répétés pour des paliers de vitesse de 250, 500, 750, 1000 et 1100tr/min.

Les essais ont été réalisés pour les fonctionnements dans les quatre cadrant (voir figure 3.49).

Les tableaux ci-dessous (III.10 et III.11), représentent les valeurs relevées et calculées pour une vitesse de 1100 tr/min en mode moteur, avec des paliers de couple allant de 10 à 160%.

Tableau III.12 : Tableau des différentes valeurs Mode moteur

Fréquence de rotation tr/min	Couple %	P1 (W)	P2 (W)	P3 (W)	P totale (W)	I1 (A)	I2 (A)	I3 (A)
1100	0	18.54	11.07	14.22	43.83	1.78	1.75	1.8
1100	10	291.7	286.7	293.37	871.77	1.61	1.58	1.64
1100	20	565.5	554.6	566.7	1686.8	3.13	3.07	3.17
1100	30	834.9	821.3	837.6	2493.8	4.66	4.6	4.69
1100	40	1097.9	1089.5	1103.5	3290.9	6.19	6.12	6.24
1100	50	1362.3	1343.5	1365.7	4071.5	7.73	7.66	7.78
1100	60	1627.1	1597.4	1632.9	4857.4	9.28	9.19	9.33
1100	70	1879.6	1859.8	1885.8	5625.2	10.82	10.72	10.88
1100	80	2107.5	2085.9	2112	6305.4	12.23	12.15	12.28
1100	90	1865.5	1794	1932.3	5591.8	13.05	13	13.08
1100	100	2152	2158.9	2162.7	6473.6	13.61	13.56	13.63
1100	110	2262.8	2210.8	2256.7	6730.3	14.2	13.98	14.03
1100	120	2242	2263.9	2288.6	6794.5	14.35	14.3	14.34
1100	130	2312.9	2305.3	2314.6	6932.8	14.58	14.55	14.6
1100	140	2356.7	2362.6	2333	7052.3	14.79	14.76	14.8
1100	150	2333.9	2347.2	2344.8	7025.9	14.96	14.93	14.97
1100	160	2369.9	2338.2	2355	7063.1	15.09	15.08	15.1

Tableau III.13 : Suite tableau des différentes valeurs Mode moteur

P joules (W)			3RI ²	Perte mécanique	U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	Couple- mètre ZFA en N/m	Puissance Electromagnétique (W)
R1.I1 ²	R2.I2 ²	R3.I3 ²							
1.045572	1.010625	1.0692	3.125397	387.48	239.5	239	238.6	0	0
0.855393	0.823812	0.887568	2.566773	387.48	243.2	242	242	7.0561368	812.8086096
3.232977	3.110217	3.316137	9.659331	387.48	243.6	241.9	243.3	14.1122736	1625.617219
7.166148	6.9828	7.258713	21.407661	387.48	243.5	242	242.6	21.1684104	2438.425829
12.644313	12.359952	12.849408	37.853673	387.48	242.4	242.8	241.4	28.2245472	3251.234438
19.718457	19.362948	19.974372	59.055777	387.48	242	241.1	241.5	35.280684	4064.043048
28.419072	27.870513	28.726137	85.015722	387.48	242.6	240.6	241.6	42.3368208	4876.851657
38.633892	37.923072	39.063552	115.620516	387.48	241.8	242.3	241.6	49.3929576	5689.660267
49.359057	48.715425	49.763472	147.837954	387.48	241.6	240.87	241.7	56.4490944	6502.468877
56.199825	55.77	56.458512	168.428337	387.48	242.6	240.2	241.2	63.5052312	7315.277486
61.126593	60.678288	61.306377	183.111258	387.48	243.4	241.9	243.3	70.561368	8128.086096
66.5412	64.495332	64.957497	195.994029	387.48	243.7	241.5	242.2	77.6175048	8940.894705
67.954425	67.4817	67.859748	203.295873	387.48	242.5	242.1	241.6	84.6736416	9753.703315
70.150212	69.861825	70.3428	210.354837	387.48	244.3	242.1	243.6	91.7297784	10566.51192
72.185553	71.893008	72.2832	216.361761	387.48	244	244.1	244.3	98.7859152	11379.32053
73.854528	73.558617	73.953297	221.366442	387.48	245.4	244.8	244.5	105.842052	12192.12914
75.143673	75.044112	75.2433	225.431085	387.48	247.7	242.3	247.6	112.8981888	13004.93775

Après avoir relevé les valeurs pour différentes vitesses et différents couples, nous avons tracé les courbes des différentes pertes et puissances.

Pour notre exemple nous tracerons les courbes du tableau III.11, pour une vitesse de 1100 tr/min ainsi que pour des couples allant de 0 à 160% de couple, en fonctionnement moteur. Nous le ferons aussi en comparant les essais en modes générateur et moteur, pour seulement deux quadrants. Voici un rappel du bilan de puissance (Figure 3.62.).

Nous pouvons exprimer ce bilan de puissance de la manière suivante :

$$P_a = P_u + P_{fe} + P_j + P_m + P_s \quad 3.4$$

Avec P_a : Puissance absorbée (électrique, en fonctionnement moteur)

P_u : Puissance utile (mécanique, en fonctionnement moteur)

P_{Fe} : Perte Fer

P_j : Pertes dans le cuivre

P_m : Pertes mécaniques

P_s : Pertes supplémentaires

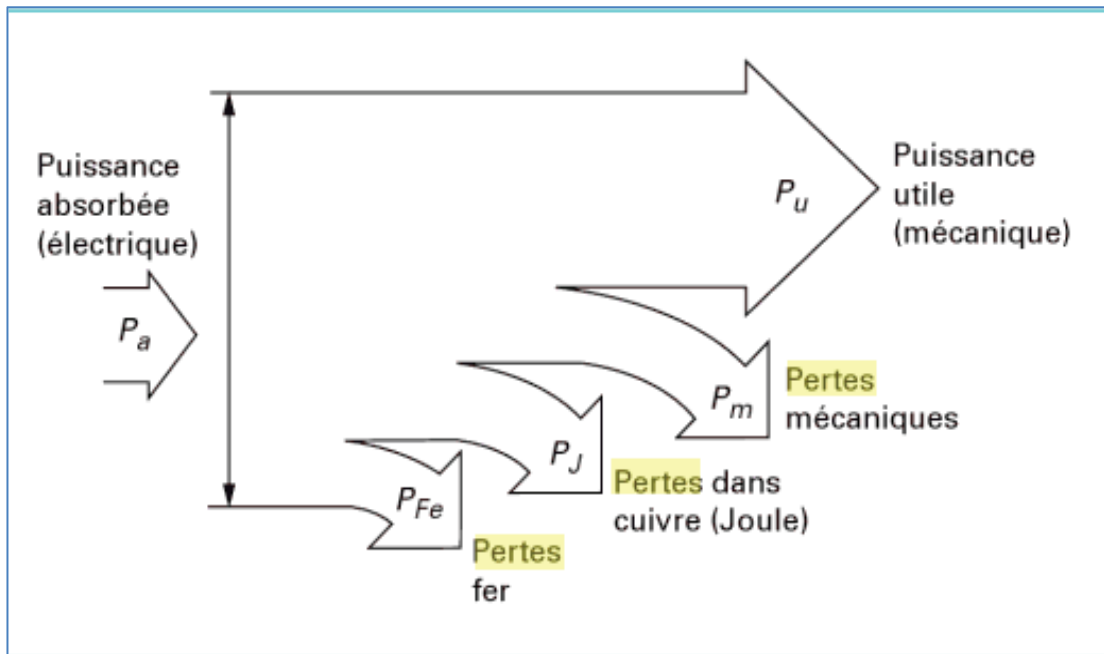


Figure 3.63 : Bilan des puissances dans un moteur électrique

Dans le chapitre qui suit, nous calculerons différentes pertes pour différentes valeurs relevées durant les essais, pour le rotor à aimant permanent.

III.2.4.4.1 V moyen en mode moteur et générateur

Les tableaux ci-dessous illustrent les relevés effectués de la tension moyenne, le courant moyen, perte joule et puissance utile, en mode générateur et en mode moteur.

Tableau III.14 : V moyen Moteur

U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	Couple %	U moy
239.5	239	238.6	0	239.033333
243.2	242	242	10	242.4
243.6	241.9	243.3	20	242.933333
243.5	242	242.6	30	242.7
242.4	242.8	241.4	40	242.2
242	241.1	241.5	50	241.533333
242.6	240.6	241.6	60	241.6
241.8	242.3	241.6	70	241.9
241.6	240.87	241.7	80	241.39
242.6	240.2	241.2	90	241.333333
243.4	241.9	243.3	100	242.866667
243.7	241.5	242.2	110	242.466667
242.5	242.1	241.6	120	242.066667
244.3	242.1	243.6	130	243.333333
244	244.1	244.3	140	244.133333
245.4	244.8	244.5	150	244.9
247.7	242.3	247.6	160	245.866667

Tableau III.15 : V moyen Générateur

U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	Couple %	U moy
239.9	241.1	240.9	0	240.633333
245.1	236.9	229.8	-10	237.266667
237.2	236	235.2	-20	236.133333
236.4	235.2	233.3	-30	234.966667
250.6	251.6	249.9	-40	250.7
233.2	232.9	232.4	-50	232.833333
236.5	234.8	236.4	-60	235.9
236.3	235.2	236.1	-70	235.866667
237.4	234.7	233.4	-80	235.166667
236.6	234.7	234.7	-90	235.333333
237.5	236.9	237.2	-100	237.2
237.9	236.7	236.4	-110	237
240.8	236.1	236.4	-120	237.766667
238.1	238.4	239	-130	238.5
238.3	235.4	244	-140	239.233333
238.6	239.8	236.6	-150	238.333333

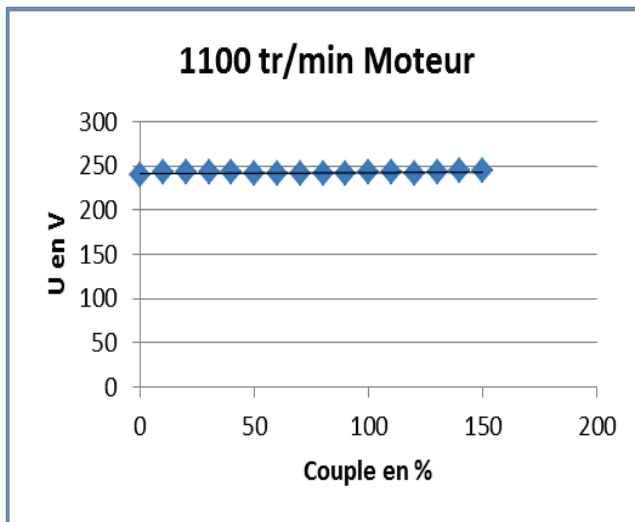


Figure 3.64. Courbe V moyen Moteur

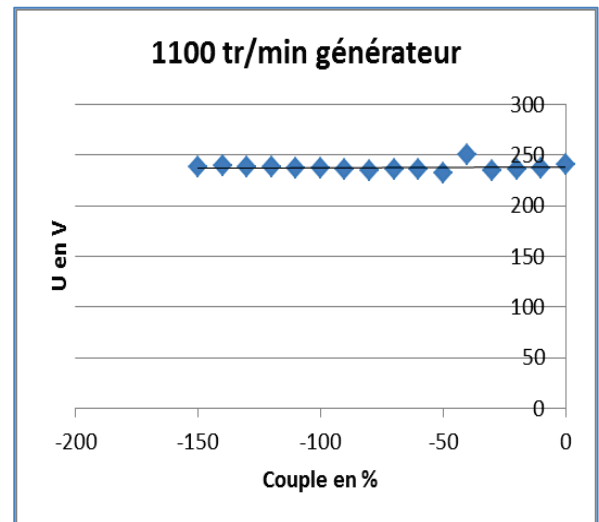


Figure 3.65. Courbe V moyen générateur

Nous constatons que la courbe en mode moteur est relativement constante, à peu près proche de la f.é.m. Nous observons une légère augmentation dû au fait que en augmentant le couple, le courant augmente. Concernant le mode générateur, le même résonnement est constaté en sens inverse.

III.2.4.4.2 Puissance Utile, moteur et générateur

Pour le calcul de la puissance utile en mode Moteur, nous avons effectué le calcul suivant :

$$P_u = \Gamma \cdot \omega \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right) \quad 3.5$$

Pour le calcul de la puissance utile en mode Générateur, nous avons effectué le calcul suivant :

$$P_u = UI \cos\varphi \quad 3.6$$

Tableau III.16 : Pu Moteur

Couple %	Couple mesuré	Vitesse de rotation	PU
0	0	1100	0
10	7.0561368	1100	812.80861
20	14.1122736	1100	1625.61722
30	21.1684104	1100	2438.42583
40	28.2245472	1100	3251.23444
50	35.280684	1100	4064.04305
60	42.3368208	1100	4876.85166
70	49.3929576	1100	5689.66027
80	56.4490944	1100	6502.46888
90	63.5052312	1100	7315.27749
100	70.561368	1100	8128.0861
110	77.6175048	1100	8940.89471
120	84.6736416	1100	9753.70331
130	91.7297784	1100	10566.5119
140	98.7859152	1100	11379.3205
150	105.842052	1100	12192.1291
160	112.8981888	1100	13004.9378

Tableau III.17 : Pu Générateur

Couple %	Couple mesuré	Vitesse de rotation	P sortie_calculée
0	0	1100	0
10	-6.436341	1100	341.9894367
20	-12.872682	1100	1069.931171
30	-19.309023	1100	1793.677451
40	-25.745364	1100	2507.760671
50	-32.181705	1100	3160.159961
60	-38.618046	1100	3929.006218
70	-45.054387	1100	4656.985309
80	-51.490728	1100	5363.665309
90	-57.927069	1100	6093.961363
100	-64.36341	1100	6825.996582
110	-70.799751	1100	7558.768098
120	-77.236092	1100	8293.507668
130	-83.672433	1100	9029.229878
140	-90.108774	1100	9764.778014
150	-96.545115	1100	10502.67601

Pour la Puissance calculée de Sortie, nous avons retranchée à la Puissance Absorbée, les pertes Joules ainsi que les pertes Mécaniques.

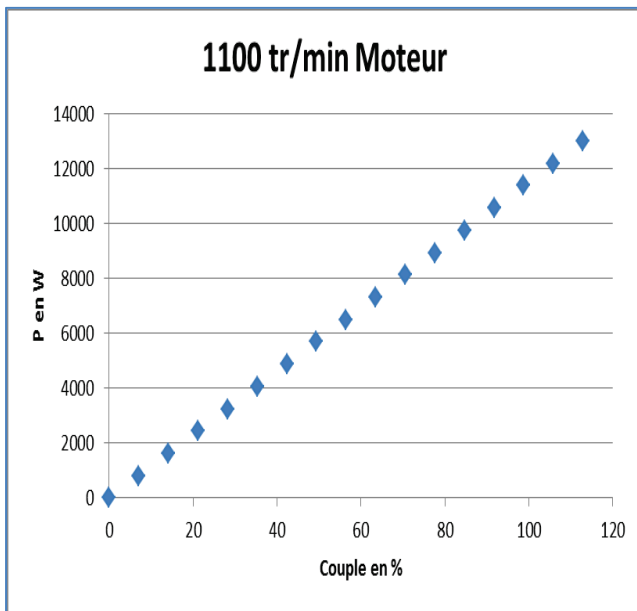


Figure 3.66. Courbe Pu Moteur

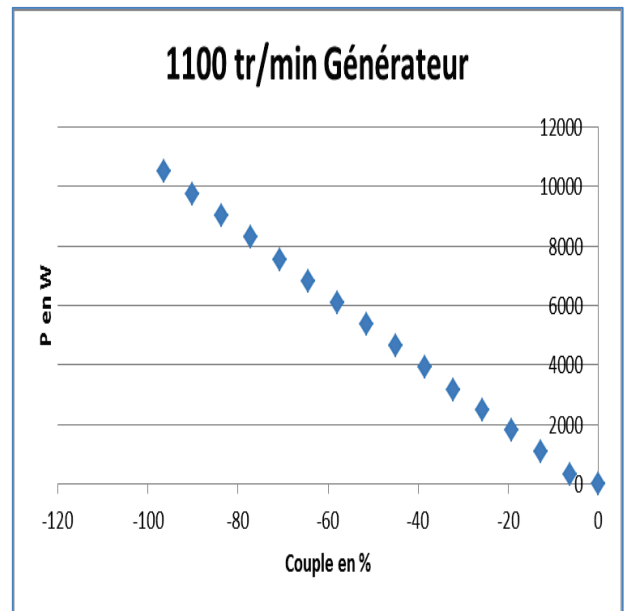


Figure 3.67. Courbe Pu générateur

Nous constatons que les mesures traduisent bien les attentes théoriques qui sont que, pour une vitesse donnée, la puissance utile est une fonction linéaire du couple.

III.2.4.4.3 Puissance Absorbée, moteur et générateur

Pour le calcul de la puissance absorbée en mode Moteur, nous avons effectué le calcul suivant :

$$P_a = UI \cos\varphi \quad 3.7$$

Pour le calcul de la puissance absorbée en mode Générateur, nous avons appliqué la formule suivante :

$$Pa = \Gamma \cdot \omega \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right)$$

3.8

Tableau III.18 : Pa Moteur

Couple %	P entrée_calculée	Couple-mètre ZFA en N/m
0	390.605397	0
10	1202.855383	7.0561368
20	2022.75655	14.1122736
30	2847.31349	21.1684104
40	3676.568111	28.2245472
50	4510.578825	35.280684
60	5349.347379	42.3368208
70	6192.760783	49.3929576
80	7037.786831	56.4490944
90	7871.185823	63.5052312
100	8698.677354	70.561368
110	9524.368734	77.6175048
120	10344.47919	84.6736416
130	11164.34676	91.7297784
140	11983.16229	98.7859152
150	12800.97559	105.842052
160	13617.84884	112.8981888

Tableau III.19 : Pa Générateur

Couple %	Fréquence de rotation tr/min	Couple-mètre ZFA en N/m	Puissance abs (W)
0	1100	0	0
-10	1100	-6.436341	741.413259
-20	1100	-12.872682	1482.82652
-30	1100	-19.309023	2224.23978
-40	1100	-25.745364	2965.65303
-50	1100	-32.181705	3707.06629
-60	1100	-38.618046	4448.47955
-70	1100	-45.054387	5189.89281
-80	1100	-51.490728	5931.30607
-90	1100	-57.927069	6672.71933
-100	1100	-64.36341	7414.13259
-110	1100	-70.799751	8155.54585
-120	1100	-77.236092	8896.9591
-130	1100	-83.672433	9638.37236
-140	1100	-90.108774	10379.7856
-150	1100	-96.545115	11121.1989

Pour la Puissance entrée calculée, nous avons additionnée à la Puissance Utile, les pertes Joules ainsi que les pertes Mécaniques

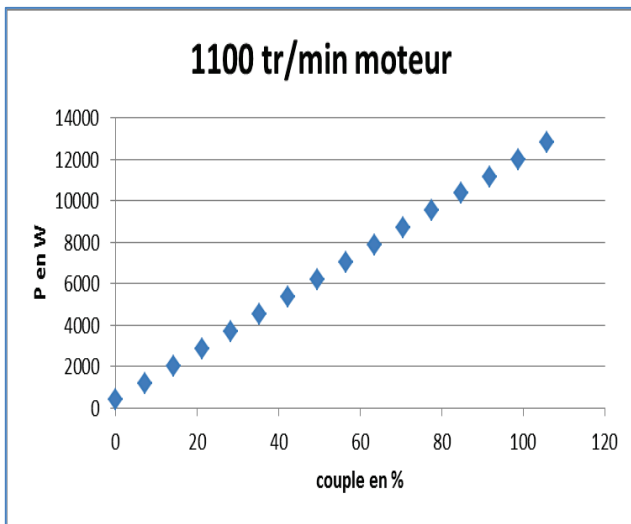


Figure 3.68. Courbe Pa Moteur

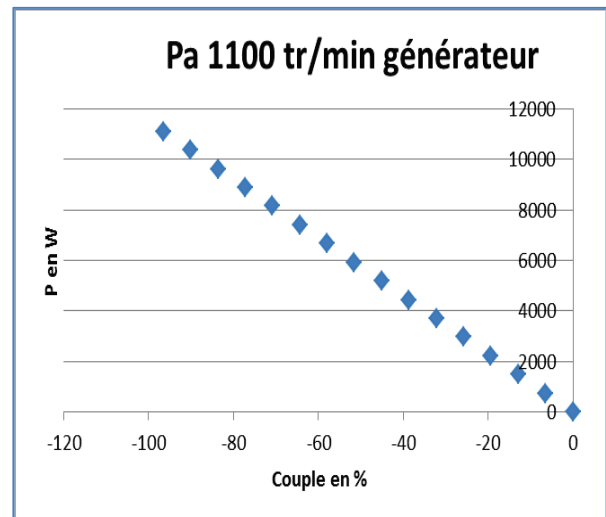


Figure 3.69. Courbe Pa générateur

Pour une vitesse donnée, la Pa augmente avec l'augmentation du couple à cause d'une part, l'augmentation de la Pu et d'autre part les Pj et Pfer.

III.2.4.4.4 Rendement

Comme nous avons pu calculer les puissances utiles et les puissances absorbées, nous pouvons maintenant calculer le rendement. Pour cela nous allons reprendre les tableaux des Pa et Pu en mode générateur et en mode moteur, puis tracer le rendement pour une même fréquence de rotation de 1100 tr/min avec des paliers de consignes, allant de 0 à 160% du couple.

Tableau III.20 : Rendement Moteur

P sortie_calculée	PA	η
0	0	#DIV/0!
341.9894367	741.413259	0.46126696
1069.931171	1482.82652	0.72154845
1793.677451	2224.23978	0.8064227
2507.760671	2965.65303	0.84560151
3160.159961	3707.06629	0.85246923
3929.006218	4448.47955	0.88322452
4656.985309	5189.89281	0.89731821
5363.665309	5931.30607	0.90429751
6093.961363	6672.71933	0.91326505
6825.996582	7414.13259	0.92067366
7558.768098	8155.54585	0.92682553
8293.507668	8896.9591	0.93217329
9029.229878	9638.37236	0.93680027
9764.778014	10379.7856	0.94074949
10502.67601	11121.1989	0.94438344

Tableau III.21 : Rendement Générateur

P entrée_calculée	PU	η
390.605397	0	0
1202.855383	812.80861	0.67573261
2022.75655	1625.61722	0.8036643
2847.31349	2438.42583	0.85639528
3676.568111	3251.23444	0.88431231
4510.578825	4064.04305	0.90100256
5349.347379	4876.85166	0.91167227
6192.760783	5689.66027	0.9187599
7037.786831	6502.46888	0.92393661
7871.185823	7315.27749	0.92937426
8698.677354	8128.0861	0.93440483
9524.368734	8940.89471	0.93873882
10344.47919	9753.70331	0.94288974
11164.34676	10566.5119	0.94645143
11983.16229	11379.3205	0.94960915
12800.97559	12192.1291	0.9524375
13617.84884	13004.9378	0.95499208

Une fois que nous avons obtenues la valeur des rendements, nous avons décidé de tracer le rendement en mode moteur et en mode générateur pour des paliers de vitesses allant de 250 à 1100 tr/min avec un couple quasiment identique.

De plus pour le calcul du rendement nous avons additionner aux pertes utiles, les pertes joules ainsi que les pertes mécaniques.

Tableau III.22 : rendement en mode moteur pour plusieurs points de vitesse

Couple en %	Vitesse	Pj	Perte Méca	Couple N/m	Pu	P entrée calculée	η
100	250	180.78	387.48	69.92568	1830.65002	2398.91002	0.76312
100	500	181.59	387.48	69.713784	3650.20519	4219.27519	0.86513
100	750	182.25	387.48	70.270011	5518.99376	6088.72376	0.90643
100	1000	182.75	387.48	70.031628	7333.69493	7903.92493	0.92785
100	1100	183.111	387.48	70.561368	8128.0861	8698.6771	0.9344

Tableau III.23 : rendement en mode générateur pour plusieurs points de vitesse

Couple en %	Vitesse	Pj	Perte Méca	Couple N/m	P sortie calculé	Pa	η
100	250	171.9	387.48	61.158483	1041.74534	1601.12534	0.65063
100	500	181.15	387.48	60.708204	2610.04413	3178.67413	0.82111
100	750	181.73	387.48	60.9201	4215.44347	4784.65347	0.88103
100	1000	186.53	387.48	63.330417	6057.93576	6631.94576	0.91345
100	1100	200.65	387.48	64.36341	6826.00259	7414.13259	0.92067

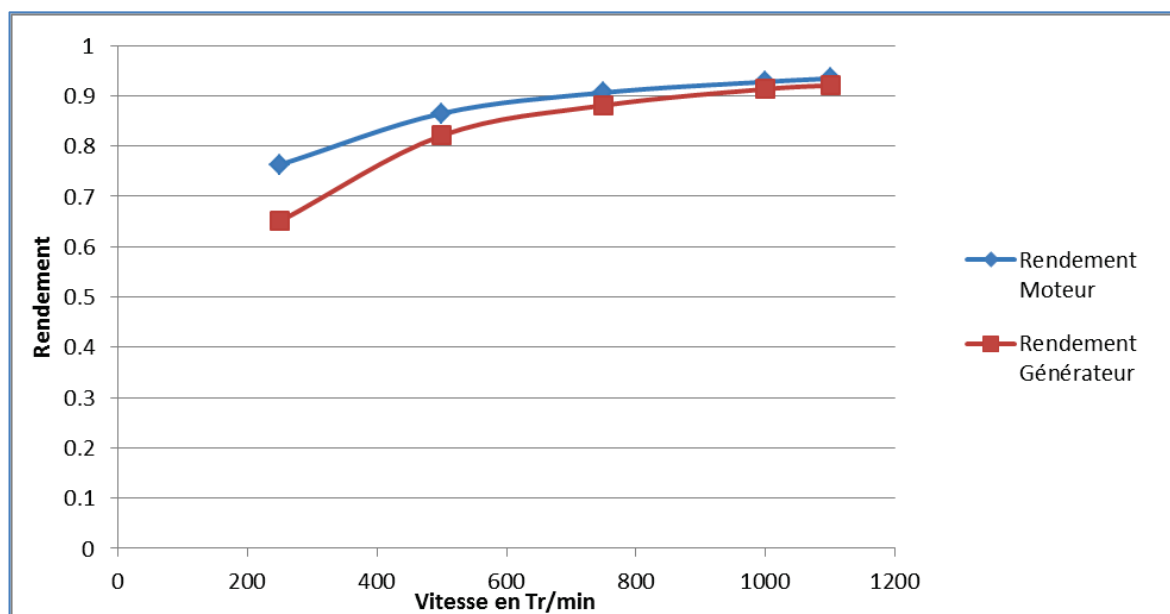


Figure 3.70 : Courbes des rendements Moteurs et Générateur

Sur la courbe ci-dessus, nous constatons que le rendement croît avec la vitesse, car la puissance utile croît plus vite que les pertes.

Au cours des essais, l'analyseur de puissance s'est détérioré et est devenu inutilisable. Le fabricant, ne fabriquant plus ce type d'appareil, il a fallu utiliser l'oscilloscope afin de visualiser les courbes de la tension, du courant ainsi que de la puissance.

Après avoir obtenu ces courbes, les données ont été enregistrées sur clé USB pour pouvoir les traiter sur fichier Excel afin d'en sortir la valeur efficace de la tension, du courant, la puissance portante par le fondamental, la puissance moyenne calculée ainsi que la puissance moyenne mesurée.

Une fois que les valeurs ont été validées, les essais en charge pour l'aimant extérieur ont pu être finis.

Il y avait un point important à prendre en compte concernant la suite des essais sur les autres rotors.

En effet, s'agissant de rotors à aimant enterrés, il était important de connaître la position de l'angle du rotor pour contrôler le défluxage.

Le variateur de vitesse ne transmettant pas cette information dans ses paramètres, nous avons décidé d'essayer de visualiser le top zéro du codeur à l'oscilloscope afin de déterminer en temps réel, l'angle de position du moteur.

III.2.4.4.5 Position de l'angle du moteur

Pour connaître la position exacte du codeur, nous avons tout d'abord étudié le document technique du codeur de la M.A.S.

En effet, il a fallu prendre le codeur de la M.A.S, car le codeur est accessible, contrairement à la M.S.A.P ou il n'était pas possible d'y avoir accès.

De plus, la M.A.S venant entraîner la M.S.A.P, sur un même axe, la position déterminée en angle pour l'un sera identique pour l'autre.

Nous avons repéré tout d'abord la connectique donnant l'impulsion du top zéro, puis avec un fil volant, soudé à la connectique et relié à l'oscilloscope, nous avons visualisé le signal provenant du top zéro.

Le but était, une fois avoir eu la position zéro, de visualiser le décalage d'angle entre le top zéro et la tension ainsi que entre le top zéro et le courant.

L'essai n'a pas été concluant, car l'impulsion que nous devons visualiser se faisait dans un laps de temps très rapide. Le relevé effectué par l'oscilloscope ne permettait pas de visualiser des impulsions aussi rapides sur une durée d'enregistrement d'un tour.

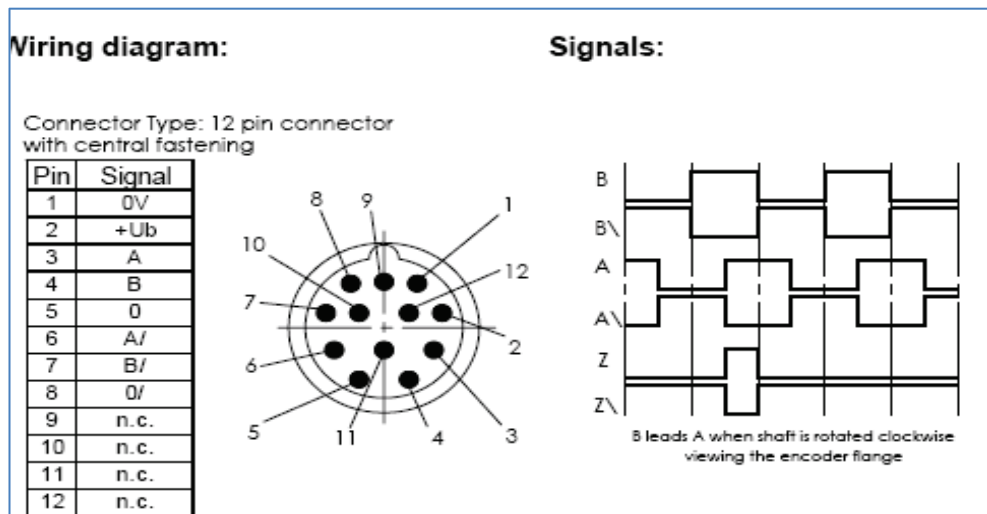


Figure 3.71 : Schéma du connecteur du capteur de position

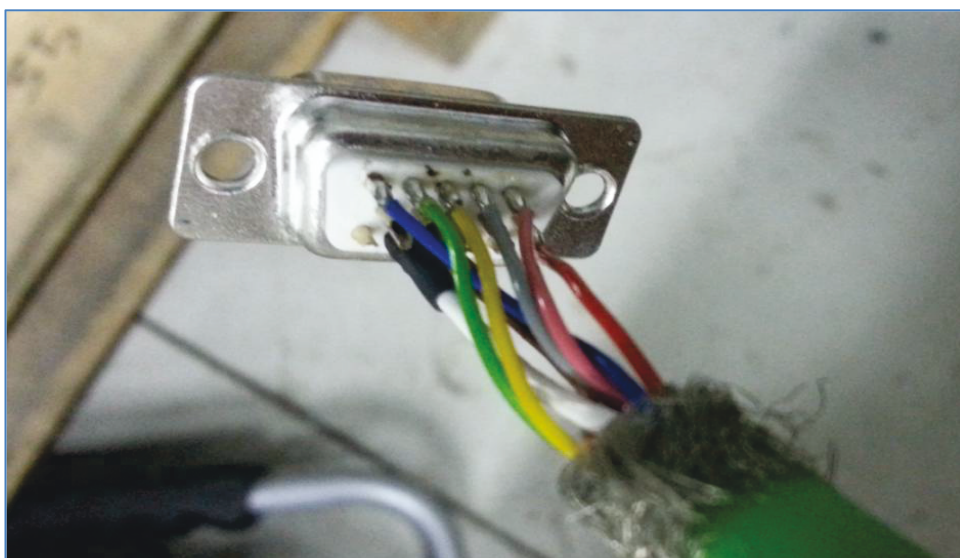


Figure 3.72 : Schéma du connecteur du capteur de position

III.2.5 Conclusion

L'essai en charge permet de déterminer le rendement de la machine. Pour calculer le rendement, nous avons effectué les essais en mode générateur et en mode moteur à la vitesse maximale de 1100 tr/min sur le rotor à aimant externe. Une fois avoir obtenu les valeurs voulues, nous avons pu déterminer les puissances absorbées et les puissances utiles afin d'en déterminer le rendement.

D'une part durant les essais à vide, nous avons constaté que le rotor en forme de «I» et le rotor à aimant en surface ont sensiblement, les flux à vide les plus élevés, ce qui a une influence sur les performances en couples. Concernant les pertes mécaniques, nous constatons que le rotor à aimant en surface, a les pertes les plus élevées, du fait que ses aimants en surface viennent se frotter au mouvement aéroulique.

D'autre part, concernant les essais en court-circuit, nous avons calculé l'inductance L_d , qui servira aux calculs des rotors à aimants enterrés durant les essais en charge.

De plus après comparaison avec les valeurs théoriques nous avons plus constatés que les valeurs se rapprochaient.

Après avoir essayé plusieurs tentatives afin de déterminer la position du moteur, nous n'avons pas pu continuer la suite des essais sur les autres rotors.

En effet, comme déjà cité plus haut, il est impératif de connaître la position du moteur en angle pour des aimants enterrés, de plus, n'ayant plus de temps pour la suite des essais comme le stage venait à terme, on a dû laisser les essais qui devront être repris par un autre stagiaire.

Néanmoins, les données déjà acquis, ont permis d'atteindre l'objectif fixé qui était d'avoir un maximum de données.

Conclusion Générale

L'objectif de ce stage, avait pour objet, la réalisation des caractérisations détaillées d'un moteur synchrone à aimants innovants permanents afin de mettre en place une base de données expérimentales utile pour le développement de recherche futures au sein du laboratoire FEMTO-ST. Enfin, il fallait effectuer des comparaisons entre le modèle théorique réalisé par un thésard ainsi que les valeurs des caractérisations expérimentales.

Dans un premier temps nous avons abordé les généralités de la machine synchrone à aimants permanents en se basant sur des supports bibliographiques. Il a été abordé des différentes structures, à flux axial et à flux radial ainsi que les différentes structures d'aimant, tel que, les aimants déposés en surface, les structures à aimants enterrés ou encore les structures à aimants insérés. Nous avons aussi évoqué les différents champs d'application de la MSAP, dans divers domaines, les équipements domestiques, les lecteurs CD, DVD, ect... Nous avons listé leurs avantages et inconvénients, ainsi que les différents types d'aimants permanents qui peuvent être utilisés, comme les Alnicos, les Ferrites, le Néodyme-Fer-Bor ou encore le Samarium-Cobalt. Enfin nous avons vu fermé ce chapitre en abordant le principe de l'autopilotage en évoquant les différents capteurs utilisés. Nous pouvons conclure dans ce premier chapitre, que le présent statut de ces machines montre qu'elles possèdent un potentiel élevé pour une plus longue utilisation.

Dans un deuxième temps nous avons vu le banc d'essai qui est composé d'un moteur asynchrone, d'un moteur synchrone à aimants permanents, des deux variateurs associés à ces deux moteurs, enfin nous avons présenté les quatre rotors prototype possédant une structure d'implantation des aimants différents les uns des autres. Nous avons tout d'abord rédigé un manuel d'utilisation du changement de rotor, ensuite nous avons étudié les variateurs. Enfin, nous avons conclu que ces deux étapes étaient importantes afin de bien connaître le banc et de mieux exploiter les essais durant la manipulation du banc.

Dans un troisième temps, nous avons abordé les différents types d'essais. Tout d'abord, nous avons effectué les essais à vide sur les quatre rotors qui permettent de calculer les pertes mécaniques. Nous avons exploité les essais à vide, de manière à obtenir pour les quatre rotors, le bilan des F.F.T et le bilan des f.é.m. En concluant sur ces deux bilans, nous pouvons dire que le rotor en forme de «I» et le rotor à aimant extérieur, on

sensiblement, les flux à vide les plus élevés, ce qui a une influence sur les performances en couples. Nous avons aussi calculé les pertes mécaniques en concluant que le rotor à aimant extérieur avait le plus de pertes du fait que ses aimants en surface viennent se frotter au mouvement aérodynamique. Nous avons ensuite réalisé les essais en court-circuit, afin de calculer l'inductance L_d , en passant par un calcul du flux à vide. Enfin notre troisième essai, concernait, les essais en charge ou nous avons tout d'abord configuré les paramètres des variateurs, puis nous avons listés toute une série d'étape à réaliser sur le banc d'essai afin de le sécuriser pour les essais en charge. L'essai en charge permet de déterminer le rendement de la machine. Pour calculer le rendement, nous avons effectué les essais en mode générateur et en mode moteur à la vitesse maximale de 1100 tr/min sur le rotor à aimant externe. Une fois avoir obtenu les valeurs voulues, nous avons pu déterminer les puissances absorbées et les puissances utiles afin d'en déterminer le rendement.

Durant les essais en charge, l'analyseur de puissance s'est détérioré, ce qui a beaucoup retarder l'avancement du stage. En effet, il a fallu le remplacer par d'autre moyen de mesure ce qui n'était pas évident du fait, que ce type d'appareil n'était plus fabriqué. Le seul moyen trouvé a été de relevé les valeurs sur oscilloscope est de traité ces résultats sur fichier Excel afin d'en sortir la puissance moyenne calculée, cette opération rendait la tâche plus longue. De plus une fois avoir trouvé le moyen de calculer la puissance, il a fallu avant de commencer les essais avec les aimants enterrés, de définir la position de l'angle du moteur. Nous avons essayé d'exploiter l'angle sur l'oscilloscope en ayant relié les fils du câble du capteur, en vain. La seule solution reste la mise en place d'un deuxième capteur de position en parallèle à celui qui est déjà en place.

En revanche, concernant les objectifs fixés, nous avons atteint le premier objectif qui était de réaliser des caractérisations détaillées et la mise en place d'une base de données expérimentale utile pour le développement de recherche futur au sein de FEMTO-ST, en sauvegardant les données des essais effectués pour différents palier de vitesse, de couple, pour les essais à vide en court-circuit et en charge. Pour le deuxième objectif qui était d'effectuer une comparaison des modèles théoriques et expérimentales, ont montré que les valeurs se rapprochaient.

Néanmoins, les perspectives pour achever le travail commencé, sont d'une part, de mettre en place un capteur de position ou il sera possible de déterminer l'angle afin de connaître le déphasage entre le courant et la tension.

D'autre part, il faudra continuer les essais en charge sur les rotors à aimants enterrés.

Enfin, à la fin des essais en charge, il faudra comparer les valeurs avec les valeurs théoriques.

Ce stage m'a permis de connaître le monde de la recherche, ou il faut déjà avoir une bonne base théorique, c'est la raison pour laquelle on a commencé le stage par des cours théoriques. Ensuite, il faut être patient savoir remédier soi-même en trouvant une solution au problème, ou encore, savoir être créatif, comme lorsque nous avons voulu connaître la position de l'angle de déphasage, il a fallu démonter la gaine du câble du capteur et de souder des fils en parallèle tout en les reliant à l'oscilloscope pour pouvoir essayer de visualiser le top zéro.

Pour conclure, d'un point de vue humain, le fait d'être associé à d'autres secteurs de recherche, cela enrichi les partages techniques et le partage du savoir-faire.

ANNEXES

Annexes

Annexe 1 : Mode d'utilisation du banc, lors du changement de rotor

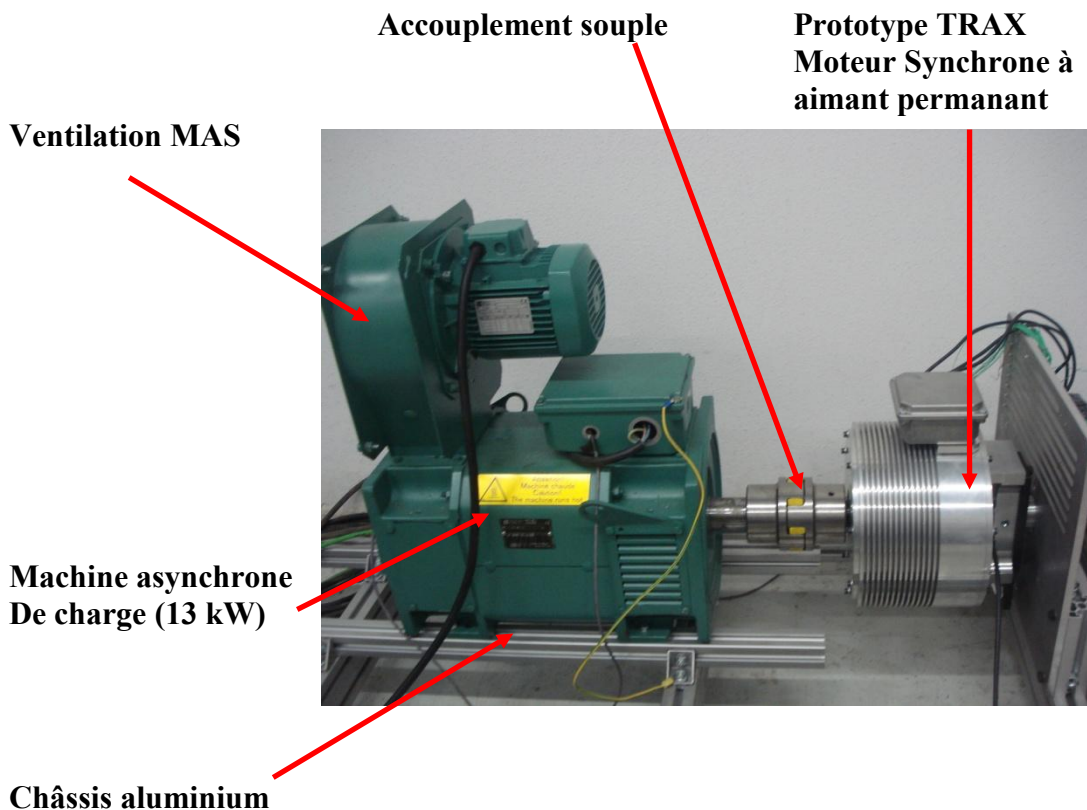
1.2. Généralité

Le présent document a été conçu dans le but d'être utilisé pour le banc d'essai d'évaluation de moteurs électriques.

En effet, le banc d'essai est composé d'un moteur asynchrone de charge (13 kW) accouplé à un prototype de moteur synchrone à aimant permanent.

Le moteur synchrone, est accompagné de 4 rotors avec une répartition des aimants, différentes les uns des autres.

Pour effectuer les essais avec chaque rotor, il est nécessaire de connaître le principe de démontage et de montage du rotor se situant sur le moteur synchrone ainsi que les précautions à prendre.



1.2. Préliminaires

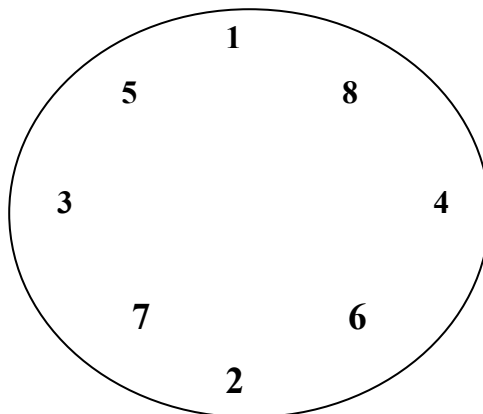
1.2.1. Outils

Avant de commencer il faut être en possession des outils ci-dessous :

- Clé Allen de 4
- Clé Allen de 5
- Clé Allen de 6
- Clé plate de 13
- Clé plate de 30 (facultatif)
- Clé dynamométrique
- Divers outils présent sur place (cloche d'extraction, vis...)

1.2.2. Précautions

- Vérifier que l'armoire électrique est bien consignée
- Toutes interventions sur les machines doivent se faire hors tension (règle de consignation)
- Eviter tout corps métalliques au voisinage du rotor
- Lors du serrage et desserrage des vis, effectuer l'opération en opposition (voir ci-dessous).
- Si possible, être à deux personnes, surtout lors de la mise en place du stator

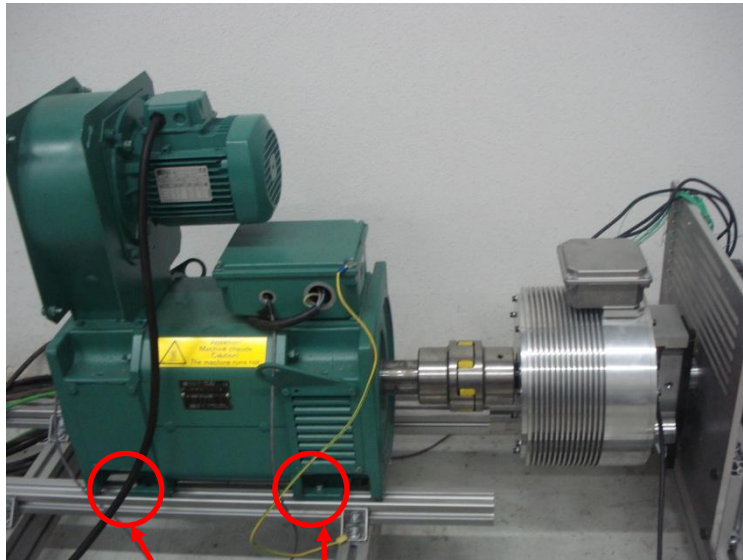


Temps alloué : 1 heure

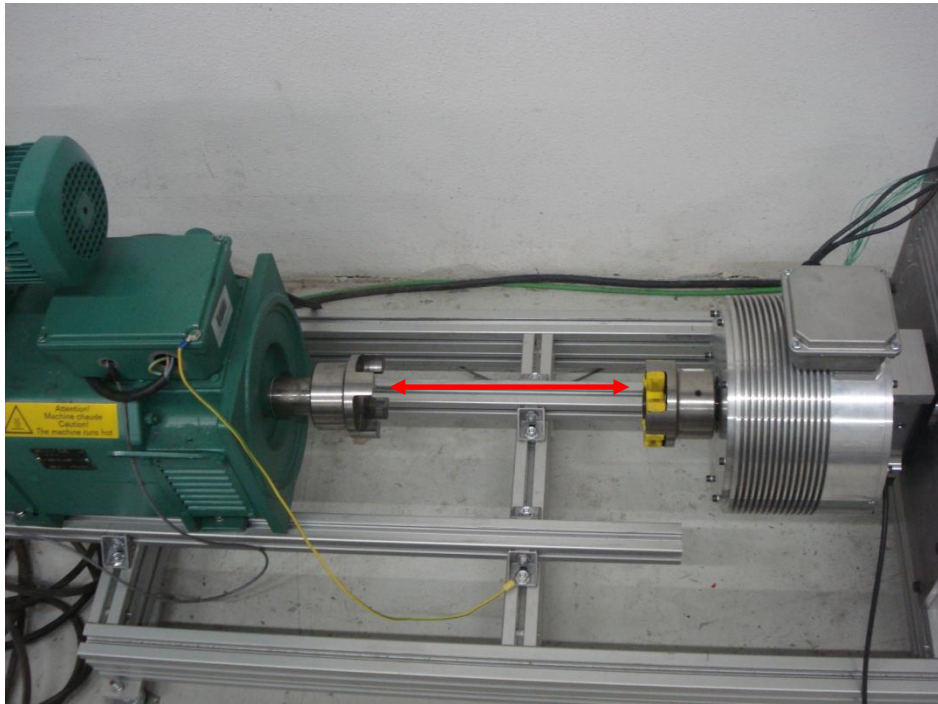
1.3.Principe du changement de rotor

1.3.1. Opérations extraction rotor

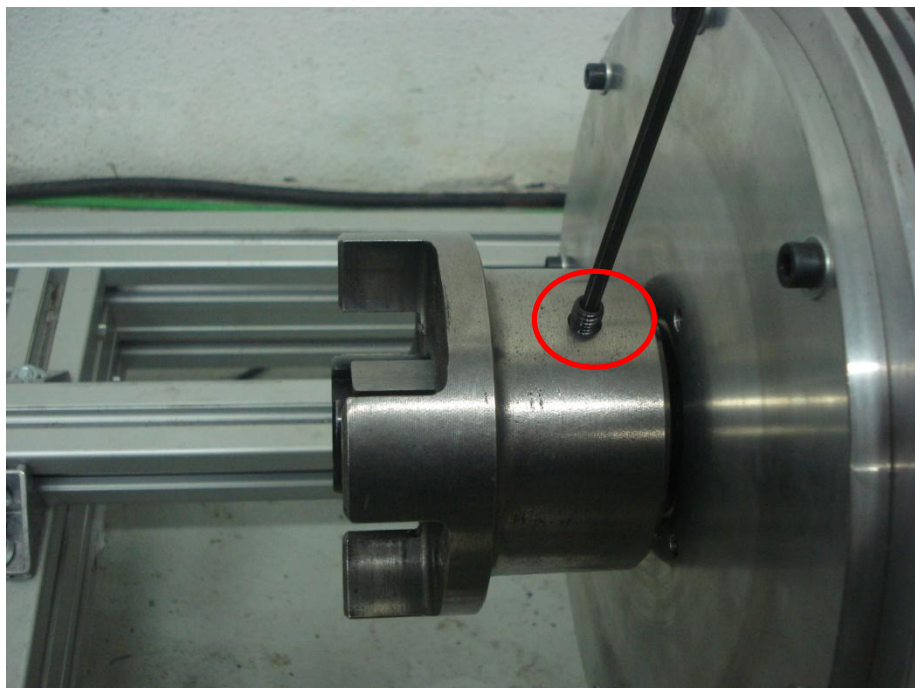
1. Desserrer les 4 vis de fixation du MAS à l'aide d'une clé plate de 13



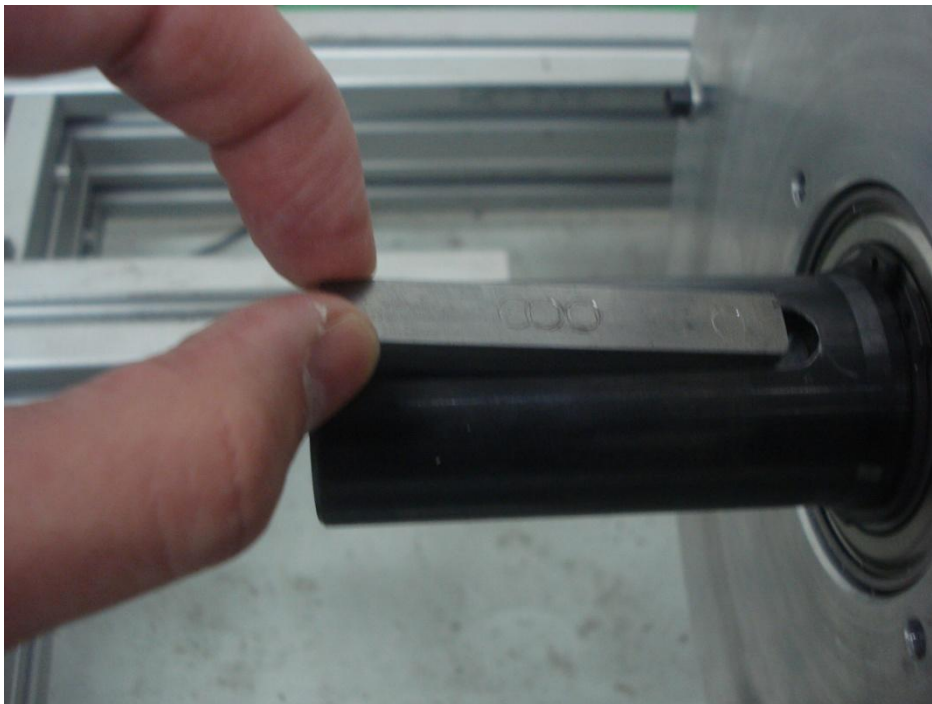
2. Reculé le moteur manuellement en le faisant glisser le long du châssis en aluminium, afin de désaccoupler l'axe du MAS à l'axe du MS



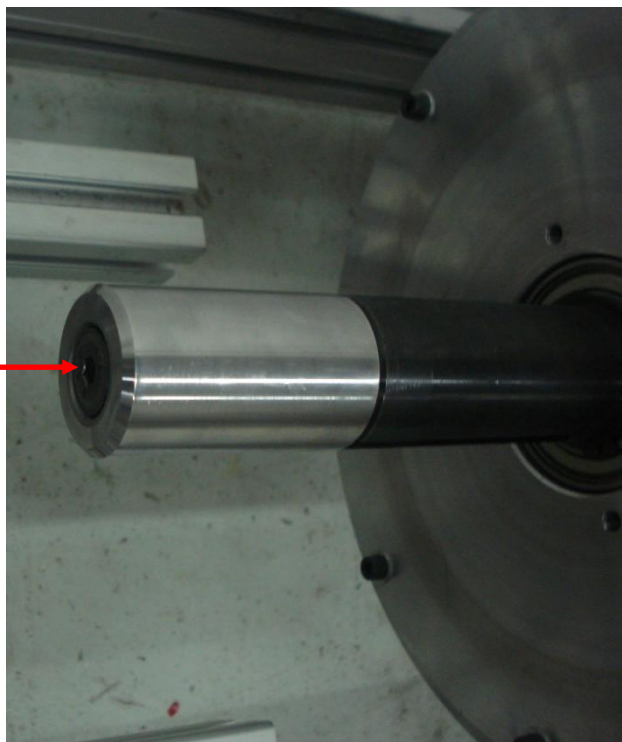
3. Desserrer la vis de l'outil d'accouplement avec une clé Allen de 4, puis enlever l'outil



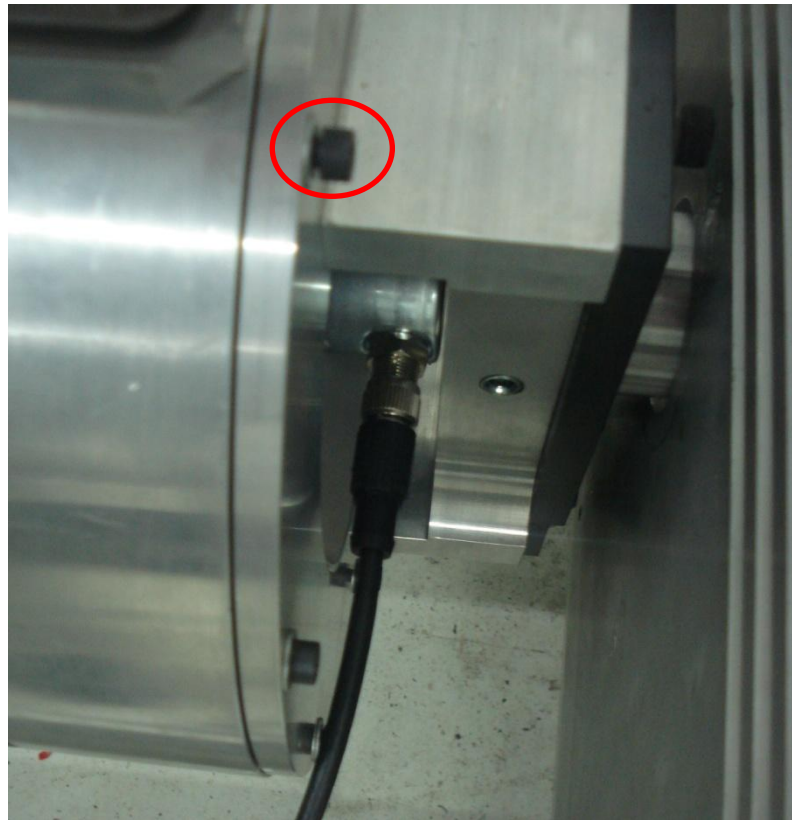
4. Enlever la clavette manuellement



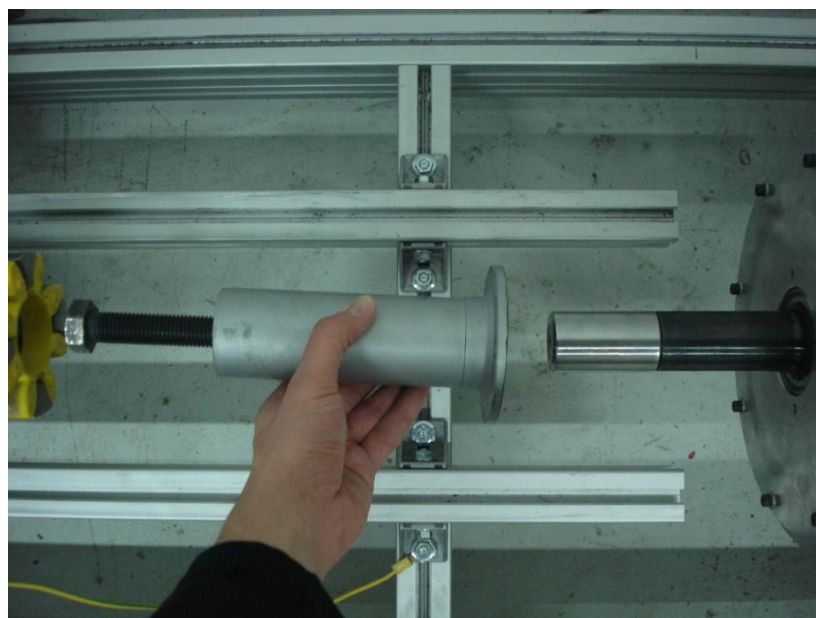
5. Mettre en place le moyeu de support d'extraction dans l'axe du MS et le serrer avec une clé Allen de 6



6. Desserrer et enlever les 8 vis se situant derrière la MS à l'aide d'une clé Allen de 4

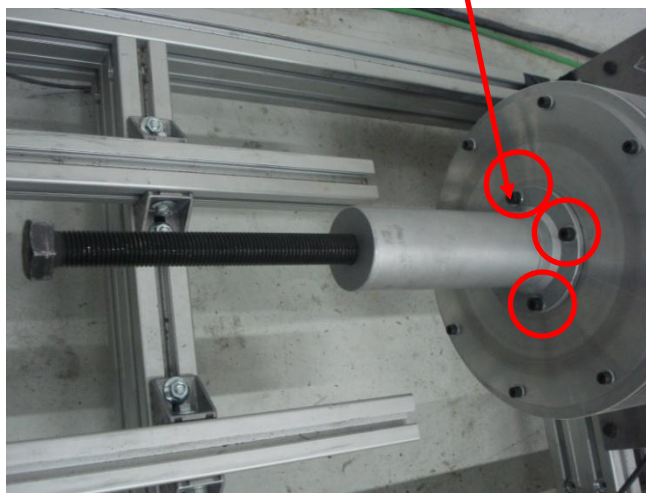


7. Mettre en place la cloche d'extraction et serrer les 4 vis avec une clé Allen de 5, dans les emplacements se situant sur le MS

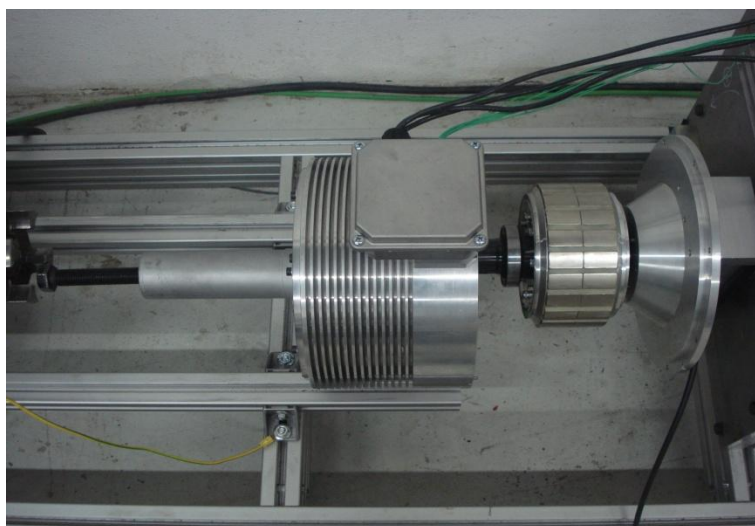




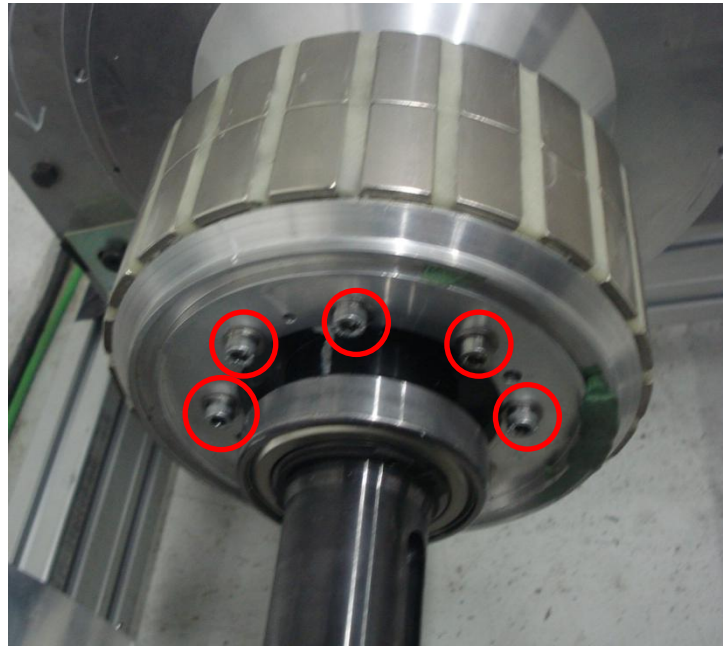
Utilisé ces 4 vis



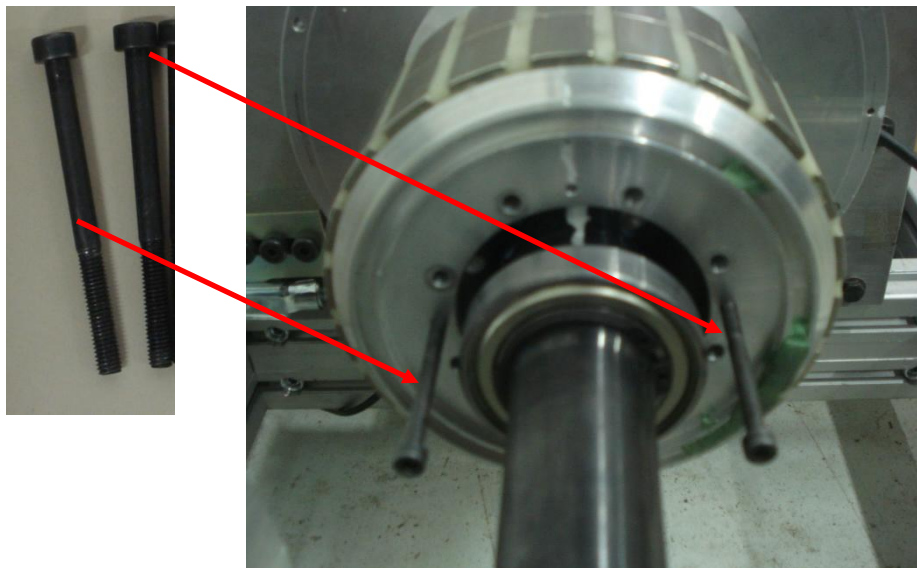
8. Serrer la vis d'extraction du stator, soit manuellement, soit avec une clé plate de 30, jusqu'à extraction du rotor. Le stator peut être posé sur le côté du châssis



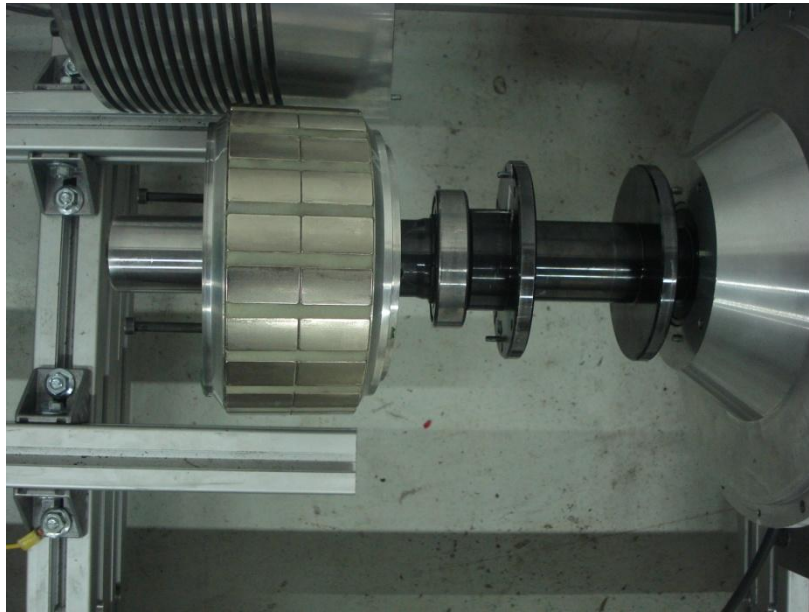
9. Desserrer puis enlever les 8 vis du rotor avec une clé Allen de 4



10. Mettre en place les 2 vis d'extraction aux endroits prévu sur la face du rotor



11. Serrer les 2 vis à l'aide d'une clé Allen de 4 jusqu'à extraction du rotor. Le rotor peut être changé

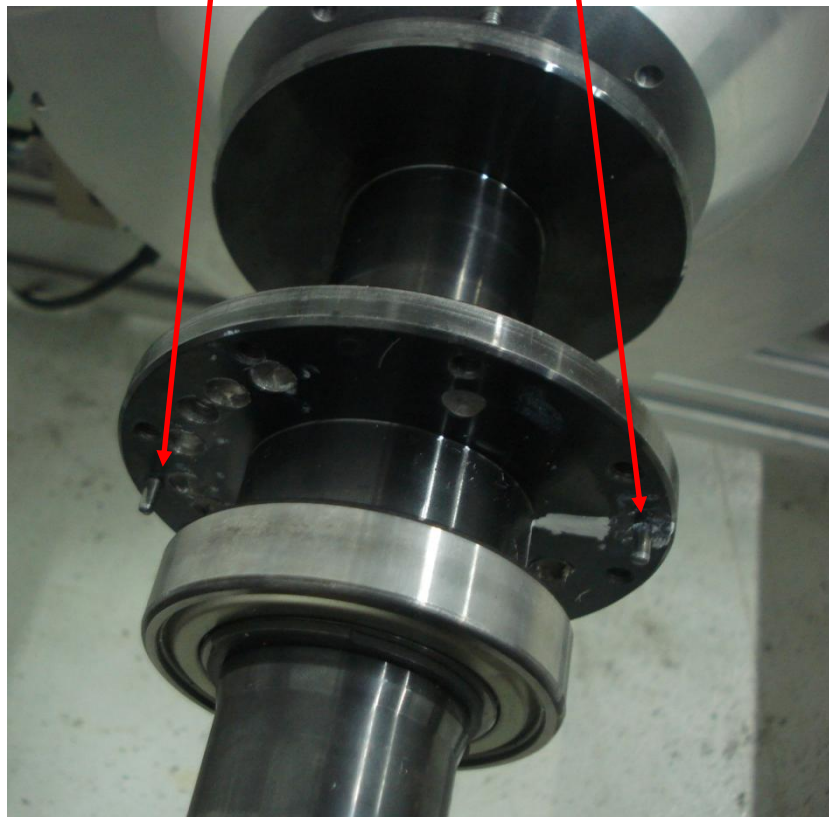


1.3.2. Etapes mise en place rotor et stator

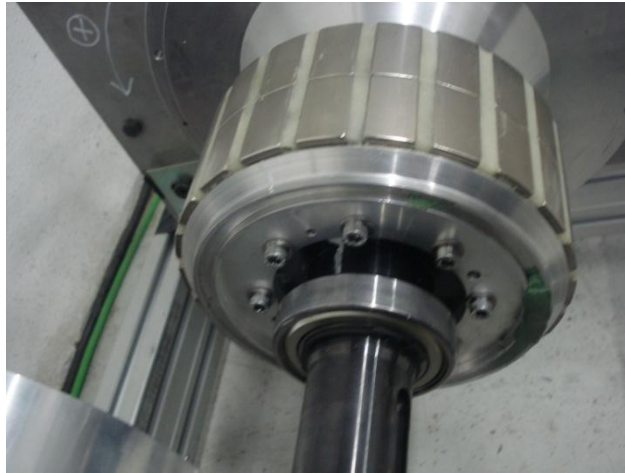
1. Choisir le rotor qu'on veut utiliser



2. Mettre en place le rotor de façon à ce que les ergots situés sur l'axe rentrent aux emplacements prévus sur la face rotor. Il y a aussi une bande blanche permettant d'indiquer l'alignement.

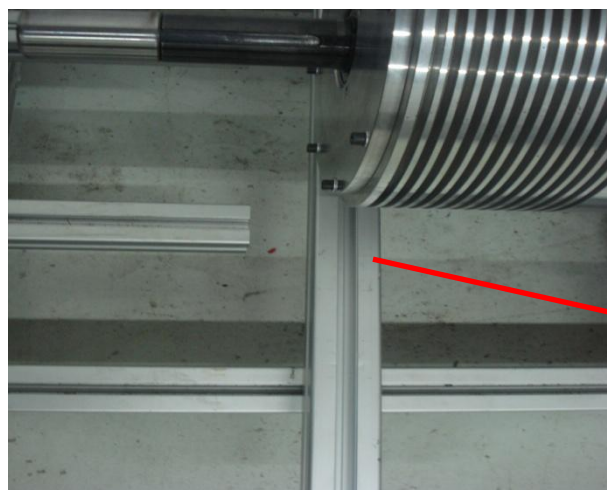


3. Serrer les 8 vis avec une clé Allen de 4 à un couple de 9 N.m. Serrage à effectuer en opposition. Faire plusieurs tour de serrage des vis, afin d'être sûr que le rotor est bien en butée.



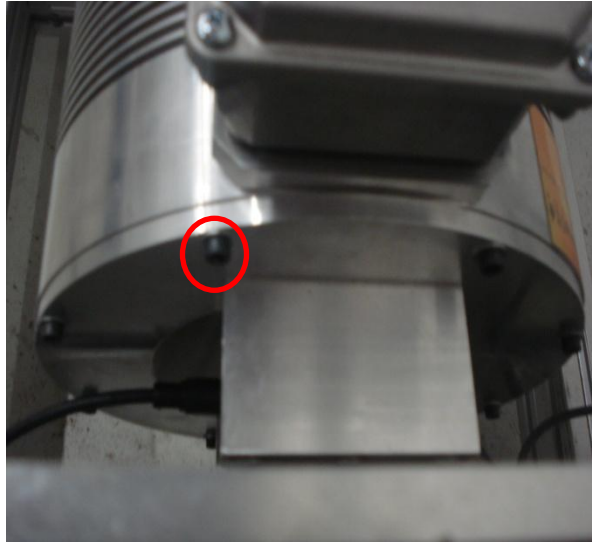
4. Avant de commencer la mise en place du stator, bien vérifié que la cloche d'extraction du stator est toujours fixée au stator. Poser un rail en aluminium perpendiculaire au châssis afin de maintenir le stator est de le faire glisser jusqu'au rotor. Ne pas mettre les doigts entre le rotor et le stator.

Faite avancer le stator en dévissant la vis de la cloche d'extraction et venir jusqu'en butée. Il y a 2 ergots permettant de définir la position de fixation du stator.



Rail de maintien

5. Serrer les 8 vis avec une clé Allen de 4 à un couple de 9 N.m



Annexe 2 : Paramètres variateurs.

Libellé	Paramètre MAS		Paramètre MS	
Mémorisation	0,00	0	0,00	0
Limite fréquence ou vitesse minimum	0,01	0	0,01	0
Limite fréquence ou vitesse maximum	0,02	2000 rpm	0,02	4000 rpm
Rampe d'accélération	0,03	10	0,03	4,000
Rampe de décélération	0,04	10 s	0,04	5,000
Sélection des références	0,05	PAD	0,05	PAD
limitation de courant	0,06	175%	0,06	175%
Mode de contrôle/gain proportionnel	0,07	0,00300 (1/rads-1)	0,07	0,00300 (1/rads-1)
couple au démarrage/gain intégral boucle vitesse	0,08	0,10 (1/rads-1)	0,08	0,10 (1/rads-1)
Sélection U/f dynamique- gain dérivé de la boucle de vitesse	0,09	0	0,09	0
Vitesse moteur calculée vitesse moteur mesurée	0,1	0	0,1	0
fréquence moteur position codeur	0,11	0	0,11	43688
Courant moteur total	0,12	0	0,12	0
courant actif moteur offset fin de l'entrée analogique	0,13	0	0,13	0
Sélection du mode régulation de couple	0,14	0	0,14	1
Mode de décélération	0,15	FAST	0,15	FAST
Dévalidation de l'affectation des bornes 28 et 29. Validation des rampes	0,16	ON	0,16	ON
Affectation de la borne 29 Filtre boucle de courant	0,17	0	0,17	0
Polarité de la logique de commande	0,18	ON	0,18	ON
Sélection type de signal sur entrée analogique 2	0,19	VOLT (6)	0,19	VOLT (6)
Affectation de l'entrée analogique 2	0,2	1,37	0,2	1,53
Sélection type de signal sur entrée analogique 3	0,21	th	0,21	VOLT (6)
Sélection du mode bipolaire	0,22	On	0,22	OFF
Référence marche par impulsions	0,23	0	0,23	0 rpm
Référence pré-réglée 1	0,24	0	0,24	0 rpm
Référence pré-réglée 2	0,25	0	0,25	0 rpm

Référence pré-réglée 3 Seuil de survitesse	0,26	0	0,26	0 rpm
Référence pré-réglée 4 Nombre de points par tour	0,27	1024	0,27	4096
Validation de la touche AV/AR du clavier	0,28	OFF	0,28	OFF
Dernier jeu de paramètres transféré par SMARTCARD	0,29	0	0,29	0
Copie des paramètres	0,3	nonE	0,3	nonE
Tension nominale variateur	0,31	400 V	0,31	400 V
Courant nominal variateur	0,32	40 A	0,32	40 A
Reprise à la volée Vitesse nominale autocalibrée	0,33	0	0,33	X
Code sécurité utilisateur	0,34	0	0,34	0
Type de communication	0,35	rtU	0,35	rtU
Vitesse de transmission liaison série	0,36	19200	0,36	19200
Adresse liaison série	0,37	1	0,37	1
Gain proportionnel boucle de courant	0,38	100	0,38	175
Gain intégral boucle de courant	0,39	400 V	0,39	682
Autocalibrages, mesures et calculs	0,4	0	0,4	0
Fréquence de découpage	0,41	6 kHz	0,41	12
Nombre de pôles moteur	0,42	4 Pôles	0,42	22 pôles
Cos φ Déphasage codeur	0,43	0,87	0,43	2,4
Tension nominale moteur	0,44	340 V	0,44	304
Vitesse nominale moteur en charge Constante de temps thermique moteur	0,45	751 min-1	0,45	1000 min-1
Courant nominal moteur Courant au calage (STALL)	0,46	30,60 A	0,46	15 A
Fréquence nominale moteur	0,47	27,3 Hz	0,47	x
Choix du mode de fonctionnement	0,48	CL VECt	0,48	SERVO
Accès niveau 2 et mémorisation code de sécurité	0,49	L2	0,49	L2
Version logicielle	0,5	1,19	0,5	1,19
Action sur sélection mise en sécurité	0,51	0	0,51	0

Table des figures

Figure 1.1 : Vue éclatée d'un moteur à aimant permanent

Figure 1.2 : Vue en coupe transversale des rotors, des moteurs à aimants permanents

Figure 1.3 : Vue schématique des machines, flux axial, flux radial

Figure 1.4 : Structure à rotor externe

Figure 1.5 : Structure à rotor interne

Figure 1.6 : Structure à aimant déposé en surface

Figure 1.7 : Structure à aimant inséré

Figure 1.8 : Structure à aimant enterrés : avec concentration de flux ou classique

Figure 1.9 : Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator

Figure 1.10 : Structure à flux axial avec double rotor et un stator

Figure 1.11 : Structure à flux axial avec double stator et un rotor

Figure 1.12 : Principales applications des MSAP

Figure 1.13 : Caractéristiques magnétiques de désexcitations de cinq aimants permanents

Figure 1.14 : dimensions relatives de quatre aimants permanents produisant le même flux.

Figure 1.15 : Illustration du cycle d'hystérésis

Figure 1.16 : Courbes de désaimantation de trois matériaux utilisés dans les aimants permanents.

Figure 1.17 : Représentation du point à énergie maximale de l'Alnico V.

Figure 1.18 : Schéma de Principe D'autopilotage d'une Machine Synchrone

Figure 1.19 : Schéma de principe de la sonde à effet Hall

Figure 1.20 : Codeur incrémental et son dispositif de lecture

Figure 1.21 : Codeur absolu

Figure 1.22 : Exemple de codage sur 4 bits

Figure 2.1 : Figure présentant le banc d'essai

Figure 2.2 : Figure présentant les différents types de rotor

Figure 2.3 : Rotor à aimants en surface

Figure 2.4 : Sens des aimants, rotor à aimant en surface

Figure 2.5 : Rotor à aimant en «U»

Figure 2.6 : Sens des aimants rotors en «U»

Figure 2.7 : Rotor à aimant en «I»

Figure 2.8 : Sens des aimants pour rotor en «I»

Figure 2.9 : Rotor à aimant en «O»

Figure 2.10 : Sens des aimants pour rotor en «O»

Figure 2.11 : Caractéristique couple/vitesse et puissance/vitesse MA

Figure 2.12 : Ensemble onduleur et commande

Figure 2.13 : Schéma de connexion

Figure 2.14 : Implantation physique

Figure 2.15 : Schéma de principe électronique

Figure 3.1 : Schéma essai à vide

Figure 3.2 : Banc, lors de l'essai à vide

Figure 3.3 : 250 tr/min. Rotor aimant surface

Figure 3.4 : 500 tr/min Rotor aimant surface

Figure 3.5 : 750 tr/min. Rotor aimant surface

Figure 3.6 : 1000 tr/min. Rotor aimant surface

Figure 3.7 : 1100 tr/min. Rotor aimant surface

Figure 3.8 : Rang Harmonique pour 1100 tr/min. Rotor aimant surface

Figure 3.9 : 250 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.10 : 500 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.11 : 750 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.12 : 1000 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.13 : 1100 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.14 : Rang Harmonique pour 1100 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.15 : 250 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.16 : 500 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.17 : 750 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.18 : 1000 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.19 : 1100 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.20 : Rang Harmonique pour 1100 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.21 : 250 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.22 : 500 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.23 : 750 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.24 : 1000 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.25 : 1100 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.26 : Rang Harmonique pour 1100 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.27 : Bilan FFT des quatre rotors à 1100 tr/min

Figure 3.28 : Courbes valeurs f.é.m.

Figure 3.29 : Bilan des couples des quatre rotors

Figure 3.30 : Bilan des pertes mécaniques

Figure 3.31 : Schéma de l'essai en court-circuit

Figure 3.32 : Sonde de courant sur les phases court-circuitées

Figure 3.33 : 5A- Phase 2- 10tr/min. Rotor à aimant en surface

Figure 3.34 : 10A- Phase 2- 21,5tr/min. Rotor à aimant en surface

Figure 3.35 : 15A-Phase 2- 34 tr/min. Rotor à aimant en surface

Figure 3.36 : 20A-Phase2-53 tr/min. Rotor à aimant en surface

Figure 3.37 : 5A- Phase 2- 11,36 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.38 : 10,3A- Phase 2- 23,68 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.39 : 11,9A- Phase 2- 31,5 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.40 : 13,9A- Phase 2- 41,5 tr/min. Rotor «I»

Figure 3.41 : 5A- Phase 2- 10,4 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.42 : 10 A- Phase 2- 23,3 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.43 : 15A- Phase 2- 45 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.44 : 16A- Phase 2- 52 tr/min. Rotor «U»

Figure 3.45 : 5A- Phase 2- 12 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.46 : 10A- Phase 2- 28 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.47 : 15A- Phase 2- 52 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.48 : 15,7A- Phase 2- 60 tr/min. Rotor «O»

Figure 3.49 : Mode des quatre quadrants

Figure 3.50 : Pose plaque polycarbonate

Figure 3.51 : Support appareils mesures

Figure 3.52 : Pose tige filetée

Figure 3.53 : Ajout disjoncteur

Figure 3.54 : Sondes de courants

Figure 3.55 : Analyseur de puissance

Figure 3.56 : Charge résistive

Figure 3.57 : Graphtec GL450

Figure 3.58 : Capteur de couple KTR DATAFLEX 42/500

Figure 3.59 : Synoptique d'installation

Figure 3.60 : Mode de fonctionnement

Figure 3.61 : Courbes des deux couples-mètres mode Moteur

Figure 3.62 : Courbes des deux couples-mètres mode Générateur

Figure 3.63 : Bilan des puissances dans un moteur électrique

Figure 3.64 : Courbe V moyen Moteur

Figure 3.65 : Courbe V moyen générateur

Figure 3.66 : Courbe P_u Moteur

Figure 3.67 : Courbe P_u générateur

Figure 3.68 : Courbe P_a Moteur

Figure 3.69 : Courbe P_a générateur

Figure 3.70 : Courbes des rendements Moteurs et Générateur

Figure 3.71 : Schéma du connecteur du capteur de position

Figure 3.72 : Schéma du connecteur du capteur de position

Table des tableaux

Tableau I.1 : Propriétés des aimants permanents à 20°C

Tableau II.1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques machines

Tableau II.2 : Tableau des composants de l'armoire électrique

Tableau III.1 : Relevés f.é.m.

Tableau III.2 : Comparaison des f.é.m. à vitesse nominale $N = 1100$ tr/min

Tableau III.3 : Tableau du couple pour le rotor EXT

Tableau III.4 : Tableau du couple pour le rotor O

Tableau III.5 : Tableau du couple pour le rotor I

Tableau III.6 : Tableau du couple pour le rotor U

Tableau III.7 : Tableau du couple sans rotor

Tableau III.8 : Tableau de calcul de L_d

Tableau III.9 : Comparaison des inductances cycliques à une vitesse donnée

Tableau III.10 : Tableau des différentes valeurs Mode générateur

Tableau III.11 : Tableau des différentes valeurs Mode moteur

Tableau III.12 : Tableau des différentes valeurs Mode moteur

Tableau III.13 : Suite tableau des différentes valeurs Mode moteur

Tableau III.14 : V moyen Moteur

Tableau III.15 : V moyen Générateur

Tableau III.16 : P_u Moteur

Tableau III.17 : P_u Générateur

Tableau III.18 : P_a Moteur

Tableau III.19 : P_a Générateur

Tableau III.20 : Rendement Moteur

Tableau III.21 : Rendement Générateur

Tableau III.22 : rendement en mode moteur pour plusieurs points de vitesse

Tableau III.23 : rendement en mode générateur pour plusieurs points de vitesse

Bibliographie

[01] **Michel LAJOIE-MAZENC**, directeur de recherche émérite au CNRS. LEEI-ENSEEIH/INPT – Principe de l'électrotechnique.

[02] **B.BELARBI et K.HADDOUCHE** : << commande numérique en Vitesse d'un moteur synchrone à Aimants Permanents >> ; Revue périodique DIRASSAT, (ISSN 1112-4652) pp. 33-37, Avril 24-26, 2004, Laghouat (Algérie)

[03] **G. LACOMBE** : « Définition et Réalisation d'une Nouvelle Génération de Logiciels pour la Conception des Moteurs Futurs » ; Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.

[04] **G. LACROUX** : « Les Aimants Permanents » ; TEC et DOC, Lavoisier, 1989.

[05] **M. KOSTENKO, L. PIOTRIVSKI**, „Machines Électriques“, Tome I et II, Édition Mir, 1969, Moscou.

[06] **T. WILDI, S. GILBERT**, „Électrotechnique“, 4ème Édition, de Boeck, 2005, Canada.

[07] **R.Saou**, „Modélisation et optimization de machines lentes à aimants permanents: Machines à double saillance et à inversion de flux“, Thèse de Doctorat d'état, ENP d'Alger, 2008

[08] **B.Sing B.P. Singh, S. Dwivedi**, „A state of art on Different Configurations of Permanent Magnet Brushless Machines“, IE(I) Journal-EL, PP. 63-73, vol87, June 2006.

[09] **A.Parviainen.**, „Design of axial flux permanent magnet low speed machines and performance comparison between radial flux and axial flux machines“, Thèse de Doctorat, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2005.

[10] **T.M. Jahns, Wen L. Soong**, „Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives – A Review”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.43, No.2, April 1996.

[11] **H.Zeroug, B.Boukais and H. Sahraoui**, “Analysis of Torque Ripple in BDCM”, IEEE Trans. Magn., Vol.38, no.2, pp. 1293-1296, March 2002.

[12] **Bernard. MULTON**, „Application des aimants aux machines électriques”, note de cours version 2009. Ecole normale supérieure de Cachan.

[13] **N. BERNARD** : «Machine Synchrone : de la Boucle Ouverte à l’Autopilotage» ; Revue 3EI, Septembre 2002, PP.24-39.

[14] **B. TOUNSI** : «Etude Comparative de Groupes Electrogènes Embarqués à Large Gamme de Vitesses Variables Associant Machines à Aimants Permanents et Conversion Statique» ; Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.

[16] www.opticalencoder.com

[17] **H. BUYSE** : « Capteur de Position et de Déplacement » ; Cours Automatisation Industrielle, Université Catholique de Louvain, 2004.

[15] **M. BENSOAM** : «Capteurs et Actionneurs » ; Cours Master SIS.1 ; Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, Génie Electrique, 2005.

RESUME

L'apparition des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) dans le monde des actionneurs électriques a joué un rôle crucial dans l'évolution des systèmes électriques.

Ce mémoire porte sur l'étude d'un prototype de moteur synchrone à aimant innovants permanents, piloté par deux variateurs, alimenté par un onduleur triphasé et possédant un rotor extractible, afin de pouvoir utiliser d'autres rotors ayant une implantation des aimants différents les uns des autres. Pour un des rotors, il s'agira d'un rotor à aimant en surface, pour les trois autres rotors, il s'agira d'aimants enterrés. Le but étant de réaliser des caractérisations détaillées afin de mettre en place une base de données expérimentales utile pour le développement de recherche futur.

Pour ce faire, on commence par une étude de l'art de la machine synchrone à aimant permanent, ensuite on a adopté des essais de performances, traduit par des essais à vide, des essais en court-circuit ainsi que des essais en charge.

Les essais n'ayant pas pu être tous effectués par faute de temps, néanmoins, après les résultats et les simulations effectuées, nous avons pu déterminer certaines performances et surtout pu avoir une grosse gamme de données pour les recherches futurs.

Mots clés : Machine synchrone à aimant permanent, onduleur, rotor, aimant en surface, aimant enterré, essai à vide, essai en court-circuit, essai en charge.

Abstract

The appearance of the Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSM) in the world of the electric actuators played a crucial role in the evolution of the electric systems.

This report concerns the study of characterization on a prototype of Permanent Magnet Synchronous Machine with magnet innovative permanent, piloted by two speed variators, supply by a three-phase inverter and possessing a rotor extractable, to be able to use other rotors having a setting-up of different magnets from each other. For one of the rotors, it will be about a rotor with on-surface magnet, for three other rotors, it will be about buried magnets. The purpose being to realize detailed characterizations to set up a useful experimental database for the future development of research.

To do it, we begin with a study of the art of the Permanent Magnet Synchronous Machine, then we adopted performances tests, translated by no load experimental, short circuit experimental and loads experimental.

The tests were not all able to be made by without the time, nevertheless, after the results and the made simulations, we were able to determine certain performances and especially been able to have a big range of data for the future researches.

Key words: Permanent Magnet Synchronous Machines, inverter, rotor, on-surface magnets, buried magnets, no load experimental, short-circuit experimental, loads experimental