

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 : Génie mécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**ETUDE DE L'ECHAUFFEMENT DES
MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES
EN VUE D'AMELIORER SES RENDEMENTS**

Réalisé par :



MAAMOUN Saad



ZOUARI FERHAT Bachir

Encadré par :

Pr. SALHI Mahmoud

Année Universitaire 2020/2021

**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 : Génie mécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**ETUDE DE L'ECHAUFFEMENT DES
MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES
EN VUE D'AMELIORER SES RENDEMENTS**

Réalisé par :

 **MAAMOUN Saad**

 **ZOUARI FERHAT Bachir**

Encadré par :

Pr. SALHI Mahmoud

Année Universitaire 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, Professeur 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 aidés de près 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 :

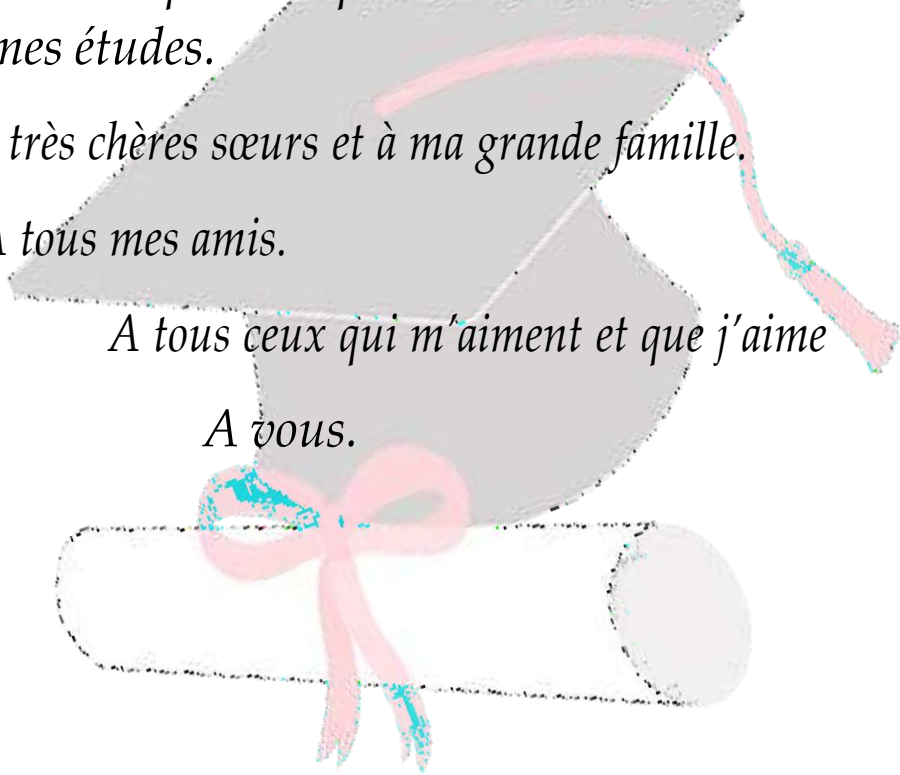
A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

A mes très chères sœurs et à ma grande famille.

A tous mes amis.

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

A vous.



Résumé

Résumé

Dans cette étude du phénomène d'échauffement des machines électriques tournantes, nous avons abordé plusieurs axes de base. Dans le premier chapitre, nous avons appris à connaître la nature des machines électriques tournantes, leurs composants, leur principe de fonctionnement et leurs différents types, et leurs caractéristiques les plus importantes. Le deuxième chapitre, nous avons abordé les machines électriques alternatives, et en particulier les deux principaux types de ces machines, qui sont les machines synchrones et asynchrones qui nous les avons définies ainsi que leur constitution, leur principe de fonctionnement et avons expliqué leur distinction et également présentés leur différences et avons mis en évidence les avantages et les inconvénients de chacune. Dans le troisième chapitre, nous avons mis en évidence les raisons qui conduisent à l'échauffement de ces machines, et les causes qui sont à l'origine du dégagement de la chaleur et des changements thermiques à l'intérieur de la machine et les effets qui en résultent, tandis que dans le quatrième chapitre nous avons présenté les causes de défaillances des machines électriques, avons aussi évoqué : les différents problèmes électriques ainsi que leurs origines.

Enfin, nous avons essayé de donner quelques précautions à prendre et quelques solutions pour éviter ces défaillances dans ces machines électriques tournantes. La première réside dans le choix du choix de matériaux isolants matériels qui assurent une parfaite isolation de leurs bobines au niveau des stators et rotors, ensuite la protection de leurs circuits électriques, car la bonne isolation protège du phénomène d'échauffement ainsi que les éventuels court-circuits. Tous ces précautions peuvent assurer le bon fonctionnement de ces machines et éviter les éventuelles pannes et assurer le rendement voulu.

Mots clés : les machines électriques, les causes de défaillance, d'échauffement.

الملخص

في هذه الدراسة لظاهرة التسخين للآلات الكهربائية الدوارة، اقتربنا من عدة محاور أساسية. في الفصل الأول، تعرفنا على طبيعة الآلات الكهربائية الدوارة ومكوناتها ومبدأ عملها وافترضايتها وأهم خصائصها. في الفصل الثاني تحدثنا عن الآلة الكهربائية الترددية وبالأخص النوعين الرئيسيين من هذه الآلات وهما الآلات المتزامنة وغير المتزامنة التي حددناها وشرحنا مكوناتها ومبدأ تشغيلها ومعرفة ما يميزها وحاضرها أيضاً. اختلافاتهم وسلطوا الضوء على إيجابيات وسلبيات كل منها. في الفصل الثالث، قمنا بتسليط الضوء على الأسباب التي أدت إلى تسخين هذه الآلات، والأسباب التي هي في الأصل إطلاق الحرارة والتغيرات الحرارية داخل الماكينة والآثار الناتجة عنها، بينما قدمنا في الفصل الرابع. أسباب أعطال الآلات الكهربائية. وأسبابها كما ذكرنا: المشاكل الكهربائية المختلفة بالإضافة إلى مشاكل التصميم الخاصة بها. أخيراً، حاولنا تقديم بعض الحلول لتجنب هذه الأعطال في هذه الآلات الكهربائية الدوارة. من أهم الحلول الصيانة الوقائية وكذلك حماية الدوائر الكهربائية الخاصة بهم، وخاصة اختيار المواد العازلة ذات الجودة الممتازة، لأن العزل الجيد لملفاتهم عند الثوابت والدورات يمكن أن يحميهم من ظاهرة السخونة الزائدة والمشاركة في حسن سير هذه الآلات وضمان التشغيل السلس.

الكلمات المفتاحية: الآلات الكهربائية، أسباب الأعطال، السخونة الزائدة .

Abstract

In a study of the heating phenomenon of rotating electrical machines, we have approached several basic axes. In the first chapter, we got to know the nature of rotating electrical machines, their components, principle of operation and types, their most important characteristics. the second chapter we talked about the reciprocating electric machine, in particular the two main types of this machine, which are synchronous and asynchronous where we have defined them and explained their components and explained the principle of the work of synchronous and asynchronous machines and know the things that set each one apart and also presented the differences between them and highlighted the pros and cons of each. In the third chapter we have highlighted the reasons that lead to the heating of electric machines, where the causes of heat generation and thermal changes inside the machine and the resulting effects, while in the fourth chapter we presented the causes of failure of electrical machines and their effects. When the causes of failure are multiple, we have mentioned them: electrical, natural, thermal problems, as well as mechanical and manufacturing problems.

Finally, we have tried to give some solutions to avoid this failure in rotating electrical machines. One of the most important solutions is the good protection of the devices used, and most importantly, the choice of excellent quality insulating materials, on the basis of which used machine is chosen, because the good insulation of the coils is the part stator and rotor of the electric machine which protects it and reduces the phenomenon of heating and thus the roundness of rotating electric machine is in perfect condition.

Keywords: Electrical machines, the causes of failure, overheating.

An orange, horizontally-oriented shape with rounded corners and a slight 3D effect, serving as a background for the title.

Table des Matières

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Table des matières

Listes des figures

Listes des tableaux

Introduction Générale

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES

I.1.Introduction	4
I.2. Définition	4
I.3. Rappel sur les lois de l'électromagnétisme	4
I.3.1. Notion de champ magnétique	4
I.3.2. Loi d'Ampère	5
I.3.3. Loi de Laplace	5
I.3.4. Loi de l'induction électromagnétique	5
I.4. Force électromotrice produite par un champ tournant	6
I.5. Catégories des machines électriques	9
I.5.1. Les machines génératrices	9
I.5.2. Les moteurs électriques	9
I.5.3. Les machines transformatrices	9
I.6. Les éléments constitutifs des machines électriques tournantes	9
I.7. Caractéristiques des machines électriques et les différentes puissances y afférentes .	9
I.7.1. La puissance nominale	9
I.7.2. Puissance absorbée	10
I.7.3.La puissance utile	10
I.7.4. Rendement de la machine	10
I.7.4.1. Rendement et Perte de puissance	11
I.8. Classification des machines électriques	12
I.8.1.Les machines génératrices	12

I.8.2. Les moteurs électriques	13
I.8.3. Les machines transformatrices	14
I.9. Constitution d'une machine électrique	15
I.10. Différents types de machines électriques	16
I.11. Caractéristiques	16
I.12. Conclusion :	17
 <i>CHAPITRE II: PRINCIPAUX TYPES DES MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES</i>	
II.1. Introduction	19
II.2. Définition	19
II.3. Constitution de la machine synchrone	19
Stator (induit)	19
Rotor (inducteur)	20
La carcasse	21
Les balais	21
Les portes balais	21
Les paliers	21
L'arbre	21
Les flasques	22
Les bagues collectrices	22
La boîte à bornes	22
II.4. Principe de fonctionnement de la machine synchrone	22
II.5. Spécification de machine synchrone	22
II.5.1. Les machines synchrones à aimants permanents	22
II.6. Machine asynchrone	23
II.6.1. Introduction	23
II.6.2. Définition	24
II.6.3. Constitution la machine asynchrone	25
II.6.4. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	26
II.6.5 spécifications des machines asynchrones	27
II.7. La différence entre les moteurs synchrones et asynchrones	27
II.8. Avantage et inconvénients des moteurs synchrones et asynchrones	27

Sommaire

II.9. Spécificité des moteurs asynchrones	28
II.10. Conclusion	28

CHAPITRE III: CAUSES D'ECHAUFFEMENT DES MACHINES ELECTRIQUES

III.1. Introduction :	30
III.2. Les pertes d'énergie	30
III.2.1.1. Les pertes électriques	30
III.2.1.2. Les pertes par effet Joule	30
III.2.2. Les pertes magnétique	30
III.2.2.1. Les pertes fer	30
III.2.3. Les pertes mécaniques	31
III.3. L'élévation de température dans les machines électriques tournantes	32
III.3.1. La surcharge	32
III.3.2. Le facteur de service	32
III.3.3. La tension d'alimentation	33
III.3.4. L'environnement	33
III.. Echanges thermiques dans les machines électriques	34
III.5. Transfert de chaleur dans les moteurs électriques tournantes	34
III.5.1. Rappel sur les différents modes de transferts thermiques	34
III.5.2. Transfert de chaleur par conduction	34
III.5.3. Transfert de chaleur par radiation(rayonnement)	35
III.5.4. Transfert de chaleur par convection	36
III.5.5. Mauvaise ventilation	37
III.4.1.5. Détermination du coefficient h	37
III.6. Modèle thermique des machines électriques tournantes	38
III.6.1. Les équations thermiques de la machine	39
III.7. Influence de l'augmentation de la température sur les machines électriques	40
III.7.1. Défauts des machines électriques entraînant l'échauffement	40
III.7.2. Défauts internes au moteur	42
III.7.3. Défauts externes au moteur	42
III.8. Causes des défauts thermiques	47
III.9. Défauts internes du moteur agissant sur l'isolation	48

CHAPITRE IV: DEFAILLANCES DES MACHINES ELECTRIQUES

IV.1. Défaillances des machines électriques	52
IV.1.1. Défaillance d'origine électriques	52

Au niveau du stator	52
Au niveau du rotor	56
IV.1.2. Défaillance d'origine mécanique	58
IV.2. Les conséquences des ces défaillances des machines électriques	61
IV.3. Conclusion	62
CHAPITRE V: SOLUTIONS A APPORTER EN CAS DE DEFAILLANCEDES	
MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES	
V.1. Différentes procédures de protection et isolation contre les défaillances de ces machines électriques	62
V.1.1. Protection	64
V.1.1.1. Protection des parties sous tension	64
V.1.1.2. Protection des parties hors tension	65
V.1.2. Isolation des machines	66
V.1.3. Condition des isolants	67
V.1.4. Etat du rotor	68
V.2. Les solutions disponibles sur le marché	69
V.2.1. Isolation organique classique	69
V.2.1.1. Isolation des fils émaillés	69
V.2.1.2. Polymères nano-chargés	70
V.2.1.3. Vernis d'imprégnation	71
V.2.2. Isolation inorganique	72
V.2.3. Le Mica	72
V.2.4. La fibre de verre	72
V.2.5. Les résines silicones	73
V.2.6. Les céramiques	73
V.2.7. Les résines époxy	74
V.3. Quelques différents Matériaux isolants	75
V.3.1. Matériaux isolants	75
V.4. Conclusion:	76
Conclusion générale	77
Bibliographie	78



Listes des figures

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES		
I.1	<i>Notion de champ magnétique</i>	4
I.2	<i>Direction et sens de la force de Laplace</i>	5
I.3	<i>Direction et sens de la force électromotrice</i>	6
I.4	<i>Création d'une force électromotrice</i>	6
I.5	<i>Forme d'onde du flux traversant la spire</i>	7
I.6	<i>Forme d'onde de la f.é.m entre les bornes de la spire</i>	8
I.7	<i>Forme sinusoïdale de la f.é.m entre les bornes de la spire par rapport au flux</i>	8
I.8	<i>Répartition des puissances dans une machine</i>	11
I.9	<i>Cas de Dinamo</i>	13
I.10	<i>Cas de Alternateur</i>	13
I.11	<i>moteur à courant continu</i>	13
I.12	<i>moteur synchrone</i>	14
I.13	<i>moteur asynchrone</i>	14
I.14	<i>Les machines transformatrices</i>	15
I.15	<i>Constitution d'une machine électrique</i>	15
I.16	<i>Différents types des machines électriques</i>	16
I.17	<i>Caractéristiques</i>	16
CHAPITRE II: PRINCIPAUX TYPES DE MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES		
II.1	<i>Représentation symbolique de l'induit</i>	20
II.2	<i>schéma du rotor à pôle saillant</i>	20
II.3	<i>Schéma du rotor à pôles lisses</i>	21
II.4	<i>Performances de la MSAP (LSRPM) : a) Compacité et b) Rendement</i>	23
II.5	<i>Stator d'une machine asynchrone basse tension</i>	25
II.6	<i>Rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil</i>	25
II.7	<i>Principe de fonctionnement de la machine asynchrone</i>	26
CHAPITRE III : LES CAUSES D'ECHAUFFEMENT DES MACHINES ELECTRIQUES		
III.1	<i>Transfert de chaleur par conduction</i>	34
III.2	<i>Transfert de chaleur par radiation</i>	35
III.3	<i>Transfert de chaleur par convection</i>	36
III.4	<i>Exemple de vue en coupe d'une machine asynchrone</i>	38
III.5	<i>Exemple de circuit contenant les modes de chaleur entre les blocs</i>	39
III.6	<i>La répartition des défaut</i>	41
III.7	<i>Exemple de surtension</i>	42
III.8	<i>Relevé des tensions d'un système triphasé déséquilibré</i>	43
III.9	<i>Déclassement d'un moteur en fonction d'un déséquilibre de tension de son Alimentation</i>	44
III.10	<i>Exemple d'un creux et d'une coupure brève de tension</i>	45

LISTE DES FIGURES

III.11	<i>Temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport courant de démarrage sur courant nominal</i>	46
III.12	<i>Résistance d'isolement en fonction de la température</i>	49
III.13	<i>Durée de vie des moteurs en fonction de leur température de fonctionnement ou du courant de consommation</i>	49
CHAPITRE IV: DEFAILLANCES DES MACHINES ELECTRIQUES		
IV.1	<i>les isolants au stator</i>	52
IV.2	<i>courbe de Loi de MONTSINGER</i>	54
IV.3	<i>Images des roulements détériorés</i>	58
IV.4	<i>Endommages physiques créés par le défaut de montage des roulements</i>	58
IV.5	<i>Répartition des contraintes radiales sur les bagues interne et externe du Roulement</i>	59
IV.6	<i>Effets sur les pistes des roulements des contaminations du lubrifiant</i>	59
IV.7	<i>la corrosion des roulements</i>	60
IV.8	<i>Effet de la lubrification inadéquate de roulements</i>	61
IV.9	<i>cassure de roulement</i>	61
CHAPITRE V: SOLUTIONS A APPORTER EN CAS DE DEFAILLANCE DES MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES		
V.1	<i>Schéma d'installation de protection</i>	65
V.2	<i>Indice thermique et température de ramollissement des principaux polymères utilisés pour l'isolation des moteurs électriques</i>	70

LISTE DES TABLEAUS

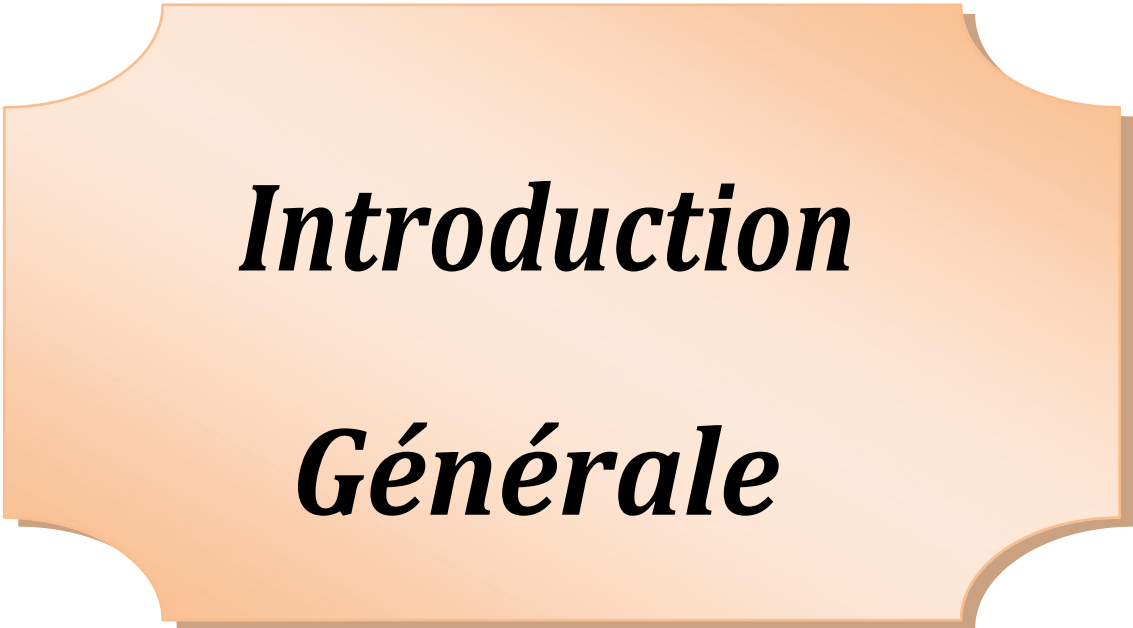
Tableau		Page
<i>CHAPITRE III: CAUSES D'ECHAUFFEMENT DES MACHINES ELECTRIQUES</i>		
<i>III.1</i>	les valeurs du coefficient de conductivité thermique	34
<i>III.2</i>	Expression de la conductance thermique et du flux selon le mode de transfert	40
<i>III.3</i>	Influence d'un déséquilibre de tension sur les caractéristiques de fonctionnement d'un moteur	44
<i>CHAPITRE V: SOLUTION A APPORTER EN CAS DE DEFAILLANCE DES MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES</i>		
<i>V.3</i>	Différents matériaux d'isolant (Classe des isolants)	76

Notationset

Symboles

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

SYMBOLES	DESIGNATION	UNITE
B	: Champ magnétique	[H]
C	: Chaleur massique	[J/kg.°C]
D	: Diamètre	[m]
l	: Elément de longueur	[m]
e/E	: Force électromotrice induite	[V]
f	: Fréquence	[Hz]
F	: Force	[N]
G	: Glissement	
H	: Coefficient d'échange par convection	
G	: Conductance thermique	
i/I	: Intensité du courant	[A]
K	: Conductivité thermique	[W/m.K]
L	: Inductance	
n_s	: Vitesse de synchronisme	[tr/s]
n	: Vitesse du rotor	[tr/s]
Nu	: Nombre de Nusselt	
P	: Nombre de pair de pôles	
P_u	: Puissance utile	[W]
P_a	: Puissance absorbée	[W]
P_e	: Perte	[W]
P	: Puissance active	[W]
Pr	: Nombre de Prandtl	
P_{js}	: Perte joule au stator	[w]
P_{jr}	: Perte joule au rotor	[W]
P_{fs}	: Perte fer au stator	[W]
P_{fr}	: Perte fer au rotor	[W]
P_{tr}	: Puissance transmise au rotor	[W]
P_Ω	: Puissance disponible au rotor	[W]
P_m	: Perte mécanique	[W]
Q	: Densité de flux de chaleur	[J]
R	: Résistance	[Ω]
R_{th}	: Résistance thermique	
R	: Résistance d'un enroulement	[Ω]
S	: Elément de surface	[m²]
T	: Température	[°C]
T_s	: Température du solide	[°C]
T_{lm}	: Température limite	
$T_{m\max}$	: Température maximale	
T_m	: Température moyenne du fluide	[°C]
T_e	: température du milieu ambiante	[°C]
T_{EM}	: Couple électromagnétique	[N.m]
U	: Tension	[V]
V	: Tension	[V]
v	: Vitesse	[m/s]
ν	: Viscosité	
ω	: Pulsation	[rad/s]
Y	: Couplage en étoile	
Φ	: Flux	[Wb]
η	: Rendement	
ρ	: Masse volumique	[kg/ m³]



Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les machines électriques alternatives tournantes sont presque présentées partout dans les industries , elles ont envahies le monde de la production et elles sont là dans la vie quotidienne quel que soit le domaine d'utilisation : machines-outils, engin de levage, pompage, les trains électriques, les appareils ménagers...

Plus de 50 millions de nouvelles machines sont installées chaque année. En générale leur conception tient compte du domaine d'utilisation ,elles sont dimensionnées pour des applications à vitesse et à couple constant afin d'assurer les meilleures caractéristiques. Par contre, dans le cas d'un couple de charge réduit ou d'une vitesse de fonctionnement en dessous de la valeur nominale, le rendement de la machine ainsi que le facteur de puissance diminuent considérablement.

les machines électriques alternatives ont subi depuis des années des modifications majeures dans la technique de leur conception ainsi que leur système de commande car ces machines a courant alternatif sont les plus utilisés en industrie et équipent le majeure partie des systèmes d'entraînement industriels a vitesse variable. Leur application sont très répandus on peut les trouver dans le robotique , dans le système de levage , dans le domaine de production d'énergie et de la sidérurgie et même dans le domaine du nucléaire etc...

Ces machines électriques et comme leur nom l'indique sont éxitées par le courant électrique donc elles sont à l'origine de circulation de courant et de flux magnétique à travers les parties conductrices et les circuits magnétiques. Ces phénomènes de circulation produisent des pertes qui se manifestent par le dégagement de la chaleur et tendent à chauffer la machine. Cet échauffement s'il dépasse les normes préconisées par le constructeur peut être néfaste pour les éléments constitutants de cette machine ce qui influ sur son bon fonctionnement , sa durée de vie et affecte son rendement et peut provoquer sa détérioration et son immobilisation.

C'est dans ce contexte de situation qui n'est autre que le phénomène d'échauffement des machines électriques tournantes que nous avons choisi le thème intitulé : «ETUDE D'ECHAUFFEMENT DES MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES EN VUE D'AMELIORER SES RENDEMENTS».

Nous avons appri que le domaine d'applications de ces machines alternatives que ce soient les machines synchrones ou asynchrones est très vaste et très utile et le problème d'échauffement est l'un des obstacles majeures qui entravent le bon fonctionnement de ces dernières et cela necessite vraiment de l'intérêt .

Afin d'avoir une idée sur le fonctionnement de ces machines et avons essayé de voir leur constitution et l'origine de ce mouvement rotatif développé pour ces machines et qui n'est autre que la force électromotrice "Fém." générée par les enroulements statoriques qui développent un champs magnétique après avoir reçu une pulsation et qui traduit cette énergie électrique en énergie mécanique à travers le rotor.

Mais l'objectif de cette étude c'est de passer en revue la constitution et caractéristiques de ces machines synchrones et asynchrones aussi que leur différences l'influence du phénomène de l'échauffement ces machines électriques tournantes et l'origine de cet échauffement sachant bien que les enroulements statorique et rotorique de ces machines font lieu de circulation du courant électrique et de flux magnétique peuvent être à l'origine des pertes qui se traduisent par le dégagement de la chaleur donc échauffement de ces machines qui peut affecté bon fonctionnement réduire ses performances et à la longue démunit la durée de sa vie et conduit à sa détérioration .

D'une manière générale le problème d'échauffement est presque identique dans les machines synchrone au asynchrone et surtout au point de vue propagation et leur conséquence sur le fonctionnement de ces machines0.

Afin de prévoir ces conséquences néfastes et éviter ces defaillances les spécialistes et chercheurs dans ce domaine ont trouvé des moyens pratiques pour faire face à cette situation afin d'assurer le bon fonctionnement de ces machines et améliorer leur rendement .

Pour essayer d'être plus explicatif nous avons partagé cette étude en cinq grandes parties:

- ❖ La première parlera généralité sur machines électriques tournantes.
- ❖ La deuxième présentera la machine asynchrone et synchrone définition ,constitution, principe de fonctionnement et le déference entre le deux.
- ❖ La troisième présentera les causes d'échauffement des machines électriques.
- ❖ Le quatrième parle des défaillances des machines électriques.
- ❖ Le Cinquième présentera des solutions aux défaillances de ces machines électriques pour préserver cet outil de production et améliorer son rendement.

CHAPITRE I

Généralités sur les machines électriques

I.1. Introduction

Les machines électriques ont pour existence de transformer une forme d'énergie en une autre dont l'un au moins doit être électrique, et l'autre électrique ou mécanique. Les deux principaux éléments fondamentaux intervenant dans cette transformation sont les courants électriques et les champs magnétiques. L'interaction de ces deux éléments forme les lois de l'électromagnétisme et fait la base du fonctionnement des machines électriques.

I.2. Définition

La machine électrique tournante est un dispositif électromécanique destiné à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique (fonctionnement en générateur) ou, inversement, à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement en moteur) ; une seule et même machine peut fonctionner dans les deux sens en moteurs et en génératrice donc elles sont dites réversibles. Les principaux éléments fondamentaux adhérent dans cette transformation sont les courants électriques et les champs magnétiques. L'interaction de ces deux éléments forme les lois de l'électromagnétisme et fait la base du fonctionnement des machines électriques. [6]

Exemples des machines électriques tournantes :

- La machine à courant continu : fonctionnement moteur et génératrice
- L'alternateur synchrone triphasé
- Le moteur asynchrone triphasé

I.3. Rappel sur les lois de l'électromagnétisme

I.3.1. Notion de champ magnétique

Le champ magnétique existe à l'état naturel, c'est le champ magnétique terrestre. Les aimants sont des éléments qui produisent un champ magnétique. Les courants électriques parcourant un conducteur électrique ou mieux encore une bobine produisent des champs magnétiques.

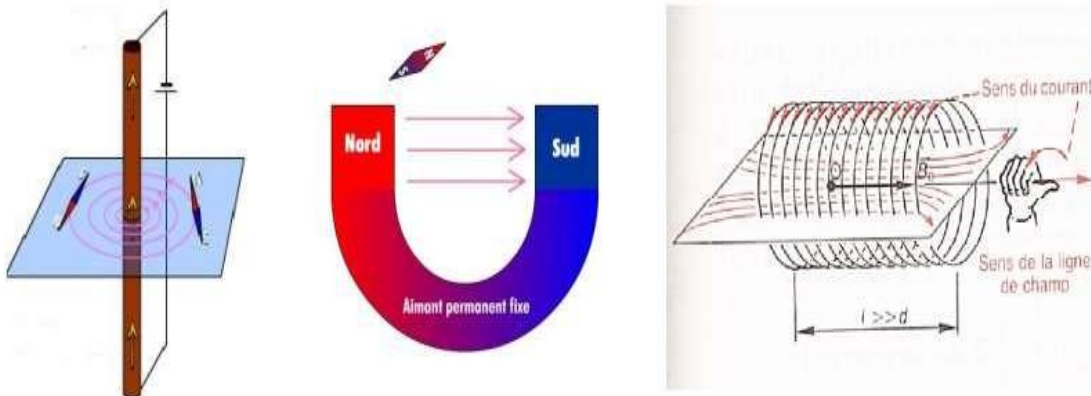


Figure I.1. Notion de champ magnétique

I.3.2. Loi d'Ampère

création d'un champ magnétique par le passage d'un courant électrique i dans un conducteur au tour de ce dernier.

La densité du flux magnétique au tour du conducteur est donnée par la relation :

$$B(t) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{d} \quad (\text{I.1})$$

A l'aide de la main gauche et plus exactement le pouce, l'index, et le majeur, on peut déterminer respectivement le sens du champ, Le sens du chemin et le sens du courant d'induit. est donné par la règle de la main gauche : Si l'on tient le conducteur dans la main gauche.

I.3.3. Loi de Laplace

Création d'une force mécanique F [N] sur un conducteur de longueur l [m] parcouru par un courant i [A] et plongé un champ magnétique B [H].

$$d\vec{F} = -(\vec{B} \times i d\vec{l}) \quad (\text{I.2})$$

La direction et le sens de cette force sont donnés par le schéma suivant :

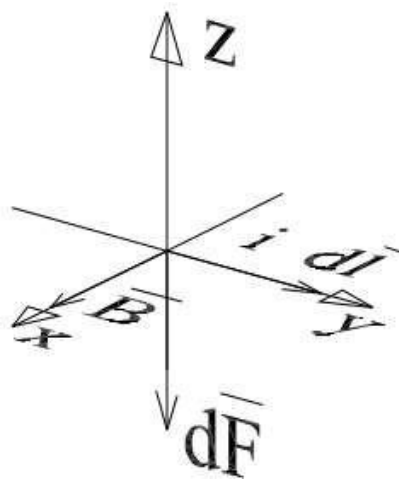


Figure I.2. Direction et sens de la force de Laplace.

I.3.4. Loi de l'induction électromagnétique

Création d'une force électromotrice induite e [V] dans un circuit en boucle fermée par la variation de la valeur de flux ϕ [Wb] qu'il embrasse.

Formule globale selon la loi de Maxwell :

$$e = r \cdot i = - \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I.3})$$

Pour un circuit mobile :

$$de = -(\vec{B} \cdot \vec{v}) \cdot d\vec{l} \quad (\text{I.4})$$

La direction et le sens de cette force est donné par le schéma suivant :

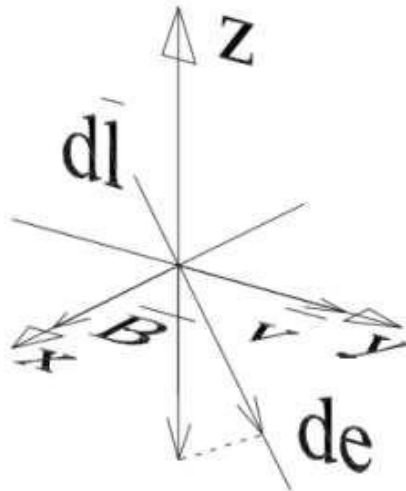


Figure.I.3.Direction et sens de la force électromotrice

I.4. Force électromotrice produite par un champ tournant

Faisons tourner un aimant droit ou un électroaimant en face d'une surface délimitée par le contour d'une spire (figure I.4), tel que le pôle nord de l'aimant soit au début perpendiculaire à la surface de la spire ($\theta = 0$) puis parallèle de sorte que le pôle nord sera en face au conducteur AA' ($\theta = \frac{\pi}{2}$). Ensuite le pôle sud qui sera perpendiculaire à la surface ($\theta = \pi$) puis parallèle de sorte que le pôle nord sera en face au conducteur BB' ($\theta = \frac{3\pi}{2}$).. Ensuite, l'aimant revient à son état initial ($\theta = 2\pi$). [30]

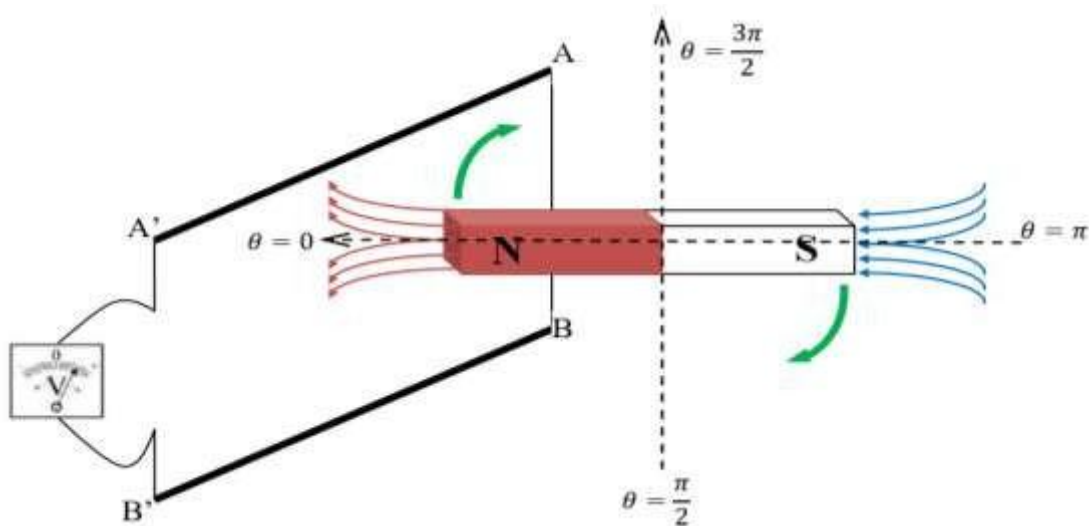


Figure I.4. Création d'une force électromotrice

En supposant que la vitesse de rotation de l'aimant est constante, le flux traversant la surface droite de la spire est alternatif et possède la forme donnée par la figure I.6.

La variation du champ magnétique de l'aimant applique une force sur les électrons de la bobine créant ainsi une tension électrique dite force électromotrice. D'après Faraday, tout circuit soumis à une variation de flux, voit apparaître à ses bornes une force électromotrice donnée comme suit :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (I.5)$$

La forme d'onde de la f.é.m est donc aussi alternative et est en quadrature arrière par rapport au flux comme le montre la figure I.6.

Remarque :

Les machines industrielles sont conçues afin que leurs f.é.m soit sensiblement sinusoïdale. Nous supposons donc par la suite que la répartition du flux est sinusoïdale et sa pulsation ω est constante comme suit [30]:

$$\phi = \phi_{max} \cos \omega t \quad (I.6)$$

Avec $\omega = 2\pi n$ et n est la fréquence de rotation de l'aimant en [tr/s].

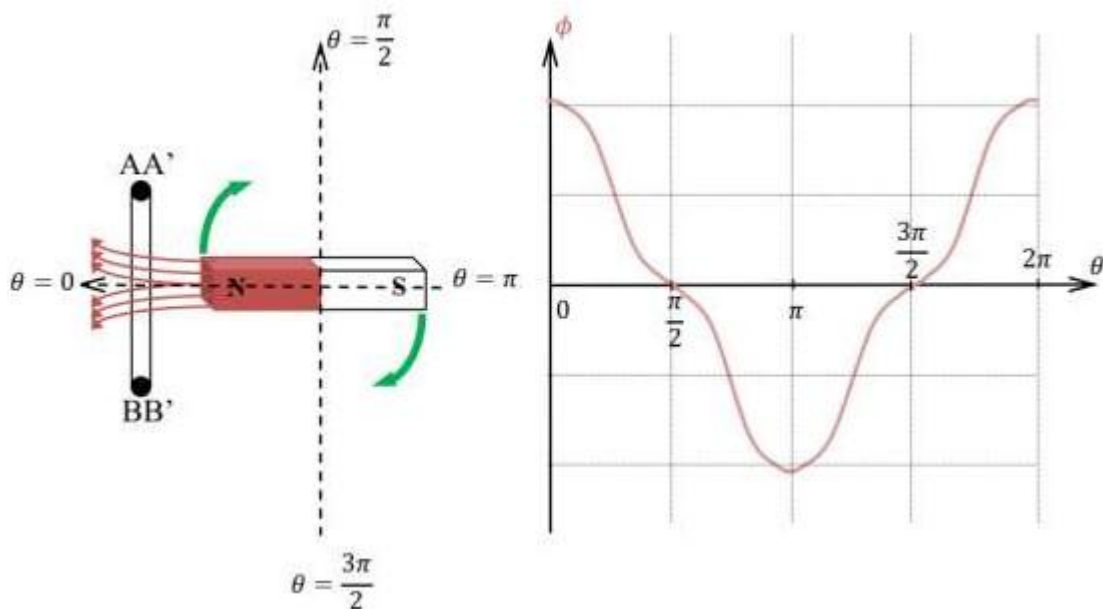


Figure I.5. Forme d'onde du flux traversant la spire

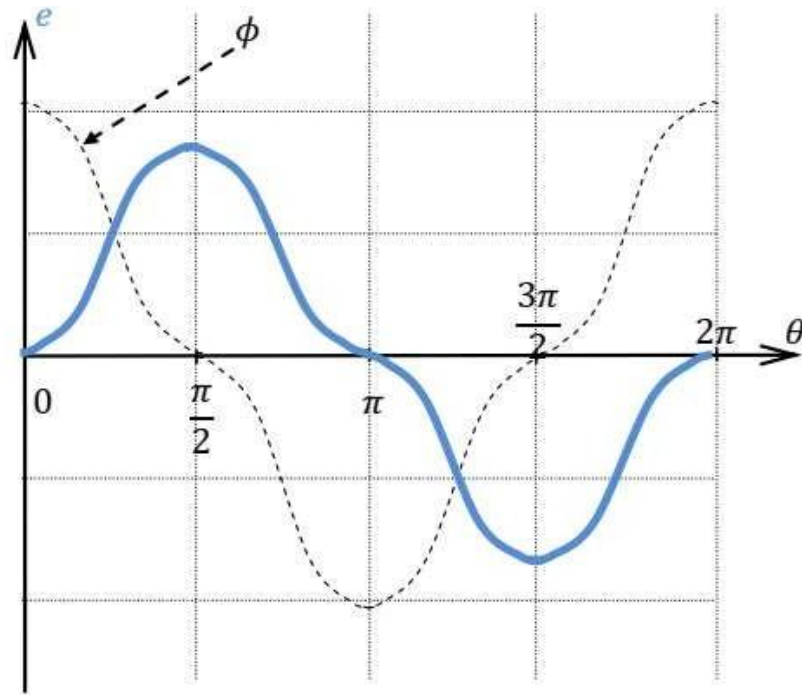


Figure I.6. Forme d'onde de la f.é.m entre les bornes de la spire.

Ceci rend la f.é.m égale à :

$$e = \phi_{max} \omega \sin(\omega t) \quad (I.7)$$

D'où

$$e = E_{max} \cos(\omega t - \pi/2) \quad (I.8)$$

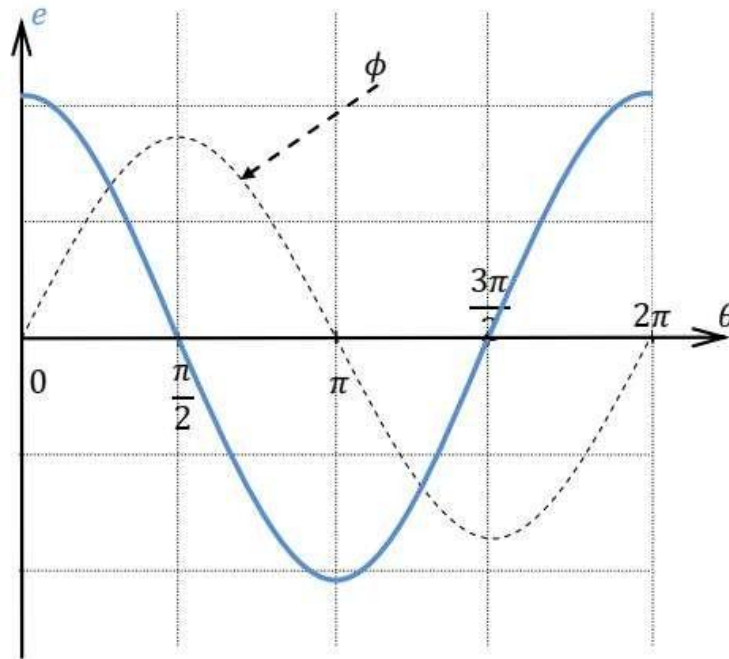


Figure I.7. Forme sinusoïdale de la f.é.m entre les bornes de la spire par rapport au flux

I.5. Catégories des machines électriques

Il y a 3 catégories de machines électriques :

I.5.1. Les machines génératrices

qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, appelées dynamo ou alternateur. [15]

I.5.2. Les moteurs électriques

qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique, appelés moteurs à courant continu ou moteurs à courant alternatif (synchrone ou asynchrone).

I.5.3. Les machines transformatrices

qui modifient la grandeur des courants ou/et des tensions, transforment le courant continu en alternatif ou l'inverse.

I.6. Les éléments constitutifs des machines électriques tournantes

Les machines qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique ou l'inverse sont appelées les machines électriques tournantes.

Ces machines tournantes comportent généralement un organe fixe nommé stator et un organe mobile, qui tourne, nommé rotor qui sont séparés par l'entrefer. L'organe qui sera destiné à créer le champ magnétique est nommé l'inducteur et l'organe portant les conducteurs qui sont siège de forces électromotrices sous l'effet des phénomènes d'induction est nommé l'induit. [24]

Le flux créé par l'inducteur est dû par la présence dans ce dernier d'un aimant permanent ou à des conducteurs parcourus par des courants. Les lignes de force de ce flux circulent à travers un circuit magnétique fermé constitué par l'inducteur, l'entrefer et l'induit.

I.7. Les différentes puissances des machines électriques

I.7.1. La puissance nominale

La grandeur nominale propre à un appareil quelconque est la grandeur à laquelle cet appareil pourra fonctionner normalement pendant sa durée de vie raisonnable sans subir d'usure ou de vieillissement anormal. Cette valeur est indiquée clairement sur la plaque signalétique de la machine.

Cette puissance nominale varie selon le type de la machine :

- pour une génératrice à courant continu, il s'agit de la puissance électrique (active) développable à ses bornes, exprimée en kW.

- pour un alternateur et un transformateur, il s'agit de la puissance électrique apparente développable à ses bornes, exprimée en kVA. La puissance active dépend des conditions d'utilisation.
- pour un moteur (à courant alternatif ou à courant continu), il s'agit de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur, exprimée en kW.

I.7.2. Puissance absorbée

La puissance absorbée correspond à l'énergie électrique absorbée sur le réseau électrique par le moteur, et que l'on détermine via la formule suivante :

Dans les circuits à courant continu, l'expression de la puissance électrique est très simple :

$$\text{Puissance} = \text{Tension} \times \text{Courant}$$

$$P = U \cdot I \quad (\text{I.9})$$

la formule de la puissance en alternatif :

$$\text{Puissance} = \text{Tension} \times \text{Courant actif}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{I.10})$$

I.7.3. La puissance utile

La puissance nominale ou puissance utile est celle que l'on retrouve sur la plaque signalétique du moteur. Elle correspond à la puissance sortant de l'arbre et qui est délivrée à la machine entraînée. On la calcule en multipliant la puissance absorbée par le rendement. [18]

$$P_u = P_a - \text{Pertes} \quad (\text{I.11})$$

I.7.4. Rendement de la machine

Le rendement de la machine est donné par la relation :

$$n = \frac{p_u}{p_a} \quad (\text{I.12})$$

Avec n est le rendement

p_u la puissance utile à la sortie de la machine et p_a est la puissance absorbée par la machine.

Les natures de p_u et p_a varient selon le type de la machine : p_a est une puissance électrique et p_u une puissance mécanique pour un moteur, inversement pour une génératrice et

sont toutes des puissances électriques pour les transformateurs.

I.7.4.1. Pertes et rendement

Grâce à la grande disponibilité de l'énergie électrique et aux nombreux développements technologiques, on rencontre de plus en plus les machines électriques qui font tous intervenir les principes électriques, électromagnétiques et mécaniques qui s'accompagnent inévitablement de pertes. Les pertes électriques sont principalement déterminées par l'effet Joule. Elles sont connues dans les conducteurs traversés par des courants. Il existe aussi, pour les pertes électriques, celles liées à la commutation ou au contact avec les bagues. Elles n'interviennent que si la machine nécessite une alimentation électrique sur sa partie tournante. Les circuits magnétiques, constitués de tôles ferromagnétiques, sont sujets aux fuites. Elles sont dues au champ magnétique effectivement créé par le circuit mais pas utilisé pour la transformation en énergie mécanique. Les fuites elles-mêmes ne sont pas directement génératrices de pertes mais obligent l'actionneur à absorber plus de puissance réactive pour conserver un niveau de flux suffisant dans sa partie utile. Le courant qui circule est donc plus intense et provoque des pertes supplémentaires. Il existe aussi des pertes à l'intérieur du circuit magnétique. Elles sont dues aux variations du champ dans le matériau et dépendent donc de la fréquence. Elles sont représentées par les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault et sont généralement difficiles à dissocier. Toutes ces pertes sont regroupées sous l'appellation de pertes fer. [6]

Les pertes mécaniques sont dues aux frottements " secs " dans les paliers ou les roulements de la machine ainsi qu'aux frottements " visqueux " issus du cisaillement de l'air dans l'entrefer et de sa mise en mouvement aux extrémités du rotor. Ces pertes sont localisées dans des parties de la machine qui les rendent moins prépondérantes que les pertes électriques ou les pertes fer qui prennent naissance au cœur du système.

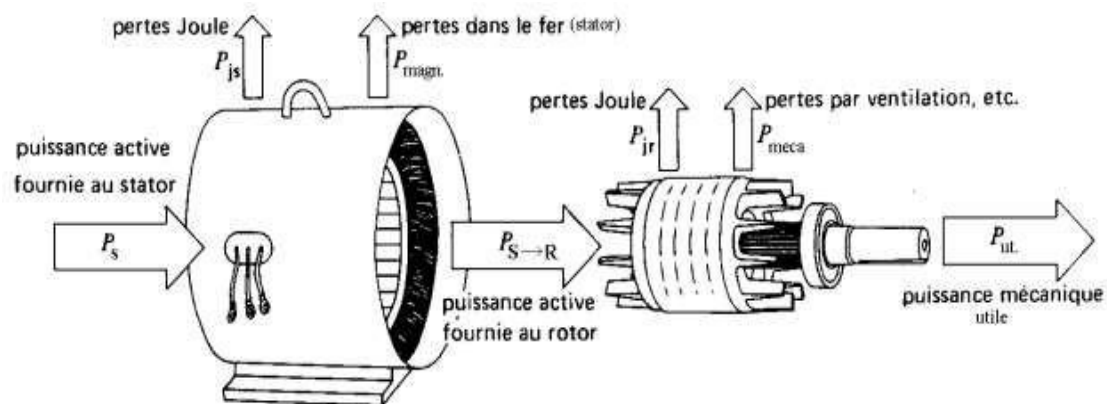


Figure I.8. Répartition des puissances dans une machine.

Toutes ces pertes se traduisent par une élévation de température due à la dissipation de chaleur participent à l'échauffement de la machine et font chuter le rendement de l'ensemble :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{délivrée}} = \frac{P_u}{P_u + P_{pertes}} \quad (I.13)$$

Nous allons voir ci-après les caractéristiques des pertes au sein de la machine en listant de manière détaillée les différents types de pertes existantes.

I.8. Classification des machines électriques

Le but essentiel des machines électriques est la transformation de l'énergie d'une forme dans une autre, l'une au moins de ces formes étant électrique, l'autre pouvant être électrique ou mécanique.

Les machines électriques font intervenir comme éléments fondamentaux :

- les courants électriques ;
- les champs magnétiques.

Le fonctionnement est donc basé sur les lois de l'électromagnétisme, qui ont été étudiées au cours d'électricité, et qui seront brièvement rappelées dans ce cours. Car c'est de l'interaction des courants électriques et des champs magnétiques que résulte leur fonctionnement.

On peut, a priori, classer les machines électriques en trois catégories principales :

I.8.1. Les machines génératrices:

qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

Leur fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par **déplacement relatif** de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un engin d'entraînement mécanique.

Selon que le courant électrique induit est continu ou alternatif, la machine génératrice sera appelée **dynamo** ou **alternateur**. Les Figures I.9 et I.10 schématisent le fonctionnement des machines génératrices.

On remarquera qu'en pratique, le déplacement relatif du circuit électrique et du champ magnétique est obtenu [27]:

- dans le cas de l'alternateur, par rotation du champ magnétique, le circuit étant fixe ;
- et dans le cas de la dynamo, par rotation du circuit électrique dans un champ magnétique fixe

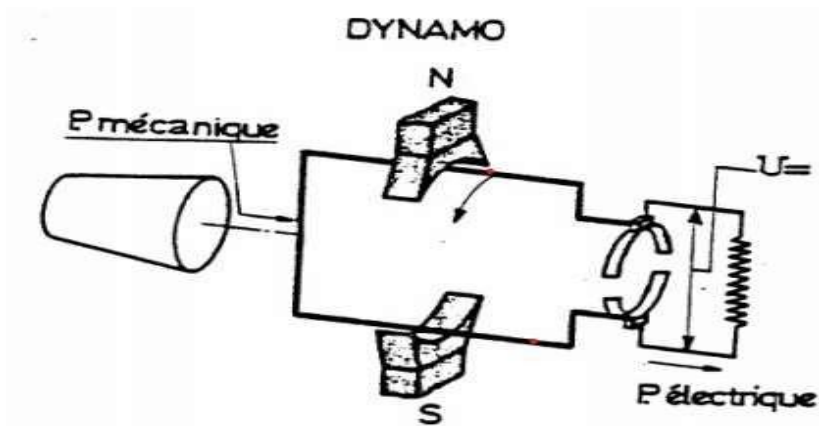


Figure I.9 Cas de Dunamo.

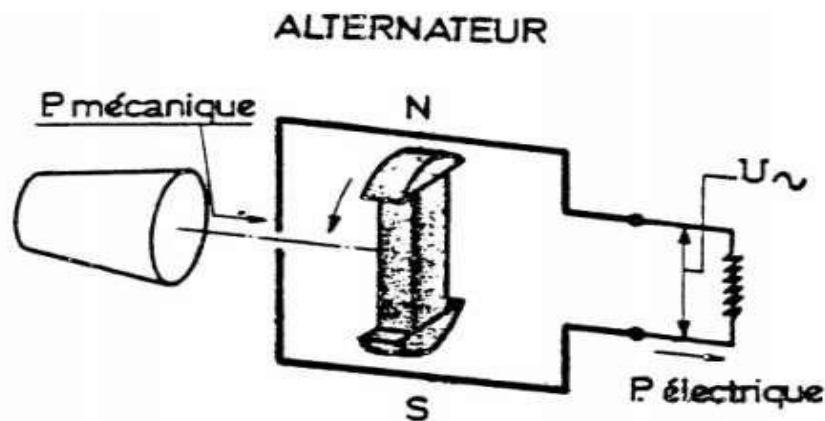


Figure I.10 Cas de l'Alternateur.

I.8.2. Les moteurs électriques

Leur fonctionnement est basé sur l'obtention d'un effort mécanique par action d'un champ magnétique sur un circuit électrique traversé par un courant fourni par une source extérieure, laquelle peut aussi produire éventuellement le champ magnétique.

Selon que le courant électrique fourni par la source extérieure est continu ou alternatif, la machine sera appelée **moteur à courant continu** ou **moteur à courant alternatif (synchrone ou asynchrone)**. [25]

Les Figures I.11, I.12 et I.13 schématisent le fonctionnement de ces moteurs électriques

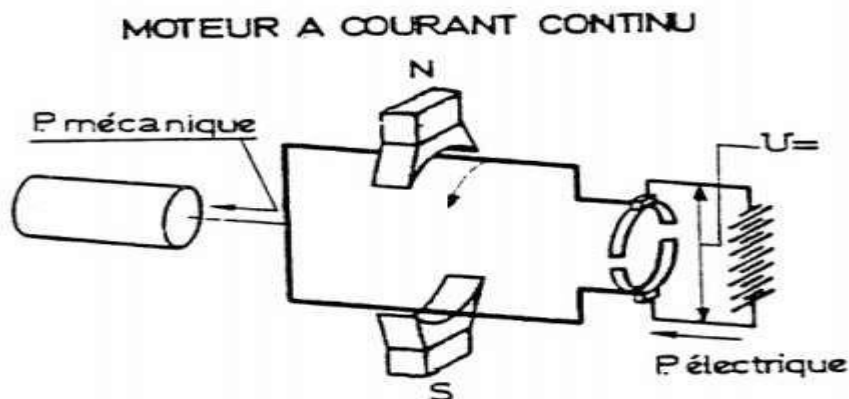


Figure I.11 moteur à courant continu

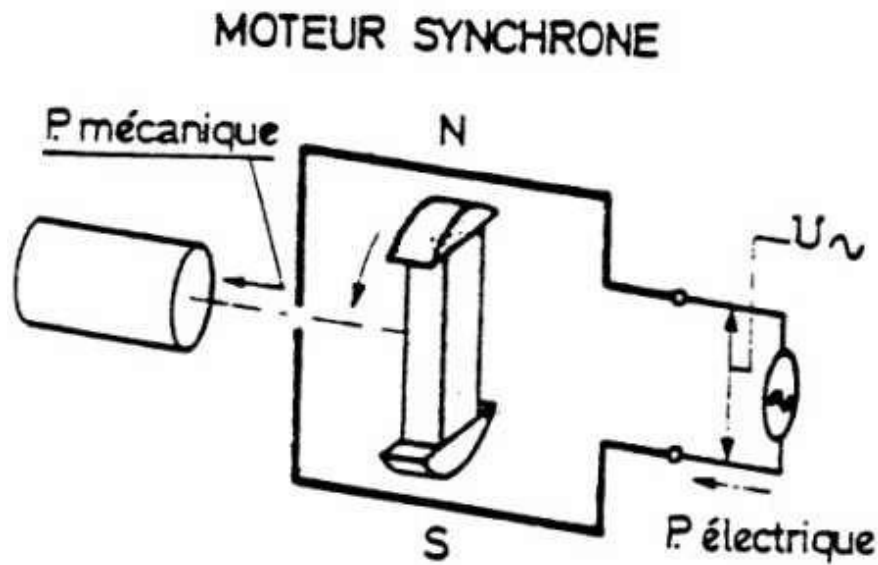


Figure I.12 moteur synchrone

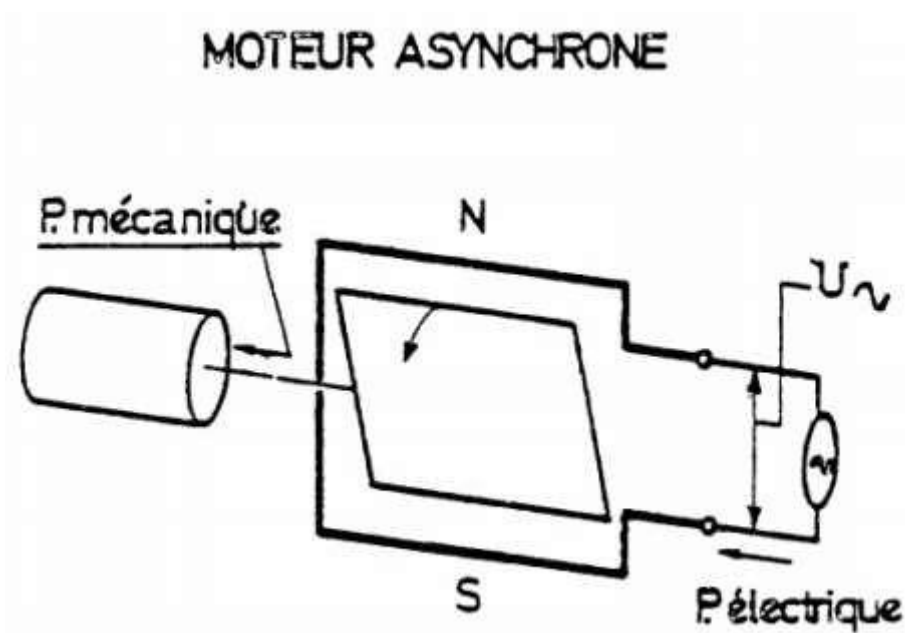


Figure I.13 moteur asynchrone

I.8.3. Les machines transformatrices

La catégorie la plus importante est le transformateur qui modifie la grandeur des courants et tensions alternatifs. Son fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur fixe sous l'action d'un champ magnétique variable dans le temps mais fixe dans l'espace. [14]

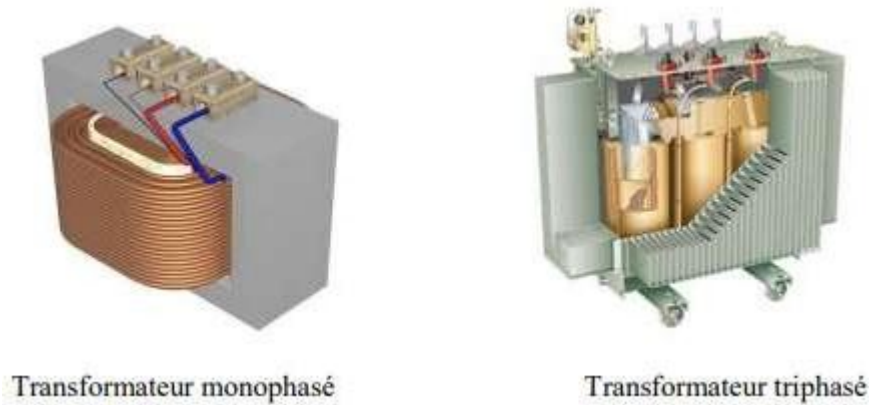


Figure.I.14. Les machines transformatrices

Les autres machines transformatrices (changeurs de fréquence, commutatrices transformant le courant alternatif en continu ou inversement) sont supplantées aujourd'hui par des systèmes statiques utilisant l'électronique de puissance.

I.9. Constitution d'une machine électrique

- a) **Mécaniquement** : un générateur ou un moteur est constitué par une partie fixe appelée stator et une partie mobile appelée rotor qui tourne à l'intérieur du stator. Entre ces 2 parties est aménagé un petit intervalle d'air appelé entrefer.
- b) **Du point de vue électromagnétique** : une machine électrique comporte un circuit magnétique et souvent 2 circuits électriques. Entre le flux (dans le circuit magnétique) et les courants (dans les circuits électriques) s'exerce une action réciproque des principes de l'électromagnétisme déjà connus.



Figure.I.15. Constitution d'une machine électrique[10]

I.10. Différents types des machines électriques

Nous pouvons classer les machines électriques, suivant la nature de leur mouvement, en trois familles :

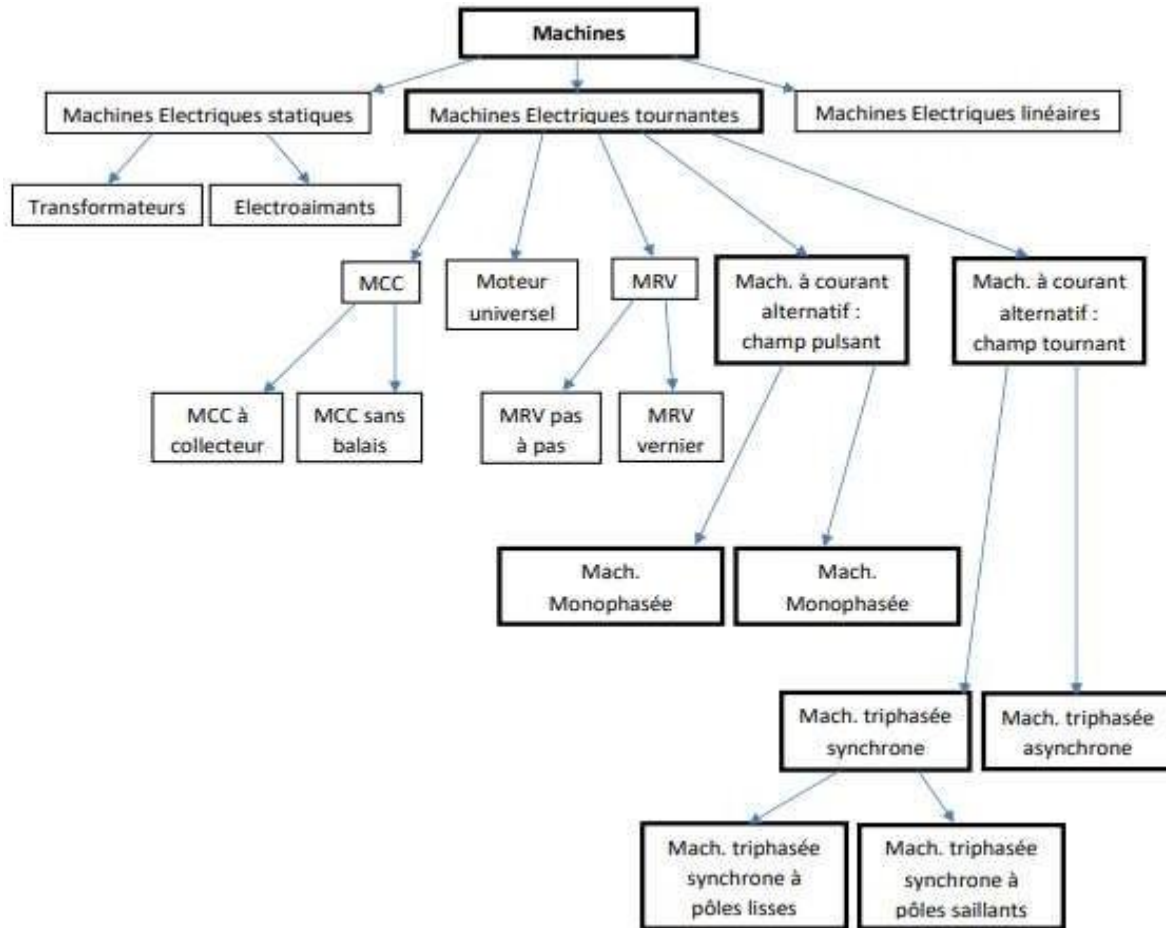


Figure.I.16. Différents types de machines électriques

I.11. Caractéristiques.

Le comportement des moteurs est donné par les courbes typiques ci-dessous. Les caractéristiques varient en fonction de l'échauffement et de la précision de la tension, de la fréquence ou de la valeur du condensateur.

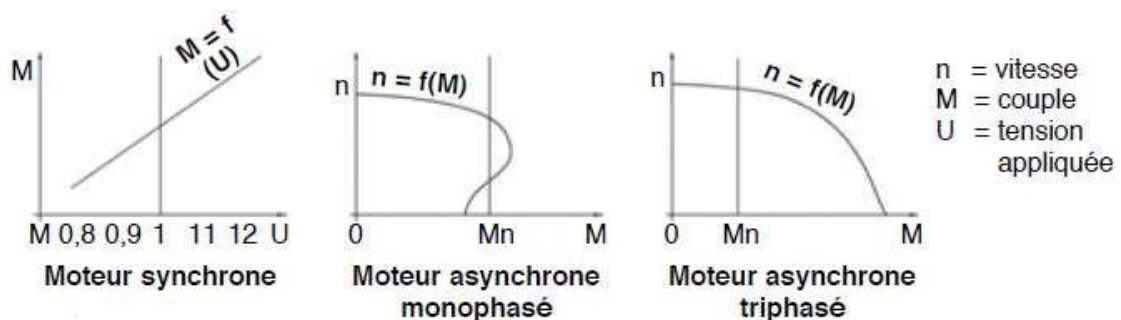


Figure I.17. Caractéristiques

I.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit des généralités sur les machines tournantes (constitution, principe de fonctionnement, caractéristique....), de plus on a donné des classifications pour ces types de machines, puis nous avons présentés les éléments constitutifs des machines électriques tournantes. ainsi que les catégories des machines électriques.

CHAPITRE II

***Principaux types des
machines électriques
tournantes***

II.1. Introduction

La machine synchrone est de loin la plus facile à piloter car le flux magnétique du rotor est créé uniquement soit par le moment magnétique de l'aimant permanent du rotor, soit par le courant inducteur continu envoyé dans le bobinage rotorique.

En particulier, il ne dépend pas de courants induits en provenance du stator, et donc de la variation du flux statorique; ce dernier sera utilisé uniquement pour effectuer un contrôle simple du couple électromagnétique.

Les mécanismes de base du pilotage de la machine synchrone pourront ensuite être transposés pour être utilisés dans le pilotage de la machine asynchrone pour laquelle le flux rotorique est intimement lié au flux statorique; ceci provient du fait que le moment magnétique créé au rotor par les courants induits sont dû à la variation du flux statorique vue du rotor. [17]

II.2. Définition [8]

Une machine synchrone est une machine à champ tournant qui se caractérise par le fait que la vitesse de rotation est un sous- multiple entier de la fréquence des courants alternatifs polyphasés parcourant l'enroulement de l'une des armatures, si cet enroulement est conçu de façon à former p pair de pôles, et si ω (en rad/s) est la pulsation des courants qui le parcourent, la vitesse angulaire de rotation Ω (en rd/s) est liée à ω et p par la relation :

$$\Omega = \omega / p \quad (II.1)$$

I.3. Constitution de la machine synchrone

Une machines synchrone comporte deux parties magnétiques séparées par un entrefer.

- **Stator (induit)**

Dans le stator, nous avons l'induit (circuit de puissance) ; C'est un bobinage triphasé, généralement couplé en étoile[23] :

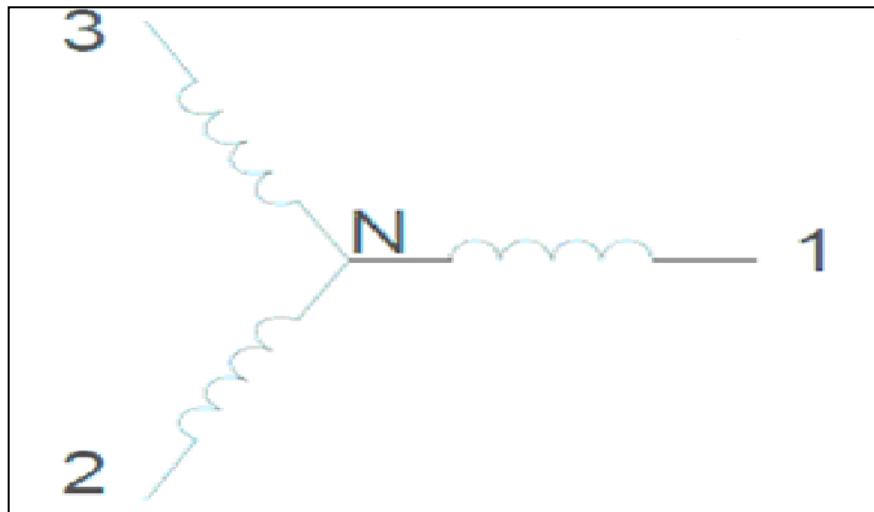


Figure.II.1. Représentation symbolique de l'induit.

- **Rotor (inducteur)**

C'est la partie tournante de la machine, elle est séparée du stator par un entrefer qui est soit constant (machine synchrone à pôles lisses), soit variable (machine synchrone à pôles saillants). [24]

Il est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation continu (apporté par l'intermédiaire de bagues et de balais) créant un champ magnétique fixe à $2p$ pôles.

a. Les différents rotors de la machine synchrone [9]

- ❖ **Rotor à pôles saillants**

C'est un électro-aimant dont les pôles sont alternativement nord et sud.

Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine.

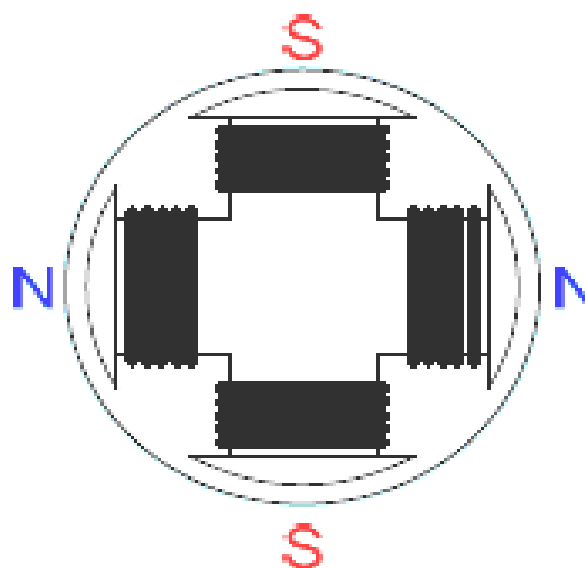


Figure. II.2.schéma du rotor à pôle saillant.

❖ Rotor à pôles lisses ou Turboalternateur

Le rotor à pôles lisses est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches. Il possède le plus souvent deux pôles (Figure.II.3) [13]:

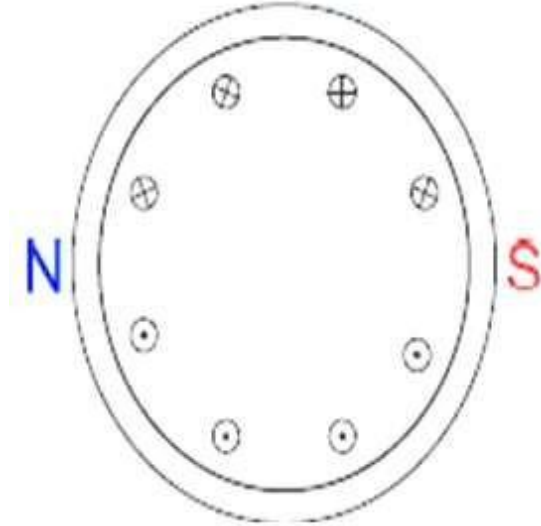


Figure. II.3.Schéma du rotor à pôles lisses.

- **La carcasse**

Ce sont des pièces ensembles, soutenant et renferment le paquet statorique, assurant la protection contre les chocs extérieurs. Sur la carcasse, on dispose d'une plaque signalétique indiquant les caractéristiques de la machine et son régime de fonctionnement.[1]

- **Les balais**

Ce sont des pièces conductrices, généralement fixées, qui assurent la liaison électrique par un contact glissant entre la partie fixe et la partie mobile.

- **Les portes balais**

Organe servant à porter les balais, et permettant de les maintenir en contact avec la surface mobile.

- **Les paliers**

Ce sont des organes réalisés en acier soudé, destinés à supporter l'arbre tournant et pouvant limiter son déplacement axial. Ils reçoivent des roulements à billes ou à rouleaux. Un dispositif de graissage assure la lubrification.

- **L'arbre**

Il assure la transmission de l'énergie mécanique et le guidage des masses tournantes ; il est en acier forgé, il doit être dimensionné pour supporter les différents régimes de fonctionnement. Les machines comportent un ou deux bouts d'arbre pour l'accouplement.

- **Les flasques**

Ce sont des pièces massives ou ajourées. Fixées à la carcasse servant à protéger les enroulements.

- **Les bagues collectrices**

Ce sont des organes conducteurs sur lesquels s'appuient les balais, destinées à permettre le passage du courant du circuit induit au circuit inducteur pour une machine auto-excitée.

- **La boîte à bornes**

C'est un dispositif permettant le raccordement des extrémités des conducteurs de la machines avec le réseau extérieur.

II.4. Principe de fonctionnement de la machine synchrone[8]

Les courants du rotor créent un champ magnétique tournant dans le stator. Sa fréquence de rotation (sa vitesse) est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est nommée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est alimenté par un courant continu ce qui le rend comparable à un aimant. Il peut d'ailleurs être constitué d'aimants permanents, le rotor n'a alors plus besoin d'alimentation. Le champ magnétique du rotor créé cherche en permanence à s'aligner sur celui du stator. C'est le principe de la boussole (qui voit elle par contre un champ magnétique fixe). Cette machine est dite synchrone : le champ du rotor ne peut que tourner à la même vitesse que le champ du stator.

II.5. Spécification de machine synchrones

II.5.1. Les machines synchrones à aimants permanents

Pour le projet SOFRACI, le choix de la topologie s'est porté sur la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). En effet, grâce à l'utilisation des aimants permanents au sein du rotor, les MSAP permettent d'obtenir des couples et puissances massives supérieurs ainsi que de très hauts rendements (cf. Figure II.4) [5]:

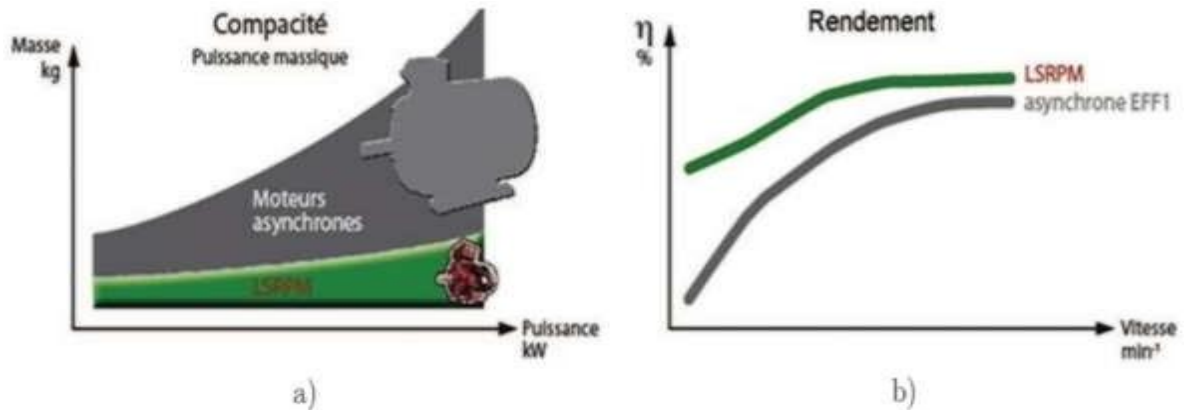


Figure II.4. Performances de la MSAP (LSRPM) : a) Compacité et b) Rendement

Par conséquent, les MSAP sont particulièrement adaptées aux applications industrielles nécessitant des performances élevées. Celles-ci comprennent évidemment les applications embarquées liées au transport telles pour les VHR et VE.

II.6. Machine asynchrone [28]

II.6.1. Introduction

Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité.

Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer.

Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications ; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans artifice.

Les caractéristiques de courant absorbé et de couple de cette machine sont bien .

Elles font apparaître très clairement une pointe d'intensité de 5 à 10 fois I_n ainsi qu'un à-coup de couple au démarrage.

La pointe d'intensité est nuisible pour le réseau d'alimentation et il sera quelquefois nécessaire de la réduire. L'à-coup de couple est gênant pour la mécanique entraînée il peut même avoir des conséquences destructives.

II.6.2. Définition

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement. Le rotor est

toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique [4]

On appelle machine asynchrone toute machine, qui, ayant $(2p)$ pôles et étant reliée à un réseau de fréquence f_s , ne tourne pas exactement à la vitesse asynchrone (f_s/π) . On parle généralement de moteurs asynchrones car ces machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique à partir du réseau électrique.

Parmi les machines asynchrones, on peut distinguer deux types [7]:

- Les machines d'induction.
- Les machines à collecteur.

Le moteur d'induction est tellement plus utilisé que les autres que lorsqu'on parle de moteur asynchrone on sous-entend d'induction. La machine d'induction est caractérisée par une armature non alimentée (rotor), parcourue par des courants induits par l'autre armature qui est alimentée à partir d'un réseau de fréquence (stator) f_s [8].

II.6.3.Constitution la machine asynchrone

•Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. La Figure.II.5 représente la constitution du stator d'une machine asynchrone.

La Figure montre la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge.



Figure II.5. Stator d'une machine asynchrone basse tension[27]

•Le rotor

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil (Figure II.6).

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine.

En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil (Figure II.6), les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

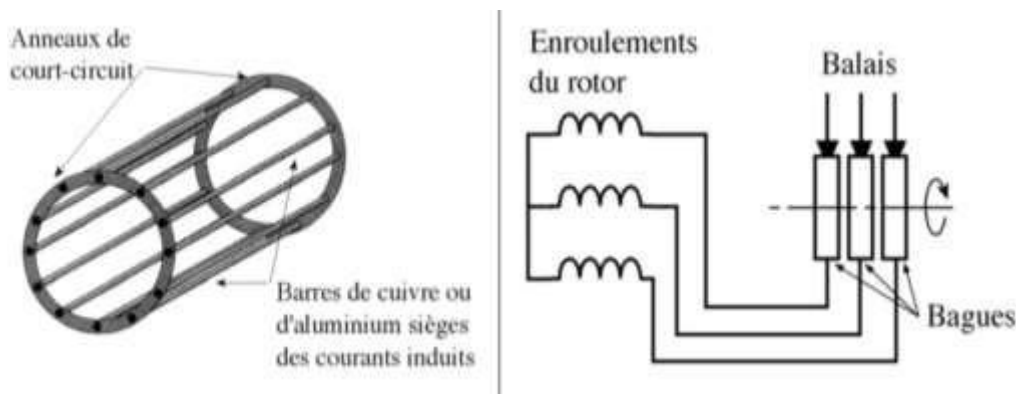


Figure II.6. Rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil

II.6.4. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose[4] :

- D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux).
- D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.

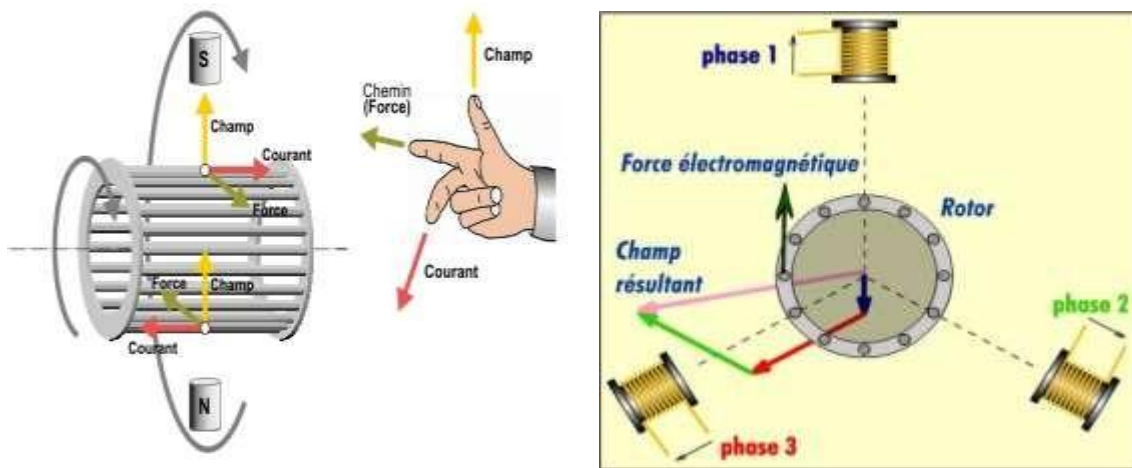


Figure II.7. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Comme montré sur le schéma ci-dessus, le champ tournant, à un instant donné, est orienté vers le haut. En considérant deux conducteurs diamétralement opposés, on constate que les courants induits dans ces deux conducteurs sont en sens inverse et, associés au champ magnétique, créent des forces motrices en sens inverse. Le rotor étant libre de tourner sur l'axe X-Y, les deux forces s'associent pour imprimer aux deux conducteurs un couple permettant la rotation de la cage d'écureuil : le moteur électrique est inventé.

Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator.

Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être

présente en permanence; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît.

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple; intervient ici la notion de glissement. [30]

II.7. La différence entre les moteurs synchrones et asynchrones

- **Une différence liée au rotor**

Les deux moteurs se composent d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile). La différence entre moteurs synchrones et asynchrones vient du rotor :

- le rotor des moteurs synchrones se compose d'un aimant ou électro-aimant alors que celui des moteurs asynchrones est constitué d'anneaux (qui forment ce que l'on appelle la cage à écureuil).
- dans le cas d'un moteur synchrone, le moteur tourne à la même vitesse que le champ magnétique (le rotor tourne à la vitesse de synchronisme). Dans le cas d'un moteur asynchrone, il y a un décalage entre la vitesse de rotation de l'arbre et le champ magnétique (le rotor tourne moins vite et n'atteint jamais la vitesse de synchronisme).

II.8. Avantages et inconvénients des moteurs synchrones et asynchrones[13]

Voici une liste non exhaustive des avantages et inconvénients de ces deux moteurs :

- Sur les moteurs asynchrones, le fait que le rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ magnétique provoque ce qu'on appelle des glissements, ce qui entraîne une perte de la vitesse de rotation. Ce problème ne touche pas les moteurs synchrones, qui ont au final un meilleur rendement.
- Le démarrage direct des moteurs synchrones est impossible alors que les moteurs asynchrones peuvent être lancés directement sur le réseau.
- L'un des grands inconvénients du moteur synchrone est qu'il décroche si l'on dépasse le couple maximum.
- La vitesse d'un moteur synchrone reste fixe, peu importe la charge. Cela peut être un véritable atout dans certaines circonstances. Les deux moteurs peuvent facilement varier leur vitesse grâce à un variateur.

II.9. Ce qui fait le succès des moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones (moteurs monophasés et moteurs triphasés) sont les moteurs les plus utilisés dans l'industrie car [11]:

- Ils sont moins chers et moins volumineux que les moteurs synchrones
- Ils sont plus simples à entretenir et très résistants (les bagues des électroaimants des moteurs synchrones sont difficiles à entretenir)
- Ils proposent un très grand choix d'application : on peut pratiquement tout faire avec un moteur asynchrone. La plupart des machines industrielles peuvent être entraînées grâce à un moteur asynchrone et la variation de vitesse est très facile à mettre en place.

II.10. Conclusion :

Les machines triphasées à courant alternatif permettent la transformation électrique-mécanique et vis-versa. Elles sont les plus largement utilisées dans les applications industrielles et domestiques depuis longtemps après une version des machines biphasées qui n'a pas prospéré. Dans ce chapitre on a présenté les principaux types des machines à courant alternatif c'est-à-dire les machines synchrone et asynchrone, nous avons commencé par les machines synchrone ensuite les machines asynchrone .

Enfin, nous avons indiqué quelques avantages et inconvénients des moteurs synchrones et asynchrones et aussi la différence entre les deux types de machines .

CHAPITRE III

Causes d'échauffement des machines électriques

III.1. Introduction:

Dans les machines électriques tournantes il existe généralement un écart entre la puissance absorbée et la puissance utile. Cet écart est dû aux pertes à travers les différentes transformations dans la machine.

Les principaux groupes de pertes rencontrés dans une machine tournante sont les suivants [10]:

- les Pertes d'énergie électrique: (Pertes par effet Joule dans les circuits électriques)
- Pertes dans le circuit magnétique ou pertes fer
- Pertes mécaniques

III.2. Les pertes d'énergie

III.2.1. Les pertes électriques

III.2.1.1. Les pertes par effet Joule

Les pertes par effet joule se trouvent au niveau des conducteurs. Ces pertes sont dues aux passages des courants dans les parties conductrices, elles sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant et à la résistance du conducteur. [16]

$$P_J = RI^2$$

Avec ces pertes viennent les pertes supplémentaires :

- Par effet de peau : Quand le courant est à haute fréquence, la densité du courant n'est plus uniforme dans une section droite du conducteur donc le flux propre du conducteur rejette le courant vers la périphérie de celui-ci. La résistance est alors réduite comme celle d'une couronne d'épaisseur de peau. En conséquence la résistance et l'inductance augmentent pour un même courant.
- Les pertes joules supplémentaires sont dues au champ principal dans les encoches. Les divers flux dans les encoches modifient les grandeurs du courant et provoquent une augmentation de la résistance du conducteur donc des pertes dissipées dans celui-ci.
- Pour le cas des machines à courant alternatif, les pertes liées aux harmoniques d'espace sont dues aux discontinuités géométriques des machines.

III.2.2. Les pertes magnétiques

III.2.2.1. Les pertes fer

Le phénomène d'Hystérésis et les courants de Foucault induisent des pertes dans les matériaux magnétiques des machines. Il s'agit des pertes Fer. Ces pertes peuvent être calculées par plusieurs formules. [21]

a) Formule de Steinmetz

Pour un régime purement sinusoïdal, les pertes Fer volumiques P_f sont données par :

$$P_f = K \cdot f^a \cdot \widehat{B}^b \quad (\text{III.1})$$

K, a, b sont des paramètres liés au matériau ferromagnétique utilisé,

f [Hz] est la fréquence du champ magnétique.

B [T] est la valeur crête de la densité de flux magnétique.

Cette expression ne prend pas en compte la totalité des pertes dans le fer. On peut l'utiliser pour le calcul des pertes fer à faible fréquence.

b) Formule de Bertotti :

L'expression décompose les pertes moyennes en trois termes différents sous la forme :

$$P_{f moy} = \frac{1}{T} \int_0^T P_f(t) dt = K_h \widehat{B}^h + \frac{e}{12T\rho} \int_0^T \left(\frac{dB(T)}{dt} \right)^2 dt + \frac{K_e}{dT} + \int_0^T \left(\frac{dB(T)}{dt} \right)^{3/2} dt \quad (\text{III.2})$$

- Le premier terme désigne les pertes par hystérésis.
- Le second terme quantifie les pertes par courant de Foucault.
- Le troisième terme sont par excès.e:

Epaisseur des tôles de fer [m] .

ρ : Résistivité électrique du fer [$\Omega \cdot m$] .

K_h et K_e sont des coefficients déterminés par recalage avec les mesures expérimentales.

III.2.3. Les pertes mécaniques

Les pertes mécaniques sont dues à la rotation des parties tournantes dans la machine.

Les natures de ces pertes sont [22] :

a) Pertes dans les paliers

Ces pertes sont dues aux forces de frottement mécaniques :

$$P_{roul} = 1.5 \cdot 10^{-5} M_i \cdot n \quad (\text{III.3})$$

$$M_i = 0.5 \cdot \mu \cdot F_i \cdot d \quad (\text{III.4})$$

Avec

n : Nombre de roulements,

M_i : Moment des forces de frottement [N.m],

μ : Coefficient de frottement du roulement,

F_i : Force appliquée sur le roulement [N],

d : Diamètre d'alésage [m].

b) Pertes aérauliques

Elles sont dues au frottement de l'air avec la surface du rotor lors de sa rotation. Elles deviennent essentiellement lorsque la machine tourne à grande vitesse.

$$P_a = \rho \cdot \pi \cdot r_j^2 \cdot L v^2 C_f \quad (\text{III.5})$$

Avec

ρ : Masse volumique de l'air [kg.m^{-3}],

r_i : Rayon externe du rotor [m],

L : Longueur moyenne de l'entrefer [m],

v : Vitesse linéaire [m.s^{-1}],

C_f : Coefficient de frottement pariétal.

Conclusion : Le calcul des pertes thermiques est essentiel destiné pour connaître avec précision la répartition des températures dans les machines électriques. Une bonne modélisation thermique passe par une quantification précise des pertes et des phénomènes de transfert de chaleur.

Les isolants ont une température limite, à chaque fois que cette température est dépassée ils se détériorent et réduisent la durée de vie de la machine. En générale à chaque 10% au-dessus de cette température la durée de vie diminue de 50%. [5]

III.3. L'élévation de température dans les machines électriques tournantes

Les causes des échauffements excessifs détériorent rapidement l'isolation du bobinage du moteur. Une règle bien connue affirme que la durée de vie des isolations diminue de 50% à chaque fois que la température croît environ 10°C de la température normale d'utilisation. Or la durée de vie des isolations détermine la durée de vie du moteur. Les principales raisons des surchauffes sont : Surcharge, faible alimentation, et la condition environnementale. [10]

III.3.1. La surcharge

La surcharge se présente lorsqu'on opère au-delà de la charge nominale admissible ou lorsque on opère avec la machine avec des services différents du type de service destiné pour cette dernière.

III.3.2. Le facteur de service

Le facteur de service de la machine désigne le fonctionnement nominal de la machine selon la charge, le temps et la fréquence d'utilisation. Une opération en dehors du facteur de service destiné au moteur peut détériorer la machine : surchauffe à cause d'une opération en charge trop long, arrêt et marche successifs fréquents, temps de refroidissement insuffisant.

III.3.3. La tension d'alimentation

Une faible tension d'alimentation fait augmenter l'appel de courant pour maintenir la puissance utile. $P=U \cdot I$ alors si U diminue, I doit augmenter pour que P reste constante.

La tension nominale de fonctionnement du moteur est donnée sur la plaque signalétique, d'après la norme IEC on peut opérer avec $\pm 5\%$ de cette tension.

III.3.4. L'environnement

La machine est destinée à travailler dans un environnement avec une température bien indiquée sur la plaque signalétique de la machine. Un climat non destiné à la machine, un manque ou une faible ventilation augmente la température de la machine.

III.4. Echanges thermiques dans les machines électriques

Le transfert thermique est la science qui cherche à prévoir l'énergie transférée entre les corps matériels due à la différence de température. Après la conception électromagnétique d'une machine électrique, souvent le problème thermique lié à la machine est négligé à cause de deux raisons [10]:

- L'analyse thermique est particulièrement difficile pour un instrument dans une machine tournante.
- les facteurs de convection ne sont pas souvent faciles à calculer. Dans plusieurs cas, le sur échauffement des machines n'est pas vu comme un grand problème, donc l'optimisation thermique pour ces cas peut être utilisée pour réduire la taille du moteur et le coût de production.

III.5. Transfert de chaleur dans les moteurs électriques tournantes [25]

***La chaleur :** C'est une forme d'énergie.

***La température :** C'est la manifestation mesurable de la chaleur stockée. On dit aussi que la température est liée à la moyenne d'énergie cinétique due au mouvement des atomes et molécules du corps.

III.5.1. Rappel sur les différents modes de transferts thermiques

Dès qu'il existe entre deux corps une différence de température, il y a apparition d'échange de chaleur entre ces corps jusqu'à l'équilibre de leur température. Cet échange peut être par conduction, par convection ou par rayonnement.

III.5.2. Transfert de chaleur par conduction

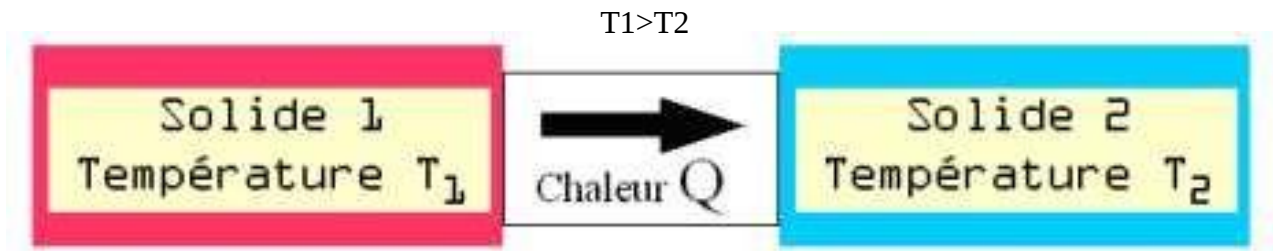


Figure III.1. Transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction est un transport de chaleur dans un milieu immobile ou mobile sans remous turbulent. Ce mode de transport de la chaleur est le seul à exister au sein d'un solide opaque, aussi la conduction concerne essentiellement les solides.

Dans les parties solides du moteur, tel que le stator et le rotor, la chaleur est transférée par conduction. Nous utilisons alors la loi standard de FOURIER pour relier le flux et le gradient de la température.

$$q = -kAT \quad (\text{III.6})$$

Où

k : conductivité thermique

q : densité du flux de chaleur

T : température

Dans le tableau ci-dessous, nous donnons les valeurs du coefficient de conductivité thermique pour les matières les plus utilisées.

Matériau	(W/m/K)	Matériau	(W/m/K)
Argent	419	Grès	1,8
Cuivre	386	Verre	0,78
Aluminium	204	Chêne	0,17
Fer (pur)	73	Laine de verre	0,038
Acier Inox	16	Eau	0,556
Mercure	8,2	Air	0,0262

Tableau III.1. les valeurs du coefficient de conductivité thermique

III.5.3. Transfert de chaleur par radiation(rayonnement)

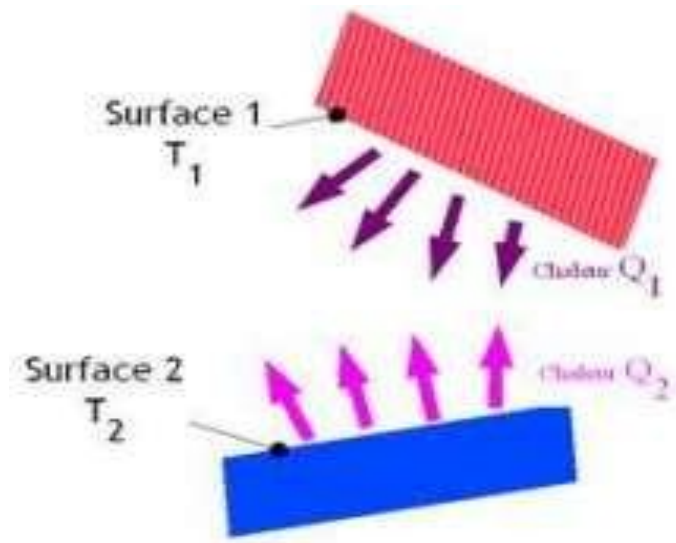


Figure III.2. Transfert de chaleur par radiation

Une partie de la chaleur dans les moteurs à induction est transférée par radiation. La quantité réelle de l'énergie transférée sous forme de vagues électromagnétiques ne dépend pas seulement des propriétés de l'émissivité des parties du moteur considéré, mais aussi de la température qui est non linéaire.

Elle est due à une différence de températures entre la surface du moteur et la température ambiante. La chaleur sera rayonnée vers l'extérieur de la surface du moteur et l'énergie rayonnée peut être évaluée d'après la loi de radiation de Stefan –Boltzmann[14]

$$Q = s\sigma T^4 A T \quad (\text{III.7})$$

Où

A : la surface de la région du moteur considéré

ε : Coefficient d'émissivité

Constante de Boltzmann

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$C_{\text{cons}} = s\sigma$$

Le transfert de chaleur par rayonnement se fait par rayonnement électromagnétique. Le transfert peut se faire dans le vide sans présence de matière. Le flux de chaleur est donné par la relation suivante :

$$= s\sigma (T_s^4 - T_e^4) \quad (\text{III.8})$$

s : Facteur d'émission de la surface

σ : Constant de Stephan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$)

T_e : Température du milieu environnant

T_s : Température de la surface rayonnant

S : Surface

III.5.4. Transfert de chaleur par convection

On considère un troisième mode de transfert d'énergie calorifique qui est la convection. (échange de chaleur entre un fluide et un solide). Dans ce cas le phénomène thermique est compliqué par des déplacements de matière et au transfert de chaleur se superpose le transfert de masse. La plupart des moteurs ont des ventilateurs externes cela cause une force de convection sur le cadre du moteur où l'air ne coule pas. [13]

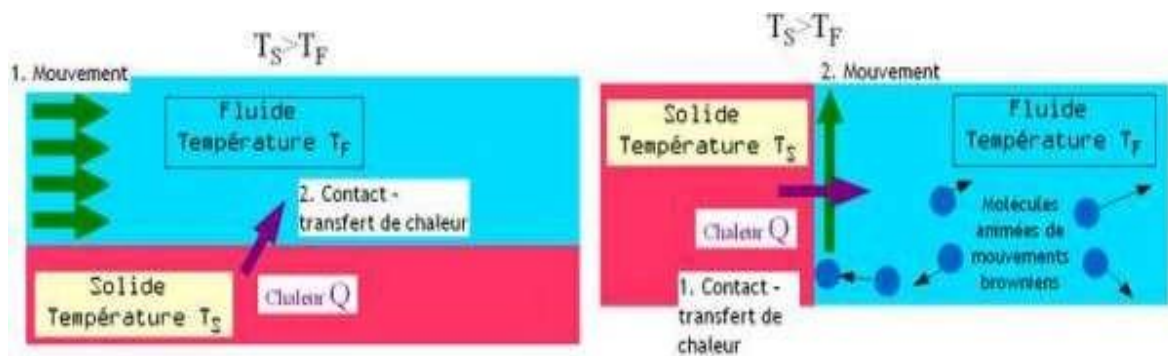


Figure III.3. Transfert de chaleur par convection

Il y a d'autres parties dans le moteur où le transfert de chaleur par convection est utilisé, en particulier dans l'entrefer, l'arbre, rotor, extrémités de l'arbre, palier magnétique, conduit refroidissant et les extrémités des bobines.

Le transfert de chaleur par convection est dû au mouvement d'un fluide de température moyenne T_m au contact d'un solide de température T_s . La loi de Newton donne une relation entre le flux de chaleur Φ et la différence de température entre les deux milieux qui est la suivante[9] :

$$\Phi = hS(T_s - T_m) \quad (\text{III.9})$$

h : coefficient d'échange par convection

S : surface de contact solide/fluide

Il y a deux types de convection :

- **Convection forcée** : lorsque le déplacement du fluide est engendré par une force extérieure.
- **Convection naturelle** : lorsque le déplacement du fluide est provoqué par la variation de sa masse volumique résultant de l'élévation de température et donc l'échange de chaleur entre le fluide et la paroi.

III.5.5. Mauvaise ventilation

On cas de détérioration du ventilateur du moteur il y aura un cumul d'air chaud qui soit chauffé les enroulements et du stator et du rotor et les roulements du moteur qui peuvent provoquer la panne de ce moteur.

III.5.6. Détermination du coefficient h

Ce coefficient d'échange est assez délicat à déterminer car il dépend de plusieurs variables telles que la géométrie des surfaces, leurs dimensions et formes, du type de matériau, de la direction et de la vitesse d'écoulement, la température, la densité, la viscosité, la chaleur spécifique et de la conductibilité thermique du fluide. Malgré cette complexité de calcul les nombres sans dimensions suivants aident à le déterminer :

- **Le nombre de Nusselt :**

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (\text{III.10})$$

Où h est le coefficient de convection, k la conductivité thermique et L une dimension linéaire caractérisant toute la surface d'échange.

C'est une comparaison entre échange par convection et par conduction.

- **Le nombre de Prandtl :**

$$Pr = \frac{v_i C}{k} \quad (\text{III.11})$$

Où v_i est la viscosité et C la chaleur massique. C'est une comparaison entre déplacement de chaleur et de matière.

- **Le nombre de Reynolds :**

$$Re = \frac{\rho}{v_i} vd \quad (\text{III.12})$$

Où ρ est la masse volumique, v la vitesse moyenne d'écoulement et d la diamètre hydraulique.

C'est une comparaison entre viscosité cinématique et vitesse d'écoulement.

III.6. Modèle thermique des machines électriques tournantes

La structure régulière et la symétrie d'une machine électrique tournante rendent possible la division de celle-ci en plusieurs blocs élémentaires concentriques autour de son axe. Cette symétrie rend aussi facile l'étude car on peut considérer qu'une demi partie de la machine. Voici un exemple représentant en coupe de tous les blocs élémentaires d'une machine asynchrone TEFC [20] :

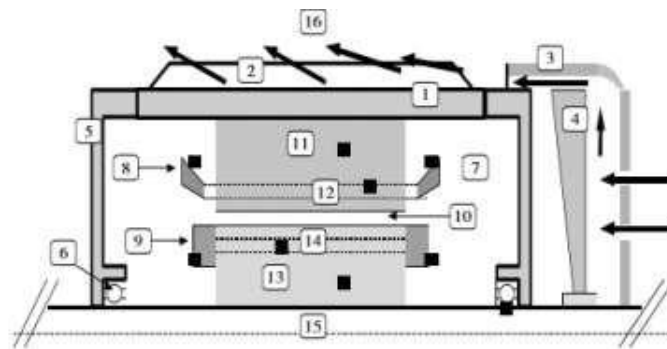


Figure III.4. Exemple de vue en coupe d'une machine asynchrone

1.carter	5.flasque	9.Anneau de court-circuit	13.fer rotorique
2.ailette	6.roulement	10.entrefers	14.barre rotorique
3.cache ventilateur	7.air interne	11.fer statorique	15.arbre
4.ventilateur	8.têtes de bobines	12.encoche statorique	16.air ambiant

Les transferts de chaleur sont supposés dans la circulation axiale et radiale, qui sont indépendants l'un de l'autre.

Après avoir découpé la machine en plusieurs blocs élémentaires, on a déterminé les modes de transfert de chaleur entre les différents blocs et a donné le schéma de circuit thermique suivant:

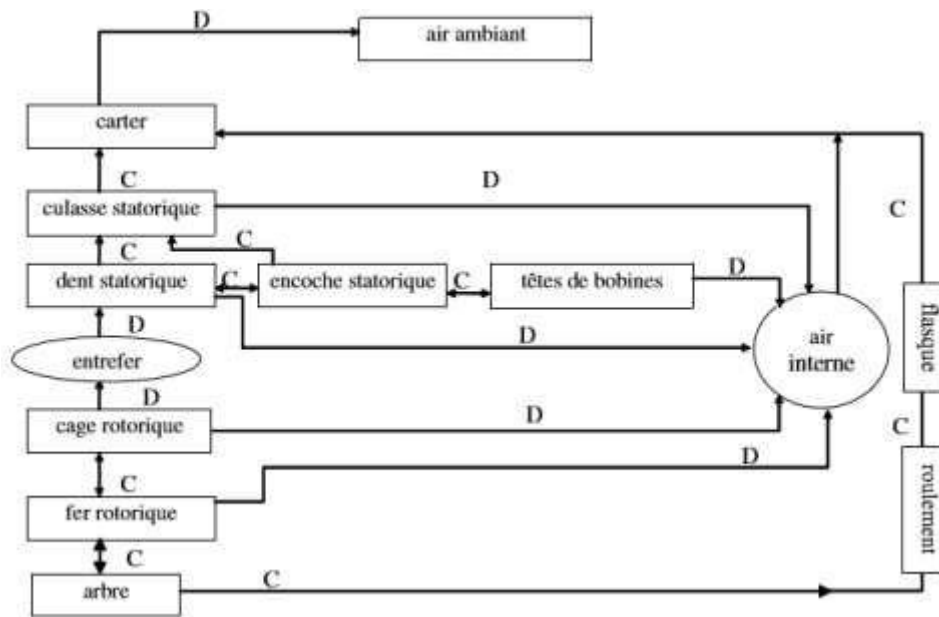


Figure III.5. Exemple de circuit contenant les modes de chaleur entre les blocs

C : conduction et D : convection

Pour établir le modèle thermique correspondant au circuit thermique de cette machine il faut déterminer les paramètres suivants :

1. Les sources de chaleur, qui sont générées par les pertes dans la machine comme on a déjà vu,
2. Les résistances thermiques R ou conductances thermiques G , $R=1/G$: connexion entre deux blocs, dont le transfert de chaleur d'un bloc à un autre y est fonction. Elles dépendent des grandeurs géométriques et des propriétés de la matière.
3. Les capacités thermiques : qui mesurent le pouvoir de chaque élément à stocker de l'énergie calorifique avec le temps. Elles dépendent des propriétés de la matière comme la chaleur spécifique et la densité.

III.6.1. Les équations thermiques de la machine

Le flux de chaleur entre deux nœuds est donné par la relation suivante :

$$\frac{dQ}{dt} = G(T_j - T_i) \quad (\text{III.13})$$

Q = quantité de chaleur [J]

G = conductance thermique

T_j et T_i = les températures isothermes des volumes i et j .

Le tableau suivant donne les expressions des flux et des conductances selon le mode de transfert :

Mode transfert	Expression du flux	Expression de la conductance
Conduction	$\frac{KS_{ij}}{L_{ij}}(T_j - T_i)$	$G_{ij} = \frac{KS_{ij}}{L_{ij}}$
Convection	$hS(T_j - T_i)$	$G_{ij} = hS$
Rayonnement	$\sigma S_i \varepsilon (T_j^4 - T_i^4)$	$G_{ij} = \sigma S_i \varepsilon (T_j^4 - T_i^4)(T_j + T_i)$

Tableau III.2. Expression de la conductance thermique et du flux selon le mode de transfert

Où S_{ij} la surface d'échange des volumes (i) et (j) et L_{ij} la longueur entre les deux nœuds (i) et (j).

III.7. Influence de l'augmentation de la température sur les machines électriques [30]

Le moteur asynchrone triphasé est maintenant largement utilisé dans des applications nécessitant une vitesse variable. Il peut faire appel à des commandes de type scalaire ou vectoriel. Ces machines ont la réputation d'être robustes, d'être adaptées à des applications de forte puissance. Cependant, malgré les qualités évoquées, son fonctionnement s'accompagne d'un certain nombre de phénomènes qui conduisent comme toute autre machine électrique à une transformation d'une partie de l'énergie électrique fournie par son alimentation en pertes qui entraînent une élévation de la température de ses différentes parties. En premier lieu, les frottements entraînent un échauffement des parties en contact. Par ailleurs, les matériaux ferromagnétiques soumis à des flux variables s'échauffent à cause des courants de Foucault et de l'hystérésis. Les courants dans les enroulements provoquent une transformation d'énergie électrique en chaleur par effet joule.

III.7.1. Défauts des machines électriques entraînant l'échauffement

Ces défauts se répartissent selon la figure suivante :

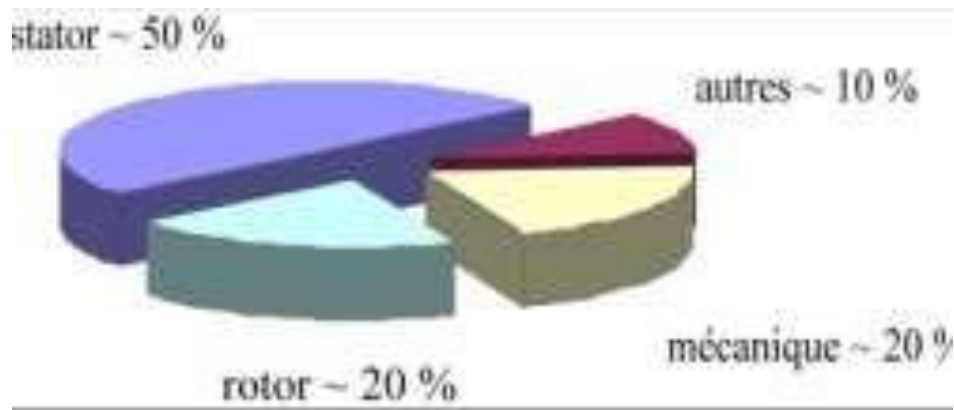


Figure III.6. La répartition des défaut

Au niveau d'une installation comportant des moteurs électriques, nous pouvons distinguer deux types de défauts :

- ✓ les défauts d'origine interne au moteur
- ✓ les défauts d'origine externe.

a. Défauts d'origine interne

- ✓ court-circuit phase - terre,
- ✓ court-circuit entre phases,
- ✓ court-circuit entre spires,
- ✓ sur-échauffement des bobinages,
- ✓ rupture d'une barre dans les moteurs à cage,
- ✓ problèmes liés aux roulements,
- ✓ etc.

b. Défauts d'origine externe

Leurs sources sont localisées en dehors du moteur électrique, mais leurs conséquences peuvent entraîner des dégradations dans celui-ci. Ces dysfonctionnements peuvent provenir : * de la source d'alimentation

- ✓ coupure d'alimentation,
- ✓ inversion ou déséquilibre de phases,
- ✓ baisse de tension,
- ✓ surtension,
- ✓ etc.
- du mode d'exploitation du moteur
 - ✓ régimes de surcharge,
 - ✓ nombre de démarrage et régime de démarrage,
 - ✓ inertie de la charge,
 - ✓ etc.

- de l'installation du moteur
 - ✓ désalignement,
 - ✓ balourd,
 - ✓ efforts excessifs sur l'arbre,
 - ✓ etc.

III.7.2. Défaits internes au moteur

L'enroulement statorique d'un moteur électrique est constitué de conducteurs en cuivre isolés par du vernis. La rupture de cette isolation peut provoquer un court-circuit permanent, entre une phase et la masse, entre deux voir trois phases, ou entre spires d'une même phase.

Elle peut-être provoquée par des phénomènes électriques (décharges superficielles, surtensions), thermiques (sur-échauffement) ou même mécaniques (vibrations, efforts électrodynamiques sur les conducteurs). Des défauts d'isolement peuvent également se produire au sein de l'enroulement rotorique avec la même conséquence : la mise hors service du moteur. La cause la plus fréquente d'avarie au niveau des enroulements d'un moteur est une élévation trop importante de leur température. Cette élévation est souvent provoquée par une surcharge impliquant une augmentation du courant circulant dans ces enroulements. [1]

III.7.3. Défaits externes au moteur

A/ Phénomènes liés à l'alimentation électrique du moteur

a-Surtensions

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension .Les surtensions (Figure III.7) temporaires ou permanentes peuvent avoir différentes origines :

- atmosphérique (coup de foudre),
- décharge électrostatique,
- manœuvre d'appareils connectés au même réseau,

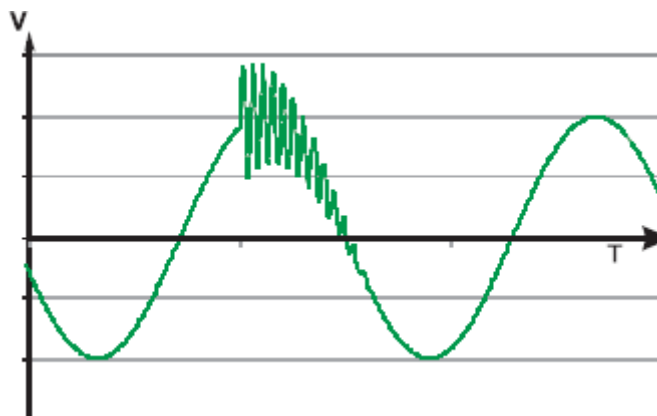


Figure III.7. Exemple de surtension

Ces perturbations, qui se superposent à la tension du réseau, peuvent s'appliquer selon deux modes:

- mode commun, entre les conducteurs actifs et la terre,
- mode différentiel, entre les différents conducteurs actifs.

Dans la majeure partie des cas, les surtensions se traduisent par un claquage diélectrique au niveau des enroulements du moteur, entraînant sa destruction.

b-Phases déséquilibrées

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

Le déséquilibre (Figure III.8) peut-être provoqué par l'ouverture d'une phase (défaut de dissymétrie), par la présence de charges monophasées dans l'environnement proche du moteur, ou par la source elle-même.

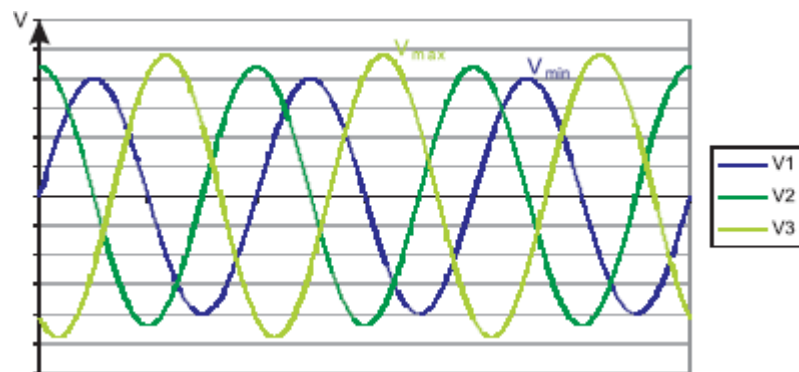


Figure III.8. Relevé de tensions d'un système triphasé déséquilibré

Le calcul du déséquilibre peut-être approché par l'équation suivante :

$$\text{Déséquilibré}(\%) = 100 \times \text{MAX} \left(\frac{V_{\max} - V_{\text{moy}}}{V_{\text{moy}}}, \frac{V_{\text{moy}} - V_{\min}}{V_{\text{moy}}} \right) \quad (\text{III.14})$$

avec :

$V_{\max}$: tension la plus élevée,

$V_{\min}$: tension la plus faible,

$$V_{\text{moy}} = (V1 + V2 + V3)/3$$

Les conséquences d'un déséquilibre des tensions appliquées à un moteur sont la diminution du couple utile et l'augmentation des pertes ; les déséquilibres se traduisent par une composante inverse qui génère de forts courants rotoriques provoquant un échauffement très important du rotor et impliquant un sur-échauffement du moteur (Tableau III .3).

Valeur de déséquilibre(%)	0	2	3,5	5
Courant statorique (A)	I_n	$1,01 * I_n$	$1,04 * I_n$	$1,075 * I_n$
Augmentation des pertes (%)	0	4	12,5	25
Echauffement (%)	100	105	114	128

Tableau III.3. Influence d'un déséquilibre de tensions sur les caractéristiques de fonctionnement d'un moteur

La norme CEI 60034-26 fournit une règle de déclassement en fonction du déséquilibre des tensions (Figure III.9) qu'il est conseillé d'appliquer lorsque ce phénomène est connu ou prévisible sur le réseau alimentant le moteur. Ce coefficient de déclassement permet, soit de "surdimensionner" un moteur pour tenir compte du déséquilibre, soit de diminuer le courant de fonctionnement d'un moteur en regard de son courant nominal. [10]

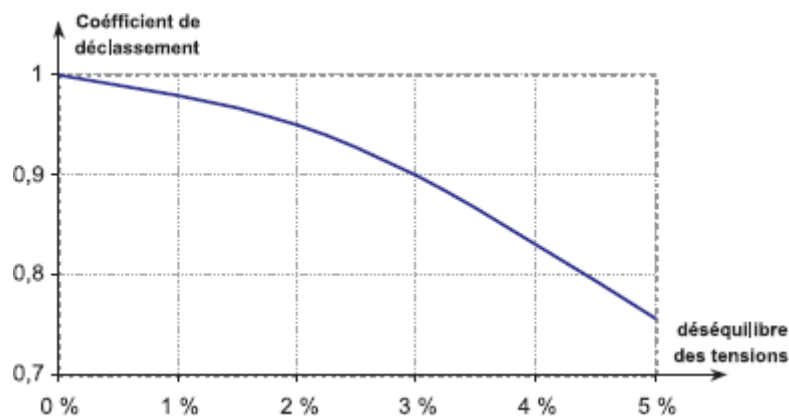


Figure III.9. Déclassement d'un moteur en fonction d'un déséquilibre de tensions de son alimentation

c-Baisses de tension et coupures

Un creux de tension (Figure III.10) est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie. La norme EN50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de 1/2 période à 50 Hz soit 10 ms jusqu'à une minute.

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes).

Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

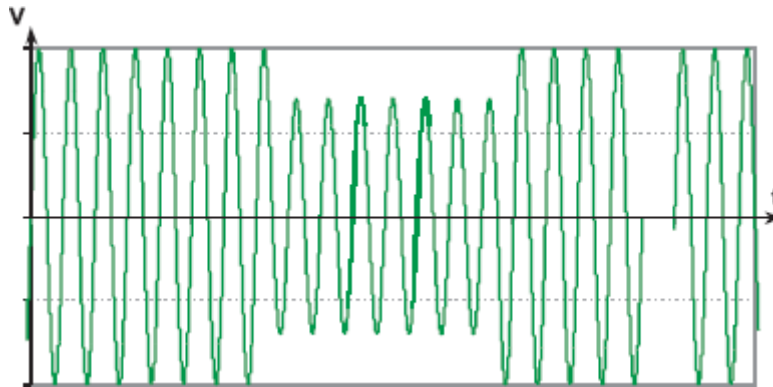


Figure III.10. Exemple d'un creux et d'une coupure brève de tension

On parle de microcoupure pour des durées de l'ordre de la milliseconde.

L'origine de ces variations de tension peut être soit un phénomène aléatoire extérieur à l'exploitation (défaut sur la distribution publique ou court-circuit accidentel), soit un phénomène lié à l'installation elle-même (branchement de fortes charges telles que des moteurs, des transformateurs). L'influence des variations peut être dramatique pour le moteur lui-même. [10]

• Conséquences sur un moteur asynchrone[23]

Lors d'un creux de tension, le couple d'un moteur asynchrone (proportionnel au carré de la tension) diminue brutalement et provoque un ralentissement. Ce ralentissement est fonction de l'amplitude et de la durée du creux, de l'inertie des masses tournantes et de la caractéristique couple-vitesse de la charge entraînée. Si, à cet instant, le couple que le moteur développe devient inférieur au couple résistant, le moteur s'arrête (décrochage). Après une coupure, le retour de la tension engendre un appel de courant de ré-accélération proche du courant de démarrage et dont la durée dépend de la durée de la coupure.

Lorsque l'installation comporte de nombreux moteurs, leurs ré-accélérations simultanées peuvent provoquer une chute de tension dans les impédances amont du réseau. La durée du creux est alors allongée et peut rendre la ré-accélération difficile (redémarrages longs avec sur échauffement) voire impossible (couple moteur inférieur au couple résistant).

La réalimentation rapide (~ 150 ms) d'un moteur asynchrone en cours de ralentissement sans précaution peut conduire à un ré-enclenchement en opposition de phase entre la source et la tension résiduelle entretenue par le moteur asynchrone. Dans ce cas, la première crête du courant peut atteindre trois fois le courant de démarrage (15 à 20 I_n). Ces surintensités, et chutes de tension qui en découlent, ont plusieurs conséquences sur le moteur:

- échauffements supplémentaires et efforts électrodynamiques dans les bobines pouvant engendrer des ruptures d'isolation,
- à-coups avec des contraintes mécaniques anormales sur les accouplements d'où une usure prématurée voire une casse.

Elles peuvent également affecter d'autres équipements tels que les contacteurs (usure voire soudure des contacts), provoquer le déclenchement des protections générales de l'installation et ainsi l'arrêt d'une chaîne de fabrication ou d'un atelier.

B/ phénomènes liés à l'exploitation du moteur

a-Démarrage trop long et/ou trop fréquent

La phase de démarrage d'un moteur correspond à la durée qui lui est nécessaire pour atteindre sa vitesse de rotation nominale. Le temps de démarrage (t_d) dépend du couple résistant (C_r) et du couple moteur (C_m).

$$t_D(s) = \frac{\pi}{30} \cdot J \cdot \frac{N}{C_m - C_r} \quad (\text{III.15})$$

Avec

J : moment d'inertie global des masses en mouvement

N (tr. s^{-1}) : vitesse de rotation du rotor

Compte tenu de ses caractéristiques intrinsèques, chaque moteur ne peut supporter qu'un nombre limité de démarrages, généralement précisé par son fabricant (nombre de démarrages par heure).

De même, chaque moteur a un temps de démarrage fonction de son courant de démarrage (Figure III.11)

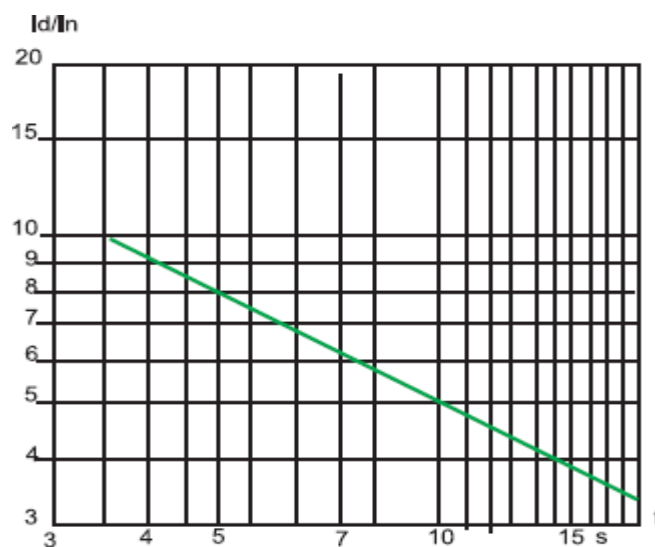


Figure III.11. Temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport courant de démarrage sur courant nominal

b- Blocage du rotor

Le blocage d'un moteur, pour une cause mécanique, provoque une surintensité sensiblement égale au courant de démarrage. Mais l'échauffement qui en résulte est beaucoup plus important car les pertes dans le rotor sont maintenues à leur valeur maximale durant tout le blocage et la ventilation est supprimée si celle-ci est liée à la rotation du rotor. Les températures rotoriques peuvent devenir très importantes (350°C).

c- Surcharge (ralentissement ou survitesse)

La surcharge d'un moteur est provoquée par une augmentation du couple résistant ou par une baisse de la tension réseau ($> 10\%$ de U_n). L'augmentation du courant consommé par le moteur engendre un échauffement qui réduit sa durée de vie et peut lui être fatal à plus ou moins long terme

III.8. Causes des défauts thermiques[10]

Afin de mieux cerner le champ disciplinaire qui nous intéresse, il convient de préciser la définition de la thermique. « La thermique est la branche de la physique relative à l'une des formes les plus usuelles de l'énergie : la chaleur. Elle traite tous les phénomènes liés à son transfert, entre milieux matériels ou en leur sein, sous l'action de différences de températures ».

Une conséquence est sa finalité principale, la maîtrise des températures et des flux de chaleur.

Pour compléter cette tentative de définition, il faut préciser que la thermique (« Heat Transfer » en anglais) est une science qui intègre naturellement les interactions et les couplages entre mécanismes de transfert de chaleur d'une part et phénomènes étudiés dans d'autres champs disciplinaires d'autre part.

Conditions de service hors de la plage prévue :

- Fonctionnement à sec
- Vitesse excessive
- Ventilation défectueuse
- Lubrification insuffisante
- Lubrification excessive
- Serrage du joint excessif
- Détérioration dans le temps
- Problème de ventilation
 - Causes : auto ou moto-ventilation déficiente, obstruction des ouïes d'aération
 - Conséquences : surchauffe du moteur

- Environnement thermique
 - Causes : sources de chaleur imprévue, température ambiante excessive
 - Conséquences : surchauffe du moteur

III.9. Défauts internes du moteur agissant sur l'isolation

La thermique est un aspect primordial de la conception d'une machine électrique. Il est essentiel que les pertes dans la machine soient évacuées de façon adéquate, c.-à-d. sans que la température dans les différentes parties de la machine dépasse une certaine limite. Ce sont notamment les isolants des bobinages qui sont délicats et dont la durée de vie est raccourcie en cas de sur température.

La conception et le fonctionnement de l'équipement électrique dépendent des matériaux disponibles. Ainsi les propriétés des conducteurs et des isolants jouent un rôle crucial dans la construction des appareils électriques.

Dans les conducteurs comme le cuivre et l'argent, les électrons se déplacent facilement. On dit que leur résistivité est faible car ils n'offrent que très peu d'opposition au passage du courant. Au contraire, le passage du courant se fait difficilement dans les diélectriques car leurs atomes retiennent énergiquement les électrons. La résistivité des diélectriques est très grande car l'opposition au passage d'un courant est très forte. Un diélectrique placé entre deux conducteurs s'oppose donc au passage du courant entre eux-ci. [4]

L'enroulement statorique d'un moteur électrique est constitué de conducteurs en cuivre isolés par du vernis. La rupture de cette isolation peut provoquer un court-circuit permanent, entre une phase et la masse, entre deux ou trois phases, ou entre spires d'une même phase.

Elle peut-être provoquée par des phénomènes électriques (décharges superficielles, surtensions), thermiques (suréchauffement) ou même mécaniques (vibrations, efforts électrodynamiques sur les conducteurs).

Des défauts d'isolement peuvent également se produire au sein de l'enroulement rotorique avec la même conséquence : la mise hors service du moteur.

La cause la plus fréquente d'avarie au niveau des enroulements d'un moteur est une élévation trop importante de leur température. Cette élévation est souvent provoquée par une surcharge impliquant une augmentation du courant circulant dans ces enroulements.

La courbe de la figure III.12. fournie par la plupart des constructeurs de moteurs électriques, montre l'évolution de la résistance d'isolement en fonction de la température : plus la température augmente et plus la résistance d'isolement diminue. La durée de vie des enroulements, et par conséquent du moteur, se réduit donc fortement. [2]

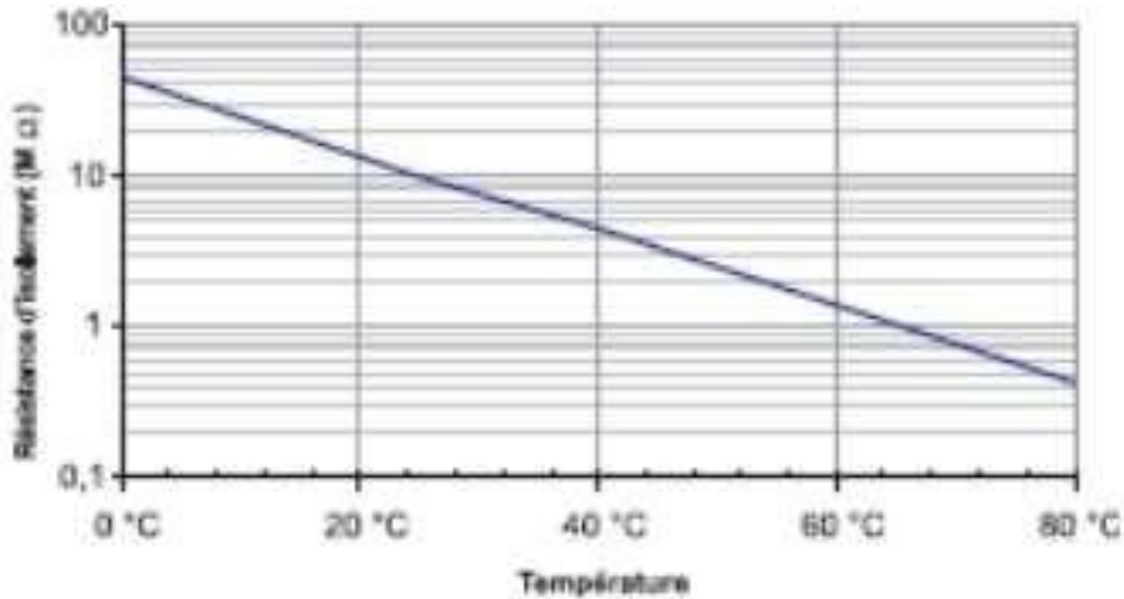


Figure III.12. Résistance d'isolement en fonction de la température

La courbe de la figure III.13, montre qu'une augmentation de 5 % du courant est équivalente à une élévation de température d'environ $+10^{\circ}\text{K}$, diminue de moitié la durée de vie des enroulements. Une protection contre les surcharges est donc nécessaire pour éviter les surchauffements et réduire les risques d'avaries internes au moteur par rupture d'isolement des bobinages.

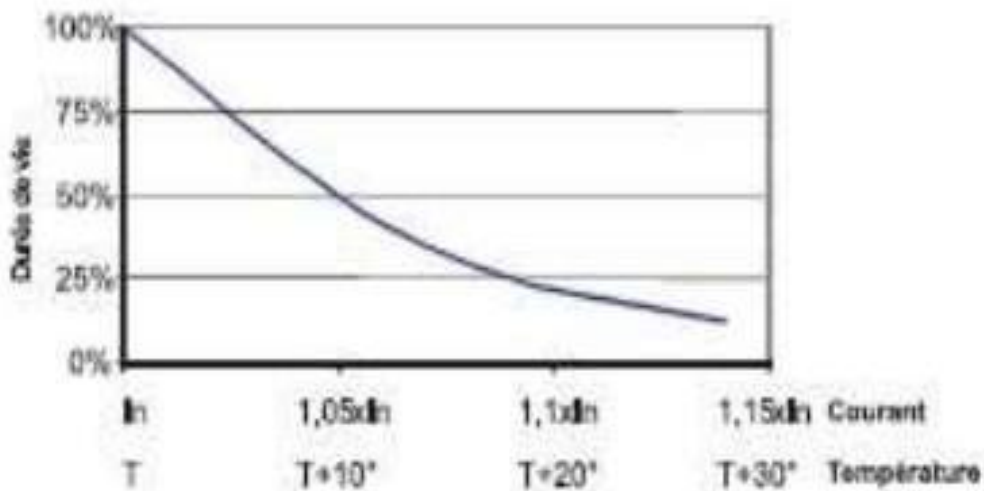


Figure III.13. Durée de vie des moteurs en fonction de leur température de fonctionnement ou du courant de consommation

Un échauffement excessif peut amener la détérioration des matériaux isolants utilisés dans le moteur. La limite dépend à la fois de la température et de la durée pendant laquelle est atteinte. [10]

III.10. Conclusion :

Dans les machines électriques tournantes il existe généralement un écart entre la puissance absorbée et la puissance utile. Cet écart est dû aux pertes à travers les différentes transformations dans la machine. Dans ce chapitre nous avons présenté les facteurs qui peuvent favoriser le phénomène d'échauffement des machines électriques, on a commencé par les pertes d'énergie (électriques, magnétique) en suite l'élévation de la température dans les machines électriques tournantes, et finalement le modèle thermique des machines électriques tournantes et l'influence de l'augmentation de la température sur les machines électriques.

CHAPITRE IV

Défaillances des machines électriques

IV.1. Défaillances des machines électriques

IV.1.1. Défaillances d'origine électriques

- **Au niveau du stator**

Le stator de machine électrique sont réalisés par assemblage de tôle de 2 à 3 dixièmes de millimètre d'épaisseur recouvertes d'isolant électrique, d'enroulement filaire en cuivre émaillé. Le fil émaillé est soit enroulé directement dans les encoches statoriques, soit sur un gabarit spécifique, l'isolation de masse et l'isolation de fermeture d'encoche, puis monté sur le stator. La défaillance au stator est à cause de dégradation de ces isolant[17].

La dégradation d'isolation du stator sont principalement dues à un problème : thermique, électrique, mécanique et environnemental.



Figure IV.1. Les isolant au stator

a. Problème thermique

L'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement ; La température interne d'une machine est liée à ses pertes qui sont-elles mêmes liées à la puissance électrique qu'elle convertit. Les échauffements excessifs détériorent rapidement l'isolation du bobinage de la machine.

Une règle bien connue affirme que la durée de vie des isolations diminue de 50% à chaque fois que la température croît environ 10°C de la température normale d'utilisation. Or la durée de vie des isolations détermine la durée de vie du moteur. Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des

démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante.

- ❖ Au moment du démarrage, un moteur commande de cinq à huit fois la quantité de courant normale nécessaire à son fonctionnement sous charge. Lorsqu'on le soumet à des démarrages répétés dans un court laps de temps, la température de l'enroulement augmente rapidement. Selon son utilisation particulière, chaque moteur présente ses propres limites. [10]

❖ Variations de la tension

Les moteurs sont donnés pour une tension nominale d'alimentation $U_n \pm 5\%$. En dehors de cette plage, les caractéristiques mécaniques se dégradent rapidement. Dans la pratique, plus un moteur est gros, plus il est sensible aux tensions :

- ✓ Inférieures à U_n : échauffements anormaux par augmentation du temps de démarrage et on a $P=U \cdot I$ alors si U diminue, I doit augmenter pour que P reste constante.
- ✓ Supérieures à U_n : augmentation des pertes Joule et des pertes fer.
- ✓ Sur le plan thermique, plus un moteur est gros, plus il peut évacuer de calories, mais l'énergie à dissiper croît encore plus vite. Une baisse de tension d'alimentation, en diminuant fortement le couple de démarrage, fait augmenter le temps de démarrage et échauffe les enroulements.
- ✓ Marche en monophasée due au coupure d'une phase suite à la fusion d'un fusible. [3]

❖ Surcharge

La surcharge se présente lorsqu'on opère ultérieurement de la charge nominale admissible de service de marche ou de charge mécanique nominale.

- ✓ Lorsqu'on exécute avec la machine avec des services différents du type de service destiné pour cette dernière, le facteur de service de la machine désigne son fonctionnement nominal selon la charge, le temps et la fréquence d'utilisation. Une opération en dehors du facteur de service destiné au moteur peut augmenter la température de la machine : surchauffe à cause d'une opération en charge trop long,
- ✓ Surcharge mécanique de la machine entraînée : augmentation du couple.

La surcharge provoque une augmentation importante du courant absorbé par les moteurs conduit une surintensité, qui est définie comme un courant entraînant une température T_{lim}

non compatible avec les conducteurs et isolants du moteur, c'est à dire telle que $T_{lim} > T_{max}$, et entraînent à un échauffement excessif du moteur.

Elle apparaît aussi quand l'intensité appelée est supérieure.

❖ L'environnement

Toutes les machines sont destinées à travailler dans un environnement avec une température et indice de protection contre les pénétrations de corps étrangers et l'eau bien indiquée sur la plaque signalétique de la machine.

Un climat non destiné à la machine, par exemple la température assignée à la machine utilisée au pôle nord est différente a la machine utilisée dans la zone tropicale, un manque ou une faible ventilation à cause de pénétration des poussières ou autres corps étrangers dans le système de refroidissement augmente la température de la machine est accélère le vieillissement et la dégradation de l'isolant dans le machine et aussi diminué la dure de vie de la machine. [4]

Pour le machine a collecteur-balai l'étincelle due au mauvais contact de ce deux composant peut augmenter la température de collecteur puits le rotor par le transfert thermique dans le machine.

L'action prolongée de la température endommage les isolants. Une température élevée maintenue trop longtemps peut détruire l'isolant. *Montsinger* a établi expérimentalement une loi liant la durée de vie à la température :

$$t = ab^{-\theta}$$

a et b : constantes pour un isolant donné.

$$\log t = \log a - \log b$$

$\log t$ est une fonction linéaire de θ .

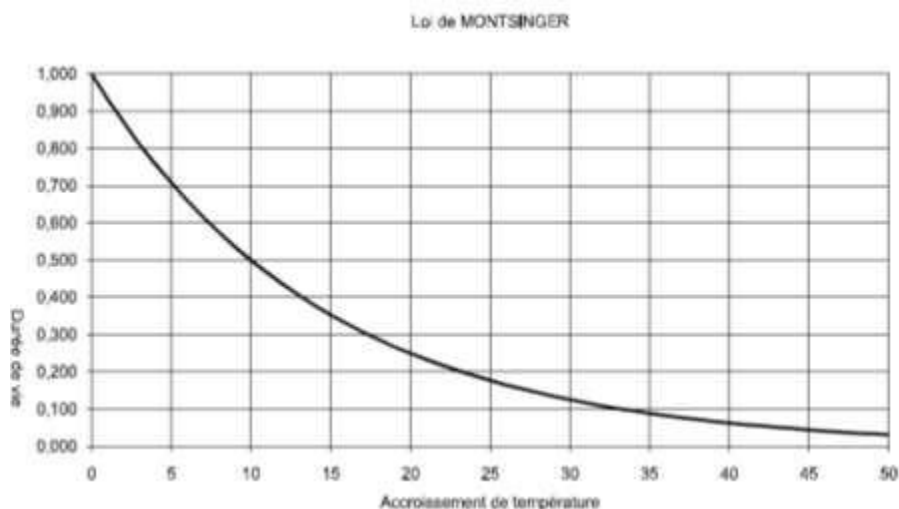


Figure IV.2.courbe de Loi de MONTSINGER

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit phase/bâti, défauts de circuit magnétique[6].

b. Variations électriques

- ✓ Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de dV/dt dû à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant.

Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut).

✓ Défauts d'alimentation

- Tension d'alimentation trop élevée au mauvais couplage (220 V sur une source 380 V) : le moteur est trop saturé, il vibre anormalement, les intensités absorbées sont beaucoup trop enlevées et le moteur ne tarde pas à griller s'il n'est pas découplé.
- Tension d'alimentation trop faible au mauvais couplage (380 V sur une source 220V) : le couple de moteur est insuffisant, la vitesse de régime ne peut être atteinte, le rotor chauffe anormalement et finit par griller le stator en raison de transfert thermique dans le moteur.
- Puissance de la source insuffisante : si la source sur laquelle est branché le moteur est insuffisante, ou si les fils de branchement du moteur sont trop longs et de section faible, l'intensité demandée par le moteur au démarrage fait chuter la tension dans des proportions importantes ; le temps mis par le moteur pour atteindre son régime augmente et dans le cas extrême, la vitesse de fonctionnement ne peut être atteinte ; le moteur chauffe très rapidement et ne tarde pas à griller.

Dans ces trois cas le bobinage est uniformément noirci. [10]

- Marche de machine triphasée en monophasée : il arrive souvent, à cause de rupture ou déconnexion d'une phase que le moteur est alimenté par deux phases seulement, ces moteurs présentent soit une phase grillée dans le cas de moteur couplé en triangle, soit deux phases grillées dans le cas de moteurs couplés en étoile.

c. Défaillances d'origine mécanique

Les problèmes mécaniques sont généralement le résultat des forces électromagnétiques diverses dans le moteur. Ces forces ont tendance à faire vibrer les bobinages. Ainsi, l'isolation sera exposée à des frottements mécaniques qui accélèrent la dégradation. Au stator, la force électromagnétique, proportionnelle au carré du courant, agit sur les conducteurs d'encoche et soumet les systèmes isolants à des efforts de cisaillement et de compression.

En addition de l'effet thermique direct provoqué par les démarrages excessifs de la machine, ces derniers provoquent une augmentation importante de température dans le cuivre d'une manière cyclique. Cela a pour conséquence de créer des dilatations et des contraintes répétitives sur l'isolant, ce qui pourra entraîner des fissures. [23]

d. Influence environnemental

Les isolations des matériels sont soumises aux conditions physiques et chimiques imposées par leur environnement les contraintes qui en résultent peuvent provoquer des dégradations spécifiques ou aggraver les dégradations engendrées par le fonctionnement.

L'humidité est sans doute le facteur le plus important, et influence directement la résistivité des matériaux isolants. D'autres facteurs affectent également la tenue diélectrique des matériaux isolants ; ils sont issus de la pollution de l'air ambiant par les poussières et aérosols industriels (brouillard d'huiles de graissage, poussières de charbon provenant des dispositifs d'excitation dynamique).

• Au niveau du rotor**a. Pour le rotor à cage d'écureuil ou rotor en court-circuit****❖ Défauts de fabrication**

Pour un rotor à cage, les défauts physiques peuvent surgir à l'étape de fabrication à travers un moulage défectueux dans le cas de rotors injectés sous pression d'aluminium, ou par une mauvaise soudure ou brassage entre les barres et les anneaux. Un rotor injecté d'aluminium peut avoir des bulles d'air entre les couches, cela augmente les résistances électriques des barres. Par conséquent, il peut y avoir des points faibles dans les barres où les résistances sont très grandes et les températures élevées, ce qui peut mener à une rupture complète de la barre. [13]

❖ Conditions de fonctionnement

En fonctionnement normal, les contraintes mécaniques et thermiques sont particulièrement accentuées si la machine est fréquemment arrêtée et remise en marche ou si la machine est fortement chargée. Il est bien connu qu'au démarrage, le courant rotorique peut atteindre dix fois le courant nominal ce qui provoque un échauffement excessif dans le circuit

rotorique. La période de démarrage est aussi caractérisée par un minimum de refroidissement et des efforts mécaniques importants, qui surchargent les barres du rotor.

❖ Les effets de défaillance et les symptômes produites

La séquence des événements générant la rupture d'une barre rotorique est décrite comme suit : la résistance de la barre fissurée augmente et commence à surchauffer. La barre se casse complètement et s'incline du côté de la rupture. Ceci endommage alors les tôles du rotor autour de la barre cassée. Les barres voisines supporteront un courant plus grand et seront soumises à des efforts accrus, faisant par la suite abîmer ces barres.

Les barres cassées peuvent alors s'ouvrir à l'extérieur en raison des forces centrifuges et endommager de façon catastrophique les enroulements statoriques.

b. Pour le rotor bobiné

Les effets de défaillance (Court-circuit entre spires, ...) au rotor bobiné sont les mêmes que celui du stator et qui peuvent provoquer des arrêts de fonctionnement comme celui des problèmes thermique, électrique, environnementale, ...

Les origines d'étincelle aux balais-collecteur sont[11] :

- Le mauvais montage et entretien des balais :
 - Coincement du balai dans sa gaine.
 - Jeu trop grand des balais
 - Porte-balais trop loin du collecteur
 - Connexions desserrées
 - Mauvais rodage
 - Pression incorrecte sur les balais
- Condition de charge
 - Surcharge de la machine
- Réglage de la machine
 - Position incorrecte des balais
 - Mauvais alignement des balais
- Défauts mécaniques
 - Méplat ou faux rond de la bague ou collecteur
 - Machine déséquilibrée
 - Vibrations dues à des causes extérieures
 - Lamelles du collecteur affleurant la surface du mica
- Défauts électriques
 - Défaut d'induit (court-circuit ou circuit ouvert)

IV.1.2. Autres problèmes d'origine mécanique[30]

La dégradation de roulement et le positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage au machine électrique tournante est la cause de décentrement du rotor, se traduisant par le décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor.

- **Dégradation des roulements**

Les roulements, quels que soient leurs domaines d'application se dégradent à un temps plus ou moins long à cause de plusieurs facteurs. On peut énumérer l'importance des contraintes de contact, les défauts de fabrication et de montage, la circulation du courant électrique dans le cas des machines électriques tournante, la corrosion, la présence de contaminants au sein du roulement, la qualité de la lubrification ou encore la température de fonctionnement.



Figure IV.3. Images de roulements détériorés.

a. Les défauts de fabrication et de montage

Le mauvais choix de matériaux de construction, matériaux incapable de supporté la température et le force centrifuge et attraction magnétique radiale qui s'exerce sur lui ; Le constructeur de machine donne le mode de fixation et position de montage de chaque machine ; Le bon fonctionnement d'un roulement nécessite un bon alignement des axes des bagues (intérieure et extérieure). Lorsque cette condition n'est pas respectée, une ou plusieurs parties des bagues subissent de fortes sollicitations entraînant des marquages, des découpures sur la piste de roulement. Le défaut de montage peut être également causé par de fortes déformations de l'arbre de rotor.



Figure IV.4. Endommages physiques créés par le défaut de montage de roulements

b. Contraintes mécaniques

En fonctionnement, le passage répété des éléments roulants au sein du roulement crée des contraintes complexes. Dans le cas des machines tournantes, la bague intérieure solidaire à l'arbre, est en rotation et la bague extérieure est fixe. La charge appliquée sur l'arbre se transmet d'une bague à l'autre par l'intermédiaire des éléments roulants. Le mouvement répété des billes engendre de fortes contraintes en sous-couche des bagues intérieures et extérieures. Ces sollicitations sont à l'origine de l'initiation de fissures aux voisinages des inclusions non-métalliques réparties au sein du matériau. Les fissures engendrées se propagent progressivement à la surface entraînant l'apparition des écaillages sur les pistes des bagues intérieures et extérieures des roulements.

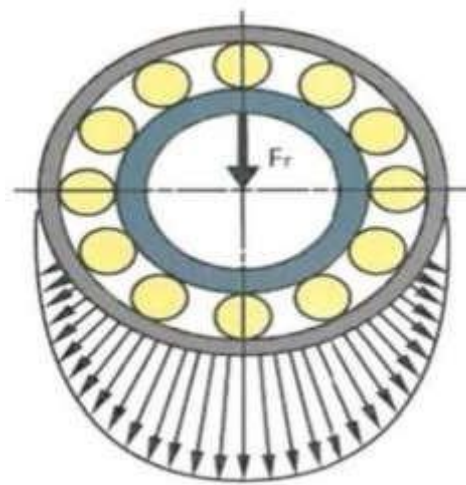


Figure IV.5. Répartition des contraintes radiales sur les bagues interne et externe du roulement

c. Les contaminations

L'insertion de particules étrangères avec un effet abrasif dans le roulement dégrade l'état de surface des pistes de roulement et des éléments roulants. Ces contaminants peuvent provenir d'un lubrifiant contaminé, du sable introduit dans le mécanisme dû à la non-étanchéité, l'utilisation des joints d'étanchéité inadéquats ou encore de l'abrasion des éléments tels que les engrenages. L'usure des surfaces conduit à des jeux de fonctionnement excessifs occasionnant de fortes sollicitations accélérant la dégradation du roulement. [10]

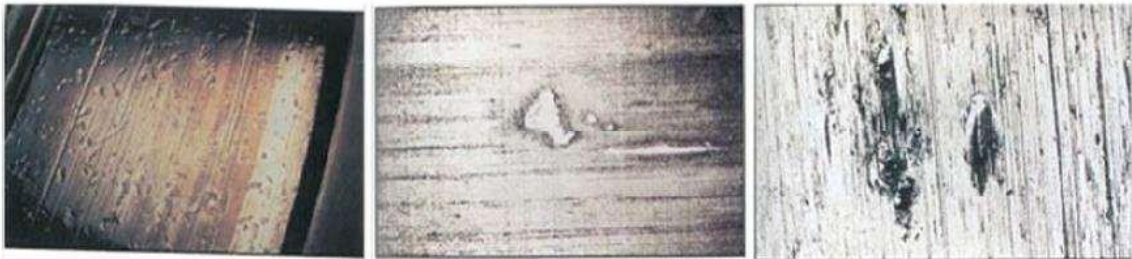


Figure IV.6. Effets sur les pistes des roulements de contaminations du lubrifiant

d. La corrosion

La corrosion est produite par la présence d'eau, d'acides et/ou de lubrifiants dégradés. Une fois la réaction chimique suffisamment avancée, les particules sont dispersées ; il en résulte la même action abrasive produite par la contamination de roulements.

La corrosion au sein du roulement peut intervenir sous différentes formes.



Figure IV.7. la corrosion de roulements

e. Le passage du courant électrique

Le passage du courant électrique d'une bague à une autre crée une décharge entraînant des microfissures ou marquages à l'endroit des décharges. Ce phénomène intervient dans les machines électriques telles que les alternateurs et les moteurs. Pour pallier ce problème, de nouvelles générations de roulements en céramiques hybrides où les billes sont en céramique fortement isolantes (Si_3N_4) ont été développées. Cette alternative présente cependant quelques inconvénients tels que le coût de revient élevé, une usure plus prononcée des bagues qui sont entièrement en acier. [7]

f. Le défaut de lubrification

L'utilisation inappropriée ou insuffisante du lubrifiant empêche le film de se former entre les pistes de roulement et les éléments roulants ; La mauvaise lubrification inclut à la fois le manque et l'excès de lubrifiant.

Dans les deux cas, les conditions de rotation des billes sont dégradées, causant une augmentation de température. La chaleur excessive réduit la capacité des graisses à lubrifier le roulement et donc accélère le processus de rupture.

Il en résulte des phénomènes d'usure et de glissement où de fortes sollicitations entraînent l'écaillage superficiel du roulement.



Figure IV.8.Effet de la lubrification inadéquate de roulements

g. Cassure

La cassure provient dans la plupart des cas d'une mauvaise manipulation du roulement, par exemple lui donner un coup de marteau au temps de montage. la cassure peut encore provenir d'une corrosion ou d'une bavure.

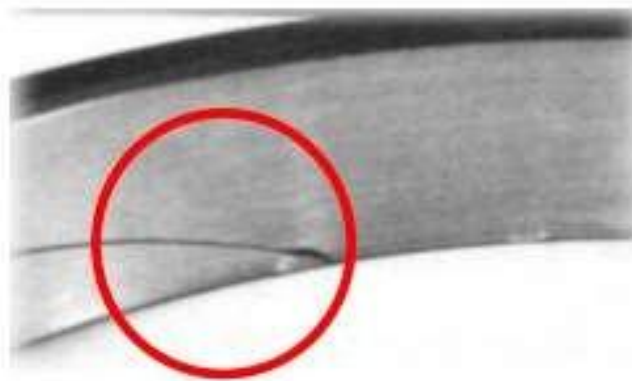


Figure IV.9.cassure de roulement

IV.2. Les conséquences de défaillances des ces machines électriques

- ❖ Echauffements supplémentaires et efforts électrodynamiques dans les bobines pouvant engendrer des ruptures d'isolation
- ❖ surchauffe du moteur
- ❖ des contraintes mécaniques anormales sur les accouplements d'où usure prématurée
- ❖ pannes évolutives (vieillessement et influence sur la durée de vie des machines)
- ❖ Arrêt prolongé des installations électriques
- ❖ Arrêt des unités de production
- ❖ Cout surélève de réparation (pièces de rechange)
- ❖ Mobilisation du personnel de maintenance

- ❖ Faible rendement des machines électriques

IV.3. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à les causes et les effets ainsi que les conséquences des défaillances des machines électriques , en premier temps nous avons passé en revue les causes électriques et mécaniques au niveau du rotor puis au niveau du stator d'une manière générale , ensuite les origines de ces défaillances et leurs conséquences.

CHAPITRE V

***Solutions à apporter en cas
de défaillance des
machines électriques
tournantes***

V.1- Différentes procédures de protection et isolation contre les défaillances de ces machines électriques .

V.1.1. Protection

Chaque installation électrique doit être protégée contre les incidents et dommages dus à des pannes ou à des fonctionnements incorrects.

Pour la sécurité, on doit en outre prévoir des protections contre les contacts directs avec des parties sous tension et indirects avec des parties normalement hors tension ; qui peuvent être à l'origine de ces incidents .

V.1.1.1. Protection des parties sous tension

La protection des parties sous tension des machines électriques est assuré par des appareils conçus à cet effet et capable de détecter toutes les anomalies d'origine électrique qui peuvent être à l'origine des pannes de ces machines.

a) Les Fusibles

La fonction du fusible est d'assurer la protection des circuits électriques contre les courts- circuits et les surcharges par la fusion d'un élément calibré lorsque le courant qui le traverse dépasse la valeur de son calibre.

Le type de fusible utilisé dans ces cas , pour protéger ces machines électriques sont des fusibles dit « accompagnement moteur » ils protègent les circuits contre les fortes surcharges ainsi que les courts-circuits. Ils sont conçus pour résister à une surcharge de courte durée durant le démarrage d'un moteur. Ils seront associés à un système de protection thermique contre les faibles surcharges. Les inscriptions sont écrites en vert.

b) Le Disjoncteur Magnéto-thermique

Ce disjoncteur est un appareil de connexion électrique capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, ainsi que d'établir, de supporter pendant une durée spécifiée et d'interrompre des courants dans des conditions anormales spécifiées telles que celles du court- circuit ou de la surcharge. La fonction est d'interrompre le courant électrique en cas d'incident sur un circuit électrique. D'une manière générale il est capable d'interrompre un courant de surcharge ou un courant de court-circuit dans une installation.

c) Le Relais thermique

Le relais thermique est un appareil qui protège le récepteur placé en aval contre les surcharges et les coupures de phase. Pour cela, il surveille en permanence le courant dans le récepteur.

En cas de surcharge, le relais thermique n'agit pas directement sur le circuit de puissance. Un contact du relais thermique ouvre le circuit de commande d'un contacteur et le contacteur coupe le courant dans le récepteur.

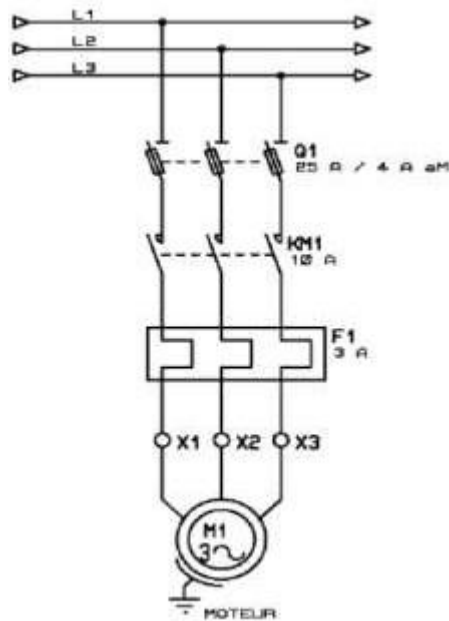


Figure V.1. Schéma d'installation de protection

V.1.1.2. Protection des parties hors tension

a) Protection contre les contacts directs

Pour éviter les contacts directs, les parties actives du moteur (qui sont normalement sous tension) sont enfermées dans une enveloppe (carcasse moteur) et l'ouverture de la boîte à bornes, qui les rend accessibles, n'est possible qu'à l'aide d'un outil. Pendant les opérations d'entretien la boîte à bornes ne peut être retirée que par du personnel qualifié et le réseau d'alimentation doit être visiblement sectionné, tout comme d'ailleurs les circuits auxiliaires (par ex. les réchauffeurs anti-condensation) de manière à ce qu'aucune partie sous tension ne soit accessible.

En cas de parties actives en mesure de conserver de la tension, comme par exemple les condensateurs de moteurs monophasés, le réseau d'alimentation étant visiblement sectionné, donc il faut décharger les condensateurs avant de procéder à toute autre intervention c'est les consignes strictes du service HSE.

b) Protection contre les contacts indirects

La protection contre les contacts indirects, c'est à dire les contacts dus à la survenance de pannes d'isolation qui amènent les masses métalliques en contact avec des parties actives sous tension, est principalement réalisée en reliant toutes les masses accessibles à un conducteur de protection, à son tour relié à la terre, et en utilisant des dispositifs de protection qui interviennent en coupant l'alimentation quand, par effet de la panne de l'enroulement, il y a passage de courant vers la terre. Le principe fondamental de cette protection consiste à

éviter qu'en cas de panne, il se produise entre une partie accessible vers la terre ou entre deux parties simultanément accessibles, une tension pendant un temps suffisamment long pour causer un risque d'effets physiologiques nocifs sur une personne qui serait en contact.

La coordination et la sélectivité de toutes les protections doivent être assurées pour protéger correctement les lignes et les appareils ; il est de toute façon absolument interdit de rétablir automatiquement les protections après leur déclenchement, car cela peut engendrer une situation dangereuse ; l'intervention de personnel dûment formé est obligatoire pour le rétablissement manuel du système dont le moteur électrique fait partie ou qui est partie principale. Quand le conducteur de neutre est présent, l'insertion des protections sur les divers conducteurs doit tenir compte du type de raccordement (système) adopté.

V.1.2. Isolation des machines

Les machines électriques nécessitent des isolations au niveau des enroulements :

- L'isolation du stator et des bobines au sein du circuit magnétique. Cela implique une isolation inter-spire dans la bobine et une isolation spire-masse entre la bobine et le circuit magnétique.
- L'isolation du rotor
- L'isolation des tôles du circuit magnétique statorique ou rotorique.

Les études menées sur les causes de défaillances dans les machines électriques montrent que près de 40% des défauts sont liés à une rupture d'un élément de l'isolation statorique.

L'ouvrage de référence donne des éléments d'explications physiques quant aux problèmes de vieillissement des isolants polymère qu'on utilise largement dans les Système d'Isolations Electrique (SIE) des machines. Les mécanismes de vieillissement sont multiples (électriques, thermique, chimique,...) et agissent principalement sur les liaisons de valence entre les macromolécules fragilisant ainsi la structure du polymère. Cela place la limite de fonctionnement des polymères en température aux alentours de 230°C.

Des études récentes montrent qu'il est tout de même possible d'étendre la gamme de fonctionnement du polymère au delà en y ajoutant des nano-charges.

En haute température, un problème important de migration du cuivre dans la couche isolante demeure très pénalisant. En effet, à température ambiante, l'oxydation du cuivre reste négligeable, mais ce n'est plus le cas lorsque la température dépasse 200°C.

Pour résoudre ce problème de diffusion de cuivre, il est possible d'enrober le cuivre dans un autre métal moins sensible à l'oxydation tel que le nickel, le titane ou le platine.

En réalité le matériau le plus couramment utilisé pour cela est le nickel pour ses propriétés mécaniques et d'alliage avec le cuivre.

Pour les températures les plus extrêmes (au delà de 300°C) l'isolation non-organique semble rester la solution la plus prometteuse pour le moment pour une utilisation longue.

Les composés inorganiques sont à même de conserver leurs caractéristiques mécaniques dans des environnements très sévères et dans des conditions opérationnelles, et ce, même sur de longues périodes de fonctionnement. Les meilleurs candidats inorganiques sont le mica, les fibres de verre, les résines à base de silicone et enfin les composés de céramique.

- Le mica est un minéral caractérisé par sa très grande capacité de résistance aux hautes températures. Il a également l'avantage de résister aux phénomènes de décharges partielles.
- Les fibres de verres sont des matériaux amorphes qui sont capables de fonctionner jusqu'à des températures inférieures à 500°C puisqu'au delà il deviennent conducteurs .

Associées à des matrices époxy ou sous forme de guipage, elles présentent des avantages indéniables pour une utilisation au sein d'une machine. Les recherches menées sur les résines époxy montrent de bonnes caractéristiques mécaniques jusque 300°C .

- Les matériaux céramiques sont réputés pour leurs très bonnes caractéristiques thermiques et leur très bonne résistance aux conditions très sévères. Le procès de dépôt sur le fil de cuivre est très différent du procès classique et les performances des fils isolés céramiques restent encore limité pour le moment. Deux procès sont très exploités le CVD (Chemical Vapor Deposition) et l'EPD (Electrophoretic Deposition) ils restent cependant très onéreux pour des applications à large diffusion .

V.1.3. Nature et rôle des isolants

Cela se rapporte aux isolants utilisés entre les enroulements et la terre.

La température élevée, l'âge des isolants, l'humidité ainsi que la contamination due à la poussière réduisent la durée de vie de ces isolants. Il a été mis en évidence que l'utilisation de chauffages afin d'assécher les isolants peut doubler la durée de vie des moteurs. Les isolants utilisés de nos jours sont de plus en plus performants et capables de résister à des températures de plus en plus élevées sans pour autant affecter la durée de vie des moteurs.

Cependant, il existe toujours des causes de destruction de ces isolants plus rapide que prévue. Il faut garder à l'esprit que même si un défaut des isolants est souvent la cause d'une

panne sur un moteur, ce défaut est lui-même dépendant d'autres facteurs. Le circuit d'alimentation d'une part influence considérablement les isolants. Si une mauvaise Connexion (à haute résistance) se trouve en amont du moteur et génère un déséquilibre résistif supérieur à 5%, et que l'on continue à faire fonctionner ce moteur dans ces conditions à sa puissance nominale, la durée de vie des isolants en sera affectée et considérablement réduite.

Des séquences de courants inversés d'autre part générant des champs magnétiques opposés au sens de rotation du moteur ne vont pas seulement réduire la capacité de couple de ce dernier, mais également créer un échauffement important qui pourra excéder les 150°C qui sont la limite des systèmes en isolation de classe F. Isolement entre conducteurs, entre conducteur et masse

Un des défauts les plus courants au niveau des enroulements d'un moteur est un défaut dit de tour à tour. Cela se produit quand l'isolant se détériore entre deux tours de la même bobine. Cela affecte sa capacité à produire un champ magnétique équilibré. Des champs magnétiques non équilibrés génèrent des vibrations, qui à leur tours peuvent dégrader les isolants ainsi que les roulements. Un échauffement localisé autour du court-circuit peut alors endommager les autres enroulements à proximité jusqu'à créer un court-circuit entre plusieurs bobines. Enfin, un échauffement excessif ne va pas seulement endommager les enroulements, mais va également affecter les isolants se trouvant entre la laminassions et le noyau du stator.

Un autre type de défaut pouvant se produire sur les enroulements d'un moteur est le défaut entre phase. Il est créé par la rupture de l'isolation entre deux phases, principalement lorsque les enroulements se trouvent à proximité l'un de l'autre dans la même encoche. Une différence de tension élevée a tendance à amplifier le phénomène très rapidement. Du papier est placé dans les encoches entre les différentes phases afin de limiter les risques de fuite entre phases.

Un court-circuit entre deux tours ou entre deux phases peut se produire sans pour autant créer un défaut d'isolation à la terre immédiat. Pour cette raison, le simple fait de tester avec un mégohmmètre en préventif, ou même après que le moteur ait disjoncté ne va pas forcément permettre d'en identifier la cause. Ce défaut au niveau de l'enroulement peut alors devenir un défaut majeur du moteur. Un défaut permanent au niveau du noyau va alors nécessiter le remplacement du moteur.

V.1.4.Influence de l'état du rotor

Cela fait référence aux barres du rotor, aux laminassions du rotor ainsi qu'aux bagues du rotor. Une étude menée conjointement par General Electric and EPRI dans les années 80 a

montré que 10% des défauts de moteur étaient en fait dus au rotor. Ce rotor, même s'il n'est la cause que d'un faible pourcentage des défauts de moteur, peut impacter d'autres zones jusqu'à y créer des défauts. Lorsqu'un moteur avec une barre de rotor fendue ou cassée est utilisé, cela crée un *échauffement intense* à proximité de la cassure. Cette température excessive peut alors se propager à d'autres barres du rotor et détruire l'isolation autour des laminations qui se trouvent à proximité. Cela peut également impacter d'autres parties du moteur, c'est le stator qui se trouve à quelques millimètres seulement du rotor. L'isolation du stator ne peut résister à la chaleur intense générée par le rotor défectueux et va finir par se détériorer.

Malheureusement, il est très difficile de diagnostiquer un rotor endommagé sans l'appareillage adéquat, et donc de déterminer la cause première du défaut. Cela va probablement engendrer un rembobinage du moteur, ainsi que le remplacement des roulements, mais pas une réparation efficace du moteur. Lorsque le moteur est utilisé à nouveau, le même défaut va se reproduire, et le nouvel isolant va se détériorer à nouveau.

V.2. Quelques procédures d'isolations

V.2.1. Isolation organique classique

Isolation des fils émaillés : Les fils émaillés organiques utilisés dans les moteurs électriques sont composés d'un noyau conducteur constitué de cuivre ou d'aluminium entouré par une couche isolante mince. Cette couche est constituée de plusieurs couches de vernis d'émaillage de nature similaire ou différente. Elles sont nécessaires pour assurer les différentes fonctions demandées à un fil émaillé : adhérence sur le fil de cuivre, résistance électrique, stabilité thermique, adhérence de l'isolant secondaire (imprégnation). Ces solutions d'émaillages ont la plupart du temps des formulations complexes qui regroupent un ou plusieurs solvants, des pré-polymères ainsi que des agents de réticulation. Selon la nature chimique de l'émail et le diamètre des fils, le vernis d'émaillage représente entre 18 et 40 % de la partie utile, le complément étant constitué de solvants qui sont brûlés dans un four à haute température pendant le processus de polymérisation. Néanmoins, la nature du solvant joue un rôle important dans la qualité finale des fils.

Il existe de nombreux types de fils émaillés disponibles sur le marché. Différentes normes, [25-27] décrivent en détail les conducteurs émaillés (diamètre, épaisseur d'isolante, présence ou non d'une couche thermo-adhérente,...). La nature chimique des émaux diffère par leur indice thermique et par les conditions de fonctionnement du moteur. La figure V.2 présente un comparatif détaillant les températures de ramollissement et l'indice de

(AFP=PUR=Polyuréthane, PEI'THEIC'= Polyester-imide avec THEIC; PES'THEIC'=Polyester avec THEIC ; PEI=Polyester-imide, PAI= Polyamide-imide,PI=Polyimide).

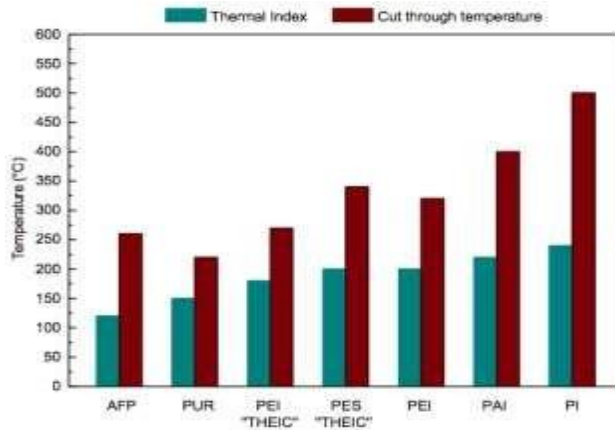


Figure V.2. Indice thermique et température de ramollissement des principaux polymères utilisés pour l'isolation des moteurs électriques [11]

Le polyimide (PI) qui reste pour le moment un des matériaux organiques les plus performants du point de vue de la montée en température présente un indice de température de 240°C. Les fils à base de PI sont en revanche très coûteux en raison du coût des matériaux et des conditions spécifiques de l'émaillage. Ils possèdent de plus des propriétés thermiques et électriques fortement dépendantes des conditions d'humidité. Par exemple, la rigidité diélectrique du PI baisse d'environ 25% à température ambiante lorsque le taux d'humidité relative est augmenté de 0 à 100% [22]

V.2.2 Méthode classique d'isolation .

V.2.2.1 Par polymères nano-chargés

Les solutions nano-chargées conduisent à des durées de vie plus importantes des machines électriques grâce à des caractéristiques diélectriques sensiblement améliorées mais surtout à l'aide d'une meilleure résistance aux phénomènes de décharges d'où leur appellation plus courante de fils « corona résistant » [29-30]. L'adjonction de particules inorganiques (quelques % en masse) dans une résine organique classique permet de réduire notablement (jusqu'à un facteur 1000) la sensibilité de la couche isolante aux DP en réduisant l'énergie des collisions, en améliorant la résistance à la diffusion des gaz [29] et en augmentant localement la résistance thermique. Différents types de particules peuvent être utilisés pour améliorer les caractéristiques de la résine : Al₂O₃, TiO₂, SiO₂ [22] ou plus récemment des composés

synthétiques de mica[30].

Ces solutions sont utilisables sous 3 formes pour une amélioration de la durée de vie des machines fortement contraintes par les DP :

- Fils émaillés corona résistant associés à un vernis d'imprégnation classique ;
- Fils émaillés standards associés à un vernis d'imprégnation nano-chargé ;

V.2.2.2 Vernis d'imprégnation

La fonction principale du vernis d'imprégnation est de renforcer mécaniquement l'enroulement pour le protéger de l'humidité, des agressions environnementales et d'améliorer sa conductivité thermique. En fonction de leur composition, les vernis d'imprégnation peuvent être divisés en deux catégories :

- les vernis à base de solvants : le solvant est présent de manière à obtenir une viscosité plus faible permettant une application plus efficace et plus aisée ; il s'évapore pendant le séchage ou la phase de polymérisation. Les solvants utilisés peuvent être complètement organiques ou avoir une partie aqueuse. Ces vernis présentent l'inconvénient d'émettre de grandes quantités de composés organiques volatiles (COV) qui entraînent un risque pour la santé et l'environnement (N-méthyl pyrrolidone, solvants aliphatiques et aromatiques tels que le naphte, le xylène, le toluène, etc...).
- Les vernis sans solvant: ils contiennent un diluant réactif (typiquement un monomère) permettant d'abaisser la viscosité et possède également le plus souvent un catalyseur accélérant le durcissement. Le vernis d'imprégnation et la technique d'imprégnation utilisée pour son application sont intimement liés. Le vernis doit être appliqué de manière à supprimer au mieux les zones d'air au sein du bobinage. La technique traditionnelle consiste à immerger la machine dans un vernis d'imprégnation ou à utiliser le processus VPI (Imprégnation sous vide-pression) pour une meilleure pénétration au cœur des enroulements.

Une seconde option consiste à utiliser des fils dit « thermodadhérents ». Ces fils spéciaux sont émaillés avec un adhésif supplémentaire placé au dessus de l'émail classique. Cet adhésif a une fonction de liaison qui s'active par la chaleur (air chaud, four, courant électrique) ou par l'action de solvants. Une fois cette fonction activée, les spires se retrouvent liées les unes aux autres dans une bobine compacte. L'utilisation de fils thermo-adhérents peut offrir des avantages de coût et de fabrication dans certaines applications de bobinage ou de réduction de l'impact sur l'environnement [mettre les 2 publications CONFREGE LSEE+LAPLACE en 2010)].

V.2.3. Isolation inorganique

Dans un environnement atteignant des températures supérieures à 300 °C, les isolants minéraux sont les mieux adaptés pour de longues périodes d'exploitation [12].

Cependant, en plus de la température, ces matériaux doivent également supporter sans défaillance les contraintes électriques et mécaniques.

L'isolante les plus répandus sont le mica, la fibre de verre, le silicone et la céramique.

V.2.3.1 Le Mica

Le mica est un minéral composé principalement de silicate d'aluminium et de potassium. Le mica est stable lorsqu'il est exposé à un champ électrique, la lumière, l'humidité et les températures extrêmes. Il est thermiquement stable et il est résistant aux décharges partielles. Les principales catégories de mica utilisées en génie électrique sont le mica phlogopite et le mica muscovite. Le mica muscovite est principalement utilisé dans les condensateurs, mais sa stabilité en température est plus faible que celle du mica phlogopite.

Le mica phlogopite reste stable à des températures plus élevées (jusqu'à 900°C) et est utilisé dans des applications dans lesquelles une combinaison de stabilité à haute température et de propriétés électriques est nécessaire.

V.2.4 La fibre de verre

Le verre est un matériau ou un alliage dur, cassant et transparent à la lumière visible. Dans la plupart des cas, le verre est constitué de dioxyde de silicium (SiO_2 -silice) auquel sont ajoutés des fondants. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (non cristallin) comportant un phénomène de transition vitreuse. A température ambiante le verre est un bon isolant avec une résistivité électrique de l'ordre de $10^{17}\Omega\cdot\text{m}$, mais à des températures élevées, il devient conducteur. Ainsi à 500°C sa résistivité électrique tombe à $6,3\cdot 10^5\Omega\cdot\text{m}$ [23]. Le verre présente de bonnes propriétés thermiques mais il est fragile et il est difficile d'utiliser du verre pour faire des isolations présentant de bonnes propriétés mécaniques en termes de flexibilité. Par conséquent, le verre est transformé en fibres flexibles. Ces fibres de verre sont utilisées pour fabriquer des tissus qui sont enroulés autour des câbles. Comme tout matériau inorganique, le verre a une résistance élevée à la contrainte électrique en termes de décharges partielles. L'examen de composites d'isolation verre et polymères après une période d'exposition à des décharges partielles révèle l'érosion des matériaux polymères, mais pas de dommage au verre [24].

V.2.5. Les résines silicones

Les silicones sont des composés inorganiques contenant un silicium-oxygène de la chaîne (-Si-O-...) sur lequel sont fixés des groupes sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques (carbone, hydrogène et parfois d'autres éléments chimiques) peuvent être utilisés pour relier plusieurs de ces chaînes. Certaines des propriétés les plus utiles des résines silicones comprennent : la stabilité thermique, la température élevée de la dégradation et les bonnes caractéristiques d'isolation électrique. Dans la plupart des exemples de systèmes d'isolation, le silicone est utilisé comme liant car le silicone se transforme en un matériau inorganique lorsqu'il est chauffé à des températures élevées [12]. Dans de nombreux cas, des charges minérales peuvent être incluses dans ces liants. Les céramiques étant naturellement poreuses et hydrophiles elles sont parfois consolidées avec du silicone pour mieux résister à l'humidité.

V.2.6. Les céramiques

Les céramiques sont essentiellement des substances inorganiques et non métalliques avec d'excellentes propriétés thermiques. Les céramiques ont généralement une inertie chimique très élevée et une bonne résistance à l'attaque par des substances agressives, à l'oxydation et aux dommages dus aux intempéries. Les céramiques conservent leur solidité même à des températures très élevées et sont capables de résister aux chocs thermiques, elles ont un faible coefficient de dilatation thermique et une faible conductivité thermique. Les céramiques techniques sont divisées en trois catégories différentes :

- oxydes : Al_2O_3 (oxyde d'aluminium), ZrO_2 (dioxyde de zirconium), ... ;
 - non-oxydes : carbure, borure, nitrure, céramique composée de silicium et de tungstène,
 - magnésium, platine ou titane ;
 - composites céramiques qui sont la combinaison d'oxydes et de non oxydes.
- Pour la fabrication de fils à haute température, on utilise généralement les oxydes parce qu'une couche mince d'isolant peut être déposée sur le conducteur tout en maintenant de bonnes propriétés mécaniques et thermiques. Le dépôt d'une couche de céramique sur des conducteurs est très différent de celui d'autres matériaux isolants traditionnels tels que des polymères. La procédure de production est difficile et donc coûteuse. Il existe différents procédés de fabrication qui vont de la pulvérisation thermique où des peintures inorganiques sont déposées et cuites à des températures élevées à la méthode le CVD (dépôt chimique en phase vapeur). Il existe également un procédé plus spécifique, dans lequel un coulis composé de verre, de céramique, d'un liant organique

et de solvants est cuit entre 700 et 800°C. Une autre méthode appelée EPD (dépôt électrophorétique), a été développée par [13]. La céramique placée sur les fils reste passablement poreuse de sorte que les fils restent sensibles à l'humidité. Ils possèdent également une résistance mécanique assez faible qui les rend cassants. Dans ces conditions, une contrainte fondamentale dans l'utilisation de ce type de fils est le rayon de courbure.

Les fils de céramique sont limités en termes de rayon de courbure à 10 fois le diamètre du fil. Cette contrainte doit impérativement être prise en compte dans la conception des bobinages. De plus, la rigidité diélectrique des couches isolantes de céramique dépend de nombreux facteurs tels que la porosité, la taille et l'uniformité des grains utilisés lors du processus de dépôt, la présence de défauts dans la microstructure,.... La rigidité diélectrique est d'autant plus grande que l'épaisseur de la couche de céramique est faible car un volume croissant de matériau augmente la probabilité de présence de défauts aléatoires [14]. Les études menées par [15- 16] montrent que le champ de rupture diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche isolante et avec la diminution de la pureté de l'alumine.

Les mécanismes de défaillance dans les céramiques ne sont pas encore entièrement connus. La rupture diélectrique est le résultat d'une série de processus complexes. Comme dans le cas des isolants organiques, on distingue la rupture intrinsèque du matériau et la rupture pratique qui se produit à proximité d'un défaut ou en raison d'une dégradation progressive de la matière [17]. Il convient également de mentionner la dégradation thermique qui est habituellement attribuée à un échauffement local du matériau, par exemple, en raison des pertes par conduction [18]. Les mécanismes de dégradation par ionisation peuvent également apparaître dans les céramiques principalement à cause des phénomènes de décharges partielles dans les porosités et les fissures. Quant à la rupture électromécanique, elle est le résultat de la création d'une force électrostatique qui tend à compresser la couche isolante.

V.2.7. Les résines époxy

La résine époxy, également connue sous le nom poly époxyde, est un polymère thermodurcissable obtenu par polymérisation de monomères époxy à l'aide d'un agent de réticulation qui peut être un anhydride d'acide, un phénol, ou plus souvent une fonction amine. Il s'agit de polymères à deux composants. Les résines époxy durcissent de manière irréversible à la suite d'une montée en température ou par addition d'un catalyseur. Pour les applications à températures élevées les résines époxy sont utilisées en tant que matrice de

structure renforcée à l'aide de fibre de verre, de mica ou de céramiques. Pour les isolants en céramique, la résine imprègne les porosités de la céramique, renforçant la résistance mécanique [19]. Les études menées sur les résines hybrides époxy-silicium par [20] montrent d'excellentes propriétés mécaniques et un coefficient de dilatation thermique plus élevé à des températures élevées (jusqu'à 300°C). Des essais expérimentaux ont également été effectués sous régime de DP dans le vide sur des matériaux époxy [21]. Les auteurs indiquent que l'activité de décharge change fortement avec l'augmentation de la température.

V.3. Différents Matériaux isolants

V.3.1. Matériaux isolants

Les pertes d'énergie électriques et mécaniques dans les machines électriques se produisent par la transformation de ces formes d'énergie en énergie thermique, ce qui chauffe certaines parties de la machine. Pour assurer la fiabilité des machines électriques, l'échauffement des différentes parties de la machine doit être limité.

La tâche la plus difficile et la plus importante est d'assurer la bonne tenue de l'isolation des enroulements ; pour cette raison la charge admissible d'une machine est déterminée tout d'abord par la température admissible des isolants utilisés (Tableau V.1). Les isolants dans les machines électriques sont diversifiés selon le mode de fonctionnement et les températures admissibles :

- ✓ Entre conducteurs : guipage de papier, coton, amiante conducteurs de faible section : émaillage
- ✓ Entre conducteur et masse : cartons, toiles huilées, agglomérés de mica, tissus de verre imprégnés de vernis de silicone.

D'après la CEI (Commission électrotechnique internationale) :

Classe	Températures limites	Constitution de l'isolant
Y	90°C	Fibreux en cellulose et soie imprégnés et plongée dans un isolant liquide.
A	90°C	Fibreux en cellulose ou soie imprégnés, ou plongés dans un isolant liquide.
E	120°C	Pellicules organiques synthétisables
B	130°C	à base de mica, et de fibre de verre utilisés avec des liants organiques.
F	155°C	à base de mica, et de fibre de verre combinés avec des liants et des compositions d'imprégnation synthétique.
H	180°C	à base de mica et de fibre de verre utilisés en combinaison avec les silicones.
C	Plus de 180°C	Le mica, les céramiques, le verre, quartz utilisé sans liants organiques.

Tableau V.1. Classe des isolants

V.4. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différents facteurs et éléments qui ont un impact direct dans la conception des machines électriques tournantes et qui peuvent participer au bon fonctionnements de ces dernières , prolongation de leur durée de vie .

envisageables on cas de défaillance des machines électriques tournantes telle que la protection des parties sous tension et hors tension et aussi l'isolation des machines puis nous avons sites les solutions disponibles sur le marché (Polymères nano-chargés, Vernis d'imprégnation, La fibre de verre, Les résines silicones,...) et a la fin on a introduire quelques différents matériaux isolants.

A large, light orange decorative shape with rounded corners and a slight shadow, centered on the page. It contains the text 'Conclusion générale' in a bold, black, italicized serif font.

Conclusion

générale

CONCLUSION GENERALE

Dans cette modeste étude , nous avons évoqué les machines électriques et leur importance dans le domaine de l'industrie elles sont certainement la pièce maitresse du développement de ce domaine , ces machines sont opérationnellement l'élément moteur dans le domaine de production de tout azimut , que ce soient les machines synchrones ou les machines asynchrones dont chacune d'elles ont leur caractéristiques , leur manière de conception , leur domaine d'utilisation , ainsi que leurs différents problèmes et défauts lors de leur fonctionnement .

Le but de cette étude c'était de prendre connaissance des différents types de ces machines , de connaître leur matériaux de construction et les différentes techniques de protectuain et isolation .

Donc nous savons que ces machines électriques tournantes rencontrent souvent des problèmes qui peuvent influencer lors bon fonctionnement , et agir sur leur bon rendement, et la majorité de ces défaillances sont les résultats de leurs échauffements excessifs lors de leur utilisations.

Donc l'objectif de cette étude c'est de voir l'origine de l'influence du phénomène d'échauffement sur le fonctionnement de ces machines car nous savons qu'en principe chaque mouvement rotatif s'accompagne d'un dégagement de chaleur qui peut influencer sur le fonctionnement de ces machines , peut provoquer des incidents dangereuses et la longue un impact sur la durée de vie de ces machines , ce qui peut provoquer un manque de production .

Le phénomène d'échauffement est due à des températures execives dont différent leur source d'origine .

Nous avons vu que les principales causes de ces échauffements lors du fonctionnements de ces machines sont les surcharges, les matériaux de conception , les défauts de fabrication l'alimentation et les conditions de travail et environnemental.

De ce fait, avons essayé de diagnostiquer ce phénomène et essayer de trouver des solution adéquates à ce problème afin de préserver les bonnes performances de ces machines et d'assurer leur bon rendement.

Bibliographies

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Bichari « système de diagnostic des défaillances des machines électriques »
- [2] R. HUSSON, « Méthodes de commande des machines électriques », Hermes, 2002.
- [3] G. STURTZER, E. SMIGIEL, « Modélisation et commande des moteurs triphasés », Ellipses, 2000.
- [4] R. ABDESSEMED, "Modélisation et simulation des machines électriques", Ellipses, Collection, 2011
- [5] M. PINARD, « Commande électronique des moteurs électriques », Dunod, 2007.
- [6] A. Razafimahery « Echauffement des machines électriques tournantes » licence es technique en Génie Mécanique et Industriel, 2015
- [7] L. JAULIN, « Représentation d'état pour la modélisation et la commande des systèmes », Hermes, 2005.
- [8] B. Bayala, « La machine asynchrone », Edition revue 2010.
- [9] B. Bayala, « Machines à courant continu », Edition revue 2010.
- [10] Y. PERRIARD, « Modélisation et commande des entraînements électriques », Revue internationale de génie électrique, volume 5, n°1/2002 : EPE'99, Hermes.
- [11] A. Ibrahim « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée »
- [12] J.P. CARON, J.P. HAUTIER, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Technip, 1995.
- [13] A. MELAKHI, « Machine électrique », Polycopie de cours, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 1997.
- [14] A. Ceban « Méthode globale de diagnostic des machines Electriques »
- [15] E.F Kherkhachi « Diagnostic du système isolant des machines électriques par identification paramétrique »
- [16] G. ISHAK « Détection des défauts mécaniques par des indicateurs de cyclo stationnarité » ; Rapport du stage Master 2 Recherche
- [17] C. Guillermin « Vieillissement électrique et thermique d'un composite résine époxyde-silice : étude des charges d'espace et de la conduction »
- [18] Turboalternateurs – techniques de l'ingénieur - D 3 530 – 15.
- [19] Organisation de la Maintenance de la Machinerie de Production dans L'industrie Manufacturière
- [20] Electrical Energy Systems - Mohamed E. El-Hawary, CRC PRESS – 2000.

- [21] Machine synchrone excitatrice – techniques de l'ingénieur D 3 545 – 1.
- [22] J.L. Dalmasso, "Cours d'électrotechnique 1 :Machines tournantes à courants alternatifs", Éditions Belin, 1985.
- [23] M. Kostenko et L. Piotrovski, "Machines Electriques : Machines à Courant Alternatif " Tome II, 3ème édition, Édition MIR, 1979.
- [24] Analysis of synchronous machine – T.A LIPO – CRC PRESS 2ed edition, 2012.
- [25] Alternating Current Machine MG SAY –PITMAN, 4th edition,1978.
- [26] G. Séguier, F. Notelet, "Electrotechnique industrielle", Téchn et Doc, 1987.
- [27] A. Ivanov-Smolensky, "Electrical Machines", Édition MIR, 1982.
- [28] T. Wildi, "Electrotechnique". 2ème édition, Presses de l'université de Laval, 2005.
- [29] G. R. Slemon, "Electrical machine and drives", Addison-Wesley publishing company, 1992.
- [30] A. Fouillé, "É lectrotechnique à l 'usage des ingénieurs : Machines électriques" , Tome II, Édition Dunod, 1957.