

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**Modélisation de la machine synchrone en vue
d'améliorer ces performances**

Présenté par :

Dérigé par ;

Pr SALHI Mahmoud

- KHELLOUT Djilani
- MOUMEN SAAD Khaled
- HARZALLAH Nouredine

Devant le jury composé de :

2020-2021



Remerciements

*Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de m'avoir donné le courage et
.la patience durant toutes ces années d'études*

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur

Pr : SALHI MAHMOUD, Proffesseur à L'Université Echahid Hamma

Lakhdar d'El Oued , pour avoir dirigé ce travail.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour

l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé

*à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous a aidé de prés ou de loin à accomplir
ce travail.*

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur

soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

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

À vous.

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude des différents défauts qui peuvent affectés les machines électriques synchrones à courant alternatif lors de leur fonctionnement en vue de diagnostiquer leurs origines afin de pouvoir les localiser, et de prendre les mesures nécessaires afin de les éviter.

Pour se faire il faut connaitre à fond la constitution de ces machines électriques dont les moteurs synchrones , leurs constitutions, leurs spécifications et de définir les méthodes d'analyse de ces anomalies. Et utiliser les méthodes mathématiques de modélisation et de simulation permettent d'aider de visualiser les différentes courbes du fonctionnement de ces machines.

Mots clés : Machines électriques - les moteurs synchrones - diagnostiquer les défauts - Méthodes mathématiques de modélisation-Simulation Matlab/Simulink- Courbes de fonctionnement.

Abstract

This work is devoted to the study of the various faults which can affect the synchronous electric machines with alternating current during their operation in order to diagnose their origins in order to be able to locate them, and to take the necessary measures in order to avoid them.

To do so, it is necessary to have a thorough knowledge of the constitution of these electric machines including synchronous motors, their constitutions, their specifications and to define the methods of analysis of these anomalies. And using mathematical modeling and simulation methods can help visualize the different operating curves of these machines.

Keywords: Electrical machines - synchronous motors - fault diagnosis - Mathematical modeling methods - Matlab / Simulink simulation - Operating curves.

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....

CHAPITRE I : Généralités sur les machines électriques	
Introduction :	19
I.1.Historique sur les machines électriques :	19
I.2. Définition d'une machines électriques	21
I.3.Structure de la machine	21
I.4. Classification des machines électriques	22
I.5. La machines à courant alternatif	23
I.5.1. Définition	23
I.5.2. Constitution de machine à courant alternatif	23
I.5.3. Principaux types de machines a courant alternatif	24
I.5.4. Différents types de machines a courant alternatif	25
I.5.4.1. Les machines synchrones	25
I.5.4.2. Les machines Asynchrones	26
I.6. Les machines à courant continu	27
I.6.1. Définition	27
I.6.2. Constitution du moteur	28
I.6.3. Différents types de moteurs	31
I.6.3.1. Moteurs à inducteur à aimant permanent	31
I.6.3.2. Moteurs à inducteur bobiné	32
I.7.Les autres type de la machine électrique	33
I.7.1 Moteurs pas à pas	33
I.7.2 Moteurs linéaires	34
I.7.3 Les moteurs universels	35
Conclusion:	36
CHAPITRE II : La machine synchrone et ses spécifications	
II.1. Introduction	38

II.2. Définition de la machine synchrone	39
II.3. Constitution de la machine synchrone	39
II.3.1. Le rotor	39
II.3.1.1. Rotor à pôle lisse	40
II.3.1.2. Rotor à pôle saillant	40
II.3.1.3 Rotor à aimants permanents	40
II.3.2. Le stator	40
II.3.2.1. Bobinage du stator	40
II.4. Caractéristique d'une machine synchrone	42
II.4.1 Caractéristique en charge de l'alternateur isolé	42
II.4.2. Caractéristique externe $V(I)$	42
II.4.3. Caractéristique de réglage $J(I)$	44
II.4.4. Caractéristique en charge d'un alternateur relié à un réseau puissant	45
II.4.4.1. Détermination du fonctionnement	45
II.4.4.2. Puissance maximum	46
II.4.4.3. Stabilité des alternateurs	47
II.4.5. Caractéristique du moteur synchrone	48
II.4.5.1. Détermination du fonctionnement	49
II.4.5.2. Couple maximum à tension et fréquence constantes	51
II. 5. Principe de fonctionnement d'une machine synchrone	53
II.6. Avantages et inconvénient des machines synchrones	55
II.6.1 Les avantages	55
II.6.2 Les inconvénients	55
Conclusion :	57
CHAPITRE III : Etude des défaillances des moteurs synchrones	
III.1. Introduction	59
III.2. Différents défauts et diagnostics des défaillances des machines synchrones	60
III.2.1. Défaut statorique	60
III.2.1.1. Les défauts de bobinage statorique	62
III.2.1.2. Court-circuit dans une phase	62
III.2.1.3 Circuit ouvert sur une phase	63
III.2.1.4 défaut d'isolement des enroulements	63
III.2.2 Défaillances rotoriques	64
III.2.2.1 Excentricité statique et dynamique	64
III.2.2.2 Les défauts des aimants (Désaimantation)	65
III.3. Réaction d'induit d'une machine Synchrone	66

III.3. 1 Cas d'une charge résistive	66
III.3.2 Cas d'une charge inductive	67
III.3.3 Cas d'une charge capacitive	67
III.3.4 Cas d'une charge mixte inductive et capacitive	68
III.4. Diagramme de la machine synchrone	68
III.4.1. Diagramme de BEHN-ESCHENBURG	69
III.4.1.1. Exemple de représentation vectorielle des flux et Fém	69
III.4.2. Diagramme de POTIER	71
III.5. Méthodes des diagnostic des défauts des machines électriques	73
III.5.1. Méthodes internes	73
III.5.2. Méthodes externes	74
III.5.2.1. Méthodes de l'intelligence artificielle	74
III.5.2.2. Méthodes de reconnaissance des formes	75
III.5.2.3. Méthode d'analyse vibratoire	75
III.5.2.4. Méthode thermique basée sur l'échauffement de la machine	76
III.5.2.5. Méthode d'analyse des flux	76
III.5.2.6. Méthode d'analyse du couple électromagnétique	77
III.5.2.7. Méthodes électriques	78
Conclusion	80
Conclusion:	
CHAPITRE IV : Modélisation et simulation d'une défaillance d'un moteur synchrone	
IV.1. Introduction	82
IV-1 Méthode mathématique de modélisation de la machine synchrone	83
IV-1-2 Modélisation du moteur synchrone à aimants permanent	83
IV-1-3 Différentes équations mathématiques représentant le modèle du MSAP	83
Equations électriques	83
IV-1-4 Transformation de Park	85
1- Le passage direct : triphasé au biphasé	85
Equation électromagnétique	86
Equation mécanique	86
2- Mise sous forme d'équation d'état	87
IV-2 Simulation d'une défaillance dans un moteur synchrone	88
IV-2-1 Blocs de simulation du moteur synchrone à aimants permanents	88
1 - Les blocs de simulation dans le repère de Park	88
IV-2-2 Simulation et interprétation des résultats	89

1-Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINK™	89
- Définition du Matlab	89
- Définition du Simulink	90
2-Simulation du fonctionnement du MSAP en régime sans défaut	90
2-1 Représentation du fonctionnement du moteur MSAP à vide	90
2-2 Représentation du fonctionnement du moteur MSAP en charge	92
3- Simulation du fonctionnement du MSAP en régime avec défaut	93
3-1 Court-circuit statorique	93
3-2 Défaillance du moteur MSAP (courts-circuits au niveau du stator)	93
3-3 Représentation du fonctionnement du moteur MSAP avec défaut	93
Conclusion	95
Conclusion générale.....	97
Bibliographique	99

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I		
Figure 1	<i>Machine de Gramme</i>	20
Figure 2	<i>Schémas des machines électriques</i>	21
Figure 3	<i>Vue éclatée d'une machine électrique</i>	22
Figure 4	<i>Classification des machines électriques</i>	23
Figure 5	<i>Constitution de machine à courant alternatif</i>	24
Figure 6	<i>Transformateur monophasé</i>	24
Figure 7	<i>Transformateur triphasé</i>	24
Figure 8	<i>Moteur universel</i>	25
Figure 9	<i>Moteur rotatif déroulé devient linéaire</i>	25
Figure 10	<i>Machine synchrone de petite puissance</i>	26
Figure 11	<i>Turbo ALT d'une centrale électrique</i>	26
Figure 12	<i>Machine synchrone triphasée – schéma de principe</i>	26
Figure 13	<i>Moteur asynchrone MAS</i>	27
Figure 14	<i>Machine asynchrone triphasée – schéma de principe</i>	27
Figure 15	<i>Fonctionnement de machine à courant continu</i>	28
Figure 16	<i>Construction du stator.</i>	29
Figure 17	<i>Les pôles du stator</i>	29
Figure 18	<i>Rotor d'un moteur à courant continu.</i>	30
Figure 19	<i>Présentation du collecteur dans le rotor.</i>	30
Figure 20	<i>Présentation des balais</i>	31
Figure 21	<i>Moteur à aimant permanent.</i>	31
Figure 22	<i>. Moteur à excitation séparée</i>	32
Figure 23	<i>Moteur à excitation série.</i>	32
Figure 24	<i>Moteur à excitation shunt.</i>	33
Figure 25	<i>Moteur à excitation composée</i>	33
Figure 26	<i>Moteur pas à pas</i>	34
Figure 27	<i>Moteur linéaire</i>	34
Figure 28	<i>Moteur universel (MCC à excitation série alimenté en alternatif monophasé)</i>	35
Chapitre II		
Figure 1	<i>Présentation des différentes technologies de rotor (a : lisse, b : saillant)</i>	39

Figure 2	<i>Etoile des tensions</i>	41
Figure 3	<i>Bobinage distribué</i>	41
Figure 4	<i>Type de bobinages à 2 couches</i>	42
Figure 5	<i>Représentation vectorielle du fonctionnement à vitesse et excitation constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance</i>	43
Figure 6	<i>Courbes de variation (I) à vitesse et excitation constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance.</i>	43
Figure 7	<i>Courbes de variation (I) à vitesse et tension constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance.</i>	45
Figure 8	<i>Représentation du fonctionnement d'un alternateur à tension et fréquence constantes</i>	46
Figure 9	<i>Représentation de la puissance maximum d'un alternateur à tension, f.é.m et fréquence constantes</i>	47
Figure 10	<i>Représentation de l'angle interne δ</i>	48
Figure 11	<i>Représentation du fonctionnement d'un moteur synchrone à tension et fréquence constantes</i>	49
Figure 12	<i>Courbes de variation (I) à vitesse et tension constantes pour différentes valeurs de la puissance</i>	50
Figure 13	<i>Courbes de variation (I) à vitesse et tension constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance</i>	51
Figure 14	<i>Représentation de la puissance maximum d'un moteur à tension, excitation et fréquence constantes</i>	52
Figure 15	<i>Exemples de rotors des MSAP</i>	53
Figure 16	<i>Classification des machines synchrones</i>	54
Chapitre III		
Figure 1	<i>Différents défauts statoriques</i>	61
Figure 2	<i>Les courts-circuits dans les enroulements statoriques</i>	61
Figure 3	<i>Différents types d'excentricités</i>	65
Figure 4	<i>. Cas d'une charge résistive</i>	66
Figure 5	<i>Cas d'une charge selfique</i>	67
Figure 6	<i>Cas d'une charge capacitive</i>	68
Figure 7	<i>Représentation des flux et f.é.m de la machine synchrone en régime permanent</i>	69
Figure 8	<i>Diagramme de Behn-Eschenburg et le circuit électrique équivalent</i>	70
Figure 9	<i>Circuit électrique équivalent de l'essai en court-circuit</i>	71
Figure 10	<i>Représentation du diagramme de Potier</i>	71
Figure 11	<i>Représentation de la détermination graphique des paramètres 'α' et 'λ'</i>	72
Chapitre IV		
Figure 1	<i>Représentation des enroulements de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique.</i>	84

Figure 2	<i>Les différents couples qui agissent sur le rotor</i>	87
Figure 3	<i>Schéma Fonctionnel d'un Moteur synchrone à aimants permanents</i>	88
Figure 4	<i>La courbe du courant statorique à vide.</i>	91
Figure 5	<i>La courbe de vitesse à vide</i>	91
Figure 6	<i>La courbe du couple du moteur à vide</i>	91
Figure 7	<i>La courbe de courant statorique en charge</i>	92
Figure 8	<i>La courbe de vitesse en charge</i>	92
Figure 9	<i>La courbe de couple en charge</i>	93
Figure 10	<i>Les courts-circuits dans les enroulements statoriques</i>	93
Figure 11	<i>Schéma fonctionnelle d'un moteur synchrone à aimants permanents</i>	93
Figure 12	<i>Les courbes des courants statoriques pour le défaut de 20%</i>	94
Figure 13	<i>Couple électromagnétique pour le défaut de 20%</i>	94

Notations et Symboles

Notations et Symboles

MSAP	Moteur synchrone a aimant permanent
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
PI	Regulateur Proportionnel Integrateur
B	Induction magnetique
H	Le champ magnetique
a, b, c	Axes lies aux enroulements triphases
d, q	Axes de referentiel de Park
$a, /$	Axes de referentiel statorique
θ	Angle entre le stator et le rotor
θ_{geo}	Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator)
V_a, V_b, V_c	Tension statorique phase a, b , ou c
V_s	Tension statorique
i_a, i_b, i_c	Courant statorique phase a, b , ou c
i_s	Courant statorique
ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c	Flux statorique phase a, b , ou c
$\bar{v}_d, v_q$	Tension statorique sur l'axe d et l'axe q
i_d, i_q	Courant statorique sur l'axe d et l'axe q
i_d^{ref}, i_q^{ref}	Courant de reference sur l'axe d et l'axe q
ϕ_d, ϕ_q	Flux statorique sur l'axe d et l'axe q
V_a, V_p	Tension statorique sur l'axe $0, /3$
L_s	Inductance cyclique propre statorique
L_d, L_q	Inductances d'axe directe et en quadrature.
M_{sf}	Inductances mutuelles du couplage stator/ rotor
$[P(0)]$	Matrice de transformation de Park
$[C]$	Matrice de transformation de concordia
K_p, K_i	Coefficient proportionnel- integral
Ω	Vitesse mecanique de rotor
Ω_{ref}	Vitesse de reference
ω_r	Vitesse de rotation de la machine

C_e	Couple electromagnetique delivre par le moteur
C_r	Couple resistant
C_f	Couple de frottement
p	Nombre de paires de poles
J	Moment d'inertie du moteur
f	Coefficient de frottement visqueux
r	Constante du temps electrique

Introduction générale

Introduction générale

Pour traiter le sujet de ce mémoire qui se résume dans l'étude des différents défauts et les méthodes de prendre connaissances de ces défauts en l'occurrence de maîtriser l'art de diagnostiquer .

Ces défauts peuvent subir les moteurs électriques qui sont présents dans de large champ d'utilisation que ce soit dans l'industrie ou même dans la vie domestique .

Pour ce faire nous avons été dans l'obligation de passer brièvement en revue cette grande famille qui n'est autre que la famille des machines électriques dont fait partie les machines synchrones.

Autre chose , nous savons que toute cette famille regroupe toutes les machines qui sont alimentées en courant électrique que ce soit à courant continu ou alternatif et qui permettent de réaliser des mouvements linéaires ou rotatifs ou autres.....et cela selon leur conception.

Ces machines électriques sont depuis fort longtemps étaient utilisées dans des divers domaines industriels à savoir dans les différentes usines industrielles, le robotique, les appareils de levage les systèmes d'alimentations ; dans le domaine de l'énergie de la sidérurgie , dans le nucléaire , dans l'industrie du papier et du textile...

Donc les machines à courant alternatif et à courant continu et spécialement les machines synchrones et asynchrones ont envahi ces divers domaines industrielles ; lesquelles sont devenues incontournables pour le développement de ces industries .

Ceci dit, cela nous amène à dire qu'il est nécessaire de maîtriser ce domaine et tout ce qui peut affecter le bon fonctionnement de ces machines à savoir connaître tous les défauts qui peuvent survenir à tout moment lors de leur fonctionnement et à connaître de les diagnostiquer pour pouvoir y remédier ..

De ce fait il est recommandé de voir toutes les généralités sur les machines électriques y compris leur constitution , la conception de leurs éléments , leurs caractéristiques , l'environnement de leur utilisation , leur matériaux de fabrication , leur avantages et inconvénients et d'une manière générale tout facteur qui peut influencer sur leur bon rendement de ces machines .

Vu que les variétés de ces machines sont très nombreuses , nous avons choisi d'étudier la machine synchrone et plus spécialement le moteur synchrone et ces défauts qui peuvent être semblables à d'autres machines électriques.

Le choix de l'étude de cette machine s'est imposé ; suite au vaste champ d'utilisation de cette dernière lors de ces dernières années , ainsi que sur le plan de leur performance.

Donc l'objectif de ce travail est actionné sur cette machine électrique synchrone en démontrant sa constitution ses caractéristiques ; avec une description de ces différents éléments constitutifs et surtout les différentes méthodes de diagnostic des défauts de ces machines . .

Nous allons aussi essayer de voir quelques différentes équations du modèle mathématique du moteur synchrone en se basant sur la méthode des circuits électriques et électromécaniques et magnétiques de cette machine ..

Enfin , nous avons essayé de simuler un défaut de court circuit au niveau du stator du à un défaut d'isolation entre spires sur une phase statorique d'un moteur synchrone à aimants permanents et de représenter les courbes de courants et de vitesse lors de son fonctionnement sans défauts et avec défaut . .

Chapitre I

**Généralités sur les
machines électriques**

Introduction :

Avant de traiter le fond du sujet de ce mémoire , qui essaie de prendre en charge le problème des défauts dans les moteurs synchrone , il nous semble qu'il est nécessaire de passer en revue , aussi longuement que possible , les généralités sur les machines électriques d'une manière la plus générale , en commençant par les premières inventions dans ce domaine qui se résument tout d'abord de voir la première machine qui a été inventé jusqu'à la conception des récentes machines électriques qui a envahi le monde industriel à savoir les machines synchrones et asynchrones sans oublié les transformateurs ; alternateurs et convertisseurs...

Dans ce contexte , nous allons évoqué les différents types de machines électriques que ce soient les machines tournantes ou statiques , à courant alternatif ou à courant continu , leur définition , leur structure , leur conception , leur classification et leur caractéristiques .

De ce fait nous allons avoir un aperçu générale sur ce domaine afin de se familiariser avec ce domaine combien il est intéressant d'une part et d'autre part faciliter la compréhension du fonctionnement de ces machines électriques .

I.1.Historique sur les machines électriques :

Nous pouvons affirmer sans trop nous tromper que l'histoire des machines électriques a débuté avec le professeur Pacinotti (1841-1912) qui avait effectué des travaux sur un anneau tournant dans un champ magnétique. Dans cette expérience, bien qu'il a resté au stade expérimental, il a envisagé une utilisation en mode générateur et moteur. Cependant certaines voix se sont levées pour réfuter cette théorie car l'effet magnétique du courant électrique a été découvert un peu plus tôt par Oersted en 1820 et l'induction magnétique par Faraday en 1831.

En 1869, le belge Zénobie Gramme réalisa les premières génératrices à courant continu en n'imaginant le collecteur. Ses travaux furent présentés à l'Académie des Sciences de Paris et cette première machine a reçu le nom de machine de Gramme dont une photo est donnée par la (Fig. I.1).



Fig I.1. Machine de Gramme

En 1887 Nikola Tesla (1856-1943), ingénieur yougoslave en électronique, né en Croatie, fonde une société de construction d'alternateurs. Grâce à ses travaux, le courant alternatif va gagner la bataille du transport 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.

L'invention du moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil intervient en 1889 grâce à l'électricien Russe Michail Ossipowitsch Doliwo-Doborwolski.

Cette machine ne sera construite industriellement que deux ans plus tard. La paternité de cette invention est contestée et souvent attribuée à Tesla, ainsi avant le début du vingtième siècle la plupart des machines électriques que nous connaissons actuellement avaient été mises en œuvre ou leur principe avait été déjà posé [1].

Les machines synchrones, asynchrones et à collecteur constituent l'essentiel du parc des machines électriques depuis un siècle et demi. Cependant, le domaine des machines électriques n'est pas resté figé. Depuis la découverte du transistor en 1948 et du thyristor en 1958, des progrès immenses ont été effectués dans ce domaine conduisant à d'importants

développements théoriques et technologiques. Au-delà de leur conception qui est quasi standardisée, il convient de savoir dans quelle mesure ces machines peuvent être exploitées au meilleur de leurs performances. Cela passe non seulement par une meilleure connaissance du système mais surtout par une élaboration de lois de commande adaptées.

I.2. Définition sur les machines électriques

Une machine électrique est un appareil capable de réaliser une transformation d'énergie d'une forme en une autre forme ou l'une d'entre elles au moins est de nature électrique. Elle fonctionne comme un générateur si elle fournit de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie (mécanique, chimique, lumineuse, solaire etc.,...) , comme un moteur (ou récepteur) qui convertit une partie de l'énergie électrique qu'il reçoit en une autre forme d'énergie (mécanique, chimique...). Une machine électrique peut également convertir une énergie électrique en énergie électriques (transformateur).[39]

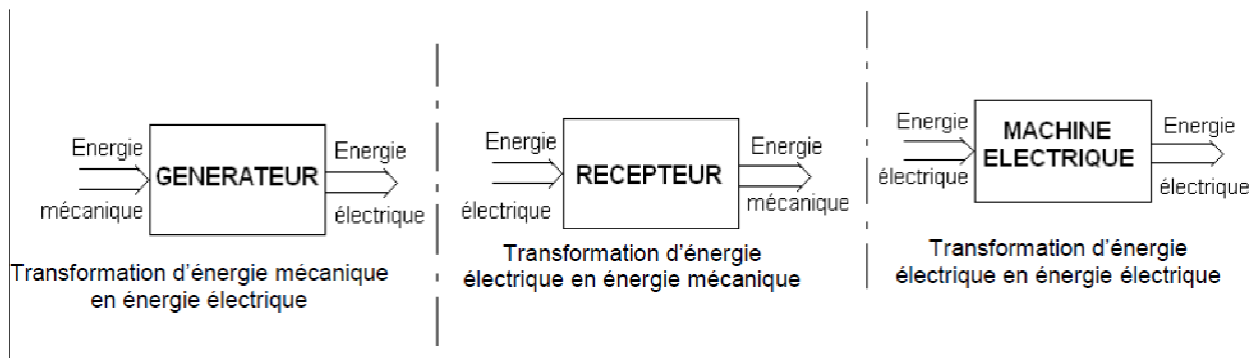


Fig I.2.Schémas des machines électriques

Les machines électriques sont utilisées dans tous les domaines, surtout dans les secteurs d'industrie énergétique moderne ; on peut également les rencontrer dans l'usage domestique.

I.3.Structure de la machine

Du point de vu construction, un moteur ou une génératrice est constitué par une partie fixe appelée STATOR et une partie mobile appelée ROTOR qui tourne généralement à l'intérieur du stator. Entre ces deux parties se trouve un intervalle d'air appelé ENTREFER permettant la rotation du rotor.[31]

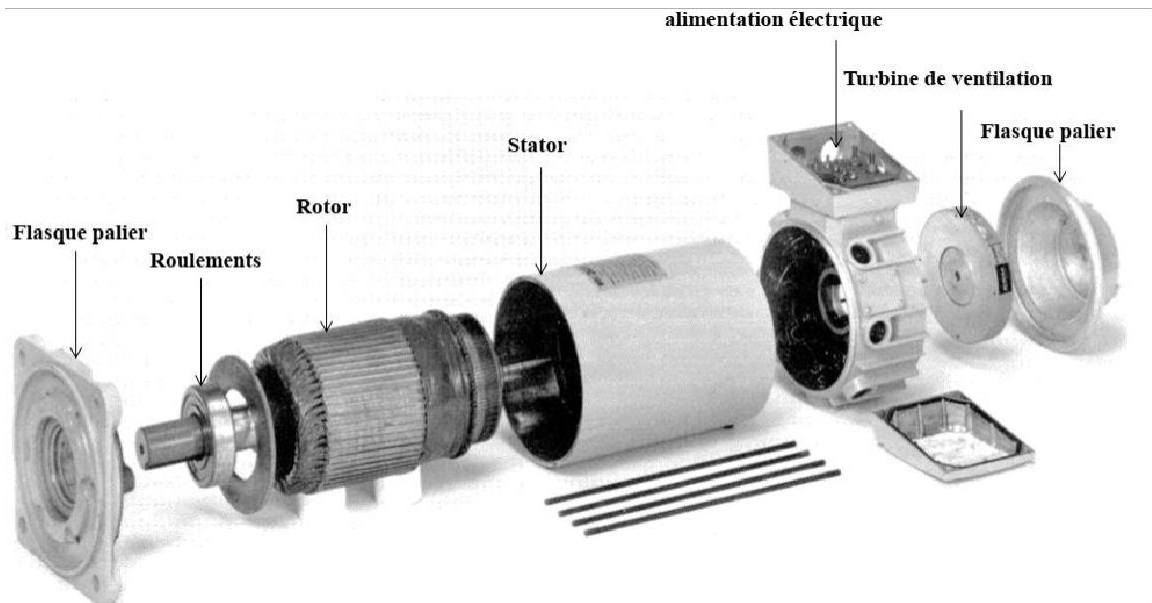


Fig I.3. Vue éclatée d'une machine électrique.

I.4. Classification des machines électriques

En général, on peut classer en deux catégories les machines électriques : machines statiques et machines tournantes.

1. Une machine statique transforme une énergie en une énergie de même nature, c'est-à-dire une énergie électrique en énergie électrique comme les convertisseurs, les transformateurs qui sont destinés à modifier une énergie électrique en une énergie électrique avec d'autres caractéristiques, tout en conservant pratiquement le même bilan des puissances actives et apparentes.
2. Les machines tournantes servent à transformer une énergie électrique en énergie mécanique ou vice versa. Suivant le genre de transformation opérée, les machines électriques tournantes sont classées en génératrices (dynamo, alternateur) et réceptrices (moteur électrique à courant continu ou alternatif tournant ou linéaire).

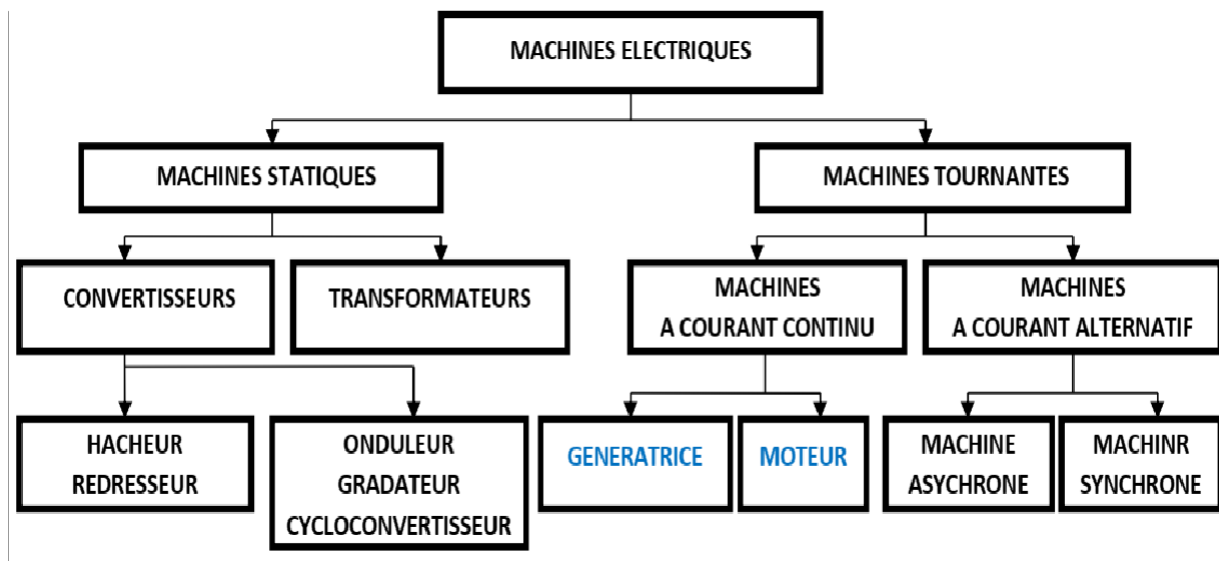


Fig I.4. Classification des machines électriques

I.5. La machines à courant alternatif

I.5.1. Définition

Un moteur électrique fait partie des machines à courant alternatif , c'est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique, destiné à entraîner une charge . En entrée, il reçoit de l'énergie électrique et il fournit en sortie une énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité.[27]

I.5.2. Constitution d'une machine à courant alternatif

Ces structures sont constituées essentiellement de trois parties.

a) Partie mécanique :

Cette partie constitue le rotor et le stator. Le rotor est la partie mobile de la machine. Quant au stator il représente la partie fixe. Les deux armatures sont séparées par un entrefer.

b) Partie magnétique :

Le circuit magnétique permet la circulation et la canalisation du champ magnétique. Il doit être d'une bonne perméabilité magnétique.

c) Partie électrique :

Cette partie constitue l'enroulement ou le bobinage. Celui-ci permet la circulation du courant électrique pour créer un champ magnétique.

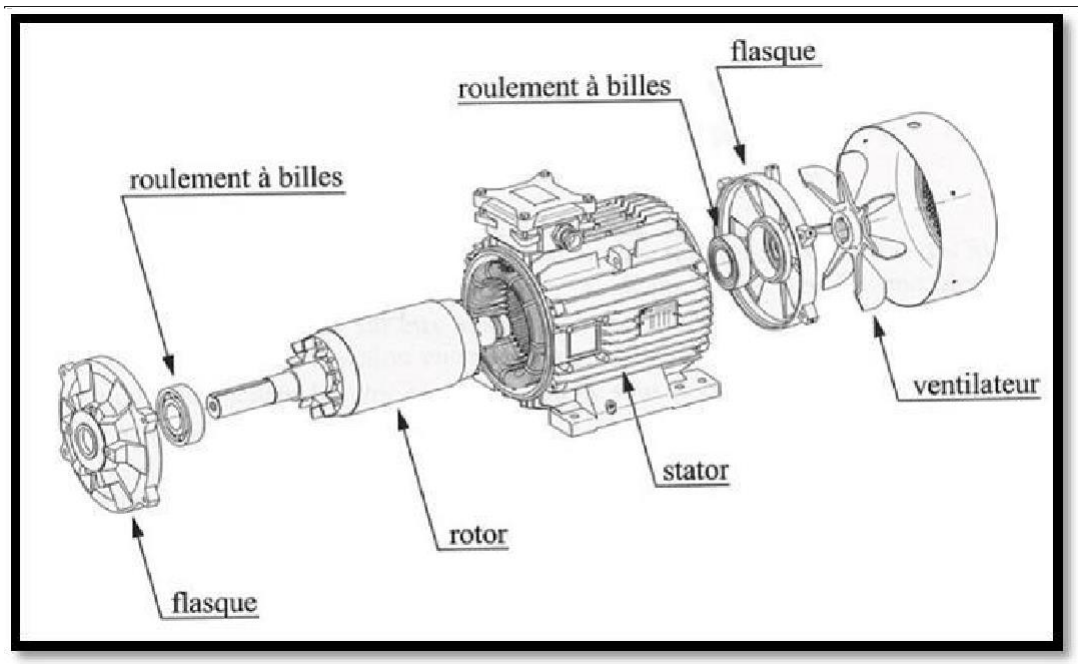


Fig.I.5. Constitution de machine à courant alternatif

I.5.3. Principaux types de machines à courant alternatif

On appelle machine électrique tout système comportant un circuit magnétique (dispositif permettant la canalisation du champs magnétique) et un circuit électrique généralement des bobines. Cet ensemble constitue une machine électrique qui peut être :

1. Partie Statique

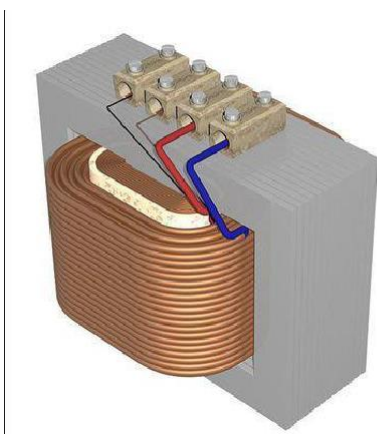


Fig.I.6. Transformateur monophasé



Fig.I.7. Transformateur triphasé

2. Partie Tournante



Fig.I.8.Moteur universel

3. Partie Linéaire

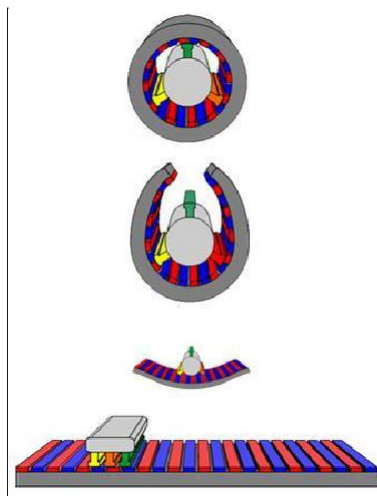


Fig.I.9.Moteur rotatif déroulé devient linéaire

I.5.4. Différents types de machines a courant alternatif

I.5.4.1. Les machines synchrones

La machine Synchrone est généralement utilisée en génératrice on l'appelle alors Alternateur, mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'énergie électrique, les contrôles électriques font appel aux ALT.[22]

Comme le nom indique, la vitesse de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent

N [vitesse : tr/min], f [fréquence : Hz], p [N_{br} de paires de pôles : sans unité]

$$N = \frac{60f}{p}$$

Les machines synchrones sont également utilisées dans les systèmes de traction (TGV atlantique est un exemple).



Fig.I.10. Machine synchrone de petite puissance



Fig.I.11. Turbo ALT d'une centrale électrique

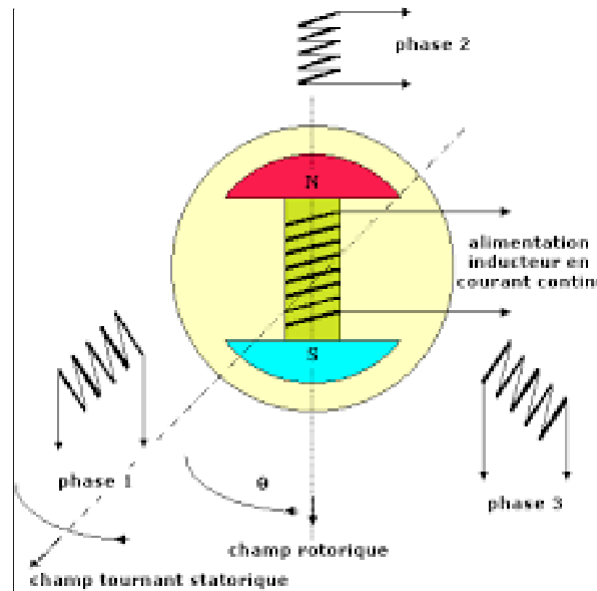


Fig.I.12. Machine synchrone triphasée – schéma de principe

I.5.4.2. Les machines Asynchrones

La machine Asynchrone (ou machine électrique la plus répandue car c'est actuellement celle qui offre le meilleur rapport qualité prix.

On les utilise dans de nombreux dispositifs domestiques (machines à laver, sèche-linge). Elles sont également utilisées pour la traction ferrovière (dernier modèle de TGV Nord).

Comme le nom indique la vitesse de ces machines n'est pas proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent.[3]

Ces machines étaient généralement utilisées en moteur, mais grâce au progrès de l'électronique de puissance il est de plus en plus fréquent qu'elles soient utilisées en génératrice.

Pour fonctionner en courant monophasé elle nécessite un système de démarrage.

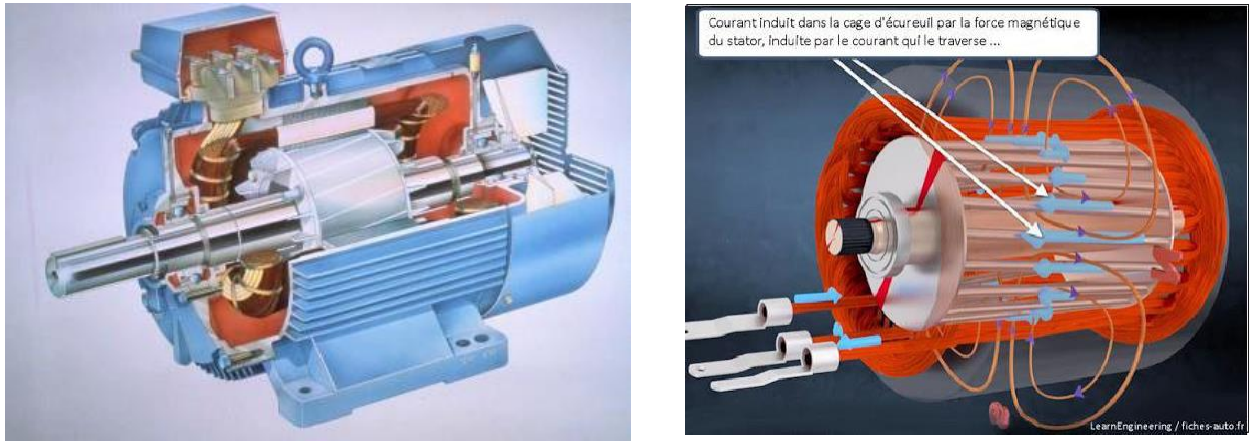


Fig.I.13.Moteur asynchrone MAS

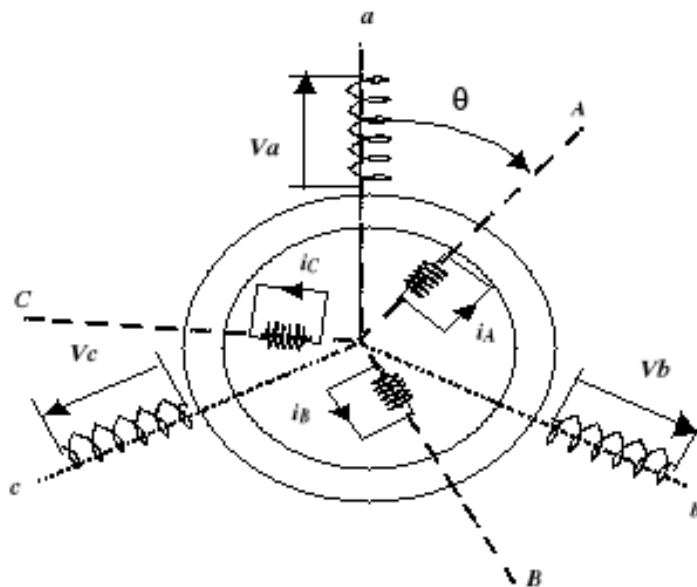


Fig.I.14.Machine asynchrone triphasée – schéma de principe

I.6. Les machines à courant continu

I.6.1. Définition

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie : Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une

charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur. Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînant. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en générateur [21].

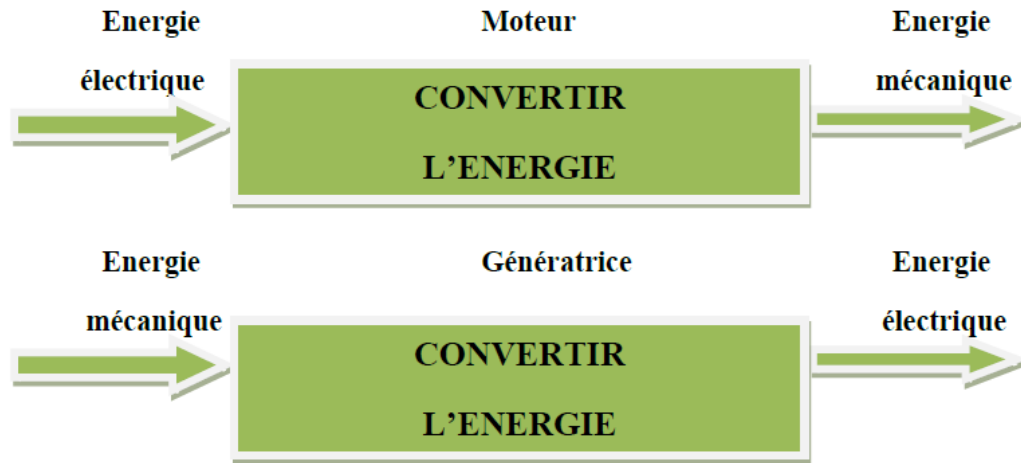


Fig I.15. Fonctionnement de machine à courant continu

I.6.2. Constitution du moteur

a) Stator du moteur à courant continu

Le stator est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit. Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électroaimant. Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique appelé « champ inducteur » (B_s).

L'inducteur magnétise le moteur en créant un flux magnétique (Φ) dans l'entrefer.

L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et le rotor. Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques.

Il s'agit du moteur courant continu qui assure l'entraînement du Scootelec de Peugeot[1].

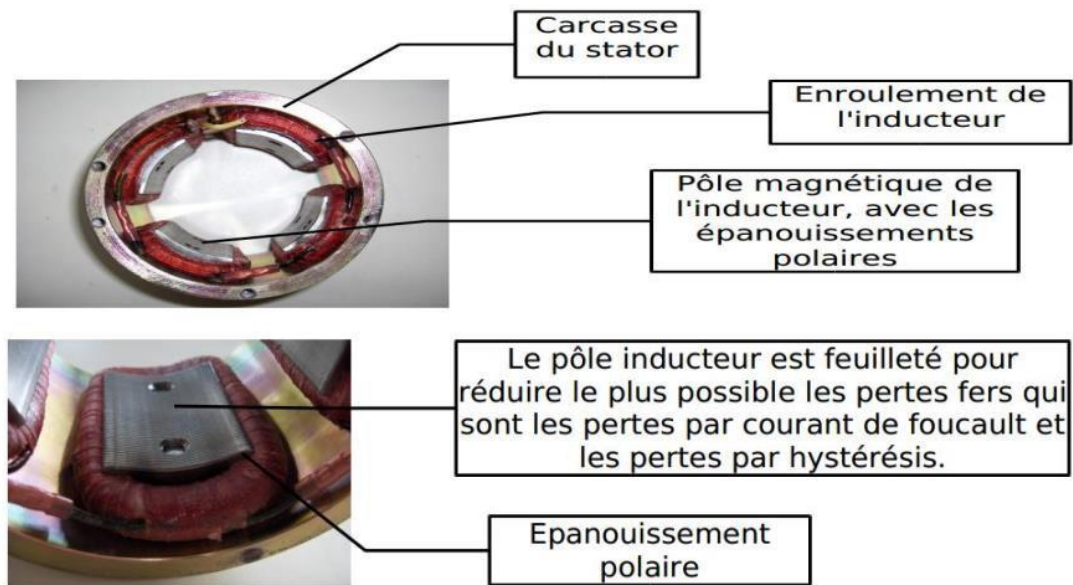


Fig I.16. Construction du stator.

Revenons à la photo d'ensemble pour la commenter d'un point de vue magnétique :

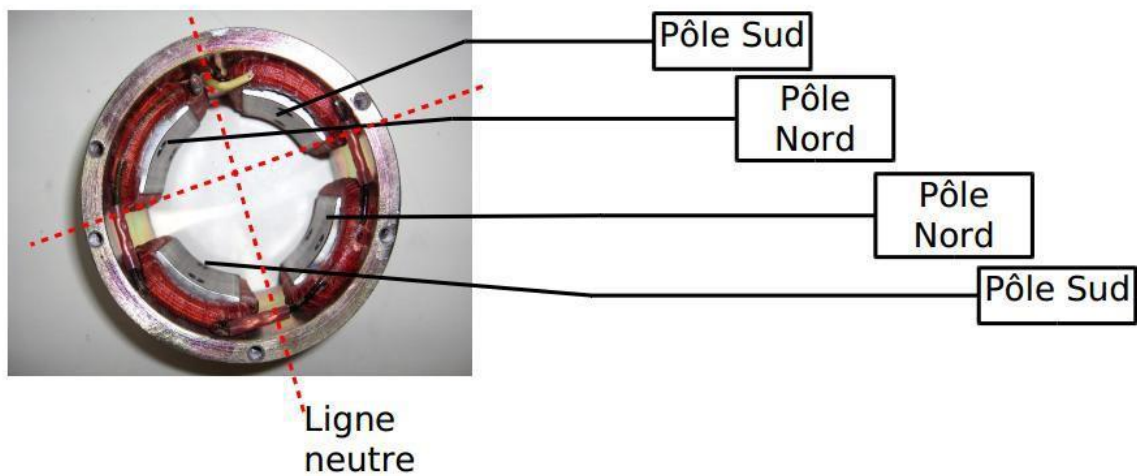


Fig I.17. Les pôles du stator

Ce moteur possède 2 paires de pôles inducteurs (Nord – Sud) pour mieux répartir le flux magnétique dans la machine. Les lignes de champ magnétique vont du pôle Nord vers le pôle Sud. La configuration des pôles est donnée pour un sens du courant inducteur. Si le courant est inversé, le pôle Sud devient un pôle Nord et inversement. C'est une possibilité pour inverser le sens de rotation du moteur, mais elle est peu utilisée. Lorsque la spire, ou section,

de l'induit (paragraphe suivant) est sur la « ligne neutre », les forces électromotrices induites dans les conducteurs sont nulles et la spire est en court circuit par les balais[3].

b) Rotor du moteur à courant continu :

Le rotor ou l'induit comporte un circuit magnétique feuilleté muni d'encoches régulièrement distribuées à la périphérie.

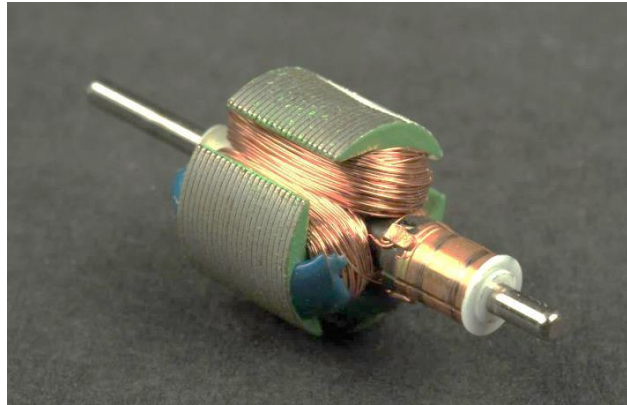


Fig I.18. Rotor d'un moteur à courant continu.

c) Le Collecteur d'un moteur à courant continu :

Est claveté sur l'arbre de l'induit, sur lequel frottent les balais. Il se compose de lame de cuivre de section trapézoïdale, portent chacune une ailette de connexion à l'enroulement de l'induit et isolées par du mica.[4]

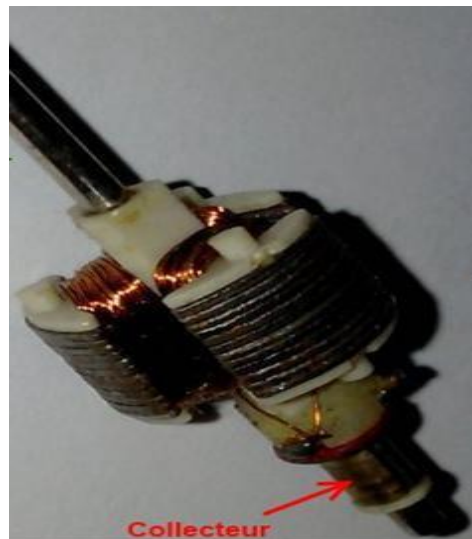


Fig I.19. Présentation du collecteur dans le rotor.

d) Les balais sont fixes, en charbon graphitique,

Appuient sur des lames diamétralement opposées du collecteur, ils sont immobiles, isolé sélectriquement du bâti de la machine.

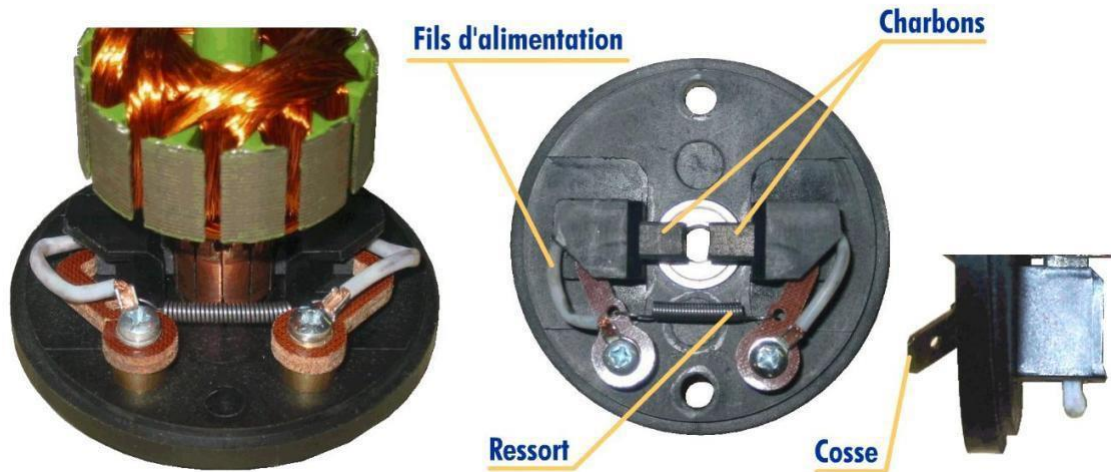


Fig I.20. Présentation des balais

I.6.3. Différents types de moteurs

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

I.6.3.1. Moteurs à inducteur à aimant permanent

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent.

Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples d'utilisation.

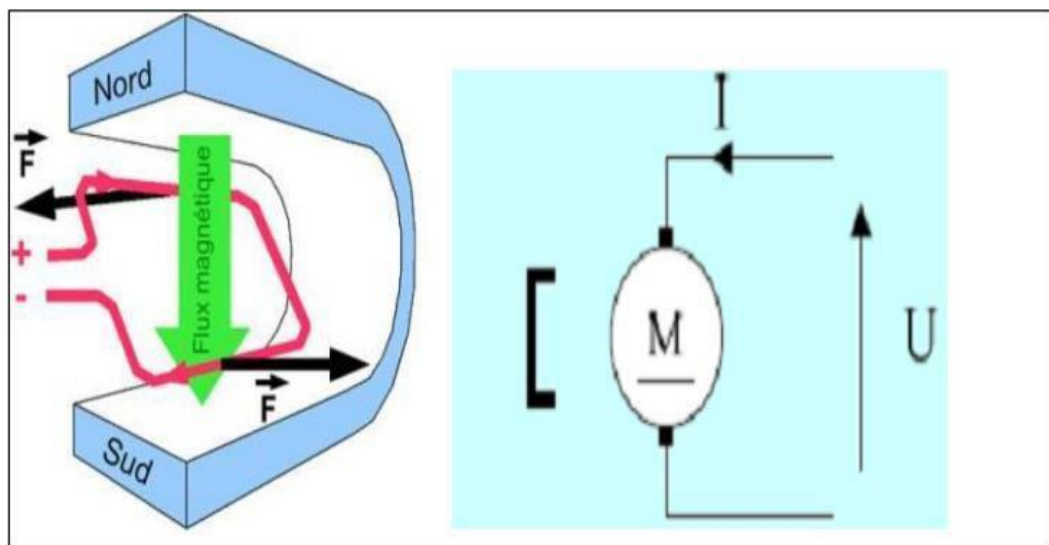


Fig I.21. Moteur à aimant permanent.

I.6.3.2. Moteurs à inducteur bobiné

Il existe 4 types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont :

1. Le moteur à excitation shunt.
2. Le moteur à excitation série.
3. Le moteur à excitation composée.
4. Le moteur à excitation séparée.

❖ **Moteur à excitation séparée:**

Le moteur à excitation indépendante est raccordé à une alimentation à courant continu séparée. par conséquent, le courant qui alimente l'inducteur est indépendante de celui qui alimente l'induit.[23]

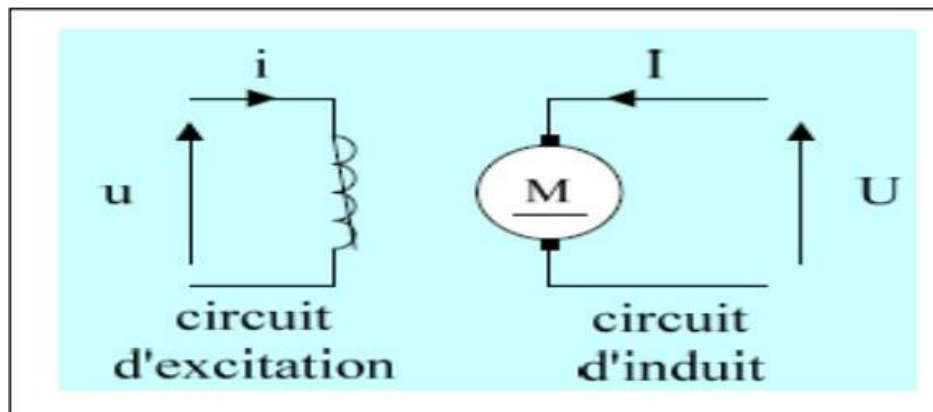


Fig I.22.Moteur à excitation séparée.

❖ **Moteur à excitation série:**

L'induit et l'inducteur sont alimentés par la même source de tension. Ce type de moteur présente un très fort couple au démarrage, il reste encore utilisé dans certaines applications de traction électrique.

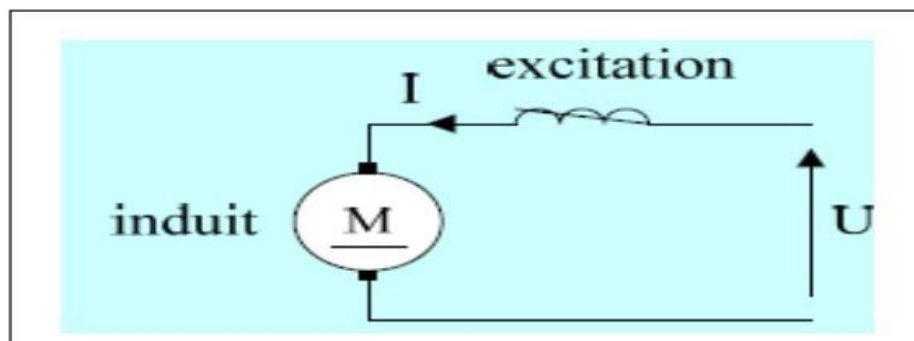


Fig I.23.Moteur à excitation série.

❖ **Moteur à excitation shunt:**

La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit.

Ce mode d'excitation offre à l'utilisateur une fréquence de rotation pratiquement indépendante de la charge et qui peut démarrer à vide.

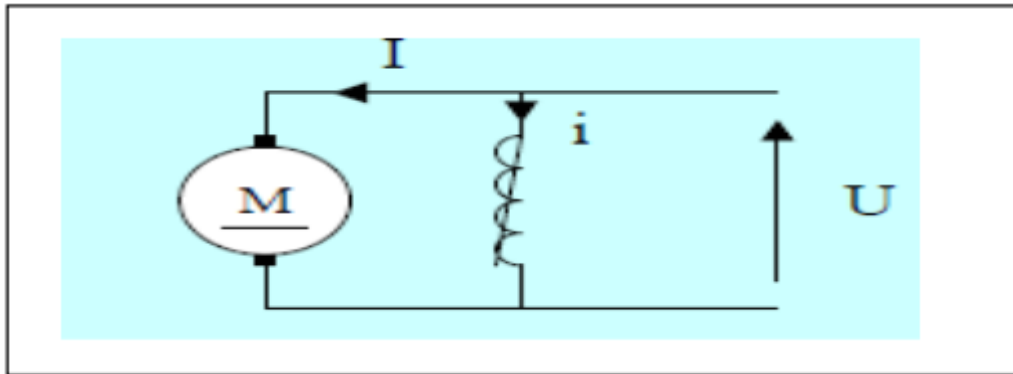


Fig I.24.Moteur à excitation shunt.

❖ **Moteur à excitation composée :**

Le moteur à excitation composé, est a raccordé à avec deux excitations, excitation série et excitation shunt en même temps[4].

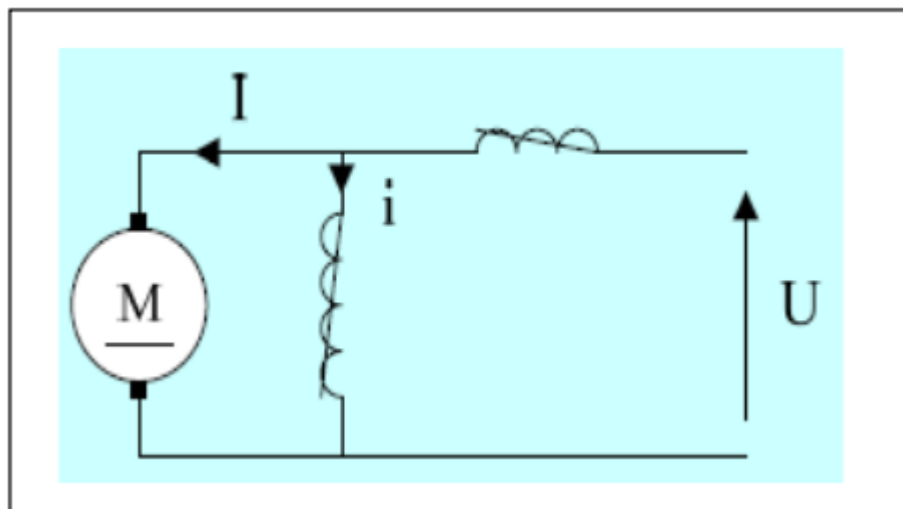


Fig I.25.Moteur à excitation composée.

I.7. Autres types de machine électrique (moteurs)

I.7.1 Moteurs pas à pas

Un autre genre de moteur électrique est le moteur pas à pas. Dans ces moteurs le rotor est commandé par un ensemble de bobines externe qui sont commutées électroniquement.

L'allumage ou nom de chacune définit une position angulaire différente (l'enchaînement permet le mouvement). Ces moteurs, suivant leurs conceptions, être extrêmement précis.

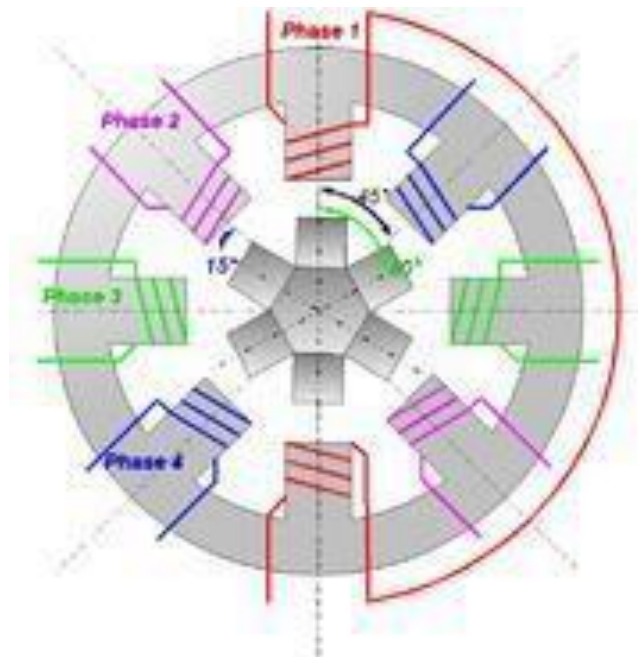


Fig.I.26. Moteur pas à pas

I.7.2 Moteurs linéaires

Un moteur linéaire est essentiellement un moteur électrique qui a été déroulé de sorte qu'au lieu de produire un couple (rotation) et produisent une force linéaire.

Ils se divisent en ceux à accélération faible utilisés dans le transport et ceux à accélération rapide dans les armes comme le canon magnétique et les engins spéciaux.

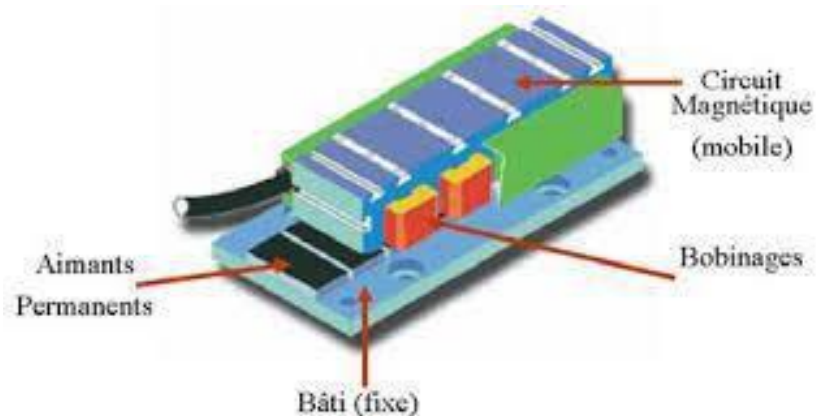


Fig.I.27. Moteur linéaire

I.7.3 Les moteurs universels

Ce sont des machines à courant continu de type « Série ». Ils sont utilisés dans des dispositifs exigeant un couple assez fort les robots de cuisines, l'outillage électroportatif de faible puissance (jusqu'à 1200W). La vitesse de ces moteurs peut être facilement réglée par un dispositif à coupleux (150DA) le gradateur.[42]

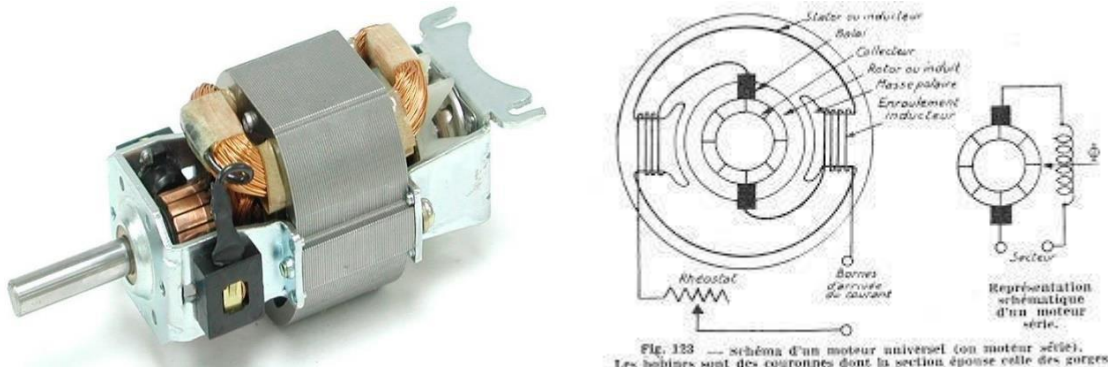


Fig.I.28. Moteur universel (MCC à excitation série alimenté en alternatif monophasé)

Conclusion :

Nous avons cité auparavant que pour pouvoir cerner les différents défauts des machines électriques synchrones et à asynchones d'une manière générale et de pouvoir diagnostiquer les défaillances que peuvent les provoquer ; il impératif de prendre connaissance des éléments constitutifs ; leur conception d'une manière générale ; leurs caractéristiques , leurs différents types , leur mode de fonctionnement , leur domaine d'utilisation ainsi que leur condition de travail ..

Donc dans ce chapitre, nous avons passé en revue tout l'évolution de ces machines électriques depuis la première invention qui a été à leur origine et ce n'est autre qu'une petite expérience dont fut la découverte du champ magnétique et son effet réalisé par le professeur Pacinoto dans les années quarante du dix-huitième siècle .

Alors que maintenant au vingtième siècle les machines électriques sont devenues indispensables pour le développement de tous les domaines de l'industrie ainsi qu'une nécessité dans notre vie courante .

Chapitre II

La Machine synchrone et ses spécifications

II.1. Introduction

A vrai dire l'appellation " 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 est c'est l'une des spécifications de ce genre de machines , en outre elle à la flexibilité de fonctionner comme moteur ou générateur .

Au début elle était utilisé en tant qu'alternateur ; mais avec le developpement de puissance et son utilisation dans les systèmes de commande ce dernier temps , ainsi que l'utilisation des aimants comme rotor dans ces machines a permis la conversion de ces dernières en tant que moteurs dans une large gamme de puissance . La machine synchrone tout comme la machine asynchrone est constitué d'une partie fixe : le stator et une partie mobile : le rotor .

Donc cette famille de machine regroupe les moteurs , les alternateurs et les moteurs pas à pas ...de ce fait elle est très sollicitée dans un domaine très vaste du domestique à l'industrie.

Actuellement et avec le developpement des systèmes de commandes , ce genre de machines est très convoité et plus particulièrement dans le domaine de la production d'énergie.

Son fonctionnement en alternateur , a fait de cette machine l'élément essentiel dans les centrales électriques pour produire l'énergie électrique , et pouvant aussi fonctionner en parallèle , à chaque station, il peut y avoir un ou plusieurs générateurs fonctionnant en parallèle.

De ce fait , ces machines synchrones représentent les mono-unités les plus utilisées comme machine de production de l'électricité, plus couramment nommés générateurs ou alternateurs, leur 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.

Comme déjà mentionné 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.[1].

Ceci dit , il est nécessaire de faire un aperçu générale sur cette fameuse machine synchrone et ses différentes spécifications à savoir sa conception son fonctionnement ses classifications ses avantages et ses points faibles .

II.2.Définition de la machine synchrone

Une machine synchrone est une machine électrique :

- soit produisant un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor : Générateur électrique ;
- soit absorbant un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du rotor : Moteur électrique[1].

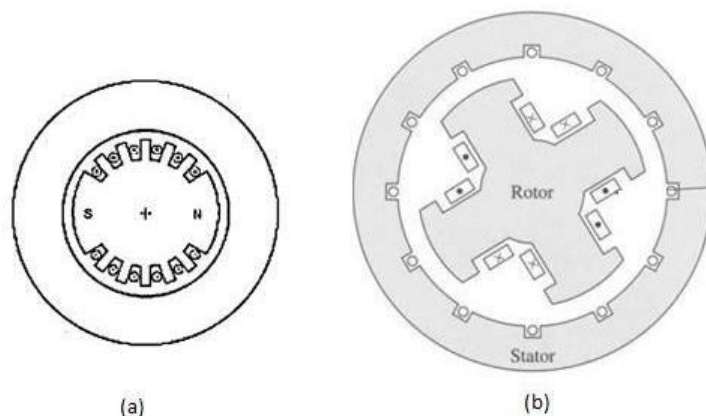
Au-delà de quelques kilowatts, les machines synchrones sont généralement des machines triphasées. Le rotor, souvent appelé « roue polaire », est alimenté par une source continue ou équipé d'aimants permanents.

II.3.Constitution de la machine synchrone

II.3.1. Le rotor

Le rotor appelé souvent “ roue polaire “ il peut être alimenté par une source extérieure en courant continu ou carrément équipé d’aimants permanents .

Donc 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.



FigII.1.Présentation des différentes technologies de rotor (a : lisse, b : saillant) [04].

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 choix se fait essentiellement au niveau de l'entrefer [4].

II.3.1.1. Rotor bobiné à pôles lisses

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)

II.3.1.2. Rotor bobiné à pôles saillants

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.

III.3.1.3 Rotor à aimants permanents

Les matériaux de fabrication de ces aimants ont été choisis pour leurs propriétés magnétiques. La machine synchrone équipée d'un rotor à aimants permanents durs n'a pas besoin d'une excitation externe par contre pour les rotors dont sont conçus de matériaux magnétiques doux ont besoin d'une excitation externe pour manifester des propriétés magnétiques.

II.3.2. 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.

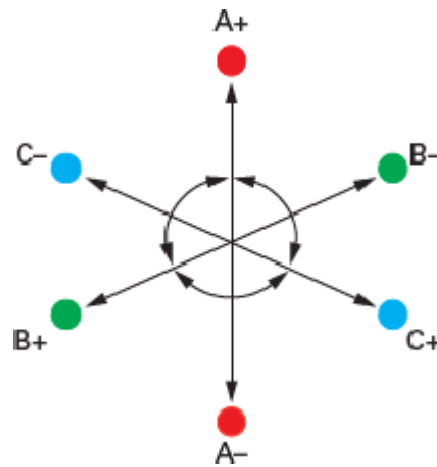
Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor, il supporte le bobinage du stator. Le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées par rapport à l'autre de 120° . [38]

II.3.2.1. Bobinage du stator

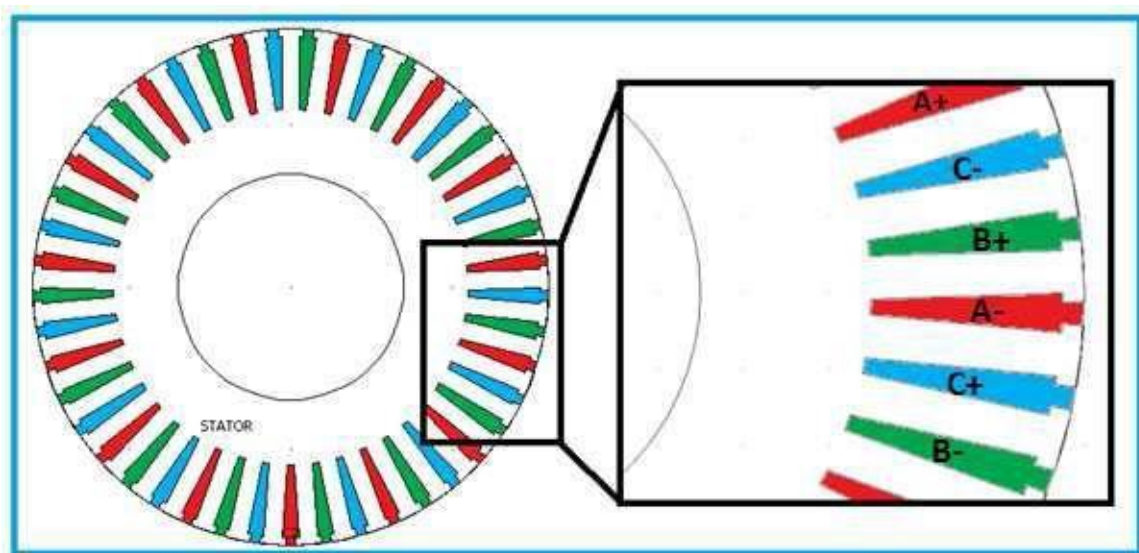
Le bobinage d'une machine synchrone est un des points cruciaux de la conception pour l'obtention de bonnes performances de la machine.

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 II.2).



FigII.2.Etoile des tensions [04]

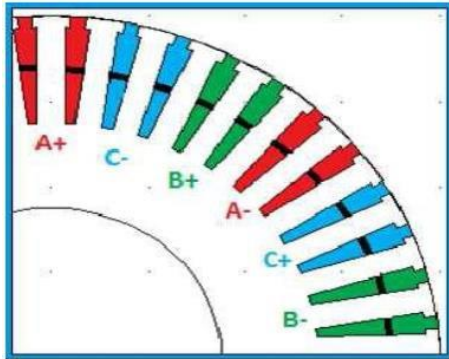


FigII.3.Bobinage distribué [04].

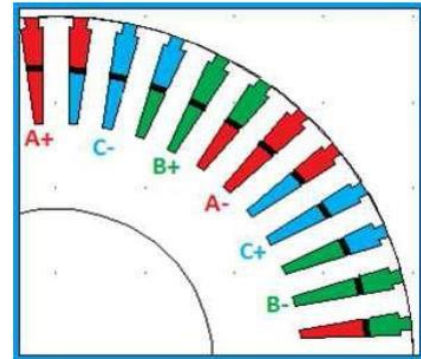
Pour chaque famille, on peut réaliser un bobinage à pas diamétral ou à pas raccourci, dans un bobinage à pas diamétral, on dispose dans chaque encoche une seule et unique phase.

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 II.4(a) représente un bobinage à pas diamétral et la figure II.4(b) un bobinage à pas raccourci.[28]



(a) Bobinage à pas diamétral



(b) Bobinage à pas raccourci

FigII.4.Type de bobinages à 2 couches [04].

II.4. Caractéristique d'une machine synchrone

II.4.1 Caractéristique en charge de l'alternateur isolé

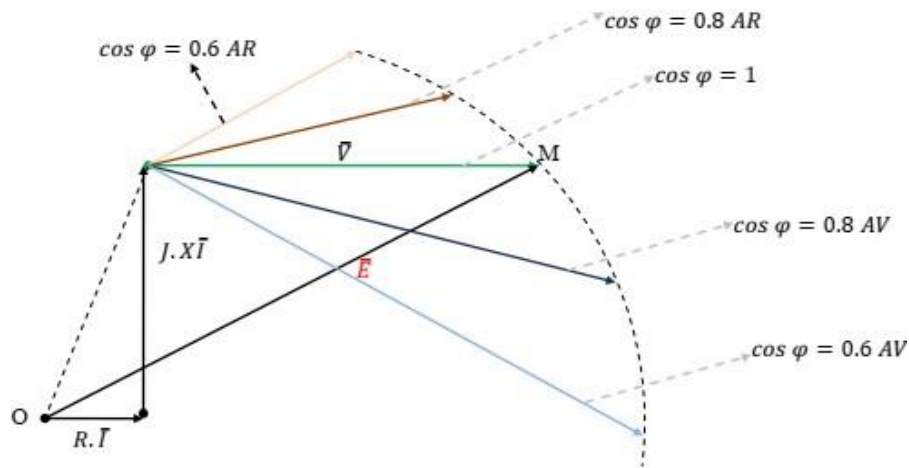
Afin de prédéterminer les caractéristiques de l'alternateur, nous utilisons le diagramme de Behn-Eschenburg. Le fonctionnement de l'alternateur est caractérisé par un ensemble des grandeurs à savoir le courant d'excitation (ou bien la f.é.m à vide), la tension à ces bornes, le courant de charge (amplitude et déphasage) et la vitesse de rotation. Lors de l'étude de la variation d'une grandeur en fonction d'une autre, il faut fixer le reste des grandeurs à ces valeurs nominales.

II.4.2. Caractéristique externe $V(I)$

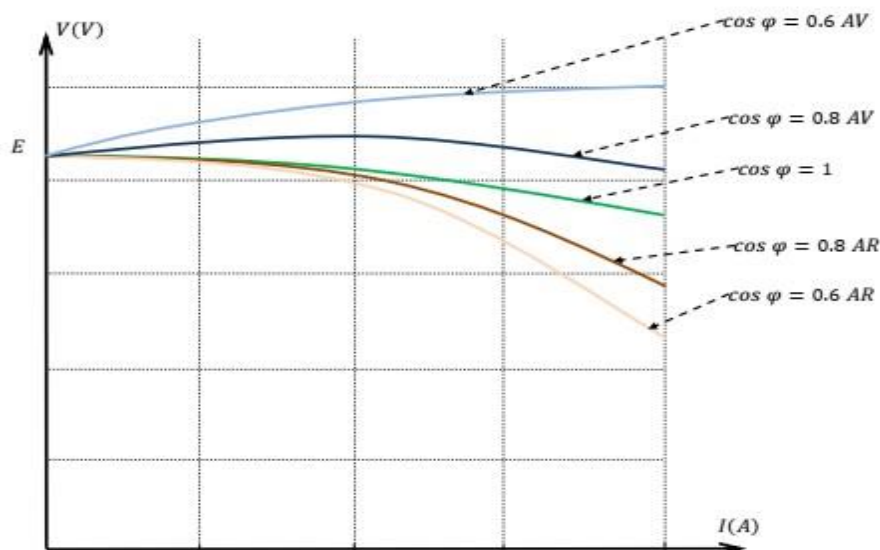
A la vitesse de rotation nominale et une excitation constante (la f.é.m à vide constante), il existe une caractéristique (I) pour chaque déphasage φ du courant par rapport à la tension (facteur de puissance). Lorsque l'alternateur alimente une charge variable, il y'aura une chute de tension interne due à la résistance et à la réactance synchrone. Afin de mieux constater cette chute de tension, nous traçons le diagramme vectoriel donnant le vecteur et partant du vecteur $R.I$, puis le vecteur $j.X.I$, ensuite le vecteur V en supposant que le courant I est horizontal. Pour une f.é.m constante, le point de fonctionnement doit se déplacer selon un cercle de rayon E et de centre O (Figure II.5).[22]

Les courbes suivantes ont été tracées afin de mettre en évidence la variation de la chute de tension en fonction de la nature du circuit alimenté.

Pour une charge résistive, Nous remarquons que la chute de tension s'accroît avec la croissance du courant de charge. Cette chute est la somme d'une chute résistive due la résistance interne du bobinage statorique et une chute inductive de la réactance synchrone due à la réaction magnétique d'induit.



FigII.5. Représentation vectorielle du fonctionnement à vitesse et excitation constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance(22)



FigII.6. Courbes de variation (I) à vitesse et excitation constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance.

Sur charge inductive, l'allure de la courbe s'explique de la même façon que pour la charge résistive. La seule différence réside dans celle de la chute inductive. Pour une charge inductive, la réaction d'induit est longitudinale démagnétisante (en opposition avec le flux inducteur). Le flux résultant sera donc plus faible diminuant automatiquement la valeur de la tension aux bornes de la machine.[31]

Sur charge capacitive, nous retrouvons aussi la chute de tension résistive allant dans le sens de réduire la tension aux bornes de la machine. Cependant, la chute de tension due à la réaction d'induit complètera la première. Pour une charge capacitive, la réaction d'induit est longitudinale magnétisante (de même sens que le flux inducteur). Le flux rotorique résultant sera donc plus important en augmentant automatiquement la valeur de la tension aux bornes de l'alternateur.

II.4.3. Caractéristique de réglage $J(I)$

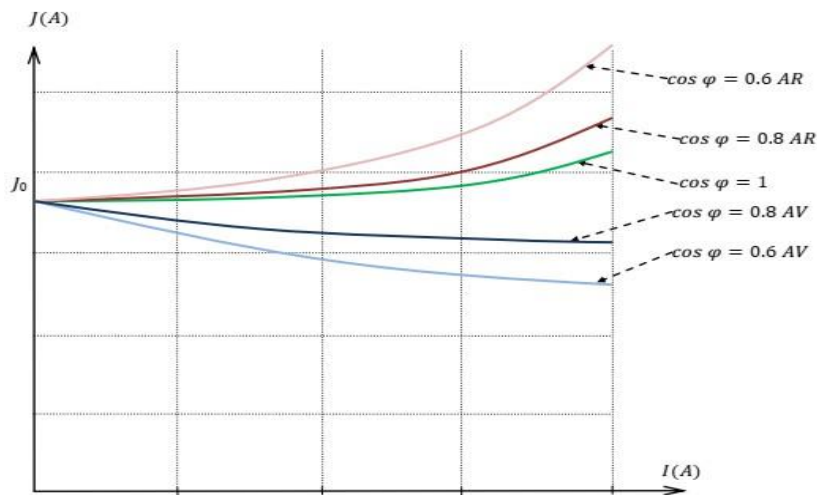
Ces courbes peuvent être déduites directement du diagramme de la figure II.5 et les courbes de la caractéristique externe. Afin de maintenir une tension aux bornes de l'alternateur constante, nous devons ajuster pour chaque variation de charge, la valeur du courant d'excitation. Cette variation sera donc d'autant plus importante que la somme des différentes chutes de tension sera élevée (Figure II.7).

Pour une charge résistive, Nous devons donc créer plus de f.é.m afin de compenser la chute de tension ohmique de la résistance interne du bobinage statorique et la chute de tension due à la réaction d'induit. Comme ces deux chutes de tension vont dans le sens de réduire la f.é.m, nous, nous devons toujours augmenter le courant d'excitation.

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 palier de charge. En tenant compte de la réaction d'induit qui est longitudinale démagnétisante, plus le courant de charge augmente, plus le flux inducteur est réduit qui bien évidemment se répercute sur la f.é.m. On doit donc compenser une chute de tension plus forte en augmentant pour de même palier de charge beaucoup plus le courant d'excitation.

Sur charge capacitive, Dans ce cas, il s'agit de la réaction d'induit longitudinale magnétisante.[35]

On a donc une augmentation du flux inducteur en fonction de la charge. Cette augmentation fait apparaître une augmentation de la f.é.m qui se traduit par une tension aux bornes de l'alternateur trop élevée que l'on doit réduire en diminuant l'excitation.



FigII.7. Courbes de variation (I) à vitesse et tension constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance.

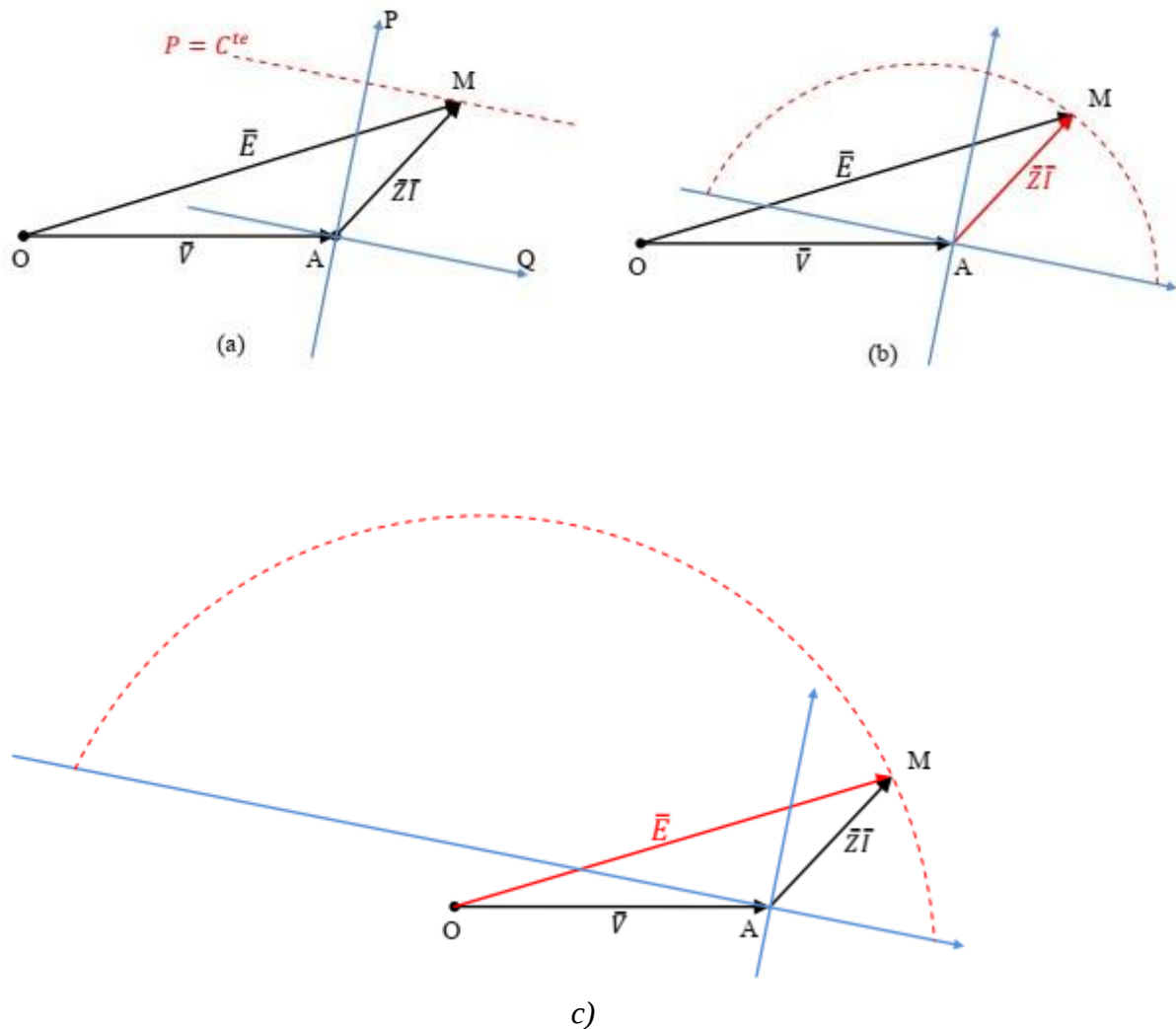
II.4.4. Caractéristique en charge d'un alternateur relié à un réseau puissant

Il arrive souvent qu'on branche un alternateur à un grand réseau comportant déjà plusieurs centaines d'alternateurs. Ce réseau est tellement puissant qu'il impose une tension et une fréquence constantes à tout appareil branché à ses bornes. C'est pourquoi on l'appelle réseau infini. Une fois couplé à un grand réseau (réseau infini), un alternateur fait partie d'un système comprenant des centaines d'autres alternateurs. Il est alors impossible de préciser la nature de la charge (grosse ou petite, résistive, inductive ou capacitive) branchée aux bornes de cet alternateur en particulier.[18]

II.4.4.1. Détermination du fonctionnement

La tension et la fréquence étant appliquées aux bornes de la machine (constantes), les paramètres restants qui caractérisent le point de fonctionnement sont la f.é.m (par action sur le courant d'excitation) et le courant de charge (par action sur le couple mécanique).

- Le fonctionnement de l'alternateur à puissance fournie constante est déterminé par le courant d'excitation qui donne la f.é.m correspondante. Ainsi, le point de fonctionnement se déplace selon l'axe $P = C_{te}$ parallèle à l'axe des puissances réactives (figure II.8.a).
- Le fonctionnement de l'alternateur à courant constant est déterminé par le courant d'excitation et le couple mécanique sur l'arbre de la machine. Ainsi, le point de fonctionnement se déplace selon le demi-cercle de centre A et de rayon Z. (figure II.8.b).
- Le fonctionnement de l'alternateur à courant d'excitation constant est déterminé par le couple mécanique sur l'arbre de la machine. Ainsi, le point de fonctionnement se déplace selon le demi-cercle de centre O et de rayon (figure II.8.c).



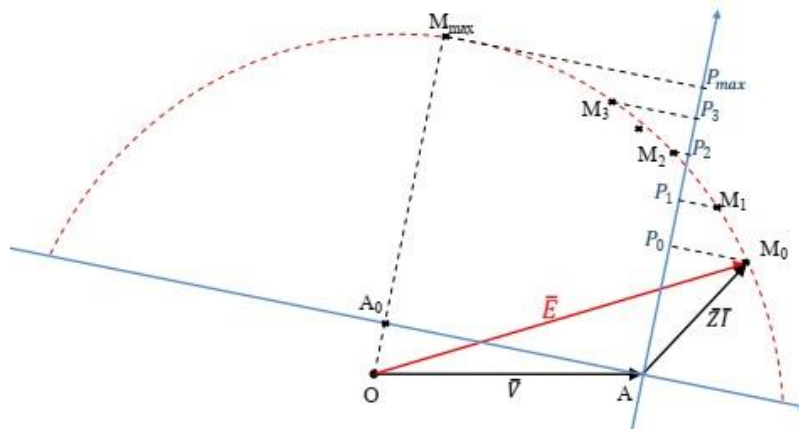
FigII.8. Représentation du fonctionnement d'un alternateur à tension et fréquence constantes.

II.4.4.2. Puissance maximum

Supposons un alternateur relié à un réseau puissant (tension et fréquence constantes). Sous une excitation constante, la puissance fournie par l'alternateur à ce réseau est limitée par un maximum. Lorsque le couple mécanique sur l'arbre de la machine augmente, la puissance active fournie au réseau augmente aussi et le point de fonctionnement se déplace selon un cercle de centre O et de rayon E passant du point initial M_0 à M_1 puis M_2 jusqu'à atteindre M_{max} . En dehors de ce point, la puissance active diminue.[11]

Si l'on cherche à dépasser cette limite (en augmentant le couple de la turbine), l'alternateur perd son synchronisme et s'emballe du réseau (Phénomène d'emballement). Le rotor se met à tourner plus vite que le champ tournant du stator et des courants intenses circuleront dans ce dernier.

En pratique, cette condition ne se produit jamais car les disjoncteurs de protection s'ouvrent aussitôt.



FigII.9.Représentation de la puissance maximum d'un alternateur à tension, f.é.m et fréquence constantes

La puissance maximale qu'un alternateur peut débiter dans un réseau infini correspond au point déterminé par le tangent du cercle et le parallèle à l'axe de puissances réactives. La puissance active maximale est alors :

$$P_{max} = A M_{0\ max} \frac{3V}{Z} = (OM_{max} - OA_0) \frac{3}{Z} = (E - V \cos \xi) \frac{3V}{Z} \quad (II.1)$$

Avec ξ est l'argument de l'impédance interne de l'alternateur ($\tan(\xi) = \frac{X}{R}$)

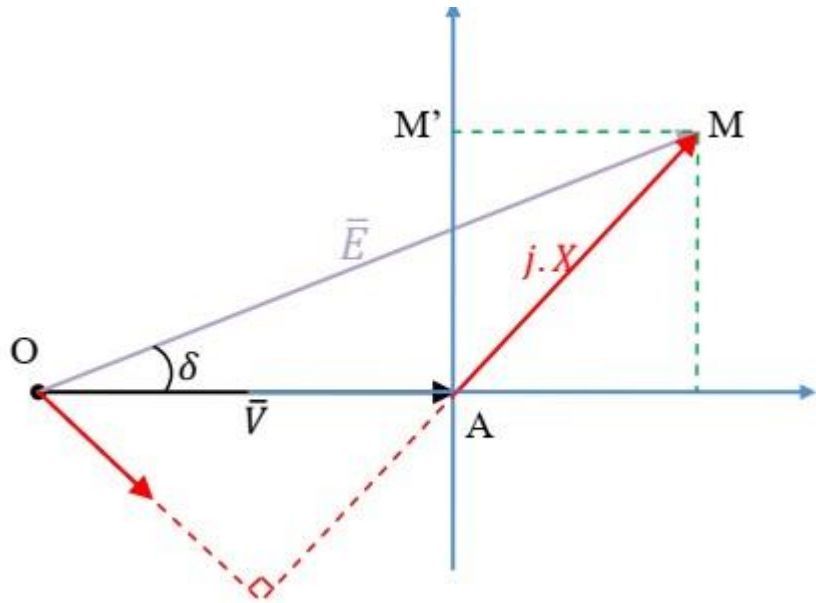
Lorsqu'on néglige la résistance interne devant la réactance synchrone, on obtient :

$$P_{max} = \frac{3VE}{X} \quad (II.2)$$

II.4.4.3. Stabilité des alternateurs

Les machines synchrones sont fréquentes dans les réseaux industriels. Elles peuvent être installées pour différents besoins à savoir la production d'énergie électrique et la compensation d'énergie réactive. Elles jouent un rôle prédominant afin d'assurer en permanence l'équilibre entre la production et la consommation. Les générateurs, les récepteurs et les réseaux électriques qui les relient ont des inerties mécaniques et/ou électriques qui rendent difficile le maintien de l'équilibre garantissant une fréquence et une tension relativement constantes. Normalement, face à une variation de puissance, le système électrique, après quelques oscillations, retrouve un état stable.

En tenant compte de l'angle interne (entre le vecteur tension et le vecteur f.é.m, en pratique il représente le décalage entre le rotor et le champ tournant) et en négligeant R, un calcul rapide montre que la puissance électrique active transmise au réseau se calcule par (figure II.10) [36]:



FigII.10.Représentation de l'angle interne δ

$$\frac{P}{X} = \frac{E}{X} \sin \delta \quad (II.3)$$

Il est clair que la puissance électrique transmise au réseau est maximum lorsque la valeur de l'angle interne δ atteint $\frac{\pi}{2}$. Afin que le fonctionnement soit stable, il faut que l'angle interne reste inférieur à un angle limite proche de $\frac{\pi}{2}$.

II.4.5. Caractéristique du moteur synchrone

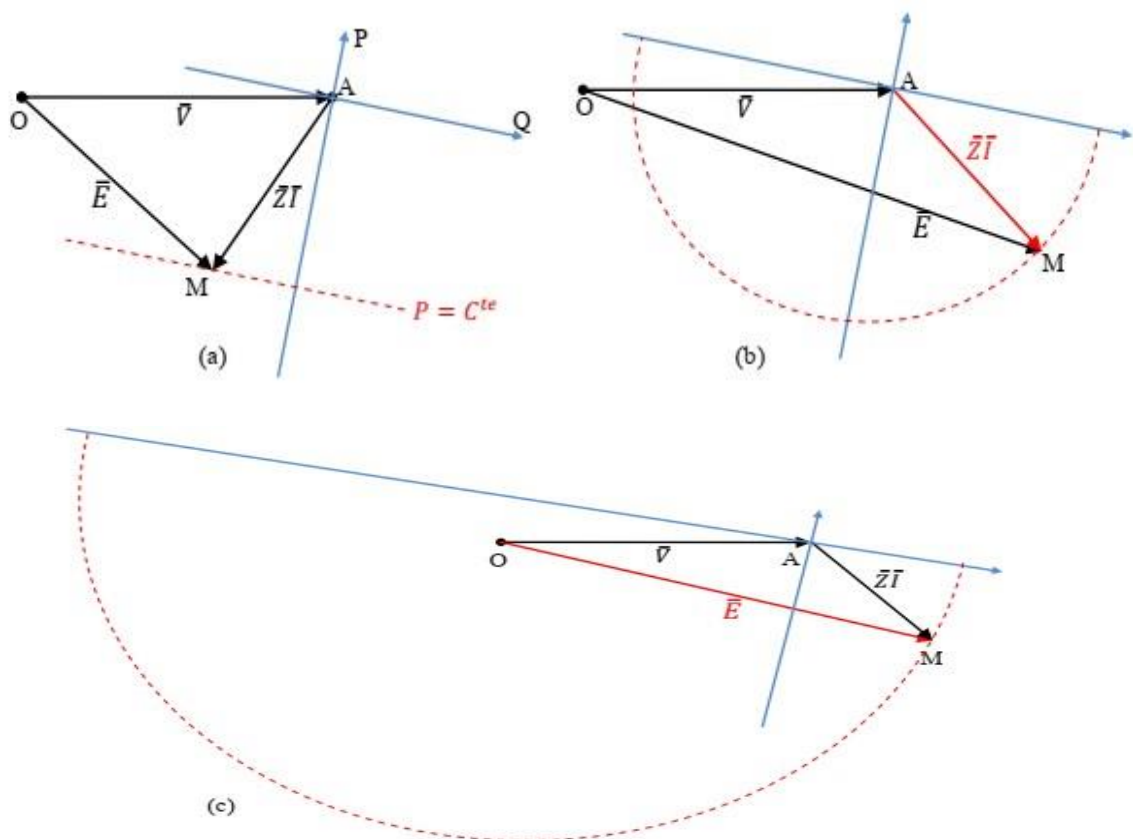
L'interaction entre les champs d'induction étant un phénomène réversible, rien n'empêche la machine synchrone de fonctionner en moteur. Il suffit pour cela d'alimenter son enroulement du stator par un réseau triphasé adéquat en présence du champ inducteur au rotor. Le seul problème qui se pose, c'est que le champ rotorique est indépendant et qu'il tourne dans l'entrefer à la vitesse du rotor. L'interaction mécanique est donc nulle tant qu'il n'y a pas de synchronisme, ce qui élimine toute possibilité de démarrage direct sur un réseau à fréquence fixe. On peut remédier à ce problème en assurant une alimentation à fréquence variable en fonction de la vitesse instantanée du moteur synchrone (une méthode connue sous le nom du 'autopilotage du moteur synchrone'). Durant notre étude on s'intéresse qu'au régime établi, où le moteur tourne effectivement à la vitesse de synchronisme.

La tension aux bornes du moteur synchrone lui étant imposée par le réseau qui l'alimente, il est évident donc d'étudier le fonctionnement du moteur à tension constante.[36]

II.4.5.1. Détermination du fonctionnement

La tension et la fréquence étant appliquées aux bornes de la machine (constantes), les paramètres restants qui caractérisent le point de fonctionnement sont la f.é.m (par action sur le courant d'excitation) et le courant de charge (dépendant de la charge entraînée).

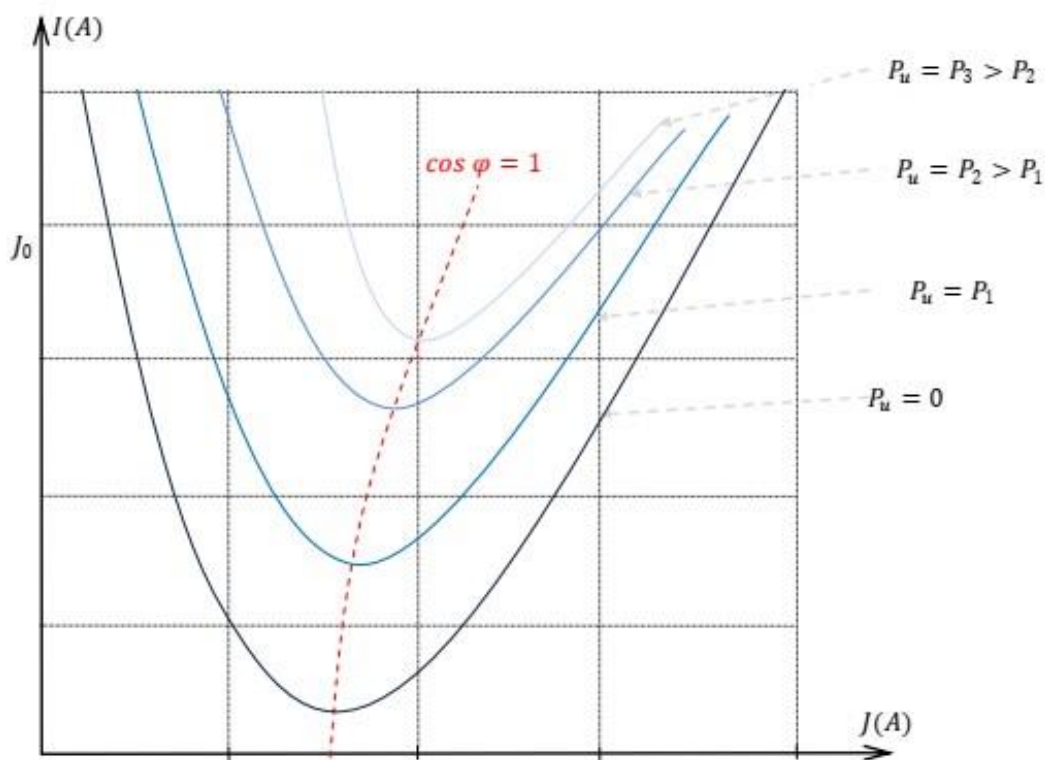
- Le fonctionnement du moteur synchrone à puissance absorbée constante est déterminé par le courant d'excitation qui donne la f.é.m correspondante. Ainsi, le point de fonctionnement se déplace selon l'axe $P = C^{te}$ parallèle à l'axe des puissances réactives (figure II.11.a).
- Le fonctionnement du moteur synchrone à courant constant est déterminé par le courant d'excitation et le couple résistant de la charge entraînée. Ainsi, le point de fonctionnement se déplace selon le demi-cercle de centre A et de rayon Z. (figure I.11.b).
- Le fonctionnement du moteur synchrone à courant d'excitation constant est déterminé par le couple résistant de la charge entraînée. Ainsi, le point de fonctionnement se déplace selon le demi-cercle de centre O et de rayon (figure II.11.c).



FigII.11.Représentation du fonctionnement d'un moteur synchrone à tension et fréquence constantes

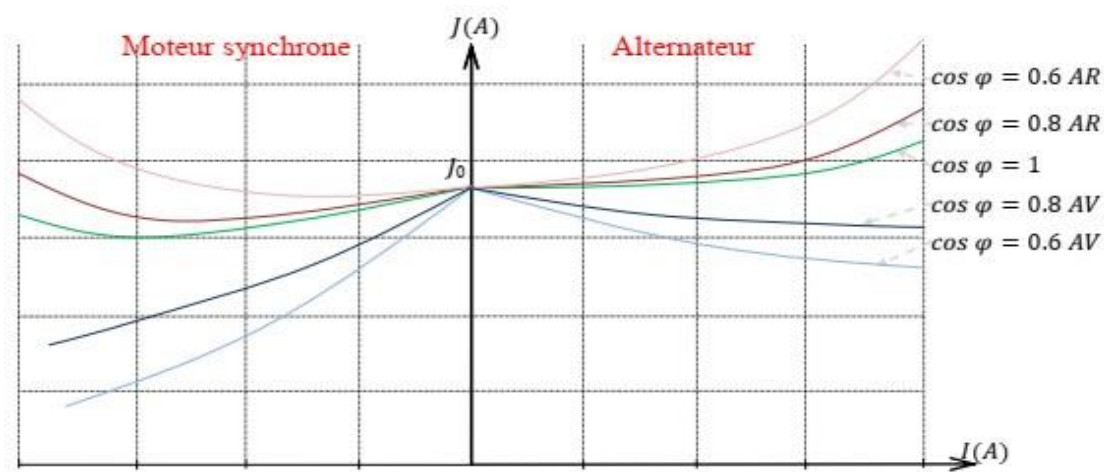
A puissance constante, le point de fonctionnement peut se situer à droite ou à gauche de l'axe de puissances actives selon la valeur de l'excitation. On remarque que l'action sur l'excitation permet d'absorber (à gauche) ou de fournir (à droite) et de fonctionner à $\cos\varphi$ unitaire (sur l'axe).

On trace les courbes de variation du courant de charge en fonction du courant d'excitation $I(J)$ qui s'appellent courbes de Mordey ou à cause de leurs formes courbe en V. Les lieux des minimums correspondent à $\cos\varphi$ unitaire.[36]



FigII.12.Courbes de variation (I) à vitesse et tension constantes pour différentes valeurs de la puissance

On peut même déduire la caractéristique (I) à $\cos\varphi$ constant, en prolongeant celle de l'alternateur. Mais elle sont peu différentes à cause de légère inclinaison de l'axe de puissance par rapport au perpendiculaire de la tension $\bar{V}$.[36]



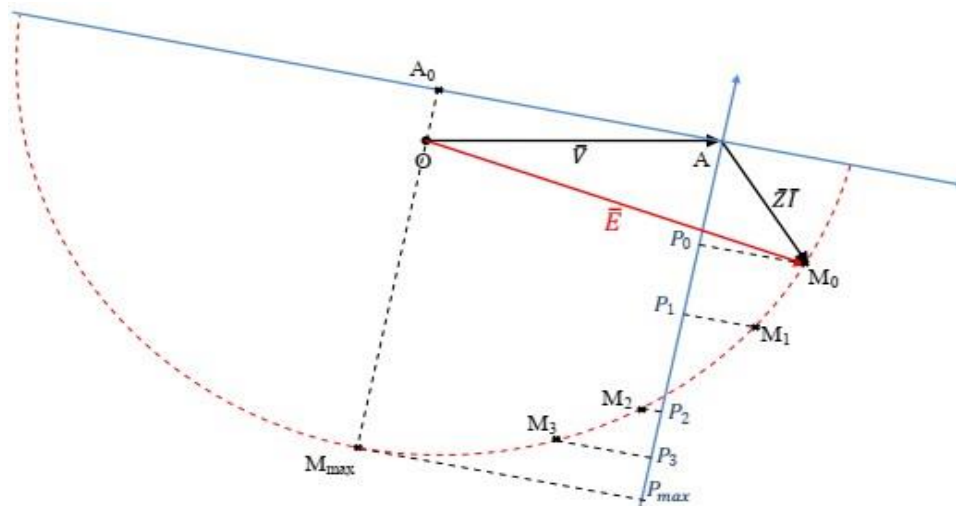
FigII.13. Courbes de variation (I) à vitesse et tension constantes pour différentes valeurs du facteur de puissance

II.4.5.2. Couple maximum à tension et fréquence constantes

Supposons un moteur relié à un réseau puissant (tension et fréquence constantes). Sous une excitation constante, la puissance absorbée par le moteur de ce réseau et ainsi la puissance mécanique fournie est limitée par un maximum.

Lorsque le couple résistant sur l'arbre de la machine augmente, la puissance active absorbée du réseau augmente aussi et le point de fonctionnement se déplace selon un cercle de centre O et de rayon E passant du point initial M_0 à M_1 puis M_2 jusqu'à atteindre $M_{\max}$. En dehors de ce point, la puissance active diminue.

Si l'on cherche à dépasser cette limite (en augmentant le couple résistant), le moteur perd son synchronisme et se décroche (Phénomène de décrochage). Le rotor se met à tourner moins vite que le champ tournant puis il s'arrête.



FigII.14.Représentation de la puissance maximum d'un moteur à tension, excitation et fréquence constantes

La puissance maximale qu'un moteur peut absorber d'un réseau infini correspond au point déterminé par le tangent du cercle et le parallèle à l'axe de puissances réactives. La puissance active maximale est alors[24] :

$$P_{max} = A M_0 \frac{3V}{Z} = (OM_{max} - OA_0) \frac{3V}{Z} = (E - V \cos \xi) \frac{3V}{Z} \quad (II.4)$$

Avec ξ est l'argument de l'impédance interne du moteur ($\tan(\xi) = \frac{X}{R}$). Lorsqu'on néglige la résistance interne devant la réactance synchrone, on obtient :

$$P_{max} = \frac{3VE}{X} \quad (II.5)$$

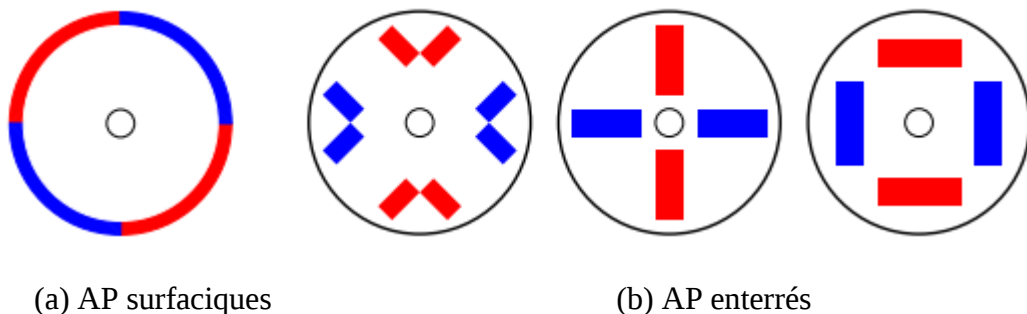
négligeant quelques pertes au stator, le couple électromagnétique maximum est directement lié à la puissance maximum comme suit :

$$C^{max} = \frac{P_{max}}{\Omega} = \frac{3VE}{X\Omega} \quad (II.6)$$

II. 5. Principe de fonctionnement d'une machine synchrone

Le stator d'une machine synchrone est triphasé, comme celui d'une machine asynchrone. Le champ tournant du stator peut être vu comme un aimant fictif qui tourne à la vitesse de synchronisme autour du rotor ; il existe trois types d'interaction entre le champ tournant et le rotor de façon à avoir une vitesse de rotation rotorique égale à celle de synchronisme (figure .II.15) [37]:

- Champ tournant - électroaimant : dans ce cas le rotor est bobiné et excité par une source DC, c'est le cas de la MSRB ;
- Champ tournant - aimant permanent : il s'agit des MSAP, où le rotor est équipé d'aimants permanents qui peuvent être surfaciques ou enterrés (figure .II.15).
- Champ tournant - matériau ferromagnétique : on parle ici des MSRV, dans ce type de machines, le rotor présente une structure saillante, et le principe de fonctionnement se base sur l'alignement du rotor avec le champ tournant de façon à assurer un chemin magnétique à réluctance minimale (i.e. flux maximal).

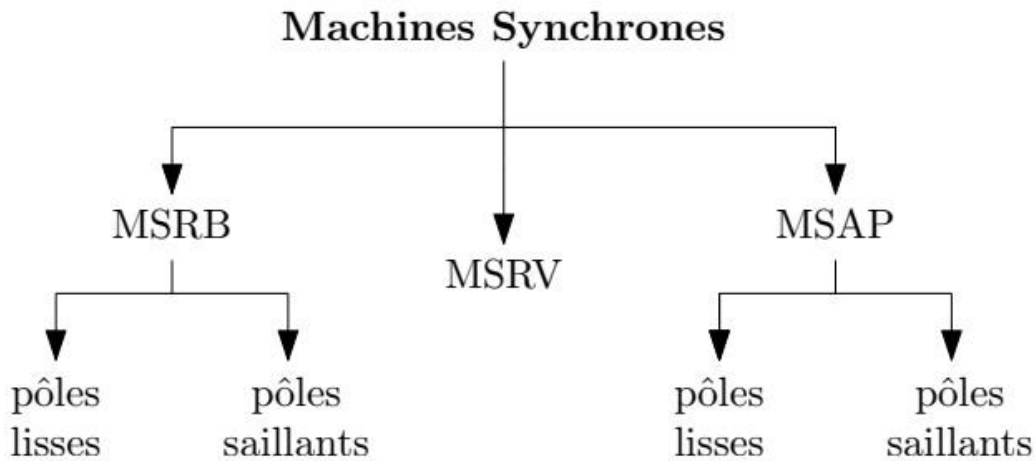


FigII.15.Exemples de rotors des MSAP

Toutefois, on peut combiner plusieurs types de rotor pour adapter la machine à une application spécifique, on cite à titre d'exemple :

- MSRB à pôles saillants
- MSAP à pôles saillants
- MSRV assistée par des AP
- MSRB avec des AP (machine à excitation hybride)

Du point de vue de la modélisation, sous les hypothèses classiques, on regroupe les MS dans 5 catégories présentées dans la figure .II.16 ; on appellera, par exemple, MSAP à pôles saillants toute machine comportant des aimants au rotor avec une saillance (y compris les MSAP enterrés et les MSRV assistées par des AP).[40]



FigII.16.Classification des machines synchrones

Les MSRB possèdent un degré de liberté supplémentaire, par rapport aux MSAP et MSRV : le flux rotorique est réglable. Ceci permet d’avoir un facteur de puissance réglable et d’effectuer un défluxage plus aisé par le réglage du courant d’excitation. En revanche, le couplage entre les dynamiques statorique et rotorique rend la commande de cette machine plus complexe.

De plus, l’alimentation du rotor nécessite une électronique supplémentaire, ce qui diminue le rendement de la machine par rapport à la MSAP. De plus, les contacts glissants du rotor limitent sa vitesse de rotation.

Les MSAP sont des machines sans balais (Brushless) ; les pertes sont surtout localisées au stator, ce qui améliore le rendement de la machine par rapport à la MSRB. De plus, elles possèdent une puissance massique importante. La commande de ces machines est un domaine relativement mûr aujourd’hui, en comparaison avec les MSRB. Les points faibles de la MSAP, hormis son coût assez élevé, sont l’ondulation du couple et le risque de dé magnétisation dans certaines conditions de fonctionnement.

Les MSRV sont aussi des machines sans balais, mais également sans aimants, ce qui réduit notablement leur coût. La conception et la commande de ces machines sont encore des

domaines ouverts ; le prix croissant des aimants permanents utilisés dans les MSAP augmente la compétitivité des MSRV.

II.6. Avantages et inconvénient des machines synchrones

II.6.1 Les avantages

La machine synchrone à Aimants Permanents présente plusieurs avantages par rapport à d'autres types de machines à courant continu synchrone a excitation électriques ou asynchrone.

Parmi ces avantages on peut citer [8], [9] :

- Meilleures caractéristiques thermiques la localisation de pertes joules et pertes fer au stator simplifie le refroidissement de la machine.
- Puissance massique et volumique importante.
- Un rendement et facteur de puissance élevé.
- K2 Aucun courant d'excitation (30% de perte ou moins)
- Une capacité à fonctionner à haute, voir très haute vitesse.

II.6.2 Les inconvénients

- Dans le moteur synchrone à aimants permanents le commutateur du moteur à courant continu est remplacé par un commutateur électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle de ce moteur plus complexe et couteux que celui d'un moteur à courant continu.
- Un désavantage du moteur synchrone est la présence de pulsations de couple. Selon la méthode de commutation utilisée, le moteur synchrone est plus ou moins sujet à ce phénomène. La commutation sinusoïdale d'un contrôleur complexe et de capteur de courant sophistiqué (couteux). La commutation trapézoïdale, permet d'utiliser un contrôle et des capteurs de courant plus simple et moins couteux (exemple : capteur à effet hall) mais implique la présence de fort couple.
- La présence d'aimants permanents majore le prix de moteur synchrone, notamment dans le cas de l'utilisation d'Aimants du type terre rare, ces aimants présentent de très grande qualité (champ coercitif, tenue en chaleur, etc.) par rapport aux Aimants<<ferrite>> mais ont un prix aussi beaucoup plus élevé.
- Le contrôle basé sur une commutation électronique augmente la complexité et donc le prix du contrôleur et de variateur. A cela s'ajoute le coût des capteurs supplémentaires nécessaires à la boucle du courant.

- Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale, défluxage impossible dans les machines à courant continu, possible dans les machines synchrones par contrôle de l'angle d'autopilotage.
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants [10], [11].

Conclusion :

Dans ce chapitre , nous avons fait un aperçu général sur cette machine qui n'est autre que la machines synchrone , nous avons abordé sa conception et son champ d'utilisation et surtout sur sa flexibilité quand à sa réversibilité dont elle peut fonctionner en moteur ou en générateur de façon à pouvoir transformer une énergie électrique en énergie mécanique ou l'inverse et nous avons traité ces deux cas concernant leur principe de fonctionnement .

Encore nous avons vu les différents aspects de cette machine qui a s'est imposé récemment dans le monde industriel , nous avons passé en revue ses caractéristiques et ses différentes classifications .

En outre nous avons insisté en notre sens sur l'utilisation la plus répandue dans l'industrie de ce machines synchrones triphasées qui permettent la transformation mécanique- électrique qui sont les plus largement utilisées dans les centrales électriques pour la production d'énergie sans perdre de vue leur utilisation dans d' autre domaine.

Enfin nous avons essayé de voir les avantages et inconvénients de ce type de machines et sa compétitivité avec d'autres machines dans le monde industriel .

Chapitre III

**Etude des défaillances
des moteurs synchrones**

III.1. Introduction

En réalité ce chapitre va traiter le fond du sujet de ce mémoire en l'occurrence Les défaillances des machines synchrones qui sont dues à des défauts qui peuvent surgir à n'importe quel moment durant leur fonctionnement .

A savoir que défaillance des machines électriques est tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court terme provoquer son arrêt , sa panne ou carrément son dommage. l'origine de cette défaillance peut être provoquer par plusieurs facteurs lors de la mise en service de ces machines et généralement se traduit par l'apparition des défauts dont subissent ces machines , donc ces défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou magnétiques.

Ces défauts qui ne sont pas uniquement tous spécifiés aux machines synchrones , mais peuvent aussi s'élargir pour toucher d'autres machines électriques et surtout les machines asynchrones .

Nous savons aussi que ces machines synchrones ont un large spectre d'utilisation dans les divers domaines d'industrie ainsi que dans le domaine domestique , elles sont réversibles et peuvent fonctionner en générateur (Alternateur) ou en moteur (Moteurs synchrones ou compensateurs synchrones). ce qui nous conduit à dire que les défauts dont peuvent subir ces machines lors de leurs utilisations dans ces domaines sont aussi nombreuses .

Comme toute machine électrique , une machine synchrone comporte un stator et un rotor qui peut être un électro-aimant alimenté en continu (appelé "circuit d'excitation" ou "inducteur"), ou d'un enroulement monophasé excité en courant continu aussi les bobinages polyphasés du stator (en général triphasé) forment l'induit de la machine . En ce qui concerne le stator ,lui aussi est constitué de bobinage traversé par un courant qui peut être triphasé .

Donc tous ces éléments constitutifs de ces machines synchrones peuvent être affectés lors de leurs fonctionnements que ce soit par court-circuit ou surcharge électrique , surchauffe électrique ;vibrations ... sans perdre de vue l'usure de leurs parties mécaniques tournantes , leur échauffements ou parfois rupture totale de ces dernières ce qui provoquent des arrêts de fonctionnements de ces machines et des pannes qui peuvent avoir des conséquences sur la production dans les installation industrielles ou l'arrêt du service alloué à ces machines.

L'objectif de ce chapitre est donc de connaître tous ces défauts qui sont à l'origine des défaillances de ces machines et surtout savoir les diagnostiquer et les localiser pour pouvoir y remédier .

III.2. Différents défauts et diagnostics des défaillances des machines synchrones

Comme on vient de le citer le champ de défauts de ces machines est très vaste , on essaie de cerner les défauts les plus fréquents , définir leur origine et interpréter leurs conséquences et tracer les représentations vectorielles résultant de quelques défaillances .

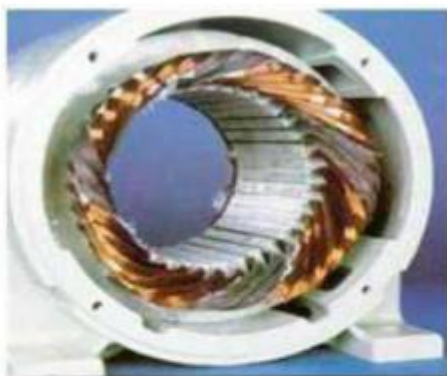
III.2.1. Défaut statorique

La principale source de défauts dans une machine électrique provient des bobinages. Les effets d'usure comme les frottements ou le vieillissement des matériaux ont un effet sur l'intégrité des fils et de leur isolant. Si cet isolant est trop endommagé, ces bobinages peuvent alors se mettre en court-circuit ou alors, lorsque le fil lui-même est endommagé, sera en circuit ouvert. Il peut y avoir différents types de défauts dont les conséquences sont différentes .

Ces différents défauts sont donnés sur la Figure III.1 [41] , à savoir :

- Ouverture d'une phase (fig a)
- Court circuit d'une phase (fig b)
- Déséquilibre de l'alimentation (fig c)
- Damage dû à la surcharge (fig d)
- Masse dans l'encoche (fig e)
- Dégradation causée par une surtension (fig f)

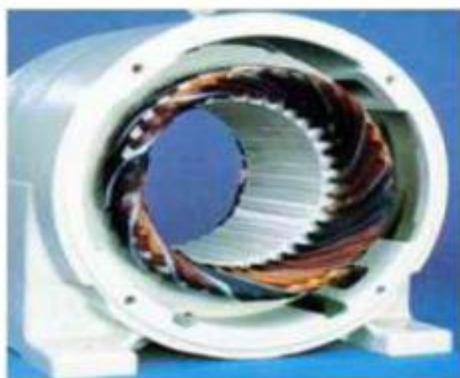
Ces défauts ont été localisés dans le circuit stator de la machine .



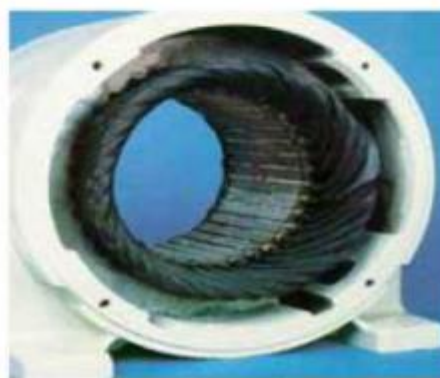
a) Ouverture d'une phase



b) Court-circuit dans une phase



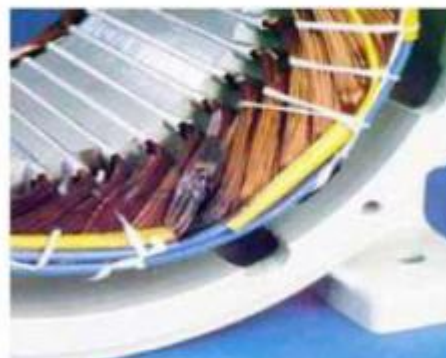
c) Déséquilibre de l'alimentation



d) Damage dû à la surcharge



e) Masse dans l'encoche



f) Dégradation causée par une surtension

Fig III.1. Différents défauts statoriques. [41]

III.2.1.1. Les défauts de bobinage statorique

Ceux-ci peuvent être soit une ouverture, soit un court-circuit d'une ou de plusieurs phases du bobinage statorique. Dans le cas d'une spire court-circuitée, la machine peut continuer à fonctionner, mais si le courant de court-circuit est important il peut entraîner une surchauffe de l'enroulement statorique et ainsi amplifier le défaut en produisant des courts circuits entre deux phases ou entre une phase et le neutre de la machine. Il est donc très important de détecter un tel défaut très rapidement avant la destruction complète de la machine. Comme montre la figure IV.2, dans les enroulements statoriques, il peut y avoir cinq cas de défauts à savoir : court-circuit enter-spires, court-circuit à la tête de la bobine, ouverture de la phase, court-circuit phase à phase, court-circuit phase- terre [42].

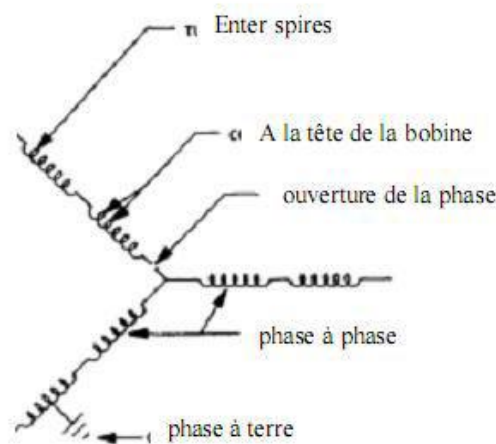


Fig IV.2. Les courts-circuits dans les enroulements statoriques

III.2.1.2. Court-circuit dans une phase

Un court-circuit dans une phase est un des problèmes les plus difficiles à tolérer [40].

Dans ce cas, la littérature présente la phase concernée comme perdue. Sur une machine triphasée avec un onduleur à 3 bras, cela implique l'arrêt de la machine à cause des conséquences physiques sur le moteur en cas de maintien de l'alimentation. La conséquence la plus importante est l'apparition des courants de court-circuit, le principal problème étant l'échauffement important. L'importance des courants de défaut dépend directement du nombre de spires en court-circuit. Il faut aussi prendre en compte le fait que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant est une valeur à caractériser pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement suite à la panne de la machine [40].

III.2.1.3 Circuit ouvert sur une phase

Un circuit ouvert dans une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit.

L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de défaut et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production de couple.

Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur à trois bras, la seule manière de pouvoir assurer un minimum de fonctionnement est de piloter les deux phases restantes, c'est-à-dire avec un fonctionnement équivalent à une machine à une phase. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle)[39].

III.2.1.4 défaut d'isolement des enroulements

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuits. En effet, les différentes pertes (joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants de la machine. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Les différentes causes de ce type de défauts sont [37] :

- ✓ dégradation de l'isolant à la fabrication,
- ✓ tension de l'enroulement supérieur à la limite du matériau d'isolation,
- ✓ courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge,
- ✓ vibrations mécaniques,
- ✓ vieillissement naturel des isolants.
- ✓ fonctionnement dans un environnement sévère.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase– masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact.

III.2.2 Défaillances rotoriques

Presque toutes les machines électriques ont une similarité de construction du stator et, par conséquent, les défauts sont également les mêmes. Toutefois, il existe une gamme de configurations du rotor selon le type de la machine. , les défaillances sont essentiellement dues à un problème [41]

- ✓ thermique (surchauffe,...)
- ✓ électromagnétique (force en $B^2(t)$...)
- ✓ résiduel (déformation,...)
- ✓ dynamique (arbre de transmission,...)
- ✓ environnemental (agression,...)

Les défauts les plus courants, situés sur le rotor, peuvent être définis comme suit :

- Excentricité statique et dynamique et mixte.
- Désaimantation des aimants.

III.2.2.1 Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor).

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage) [40]. (Figure IV.3)

Trois cas d'excentricité, [40] sont généralement distingués :

- **L'excentricité statique**, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe
- **L'excentricité dynamique**, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe
- **L'excentricité mixte**, associant les deux cas précédemment cités. Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine.

En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement. Correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [37].

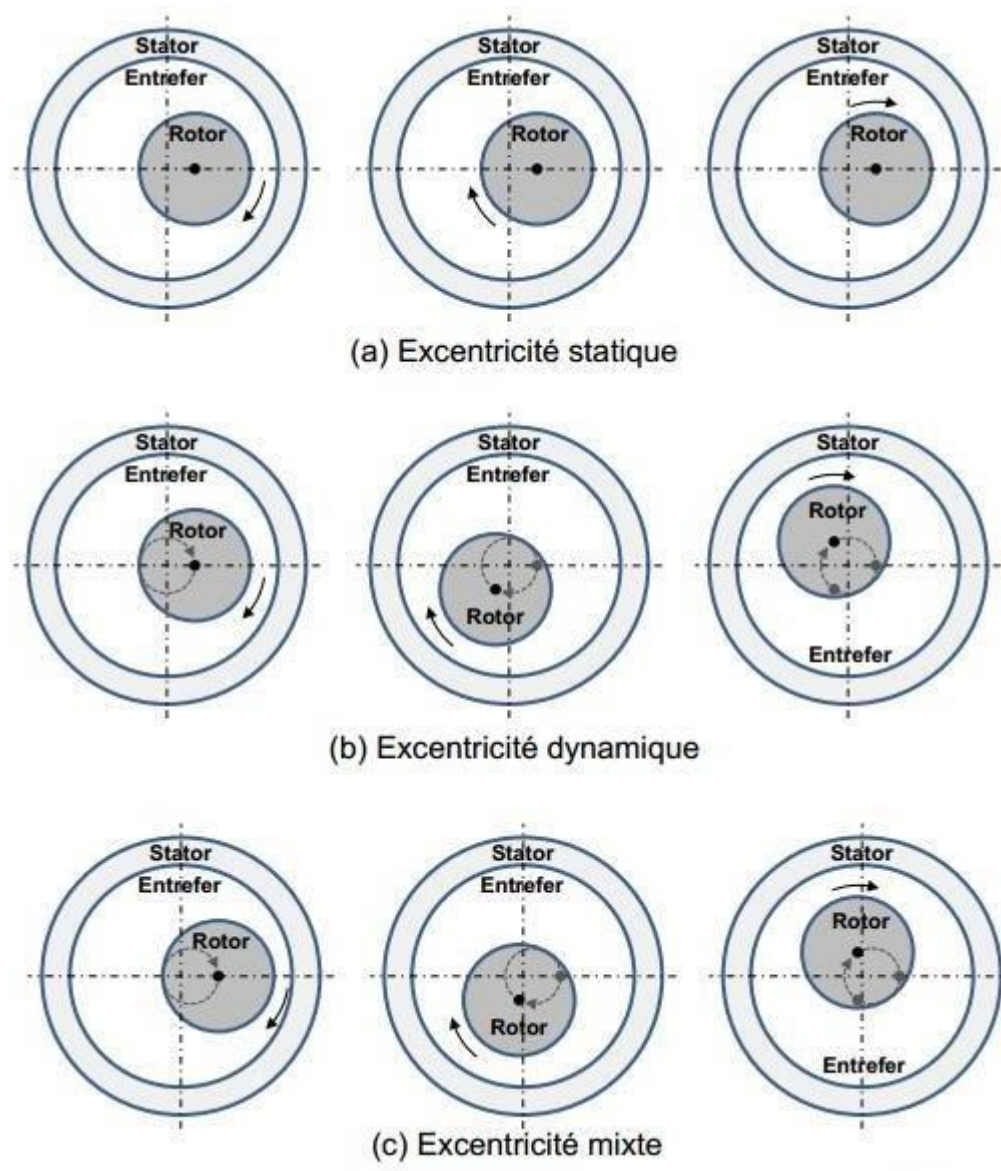


Fig III.3. Différents types d'excentricités [37].

III.2.2.2 Les défauts des aimants (Désaimantation)

Une des problématiques importantes des actionneurs associé avec les aimants permanents (AP) Est la désaimantation des AP. la désaimantation pour les machines à aimants est liée aux pertes Rotor et l'échauffement des aimants, accentuée par un niveau élevé de réaction induit.

Aujourd'hui, la plupart des travaux sur ce sujet concernent le comportement des AP en charge et leur capacité à supporter un champ de réaction magnétique d'induit intense dû à de forts courants. Pourtant, il existe aussi un risque de désaimantation lorsque l'inducteur n'est pas assemblé avec l'induit.[31]

Principalement, on peut distinguer deux situations concrètes. La première concerne le collage des AP de type Nd-Fe-B frittés ou composites (plasto-néodymes). Pour ce dernier type de matériau, l'induction rémanente, et le champ de rigidité limite, décroissent avec la température de fonctionnement de l'AP. Durant la polymérisation de la colle, un passage en étuve peut amener l'inducteur à une température supérieure à 100°C, entraînant une démagnétisation partielle des AP à cause du champ démagnétisant dans l'air. La seconde situation est celle des moteurs à stator réparti en secteurs. Ce type de moteur présente notamment l'avantage de la modularité, mais, durant une partie de la période de fonctionnement, les AP sont soumis au champ démagnétisant dans l'air.

L'utilisation d'AP de type ferrite ou en plasto-ferrite pose alors un problème à basse température, car pour ce type de matériau, le module du champ coercitif décroît avec la température [39].

III.3. Réaction d'induit d'une machine Synchrone

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 [35].

III.3. 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.

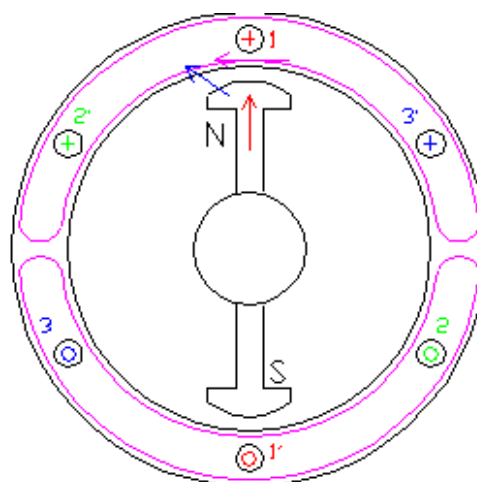


Fig III.4. Cas d'une charge résistive [35].

On réalise que le flux rotorique va être dévié par le flux statorique. Les conséquences seront que la fém induite au stator qui en théorie devrait être en 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 Fém 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 [35].

III.3.2 Cas d'une charge inductive

Dans ce type de charge le courant est en arrière sur la tension. Si la tension est maximale, le courant est donc en minimum. Hors la tension sera en 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.

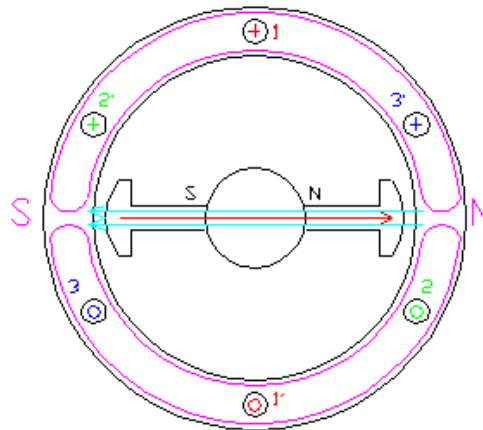


Fig III.5. Cas d'une charge selfique [35].

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 [35].

III.3.3 Cas d'une charge capacitive

Dans ce type de charge le courant est en avance sur la tension. Si la tension est en maximum, le courant est donc en minimum. Hors la tension sera minimale 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 [35].

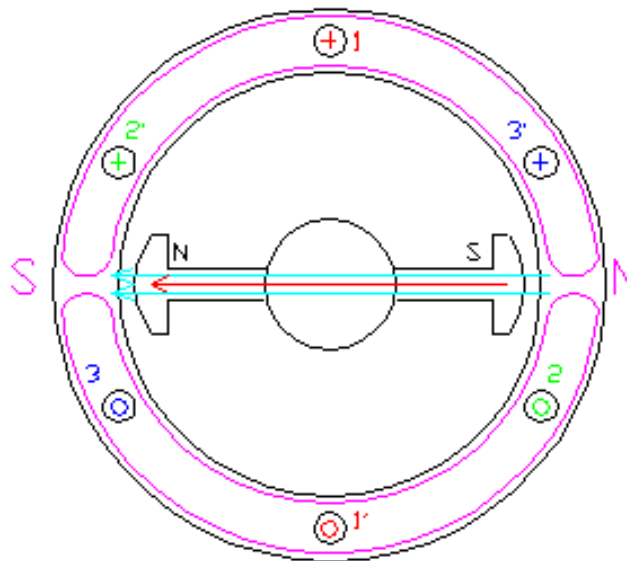


Fig III.6. Cas d'une charge capacitive [35].

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 plus le renforcement sera fort avec une augmentation proportionnelle de la tension d'exploitation, la réaction d'induit est longitudinal magnétisante [35].

III.3.4 Cas d'une charge mixte 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 Fém 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 [35].

III.4. Diagramme de la machine synchrone[37]

Dans ce sous chapitre , nous avons essayé de présenter quelques circuits électriques équivalent representants quelques défaillances citées ci-dessus ainsi que des representations vectorielles de diagramme de BEHN-ESCHENBURG et POTIER .

III.4.1. Diagramme de BEHN-ESCHENBURG

Ce diagramme est utilisé pour une MS à pôle lisse en régime linéaire (pas de saturation du circuit magnétique). Les flux engendrés par les courants inducteurs et induit sont indépendants. Ce qui permet de raisonner directement sur ces derniers en définissant :

- Le flux inducteur, créé par le courant d'excitation est proportionnel à ce dernier, et est le même qu'à vide qu'en charge (en d'autres termes, c'est le flux Φ_j évoqué plus haut).
- le flux de réaction d'induit, créé par le courant d'induit, proportionnel lui aussi au courant αI , où α est le coefficient d'équivalence qui permet de ramener le courant induit à celui de l'inducteur.

III.4.1.1. Exemple de représentation vectorielle des flux et Fém

Le coefficient d'équivalence α est un facteur tel que « I » Ampères du courant d'induit produisent le même flux que « αI » Ampères de l'inducteur.

D'une part, les flux et ainsi les f.é.m sont proportionnels aux courants qui les créent comme suit :

$$E = C \cdot J, E_l = C \cdot (\alpha I) \text{ et } E_r = C \cdot J_r \text{ avec } \vec{J}_r = \vec{J} + \alpha \vec{I} \text{ et la relation entre les 3 f.é.m est :}$$

$$\vec{E}_r = \vec{E} + \vec{E}_l \quad (\text{III.1})$$

En s'opposant sur cette équation et l'équation I.8

$$E_r = K \cdot N \cdot f \cdot \phi_r \quad (\text{III.2})$$

$$\vec{E}_r = \vec{V} + R\vec{I} + j\lambda\vec{I} \quad (\text{III.3})$$

nous construisons le diagramme vectoriel de la figure IV.7.a. Alors que la superposition des diagrammes équivalent aux équations IV.2 et IV.3 donne le diagramme de la figure IV.7.b.

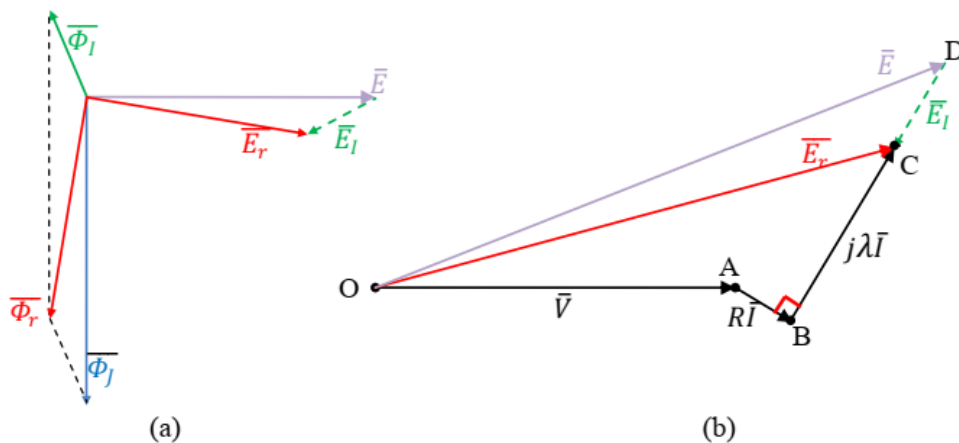


Fig III.7. Représentation des flux et f.é.m de la machine synchrone en régime permanent[33]

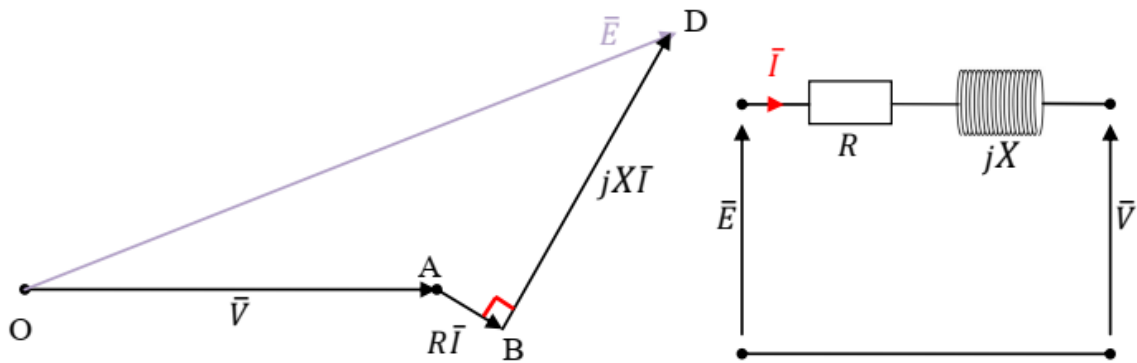
Sachant que : $BD = \lambda I + C\alpha I = (\lambda + C\alpha)I$ et en posant $\lambda + C\alpha = X$, l'équation générale régissant la MS devient :

$$\vec{E} = \vec{V} + R\vec{I} + jX\vec{I} \quad (\text{III.4})$$

Alors que le diagramme est donné par la figure IV.21 en montrant que les points O, A, B et D.

Ce diagramme est le diagramme de *Behn-Eschenburg* dit aussi diagramme à une seule réactance. On représente aussi sur cette figure le circuit monophasé correspondant.

X est dite la réactance synchrone. Elle tient compte de la totalité des chutes inductives. A savoir, la chute inductive due à l'inductance du flux de fuite et la réaction du flux d'induit.



FigIII.8. Diagramme de Behn-Eschenburg et le circuit électrique équivalent

On peut déterminer la valeur de la réactance X au moyen d'un essai à vide et un essai en court-circuit. Lors de l'essai à vide, l'alternateur est entraîné à la vitesse nominale et le courant d'excitation est ajusté de façon à produire la tension nominale E_n entre ligne et neutre.

On note alors la valeur du courant d'excitation J_{xn} correspondant. Ensuite, l'excitation est réduite à zéro, les trois bornes du stator sont mises en court-circuit, et on mesure le courant I_{cc} circulant dans les phases du stator pour la vitesse de rotation nominale et l'excitation J_{xn} .

La valeur de la réactance synchrone est alors :

$$X = \frac{E_n}{I_{cc}} \quad (\text{III.5})$$

En court-circuit, l'équation de la MS est :

$$0 = \vec{E}_n - (R + j.X)\vec{I}_{cc} \quad \text{D'où} \quad \sqrt{R^2 + X^2} = \frac{E_n}{I_{cc}} \quad (\text{III.6})$$

En négligeant R devant X , nous retrouvons la valeur calculée par la méthode décrite ci-dessus.

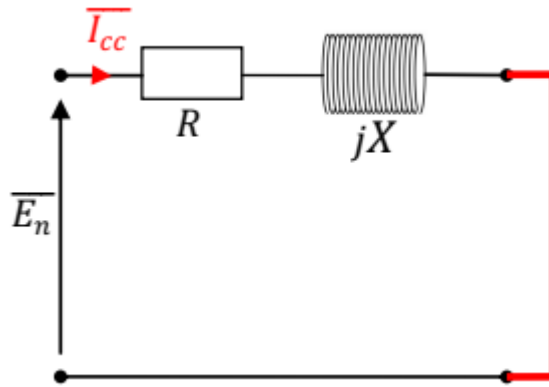
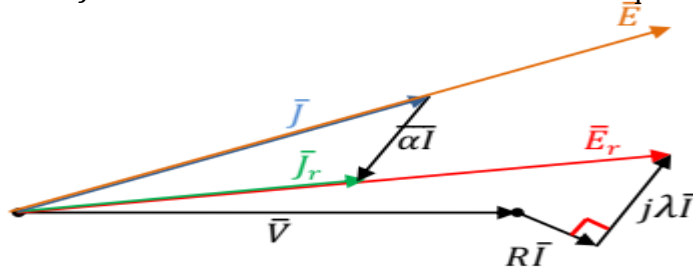


Fig III.9. Circuit électrique équivalent de l'essai en court-circuit[33]

III.4.2. Diagramme de POTIER

Ce diagramme est utilisé pour une MS à pôle lisse en tenant compte de la saturation du circuit magnétique. On trace d'abord le diagramme donnant la f.é.m résultante. Ensuite, on lit le courant réel J_r correspondant à E_r depuis la caractéristique à vide. On trace le vecteur $\overline{\alpha I}$ parallèle à l'axe aligné selon le vecteur $j\lambda \vec{I}$ prolonge qui est perpendiculaire au vecteur courant $\vec{I}$. On trouve donc le vecteur $\vec{J}$ allant de l'équation $\vec{Jr} = \vec{J} + \overline{\alpha I}$. Le sens du vecteur $\vec{E}$ est le même que le vecteur $\vec{J}$ et le module sera déduit de la caractéristique à vide.



FigIII.10. Représentation du diagramme de Potier[37]

Remarque: Si on ne tenait pas compte de la saturation, on retrouvera exactement le diagramme à réactance synchrone.

Afin de déterminer les paramètres de ce diagramme, on mesure la résistance R et on relève:

- La caractéristique à vide (J) à la vitesse nominale.
- La caractéristique en court-circuit I_{cc} (J) à la vitesse nominale.
- Un point de l'essai en déwatté (V_d, J_d, I_d) à la vitesse nominale.

Les courants et les tensions des deux derniers essais doivent être proches à ceux de la pleine charge.

Lorsqu'on débite sur une charge très inductive (essai en déwatté), et puisque la résistance de l'enroulement d'une phase est faible devant la réactance de la charge (figure IV.11), nous admettons que : $E_r \simeq V + \lambda I$ et $J \simeq J_r + \alpha I$ car les trois vecteurs $\vec{V}$, $j\lambda \vec{I}$ et $\vec{E}_r$ ainsi que $\vec{J}$, $\vec{J}_r$ et $\overline{\alpha I}$ ont presque la même direction.



En court-circuit, on suppose que ces deux dernières relations restent valables :

$$Er \simeq \lambda I \text{ et } J \simeq Jr + \alpha I \quad (\text{III7})$$

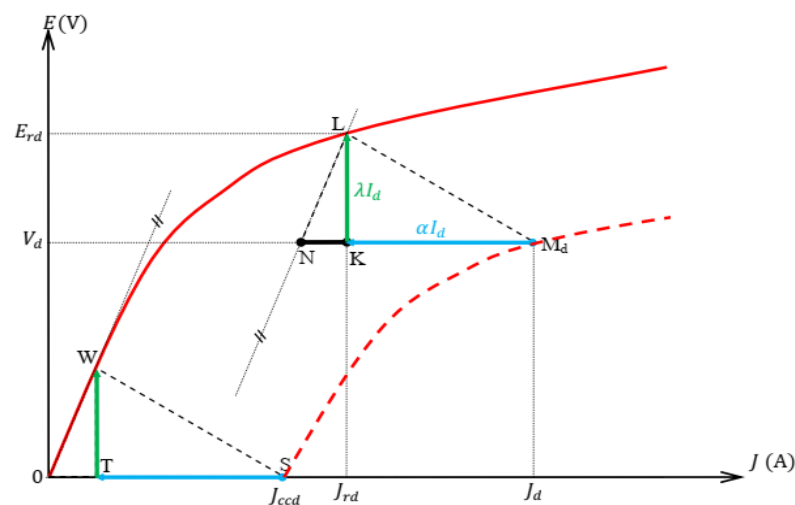
Ces approximations seront plus exactes si la résistance de l'enroulement d'une phase était plus faible.

Sur la caractéristique à vide (J), on pointe le point M_d de coordonnées (V_d, J_d) correspondant à l'essai en déwatté dont le courant absorbé est I_d . Une translation horizontale de $-\alpha I_d$ fait passer de M_d au point K de coordonnées $(V_d, J_d - \alpha I_d)$. Une translation verticale de $+\lambda I_d$ amène le point K vers le point L de coordonnées $(V_d + \lambda I_d, Jr_d)$ qui doit être un point de la caractéristique à vide mais on ne sait pas où car α et λ sont des paramètres inconnus.

De l'essai en court-circuit, on détermine le courant d'excitation J_{ccd} correspondant au courant de court-circuit de valeur égale à I_d . Ensuite, on pointe le point S de coordonnées $(0, J_{ccd})$. Les mêmes translations faites pour le point M_d amènent le point S au point T puis à un point W de la caractéristique à vide.

Puisque les triangles STW et M_dKL sont égaux. Le point L peut être déterminé par l'intersection de la caractéristique à vide et le parallèle de sa partie linéaire ^(IV 8) passant par le point N de coordonnées $(V_d, J_d - \alpha I_d)$. Ainsi, on peut déduire les paramètres α et λ graphiquement de telle sorte que :

$$M_dK = \alpha I_d \text{ et } KL = \lambda I_d$$



FigIII.11. Représentation de la détermination graphique des paramètres α et λ [39]

En rappelons qu'il y a d'autres diagrammes qui tiennent compte de la spécificité des machines ou moteurs synchrones et les différents modes de fonctionnement, autre que nous venons citer.

III.5. Méthodes des diagnostic des défauts des machines électriques

L'historique du diagnostic des défauts est aussi vieux que les machines électriques. En règle générale, la surveillance et le diagnostic exigent la détection et l'analyse des signaux contenant des informations spécifiques (symptômes) qui caractérisent la dégradation de la machine. [31]

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection de défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure, tel que la mesure du champ magnétique, du bruit, de la vibration...etc. d'autres sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur défaillant avec celles du moteur sain (courant statorique, couple électromagnétique, vitesse mécanique et puissance).

Les techniques de diagnostic sont généralement liées aux types de défauts. Certaines techniques sont plus adaptées pour un type particulier de défaut, d'autre peuvent être utilisées pour n'importe quel type de défaut. L'intérêt de la technique réside dans l'instrumentation employée, la facilité de sa mise en œuvre ainsi que la richesse de l'information fournie sur l'existence ou non du défaut et de sa sévérité.

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes méthodes de diagnostic. Ces méthodes sont classées en deux grandes familles, analytique ou heuristique, en fonction de la forme prise par la connaissance du comportement du système, et par conséquent, de la méthode d'analyse qui en découle.

La distinction est donc faite entre, les méthodes qui effectuent l'analyse des signaux d'acquisitions sans connaissance a priori, qualifiées de diagnostic externe [34], et celles qui nécessitent la formulation d'un modèle mathématique du système, qualifiées de diagnostic interne [34].

Toutes ces méthodes permettent de générer une information pertinente (paramètres, vecteur forme, règles, etc...) pour l'élaboration des indicateurs de défauts du système. Le choix d'une méthode se fera en fonction de la nature de ces indicateurs de défauts.

III.5.1. Méthodes internes

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles s'appuient sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié ou sur la différence entre le modèle et le processus (méthode des résidus). Une comparaison entre les paramètres mesurés ou calculés et ceux associés à un mode de fonctionnement normal (sain), nous renseigne sur la présence éventuelle d'un défaut [33][32].

Deux approches peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques.

La première repose sur le suivi des paramètres électriques caractérisant les modèles. Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres au cours d'un fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence de défauts. L'identification des paramètres peut se faire hors ligne. Elle se base alors sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux du système étudié [33]. Les paramètres peuvent aussi être identifiés en cours de fonctionnement à l'aide d'observateurs étendus. Le plus couramment utilisé est le Filtre de Kalman [33].

La deuxième approche consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Le modèle de processus est constitué de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables: des variables inconnues (variables internes, perturbations, entrées inconnues, ...) et des variables connues (consignes, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'un défaut survient.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour faire ressortir un résidu significatif de la présence de défaut (gradient, Newton-Raphson, ...). La difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu établi et un défaut particulier.

III.5.2. Méthodes externes

Nous avons vu que la première famille de méthodes nécessite la connaissance du comportement dynamique de la machine. Dans cette deuxième partie, nous nous intéressons aux résultats obtenus à partir du suivi direct des grandeurs telles que les courants, le couple estimé ou mesuré, les flux ou encore les vibrations [39].

Ces méthodes dites „sans modèles' se basent sur l'analyse des signaux d'acquisitions. Elles ont l'avantage de l'indépendance de l'analyse par rapport aux fluctuations internes du système. D'autre part, l'information contenue dans les signaux, n'étant pas filtrée par la modélisation, reste intacte.

III.5.2.1. Méthodes de l'intelligence artificielle

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment (diagnostic interne et externe), ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques liées à l'intelligence artificielle [33].

Ces techniques apportent aux systèmes de diagnostic des moteurs électriques la fiabilité, l'automatisation, la praticité et la sensibilité. Ces méthodes ne sont pas en concurrence avec les méthodes précédemment citées. Elles exploitent les signatures avec ou sans modèle, décrites précédemment, pour réaliser la supervision et le diagnostic du système. Elles possèdent, par ailleurs, de grandes facultés d'apprentissage. En effet, les récents développements dans le matériel et le logiciel permettent de produire un système pour la surveillance automatique des moteurs asynchrones en utilisant des techniques de traitement des signaux et des techniques de classification non supervisée pour le diagnostic des défauts.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer les systèmes experts, la logique floue, les réseaux neuronaux, leurs techniques hybrides, etc [33].

III.5.2.2. Méthodes de reconnaissance des formes

Les méthodes de diagnostic qui utilisent la reconnaissance des formes sont peu nombreuses à ce jour. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur de forme, est extrait à partir de plusieurs mesures. Les règles de décisions adoptées permettent de classer les observations, décrites par le vecteur de forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec et sans défaut.

Pour classer ces observations, il faut obligatoirement être en mesure de fournir les données pour tel ou tel mode de fonctionnement (fonctionnement avec un rotor sain à 0% de charge ou alors fonctionnement avec une barre cassée à 100% de charge par exemple). Pour cela, il faut disposer d'une base de données, ce qui permettra ensuite de construire la classe correspondante au défaut créé (possible pour les machines de petites et moyennes puissances). Une autre voie consisterait à calculer les paramètres du vecteur de forme en effectuant des simulations numériques de la machine étudiée (indispensable pour les moteurs de fortes puissances). Dans la dernière configuration, il faut un modèle comportemental de la machine relativement précis pour obtenir des paramètres les plus proches possibles de la réalité. Le choix de la classe à laquelle appartient le vecteur de forme mesuré s'effectue par exemple grâce à des algorithmes de type k-PPV (k plus proches voisins) ou par une approche utilisant les frontières de séparation [40].

III.5.2.3. Méthode d'analyse vibratoire

L'analyse des défauts des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet quasiment une détection de tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales [40].

Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

- problème d'accessibilité,
- difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut,
- De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs. Ceci laisse cette technique employée uniquement pour les grandes machines.

Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

III.5.2.4. Méthode thermique basée sur l'échauffement de la machine

Toute machine électrique dissipe une certaine quantité de chaleur due aux pertes mécaniques dans les roulements, aux pertes électriques dans les conducteurs et aux pertes magnétiques dans le fer. Il en découle des échauffements générateurs de contraintes thermiques et une diminution du rendement. Par ailleurs l'élévation de température apparaît dès la naissance du défaut. La mesure de celle-ci peut donc donner accès à sa prévision. Ce type de diagnostic implique en premier lieu une meilleure compréhension du comportement thermodynamique du stator et du rotor dans les régimes permanent et transitoire [37].

L'approche thermique consiste à mesurer la température de chaque phase de l'enroulement statorique et la comparer avec la valeur limite.

Le diagnostic par mesure de température requiert en premier lieu la modélisation du comportement thermique de la machine électrique. Le modèle devrait simuler le comportement thermodynamique du stator et du rotor dans les états permanent et transitoire, y compris le transfert de chaleur à partir des enroulements du moteur au fer et du fer vers l'air ambiant.

Ce modèle devrait aussi tenir compte des différences importantes dans le comportement thermique dû à la taille du moteur et au type de construction. Le dernier paramètre à prendre en considération est l'indice de protection indiquant la possibilité de l'existence de particules et de

l'humidité établies dans le moteur. Une fois le modèle établi, les paramètres d'entrée du système tels que les courants et le temps du démarrage peuvent y être inclus.

Ce modèle calcule les températures de l'enroulement du rotor et les compare avec les limites de température admissibles. Si ces limites sont dépassées, le moteur doit être mis à l'arrêt [35].

La température peut donc s'avérer, dans quelques cas de défauts, porteuse d'informations. Cependant, sa mesure reste toujours très délicate et difficile à maîtriser. En effet, cette approche nécessite aussi l'installation des capteurs au niveau de la machine, chose qui n'est pas praticable pour les machines de petite taille [34].

III.5.2.5. Méthode d'analyse des flux

Un déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou bien encore électromagnétique, situé au rotor ou au stator, peut affecter la conversion électromécanique et la répartition de champ dans et en hors de la machine. Des études ont donc été menées pour extraire de la mesure des flux d'entrefer, axial ou de fuite des signatures caractéristiques de certains défauts. Pour cela, des bobines exploratrices sont placées à l'intérieur de la machine sur les dents statoriques, à l'extérieur de la machine, parallèlement et perpendiculairement à l'axe du rotor. Dans [36], l'auteur met en évidence les composantes fréquentielles du flux d'entrefer et le flux de fuite dans l'axe du rotor, respectivement, qui permettent de détecter et d'identifier des ruptures de barres rotoriques et des court-circuits dans les enroulements statoriques. Il en déduit les fréquences caractéristiques.

Ces composantes, présentes dans le spectre du flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut. Certaines composantes du flux axial permettent de détecter d'éventuels défauts liés aux barres rotoriques et aux paliers [36].

III.5.2.6. Méthode d'analyse du couple électromagnétique

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux des trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine [38].

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même, la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple.

Les oscillations du couple, provoquées par certains défauts rotoriques, peuvent servir à détecter ces derniers [40].

A partir d'un modèle de la machine, l'estimation des composantes du flux rotorique dans un repère „d-q' lié au stator peut se faire dans le but d'observer le couple électromagnétique. Il a été constaté qu'une dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer [39]. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentes dans le spectre du couple estimé.

Comme nous venons de le voir, les signaux évoqués précédemment permettent de détecter un grand nombre de défauts sur la machine. Cependant, ces signaux nécessitent la mise en place d'un grand nombre de capteurs (bobines exploratrices pour le flux, couplemètre, accéléromètres, transducteurs,...) souvent coûteux ou onéreux, sensibles et délicats à placer dans des environnements contraignants. Ceci limite l'application de ces techniques qui sont basées sur l'analyse de ces signaux malgré leurs avantages. D'autres techniques qui ne sont pas décrites ici, sont bien utilisées pour des applications bien particulières telles que les techniques de mesure des décharges électriques, les techniques qui utilisent les signaux infrarouges, de radiofréquence (RF) ou les techniques chimiques et d'autres, qui trouvent dans certains cas leur emploi dans les grosses machines spécifiques à un certain type de défauts.

III.5.2.7. Méthodes électriques

Malgré que certaines techniques sont jusqu'à maintenant utilisées telles que la technique des vibrations, les chercheurs durant ces deux dernières décennies s'orientent vers d'autres techniques plus efficaces et plus simples à utiliser et qui ne nécessitant pas la mise en place de capteurs au niveau de la machine, mais uniquement une image sur la grandeur à mesurer à partir de la salle de contrôle. Il s'agit des techniques basées sur l'analyse de la signature électrique du moteur, où l'enroulement statorique placé dans la machine, est considéré comme un capteur. Ce qui montre l'avantage de leur emploi pour les machines de différentes tailles et quelque soit l'environnement dans lesquelles elles sont placées.

Dans [39], l'auteur présente l'efficacité et le potentiel de l'analyse des courants du stator pour détecter les défauts (déséquilibre de phase, court-circuit de spires, ruptures de barres rotoriques, excentricité d'entrefer, etc.). En effet, il compare le spectre du courant d'alimentation du moteur avec celui du signal vibratoire. Il en déduit, bien que les spectres ne sont pas totalement identiques, que les informations présentes dans le courant correspondent à celles contenues dans les vibrations avec en plus les informations propres aux phénomènes électriques (glissement,...).

Cette approche de surveillance des entraînements électriques a été largement utilisée ces dernières années [33]; elle est connue sous le nom de l'analyse de la signature du courant du moteur.

L'avantage, comparé aux signaux précédents, est que les capteurs de courants sont désormais présents dans tous les systèmes de commande des entraînements électriques et offrent donc, un accès aisé à la mesure sans une implémentation (de capteur) supplémentaire.

a. Analyse de la signature du courant statorique

La mesure des signaux puis leurs traitements dans le domaine fréquentiel ne peut servir, que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut sont connues [33].

Il y a plusieurs techniques pour effectuer l'analyse des courants. La plus utilisée consiste à réaliser une analyse fréquentielle (FFT par exemple) directement sur un courant de ligne. Cette méthode a été largement employée ces dernières années. Mais, bien qu'elle permette d'obtenir de bons résultats, elle présente quelques inconvénients [4]. En effet, la signature fréquentielle spécifique au défaut est la forte modulation des harmoniques du courant par la fréquence de glissement. Dans cette analyse fréquentielle, il est préférable de faire une étude globale sur les courants car l'information sur le défaut dans la plupart des cas est différente d'un courant de ligne à un autre. Ceci est dû au déséquilibre de la source d'alimentation et/ou au déséquilibre créé par le défaut lui-même. Mais faire une FFT sur chaque courant risque d'être pénalisante en temps de calcul. C'est pour cela que certains auteurs s'orientent, avec la multiplication du nombre de capteurs de courants, vers l'analyse spectrale de la combinaison des trois courants, réalisée à l'aide des différentes matrices de transformation telles que celle de Park, Fortescue et de Concordia .

La plus utilisée de ces transformations est celle de Park, car elle permet d'une part, de présenter les courants du moteur dans le domaine de Park, d'autre part elle permet aussi de choisir le référentiel lié au stator, au rotor et au synchronisme et aussi dans sa seconde version d'utiliser le module des courants des vecteurs de Park [34].

b. Analyse de la signature de la tension

Cette technique est basée sur un test d'ouverture de phase lorsque la machine synchrone fonctionne à vide. Au moment où les trois phases statoriques de la machine sont déconnectées de l'alimentation, nous savons que les courants rotoriques induisent des tensions dans les bobinages statoriques. Lorsque le rotor de la machine est sain, la force magnétomotrice produite par les

courants des barres rotoriques après la déconnexion de la source d'alimentation est à prédominance sinusoïdale. Par conséquent, les tensions générées dans les bobinages statoriques ne contiennent pas ou peu d'harmoniques significatifs, mise à part l'harmonique fondamental ou

encore les harmoniques créés par l'encoche rotorique. Si la cage d'écureuil présente une ou plusieurs barres cassées, la tension induite dans les bobinages statoriques n'est plus sinusoïdale ce qui provoque l'apparition de composantes harmoniques supplémentaires spécifiques au défaut rotorique [35].

Cependant, la technique proposée est intéressante puisqu'elle se dégage des perturbations (harmoniques de temps) et des déséquilibres générés par la source d'alimentation. De plus, cette méthode requiert peu de points pour le calcul de la transformée de Fourier car il ne faut prendre que les premières périodes de la tension composée pour considérer le signal comme étant stationnaire [33].

Le principal inconvénient est l'impossibilité d'utiliser cette méthode sur des machines faisant partie intégrante d'un système de production. Cette technique peut cependant être intéressante pour le diagnostic des défauts rotoriques dans une entreprise de fabrication de machines électriques

(diagnostic de la machine en sortie de chaîne de production par exemple). La détection d'un défaut naissant avec cette technique reste, à l'heure actuelle, encore difficile [33].

c. Analyse de la signature de la puissance instantanée

Suite à la facilité d'emploi des capteurs de tension et de courant, d'autres chercheurs préfèrent multiplier le nombre de ces deux types de capteurs afin d'extraire la signature du défaut par l'analyse spectrale de la puissance d'entrée de la machine, on peut signaler l'analyse de la signature des courants, Ils existent d'autres analyses telle que l'analyse de la signature des courants

Conclusion

Dans ce chapitre qui était vraiment l'épine dorsale du sujet de ce mémoire dans la mesure où il a traité modestement l'étude des divers défauts et problèmes que peuvent rencontrer les machines électriques et surtout les machines synchrones lors de leurs fonctionnements et qui sont à l'origine de leurs défaillances et qui peuvent conduire de la plus simple panne jusqu'au dommage total de ces dernières .

Nous savons bien que toute machine électrique lors de son fonctionnement fait appel à une énergie électrique qui l'alimente et d'autres courants qui traversent ses enroulements électriques que ce soit au niveau de son stator ou au niveau du rotor s'il est bobiné et du coup , elle sera exposée aux diverses pannes si l'un de ces composants présentera un défaut elle peut encore subir d'autres pannes mais cette fois-ci d'origine mécanique qui sont causées que ce soient par l'effet de vibration ou échauffement ou usure de pièces de rechanges.

De ce fait la connaissance de tout cet arsenal de défauts s'impose , ainsi que de savoir maîtriser les manières de diagnostiquer l'origine de ces défauts et connaître les différentes méthodes classiques ou récentes pour les découvrir afin de porter les solutions voulues ou prévoir auparavant un programme adapté de maintenance

Chapitre IV

**Modélisation et simulation
d'une défaillance dans un
moteur synchrone**

Introduction

Nous allons voir dans ce dernier chapitre que l'électronique et l'informatique à l'ère actuel ont ouvert un vaste champ dans le domaine industriel et ont contribué à l'aide des méthodes mathématiques a développé des conceptions modernes des machines électriques y compri les moteurs synchrones.

Ainsi la mise en équation mathématique des circuits électriques pour modéliser le process ont facilité la résolution des équations de la physique avec un minimum de données et de permettre de couplage de ces équations physiques aux équations des circuits électriques.

Les machines synchrones regroupent les machines à pôles lisses ou à pôles saillants ou pôles à aimants permanents, donc la modélisation de toutes ces machines nécessitent une étude complète, de ce fait nous avons choisi uniquement la modélisation d'un moteur synchrone à aimants permanants ensuite on va procéder à une simulation d'un défaut statorique du moteur synchrone à aimants permanants.

Donc nous allons essayer en premier lieu de mettre sous forme d'un modèle mathématique un moteur synchrone en prenant en considération uniquement les hypothèses usuelles simples, ensuite nous allons essayer d'identifier des paramètres d'un moteur synchrone à aiment permanent en vue de le représenter dans le simulateur.

En sachant bien que le principe est le même que celui de la simulation analogique mais dans ce cas le logiciel remplace le matériel et sera exécuté par un ordinateur.

Enfin nous allons voir la representation des courbes de courant statorique et de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanent en fonctionnement normal à vide et en charge ensuite en fonctionnement avec un défaut statorique du à un court circuit dans les spires d'une phase .

les différentes équations qu'on peut les avoir lors de la modélisation de ce moteur synchrone.

IV-1 Méthode mathématique de modélisation de la machine synchrone

En effet les méthodes mathématiques permettent la détermination du modèle dynamique des machines électriques, donc diverses méthodes de modélisation ont vu le jour, de ce fait notre objectif est d'essayer à titre d'exemple de traduire le modèle d'une machine synchrone à aimant permanent en équations mathématiques que ce soit en équation électrique ou mécanique ou magnétique en tenant compte de quelques conditions exigées.

IV-1-2 Modélisation du moteur synchrone à aimants permanent

Donc la mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP est nécessaire, comme pour toute autre machine électrique, pour l'étude de leur système de commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent et permet aussi d'analyser et de diagnostiquer leurs défaillances.

Les hypothèses simplificatrices usuelles adoptées dans la modélisation de la machine, données dans la majorité des références, sont [9] :

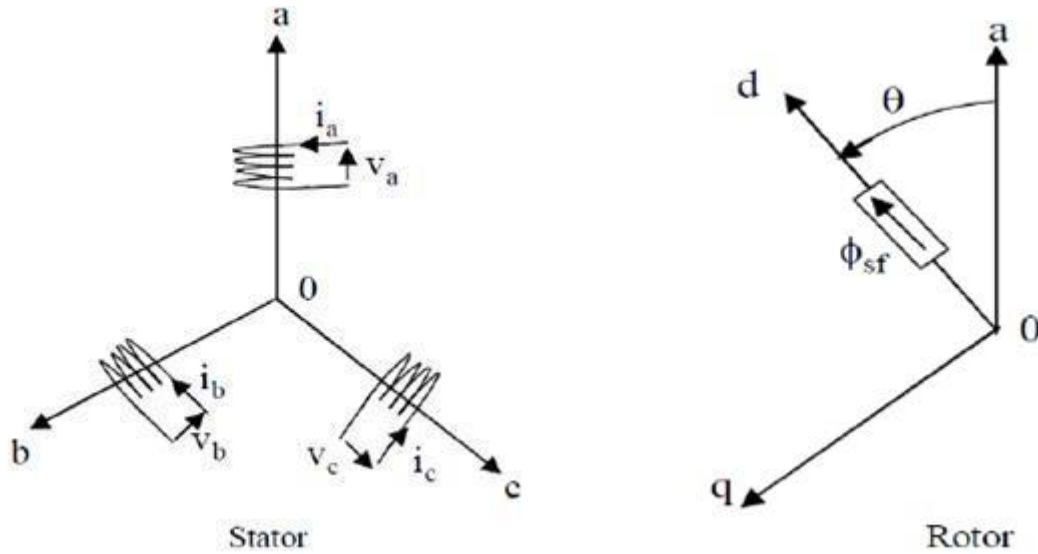
- > résistance des enroulements invariables avec la température,
- > effet de peau négligeable,
- > absence de la saturation dans le circuit magnétique,
- > machine alimentée par un système de tensions triphasées sinusoïdales et équilibrées,
- > parfaite symétrie de construction,
- > répartition spatiale sinusoïdale, le long de l'entrefer, des forces magnétomotrices,
- > entrefer d'épaisseur uniforme et effet d'encoche négligeable,
- > pertes ferromagnétiques (par hystérésis et courant de Foucault) négligeables.

Ces hypothèses signifient que les comportements électrique et magnétique sont supposés linéaires.

IV-1-3 Différentes équations mathématiques représentant le modèle du MSAP

- **Equations électriques**

La figure (III.5) donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents :



FigIV-1 Représentation des enroulements de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique.

-Nous allons nous limiter aux équations qui décrivent le comportement de la machine synchrone à aimants permanents dans un repère lié au stator :

✓ **Du stator :**

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Avec :

R_s : La résistance des phases statorique,

$[V_a V_b V_c]^t$: Vecteur tensions des phases statoriques. $[i_a i_b i_c]^t$:

Vecteur courants des phases statoriques. $[\phi_a \phi_b \phi_c]^t$:

Vecteur flux des phases statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Matrice résistance du stator

: Résistance par phase statorique.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Matrice Inductance du stator

La matrice $[L_s]$ est une matrice carrée d'ordre 3, elle contient des termes constants que nous regroupons dans et les termes variables dépendent de θ , que nous regroupons dans $[L_{s2}(\theta)]$ Posons

Voir my phone Quebec La Matrice

IV-1-4 Transformation de Park

Un passage du repère triphasé au repère biphasé est requis pour que les algorithmes de commande traitent des grandeurs électriques continues. Par conséquent les enroulements triphasé (a, b, c) sont remplacés par deux enroulements en quadrature (d, q), le passage est atteint par la transformée de Park. La matrice de passage est donnée par :

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad (4.4)$$

1- Le passage direct : triphasé au biphasé

L'équation traduisant le passage du système triphasé au système biphasé (d, q) est donné par :

$$X_{odq} = [P(\alpha)] [X_{abc}]^T \quad (4.5)$$

$[P(\alpha)]$: Est la matrice de passage direct de Park défini par :

$$[P(\alpha)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Où $[X_{abc}]$ représente les variables considérés de la machine qui sont les tensions, courant et flux.

Alors : l'équation est donnée par :

$$[V_{dqo}] = [P(\alpha)] \begin{bmatrix} V_{abc} \\ V_{abc} \\ V_{abc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$[I_{dqo}] = [P(\alpha)] \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{abc} \\ I_{abc} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$[\Phi_{dqo}] = [P(\alpha)] \begin{bmatrix} \Phi_{abc} \\ \Phi_{abc} \\ \Phi_{abc} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

X_o : représente la composante homopolaire, ajoutée pour permettre à la transformation d'être réversible, pour un système équilibré X_o est nulle.

$$[P(\alpha)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 1 \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

- **Equation électromagnétique**

La connaissance du couple électromagnétique de la machine est essentielle pour l'étude de la machine et sa commande.

Le couple peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p ((L_d - L_q) I_q I_d + \phi_{mp} I_q) \quad (4.11)$$

Il est composé de deux termes :

Le couple principal : $\frac{3}{2} p \phi_{mp} I_q$

Le couple de réluctance variable : $\frac{3}{2} p (L_d - L_q) I_q I_d$

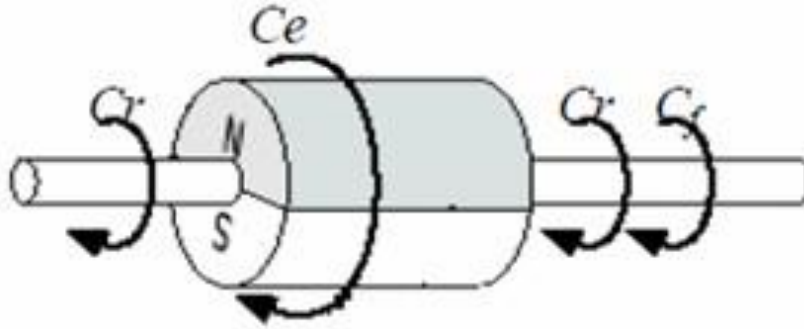
L'équation du mouvement est représenté par :

$$\frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f_v \Omega) \quad (4.7)$$

L'étude analytique du comportement de telles équations est relativement laborieuse, vu le grand nombre de coefficients variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. L'une de ces transformations est la transformation de Park.[5]

- **Equation mécanique**

Les seules pièces mobiles d'une (MSAP) sont le rotor et son roulement, et la robustesse et la fiabilité de cette machine est une conséquence directe de sa structure peu compliquée. A cet effet, l'application de la deuxième loi de Newton dans cette approche définit aisément. La dernière équation mécanique du modèle de système d'équations fondamentales de la MSAP comme suite [41] :



FigIV.2. Les différents couples qui agissent sur le rotor

J : Et le moment d'inertie du moteur ;

f : C'est le coefficient de frottement visqueux ;

C_e : C'est le couple électromagnétique délivré par le moteur ; C_r : C'est le couple résistant, ou de charge

2- Mise sous forme d'équation d'état [43]

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (V_d - R_s I_d + \omega_r L_q I_q) \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (V_q - R_s I_q - \omega_r (L_d I_d + \Phi_{mp})) \\ \frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} (C_m - C_r - f_v \Omega) \end{cases}$$

Le système 2.38 peut être mis sous forme d'équation d'état [12] :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U]$$

$[A]$: matrice fondamentale qui caractérise le système.

$[B]$: matrice d'entrée.

$[U]$: vecteur commande.

$[X]$: vecteur d'état

On pose :

$$[X] = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad [U] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \Phi_{mp} \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_r \\ \frac{L_d}{L_q} \omega_r & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & -\frac{\omega_r}{L_q} \end{bmatrix}$$

Les équations de la MSAP peuvent être modélisées par une représentation d'état sous la forme suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} * \omega \\ \frac{L_d}{L_q} * \omega & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & -\frac{\omega_r}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \Phi_{mp} \end{bmatrix}$$

IV-2 Simulation d'une défaillance dans un moteur synchrone

Nous avons cité auparavant les divers défauts que peuvent subir les machines électriques et surtout les machines synchrones qui peuvent provoquer des défaillances au niveau du fonctionnement de ces machines .

En outre et dans le cadre de la modélisation du moteur synchrone nous avons modélisé les enroulements statoriques de ce moteur .

Alors dans le cadre de la simulation d'une défaillance , nous avons choisi de simuler un défaut de court-circuit dans ces enroulements sus-mentionnés .

IV-2-1 Blocs de simulation du moteur synchrone à aimants permanents

Après l'étude théorique du système nous présentons une analyse par simulation numérique sous l'environnement *Matlab - Simulink*.

On présente tout d'abord la machine en fonctionnement normal en charge , en représentant les courbes de courants (le courant labc en f (t)) c'est-à-dire la courbe de courant en charge et la courbe de vitesse et la courbe en charge .

Ensuite on représente les mêmes courbes mais cette fois-ci avec une défaillance au niveau des enroulements statoriques .

1 - Les blocs de simulation dans le repère de Park

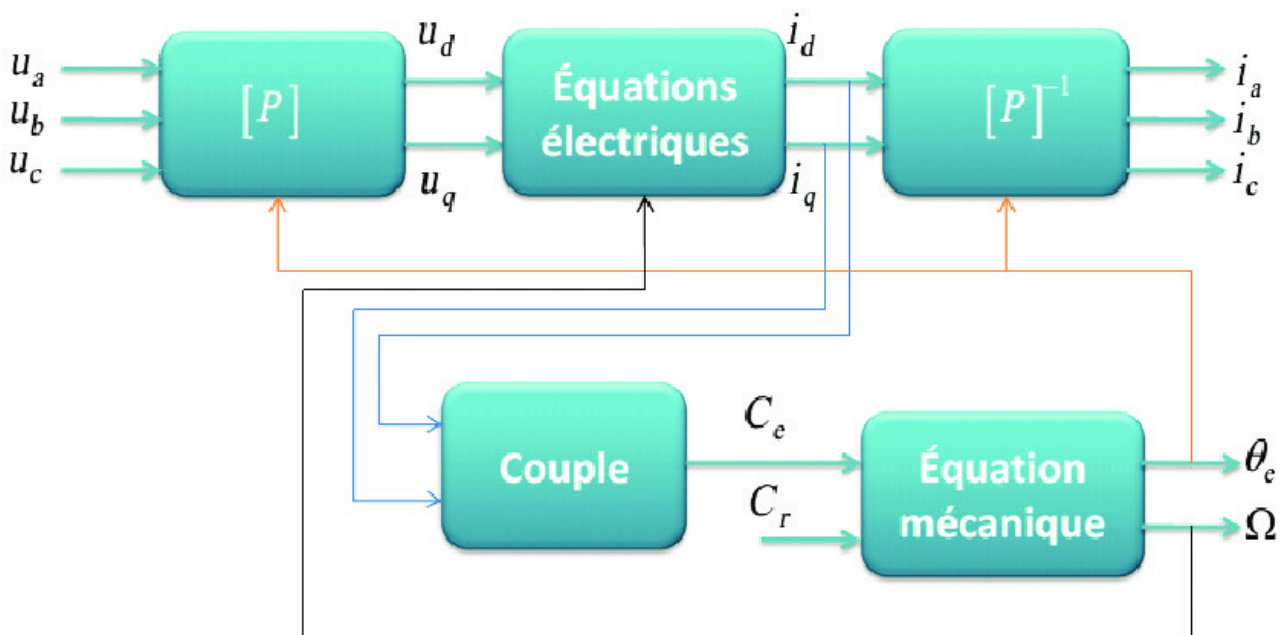


Fig IV-3 Schéma Fonctionnel d'un Moteur synchrone à aimants permanents []

IV-2-2 Simulation et interprétation des résultats:

Le principe de simulation dans ce cas, est semblable à celui utilisé pour la simulation analogique mais tout ce qui était réalisé avec du "matériel" sera remplacé par un logiciel exécuté par un ordinateur.

Le réglage des paramètres effectué à l'aide du clavier est beaucoup plus aisé que celui des simulateurs analogiques, une liaison "physique" avec l'extérieur est possible grâce aux cartes de conversion analogique numérique d'entrée et numérique de sortie.

1- Présentation de l'environnement MATLAB/SIMULINKTM

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

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

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

-Définition du Matlab

MATLAB est un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc....., il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif,

L'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (*programmes*) comme avec d'autres langages l'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fournissent à **MATLAB** un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement **MATLAB** peut facilement être étendu. Dans **MATLAB**, l'élément de base est la matrice.

L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. *MATLAB* s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire *MATLAB* est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. *MATLAB* est une abréviation de *MATrix LABoratory*. écrit à l'origine, en Fortran, par *Cleve Moler*, *MATLAB* était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets *LINPACK* et *EISPACK*.

- Définition du Simulink

SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ; une (*MATLAB*), dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes.

On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable.

SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est-à-dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. *SIMULINK* est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (*librairies*) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans le tableau.

2- Simulation du fonctionnement du MSAP en régime sans défaut [44]

Pour rappel nous avons uniquement modélisé la partie statorique de cette machine et nous allons voir le résultat de son fonctionnement à vide.

2-1 Représentation du fonctionnement du moteur MSAP à vide

- On va représenter les courbes du courant et de vitesse du moteur MSAP à vide

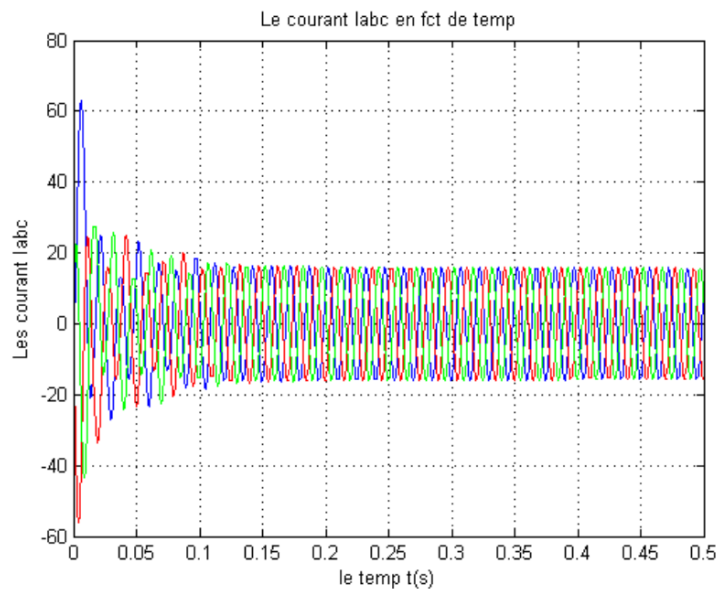


Fig IV-4 La courbe du courant statorique à vide.

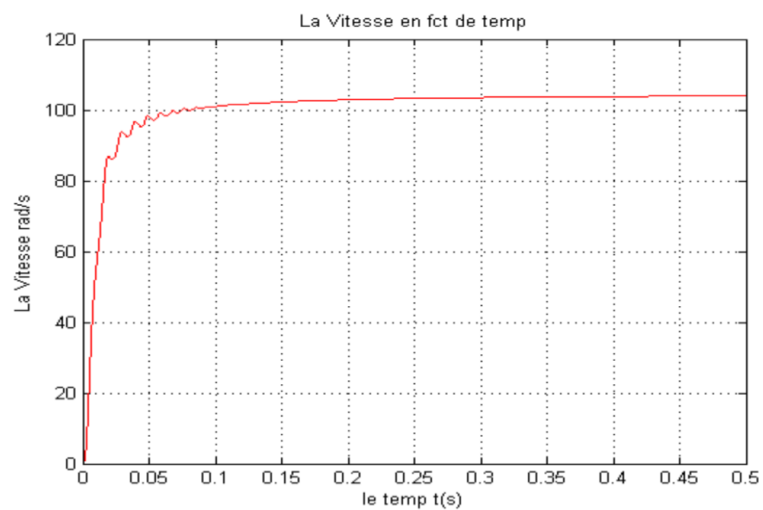


Fig IV-5 La courbe de vitesse à vide

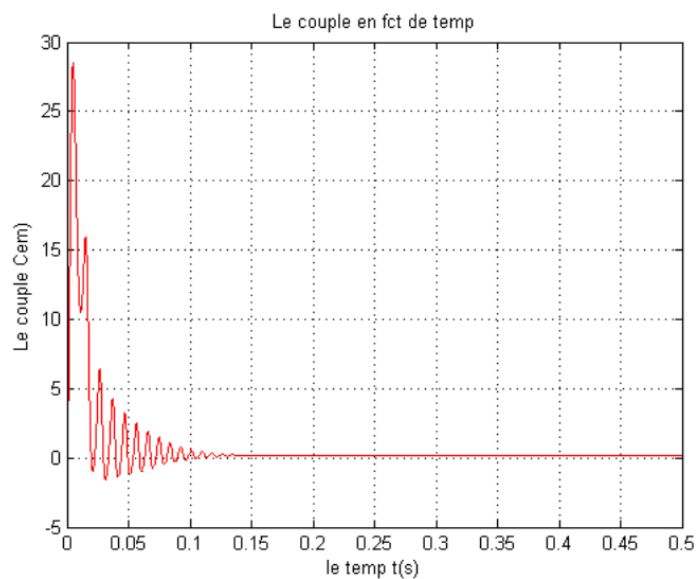


Fig IV-6 La courbe du couple du moteur à vide

2-2 Représentation du fonctionnement du moteur MSAP en charge

- On va représenter les courbes du courant et de vitesse du moteur MSAP en charge

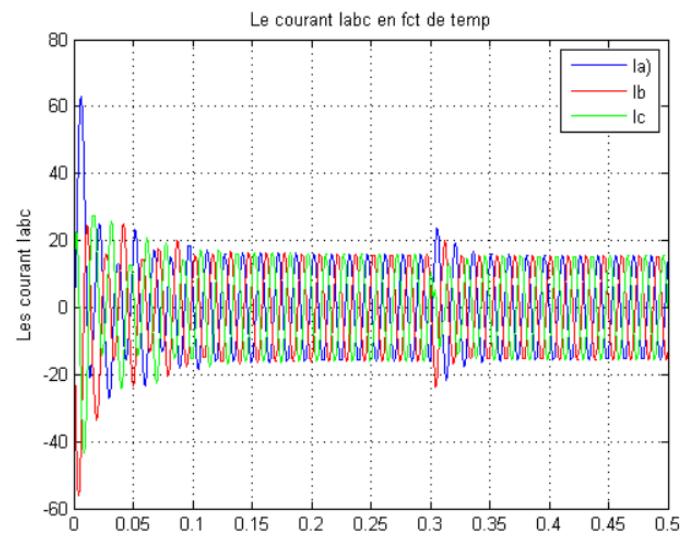


Fig IV7 La courbe de courant statorique en charge

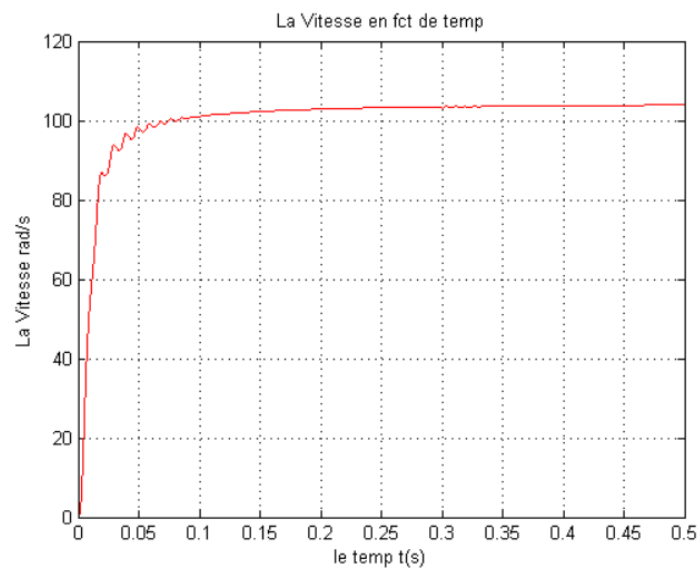


Fig IV8 La courbe de vitesse en charge

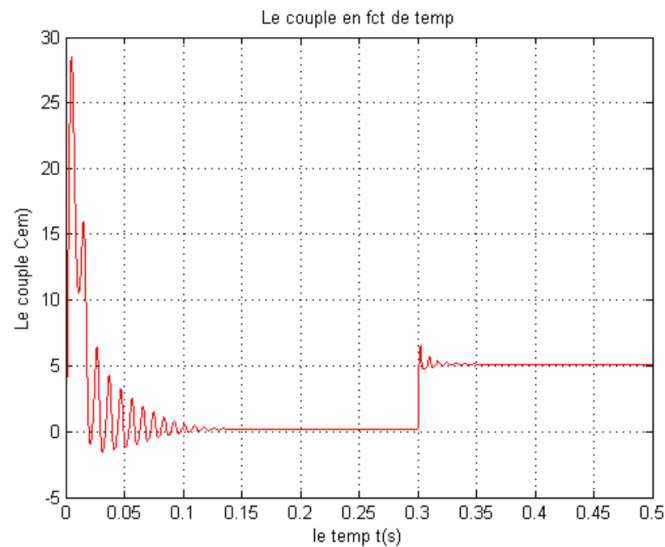


Fig IV9 La courbe de couple en charge

3- Simulation du fonctionnement du MSAP en régime avec défaut

3-1 Court-circuit statorique

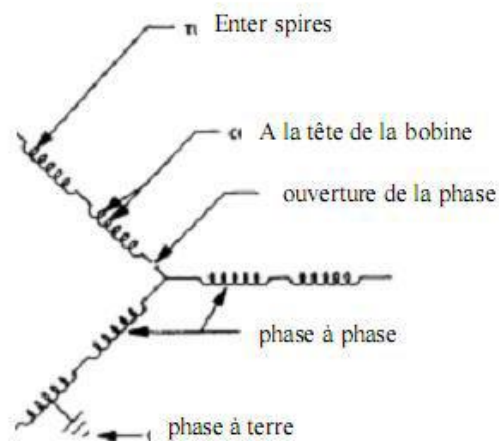


Fig IV10 Les courts-circuits dans les enroulements statoriques

3-2 Défaillance du moteur MSAP (courts-circuits au niveau du stator)

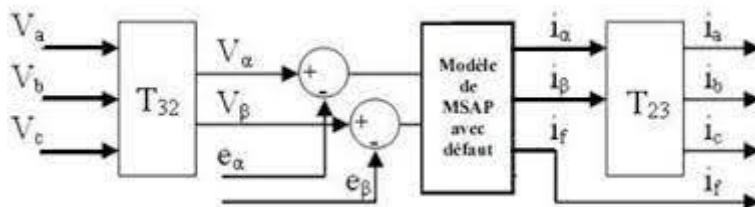


Fig IV11 Schéma fonctionnelle d'un moteur synchrone à aimants permanents

3-3 Représentation du fonctionnement du moteur MSAP avec défaut

- Les courbes pour $r_f=0.001$ à partir de 3s pour passer au mode défaut.

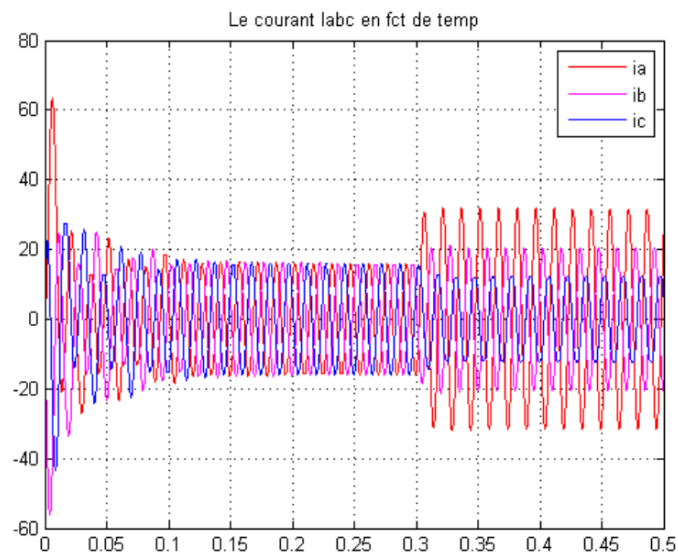


Fig IV12 Les courbes des courants statoriques pour le défaut de 20%

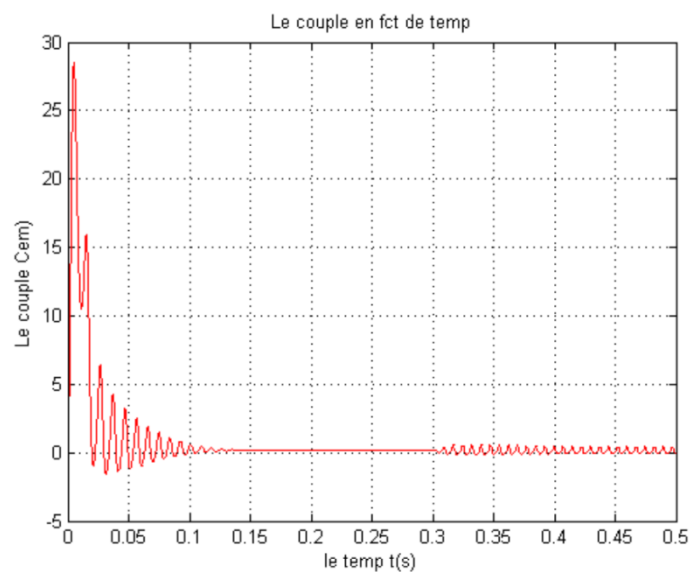


Fig IV13 Couple électromagnétique pour le défaut de 20%

Cette courbe représente le couple électromagnétique du moteur synchrone à aimants permanents en fonctionnement en charge avec une défaillance au niveau des enroulements statoriques.

Conclusion:

Sans s'approfondir dans les différentes méthodes de modélisation de la machine synchrone à savoir la méthode des éléments finis ou la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés ou la méthode des réseaux de perméances et autres... Nous avons essayé de présenter brièvement la modélisation la plus simple de la machine synchrone

Donc dans ce chapitre aussi nous avons représenté les enroulements de la machine synchrone à aimants permanents sous forme vectorielle dans l'espace électrique en appliquant la loi de mailles pour avoir les équations électriques correspondantes. De ce fait nous avons essayé la mise en équation du modèle du moteur synchrone en passant par les équations électriques, mécaniques, et électromagnétiques ainsi que le passage du modèle triphasé au modèle biphasé en utilisant la transformation de Park.

En outre nous avons pris connaissance de l'outil nécessaire qui facilite l'élaboration des applications sur procédé réel de simulation et de supervision et ce n'est autre que le logiciel MATLAB combiné avec le SIMULINK, afin de simuler le comportement de ces machines électriques.

L'utilisation de cet outil précieux, permet de visualiser les différentes courbes représentatives et plus spécialement les courbes du courant statorique, et grâce au modèle de la MSAP qu'on a pu analysé ces courbes en fonctionnement normal et à vide de ce moteur, ensuite ces courbes en charge et enfin avec fonctionnement en défaut au niveau des enroulements statoriques.

Enfin cette modeste étude de la défaillance statorique sur ce moteur synchrone, provoqué par un court-circuit de spires sur une phase du stator, comme on l'a mentionné, nous a alerté de la présence de ce défaut et a permis d'intervenir sur ce moteur pour éviter le pire qui peut se traduire par une panne ou son dommage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour commencer il y a lieu de préciser qu'on ne peut jamais maîtriser un domaine sans pour autant étudier tous ses aspects et tous les éléments et facteurs qui peuvent intervenir d'une manière positive pour son bon déroulement et son fonctionnement ou négative qui peuvent affecter ce cursus de déroulement,

De ce fait le but de cette étude sous- titrée " Etudes et diagnostics des défauts dans un moteur synchrone" était de prendre connaissance des généralités sur les machines électriques de la première invention dans ce domaine jusqu'au développement des différentes machines électriques actuelles...leurs constitutions les différents types de ces machines électriques leurs éléments constitutifs leurs spécificatifs leur domaine d'utilisation et leur condition de service , ensuite nous avons insisté sur les machines synchrones et leurs spécifications d'une manière générale , nous avons aussi cité les avantages et inconvénients de ces machines car notre étude est basée sur l'étude des défaillances du moteur synchrone qui y appartient.

Ensuite nous avons essayé d'approfondir un peu cette étude en ce qui concerne l'étude des différents défauts des moteurs synchrones qui peuvent provoquer des défaillances de fonctionnements de ces machines , et les différentes méthodes qui nous aident à diagnostiquer les différentes défaillances , qui sont à l'origine de leurs pannes , leurs mauvais rendements ou carrément leur dommage qui peut se traduire par un manque de service ou carrément un manque de production dans le domaine industriel.

Enfin nous avons voulu attirer l'attention sur l'importance de simulation des défauts sur cet outil de travail qui est le fruit de l'émergence des techniques modernes des systèmes basées sur les méthodes mathématiques de modélisation qui ont aidé à la simulation et la visualisation des modèles des processus et de pouvoir enregistrer les anomalies et défauts au niveau des machines électriques et aussi développé leur systèmes de commandes ..

Donc le MATLAB/SIMULINK a été conçu pour ce but en l'occurrence visualiser les différentes courbes que ce soit en fonctionnement normal à vide ou en charge et voir ces mêmes courbes en simulant un défaut comme dans notre cas (un court-circuit inter-spire) et cela peut nous avertir de la présence de ce défaut et prendre les mesures adéquates pour éviter le pire .

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. ABDESSEMED, "Modélisation et simulation des machines électriques", Ellipses, Collection, 2011.
- [2] J. LESENNE, F. NOTELET, G. SEUIER, « Introduction à l'électrotechnique approfondie », Technique et documentation, 1981.
- [3] M. JUFER, « Les entraînements électriques: Méthodologie de conception », Hermès, Lavoisier, 2010.
- [4] S. SMIGEL, « Modélisation et commande des moteurs triphasés », Commande vectorielle des moteurs synchrones", 2000.
- [5] J.P. CARON, J.P. HAUTIER, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Technip, 1995.
- [6] J.P. HAUTIER, J.P. CARON, « Systèmes Automatiques - Commande des processus », Cours et exercices corrigés. Tome 2, Ellipses, 1997.
- [7] R. HUSSON, « Méthodes de commande des machines électriques », Hermes, 2002.
- [8] G. STURTZER, E. SMIGIEL, « Modélisation et commande des moteurs triphasés », Ellipses, 2000.
- [9] Y. PERRIARD, « Modélisation et commande des entraînements électriques », Revue internationale de génie électrique, volume 5, n°1/2002 : EPE'99, Hermes.
- [10] M. PINARD, « Commande électronique des moteurs électriques », Dunod, 2007.
- [11] L. JAULIN, « Représentation d'état pour la modélisation et la commande des systèmes », Hermes, 2005.
- [12] A. MELAKHI, « Machine électrique », Polycopie de cours, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 1997.
- [13] B. Bayala, « La machine asynchrone », Edition revue 2010.
- [14] B. Bayala, « Machines à courant continu », Edition revue 2010.
- [15] G. Bouix « Manuel De génie Électrique »,
- [16] A. Razafimahery « Echauffement des machines électriques tournantes » licence es technique en Génie Mécanique et Industriel, 2015
- [17] A. Ceban « Méthode globale de diagnostic des machines Electriques »
- [18] E.F Kherkhachi « Diagnostic du système isolant des machines électriques par identification paramétrique »
- [19] A. Ibrahim « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée »
- [20] C. Guillermin « Vieillissement électrique et thermique d'un composite résine époxyde- silice : étude des charges d'espace et de la conduction »
- [21] Dr. N. Benaired « Schémas et Appareillages électriques »
- [22] M. Bichari « système de diagnostic des défaillances des machines électriques »
- [23] G. ISHAK « Détection des défauts mécaniques par des indicateurs de cyclo stationnarité » ; Rapport du stage Master 2 Recherche

- [24] Organisation de la Maintenance de la Machinerie de Production dans L'industrie Manufacturière
- [25] Electrical Energy Systems - Mohamed E. El-Hawary, CRC PRESS – 2000.
- [26] Electric machinery –A.E FITZGERALD, McGrawHill 6th edition – 2003.
- [27] Turboalternateurs – techniques de l'ingénieur - D 3 530 – 15.
- [28] http://www.industrial-electronics.com/elect4_20.html
- [29] Machine synchrone excitatrice – techniques de l'ingénieur D 3 545 – 1.
- [30] Loss of excitation of synchronous generator - Vladimir Kristof, Marian Mester - VOL 68 (2017), NO1, 54–60
- [31] Analysis of synchronous machine – T.A LIPO – CRC PRESS 2ed edition, 2012. [32]. Les machines électriques – Edi. NATHAN TECHNIQUE – J NIARD, 1976
- [33] Alternating Current Machine MG SAY –PITMAN, 4th edition, 1978.
- [34] Electric Machinery Fundamentals 4th Edition (Stephen J Chapman) –McGrawHill – 2004.
- [35] G. Séguier, F. Notelet, "Electrotechnique industrielle", Téchn et Doc, 1987.
- [36] M. Kostenko et L. Piotrovski, "Machines Electriques : Machines à Courant Alternatif" Tome II, 3ème édition, Édition MIR, 1979.
- [37] A. Ivanov-Smolensky, "Electrical Machines", Édition MIR, 1982.
- [38] T. Wildi, "Electrotechnique". 2ème édition, Presses de l'université de Laval, 2005.
- [39] J.L. Dalmaso, "Cours d'électrotechnique 1 : Machines tournantes à courants alternatifs", Éditions Belin, 1985.
- [40] G. R. Slemon, "Electrical machine and drives", Addison-Wesley publishing company, 1992.
- [41] Cours d'Electricité 2 — Électrotechnique "L'alternateur synchrone", I.U.T Mesures Physiques, Université Montpellier 2, Année universitaire 2008-2009.
- [42] - A. Fouillé, "Électrotechnique à l'usage des ingénieurs : Machines électriques", Tome II, Édition Dunod, 1957.
- [43] Macamo Bernardo Amizado & Maiga Djibril, Mémoire de Master ; Diagnostic des défauts statoriques d'un moteur synchrone à aimant permanent-Université Saad Dahleb de Blida- Année universitaire 2016-2017