

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université de KHEMIS MILIANA**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département des Sciences et de Technologie**

Mémoire Présenté

Pour l'obtention du diplôme

**Master II**

En

« Génie électrique »

Option :

« Electrotechnique »

Thème :

**Etude expérimentale et simulation  
des essais d'une machine  
synchrone**

Réalisé par :

Encadré par :

❖ Tsamda Abderrahmane

❖ Dr : BENALLAL, M, Nadjib.

❖ Bouziane Errahmani Abdenour

**Année Universitaire : 2016 - 2017**

## **Remerciements :**

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et le temps pour finir ce travail. Nous tenons particulièrement à remercier Dr : BENALLAL notre promoteur, qui nous a consacré son temps et ses moyens pour ce travail, nous tiendrons à le remercier vivement pour sa disponibilité constante, son esprit critique et son encouragement pour le long de notre travail. Tout remerciement également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Nous remercions l'ensemble des enseignants du département de science et la technologie qui ont veillé à notre formation durant toute cette période, leur aide et leur disponibilité.*

## إهداء

بعد بسم الله الرحمن الرحيم و الصلاة و السلام على اشرف المرسلين.  
نحمد الله و نشكره و نثني عليه لتوفيقنا لإتمام هذا العمل المتواضع.  
كما أتقدم بجزيل الشكر إلى أمي، زوجتي، أبنائي، أختي و كل العائلة  
الكريمة من قريب أو من بعيد.

و الحمد لله رب العالمين.

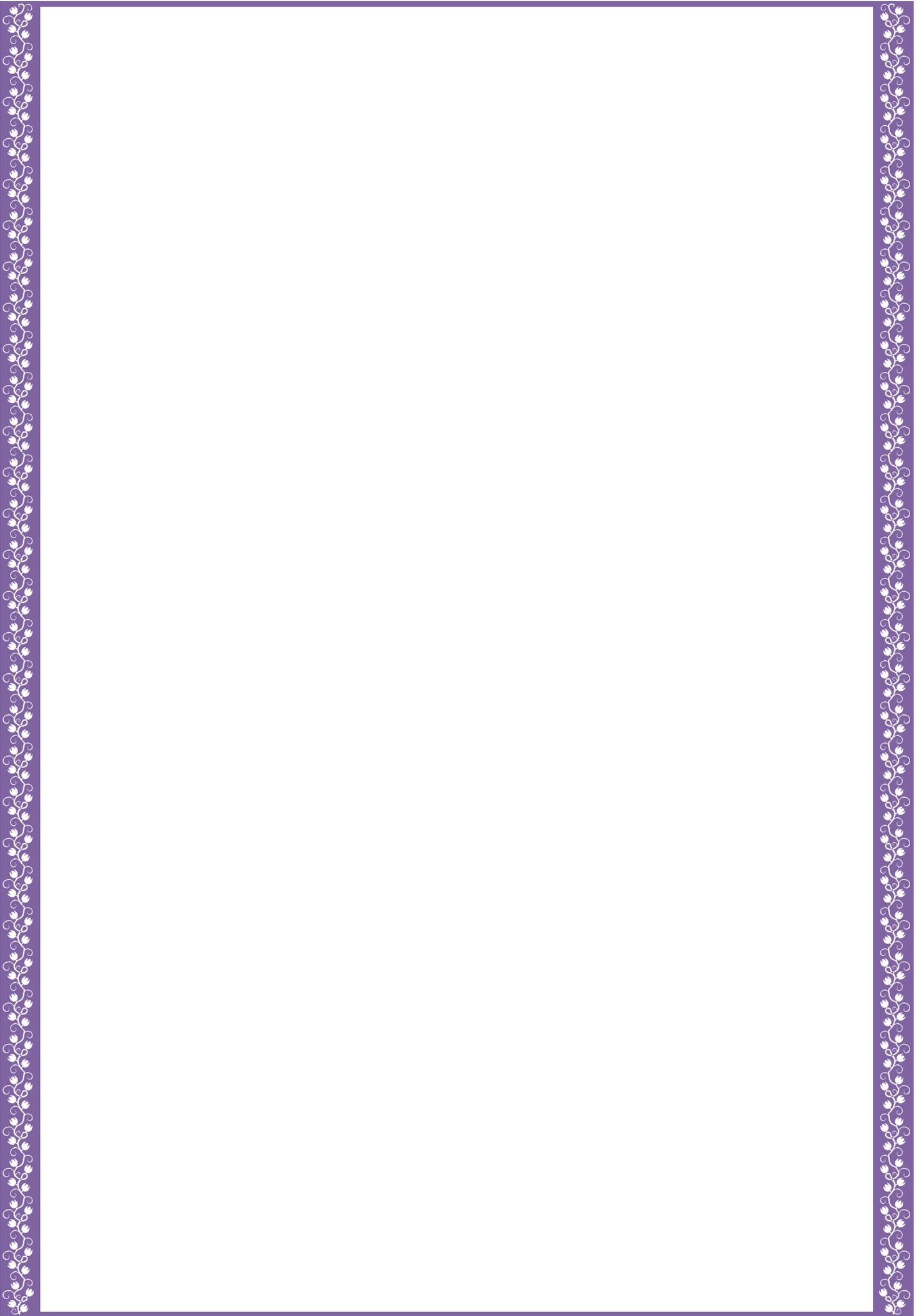
عبد الرحمان، تسامدة

## إهداء

بعد بسم الله الرحمن الرحيم و الصلاة و السلام على اشرف المرسلين, نحمد الله و  
نشكره و نثني عليه لتوفيقنا لإتمام هذا العمل المتواضع, كما أتقدم بجزيل الشكر  
إلى أمي وإخوتي .

و الحمد لله رب العالمين.

Bouziane Errahmani Abdenour



# Liste des figures

---

## Liste des figures :

### **Chapitre 1 :**

Figure 1-1 : La roue de Barlow .....	4
Figure 1-2 : La machine de Gramme.....	5
Figure 1-3 : Croquis simplifié d'une machine synchrone.....	6
Figure 1-4 : Distribution spatiale de la densité de flux dans un générateur synchrone cas idéal.....	7
Figure 1-5 : Présentation des différentes technologies de rotor.....	7
Figure 1-6 : Etoile de tensions.....	9
Figure 1-7 : Présente un stator avec un bobinage distribué.....	9
Figure 1-8 : Type de bobinages concentriques.....	9
Figure 1-9 : Rotor d'une MS avec amortisseurs.....	10
Figure 1-10 : Excitatrice à CC.....	10
Figure 1-11 : Circuit équivalent par phase d'une MS à rotor lisse.....	11
Figure 1-12 : Circuit équivalent par phase d'une MS à rotor saillant.....	12
Figure 1-13: La réaction d'induit est transversale.....	14
Figure 1-14 : Longitudinale démagnétisante.....	15
Figure 1-15 : Longitudinal magnétisante.....	15
Figure 1-16 : Alignement des axes d-q tournant avec les axes as-bs-cs stationnaires sur le plan d-q Et le vecteur tension à l'instant $t = 0s$ .....	17
Figure 1-17 : Diagramme vectoriel d'un moteur synchrone sous excité.....	20
Figure 1-18 : Diagramme vectoriel d'un moteur synchrone sur excité.....	20
Figures 1-19 : Courbes de Mordey.....	21

### **Chapitre 2 :**

Figure 2-1 : Banc d'essai réalisé.....	23
Figure 2-2 : Essai à vide.....	26
Figure 2-3 : Essai en cc permanent.....	28
Figure 2-4 : Essai $\cos(\phi) = 0$ .....	30
Figure 2-5 : Charges variables ( résistive , capacitive et inductive).....	32
Figure 2-6 : La charge résistive.....	32

# Liste des figures

---

Figure 2-7 : La charge selfique (inductive).....	33
Figure 2-8 : La charge capacitive .....	34
Figure 2-9 : Caractéristique de régulation pour les charges (résistive, capacitive et inductive)....	36
Figure 2-10 : Diagramme de Fresnel.....	38
Figure 2-11 : Moteur synchrone pour les essais des courbes de Mordey.....	39
Figure 2-12 : Courbes de Mordey.....	40
Figure 2-13 : Courant d'excitation .....	41
Figure 2-14 : La réaction d'induit.....	42
Figure 2-15 : Moteur en sur excité.....	43
<b>Chapitre 3 :</b>	
Figure 3-1 : La plaque signalétique de la machine synchrone utilisée.....	47
Figure 3-2 : Méthode graphique CEI-60034-4 [15].....	48
Figure 3-3 : Méthode du triangle de Poitier [15].....	50
Figure 3-4 : Résultats des testes à vide et à facteur de puissance nul.....	50
Figure 3-5 : SIMULINK avec SIMPOWERSYSTEMS – sous rubrique MACHINES.....	52
Figure 3-6 : La machine synchrone Dans SIMPOWERSYSTEMS.....	52
Figure 3-7 : Paramètres du block de la machine synchrone simplifié.....	53
Figure 3-8: Saisie des paramètres calculés de la machine du laboratoire.....	54
Figure 3-9 : Essais à vide et en court circuit.....	55
Figure 3-10 : Résultat essais à vide sur SIMULINK vs essai réel.....	56
Figure 3-11 : Résultat essais en CC permanant sur SIMULINK vs essai réel.....	57
Figure 3-12 : Essais en charge capacitive et résistive .....	58
Figure 3-13 : Résultats de l'essai en charge.....	59
Figure 3-14 : Allure des tensions statoriques $V_{abc}$ (charge résistive).....	59
Figure 3-15 : Allure de la tension interne $E_a$ (charge résistive).....	60

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux :

Tableau1-1 : e nombre de paire de pôle et la vitesse de rotation en t/min.....	16
Tableau2-1 : la caractéristique de la machine synchrone triphasée du type MSM20.....	24
Tableau2-2 : la caractéristique de la machine à courant continu du type cc20-a excitation séparé...	24
Tableau2-3 : courant d'excitation(A) et tension entre phase(v).....	25
Tableau2-4 : variation de courant d'excitation(A) et le courant de court-circuit (I <sub>cc</sub> ) (A).....	27
Tableau2-5 : les résultats obtenu à partir de l'essai à $\cos(\phi)=0$ .....	29
Tableau2-6 : les résultats obtenu à partir de l'essai en charge résistive variation le courant avec la tension.....	31
Tableau2-7 : les résultats obtenu à partir de l'essai en charge résistive variation de courant d'excitation avec le courant de ligne .....	35
Tableau2-8 : variation de courant avec tension de charge (résistive, capacitive et inductive).....	40

## الملخص :

في هذه المذكرة تناولنا الجانب التجريبي للألة المتزامنة من خلال إجراء مجموعة من الاختبارات وفقا للمعايير IEEE و IEC لدراسة سلوك الألة المتزامنة والظواهر الكهربائية المتعلقة بها من خلال تشغيلها مع عدم تحميلها، مع تحميلها بحمل مقاوم، بالسعة و الوشعة -والدائرة القصيرة الثابتة ، كما قمنا باختبارات خاصة من أجل تحديد إعدادات الألة المتزامنة ذات القطب البارز بعد ذلك قمنا بمحاكاة بعض اختبارات الألة المتزامنة على برنامج / SIMULINK MATLAB للتحقق من الطرق التجريبية والرسوم البيانية المستخدمة لتحديد مفاعلة متزامن ومفاعلة بواتييه.

## Résumé :

Dans ce mémoire nous avons abordé l'aspect expérimental de la machine synchrone en conduisant une batterie de teste selon des normes IEEE et CEI afin de pouvoir étudier son comportement et les phénomènes liés à des modes de fonctionnement à vide, en charge – résistive, capacitive et inductive - et en court-circuit permanent, aussi nous avons réalisé des testes spécifiques pour pouvoir déterminé les paramètres en régime équilibré d'une machine synchrone à pôle saillant, par la suite nous avons simulé quelques testes sur le logiciel MATLAB/SIMULINK pour vérifier les méthodes expérimentales et graphiques utilisé pour la détermination de la réactance synchrone et la réactance de Poitier..

## Abstract:

This thesis focuses on the design of the synchronous machine, after reminders about the conception of the SM, secondelly we did some tests on our Synchronous Machine according to IEC and IEEE standards to study the behavior of the SM in open load, short circuit and in loaded mod. An analytical calculations method was used to determine the direct synchronous reactance ( $X_{ds}$ ), the Poitier reactance ( $X_p$ ) and other parameters of the SM. Once the analytical model developed, it is programmed in MATLAB environment. Then we move to the numerical method simulating environment on SIMULINK MATLAB.

# Sommaire

---

## Sommaire :

<b>Introduction général</b> .....	01
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones :</b>	
I-1 Introduction.....	04
I-2 Histoire de la machine synchrone.....	04
I-3 La machine synchrone préliminaire.....	06
I-4 Constitution de la machine synchrone.....	07
I-4.1 Le rotor.....	07
I-4.1-1 Rotor à pôle lisse.....	08
I-4.1-2 Rotor à pôle saillant.....	08
I-4.2 Le stator.....	08
I-5 Les amortisseurs.....	09
I-6 Système d'excitation.....	10
I-7 Fonctionnement de base de la machine synchrone.....	11
I-7.1 Alternateur.....	11
I-7.2 Circuit équivalent de l'alternateur.....	11
I-8 La FEM à vide ( $E_i$ ).....	12
I-9 La FEM en charge.....	13
I-10 La réaction d'induit.....	14
I-10.1 Cas d'une charge résistive.....	14
I-10.2 Cas d'une charge inductive.....	14
I-10.3 Cas d'une charge capacitive.....	15
I-10.4 Cas d'une charge inductive et capacitive.....	16
I-11 La fréquence.....	16
I-12 Comportements en régime permanent des machines synchrones.....	16
I-12.1 Choix du référentielle.....	16
I-13 Moteur synchrone.....	18
I-13.1 Démarrage des moteurs synchrones.....	19
I-13.1.1 Utilisation d'un moteur auxiliaire (Pony).....	19
I-13.1.2 Démarrage en asynchrone synchronisé.....	19
I-13.2 Schéma équivalent d'un moteur synchrone.....	19
I-13.3 Diagramme vectoriel d'un moteur synchrone.....	19
I-14 Courbes en v (Mordey) d'un moteur synchrone.....	21

# Sommaire

---

I-15 Conclusion.....	22
----------------------	----

## **Chapitre2 : Etude expérimentale et essais de la machine synchrone :**

II-1 Introduction.....	23
II-2 Présentation du banc d'essais.....	23
II-3 Les caractéristiques des machines utilisées .....	24
II-4 Etude de l'alternateur.....	25
II-4.1 Caractéristique interne ou essai à vide.....	25
II-4.2 Essai en court-circuit permanent.....	27
II-4.3 Essai en charge purement inductive $\cos(\phi)=0$ .....	28
II-4.4 Caractéristique externe .....	30
II-6 Caractéristiques de réglage.....	34
II-7 Etude du moteur synchrone.....	38
II-8 Conclusion.....	44

## **Chapitre3 : Mesure des paramètres de la machine synchrone et simulation :**

III-1 Introduction.....	45
III-2 Définition des paramètres usuels d'une machine synchrone.....	46
III-2.1 Réactance synchrone longitudinale $x_d$ .....	46
III-2.2 Rapport de court-circuit $k_c$ .....	46
III-2.3 Réactance synchrone transversale $x_q$ .....	46
III-2.4 Réactance de Potier $x_p$ .....	46
III-2.5 Résistance en courant continu de l'induit et de l'enroulement $R_a$ et $R_f$ .....	46
III-3 Présentation de la machine synchrone étudiée .....	47
III-4 Calcul de l'impédance de base .....	47
III-5 Mesure de la résistance statorique $R_a$ et la résistance du bobinage inducteur $R_f$ .....	47
III-6 Calcul de l'impédance directe saturée $Z_{d\_sat}$ de la machine .....	48
III-7 Calcul de la réactance synchrone directe saturée $X_{d\_sat}$ de la machine .....	49
III-8 Calcul de la réactance synchrone directe non-saturée $X_{d\_nsat}$ de la machine.....	49

## Sommaire

---

III-9 Calcul du rapport du court-circuit « $k_c$ » .....	49
III-10 Calcul de la réactance de Poitier « $X_p$ » .....	49
III-11 Présentation du logiciel SIMULINK de MATHWORKS .....	51
III-12 Sim Power Systems .....	52
III-13 Présentation d'une machine synchrone simplifiée sous SIMULINK .....	52
III-14 Entrées et sorties .....	53
III-15 Simulations de l'essai à vide et en CC permanent sur SIMULINK .....	54
III-16 Simulations de l'essai en charge capacitive et résistive sur SIMULINK.....	58
III-17 Interprétation des résultats de simulation .....	60
III-18 Conclusion.....	61
III-19 Conclusion générale .....	62

# Introduction générale

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le développement de la science et de la technique moderne est indissolublement lié à la fabrication des machines nouvelles destinées à rendre le travail de l'homme plus productif et plus facile et à lui donner des moyens d'étudier les lois de la nature et la vie humaine.

Toute machine électrique dont laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel Fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Deux modes de fonctionnement sont à distinguer pour la machine synchrone, 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 [1] [2].

Les grandeurs 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.

La conception des machines synchrone est en pleine évolution. En effet, l'intensification de la concurrence économique force les entreprises à accélérer le renouvellement de leurs produits et la mise en œuvre de technologies innovantes. Actuellement pour qu'un produit soit vendable avec succès sur le marché, il faut continuellement réduire les couts, augmenter les performances, diminuer les temps de conception et de fabrication pour faire sortir le produit le plus rapidement possible Les ingénieurs et chercheurs se trouvent confrontés à ce nouveau défi qui consiste à faire face à une complexité croissante dans des délais d'études toujours plus courts [1].

Dans le domaine des machines synchrone, les progrès ont été considérables et se traduisent par une qualité et une quantité de services rendus importantes dans un encombrement réduit. Les machines synchrone ont encore une considérable amélioration du fait des nouveaux matériaux, de l'utilisation croissante de l'électronique de puissance, et de la montée en puissance de la commande en temps réel.

# Introduction générale

---

Et pour commencer, notre thèse est répartie en trois chapitres :

**Le premier chapitre :** « Généralités sur les machines synchrones », une recherche des principes de fonctionnement des machines synchrones, sa constitution, ses types et le domaine d'utilisation de machine synchrone pour ses deux modes de fonctionnement moteur/générateur.

**Le deuxième chapitre :** « Etude expérimental et essais de la machine synchrone », le banc d'essai est constitué d'une machine synchrone entraîné par une machine à courant continue. Les deux machines sont réversibles (moteur – générateur), une série de tests sont faites sur la MS afin de pouvoir identifier ses paramètres internes.

**Le troisième chapitre:** « mesures des paramètres de la machine synchrone et simulation »  
Nous allons déterminer les paramètres synchrones de fonctionnement en régime équilibré, et dans utiliser les paramètres déjà calculés comme paramètres d'entrés (paramétrage) dans le logiciel MATLAB/SIMULINK pour la simulation de quelques caractéristiques de fonctionnement de la machine synchrone.

# Chapitre 1 :

## Généralités sur les machines synchrones

# Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

---

## I-1 Introduction

L'épine dorsale de tout système d'alimentation électrique est un ensemble de stations de production d'électricité fonctionnant en parallèle, A chaque station, il peut y avoir un ou plusieurs générateurs fonctionnant en parallèle.

Les machines synchrones représentent les mono-unités les plus utilisées comme machine de production de l'électricité, plus couramment nommés générateurs ou alternateurs, leurs puissance varie de plusieurs centaines de Voltampères (VA) à plus de mille méga-volt-ampères (MVA), Dans de nombreux systèmes électriques.

Une machine synchrone est très fiable et efficace pour la conversion d'énergie. Le fonctionnement d'un générateur synchrone est (comme tous les dispositifs électromécaniques de conversion d'énergie) basés sur la loi de Faraday de l'induction électromagnétique, Le terme synchrone fait référence au fait que ce type de machine fonctionne à vitesse et fréquence constantes en régime permanent.

Les machines synchrones sont également capables de fonctionner en tant que moteurs, dans ce cas l'énergie électrique fournie aux bornes d'induit est transformée sous forme d'énergie mécanique

## I-2 Histoire de la machine synchrone

Les premières machines électriques sont imaginées durant les décennies suivant l'expérience d'Oersted (1820, interaction mécanique entre une aiguille aimantée et un conducteur parcouru par un courant électrique). Comme le courant continu était la seule forme d'énergie électrique disponible (piles électrochimiques) et que les structures les plus performantes étaient fondamentalement à courant alternatif, il fallu imaginer dès le départ des commutateurs mécaniques (collecteurs). La seule machine électrique réellement à courant continu est représenté par **la roue de Barlow (figure 1)**, mais ce principe est resté totalement marginal et n'a donné lieu qu'à de très rares développements industriels.



Figure 1-1 : La roue de Barlow [01]

# Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

---

Les génératrices électriques allaient ainsi pouvoir convertir les ressources mécaniques hydrauliques relativement abondantes (la tradition des moulins était bien ancrée) et des machines à vapeur fonctionnant au bois et désormais au charbon. Vers 1870, **la machine de Gramme** était alors la machine à courant continu par excellence et on découvrit qu'elle était réversible, elle pouvait fonctionner en moteur ou en générateur et passer d'un mode à l'autre de façon absolument continue.

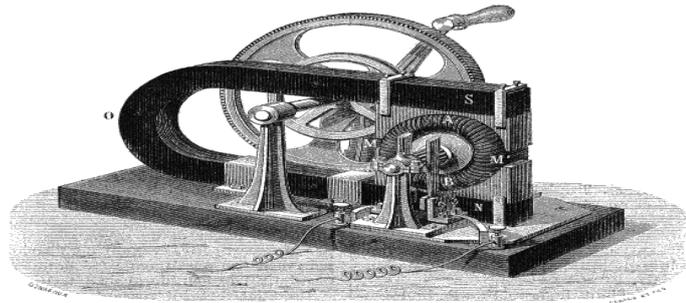


Figure 1-2 : La machine de Gramme [02]

Les applications du courant continu étaient bien développées : force motrice, électrochimie, éclairage, Mais le transport à longue distance, et avec une bonne efficacité, du courant continu se révèle rapidement impossible avec les moyens technologiques de l'époque.

Ainsi, vers 1890, le courant alternatif commença à s'imposer grâce à l'invention du transformateur électromagnétique qui permettait d'adapter la tension aisément, et aux générateurs électriques naturellement à courant alternatif (machines synchrones ou alternateurs). Le moteur asynchrone, qui venait d'être également inventé, permettait de satisfaire les applications de force motrice si demandées, et ceci dans des conditions de fiabilité inégalées par rapport aux moteurs à collecteur. Au début du 20ème siècle, la théorie des machines électriques commençait à être bien établie et ce siècle fut celui d'améliorations continues et de quelques découvertes de nouvelles structures, mais sans révolutions majeures, si ce n'est peut-être l'arrivée d'aimants permanents performants à partir des années 1960.

Les machines électriques sont absolument partout, dans notre montre analogique, nos automobiles, nos appareils électroménagers, dans l'industrie... etc.

Dans le domaine de la production d'électricité, en dehors du cas très particulier de la génération photovoltaïque, ce sont des génératrices électriques qui convertissent de l'énergie mécanique, souvent issue d'une turbine. En forte puissance, **les machines synchrones** règnent en maître avec des puissances dépassant le GW, mais en dessous de la dizaine de MW, **les machines asynchrones** peuvent trouver leur place. Notons qu'il n'y a plus, depuis bien longtemps, de machines à courant continu dans ce domaine.

# Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

Grâce aux travaux de Nikola Tesla (1856-1943) [ingénieur en électricité et mécanique], En 1887, le courant alternatif avait gagné la bataille du transport de l'électricité à distance et son utilisation va se trouver profondément bouleversée. C'est ainsi que la première expérience de transport d'électricité s'est faite dans les années 1890 vers l'Allemagne sur une distance de 175 km avec un rendement de 75 %. Tesla préconise d'abord l'utilisation des courants polyphasés et réussit à créer un champ magnétique tournant qui permet d'entraîner en rotation une armature mobile tournante [02].

## I-3 La machine synchrone – préliminaire

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotatorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal à une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

L'enroulement d'induit d'une machine synchrone est sur le stator, et l'enroulement du champ est sur le rotor – voir figure 1-3. Le champ est excité par le courant continu qui est conduit à travers des balais de charbon (Collecteur). La source du courant continu est appelée excitatrice et elle est souvent montée sur le même arbre que la machine synchrone.

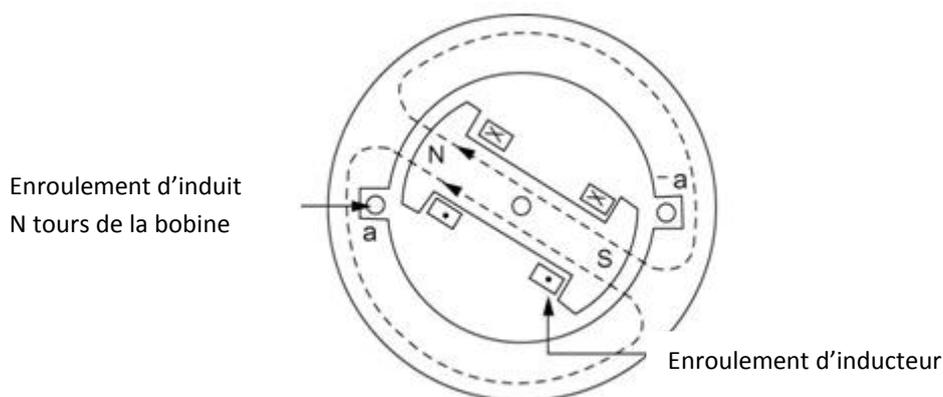


Figure 1-3 : Croquis simplifié d'une machine synchrone

Différents systèmes d'excitation avec du courant alternatif utilisent les redresseurs à base de semi-conducteurs pour obtenir un courant d'excitation continue. Ces systèmes sont utilisés avec les grands générateurs de turbines. Les principaux avantages de ces systèmes comprennent l'élimination des problèmes de refroidissement et d'entretien associés aux bagues collectrices.

Les faces radiales des pôles sont façonnées de telle sorte que la distribution radiale de la densité du flux magnétique soit d'une forme sinusoïdale comme indiqué dans la figure 1-4.

Répartition de densité de flux magnétique(B)

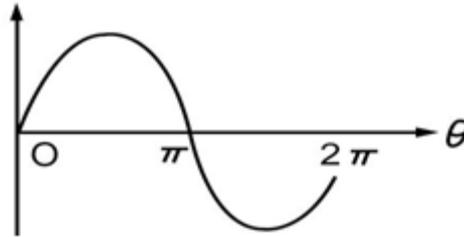


Figure 1-4 : Distribution spatiale de la densité de flux dans un générateur synchrone cas idéal [3].

Le bobinage de l'induit peut contenir un ou plusieurs tours, dans la figure 1-3 une bobine est représentée (a, -a) placés en position diamétralement opposée sur la périphérie intérieure du stator avec des conducteurs parallèles à l'arbre de la machine, Le rotor est tourné à une vitesse constante par un moteur relié à son arbre, par conséquent, la forme d'onde de flux balaie entre les côtés de la bobine (a, -a), La tension induite dans la bobine est une fonction de temps sinusoïdale. Pour chaque révolution des deux pôles, La tension de la bobine traverse un cycle complet de valeurs. La fréquence de la tension en cycles par seconde (hertz) est la même que la vitesse du rotor en tours par seconde. Ainsi, une machine synchrone bipolaire doit tourner à 3600 tr/min pour produire une tension de 60 Hz [3].

## I-4 Constitution de la machine synchrone

### I-4.1 Le rotor

Il porte l'enroulement inducteur parcouru par un courant ou parfois constitué d'un aimant permanent. Il a pour rôle de créer dans l'entrefer de la machine un champ tournant à répartition sinusoïdale représentant  $2p$  pôles.

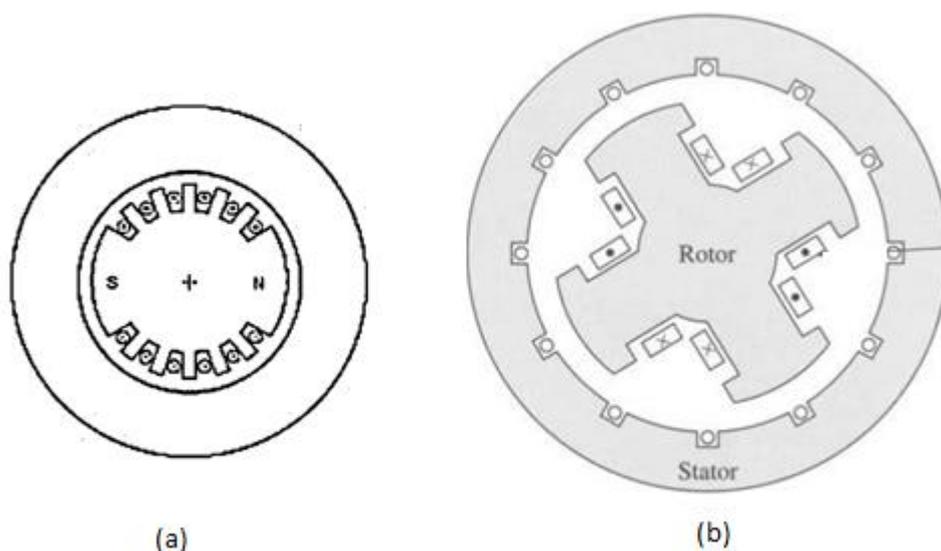


Figure1- 5: Présentation des différentes technologies de rotor (a : lisse, b : saillant) [04].

# Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

---

Le choix du type de rotor repose essentiellement sur le type d'application et l'expérience de la personne qui conçoit la machine. La différence entre les deux machines se fait essentiellement au niveau de l'entrefer [04].

## **I-4.1.1 Rotor à pôle lisse**

Une machine à pôles lisses a un entrefer considéré comme constant, dans les encoches du rotor sont logées des conducteurs associés en série. Ce code de construction assure une grande robustesse mécanique. Il est adopté pour les alternateurs de forte puissance dont la fréquence de rotation est élevée (turbo alternateur)

## **I-4.1.2 Rotor à pôle saillant**

Une machine à pôles saillants possède un entrefer variable, Les pièces placées sur le rotor analogue à celles du courant continu portent des bobines inductrices. Cette dernière convenablement associée en série permet d'obtenir des pôles Nord ou Sud. On trouve ce type de rotor dans les alternateurs hydroélectriques.

## **I-4.2 Le stator**

Il porte les enroulements induits, dans une MS triphasée l'induit est réalisé selon le principe suivant: 3 groupes de conducteur logés dans les encoches du stator sont associés pour former 3 enroulements, une pour chaque phase décalée de façon convenable et parcouru par 3 courants qui forment un système identique.

Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor, il supporte le bobinage du stator. Le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées par rapport à l'autre de  $120^\circ$ .

### **Bobinage du stator**

Le bobinage d'une machine synchrone est un des points cruciaux de la conception pour l'obtention de bonnes performances de la machine. On retrouve deux familles de bobinage, distribué ou concentrique, mais il est possible de concevoir de nombreuses variantes, seulement limitées par les problèmes de fabrication.

Dans un bobinage distribué, on change de phase à chaque fois que l'on change d'encoche. Pour l'ordre d'apparition des phases, on choisit de se référer à l'étoile des tensions (figure 1-6).

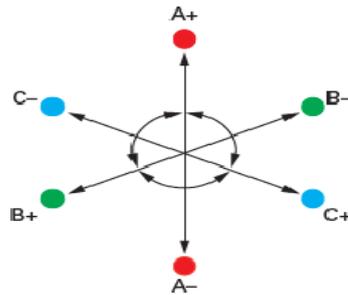


Figure 1-6: Etoile des tensions [04].

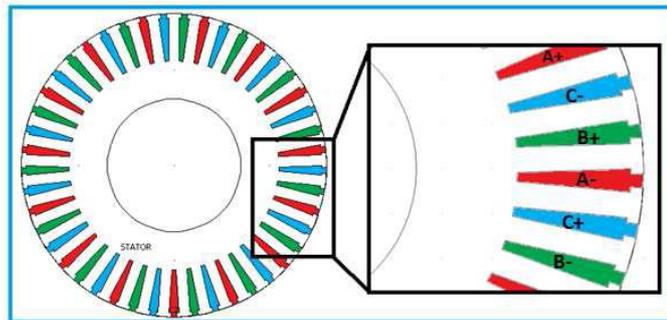
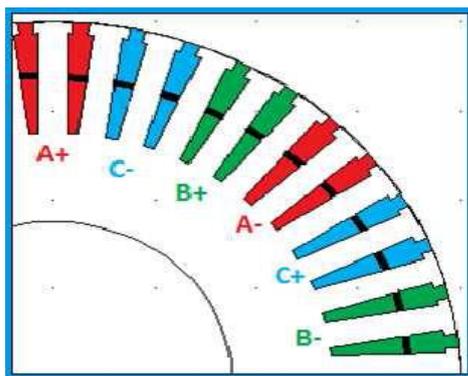


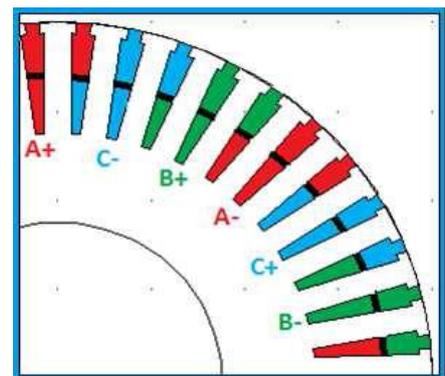
Figure 1-7: Bobinage distribué [04].

Pour chaque famille, on peut réaliser un bobinage à pas diamétral ou à pas raccourci, dans un bobinage à pas diamétral, on dispose dans chaque encoche une seule et unique phase.

Un bobinage à pas raccourci peut contenir plusieurs phases dans une seule encoche, ce procédé permet d'avoir une variation de l'induction dans l'entrefer sinusoïdal, ce qui réduit les pertes magnétiques au niveau du fer et les ondulations de couple mais ce qui impose certaines complexités de fabrication. La figure 1-8(a) représente un bobinage à pas diamétral et la figure 1-8(b) un bobinage à pas raccourci.



(a) Bobinage à pas diamétral



(b) Bobinage à pas raccourci

Figure 1-8: Type de bobinages à 2 couches [04].

## I-5 Les amortisseurs

L'amortisseur est un organe qui n'a pas d'utilité en régime normal d'une machine synchrone; il n'intervient qu'au cours de certains fonctionnements anormaux tels que la marche asynchrone temporaire après rupture de synchronisme, le fonctionnement permanent sur charge non

# Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

équilibrée sur les trois phases, les oscillations, les courts-circuits biphasés ou le réenclenchement monophasé après défaut. Pendant ces fonctionnements, l'amortisseur permet la circulation des courants induits au rotor par les champs magnétiques non synchrones, assurant la protection du rotor en évitant de faire passer ces courants par des contacts mécaniques délicats tels que celui entre frettes et fût. Il permet, ainsi, de mieux supporter ces régimes anormaux.

L'amortisseur (figure 1-9) est constitué d'une cage formée par des conducteurs en cuivre à l'argent écroui, disposés sous les cales d'encoches du rotor, ou par les cales d'encoches elles-mêmes, lorsque celles-ci sont d'une seule pièce. Il est fermé aux extrémités par un anneau de court-circuit généralement formé par la superposition de deux couches de conducteurs à recouvrement dont la technologie est variable d'un constructeur à l'autre ; le contact électrique entre les différents éléments de l'amortisseur est assuré par la force centrifuge s'exerçant sur des surfaces préalablement argentées [05].

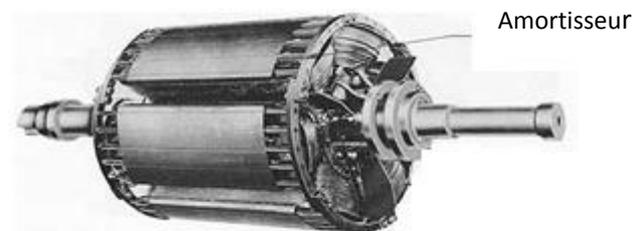


Figure 1-9 : Rotor d'une MS avec amortisseurs [06]

## I-6 Système d'excitation

Le courant d'excitation des machines synchrones est obtenu à partir d'un ensemble appelé système d'excitation comportant :

- a-** la source de puissance proprement dite, fournissant la puissance d'excitation (figure 1-10) ;
- b-** le régulateur de tension
- c-** des étages amplificateurs intermédiaires, intercalés entre le régulateur et la source de puissance [07].

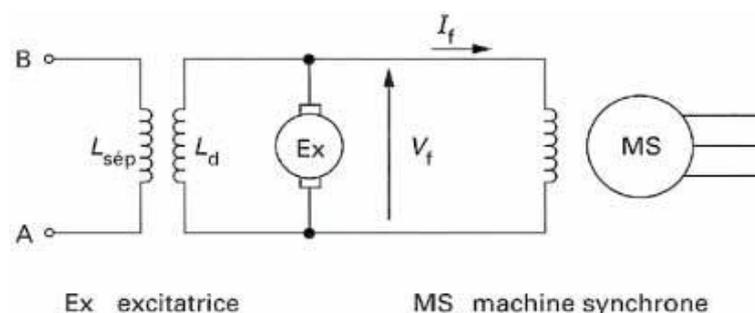


Figure 1-10 : Excitatrice à CC [07]

# Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

## Rôle du système d'excitation

Le système d'excitation des machines synchrones joue un rôle important dans les circonstances suivantes :

- 1) il assure le réglage de tension dans les conditions normales de fonctionnement,
- 2) il contribue au rétablissement de conditions normales de fonctionnement, à la suite de variations brutales et de grande amplitude notamment de la tension aux bornes d'un alternateur [07].
- 3) il assure une réserve de stabilité dynamique suffisante lors des changements de puissance du générateur après défauts ou manœuvres sur le réseau alimenté par cette machine synchrone [08].

## I-7 Fonctionnement de base de la machine synchrone

### I-7.1 Alternateur

Lorsqu'on applique sur l'enroulement inducteur de la machine une tension continue, ce dernier ayant une résistance, on va obtenir la circulation d'un courant continu qui va créer au sein de chaque bobine un flux. Ces derniers vont ainsi polariser les noyaux du rotor qui vont générer le flux inducteur. Ce dernier via le circuit magnétique du stator pourra se référer et ainsi traverser les bobinages statoriques. Si le rotor est en rotation, les enroulements statoriques vont être soumis à un champ rotoriques tournant qui sera pour ces derniers variable. Les enroulements statoriques seront donc le siège de force électro motrice. On obtiendra donc au droit des bornes de chaque bobine une tension alternative sinusoïdale qui majorée des chutes de tension nous donnera la tension d'exploitation alternative sinusoïdale triphasée qui pourra ainsi pousser un courant alternatif sinusoïdale [09].

### I-7.2 Circuit équivalent de l'alternateur

On distingue généralement deux types de machine synchrone selon le modèle de construction de leur rotor :

- a- Machine synchrone à rotor lisse voire - figure 1- 11 :

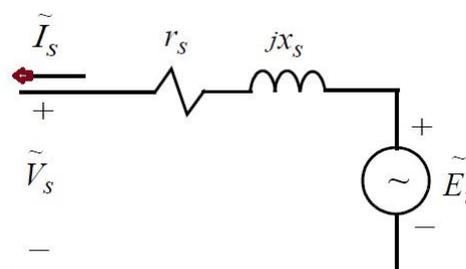


Figure 1-11 : circuit équivalent par phase d'une MS à rotor lisse [09]

b- Machine synchrone à rotor saillant voire - figure 1- 12 :

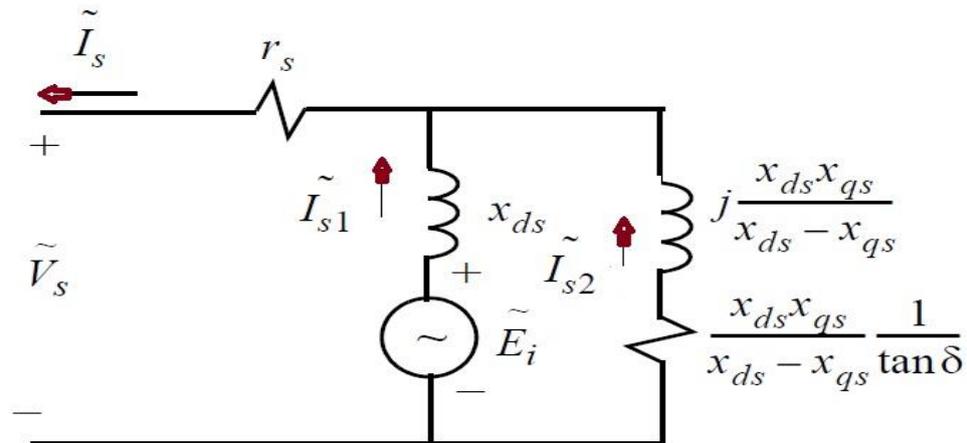


Figure 1-12 : circuit équivalent par phase d'une MS à rotor saillant [09]

$I_s$ : courant statorique du phaseur par phase(A).

$E_i$  : tension induite par phase(V).

$V_s$ : tension aux bornes d'une phase(V).

$X_s$  : réactance statorique par phase( $\Omega$ ).

$R_s$  : résistance statorique par phase( $\Omega$ ).

$X_{ds}$  : réactance directe selon l'axe d( $\Omega$ ).

$X_{qs}$  : réactance en quadrature selon l'axe q( $\Omega$ ).

$\delta$  : angle de charge (rad).

## I-8 La FEM à vide ( $E_i$ )

Les conducteurs formant les bobines du stator sont placés perpendiculairement au champ rotorique. Comme ce dernier champ rotorique est tournant, il sera donc vu du stator comme un champ variable. On conclut donc que les enroulements rotorique produisent un flux dont l'expression sera :

$$\phi = \phi_{Max} \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

Le flux est variable et donc caractérise une variation de flux qui s'exprime avec l'expression du flux rotorique dans la formule ci-après :

$$e = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d(\phi_M \cdot \sin(\omega t))}{dt} = \omega \cdot \phi_M \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (1-2)$$

La valeur maximale de cette FEM sera :

$$E_M = \omega \cdot \phi_M \quad (1-3)$$

Et sa valeur efficace sera :

$$E_{eff} = \frac{\omega \cdot \phi_M}{\sqrt{2}} \quad (1-4)$$

# Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

---

En supposant que la pulsation soit égale à :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1-5)$$

La valeur de la FEM efficace devient :

$$E = 4,44 \cdot f \cdot \phi_M \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-6)$$

Pour  $N$  conducteurs, nous savons que notre machine est composée d'un nombre de conducteur soit  $N$ , nous savons également que ces conducteurs placés en série forment des spires qui elles mêmes forme les bobines, et que chaque conducteurs actifs soumis aux variations de flux est le siège d'une FEM « e ». Comme on a besoin de deux conducteurs actif pour former une spire, donc pour  $N$  conducteurs actifs, nous avons  $N/2$  spires. La FEM totale devient dès lors [10]

$$E_i = 2,22 \cdot N \cdot f \cdot \phi_M \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-7)$$

Avec :

$E_i$  : la Force Electro Motrice en volt

$f$  : la fréquence en Hertz

$\phi_m$  : le flux inducteur en wéber

$N$  : le nombre de spire au stator

## **I-9 La FEM en charge**

En charge, la tension n'est plus égale à la FEM, des phénomènes bien connus en électrotechnique permettent d'expliquer ces différents types de chute de tension.

### **La résistance**

La résistance du stator parcourue par un courant de charge entraîne une chute de tension. Cette dernière devra donc être soustraite à la FEM. Donc la tension d'exploitation sera plus petite que la FEM débitée, et pour maintenir la tension d'exploitation constante en régulant le champ inducteur. Les variations de ce dernier devront compenser les variations de la chute de tension.

### **Le circuit magnétique**

Le flux inducteur est conduit par les circuits magnétiques, celui du rotor et celui du stator. Aussi nous savons également qu'un circuit magnétique possède des limites dans ses capacités à conduire le flux. Donc, les circuits magnétiques vont à un moment donné se saturer. Dans cette plage de saturation, il nous sera devenu impossible de maintenir la tension d'exploitation constante en augmentant le courant d'excitation car toute augmentation du courant d'excitation sera inutile.

## I-10 La réaction d'induit

La réaction d'induit est un phénomène particulier qui apparaît au sein de la machine. Ce phénomène peut être résumé en disant qu'il s'agit d'une déformation du flux sous l'influence d'un autre flux. Pour analyser correctement les conséquences réelles de la réaction d'induit, nous devons tenir compte de la charge placée sur l'alternateur. Nous analyserons donc le phénomène sur charge résistive, sur charge selfique et sur charge capacitive [10].

### I-10.1 Cas d'une charge résistive

Dans ce type de charge le courant est en phase avec la tension. Si la tension est maximum, le courant est donc maximum. Hors la tension sera maximum si l'enroulement du stator est soumis au flux inducteur maximum. Nous pouvons donc résumer cette position sur le dessin ci-dessous au droit du conducteur n°1.

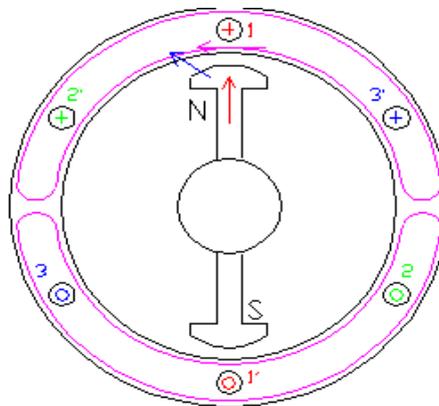


Figure 1-13 : Cas d'une charge résistive [10].

On réalise que le flux rotorique va être dévié par le flux statorique. Les conséquences seront que la FEM induite au stator qui en théorie devrait être maximum ne le sera pas et que dès lors la tension d'exploitation sera plus petite. Nous avons bien un nouveau phénomène qui va dans le sens de réduire la tension d'exploitation en jouant ici directement sur la FEM via le flux, la déformation sera d'autant plus grande que le champ statorique sera important et comme ce dernier est lié au courant de charge, plus le courant sera grand dans les enroulements statoriques et plus la déformation sera forte avec une diminution proportionnelle de la tension d'exploitation, dans ce cas de figure la réaction d'induit est **transversale** [10].

### I-10.2 Cas d'une charge inductive

Dans ce type de charge le courant est en arrière sur la tension. Si la tension est maximum, le courant est donc minimum. Hors la tension sera minimum si l'enroulement du stator est soumis au flux inducteur minimum. Nous aurons cette situation si le pôle du rotor est en quadrature sur l'enroulement du stator. Nous pouvons donc résumer cette position sur le dessin ci-dessous au droit du conducteur n°1.

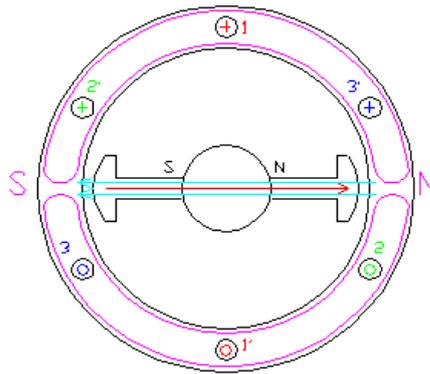


Figure 1-14 : Cas d'une charge selfique [10].

Le flux rotorique va être en opposition direct avec le flux statorique comme indiqué ci-dessus, donc l'influence de la réaction d'induit est la plus néfaste. Notons que la destruction du flux rotorique sera d'autant plus grande que le champ statorique sera important. Comme ce dernier est lié au courant de charge, plus le courant sera grand dans les enroulements statoriques et plus la destruction sera forte avec une diminution proportionnelle de la tension d'exploitation. La réaction d'induit est **longitudinale démagnétisante** [10].

### I-10.3 Cas d'une charge capacitive

Dans ce type de charge le courant est en avance sur la tension. Si la tension est maximum, le courant est donc minimum. Hors la tension sera minimum si l'enroulement du stator est soumis au flux inducteur minimum. Nous aurons cette situation si le pôle du rotor est en quadrature sur l'enroulement du stator. Nous pouvons donc résumer cette position sur le dessin ci-dessous au droit du conducteur n°1 [10].

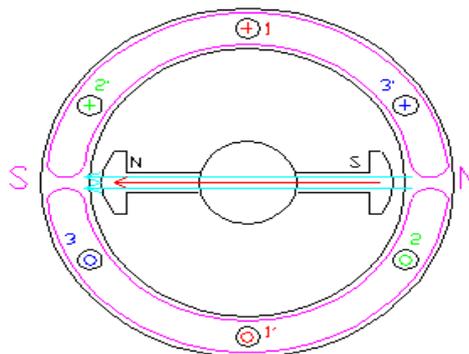


Figure 1-15 : Cas d'une charge capacitive [10].

Dans ce cas et comme indiqué sur le dessin ci-dessus que le flux rotorique va être en phase avec le flux statorique. Donc sur une telle charge, l'influence de la réaction d'induit est la plus intéressante mais peut aussi devenir néfaste. Notons que nous avons une amplification du flux rotorique et qu'elle sera d'autant plus grande que le champ statorique sera important. Comme ce dernier est lié au courant de charge, plus le courant sera grand dans les enroulements statoriques et

# Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

plus le renforcement sera fort avec une augmentation proportionnelle de la tension d'exploitation, la réaction d'induit est **longitudinal magnétisante** [10].

## **I-10.4 Cas d'une charge inductive et capacitive**

Dans la pratique, l'alternateur débite sur des circuits de type R-L ou R-C et le déphasage du courant sur la FEM sera donc compris entre 0 et 90°, nous aurons dans ce cas une réaction d'induit composée d'une partie transversale et d'une partie longitudinale. En fonction du déphasage, l'on tendra plus vers l'une ou vers l'autre. Dans tous les cas, une augmentation du courant de charge exigera une adaptation du courant d'excitation afin de tenter de maintenir la tension d'exploitation constante [10].

## **I-11 La fréquence**

La formule: 
$$f = p \cdot n \quad (1-8)$$

$f$  = la fréquence en Hertz

$n$  = la vitesse de rotation en tr/min

$p$  = le nombre de paire de pôle

$p$	$n$ (t/min)
1	3000
2	1500
3	1000
4	750

Tableau 1-1

Donc pour avoir une fréquence fixe de 50 Hz on utilise des alternateurs avec un nombre de paire de pôles différents comme l'indique le tableau 1-1 [12].

## **I-12 Comportement en régime permanent des machines synchrones**

Les machines synchrones fonctionnent presque exclusivement dans des conditions sinusoïdales équilibrées, il est important que ce mode de fonctionnement soit examiné et ses équations mathématiques soient présentées dans notre mémoire pour différencier les deux types en termes de construction du rotor des machines synchrones à pôle lisse ou saillant.

### **I-12.1 Choix du référentielle**

Les tensions d'un système triphasé peuvent être considérées comme un vecteur unique dans un espace tridimensionnel, Lorsque la somme des trois tensions donne le vecteur nul, le vecteur de tension tourne alors sur un plan (c'est-à-dire le plan d-q). Lorsque les tensions triphasées forment un ensemble triphasé sinusoïdal équilibré, le vecteur de tension a une amplitude constante et donc trace un cercle dans le plan d-q. Enfin, lorsque les axes d-q du plan d-q sont réalisés pour tourner avec le vecteur de tension lui-même, les projections du vecteur de tension sur le plan d-q sont devenues des

## Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones

constantes. Lorsque ces tensions sinusoïdales équilibrées sont appliquées à la machine, on produit un flux d'induit uniforme tournant dans l'espace (entrefer) qui tourne à la vitesse mécanique équivalente de la vitesse synchrone. Le fonctionnement normal dans l'état stationnaire est défini comme étant l'état dans lequel le rotor de la machine tourne à la même vitesse angulaire mécanique que le flux rotatif du stator (c'est-à-dire la vitesse synchrone) et que les courants dans la machine ont atteint leur état stationnaire de fonctionnement [09].

On choisit un repère d-q tournant et le système triphasé a-b-c stationnaire comme c'est indiqué dans la figure ci-dessous :

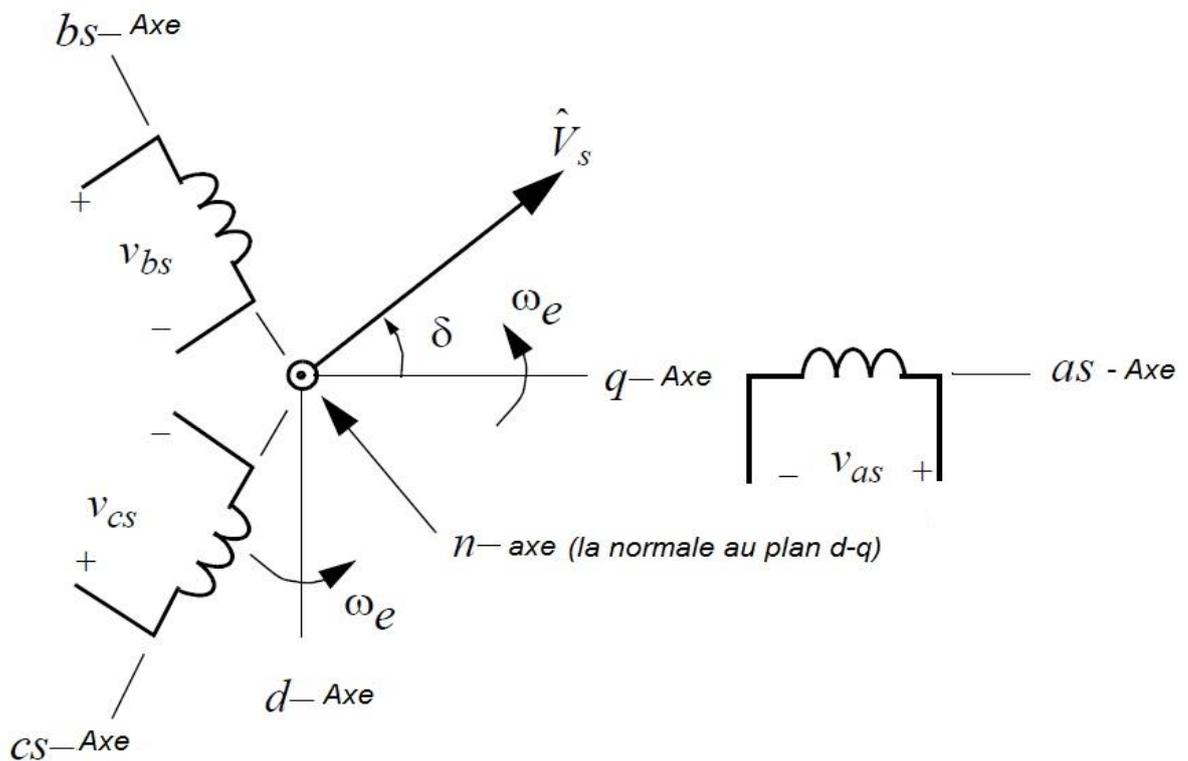


Figure 1-16 : alignement des axes d-q tournant avec les axes as-bs-cs stationnaires sur le plan d-q et le vecteur tension à l'instant  $t=0s$  [09].

A signaler que plusieurs références bibliographiques montrent le développement de calcul des équations de tensions, de courant de flux aboutissant à ce qui suit :

En régime permanent et sinusoïdal les équations de Parck deviennent [09]:

$$-v_s \sin\delta = r_s I_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (1-9)$$

$$v_s \cos\delta = r_s I_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (1-10)$$

$$0 = r_s I_{ns} \quad (1-11)$$

$$0 = r'_{dr} I'_{dr} \quad (1-12)$$

$$0 = r'_{qr} I'_{qr} \quad (1-13)$$

$$V'_{fr} = r'_{fr} I'_{fr} \quad (1-14)$$

Et les équations de courant :

$$I_{ds} = \frac{v_s(x_{qs} \cos \delta - r_s \sin \delta) - E_i x_{qs}}{r_s^2 + x_{ds} x_{qs}} \quad (1-15)$$

$$I_{qs} = \frac{v_s(r_s \cos \delta + x_{ds} \sin \delta) - E_i r_s}{r_s^2 + x_{ds} x_{qs}} \quad (1-16)$$

Equation du couple électromagnétique :

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{p}{2w_b} \right) \left\{ E_i \frac{v_{qs} r_s - v_{ds} x_{ds} - E_i r_s}{r_s^2 + x_{ds} x_{qs}} + \frac{x_{ds} - x_{qs}}{(r_s^2 + x_{ds} x_{qs})^2} [r_s x_{qs} (v_{qs}^2 + E_i^2) + (r_s^2 - x_{ds} x_{qs}) v_{qs} v_{ds} - r_s x_{ds} v_{ds}^2 - 2 r_s x_{qs} v_{qs} E_i - r_s^2 v_{ds} E_i + x_{qs} x_{ds} v_{ds} E_i] \right\} \quad (1-17)$$

La puissance active:

$$P_s = \frac{3}{2} \frac{v_s^2 \left[ r_s + (x_{ds} - x_{qs}) \left( \frac{\sin 2\delta}{2} \right) \right] - E_i v_s (r_s \cos \delta - x_{qs} \sin \delta)}{r_s^2 + x_{ds} x_{qs}} \quad (1-18)$$

Et si on néglige la résistance du stator  $r_s$  :

$$P_s \approx \frac{3}{2} \frac{v_s E_i}{x_{ds}} \sin \delta + \frac{3}{2} v_s^2 \frac{(x_{ds} - x_{qs})}{2x_{ds} x_{qs}} \sin 2\delta \quad (1-19)$$

La puissance réactive :

$$Q_s = \left( \frac{3}{2} \right) \frac{v_s^2 (x_{qs} \cos^2 \delta + x_{ds} \sin^2 \delta) - E_i v_s (x_{qs} \cos \delta + r_s \sin \delta)}{r_s^2 + x_{ds} x_{qs}} \quad (1-20)$$

Et si on néglige la résistance statorique  $r_s$  :

$$Q_s \approx \left( \frac{3}{2} \right) \left\{ \left( \frac{v_s^2}{2} \right) \left[ \left( \frac{1}{x_{qs}} + \frac{1}{x_{ds}} \right) - \left( \frac{1}{x_{qs}} - \frac{1}{x_{ds}} \right) \sin 2\delta \right] - \frac{E_i v_s}{x_{ds}} \cos \delta \right\} \quad (1-21)$$

## **I-13 Moteur synchrone**

Un alternateur triphasé est donc réversible il fonctionne en générateur comme il peut fonctionner en moteur, mais un couple moteur ne peut se produire que si le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant du stator, c'est pourquoi on le nomme moteur synchrone.

L'avantage essentiel des moteurs synchrone est leur rendement très haut, et leur facteur de puissance et la possibilité de retenir le fonctionnement en synchronisme durant les écrasements de tension d'alimentation, le moteur synchrone peut être construit pour fonctionner à des vitesses grandes de 3000tr/min – 50hz, à des vitesses très basses où il peut concurrencer les performances des moteurs asynchrones [13].

Aussi on peut utiliser le moteur synchrone comme un compensateur synchrone afin d'améliorer le facteur de puissance du réseau.

## **I-13.1 Démarrage des moteurs synchrone**

Si nous appliquons une tension triphasée alternative sur un moteur synchrone et que nous l'excitons, nous remarquerons que le moteur ne se mettra pas en rotation. Nous savons que si le décalage angulaire entre les deux champs est supérieur à  $90^\circ$ , nous avons décrochage. Hors au démarrage, le champ statorique est à vitesse du synchronisme de façon instantanée ce qui empêchera tout accrochage. Il nous faut donc amener la vitesse du rotor à une vitesse proche de celle du synchronisme pour permettre un accrochage du champ rotorique sur le champ statorique, pour réaliser cela deux méthodes sont généralement utilisées :

### **I-13.1.1 Utilisation d'un moteur auxiliaire (Pony)**

On entraîne le moteur synchrone à une vitesse de rotation à peine inférieure à celle du synchronisme au moyen d'un moteur asynchrone (ou courant continu) de faible puissance. Le moteur synchrone est couplé au réseau lorsque sa vitesse s'est stabilisée [13].

### **I-13.1.2 Démarrage en asynchrone synchronisé**

A l'aide des barres d'amortisseurs placé sur le rotor et surtout pour les rotors à pôles saillants, et avec une application graduelle de la tension d'alimentation triphasé au stator on peut démarrer notre moteur synchrone exactement comme un moteur asynchrone à rotor à cage une fois la vitesse se rapproche de la vitesse du synchronisme et la tension d'alimentation atteint la tension nominale, le moteur s'accroche et la vitesse se stabilise [13].

## **I-13.2 Schéma équivalent d'un moteur synchrone**

Le schéma équivalent d'un moteur synchrone est le même schéma adopté pour un générateur – comme ça était présenté au paragraphe **I.7.2** de ce chapitre - mais avec un signe conventionnel opposé pour le sens du courant statorique qui est cette fois-ci absorbé et non pas générer.

## **I-13.3 Diagramme vectoriel d'un moteur synchrone**

a- sous excité à facteur de puissance en retard avec une réaction d'armature magnétisante – voir figure 1-17 :

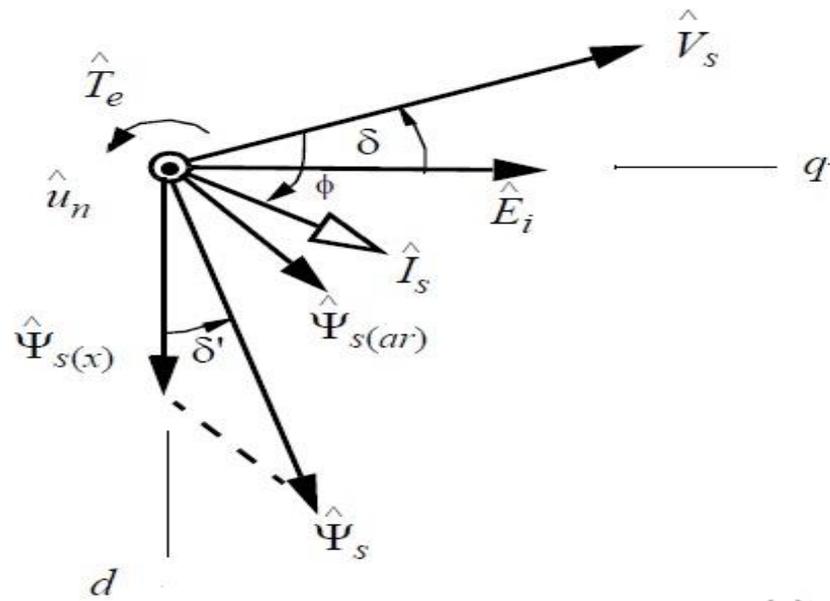


Figure 1-17: Diagramme vectoriel d'un moteur synchrone a- sous excité [14]

**b-** sur excité à facteur de puissance en avance avec une réaction d'armature dé-magnétisante – voir figure -18 :

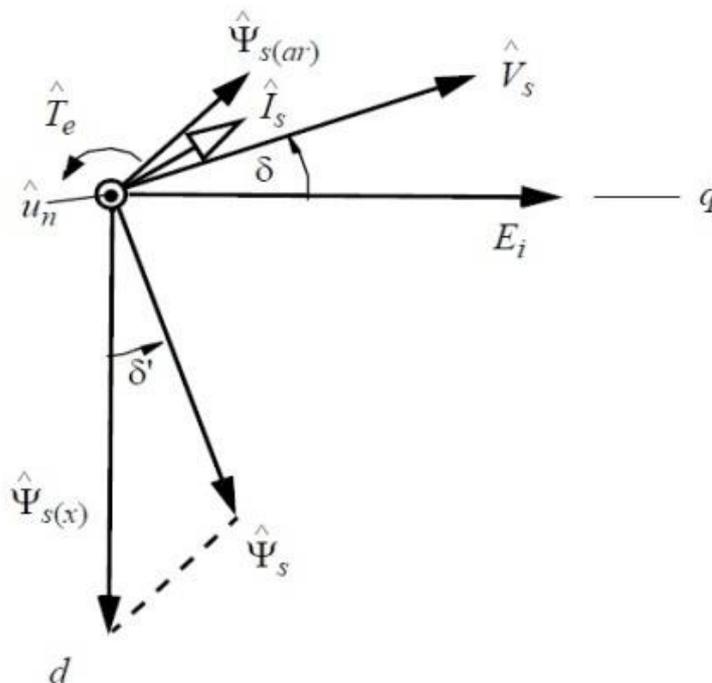


Figure 1-18 : Diagramme vectoriel d'un moteur synchrone b- sur excité [14]

Dans ce cas la puissance absorbée par le stator est positive et le couple est positif.

## I-14 Courbes en v (Mordey) d'un moteur synchrone

Les courbes de Mordey représentent une famille de courbe du courant absorbé par la machine en fonction du courant d'excitation – voir figure 1-19-, tout en maintenant la vitesse de rotation, la tension d'alimentation des paramètres constants, et on prend la puissance active comme paramètre, le calcul de ces courbes est simple une fois la caractéristique à vide de la machine est connue et les réactance  $X_d$  et  $X_q$  (pour une machine à pôles saillants) sont connu, mais malheureusement lorsque le courant d'excitation varie d'un minimum à un maximum, le courant absorbé par le stator aussi donc ( $I_d$  et  $I_q$ ), donc la saturation magnétique locale varie aussi malgré que le flux total reste constante [14] .

$$I_1 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \sqrt{\left(\frac{-E_1 + v_1 \cos\delta v}{x_d}\right)^2 + \left(\frac{v_1 \sin\delta v}{x_q}\right)^2} \quad (1-22)$$

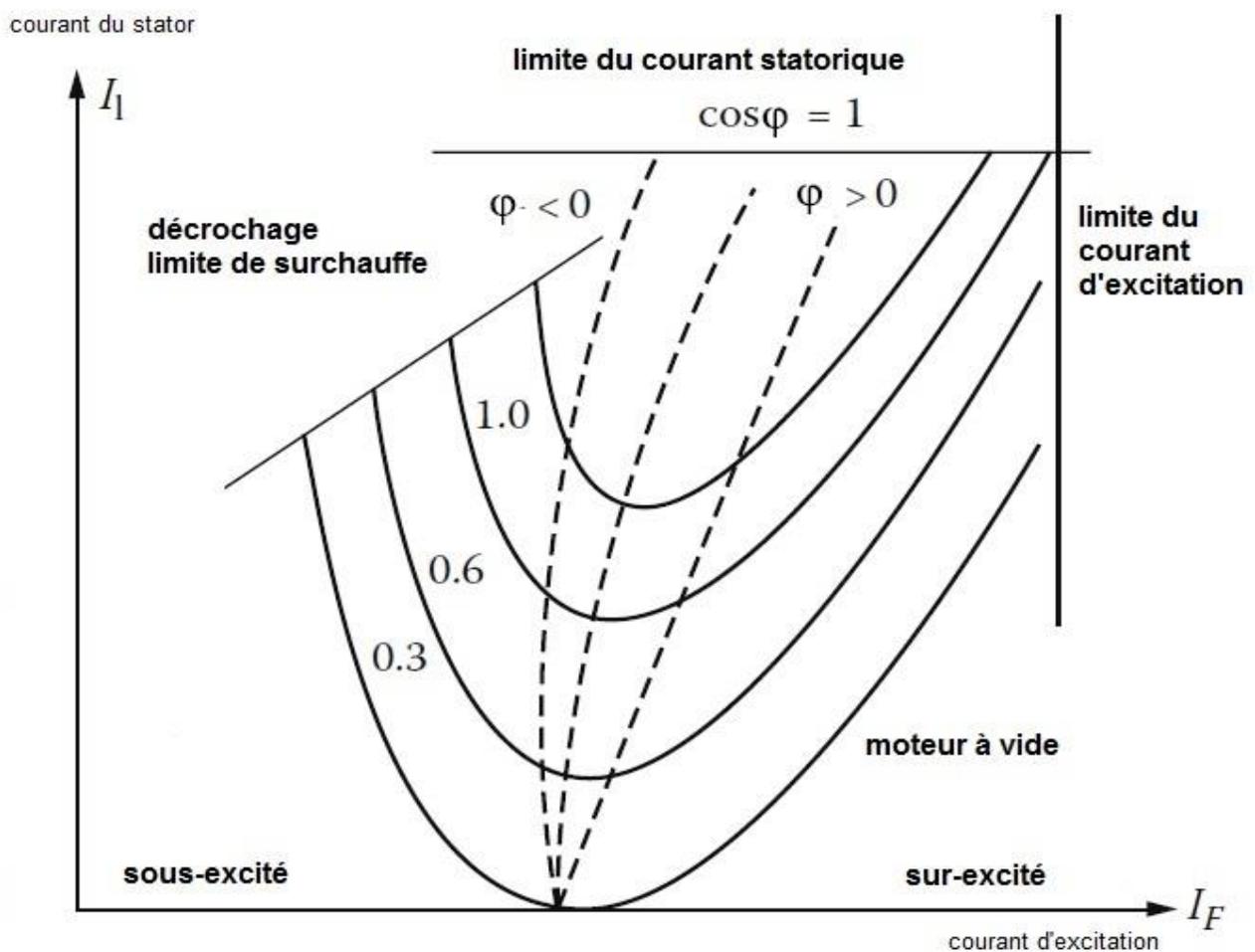


Figure 1-19 : courbes de Mordey [14].

## **I-15 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons fait une description de la machine synchrone et présenté son utilisation dans le domaine de la production d'électricité et le domaine de motorisation, nous avons présenté aussi sa construction physique, ses différents types de bobinage et son principe de base de fonctionnement.

Dans un second lieu nous avons présenté les différents phénomènes physiques leurs causes avec leurs conséquence sur le fonctionnement de la machine synchrone en générale, en plus de ça nous avons abordé brièvement les modèles (circuits équivalents) des machine synchrone à pôles lisses ou saillants, avec les équations mathématique dans un régime sinusoïdale équilibré.

Dans un troisième lieu, nous avons décrit le fonctionnement moteur de la machine synchrone, ses méthodes de démarrage et ses caractéristiques en sous-excité et surexcité.

Ce chapitre nous servira comme une porte nous permettant d'accéder au second chapitre de ce mémoire qui est l'étude expérimentale et essais de la machine synchrone dans ses deux aspects de fonctionnement : Génératrice et moteur.

# Chapitre 2 :

Etude expérimental  
et essais de la  
machine synchrone

### II-1 Introduction

Pour effectuer une étude expérimentale d'une machine synchrone, une variété de testes pratiques sont réalisés selon les normes IEC et IEEE, ces deux dites organismes de normalisation ont publié deux normes IEC-60034-4 et IEEE-115 avec de différentes versions. Dans notre travaille on s'est basé sur la version IEC-60034-4 intitulée « Méthode pour la détermination à partir d'essais des grandeurs des machines synchrone – 2eme édition de l'année 1985 » pour effectuer nos essais.

Les essais ont été effectués au sein du laboratoire de la recherche en électrotechnique de l'université de KHEMIS MILIANA, avec un matériel LANGLOIS. Le banc d'essais est constitué d'une machine synchrone entrainé par une machine à courant continu. Les deux machines sont réversibles (moteur – générateur).

### II-2 Présentation du banc d'essais

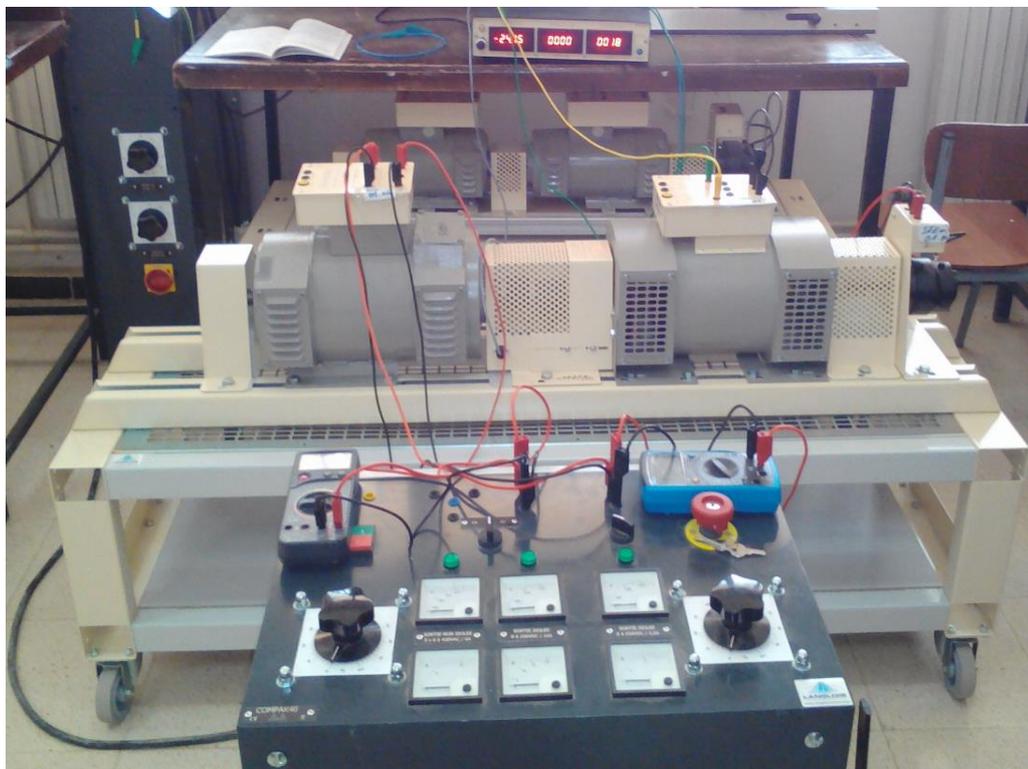


Figure 2-1 : Banc d'essai réalisé

### II-3 Les caractéristiques des machines utilisées

#### Machine Synchrone triphasé du type MSM20 :

	Alternateur	Moteur
Tension nominale composée (V)	400	400
Courant nominal (A)	2.2	4.6
Vitesse de rotation (tr/min)	1500	
Cos (phi)	/	0.68
Puissance nominale (kW)	1.5	
Nombre paire de pôles (p)	2	
Type de pôle	Saillant	
Amortisseur LEBLANC	Oui	
Couplage – Etoile/Triangle	Oui	
Mise à la terre	Oui	
Protection surchauffe	Oui	
Roue polaire en alternateur	Tension : 56V <sub>cc</sub>	Tension :13V <sub>cc</sub>
Roue polaire en moteur	Courant : 2.9A	Courant : 0.6A
Poids	41kg	

Tableau 2-1

#### Machine à courant continu du type CC20 – a excitation séparée :

	Induit	Inducteur
Tension nominale (V DC)	220	220
Courant nominal (A)	9	0.6
Vitesse de rotation (tr/min)	1500	
Puissance nominale (kW)	1.5	
Pôles auxiliaires	Oui	
Mise à la terre	Oui	
Protection surchauffe	Oui	
Poids	51kg	

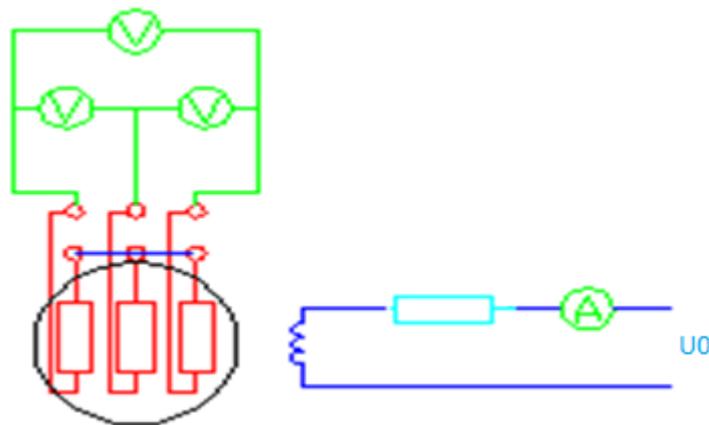
Tableau 2-2

### II-4 Etude de l'alternateur

#### II-4.1 Caractéristique interne ou essai à vide

Dans cet essai on maintient la vitesse de rotation constante de l'alternateur, on fait varier le courant d'excitation, pour voir l'évolution de la FEM « E » en fonction du courant ( $E=f(i)$  ou  $U=f(i)$ ). On pourra avancer l'hypothèse que  $E_v$  (FEM à vide) est égale à  $U$  (aux bornes de l'alternateur) [15].

#### Schéma du câblage



#### Procédure du teste

- ✓ Câbler la machine en fonction du schéma du câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- ✓ Vérifier que tous les organes de variation de tensions sont en position minimale (tension d'alimentation de la roue polaire, tension d'inducteur de la MCC, tension d'induit de la MCC).
- ✓ Alimenter l'inducteur de la machine MCC à la tension nominale, en suite on augmente la tension d'induit de la MCC graduellement jusqu'à obtenir une vitesse de rotation constant de 1500 tr/min (fréquence constante de 50Hz).
- ✓ Mettre le rotor en rotation et stabiliser la vitesse pour obtenir la fréquence souhaitée.
- ✓ A l'aide d'une alimentation DC variable de 0VDC à 250VDC, on alimente l'inducteur de la machine synchrone (la roue polaire) graduellement et on relève la valeur du courant d'excitation et de la FEM.
- ✓ Cet essai se poursuit jusqu'à avoir dépassé la valeur de la tension d'exploitation souhaitée.

#### Résultats expérimentaux

Le tableau ci-après nous donnera les résultats obtenu à partir de l'essai à vide :

Courant d'excitation (A)	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.5
Tension entre phase (V)	6	113	210	284	340	380	405	433	450	456

Tableau 2-3

Courbe : à partir du tableau N°2-3 on peut tracer la courbe suivante :

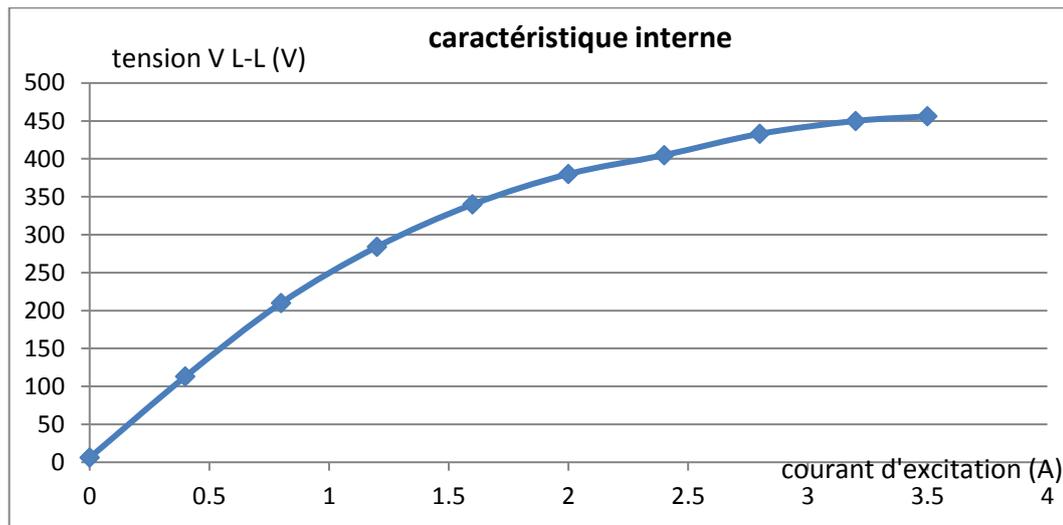


Figure 2-2 : Essais à vide.

### Interprétation des résultats

Nous pouvons remarquer que la courbe ne commence pas à une tension nulle, pour une excitation nulle, la mise en rotation seul suffit à faire débiter une tension à notre alternateur. La raison est que le rotor est constitué de noyaux bobinés et dès leurs première alimentation en courant continue ces noyaux conserveront toujours un petit flux dit : un flux rémanent suffira pour créer une tension au stator.

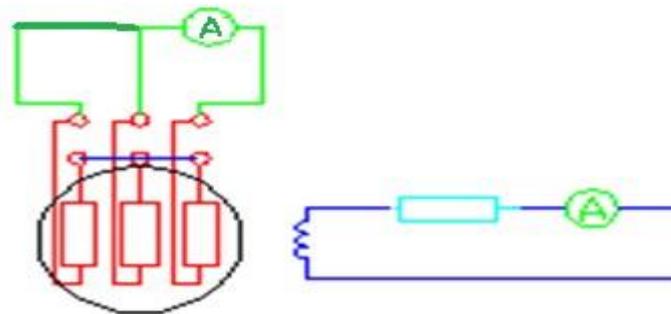
Nous remarquons aussi que notre courbe est la liaison entre deux zones. La première est une droite (linéaire) et la seconde est une courbe. La droite nous montre bien le lien proportionnel entre le courant d'excitation, le flux rotorique et la FEM. Cette courbe est visible car nous sommes à vide, aucune perte n'est enregistrée du moment que la machine n'est pas chargée.

Pour la seconde partie de la courbe, nous constatons que ce phénomène de proportionnalité n'est plus respecté. La FEM est fonction du flux inducteur, ce dernier doit augmenter puisque nous augmentons l'excitation. La raison provient du fait que si le flux inducteur interne augmente au droit des bobines inductrices, le circuit magnétique lui offre une saturation ce qui explique que le flux induisant le stator n'est plus l'image proportionnel du flux côté rotor. Nous voyons donc clairement sur notre courbe que la FEM tend vers une valeur ce qui est bien l'image d'un circuit magnétique qui se sature avec le flux qui tend vers une valeur maximum, donc pour un fonctionnement à vide, le seul phénomène qui peut venir déformer la FEM est la saturation du circuit magnétique dans la zone non- linéaire de notre courbe.

### II-4.2 Essai en court-circuit permanent

Dans ce test on va maintenir la vitesse de rotation constante, on court-circuite les bornes de l'alternateur, et on fait varier le courant d'excitation graduellement du zéro ampère jusqu'à obtenir un courant de court-circuit permanent qui égale au courant nominal sur le stator, cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution du courant d'excitation «  $i$  » en fonction du courant de court-circuit «  $I_{cc}$  »  $i=f(I_{cc})$  [15].

#### Schéma du câblage



#### Procédure du teste

- ✓ Câbler la machine en fonction du schéma du câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- ✓ Vérifier que tous les organes de variation de tensions sont en position minimale (tension d'alimentation de la roue polaire, tension d'inducteur de la MCC, tension d'induit de la MCC).
- ✓ Alimenter l'inducteur de la machine MCC à la tension nominale, en suite on augmente la tension d'induit de la MCC graduellement jusqu'à obtenir une vitesse de rotation constant de 1500 tr/min (fréquence constante de 50Hz).
- ✓ A l'aide d'une alimentation DC variable de 0VDC à 250VDC, on alimente l'inducteur de la machine synchrone (la roue polaire) graduellement, par pallier constant, et on relève le courant de charge équivalent ( $I_{cc}$ ). Nous chargerons la machine en veillant à ne jamais dépasser le courant maximale de la machine.

#### Résultats expérimentaux

Le tableau ci-après nous donne les résultats obtenus à partir de l'essai en court-circuit permanent :

Courant d'excitation (A)	0	0.08	0.2	0.32	0.34	0.57	0.67	0.8	0.93	1.02	1.13
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) (A)	0.07	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.52	2.7	3

Tableau 2-4 :

Courbe : à partir du tableau N°2-4 on peut tracer la courbe suivante :

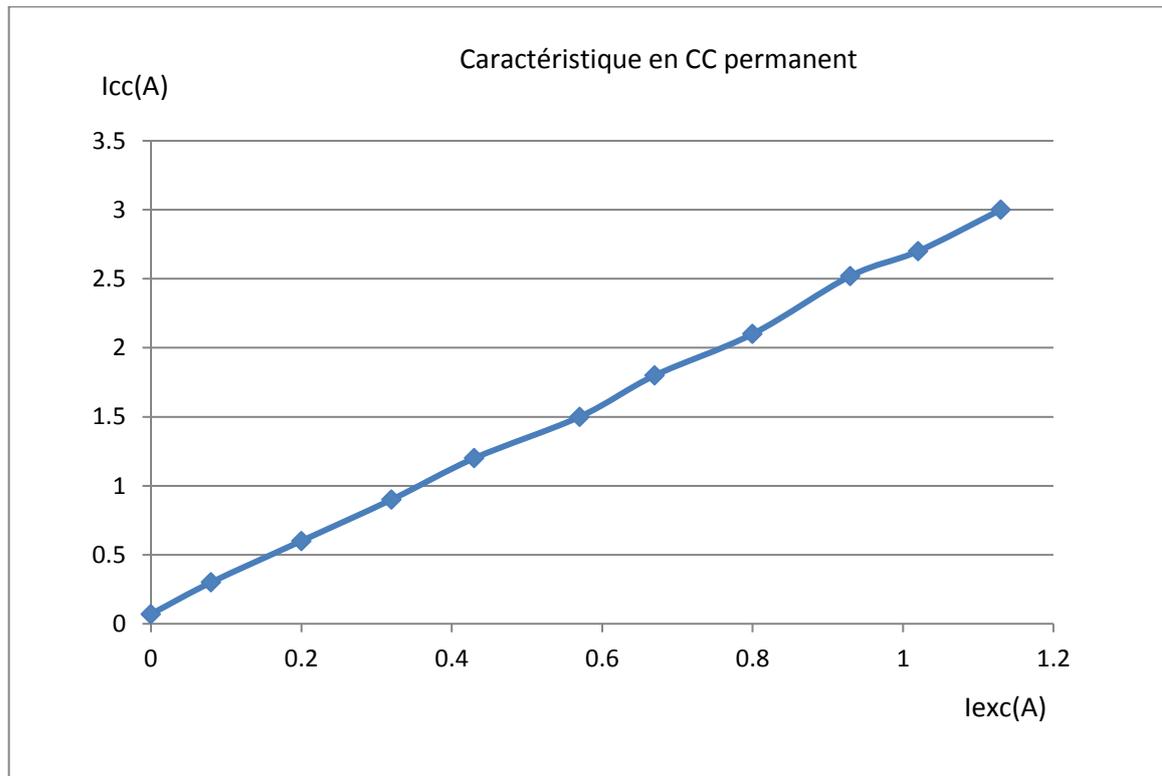


Figure 2-3 : Essais en CC permanent.

### **Interprétation des résultats**

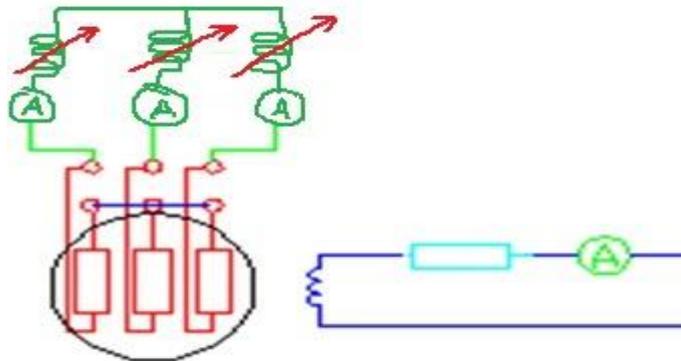
Etant donné que le courant de court-circuit est directement lié à la FEM, puisque la tension est nulle. Dès lors comme la FEM est proportionnelle au courant d'excitation, on peut déduire que le courant de charge est proportionnel au courant d'excitation, donc nous retrouvons bien une droite.

### **II-4.3 Essai en charge purement inductive $\cos(\phi) = 0$**

Dans ce test on va maintenir la vitesse de rotation constante, le courant d'alimentation de la charge inductive constant  $I=I_{nom}$ , et on fait varier le courant d'excitation avec la charge inductive de telle sorte à garder le courant absorbé constant, cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution du courant d'excitation «  $i$  » en fonction de la tension entre phase « VL-L »

$$V_{L-L}=f(I_{exci}) \text{ [15].}$$

### Schéma du câblage



### Procédure du teste

- ✓ Câbler la machine en fonction du schéma du câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- ✓ Vérifier que tous les organes de variation de tensions sont en position minimale (tension d'alimentation de la roue polaire, tension d'inducteur de la MCC, tension d'induit de la MCC).
- ✓ Alimenter l'inducteur de la machine MCC à la tension nominale, en suite on augmente la tension d'induit de la MCC graduellement jusqu'à obtenir une vitesse de rotation constant de 1500 tr/min (fréquence constante de 50Hz).
- ✓ On calibre notre charge inductive sur l'alimentation triphasé en suite on la alimente directement à partir de notre alternateur.
- ✓ A l'aide d'une alimentation DC variable de 0VDC à 250VDC, on alimente l'inducteur de la machine synchrone (la roue polaire) graduellement jusqu'à obtenir le courant nominale dans le stator.
- ✓ On fait varier la charge par pallier constant tout en agissant sur l'excitation pour maintenir un courant de charge constant.
- ✓ On relève le courant d'excitation avec la tension de la machine VL-L.

### Résultats expérimentaux

Le tableau ci-après nous donnera les résultats obtenu à partir de l'essai à  $\cos(\phi) = 0$  :

Courant d'excitation (A)	4	3.9	3.8	3.6	3.42	2.9	2.38	2.11	1.7	1.3	1	0.7	0.5	0.2	0
Tension VL-L(V)	436	431	421	420	410	374	314.3	276.5	226.3	183.4	140.3	100.5	70.3	34.7	10.7

Tableau 2-5

## Chapitre 2 : Etude expérimental et essais de la machine synchrone

Courbe : à partir du tableau N°06 on peut tracer la courbe suivante :

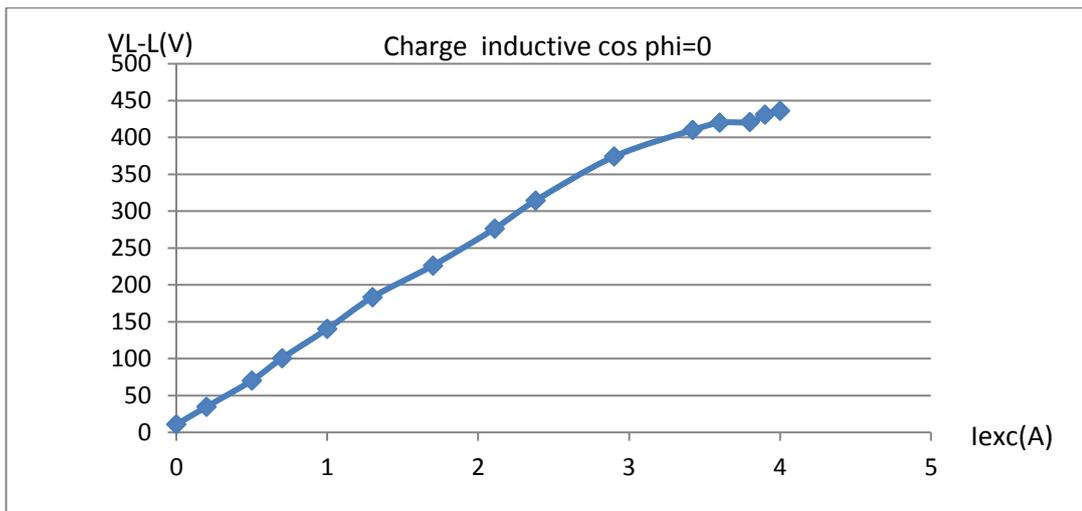


Figure 2-4 : Essais  $\cos (\phi)=0$ .

### Interprétation des résultats

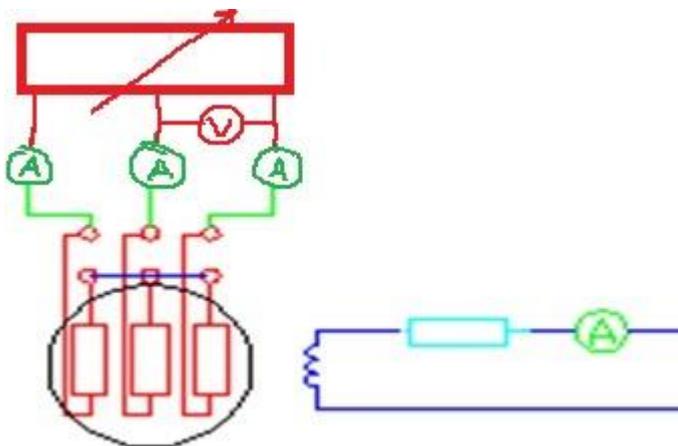
Ce test est utilisé pour obtenir la courbe de saturation à facteur de puissance nul, Aussi cette caractéristique est utilisée avec la caractéristique à vide de la machine pour obtenir la réactance de fuite d'induit ou la réactance de Potier (réaction d'induit) d'un générateur synchrone à n'importe quel courant de charge.

### II-4.4 Caractéristique externe

#### Fonctionnement en charge

Dans cet essais on va maintenir la vitesse de rotation constante, le courant d'excitation constant, et on fait varier la charge pour trois types de charges (résistive, capacitive et inductive), cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution de la tension « U » en fonction du courant de charge  $U=f(I)$  [15].

#### Schéma du câblage



## Chapitre 2 : Etude expérimental et essais de la machine synchrone

### Procédure du teste

- ✓ Câbler la machine en fonction du schéma du câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- ✓ Vérifier que tous les organes de variation de tensions sont en position minimale (tension d'alimentation de la roue polaire, tension d'inducteur de la MCC, tension d'induit de la MCC).
- ✓ Alimenter l'inducteur de la machine MCC à la tension nominale, en suite on augmente la tension d'induit de la MCC graduellement jusqu'au obtenir une vitesse de rotation constant de 1500 tr/min (fréquence constante de 50Hz).
- ✓ A l'aide d'une alimentation DC variable de 0VDC à 250VDC, on alimente l'inducteur de la machine synchrone (la roue polaire) graduellement, et on règle la tension d'exploitation souhaitée aux bornes des enroulements du stator.
- ✓ Par pallier constant, on applique des charges et on relève la valeur du courant de charge et de la FEM, en veillant à ne jamais dépasser le courant maximale de la machine.

NB : On refait le même teste pour les trois types de charge (résistive, capacitive et inductive), et pour finir on utilise une charge constante pour comparer et elle nous servira comme charge de base.

### Résultats expérimentaux

Le tableau ci-après nous donnera les résultats obtenu à partir de l'essai en charge variable résistive de : 2kW, capacitive de 2kVAr et inductive de 2kVAr aussi :

I(A)	0	0.17	0.35	0.51	0.67	0.84	1	1.17	1.34	1.48	1.61	1.78	1.94	2.12	2.2	2.4	2.54	2.7
Tension VL-L(V) Charge résistive	440	438	436	428	427	423	422	421	419	417	416	413	412	410	408	407	402	399
Tension VL-L(V) Charge capacitive	440	444	448	450	454	459	462	466	467	470	473	480	484	487	490	494	498	502
Tension VL-L(V) Charge inductive	-	-	-	-	415	409	409	-	-	394	-	382	377	-	368	-	355	346

Le tableau 2-6

Courbe : à partir du tableau 2-6 on peut tracer les courbes suivantes :

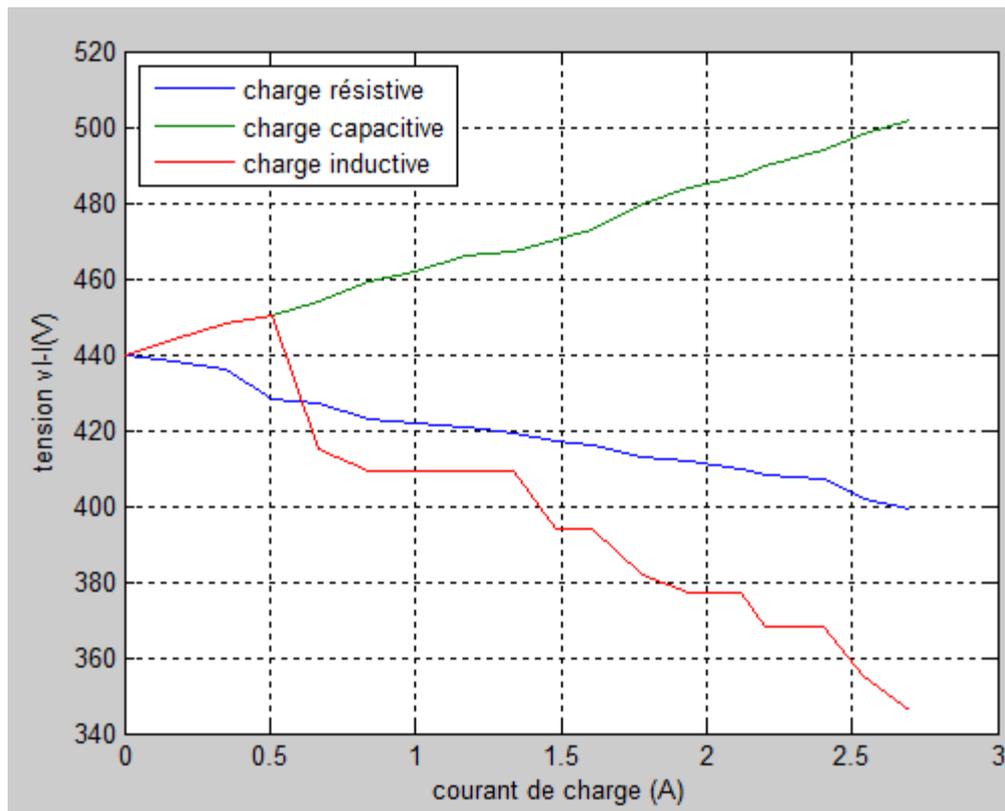


Figure 2-5 : charges variables (résistive, capacitive et inductive).

### Interprétation des résultats

#### a- Sur charge résistive



Figure 2-6 : la charge résistive

On remarque que la tension d'exploitation diminue lorsque la charge augmente. Cette chute de tension est la somme de trois phénomènes de chute de tension. La première est la chute ohmique, la tension est proportionnelle au courant. Nous obtiendrons une première chute de tension à l'image d'une droite. La seconde est la chute due à la FCEM. Du moment que les enroulements du stator sont balayés par les champs tournant statorique, donc ils sont le siège d'une FCEM qui va s'opposer

## Chapitre 2 : Etude expérimental et essais de la machine synchrone

---

à ce qui à donné naissance à cette variation autrement dit la FEM, cette variation sera directement proportionnelle au courant de charge et aura également comme image une droite. Pour la troisième chute de tension, est la réaction d'induit qui sera dans le cas d'une charge résistive du type transversale. Nous aurons donc une déformation du flux rotorique qui sera d'autant plus important que le courant de charge sera grand. Dans ce cas, la déformation n'est plus proportionnelle mais aura l'allure d'une courbe. La somme de ces trois chutes de tension nous donnera une chute de tension globale définie par une autre courbe qui soustraite à la tension d'exploitation de départ et nous donne une allure située entre la charge de type selfique et capacitive.

### **b- Sur charge inductive**



Figure 2-7 : la charge selfique (inductive)

L'allure de la courbe s'explique de la même façon que pour la charge résistive, nous retrouvons une chute de tension ohmique, une chute de tension liée à la FCEM et une dernière fonction de la réaction d'induit. La seule différence réside dans cette dernière. Pour une charge selfique, la réaction d'induit est du type longitudinale démagnétisante ce qui sous-entend que le flux rotorique est en opposition avec le flux statorique. Le flux rotorique résultant sera donc plus faible diminuant automatiquement la valeur de la tension d'exploitation. On note bien que la réaction d'induit étant plus néfaste sur la charge selfique que sur charge résistive, l'effondrement de la tension d'exploitation sera d'autant plus importante.

### c- Sur charge capacitive



Figure 2-8 : la charge capacitive

L'allure de la courbe s'explique de la même façon que pour la charge résistive ou selfique, nous retrouvons une chute de tension ohmique, une chute de tension liée à la FCEM toutes deux allant dans le sens de réduire la tension d'exploitation. La chute de tension due à la réaction d'induit complètera les deux premières. Sur base de ce qui vient d'être dit, l'augmentation de la tension d'exploitation que l'on peut voir sur la courbe ne peut être due qu'à cette réaction d'induit. Pour une charge capacitive, la réaction d'induit est du type longitudinale magnétisante ce qui sous-entend que le flux rotorique est dans le même sens que le flux statorique. Le flux rotorique résultant sera donc plus important et il va faire augmenter automatiquement la valeur de la tension d'exploitation. On notera que la réaction d'induit restera toujours positive.

Sachant que le circuit magnétique possède ces limites dans la conduction où le flux rotorique deviendra constant. A partir de ce moment, les deux autres types de chute de tension prendront le dessus pour créer une résultante qui amènera comme pour les autres charges l'effondrement de la tension d'exploitation.

### II-6 Caractéristique de réglage

Dans cet essai on va maintenir la vitesse de rotation constante, la tension d'exploitation constante, et on fait varier le courant d'excitation pour trois types de charges (résistive, capacitive et inductive), cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution du courant d'excitation «  $i_e$  » en fonction du courant de charge «  $I$  »  $i_e=f(I)$  pour chaque type de charge [15].

## Chapitre 2 : Etude expérimental et essais de la machine synchrone

### Procédure du teste

- ✓ Câbler la machine en fonction du schéma du câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- ✓ Vérifier que tous les organes de variation de tensions sont en position minimale (tension d'alimentation de la roue polaire, tension d'inducteur de la MCC, tension d'induit de la MCC).
- ✓ Alimenter l'inducteur de la machine MCC à la tension nominale, en suite on augmente la tension d'induit de la MCC graduellement jusqu'au obtenir une vitesse de rotation constant de 1500 tr/min (fréquence constante de 50Hz).
- ✓ A l'aide d'une alimentation DC variable de 0VDC à 250VDC, on alimente l'inducteur de la machine synchrone (la roue polaire) graduellement, et on règlera la tension d'exploitation souhaitée aux bornes des enroulements du stator.
- ✓ Par pallier constant, appliquer des charges et ajuster à l'aide du courant d'excitation (tension de la roue polaire) la valeur de la tension d'exploitation afin de la maintenir constante. Nous chargerons la machine en veillant à ne jamais dépasser le courant maximale de la machine.

### Résultats expérimentaux

Le tableau ci-après nous donnera les résultats obtenu à partir de l'essai en charge variable : résistive de 2kW, capacitive de 2kVAr et inductive de 2kVAr comme suit :

$I_{ex}(A)$ capacitive	2.23	2.23	2.22	2.02	1.94	1.88	1.85	1.74	1.68	1.59	1.54	1.47	1.36	1.36	1.29	1.21	1.21	1.08	0.96	0.93
$I_{ex}(A)$ résistive	2.3	2.32	2.34	2.36	2.35	2.41	2.48	2.51	2.55	2.56	2.59	2.59	2.67	2.78	2.82	2.83	2.9	2.96	2.99	3.05
$I_{ex}(A)$ inductive	2.57	2.67	2.74	2.79	2.98	3.18	3.5	3.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I(A)$ Charge résistive	0	0.16	0.32	0.48	0.62	0.79	0.95	1.11	1.25	1.41	1.57	1.69	1.85	2.05	2.2	2.35	2.56	2.71	2.82	3
$I(A)$ Charge capacitive	0	0.15	0.32	0.49	0.64	0.81	0.97	1.13	1.28	1.44	1.6	1.76	1.96	2.13	2.24	2.4	2.6	2.76	3.06	3.24
$I(A)$ Charge inductive	0.65	0.8	0.97	1.16	1.48	1.94	2.6	3.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Le tableau 2-7

Courbe : à partir du tableau N°08 on peut tracer les courbes suivantes :

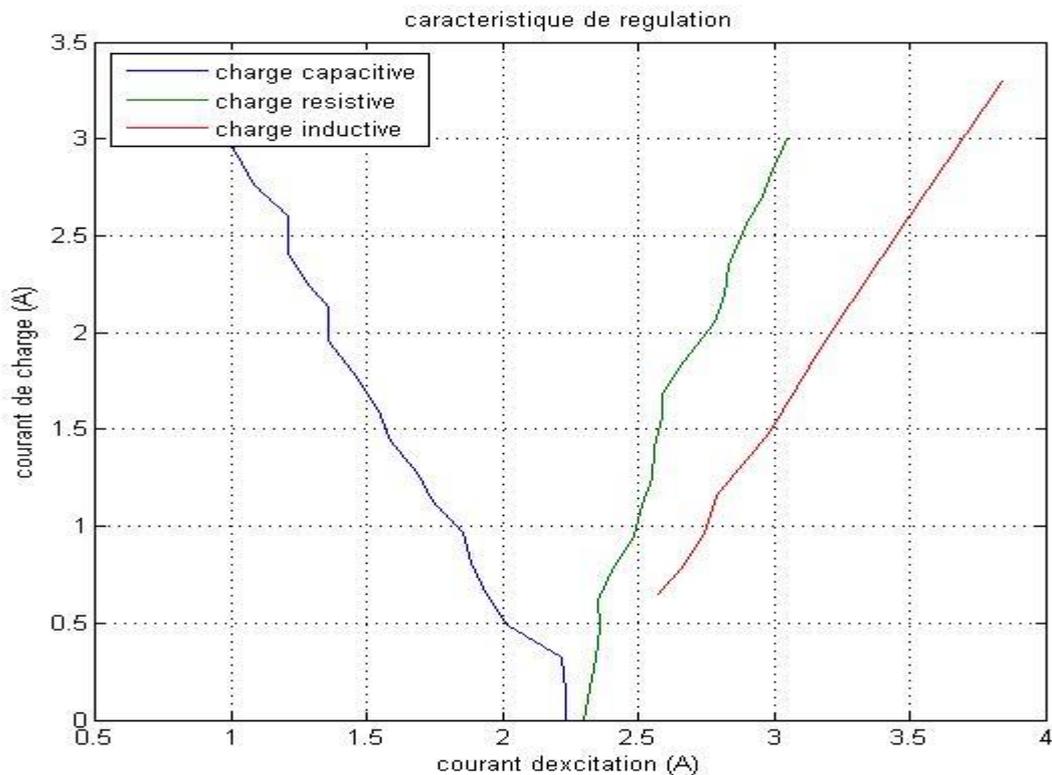


Figure 2-9 : caractéristique de régulation pour les charges (résistive, capacitive et inductive).

### **Interprétation des résultats**

#### **a- Sur charge Résistive**

Ces courbes nous montrent que pour maintenir une tension d'exploitation constante, nous devons ajuster pour chaque variation de charge la valeur du courant d'excitation. Cette variation sera donc d'autant plus importante que la somme des différentes chutes de tension sera élevée. Nous devons donc créer plus de FEM afin de récupérer la chute de tension ohmique, la chute de tension due à la FCEM et la chute de tension due à la réaction d'induit. Comme toutes ces chutes de tension vont dans le sens de réduire la FEM, nous pouvons vérifier que nous devons toujours augmenter le courant d'excitation. Les deux premiers types de chute de tension étant proportionnelle, nous aurions pour ces dernières une augmentation proportionnelle de l'excitation en fonction du courant de charge.

Pour ce qui est de l'influence de la réaction d'induit qui dans ce cas est transversale, la variation du courant d'excitation n'est pas proportionnelle avec la charge. La somme des FEM supplémentaires ne nous donne donc pas une droite mais une courbe dont voyons l'image sur notre courbe dans l'évolution du courant d'excitation voir figure 2-9.

### **b- Sur charge inductive**

L'allure de cette courbe est du même type que pour la charge résistive si ce n'est que l'augmentation du courant d'excitation doit être plus importante pour chaque pallier de charge. Nous savons déjà que les chutes de tension ohmique et les chutes due à la FCEM sont similaires et proportionnelles. Rien jusque là ne justifie une telle différence dans les courbes. Si nous tenons compte de la réaction d'induit, nous parvenons à justifier que pour une charge selfique elle est du type longitudinale démagnétisant, ce qui sous entend que plus on charge et plus on détruit le flux rotorique qui bien évidemment se répercute sur la FEM. On doit donc compenser une chute de tension plus forte en augmentant pour de même pallier de charge beaucoup plus le courant d'excitation.

### **c- Sur charge capacitive**

Dans ce cas, nous devons au vu de la courbe non plus augmenter le courant d'excitation mais le diminuer durant un certain pallier de charge. Ce phénomène est lui aussi lié à la réaction d'induit, car on n'oublie pas que dans ce cas il s'agit du type longitudinal magnétisant. Nous avons donc augmentation du flux rotorique en fonction de la charge jusqu'à la saturation du circuit magnétique. Cette augmentation nous laisse apparaître une augmentation de la FEM qui se traduit par une tension d'exploitation trop élevée que l'on doit réduire en diminuant l'excitation. Une fois la saturation atteinte, les deux autres chutes de tension prennent le dessus et nous avons une diminution de la tension d'exploitation que nous devons compenser en augmentant cette fois ci le courant d'excitation.

### **Le diagramme de FRESNEL**

Ce diagramme permet de mettre sur un même graphe l'ensemble des caractéristiques de la machine synchrone. Nous prendrons comme hypothèse que le circuit magnétique de l'alternateur n'est pas saturé. Selon cette hypothèse, nous pouvons dire que le flux est proportionnel au courant qui le produit. Dans la même idée, on peut conclure que l'allure de la tension d'exploitation est sinusoïdale, l'équation nous exprime que le courant et le flux sont en phase puisque les autres termes sont des constantes liées aux caractéristiques constitutives de la machine.

Comme le flux inducteur engendre au sein des enroulements du stator une FEM :

$$E = 2,22.N.f.\phi_M \cdot \sin(\omega.t - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

On déduit que cette dernière est déphasée de 90° en arrière sur le flux. Aussi on sait que de part sa constitution, la machine est inductive ce qui nous permet de placer le courant statorique en arrière sur la FEM. Rappelons que la réactance de l'impédance n'est pas négligeable. Comme ce courant en traversant les enroulements statoriques, il induit un flux statorique, ce dernier flux sera

## Chapitre 2 : Etude expérimental et essais de la machine synchrone

donc comme le montre l'équation en phase avec son courant. Ce flux ainsi créé va en vertu de la loi de LENZ s'opposé à ce qui lui à donné naissance et va donc créer une FCEM d'équation :

$$E' = 2,22.N.f.\phi .\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (2-1)$$

Cette équation nous donne le déphasage entre la FCEM et le flux statorique soit  $90^\circ$  en arrière. On peut donc déduire la tension d'exploitation en réalisant la somme vectorielle de la FEM et de la FCEM.

Le diagramme vectoriel dans la figure 2-10 ci-dessous illustre l'ensemble de ces données.

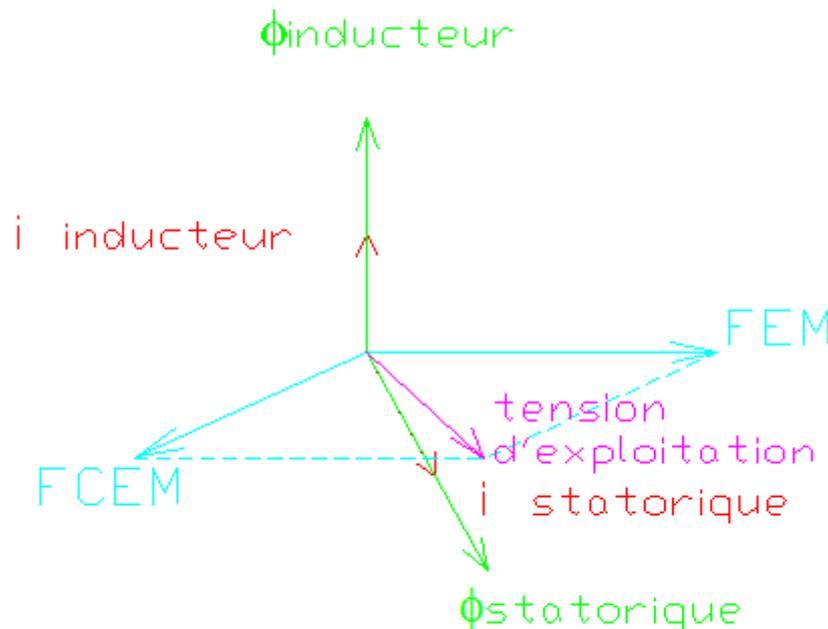


Figure 2-10 : digramme de FRENSEL [15].

### II – 7 Etude du moteur synchrone

#### Les courbes en v (Mordey)

Dans cet essai on va maintenir la vitesse de rotation constante, le couple moteur constant, et on fait varier le courant d'excitation de la machine, Cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution du courant absorbé « I » en fonction du courant d'excitation ( $I=f(i)$ ).

NB : pour cet essai nous avons changé de type de machine à cause des problèmes techniques rencontré avec la machine principale, et nous avons réalisé ces essais pour comprendre les phénomènes liés au changement du courant d'excitation pour le fonctionnement moteur de la machine



Figure 2-11 : moteur synchrone pour les essais des courbes de Mordey.

### Procédure du teste

- ✓ Câbler la machine en fonction du schéma du câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- ✓ Vérifier que tous les organes de variation de tensions sont en position minimale.
- ✓ Alimenter l'induit de la machine synchrone, en suite on augmente la tension d'induit graduellement jusqu'au obtenir une vitesse de rotation presque égale à 1500 tr/min jusqu'au accrochage du moteur.
- ✓ A l'aide d'une alimentation DC variable de 0VDC à 250VDC, on alimente l'inducteur de la machine synchrone (la roue polaire) et par pallier constant, on modifie le courant d'excitation et on relève le courant absorbé.
- ✓ On fait ensuite la même manipulation pour différent moment :  $0.25 M_{nom}$  ,  $0.50 M_{nom}$  ,  $0.75M_{nom}$ ,  $1 M_{nom}$  et  $1.25 M_{nom}$ .

### Résultats expérimentaux :

Le tableau ci-après nous donnera les résultats obtenu à partir de l'essai :

0.25*M <sub>nom</sub>	Limite de stabilité	Sous-excité					Cos (phi)=1	Sur-excité				
		0.20	0.30	0.35	0.45	/		0.51	0.55	0.60	0.65	0.70
I <sub>exci</sub>	0.15	0.20	0.30	0.35	0.45	/	0.51	0.55	0.60	0.65	0.70	0.80
IL	0.35	0.30	0.24	0.22	0.20	/	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.27

0.5*M <sub>nom</sub>	Limite de stabilité	Sous-excité					Cos (phi)=1	Sur-excité				
		0.35	0.40	0.45	0.50	/		0.56	0.60	0.65	0.70	0.75
I <sub>exci</sub>	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	/	0.56	0.60	0.65	0.70	0.75	/
IL	0.40	0.36	0.32	0.30	0.29	/	0.29	0.30	0.32	0.34	0.36	/

## Chapitre 2 : Etude expérimental et essais de la machine synchrone

$0.75 \cdot M_{nom}$	Limite de stabilité	Sous-excité					Cos (phi)=1	Sur-excité				
$I_{exci}$	0.44	0.50	0.55	0.60	/	/	0.62	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
IL	0.48	0.44	0.42	0.40	/	/	0.40	0.41	0.41	0.44	0.46	0.49

$M_{nom}$	Limite de stabilité	Sous-excité					Cos (phi)=1	Sur-excité				
$I_{exci}$	0.61	0.65	0.70	/	/	/	0.72	0.75	0.80	0.85	0.90	0.96
IL	0.50	0.49	0.50	/	/	/	0.51	0.51	0.52	0.53	0.55	0.56

$1.25 \cdot M_{nom}$	Limite de stabilité	Sous-excité					Cos (phi)=1	Sur-excité				
$I_{exci}$	0.75	0.78	0.81	/	/	/	0.83	0.90	0.95	0.97	0.94	/
IL	0.67	0.65	0.65	/	/	/	0.64	0.66	0.67	0.68	0.68	/

Le tableau 2-8

Courbes : à partir du tableau N°09 on peut tracer les courbes suivantes :

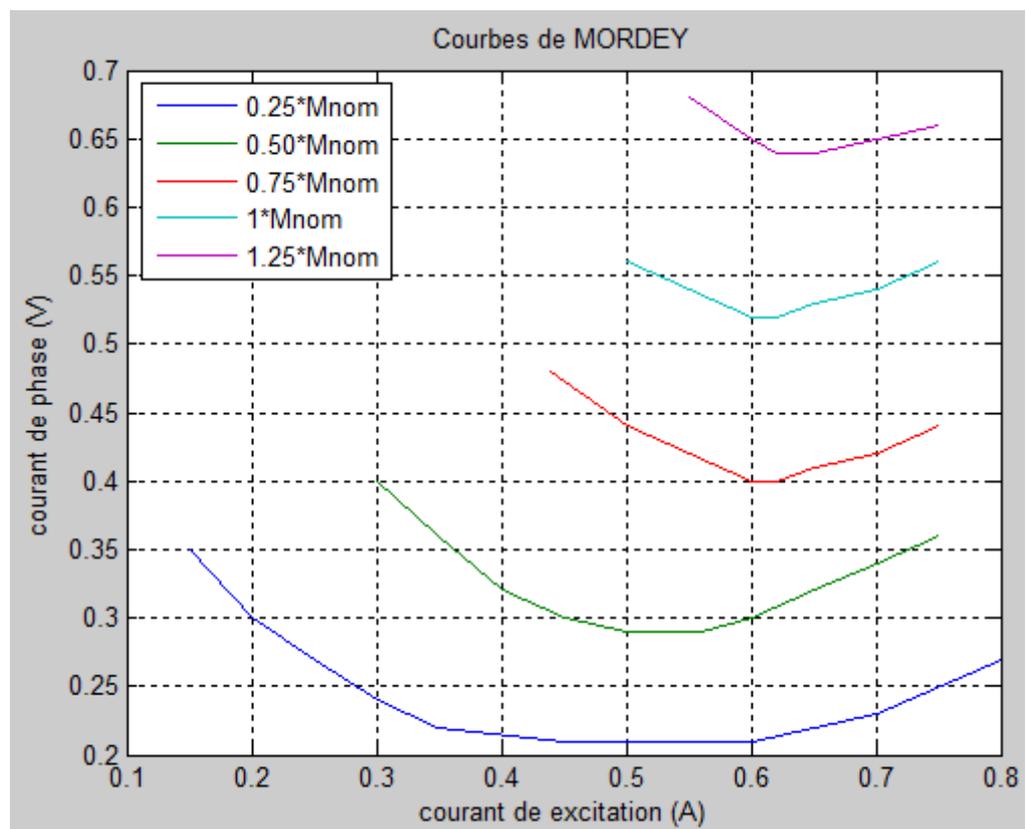


Figure 2-12 : courbes de Mordey

### Interprétation des résultats :

Nous remarquons une allure très particulière de cette courbe. En effet, lorsque l'on augmente le courant d'excitation, le courant absorbé décroît dans un premier temps pour passer par une valeur minimum et ensuite remonter. Nous savons que ces courbes sont réalisées sur charge constante et que dès lors la puissance active demandée au réseau reste également constante. On peut donc déduire que la variation du courant d'excitation entraîne une variation du courant réactif absorbé au réseau. Analysons ce qui se passe. Nous avons commencé notre essai avec le rhéostat au maximum de sa résistance ce qui sous-entend que le courant d'excitation est minimum et que donc le flux rotorique l'est aussi. on peut donc dire également que le décalage entre le flux rotorique et le flux statorique est maximum pour cette charge. Si cette angle est maximum, cela veut dire que nous avons une réaction d'induit très importante et que donc la FCEM est faible exigeant un appel de courant très important. Nous visualisons très bien ce premier point sur le graphe. Etant donné que la puissance active est constante, on peut dire que le courant actif l'est également. Si on augmente le courant d'excitation, on diminue l'angle entre les deux flux puisque pour un même couple résistant, si l'une des forces augmente, le bras de levier peut devenir plus faible. Cette diminution de l'angle entraîne une déformation moins importante du flux rotorique d'où une augmentation de la FCEM et une diminution du courant absorbé. Comme la composante active de ce courant n'a pas changé pour une charge constante, on peut dire que seul la composante réactive a changé et que l'angle de ce courant total absorbé par rapport à la tension à lui aussi diminué.

Visualisons sur la figure 2-13 ci-dessous cette situation :

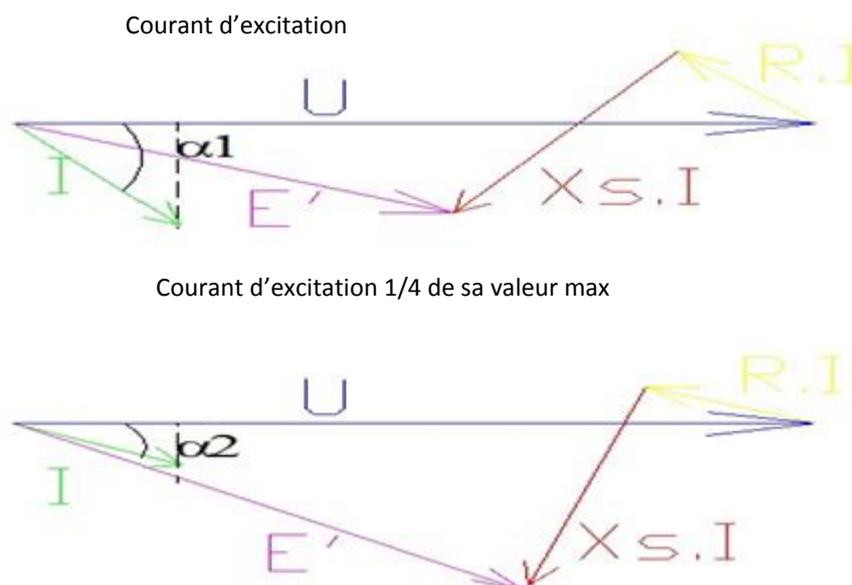


Figure 2-13 : le courant d'excitation [15].

## Chapitre 2 : Etude expérimental et essais de la machine synchrone

Si nous continuons à augmenter le courant d'excitation, nous pouvons voir que nous allons trouver un courant absorbé purement actif et de même valeur puisque la charge n'a pas changée. Nous avons dès lors le courant en phase avec la tension du réseau comme l'indique la figure 2-14. La réaction d'induit est alors purement transversale et ce passage à permis de diminuer la déformation, donc d'augmenter encore la FCEM et donc une diminution de  $I$ .

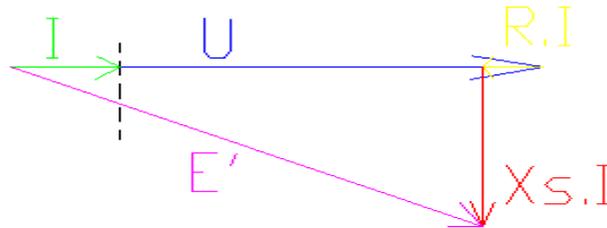


Figure 2-14 : la réaction d'induit [15]

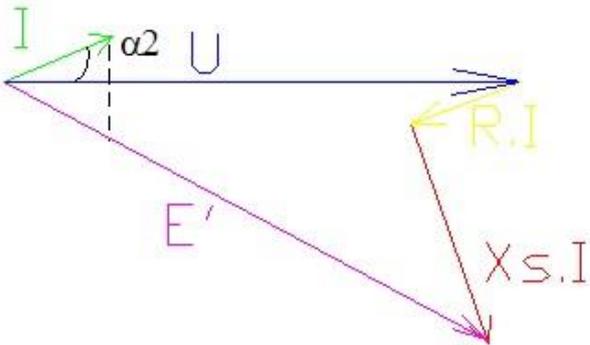
Que se passe t-il si nous continuons à augmenter le courant d'excitation, nous allons encore augmenter la valeur du champ rotorique qui va permettre de faire passer le champ rotorique devant le champ statorique. Cela sous-entend que nous avons apparition de réaction d'induit longitudinale magnétisante et que cette dernière va amplifier le flux rotorique ce qui aura pour conséquence d'augmenter la FCEM et donc de modifier le courant absorbé.

Nous savons que quel que soit la valeur que le courant absorbé va prendre, la composante active devra toujours avoir la même valeur puisque notre charge n'a pas variée. Voyons sur la figure 2-15 ci-dessous ce que devient le courant.

Nous voyons que le courant absorbé augmente à nouveau, avec une composante réactive du type capacitif et non plus inductive. Cela veut dire que notre moteur ne consomme plus que de la puissance active, la puissance réactive elle est fournie par notre moteur au réseau. Ce type de fonctionnement est utilisé dans certaine grosse installation afin d'améliorer le facteur de puissance globale. Donc si nous appliquons le maximum de courant d'excitation, la FCEM continue à augmenter entraînant une augmentation du courant absorbé et une augmentation de production de puissance réactive. La machine lorsqu'elle est surexcitée fonctionne en compensateur synchrone.

Chapitre 2 : Etude expérimental et essais de la machine synchrone

courant d'excitation  
3/4 de sa valeur Max



courant d'excitation  
maximum

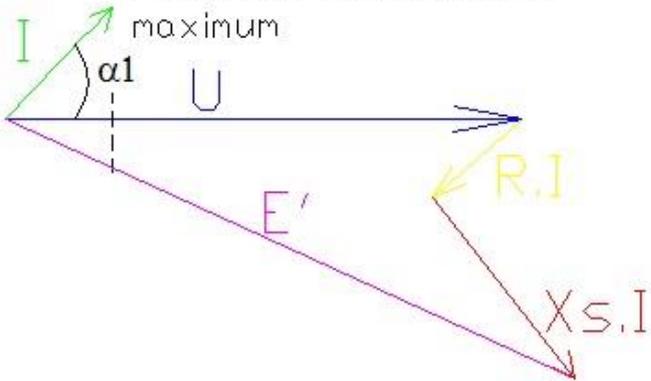


Figure 2-15 : Moteur en sur excité [15]

### **II-8 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'expliquer à travers des essais expérimentaux les différents phénomènes du champ magnétique se passant à l'intérieur d'une machine synchrone dans ses deux principaux modes de fonctionnement.

Dans un premier lieu le fonctionnement générateur de la machine synchrone nous a permis d'étudier son comportement à travers ses caractéristiques internes (fonctionnement à vide et en court-circuit permanent à tension réduite), en suite selon ses caractéristiques externes (dans différents modes de charge, et sa caractéristique de régulation).

Dans un second lieu nous avons abordé les essais expérimentaux du moteur synchrone, et nous avons expliqué les différentes interactions entre le champ magnétique statorique et celui du rotor dans différents modes de charges et d'excitation à travers les courbes de Mordey (vé) et nous avons présenté son meilleur point de fonctionnement, aussi nous avons présenté le phénomène du générateur de l'énergie réactive (le compensateur synchrone) dans un moteur synchrone pour améliorer le facteur de puissance du réseau qu'il l'alimente.

Finalement, les essais effectués dans ce chapitre et leurs résultats vont nous servir dans notre prochain chapitre pour la détermination des paramètres en régime permanent équilibré de notre machine synchrone pour pouvoir établir son modèle puis le simuler sur le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK.

# Chapitre 3 :

## Mesure des paramètres de la machine synchrone & simulation

### **III-1 Introduction**

L'objectif principal de ce chapitre est de rechercher la réactance synchrone directe en régime permanent ainsi que la chute de tension due à la réaction d'induit (réactance de Poitier) de la machine synchrone testée, ainsi que d'autres paramètres nécessaires à la simulation d'une machine synchrone simplifiée avec MATLAB/SIMULINK.

Il existe deux types de paramètres d'une machine synchrone :

Des paramètres du régime transitoire qui sont liés principalement au fonctionnement transitoire lors d'un démarrage, arrêt ou défaut d'une machine synchrone. Ces paramètres nécessitent des essais spéciaux avec un banc d'essais qui n'est pas disponible pour le moment au niveau du laboratoire de recherche en électrotechnique de notre université, ces dites paramètres ne font pas objet de notre mémoire.

Des paramètres du régime permanent qui décrivent le fonctionnement de la machine dans un régime permanent, stable et nominal, la plus part du cycle de vie d'une machine synchrone 98%, ces paramètres vont être présentés, ensuite calculés pour notre machine déjà présenté dans le chapitre N°2.

Dans un premier volet de ce chapitre, nous allons déterminer les paramètres synchrones de fonctionnement en régime équilibré, et dans un second lieu nous allons utiliser les paramètres déjà calculés dans le logiciel MATLAB/SIMULINK pour la simulation de quelques caractéristiques de fonctionnement de la machine synchrone.

### **III-2 Définition des paramètres usuels d'une machine synchrone**

#### **III-2.1 Réactance synchrone longitudinale « $x_d$ »**

Quotient de la valeur en régime établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux longitudinale total due au courant d'induit longitudinal, par la valeur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée.

La réactance synchrone longitudinale  $x_d$  correspondant à l'état non saturé est déterminée en partant de la caractéristique de saturation à vide et de la caractéristique en court-circuit triphasé permanent [15].

#### **III-2.2 Rapport de court-circuit « $k_c$ »**

Le rapport de court-circuit est le rapport du courant d'excitation pour la tension assignée de l'induit à vide au courant d'excitation pour le courant assigné d'induit en court-circuit triphasé permanent, la machine tournant à sa vitesse assignée.

Le rapport de court-circuit est déterminé en partant de la caractéristique de saturation à vide [15].

#### **III-2.3 Réactance synchrone transversale « $x_q$ »**

Quotient de la valeur en régime établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux transversal total due au courant d'induit transversal, par la valeur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée [15].

#### **III-2.4 Réactance de potier « $x_p$ »**

Réactance de fuite équivalente utilisée à la place de la réactance de fuite d'induit pour déterminer l'excitation en charge par la méthode de Potier. Elle tient compte de la fuite supplémentaire de l'enroulement d'excitation en charge dans la zone de fonctionnement en surexcitation et elle est de ce fait plus élevée que la valeur effective de la réactance de fuite de l'induit [15].

#### **III-2.5 Résistance en courant continu de l'induit et de l'enroulement « $R_a$ » et**

#### **« $R_f$ »**

La résistance en courant continu d'un enroulement est mesurée au moyen de la méthode du voltmètre et ampèremètre [15].

### III-3 Présentation de la machine synchrone étudiée



Figure 3-1 : La plaque signalétique de la machine synchrone utilisée

La machine est à pôle saillant avec deux paires de pôles, avec des amortisseurs LEBLANC.

#### En mode alternateur

$P_n=1500W$ ,  $V_{nomL-L}=400 V$  à  $1500tr/min$ ,  $I_{nom}=2.2A$ , Roue polaire  $V_{nom}=56V_{cc}$ ,  $I_{nom}=2.9A$ .

#### En mode moteur

$P_n=1500W$ ,  $V_{nomL-L}=400V$  à  $1500tr/min$ ,  $I_{nom}=4.6A$ ,  $\cos(\phi)=0.68$ , Roue polaire  $V_{nom}=13V_{cc}$ ,  $I_{nom}=0.6A$ .

NB : tous les paramètres de la plaque signalétiques, sont des paramètres de base, qui vont nous servir pour calculer les paramètres nécessaires en Per Unit (p.u)

### III-4 Calcul de l'impédance de base

$$Z_b = \frac{v_b}{\sqrt{3} \cdot I_b} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 2.2} = 104.97\Omega \quad (3)$$

On définit la réactance en p.u :

$$X_{pu} = \frac{X}{Z_b} p.u \quad (3-1)$$

### III-5 Mesure de la résistance statorique « $R_a$ » et la résistance du bobinage

#### inducteur « $R_f$ »

On mesure la tension et l'intensité tout en appliquant une tension continue aux bornes de deux bobines statorique, donc la résistance par phase devienne :

$$R_a = \frac{U_{mesuré}}{2 \cdot I} = \frac{9.66}{2 \cdot 1} = 4.8 \text{ en p.u} \quad R_{a pu} = \frac{R_a}{Z_b} = \frac{4.83}{104.97} = 0.046 p.u \quad (3-2)$$

$$R_f = \frac{U_{mesuré}}{I} = \frac{20.49}{1} = 20.49 \Omega \text{ en p.u} \quad R_f = \frac{R_f}{Z_b} = \frac{20.49}{104.97} = 0.195 p.u \quad (3-3)$$

**III-6 Calcul de l'impédance directe saturée  $Z_{d, sat}$  de la machine**

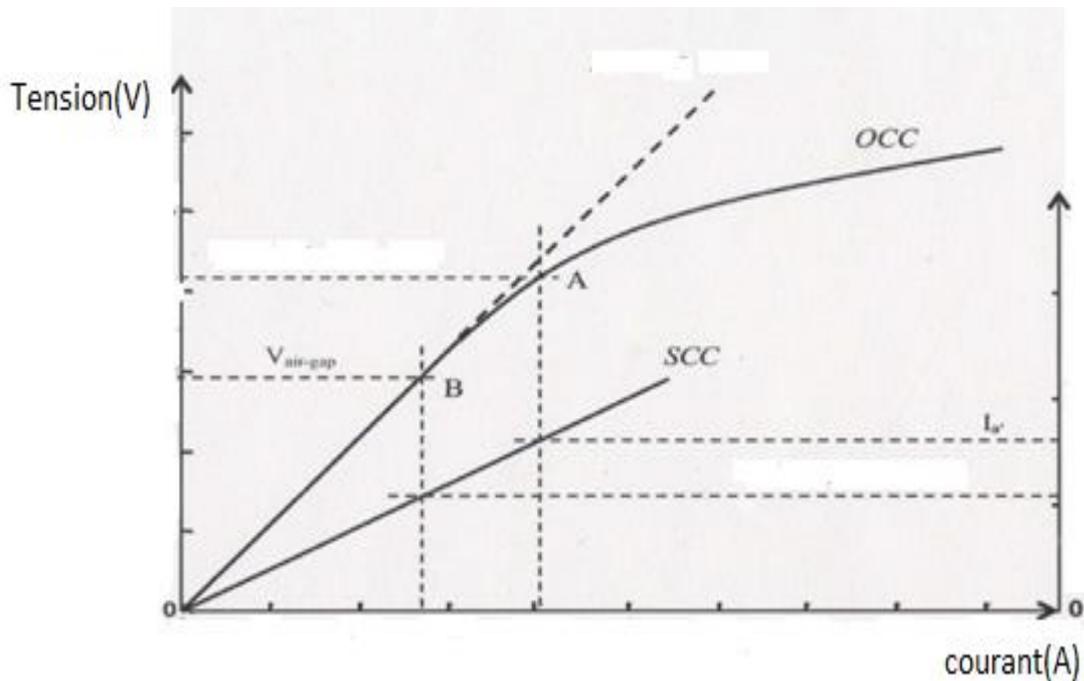


Figure 3-2 : Méthode graphique CEI-60034-4 [15].

A partir des deux caractéristiques –voir figure 3-2 - à vide et en CC permanent déjà effectué dans le chapitre N°2 de notre thèse :

$$Z_{dsat} = \frac{\text{la tension nominale sur la caractéristique à vide}}{\sqrt{3} \cdot \text{le courant de CC qui correspond au courant inducteur à la tension nominale}}$$

D'après la caractéristique à vide, la tension nominale sur la caractéristique à vide avec le point A de la figure 3-2 :  $A = (V_{nom}=400V, I_{exc} = 2.25 A)$ ,

Pour trouver le courant de CC correspondant à 2.5A, on utilise la fonction POLYFIT ( $I_{exci}, I_{cc}, 1$ )

De MATLAB, qui nous donne un polynôme :

$$I_{cc} = 2.5786 \cdot I_{exci} + 0.0756 \text{ (A)}$$

Donc pour un courant d'excitation  $I_{exci} = 2.25A$  :

$$I_{cc} = 5.877 \text{ A}$$

Donc :

$$Z_{dsat} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 5.877} = 39.29\Omega \tag{3-4}$$

### **III-7 Calcul de la réactance synchrone directe saturée $X_{d\text{ sat}}$ de la machine**

$$X_{d\text{sat}} = \sqrt{Z_{d\text{-sat}}^2 - R_a^2} \quad (3-5)$$

$$X_{d\text{sat}} = \sqrt{39.29^2 - 4.83^2} = 58.703 \Omega \quad (3-6)$$

En p.u :

$$X_{d\text{sat}(pu)} = \frac{58.703}{104.97} = 0.559 \text{ p.u} \quad (3-7)$$

### **III-8 Calcul de la réactance synchrone directe non-saturée $X_{d\text{ nsat}}$ de la machine**

L'impédance synchrone directe non saturé de la machine peut être trouvé de la même façon que le paragraphe **III-7** de ce chapitre, mais on prenne un point de la ligne droite avant la saturation (point B) :

$$B = (V_{L-L}=300V, I_{\text{exci}}=1.3A),$$

Le courant  $I_{cc}$  qui correspond  $I_{cc}=3.488 \text{ A}$

$$Z_{d\text{nsat}} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 3.488} = 49.657 \Omega \quad (3-8)$$

$$X_{d\text{nsat}} = \sqrt{Z_{d\text{-nsat}}^2 - R_a^2} \quad (3-9)$$

$$X_{d\text{nsat}} = \sqrt{49.657^2 - 4.83^2} = 66.953 \Omega \quad (3-10)$$

En P.U :

$$X_{d\text{nsat}(pu)} = \frac{66.953}{104.97} = 0.637 \text{ p.u} \quad (3-11)$$

### **III-9 Calcul du rapport du court-circuit « kc »**

$$k_c = \frac{2.25}{0.93} = 2.419 \quad (3-12)$$

### **III-10 Calcul de la réactance de Poitier « $X_p$ »**

La réactance de Poitier est calculer selon le triangle de Poitier à l'aide de l'essai à vide plus l'essai à facteur de puissance nul comme l'indique la figure 3-3, les résultats de ces deux testes sont affichés sur la figure 3-4.

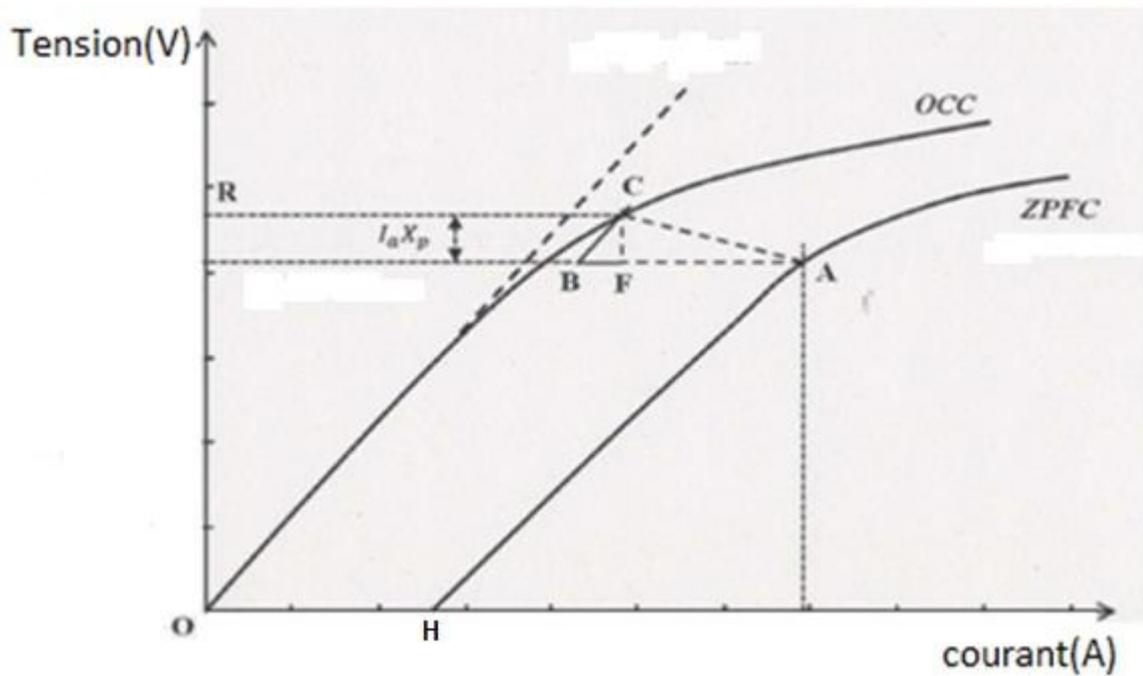


Figure 3-3 : Méthode du triangle de Poitier [15].

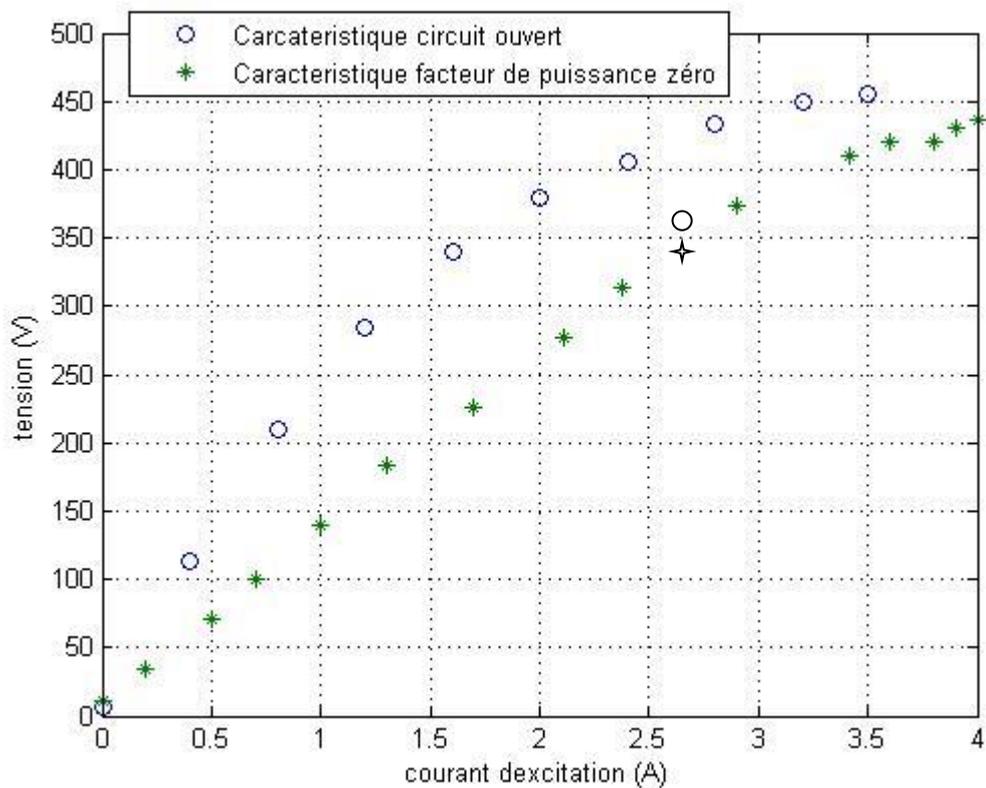


Figure 3-4 : Résultats des testes à vide et à facteur de puissance nul.

### La réactance de Poitier peut être calculée comme suit

- On affiche la caractéristique à vide et à facteur de puissance nul sur le même graph comme indiqué sur la figure 3.3.
- Le point A, dont l'ordonnée est la tension nominale, est déterminé sur la caractéristique de facteur de puissance nul.
- A gauche de A, une ligne horizontale BA est égale à OH est dessiné vers l'OCC. La longueur OH est égale au courant de champ correspondant à la tension de borne zéro sur le ZPFC. Ce courant de champ est également égal à celui nécessaire pour faire circuler le courant de stator évalué sous une condition de court-circuit soutenue.
- La ligne BC parallèle à la ligne d'entrefer est dessinée vers le haut à partir du point B. L'intersection de cette ligne avec le genou du point OCC est C.
- De C, une ligne perpendiculaire est dessinée vers le bas jusqu'à ce qu'elle croise la ligne BA, au point F. Le triangle AFC entre les deux courbes est connu sous le nom de triangle de Potier.
- Enfin, la jambe verticale CF du triangle du Potier représente la réactance de fuite ou réactance de Potier ( $I_a * X_p$ ) au courant nominal de l'armature. Ainsi, pour le générateur synchrone du pôle saillant de laboratoire.

Donc :

$$\frac{I_a * X_p}{\text{phase}} = \frac{20}{\sqrt{3}} = 11,547 \text{ V} \quad (3-13)$$

La réactance de Poitier égal la réactance de fuite du stator :

$$X_p = X_l = \frac{11.547}{2.2} = 5.249 \Omega \quad (3-14)$$

Et finalement la réactance de Poitier en  $P_U$  :

$$X_p = \frac{5.249}{104.97} = 0.05 \text{ pu} \quad (3-15)$$

### III-11 Présentation du logiciel SIMULINK de MATHWORKS

Le Toolbox Simulink est une fonction lancée depuis Matlab qui donne accès à une description graphique des problèmes avec application au traitement du signal, l'automatique classique, la logique floue, l'électronique, l'électrotechnique...etc.

La base est une description en schéma-bloc hiérarchique, chaque bloc étant une fonction décrite en langage Matlab ou à partir d'autres blocs. Pour l'utilisateur, la description et l'exécution de Matlab est transparente dans les problèmes usuels. Il ne se préoccupe que de la construction

graphique de son problème avec éventuellement la création de nouveaux blocs pour les problèmes avancés. La sauvegarde des applications Simulink est un fichier d'extension mdl [16].

### III-12 SimPowerSystems

C'est un outil au niveau de SIMULINK qui permet la modélisation des systèmes d'électrotechnique et d'électronique de puissance qui donne accès à une gamme très large des composants pour réaliser des simulations dynamique/permanente – Figure 3-5 SIMULINK avec SIMPOWERSYSTEMS – sous rubrique MACHINES[16].

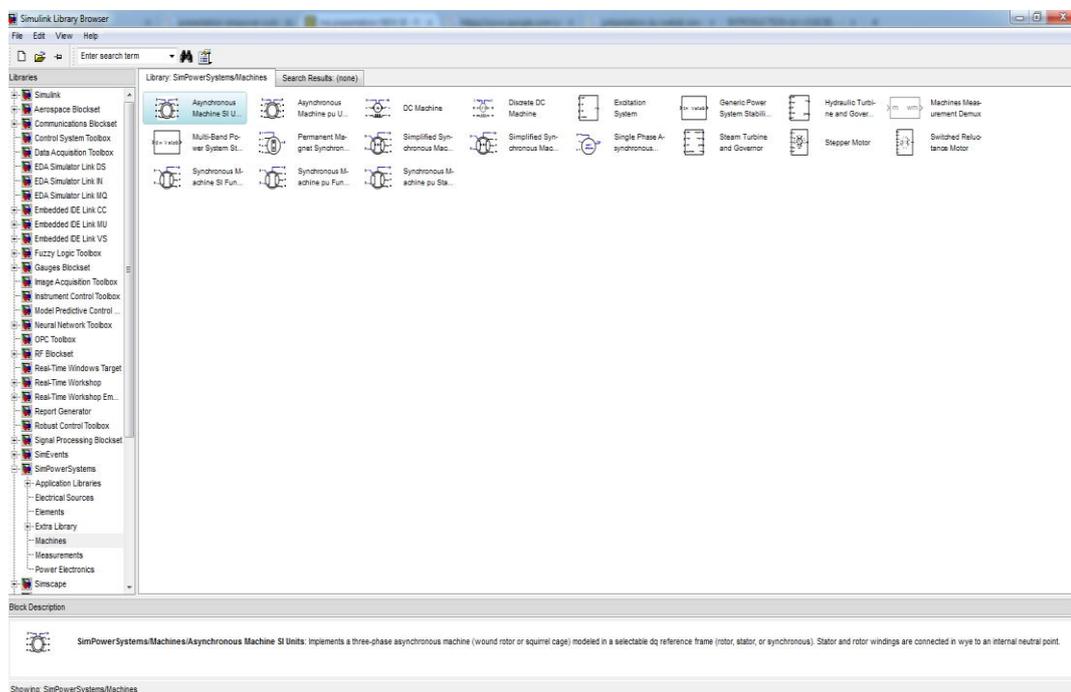


Figure 3-5: SIMULINK avec SIMPOWERSYSTEMS – sous rubrique MACHINES.

### III-13 Présentation d'une machine synchrone simplifiée sous SIMULINK

Dans la bibliothèque POWERLIB, on peut choisir entre les unités SI ou le p.u. Blocs de machines synchrones simplifiées pour spécifier les paramètres électriques et mécaniques du modèle [17].

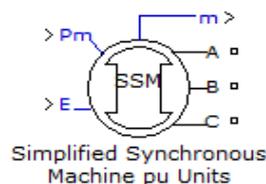


Figure 3-6 : la machine synchrone Dans SIMPOWERSYSTEMS

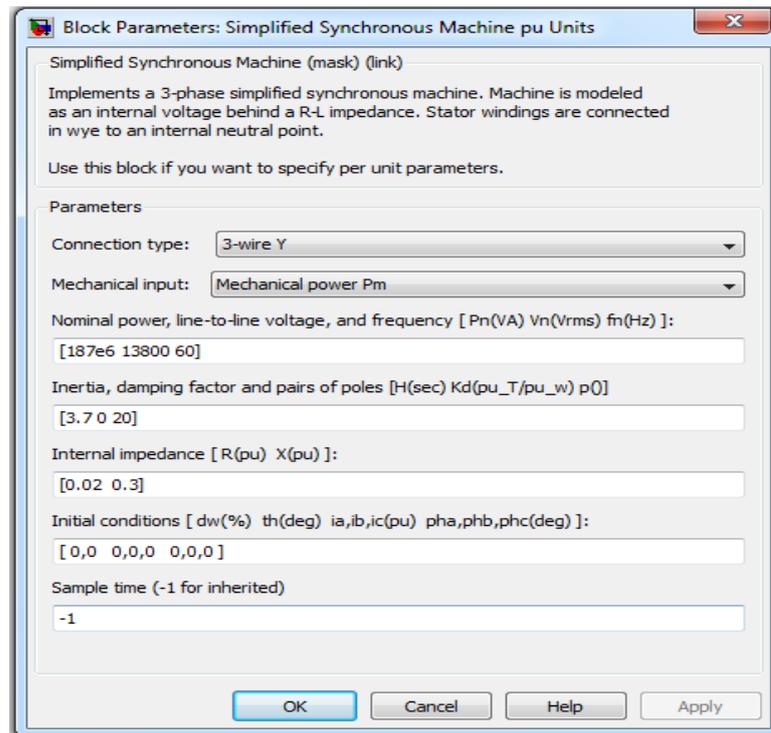


Figure 3-7 : Paramètres du block de la machine synchrone simplifié

### **III-13.1 Type de connexion**

Spécifiez le nombre de fils utilisés dans la connexion Y triphasé: soit à trois fils (neutre non accessible) soit à quatre fils (le neutre est accessible) [17].

### **III-13.2 Puissance nominale, tension L-L et fréquence**

La puissance nominale apparente  $P_n$  (VA), la fréquence  $f$  (Hz) et la tension ligne-ligne RMS  $V_n$  (V). Utilisé pour calculer le couple nominal et convertir les unités SI en p.u [17].

### **III-13.3 Inertie, facteur de frottement et nombre de paires de pôles**

L'inertie ( $J$  en  $\text{kg.m}^2$  ou  $H$  en secondes) facteur d'amortissement ( $K_d$ ) et le nombre de paires de pôles ( $p$ ). Le facteur d'amortissement doit être spécifié dans (p.u de couple) / (p.u. de vitesse) dans les deux boîtes de dialogue de la machine (en p.u et en SI) [17].

### **III-13.4 Impédance interne**

La résistance  $R$  ( $\Omega$  ou p.u.) et la réactance  $L$  ( $H$  ou  $X$  en Ohm ou PU) pour chaque phase [17].

### **III-14 Entrées et sorties**

La première entrée du bloc de la machine synchrone simplifiée est l'alimentation mécanique fournie à la machine. Cette entrée peut être une constante ou la sortie du bloc Hydraulic Turbine et Gouverner. La fréquence des sources de tension internes dépend de la vitesse mécanique de la machine. L'amplitude de ces tensions est donnée par la deuxième entrée du bloc, qui peut être

une constante ou la sortie d'un régulateur de tension. Si on utilise des unités SI, ces deux entrées devraient être en Watts et Volts entre phase RMS. Si on utilise des p.u. Les deux entrées devraient être en p.u [17].

### III-15 Simulations de l'essai à vide et en CC permanent sur SIMULINK

**Hypothèse :** le modèle de la machine synchrone simplifié ne tien pas compte de l'effet de la saturation magnétique du stator et le rotor, la simulation se déroule sur la droite « air-gap line » [17].

Saisie des paramètres calculés de la machine synchrone testée au laboratoire

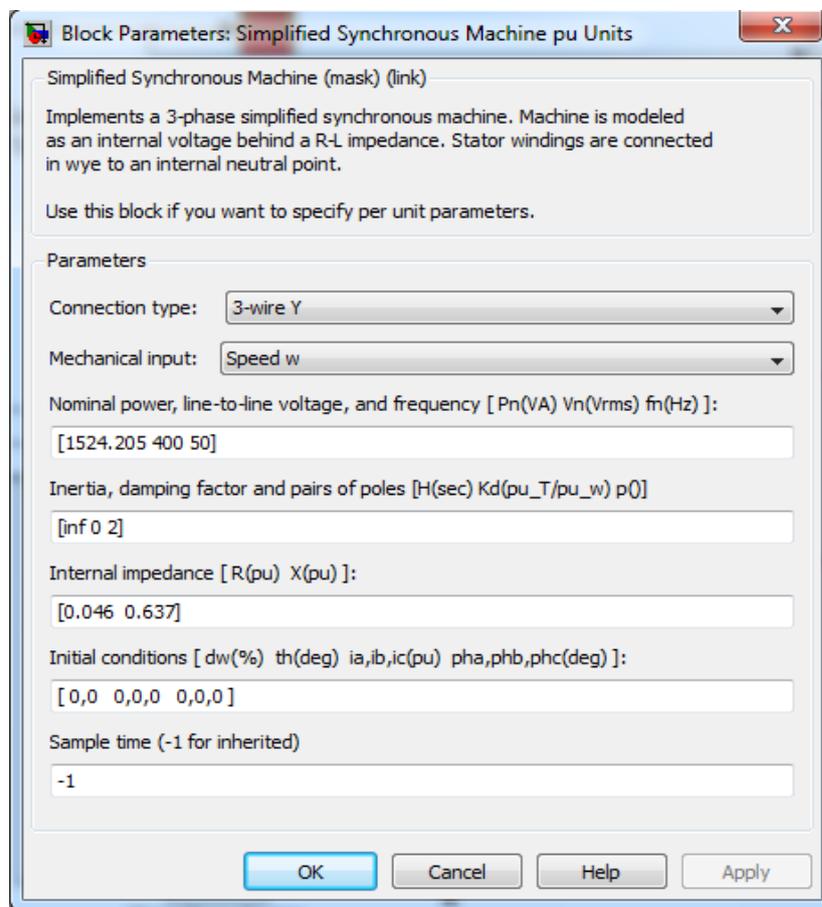


Figure 3-8: Saisie des paramètres calculés de la machine du laboratoire

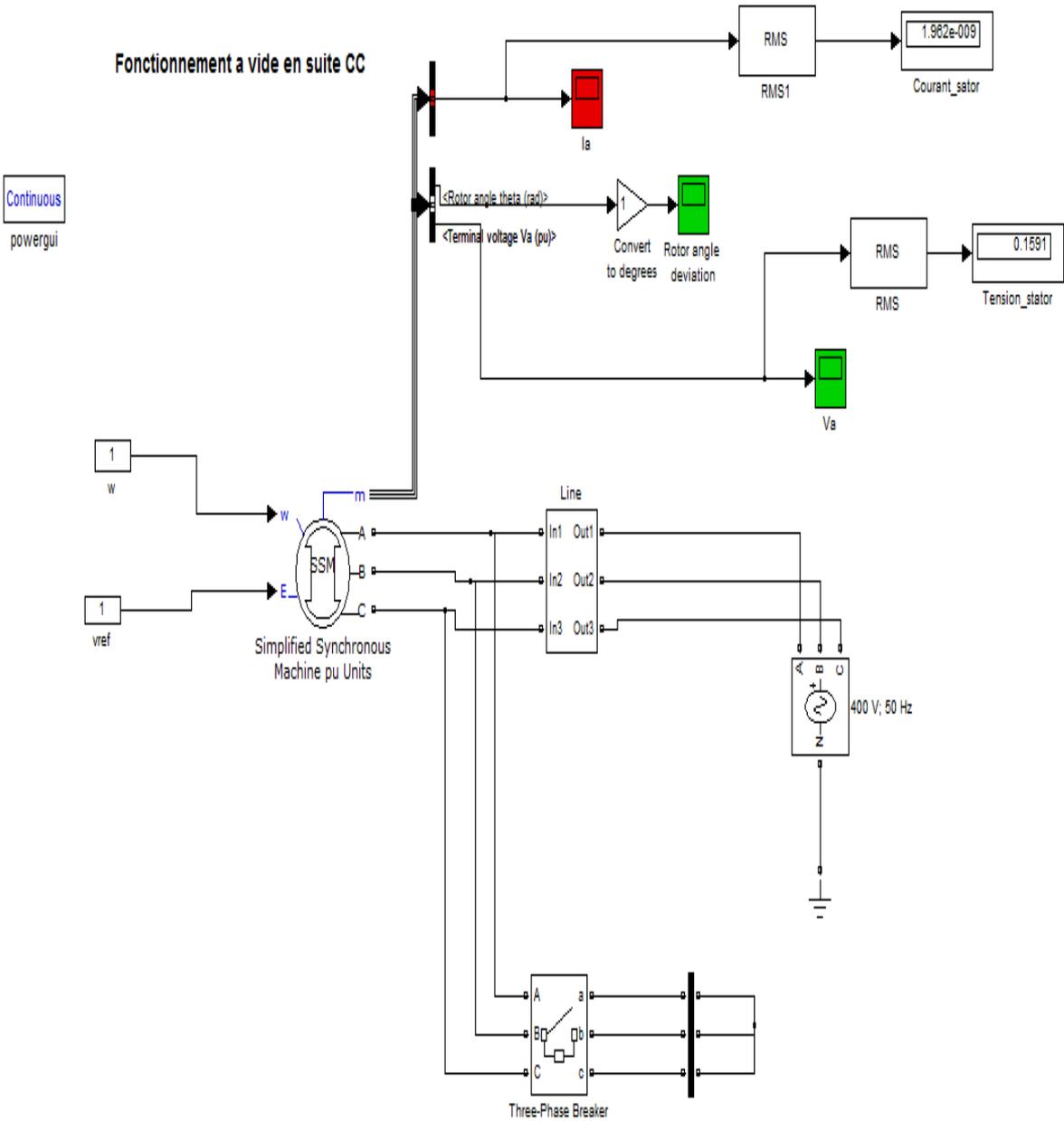


Figure 3-9 : Essais à vide et en court circuit.

**Résultat de l'essai à vide**

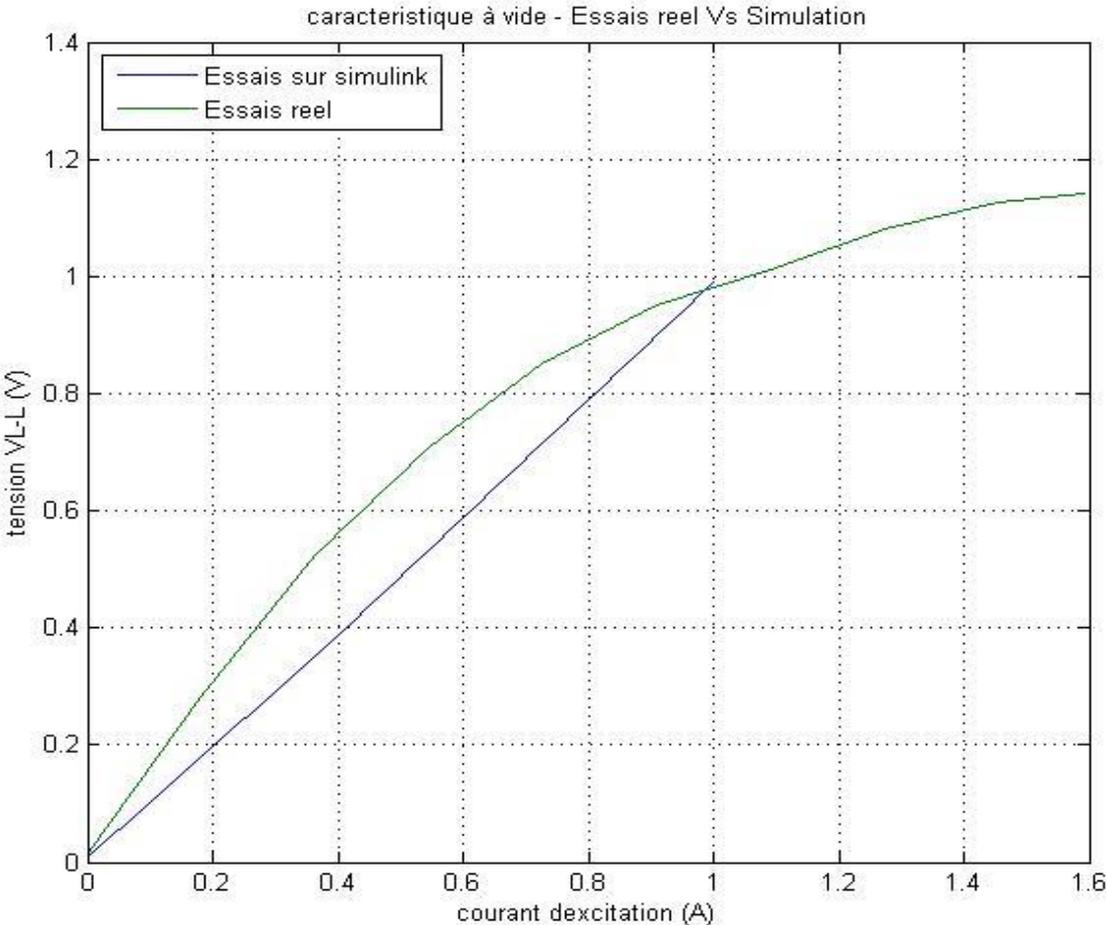


Figure 3-10: résultat essais à vide sur SIMULINK vs essai réel.

**Résultat de l'essai en CC permanent**

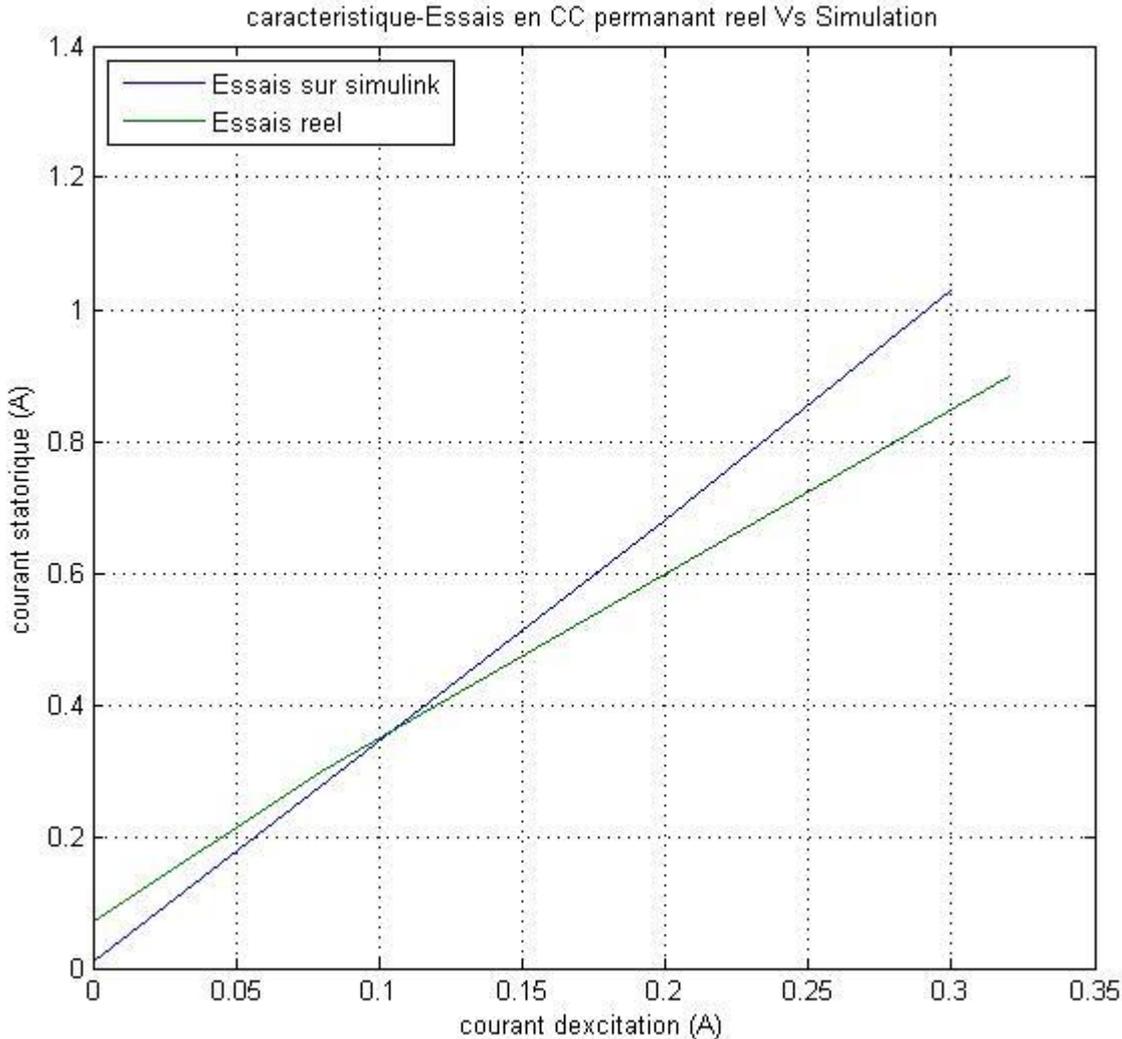


Figure 3-11: résultat essais en CC permanent sur SIMULINK vs essai réel.

**III-16 Simulations de l'essai en charge capacitive et résistive sur SIMULINK**

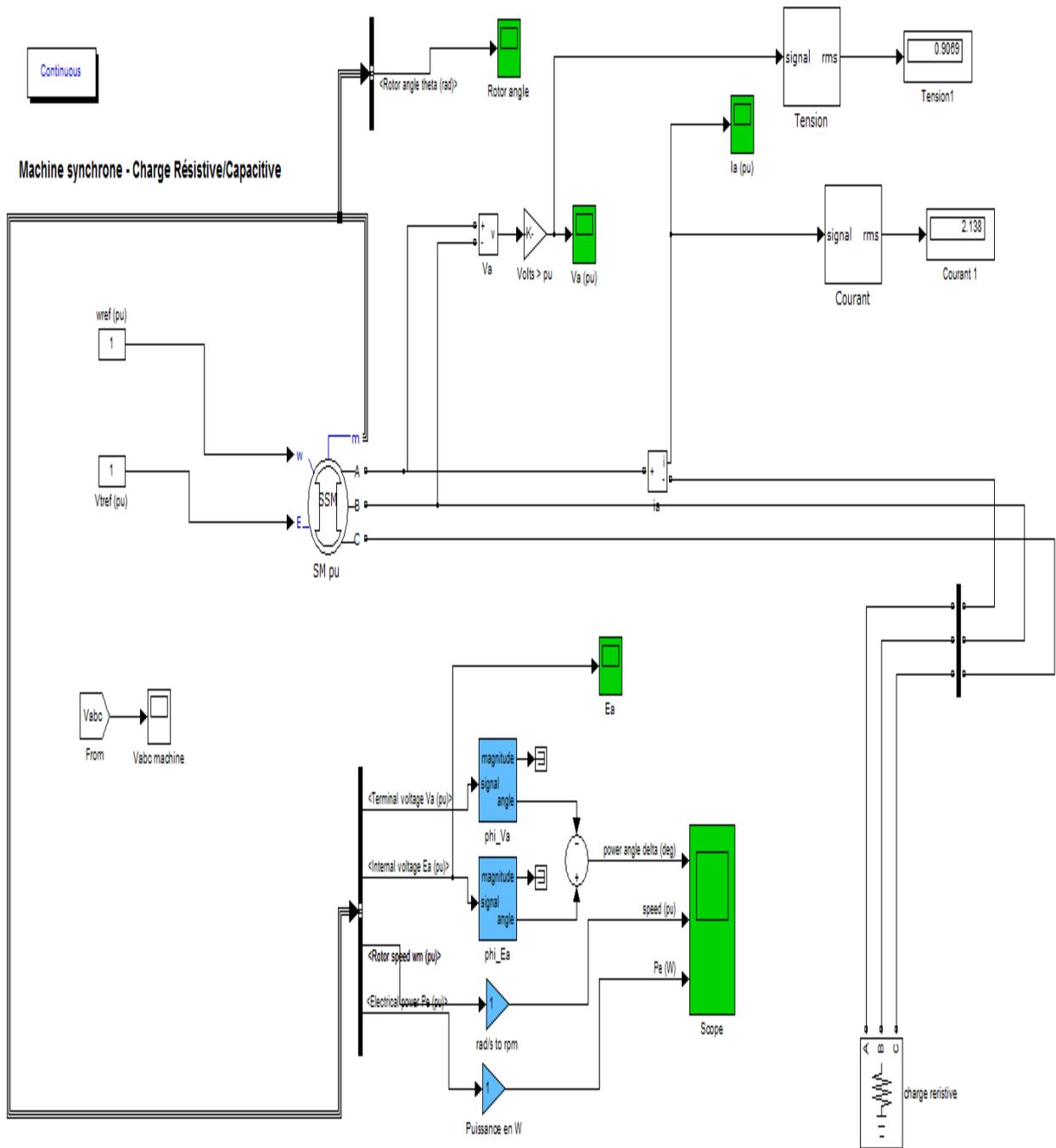


Figure 3-12 : Essais en charge capacitive et résistive

**Résultat de l'essai en charge**

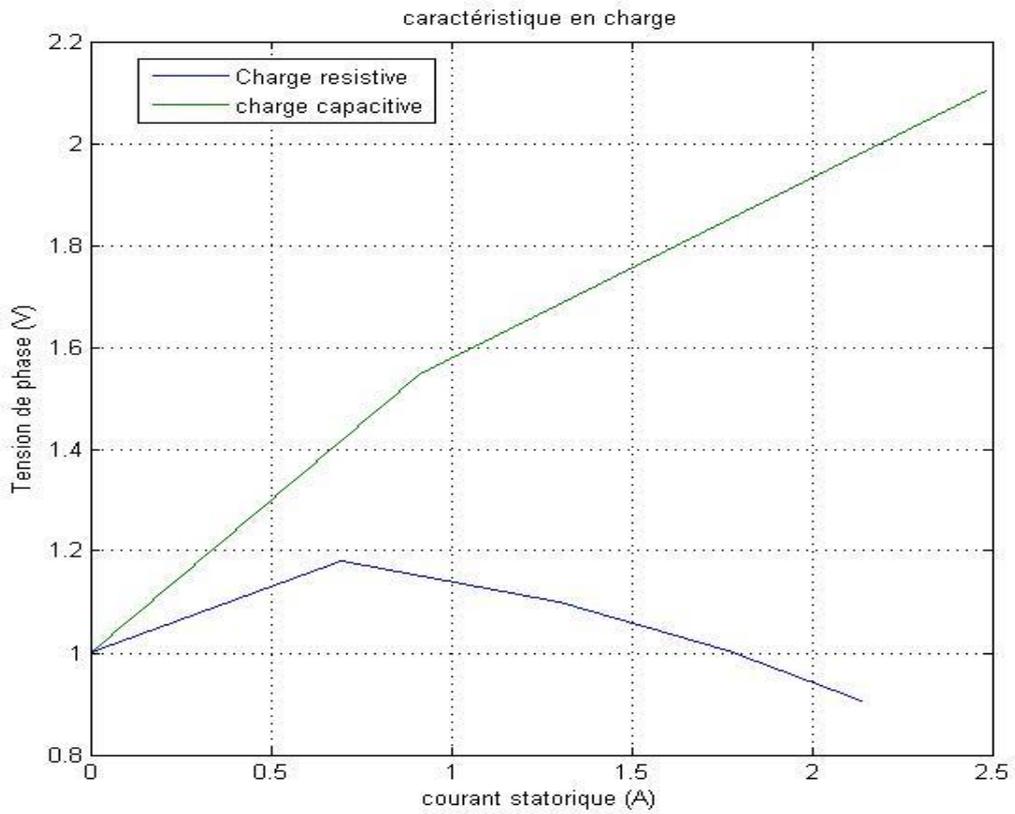


Figure 3-13 : Résultats de l'essai en charge

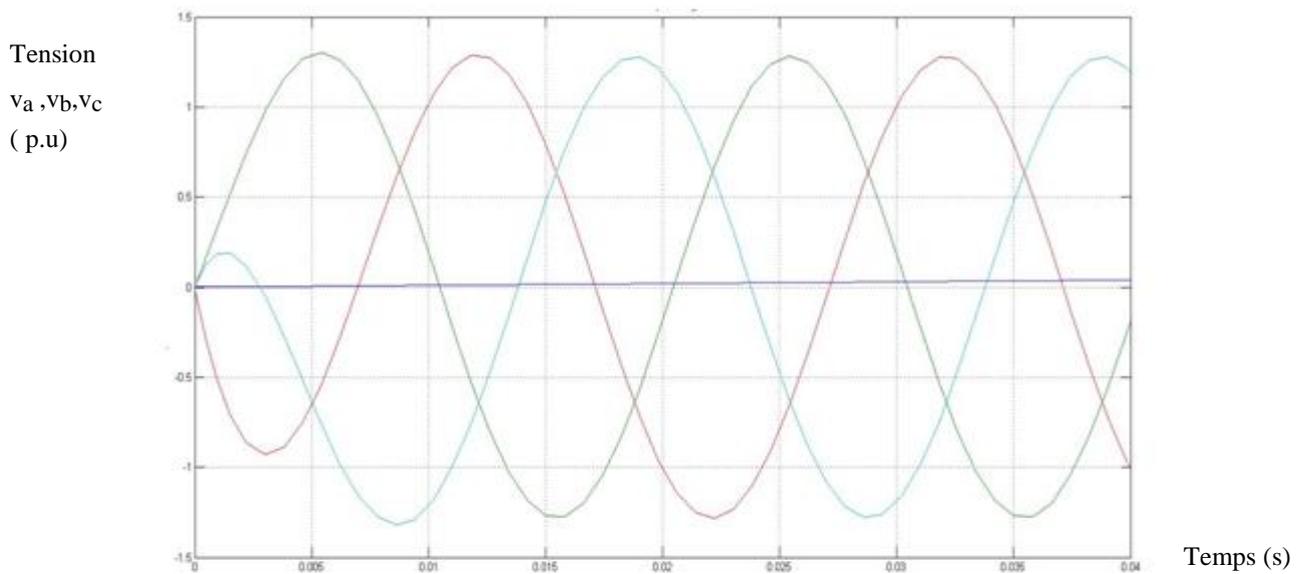


Figure 3-14: Allure des tensions statoriques  $V_{abc}$  (charge résistive).

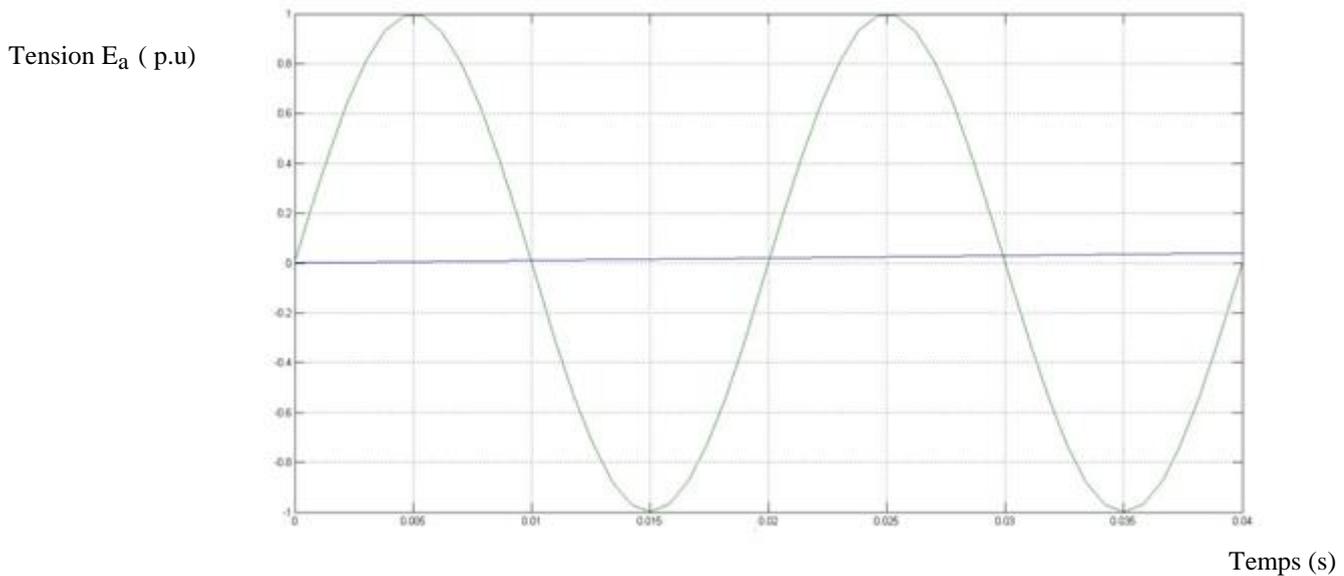


Figure 3-15 : Allure de la tension interne  $E_a$  (charge résistive).

### **III-17 Interprétation des résultats de simulation**

Dès la première vue, on remarque que les courbes ne coïncident pas suffisamment et c'est dû aux erreurs de prélèvement des mesures et la précision du matériel utilisé pour l'affichage des tensions et courants dans le chapitre N°2 de la partie expérimental ; Or que l'allure coïncide surtout au niveau de la partie linéaire (la non saturation) dans l'essai à vide.

Pour l'essai en court-circuit permanent les deux allures se rapprochent côté expérimental et simulation sauf quelques erreurs dues à la méthode graphique de détermination des paramètres (réactance de Poitier).

Pour l'essai en charge on remarque que les mêmes phénomènes étudiés dans la partie expérimentale se reproduisent dans la partie simulation.

### **III-18 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis dans un premier lieu le calcul des paramètres du régime permanent équilibré d'une machine synchrone avec les méthodes graphiques et expérimentaux présentés dans la norme CEI – 60034-4, en Per Unit, Nous avons pu déterminer la réactance synchrone, la réactance de Poitier ainsi que d'autres paramètres nécessaires pour pouvoir remplir le block des paramètres de la machine synchrone simplifiée sur le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK.

Dans le second volet de ce chapitre, nous avons simulé quelques essais de la machine synchrone utilisée pour pouvoir vérifier les résultats expérimentaux effectués dans le chapitre deux de ce mémoire, en plus de ça de valider les méthodes graphiques utilisées dans la norme CEI-60034-4 pour la détermination des paramètres d'une machine synchrone dans son régime synchrone équilibré.

### **III-19 Conclusion générale**

L'étude expérimental d'une machine synchrone s'avère très nécessaire surtout lorsqu'elle est acquise nouvellement dans un laboratoire de recherche, d'abord pour vérifier la qualité du produit acquis dans le cadre de recherche, en suite la vérification des paramètres et performance de cette machine qui est de sa construction réversible c.-à-d. en mode générateur et en mode moteur.

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous avons fait un rappelle des concepts fondamentaux d'une machine synchrone, en traitant le volet construction et le volet principe de fonctionnement.

Par contre, au niveau du second chapitre nous avons traité l'aspect expérimental de la machine en conduisant une série de teste selon des normes IEEE et CEI afin de pouvoir étudier chaque comportement et phénomène lié à un mode de fonctionnement quelque soit ce mode, aussi nous avons réalisé des types de testes spécifiques pour pouvoir utilisé ces résultats dans le chapitre N°3.

Dans le chapitre trois nous avons déterminé les paramètres en régime synchrone et équilibré de la machine synchrone en suite nous avons simulé quelque testes sur le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Pour faire suite aux paramètres et essais expérimentaux obtenus dans ce mémoire, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à une meilleur étude expérimental de la machine synchrone, c'est de réalisé le teste de court-circuit en régime nominal pour pouvoir extraire les paramètres du modèle du régime transitoire de la machine synchrone, afin d'étudier le régime transitoire de cette machine durant une perte brusque de charge, un ou des défauts à la terre...etc. cette étude permettra de bien régler les protections des générateur/moteur synchrone en ca de défaut.

## Bibliographia

---

- [01] <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/conversion-energie-Multon1.xml>.
- [02] [https://fr.wikisource.org/wiki/Machine\\_magn%C3%A9to-%C3%A9lectrique\\_de\\_Gramme](https://fr.wikisource.org/wiki/Machine_magn%C3%A9to-%C3%A9lectrique_de_Gramme)
- [03] Electrical Energy Systems - Mohamed E. El-Hawary, CRC PRESS – 2000.
- [04] Electric machinery –A.E FITZGERALD, McGrawHill 6<sup>th</sup> edition – 2003.
- [05] Turboalternateurs – techniques de l'ingénieur - D 3 530 – 15.
- [06] [http://www.industrial-electronics.com/elec4\\_20.html](http://www.industrial-electronics.com/elec4_20.html)
- [07] Machine synchrone excitatrice – techniques de l'ingénieur D 3 545 – 1.
- [08] Loss of excitation of synchronous generator - Vladimir Kristof, Marian Mester - VOL 68 (2017), NO1, 54–60
- [09] Analysis of synchronous machine – T.A LIPO – CRC PRESS 2ed edition, 2012.
- [10]. Les machines électriques – Edi. NATHAN TECHNIQUE – J NIARD, 1976
- [11] Alternating Current Machine MG SAY –PITMAN, 4<sup>th</sup> edition, 1978.
- [12] Electric Machinery Fundamentals 4th Edition (Stephen J Chapman) –McGrawHill – 2004.
- [13] P. C. Sen, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [14] Synchronous generators – ION BOLDEA – CRC Press Second edition -2016.
- [15] CEI 60034-4 « Méthode pour la détermination à partir d'essais des grandeurs des machines synchrone – 2eme édition de l'année 1985 ».
- [16] le site internet de MATLAB/SIMULINK [mathworks.com](http://mathworks.com)
- [17] Simpowersystems – For use with SIMULINK/HYDRO QUEBEQ Version 3 -2003.