

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITÉ MOHAMMED SEDIK BENYAHIA-JIJEL**



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département Électrotechnique**

**Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Électrotechnique**

**Option : Machines Électriques**

**Thème :**

**Prédiction de la durée de vie d'une machine  
asynchrone exposée à des fluctuations de tension**

***Réalisé par :***

***M<sup>lle</sup>. SAHRAOUI Soumia***

***M<sup>me</sup>. KERFALI Samah***

***Encadré par:***

***Dr. REZIG Ali***

**Promotion : 2020/2021**

## *REMERCIEMENT*

*Avant tout nous remercions le bon dieu, pour nous avoir aidés à accomplir ce travail dans des bonnes conditions.*

*Nous tenons le remerciement à notre encadreur Dr. REZIG Ali d'avoir bien dirigé pour réaliser ce travail par ses conseils, sa documentation, sa compréhension, sa patience et ses encouragements.*

*Les membres de jury pour avoir honoré en acceptant de juger notre travail.*

*Mes enseignants tout au long de ma formation à l'université de Jijel.*

## *Dédicace*

*De tout mon cœur, je dédie ce travail :*

*A mon mari et mes chers parents pour leur bienveillance, leur aide et leur soutien tout long de ma formation.*

*A ma chère sœur et mon frère pour leur enthousiasme et leurs encouragements.*

*A toute mes amies et collègues d'électrotechnique promotion  
2020/2021*

*Kerfali Samah*

## *Dédicace*

*De tout mon cœur, je dédie ce travail :*

*À mes chers parents pour leur bienveillance, leur aide et leur soutien tout long de ma formation.*

*À mes chères sœurs et mes frères pour leur enthousiasme et leurs encouragements.*

*À toute mes amies et collègues d'électrotechnique promotion 2020/2021*

*Sahraoui Soumia*

*Sommaire*

**Introduction Générale.....1**

**Chapitre I: Systèmes d’isolation du bobinage dans les machines électriques**

Introduction .....4

1. Isolants dans le système électrique .....4

    1.1 Définition .....4

        1.1.1 Caractéristique des matériaux isolants.....5

    1.2 Types des isolants .....5

        1.2.1 Matériaux isolant solide .....5

        1.2.2 Matériaux isolant liquide .....6

        1.2.3 Matériaux isolant gazeux.....7

    1.3 Class thermique des isolants .....8

    1.4 Système d’isolation des machines rotatives.....9

        1.4.1 Caractéristiques du système d’isolation d’enroulement de stator.....9

            1.4.1.1 Isolation des brins .....10

            1.4.1.2 Isolation des spires .....12

            1.4.1.3 Isolation de la paroi de terre .....12

    1.5. Vieillessement de l’isolant du bobinage d’une machine électrique .....13

        1.5.1 Définition .....13

        1.5.2. Vieillessement électrique .....14

        1.5.3. Vieillessement physique .....15

1.5.4. Vieillessement chimique .....	15
1.5.5. Vieillessement climatique.....	15
1.5.6. Vieillessements artificiels .....	16
1.6. Contraintes de vieillessement .....	16
1.6.1. Contrainte thermique .....	17
1.6.2. Contrainte électrique .....	18
1.6.2.1. Effet combiné des contraintes thermique et électrique .....	20
1.6.3. Contraintes mécaniques .....	20
1.6.4. Contrainte climatique .....	21
1.6.5. Contraintes environnementales .....	22
1.7. Méthodes de surveillance de l'état d'un isolant .....	22
1.7.1 Résistances de l'isolation et indice de polarisation (PI) .....	22
1.7.2 Test Hipot CC .....	23
Conclusion .....	24

## **Chapitre II : Modèles multi-contraintes pour la prédiction de la durée de vie de l'isolation du bobinage d'une machine électrique**

Introduction .....	26
2.1 Modèles d'estimation de la durée de vie d'un isolant dans un bobinage.....	26
2.1.1 Le modèle de vieillessement avec une contrainte.....	26
2.2 Modèle de dégradation de l'isolation de l'enroulement du stator dans les grands alternateurs .....	28
2.2.1 Modèle général de dégradation de l'isolation .....	29

2.2.2 Application du modèle général de dégradation de l'isolation de l'enroulement du stator d'un alternateur.....	30
2.2.3 Définition du seuil de défaillance (Failure threshold) .....	31
2.2.4 Application pour le calcul de la durée de vie de d'isolation d'un enroulement statorique.....	32
2.2.4.1 Modèle de dégradation .....	32
2.2.5 Dégradation de l'isolation des enroulements du stator .....	35
Conclusion.....	38

**Chapitre III : Effet des fluctuations de la tension sur le vieillissement de l'isolation d'une machine asynchrone**

Introduction .....	41
3 .1 Estimation de la durée de vie du moteur à induction .....	41
3.2 Modèle électrique .....	42
3.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	42
3.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	43
3.2.2.1 Équations générales de la machine asynchrone triphasée .....	43
a. Equations électriques .....	43
b. Equations magnétiques .....	44
c. Équations mécanique .....	45
3.3 Prise en compte de la fluctuation de tension dans le modèle électrique .....	46
3.3.1 Modèle thermique .....	47
3.3.2 Estimation du vieillissement de l'isolation dû à la température .....	47

3.4 Application pour l'estimation de la durée de vie de l'isolation d'un moteur asynchrone .....	50
Conclusion .....	55
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>57</b>
Bibliographie .....	60



***INTRODUCTION  
GENERALE***

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les systèmes utilisant des machines électriques doivent pouvoir compter sur leur fonctionnement sûr sans défaillance inattendue.

Il existe de nombreux types de défaillances qui peuvent être rencontrées par une machine électrique, l'une des plus courantes étant la défaillance de l'isolation de l'enroulement du stator [1] [2]. Les contraintes qui peuvent conduire à la défaillance de l'isolation sont d'origine environnementale, thermique, électrique ou mécanique.

L'isolation se détériore pendant le fonctionnement normal et le défaut peut entraîner des court-circuités entre les conducteurs dans les encoches du stator ou au niveau des têtes de bobines. Ces court-circuités peuvent rapidement se propager en un défaut plus grave et peut potentiellement causer des dommages catastrophiques à la machine et à l'équipement qui fonctionne en conjonction avec elle. [3] [4]

Les méthodes d'évaluation de la qualité de l'isolation du stator deviennent plus importantes. Cette évaluation est nécessaire pour fournir un pronostic de l'heure prévue de la panne (arrêt complet de la machine).

La dégradation de l'isolation des machines électriques a été étudiée par plusieurs groupes de recherche. Dans [5], Lahound réalise des expériences (DOE) pour évaluer la durée de vie de l'isolation avec différentes contraintes appliquées aux matériaux d'isolation couramment utilisés dans les machines électriques basse tension. Il a été déterminé que la tension appliquée ainsi que la température à laquelle l'isolant est exposé sont les deux facteurs qui ont le plus grand impact sur la durée de vie de l'isolant. Dans [6], les auteurs ont montré que la résistance et le courant de polarisation à travers l'isolation varient en fonction de la température. Dans [7], il est montré que la résistance de l'isolation a le changement le plus significatif lors de la dégradation. Donc il est possible de contrôler l'état de l'isolation en inspectant cette résistance.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des contraintes électriques, thermiques et mécanique sur la durée de vie de l'isolation du bobinage des machines électriques. Les modèles d'estimation de la durée de vie des isolants seront mis en évidence, notamment ceux basés sur l'approche Arrhenius et l'approximation de Simoni.

L'étude de l'effet de la fluctuation de la tension sur le bobinage d'une machine asynchrone est abordée aussi.

Ce mémoire de Master est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les différents éléments qui interviennent dans l'isolation des systèmes électriques notamment les machines électriques.

L'accent est mis particulièrement sur les différentes contraintes qui influent sur la qualité de l'isolation. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des modèles multi contraintes de prédiction de la durée de vie de l'isolation. Ces modèles généralement empiriques sont tous issues de l'approche d'Arrhenius. La difficulté de ces modèles par contre réside dans le fait que ses paramètres varient selon les conditions d'utilisation des machines électriques. Cela nécessite la réalisation des tests de vieillissement accélérés sur les prototypes.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude de l'effet de la fluctuation de la tension sur la durée de vie de l'isolation d'une machine asynchrone. Dans ce modèle nous relierons les pertes par effet Joule dans le bobinage de la machine aux variations de la température. Pour cette raison, un modèle électrique thermique sera développé.

Ce mémoire terminera par une conclusion générale et des perspectives.

## INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la description du système d'isolation d'une machine électrique. Ce composant est d'une importance très particulière dans le fonctionnement de la machine. L'objectif est définir un système d'isolation, les matériaux isolant et les contraintes appliquées. Ces contraintes peuvent nuire au bon fonctionnement d'un isolant. L'effet des contraintes thermiques, électriques et mécanique sera étudié. Les méthodes de teste appliquée au bobinage des machines électriques seront brièvement discutées.

### 1. Isolants dans les systèmes électriques

#### 1.1 Définition d'un isolant

En électricité comme en électronique, un isolant électrique est une partie d'un composant ou un organe ayant pour fonction d'empêcher le passage de tout courant électrique entre deux parties conductrices soumises à une différence de potentiel électrique. Un isolant est constitué d'un matériau diélectrique qui possède peu de charges libres [8].



Figure 1.1 Câble électrique 2 fils + terre avec isolant plastique



Figure 1.2 Isolateur céramique utilisé pour supporter les câbles hauts tension.

La faculté isolante d'un matériau s'explique par la notion de bandes d'énergie. Dans un solide constitué de  $N$  atomes, les niveaux d'énergies se répartissent en intervalles dits bandes d'énergies qui seront donc occupées par les électrons. Parmi ces bandes, deux seulement sont intéressantes car ils déterminent les propriétés électriques du solide, ces deux bandes sont la bande de valence (BDV) et la bande de conduction, séparées par une bande dite interdite car ne pouvant être occupée par les électrons. Dans un isolant les électrons dans la bande de valence ne peuvent pas la quitter pour occuper la bande de conduction à cause de la largeur de la bande interdite très élevée, ainsi les électrons restent emprisonnés dans la bande de valence [9]. L'isolation électrique est rattachée à une propriété physique du matériau utilisé, la résistivité, exprimée en ohmmètre (symbole  $\Omega \cdot m$ ), associée à une grandeur physique mesurable, la résistance, qui s'exprime en ohms (symbole :  $\Omega$ ).

### **1.1.2. Caractéristiques des matériaux isolants**

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée de l'ordre de  $10^8$ : à  $10^{16} \Omega \cdot m$ , car ils contiennent très peu d'électrons libres.

Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.

Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en Courant Continu doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en haute tension (HT) continue.

Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et appelé courant résiduel.

## **1.2 Types d'isolants**

### **1.2.1 Matériaux isolants solides**

Le rôle principal des isolants solides est de s'opposer au passage du courant électrique, mais ils servent aussi à maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions bien déterminées (par exemple : isolateurs de ligne).

Le taux d'utilisation de ces isolants varie selon le besoin. Dans certains cas la quantité d'isolants solides utilisée est très réduite (lignes aériennes en conducteurs nus). Mais la préoccupation de réduire l'encombrement des systèmes électriques, conduit à rapprocher les

conducteurs, et par conséquent à augmenter leurs isolation et les maintenir rigide en place pour éviter qu'ils se mettent en contact sous l'effet de leurs propres poids, des déformations, ou des forces extérieures. Les isolants solides peuvent être employés seuls (câble à isolation synthétique extrudée), en association de plusieurs solides (bobinage réalisé en fil émaillé imprégné de résine thermodurcissable) ou en association d'un solide et d'un liquide (isolation en papier imprégné d'huile minérale pour les transformateurs hautes tensions).

Afin d'assurer l'isolation des différents systèmes électriques, divers isolants solides sont utilisés (verre, porcelaine, matériaux composites,..., etc.), dont on s'intéresse aux polymères qui possèdent des propriétés physicochimiques (comme l'hydrophobicité) meilleures que celles du verre ou la porcelaine). [11]



*Figure 1.3 Isolation solide*

### **1.2.2 Matériaux isolants liquides**

Usuels l'usage d'isolants liquides s'impose lorsqu'il faut remplir des interstices et évacuer des quantités importantes de chaleur à travers des canaux de dimensions réduites. Ils jouent le rôle d'imprégnant d'isolants solides et permettent d'augmenter très sensiblement la sollicitation diélectrique. L'isolation des transformateurs consiste en papiers et cartons (boards) soigneusement séchés sous vide et imprégnés à cœur au moyen de produits de raffinage du pétrole et du charbon (hydrocarbures purs) ou de produits de synthèse. Toute la

partie active du transformateur (circuit magnétique et enroulements) est maintenue en permanence dans l'isolant liquide contenu dans la cuve.

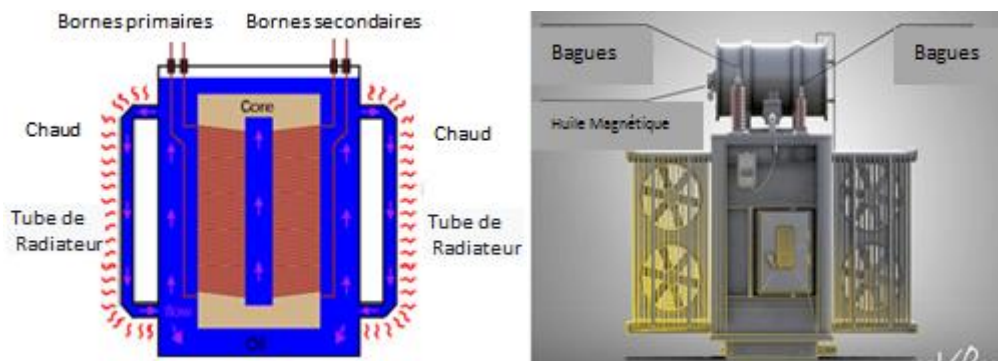


Figure 1.4 isolants liquides pour transformateurs

### 1.2.3 Matériaux isolants gazeux

Les gaz sont utilisés normalement comme fluide caloporteur pour la ventilation des machines électriques. Par certaines de leurs propriétés physiques, ils interviennent toutefois également dans la tenue diélectrique du matériel. Dans les machines électriques autres que les turbo-alternateurs et compensateurs synchrones de grandes puissances, le refroidissement est assuré par une circulation d'air. Entre les conducteurs sous tension et la masse, l'isolement est assuré par des matériaux isolants solides et par de l'air, souvent en couches minces. Vu la faible permittivité de l'air, la contrainte diélectrique peut dépasser souvent le seuil d'effluves et provoquer, par ionisation, la formation d'ozone. Il appartient au constructeur d'éliminer par des dispositions adéquates (traitement anti-effluves) le risque de destructions locales, du fait de l'apparition d'effluves et d'un agent chimique aussi actif que l'ozone. Le refroidissement par circulation d'hydrogène est utilisé pour toutes les machines de grandes puissances il faibles polarités (turbo-alternateurs à 2 et 4 pôles, compensateurs synchrones) afin de réduire les pertes par frottement et ventilation grâce à la faible masse volumique de ce gaz et d'augmenter la puissance spécifique de la machine grâce à l'amélioration sensible des échanges thermiques par conduction et convection forcée, par rapport à un refroidissement par air. L'azote est utilisé exceptionnellement pour le refroidissement de certaines machines fonctionnant dans des atmosphères à haut risque d'explosion. [12]



*Figure 1.5 bien choisir ses matériaux isolants*

### **1-3 Classes thermiques des isolants**

Les pertes d'énergie électrique et mécanique dans les machines électriques se produisent par la transformation de ces formes d'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 sont 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.

La température admissible pour laquelle sont assurées la rigidité diélectrique, la résistance mécanique et la stabilité thermique de l'isolation (capacité de conserver ses propriétés sans modifications importantes pendant 15 à 30 années), dépend des classes des isolants utilisés.

Les différentes classes d'isolation sont montrées sur le tableau ci-dessous [13] [14]



Tableau (1.1) Classes thermiques des isolants

Classe thermique	Température limite (°C)	Exemples
Y	90	Coton, soie, papier, matières organiques similaires sans Imprégnation ni immersion dans un diélectrique liquide
A	105	Mêmes matières que celles de la classe Y mais imprégnés ou immergés dans un diélectrique liquide
E	120	Emaux ou résines époxydes ou formol-polyvinyle
B	130	Matières minérales telles que le mica, fibre de verre
F	155	Mêmes matières que celles de la classe B mais avec des matières d'agglomérations (résines alkyles, époxy des, polyesters)
H	180	élastomères de silicones ou mica, fibre de verre, amiantes agglomérées avec résines de silicone
C	>180	Mica sans agglomérant, verre, quartz, porcelaine

## 1.4 Système d'isolation des machines rotatives

### 1.4.1 Caractéristiques du système d'isolation d'enroulement de stator

Le système d'isolation de l'enroulement du stator contient plusieurs composants et caractéristiques différents, qui, ensemble, garantissent que des courts-circuits électriques ne se produisent pas, que la chaleur provenant des pertes  $I^2R$  sont transmises à un dissipateur thermique et que les conducteurs ne vibrent pas malgré les forces magnétiques.

Les composants de base du système d'isolation du stator sont les suivants :

- Isolation des brins (ou sous-conducteurs)
- Isolation de la spire
- Isolation de la paroi de terre (ou masse ou terre)

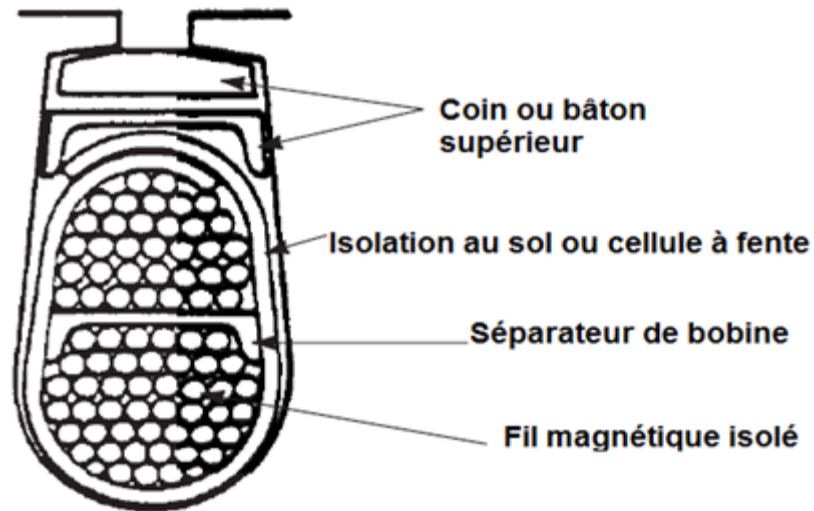


Figure 1.6 Coupe transversale d'une bobine d'enroulement de stator de type aléatoire

La figure (1.6) montre une section transversale d'une bobine à enroulement aléatoire et identifie les composants ci-dessus.

Les sections suivantes décrivent l'objectif de chacun de ces composants. Les contraintes mécaniques, thermiques, électriques et environnementales auxquelles les composants sont soumis sont également décrites.

#### 1.4.1.1 Isolation des brins

Le courant nécessaire dans la bobine ou la barre pour une grande machine nécessite une section transversale relativement grande. C'est-à-dire qu'une grande section transversale de conducteur est nécessaire pour obtenir le courant admissible souhaité.

Un conducteur aussi gros est difficile à plier et à mettre en forme de bobine/barre requise. Un conducteur formé de brins plus petits (également appelés sous-conducteurs) est plus facile à plier dans la forme requise qu'un grand conducteur.

D'un autre côté l'utilisation des conducteurs en brins réduit les pertes provoquées par l'effet de peau.

Les brins doivent être isolés les uns des autres.

La tension aux bornes des brins est inférieure à quelques dizaines de volts ; par conséquent, l'isolant du brin peut être très mince. Cette isolation est sujette à des dommages lors du processus de la fabrication de la bobine, il doit donc avoir de bonnes propriétés mécaniques. Étant donné que l'isolation du brin est adjacente aux conducteurs en cuivre qui transportent le courant statorique principal, ce qui produit des pertes ( $I^2R$ ), l'isolant des brins est exposé aux températures les plus élevées dans le stator. Par conséquent, l'isolant des brins doit avoir de bonnes propriétés thermiques.

Dans les stators, l'isolation des brins peut fonctionner comme l'isolation des spires, bien que des gaines supplémentaires soient parfois appliquées pour renforcer l'isolation de la spire dans des zones clés.



*Figure 1.6 Isolation des brins dans les machines électrique*

Les machines à bobinage de forme utilisent une isolation séparée des brins et des spires. On s'intéresse dans ce chapitre principalement à l'isolation des brins (torons) dans les bobines et barres.

L'isolation des brins dans les machines aléatoire sera traitée comme l'isolation des spires.

#### **1.4.1.2 Isolation des spires**

Le but de l'isolation des spires dans les stators à enroulement aléatoire et de forme est d'empêcher le court-circuit entre les spires d'une bobine. Si un court-circuit produit, le virage court apparaîtra comme l'enroulement secondaire d'un autotransformateur. Si, par exemple, le

bobinage a 100 tours entre la borne de phase et le neutre (le « enroulement primaire »), et si un court-circuit apparaît aux bornes un tour (le « secondaire »), puis 100 fois le courant normal circulera dans le tour court-circuité. Cette découle de la loi du transformateur :

$$n_p I_p = n_s I_s \quad (1.1)$$

Où  $n$  fait référence au nombre de tours dans le primaire ou le secondaire, et  $I$  est le courant dans le primaire ou secondaire. Par conséquent, un énorme courant circulera dans la spire en défaut, en le surchauffant rapidement. Habituellement, ce courant élevé sera suivi rapidement d'un défaut à la terre en raison de la combustion du cuivre fondu à travers toute isolation de mur de terre. Une isolation efficace est nécessaire pour assurer une longue durée de vie. [30]

#### 1.4.1.3. Isolation de la paroi de terre

L'isolation de la terre est le composant qui sépare les conducteurs en cuivre du noyau de stator mis à la terre. La défaillance de l'isolation de la paroi de terre déclenche généralement un relais de défaut à la terre.

Cela permet à un courant de circuler du cuivre vers le noyau du stator, ce qui peut endommager le noyau du stator.

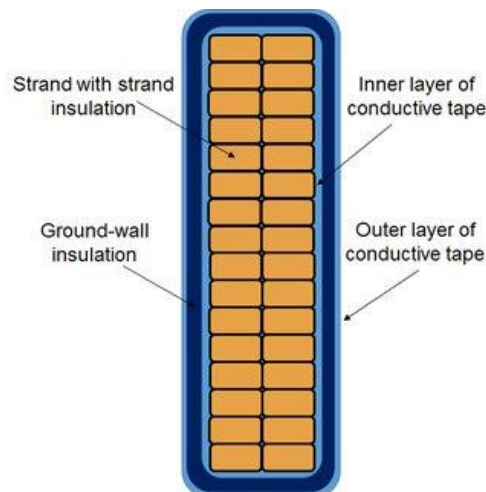


Figure 1.7 Isolation de bobine-noyau-terre

Le bon fonctionnement d'un moteur ou d'un générateur pour une longue durée de vie, nécessite que l'isolation de la terre doive répondre aux rigueurs des sollicitations électriques, thermiques et mécaniques auxquelles elle est soumise. [30]

## **1.5. Vieillessement de l'isolant du bobinage d'une machine électrique**

### **1.5.1 Définition**

Le vieillissement d'une machine électrique ou d'un de ses composants est caractérisé par des modifications diminuant très lentement son aptitude à fonctionner sans risque de panne. Le terme de cette évolution est caractérisé par la défaillance totale ou partielle de certains composants ; ce terme est appelé vieillissement critique.

On appelle vieillissement tout phénomène qui se traduit par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériau.

Le terme vieillissement n'implique pas un mécanisme précis, on est même souvent en présence de phénomènes complexes faisant intervenir simultanément plusieurs mécanismes comme l'oxydation à température modérée, l'hydrolyse ...

Parmi les plus sévères contraintes en service nous pouvant citer la contrainte thermique qui peut conduire à la réduction de la durée de vie suite au vieillissement du matériau.

Le vieillissement thermique peut provoquer aussi la modification de sa structure et de ses propriétés diélectriques et mécanique. [15]

On distingue plusieurs types de vieillissement :

### **1.5.2. Vieillessement électrique**

Lors de contraintes dues à l'application d'un champ électrique, plusieurs modes de vieillissement peuvent apparaître. On distingue deux types de vieillissements :

Le vieillissement extrinsèque, qui se fait à une tension supérieure à la TADP et donc sous DP, du vieillissement intrinsèque, lié à l'injection et au déplacement de charges ainsi qu'à la présence de dipôle permanent.

Dans le premier cas, les décharges électriques répétées dégradent progressivement le matériau et finissent par provoquer sa perforation. Dans le second cas, dans certaines conditions (typiquement champ électrique continu de plusieurs dizaines de kV/mm), l'injection de charges d'espace peut conduire à des renforcements locaux de champ électrique à l'origine d'arborescences électriques et finalement de ruptures d'isolation. Dès lors, les contraintes seront différentes selon le niveau de champ, le niveau de tension et la forme de l'onde de tension (signaux sinusoïdaux ou à fronts raides comme en Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI)).

Le débat est encore ouvert pour savoir si, lorsqu'il n'y a pas de charges d'espace ni de décharges partielles, l'impact du champ électrique a vraiment un effet sur la dégradation des isolations dans la pratique industrielle. Des études menées sur des machines haute tension montrent qu'aucune dégradation significative due à la contrainte électrique en tension alternative n'est observée.

Cependant, Stone et al. [50] indiquent quant à eux que même en l'absence de cavités d'air, les contraintes électriques peuvent être suffisantes pour permettre l'émission de charges provenant de petits défauts sur le fil de cuivre. Après un nombre suffisant de surtensions, ce flux de charges pourraient casser des liaisons chimiques et éventuellement créer et agrandir des cavités d'air jusqu'à permettre l'apparition de DP. Bien que le rotor soit alimenté en tension continu, les aspects de charges d'espaces ne seront pas intégrés dans nos études.

De ces faits, seuls les problèmes liés aux décharges partielles seront étudiées. Deux types de décharges seront distingués :

- Les décharges surfaciques, dues à un renforcement du champ, à la géométrie du système, à une contamination...
- Les décharges volumiques, situées à l'intérieur du système d'isolation (cavités, délaminations...) et qui se produisent généralement après une première dégradation des matériaux suite à un premier vieillissement non électrique.

### **1. 5.3. Vieillissement physique**

Le vieillissement physique peut se produire avec ou sans transfert de masse :

#### **❖ Avec transfert de masse**

Un solvant peut pénétrer dans un matériau, dans les polymères, il peut avoir plastification accompagnée d'un gonflement ou également perte d'adjuvants par extraction ou évaporation. Lorsque le matériau est soumis à des contraintes (mécanique, électrique...) le solvant peut provoquer une craquelure. Si la déformation du polymère se poursuit, il se produit un phénomène de fissuration ou cracking.

Avec l'eau il peut exister des gradients de concentration dus à diffusion, à un gonflement différentiel fibre-polymère pour les matériaux composites ou un gonflement du aux hétérogénéités du matériau cette pénétration de l'eau dans le matériau contribue à la

démunissions de la résistance d'isolement, elle se produit généralement lorsque le matériel, par exemple des moteurs, sont à l'arrêt.

#### ❖ **Sans transfert de masse**

Un matériau peut se fissurer sous contraintes en présence d'un composé tensio-actif.

Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en œuvre, il peut en résulter un vieillissement physique interne. [16]

#### **1.5.4. Vieillissement chimique**

Par opposition au vieillissement physique, le vieillissement chimique implique une modification de la structure chimique du polymère. Il existe différents types de vieillissement chimique, qui correspond à différents processus réactionnels.

Et ils sont le vieillissement thermochimique, photochimique, ou hydrolytique. [11]

#### **1. 5.5. Vieillissement climatique**

Le vieillissement climatique résulte de l'exposition directe des matériaux aux rayonnements solaires, aux intempéries et à diverses pollutions. La lumière solaire accélère le vieillissement des plastiques et des élastomères. la température joue également un rôle important.

Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques de la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminement. [10]

#### **1.5.6. Vieillissements artificiels**

Les températures de vieillissement sont les suivantes : 85°C, 95°C et 105°C. Elles ont été choisies afin de se rapprocher des essais réalisés dans les années 90 par Metzger (85°C et 95°C). Le choix d'une température légèrement plus forte (105°C) a été guidé par le souhait d'accélérer encore les phénomènes « normaux » de vieillissement, sans pour autant impliquer de nouveaux phénomènes inhérents à une température trop élevée pour le PVC. Un vieillissement complémentaire à une température de 115°C a également été réalisé.

Le suivi de vieillissement s'effectue sur des périodes longues (des centaines de jours). Les trois températures de vieillissement, 85°C, 95°C et 105°C, sont donc appliquées dans trois étuves différentes. [17]



Figure 1.9 Etuves de vieillissement thermique

## 1.6. Contraintes de vieillissement

En service l'équipement électrique, et par voie de conséquence l'isolation électrique, est soumis à plusieurs contraintes qui affectent directement sa performance. Ces contraintes peuvent être du type thermique, mécanique, électrique, climatique et de charge. [20,18 ,19]. Chacune de ces contraintes sera décrite dans les paragraphes suivants. L'application simultanée de ces contraintes mène à l'interaction et à l'accélération des mécanismes de vieillissement.

### 1.6.1. Contrainte thermique

C'est probablement la cause principale de la dégradation progressive de l'isolation d'où un système d'isolation doit être choisi en fonction de ses performances thermiques. La température sous laquelle l'équipement électrique opère est déterminante pour la durée de vie de son système d'isolation. Elle correspond aux différentes pertes localisées dans le cuivre (pertes Joule), dans le fer (Hystérésis et courants de Foucault) et dans une moindre mesure dans l'isolant lui-même (pertes diélectriques). Dans les systèmes d'isolation modernes, la température cause une réaction chimique (oxydation dans les machines refroidies à l'air) si celle-ci est supérieure à un certain seuil de température. Le processus d'oxydation rend tous les types de systèmes d'isolation fragiles et tend à causer le décollement ou la délamination du renfort dans l'isolation de masse des bobines préformées.

À son tour la variation de la contrainte thermique cause également une contrainte thermomécanique. Aussi, les variations de charges fréquentes de la machine électrique font que la température de l'enroulement change. Si cette température passe rapidement de la température ambiante à la température de fonctionnement, les cuivres des conducteurs se



dilatent et s'étendent axialement. Le résultat est une contrainte de cisaillement entre les conducteurs et l'isolation car le cuivre se dilate plus rapidement que l'isolation de masse. En revanche, les systèmes d'isolations modernes ont un faible coefficient de dilatation thermique inférieur à celui du cuivre. Dans une situation transitoire, ces systèmes résistent aux changements de la température sans subir de la dilatation même si la charge de la machine augmente. Dans un enroulement statorique et après plusieurs cycles thermiques (c.-à-d. les cycles de charge), la bande entre l'isolation et le cuivre peut se briser. Il n'y a aucune relation mathématique reliant le nombre de cycles aux défauts en fonction de la température.

Cependant, plus la différence de la température entre l'isolation et le cuivre est grande, plus le nombre de cycles de défaut est petit [20]. La durée de vie thermique (L) d'un matériau est souvent exprimée par la relation d'Arrhenius [21] :

$$L = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (1.2)$$

Où T est la température et A, B sont des constantes comme illustré sur la Figure (1.10).

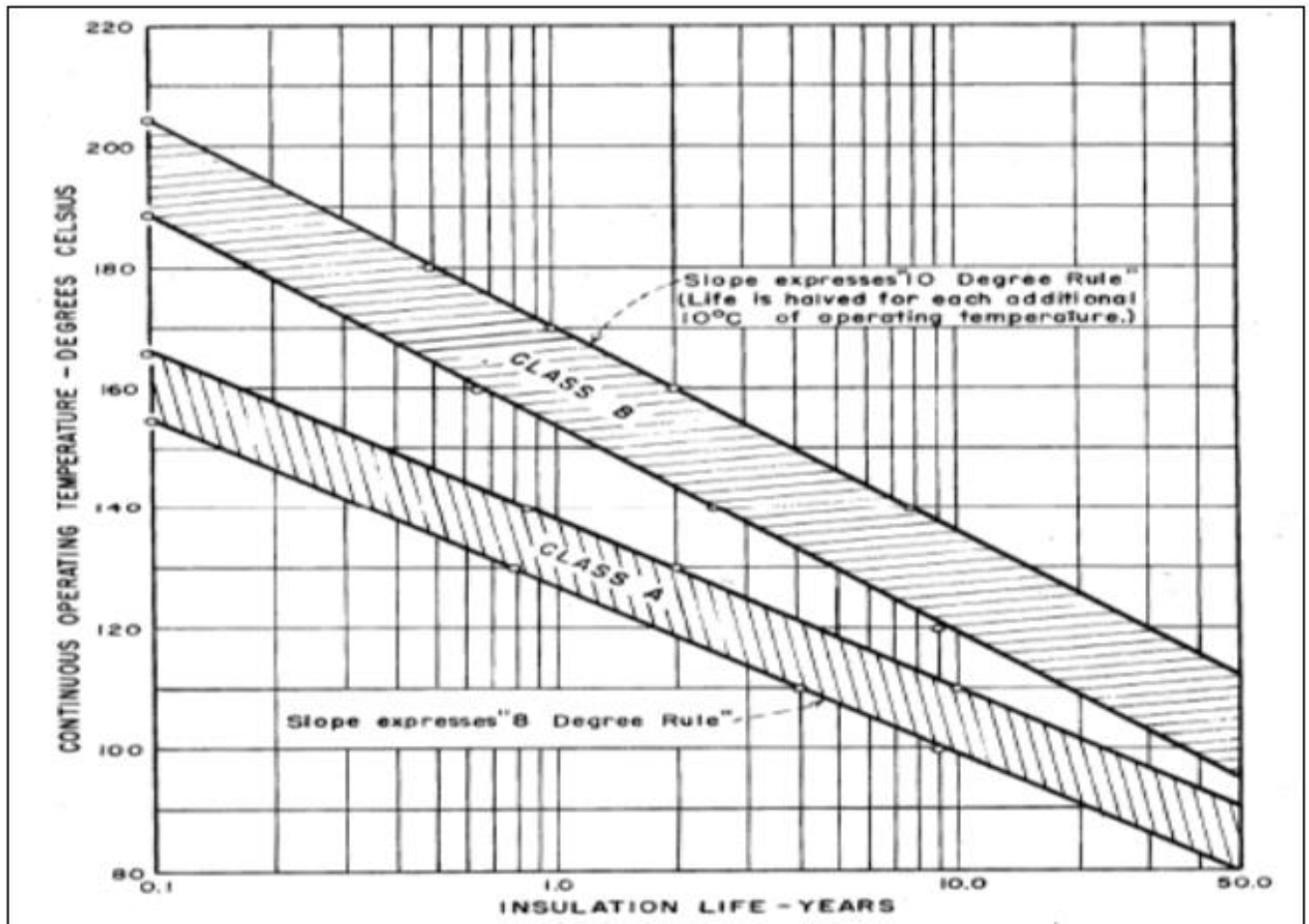


Figure 1.10 Température de fonctionnement dans un régime continu en fonction de la durée de vie de l'isolation

### 1.6.2. Contrainte électrique

Ces contraintes sont diverses. La figure (1.11) présente les différents phénomènes de dégradation que peut subir le système d'isolation d'une machine quand il est soumis à un champ électrique. On peut voir que la dégradation dépend de l'intensité du champ électrique appliqué et de la durée d'exposition à ce champ.

Cette figure montre qu'en fonction de l'intensité du champ électrique, plusieurs types de dégradations peuvent intervenir. Ce sont des phénomènes plus ou moins lents en fonction de leur nature. Ils peuvent avoir plusieurs origines et conduire à la rupture irréversible du matériau. On peut distinguer trois types de ruptures du diélectrique sous l'effet d'un champ électrique élevé : [22]

O Rupture électromécanique : sous l'effet d'un champ électrique élevé, une pression électrostatique est exercée par les conducteurs sur les isolants. Cela conduit à une diminution

de l'épaisseur de l'isolant ou à la création de fissures sur ce dernier. Ce phénomène peut alors conduire à une rupture irréversible du matériau. O Rupture par effet thermique : cette rupture intervient lorsque la conductivité électrique du matériau augmente, du fait d'une densité de courant importante. Cela engendre des pertes supplémentaires et par conséquent un échauffement par effet Joule du matériau. Un emballement thermique peut alors engendrer une rupture du diélectrique.

O Rupture par décharges électriques : un champ électrique suffisamment élevé provoque un phénomène d'avalanche électronique conduisant à la rupture diélectrique du matériau.

On peut voir sur la figure I.11 que ces phénomènes de rupture irréversible de l'isolation sont souvent précédés par un vieillissement électrique du matériau qui conduit à son tour à une dégradation de ce dernier.

La dégradation du matériau peut être causée par un phénomène d'arborescence électrique, d'arborescence humide et surtout par un phénomène de décharges partielles (DP). Ce processus de rupture par décharges électriques sera discuté plus en détail dans le chapitre III de ce manuscrit.

Il est cependant important de noter que ces phénomènes n'interviennent pas dans le cas d'un dispositif, en l'occurrence un bobinage dans notre cas, parfaitement sain, c'est-à-dire sans défauts dans l'isolation. En effet, et d'après les mécanismes décrits dans la figure (1.11), la dégradation de l'isolant apparaît comme une conséquence de son vieillissement.

Le vieillissement des matériaux peut être causé soit par une augmentation progressive de la conductivité électrique, soit par l'apparition et/ou la croissance de vacuoles d'air dans le volume ou en surface de l'isolant.

Hormis les défauts qui peuvent survenir pendant d'isolation des conducteurs du bobinage ou lors de l'imprégnation il existe des mécanismes intrinsèques au matériau diélectrique contribuant à la création et la croissance des vacuoles dans l'isolation. Ces mécanismes sont majoritairement liés à la création de charges d'espace sous l'effet d'un champ électrique important. Nous n'allons pas détailler ici ces mécanismes, mais le lecteur peut consulter les références [22], [23] pour en savoir davantage.

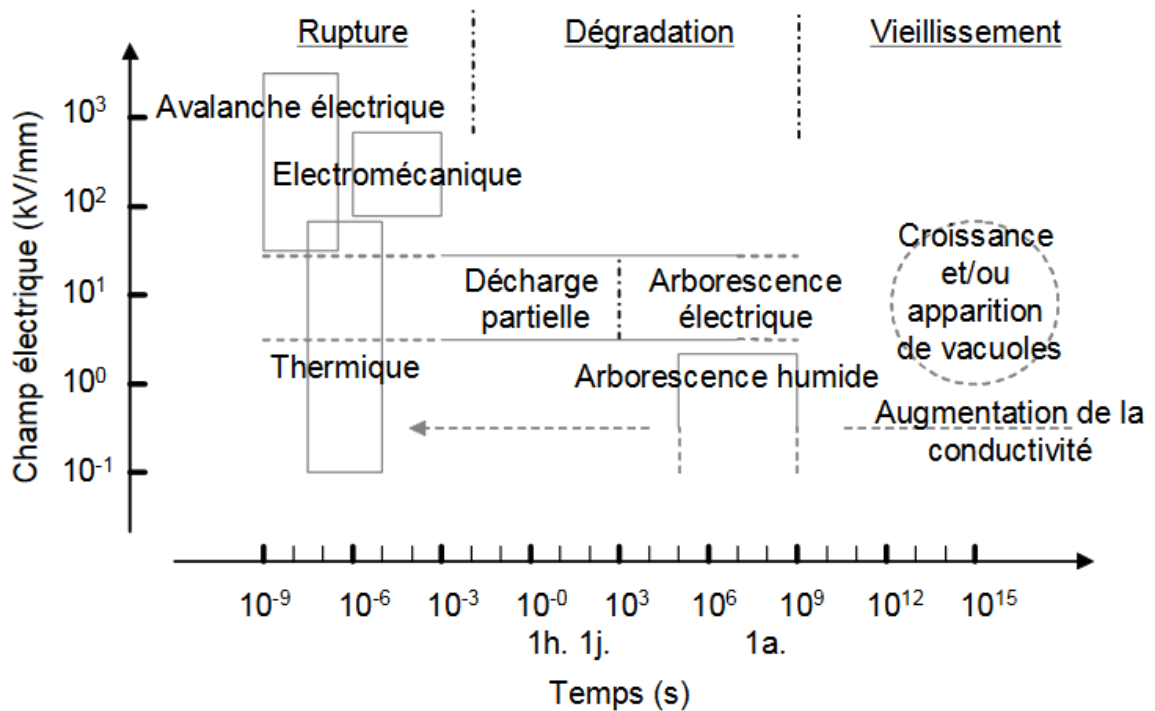


Figure 1.11 Schématisation des différents phénomènes intervenant dans la dégradation des isolants en fonction du champ électrique appliqué et du temps d'exposition au champ électrique

### 1.6.2.1. Effet combiné des contraintes thermique et électrique

Cette partie du travail est consacrée à l'étude expérimentale réalisée au laboratoire de physique de la firme Electro-Industries d'Azazga. Les essais ont été réalisés dans le but d'étudier l'effet combiné d'une contrainte thermique et d'une contrainte électrique sur le papier utilisé dans les transformateurs de puissance. L'étude a été menée sous différentes températures plusieurs niveaux de tension continue appliquée à des échantillons de papier imprégné ayant une épaisseur de 0.5 mm.

Un échantillon de papier est placé entre un système d'électrodes pointe/plan, le tout étant imprégné dans de l'huile minérale pour transformateur. Le système est ensuite soumis à différentes températures. Dès que la température désirée est atteinte, un essai sous tension est réalisé et la caractéristique courant-tension est relevée. [29]

**1.6.3. Contraintes mécaniques**

Les contraintes mécaniques subies par le stator sont principalement dues aux mouvements des bobines. Le passage du courant dans les conducteurs du bobinage du stator crée une force électromagnétique qui est proportionnelle au carré du courant. Cette force, qui atteint sa valeur maximale lors de la phase de démarrage de la machine, provoque la vibration du bobinage dans les directions radiale et tangentielle [24]. Ainsi, les vibrations provoquées par ces forces électromagnétiques peuvent détériorer les isolants des conducteurs. L'isolation de fond d'encoche peut également être touchée (en la fissurant par exemple). Les variations de pressions magnétiques engendrées par le rotor en mouvement peuvent également constituer une source de vibrations importantes dans la machine. Dans le cas d'une alimentation par onduleur commandé en MLI, certains harmoniques du signal de commande peuvent coïncider avec les fréquences de résonance de la machine et provoquer sa vibration. D'autres sources de vibrations peuvent provenir de l'extérieur du système lorsqu'il s'agit d'une machine embarquée. Dans le cas de la traction automobile, des vibrations peuvent être transmises par la route par exemple [25]. Afin de minimiser ces] et à MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion).

**1.6.4. Contraintes climatiques**

L'environnement physicochimique de la machine joue un rôle important. La présence des pollutions de toutes natures, combinées à la présence de l'oxygène de l'air, est bien souvent à l'origine de réactions chimiques qui attaquent l'isolant [26]. Aussi, certaines machines peuvent fonctionner dans un environnement atmosphérique pollué par de l'humidité, de l'huile ou des poussières. L'humidité contenue dans l'atmosphère peut agir comme un plastifiant pour la délamination du renfort dans les matériaux composites. En effet, la permittivité relative élevée de l'eau et sa conductivité électrique non nulle, modifie la carte du champ électrique dans l'environnement du système d'isolation qui a une tendance à accroître les contraintes diélectriques sur les couches isolantes. Dans un autre cadre, comme l'industrie alimentaire par exemple, l'association de poussière, d'humidité et d'une température propice peuvent également favoriser l'apparition des moisissures qui produisent d'autres éléments chimiques, notamment des acides, capables d'attaquer les isolants. Même en absence d'humidité, la simple présence des poussières dégrade l'efficacité du refroidissement de la machine en bloquant les canalisations de ventilation ce qui provoque des surchauffes dans l'isolation [27]. Associée aux vibrations inévitables du bobinage soumis à

des forces, entre autres, d'origine électrodynamiques, la poussière provoque une action abrasive qui entraîne une usure mécanique accélérée des couches isolantes.

### **1.6.5. Contraintes environnementales**

L'environnement dans lequel évolue la machine a un impact majeur sur sa durée de vie. Plusieurs facteurs environnementaux peuvent détériorer le système d'isolation de la machine, tels qu'une humidité trop élevée, la présence de produits chimiques agressifs ou la présence d'huile. Dans le cas de l'automobile, l'environnement dans lequel est exploitée la machine électrique est relativement ouvert. De la poussière et de l'humidité peuvent alors s'accumuler sur la surface des isolants. Il arrive parfois que cette poussière soit conductrice, par conséquent la résistance de surface de ces derniers peut être diminuée, ce qui peut avoir un impact sur la durée de vie de la machine. [28]

### **1.7. Méthodes de surveillance de l'état d'un isolant**

Cette partie est consacrée à la présentation des différentes méthodes pour tester un bobinage.

#### **1.7.1 Résistances de l'isolation et indice de polarisation (PI)**

Cette méthode est largement utilisée pour le diagnostic du bobinage. Elle est applicable à la majorité des machines électriques à l'exception de la machine asynchrone à cage. Ce test localise avec succès les problèmes de pollution et de contamination dans les enroulements. Dans les systèmes d'isolation plus anciens, le test peut également détecter une détérioration thermique.

Le test IR mesure la résistance de l'isolation électrique entre les conducteurs en cuivre et le noyau du stator ou du rotor. Idéalement, cette résistance devrait être infinie puisque, le but de l'isolation est de bloquer la circulation du courant entre le cuivre et le noyau. Dans la pratique, IR n'est pas infiniment élevé. En général, plus la résistance d'isolement est faible, plus il est probable qu'il y ait un problème avec l'isolation.

Le test PI est une variante du test IR. PI est le rapport de l'IR mesuré après application de la tension pendant 10 minutes (R10) à IR mesuré après seulement une minute (R1).

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (1.3)$$

Dans le test, une tension continue relativement élevée est appliquée entre le cuivre de l'enroulement et le stator ou le noyau du rotor (généralement via le châssis de la machine). Le courant circulant dans le circuit est alors mesuré. [30]

La résistance d'isolement à l'instant  $t$  est alors :

$$R_t = \frac{V}{I_t} \quad (1.4)$$

Avec  $V$  : la tension appliquée

$I_t$  : Le courant mesuré après un temps  $t$

### **1.7.2 Test Hipot CC**

Le test hipot DC est un test de surtension qui s'applique aux enroulements de stator et de rotor de tous types.

Hipot est l'abréviation de High potentiel.

Dans ce test, une tension continue, sensiblement plus élevée que celle qui se produit en fonctionnement normal, est appliquée à l'enroulement, l'idée de base est que si l'enroulement ne tombe pas en panne à cause de la haute tension, l'enroulement n'est pas susceptible de tomber en panne prochainement en raison du vieillissement de l'isolation lorsqu'il est remis en service. Si un enroulement échoue au test Hipot CC, des réparations ou un rembobinage sont obligatoires, car l'isolation de terre a été perforée. Les enroulements de stator sont beaucoup plus susceptibles d'être soumis à un test Hipot que les rotors.

#### **Objectif et théorie**

Le but de ce test est de déterminer si l'isolation de la paroi de terre présente des défauts majeurs avant la mise en service d'un enroulement (test hipot de mise en service ou d'acceptation) ou pendant le service (test hipot de maintenance).

Le principe est le suivant : s'il existe un défaut majeur dans l'isolation, une tension suffisamment élevée appliquée à l'enroulement provoquera une rupture de l'isolation au niveau de ce défaut.

Selon les normes de la référence [24] , tous les nouveaux enroulements (originaux ou rembobinés) doivent subir un test de Hipot avant d'être accepté par le client.

Bien sûr, le principal problème avec le test Hipot (à la fois en courant continu et en courant alternatif) est que l'enroulement peut tomber en panne, Si une défaillance se produit, l'isolant qui a été perforé doit être remplacé, la bobine endommagée doit être retirée.

Toutes ces solutions sont coûteuses et entraînent un retard dans la mise en service de la machine, étant donné qu'un test de Hipot peut être destructif. [30]

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre, le système d'isolation d'une machine électrique a été mis en évidence. Au début l'isolation d'un système électrique a été décrite ainsi que les différents matériaux utilisés dans ces isolants. Après nous avons exposé les différentes isolations existantes dans particulièrement le stator d'une machine électrique. Nous avons abordé aussi le vieillissement des isolants et les contraintes qui influent sur la qualité d'un isolant. Ces contraintes d'origine thermique, électrique et mécanique.

Enfin nous avons présenté brièvement deux méthodes pour tester un l'isolation d'un bobinage soit avant de le mettre en service, soit lorsque il est marche.

Il est important d'avoir des informations sur l'état de l'isolation et prédire la durée de vie restante d'un isolant soumis à des contraintes.

Le deuxième chapitre est consacré à présentation des différents modèles existant pour la prédiction de la durée de vie restante.



## *Chapitre II*

*Modèles multi-contraintes pour la  
prédiction de la durée de vie de  
l'isolation du bobinage d'une  
machine électrique*

## INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré au modèle de prédiction de la durée de vie de l'isolation des machines électriques.

Nous avons étudié un modèle multi-stress qui estime la durée de vie de l'isolant de l'enroulement par rapport à son cycle de service est aussi un deuxième modèle qui estime la durée de vie de l'isolation d'un alternateur soumis à des contraintes d'origine électrique, thermique et mécanique.

Avec une mise en œuvre adéquate de ces modèles, alors une machine électrique peut être conçue non seulement en termes d'exigences de performance, mais aussi compte tenu des aspects de fiabilité et de durée de vie associés.

La détermination des paramètres du modèle est basée sur les résultats de vieillissement accéléré réalisé dans certains travaux publiés.

### **2.1 Modèles d'estimation de la durée de vie d'un isolant dans un bobinage**

#### **2.1.1 Le modèle de vieillissement avec une contrainte**

Dans cette section, on présente un modèle de vieillissement qui estime la durée de vie de l'isolation de l'enroulement en fonction des contraintes appliquées.

Les contraintes thermiques et thermomécaniques sont considérées comme les principaux facteurs de vieillissement. Par conséquent, le modèle est particulièrement adapté à l'estimation de la durée de vie des enroulements subissant un cyclée thermique important, comme dans les machines de haute performance à court terme.

En effet, dans ces applications la température de l'enroulement varie généralement entre la température ambiante et une température maximale atteinte à la fin de la période de charge, sans atteindre une valeur stable, Puisque les facteurs de vieillissement considérés ne dépendent que de la température, la seule entrée requise par le modèle est le profil de température de l'enroulement  $T(t)$  en fonction du temps  $t$ .

La durée de vie du matériau isolant dans le cadre du vieillissement thermique à température constante  $T$  peut être modélisée par l'équation (2.1), où  $L_T$  est la durée de vie de l'isolant sous contrainte thermique à la température  $T$ ,  $L_0$  représente la durée de vie à une température de référence  $T_0$  et  $B$  est un paramètre lié à l'énergie d'activation du processus de dégradation.

$$L_T(T) = L_0 e^{\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}} \quad (2.1)$$

Ce modèle a été introduit pour la première fois dans la référence [1] et il relie le vieillissement thermique au taux d'une réaction chimique dépendant de la température, par l'utilisation de l'équation d'Arrhenius.

Le vieillissement thermomécanique est principalement dû à la contrainte de cisaillement mécanique entre la surface du conducteur et l'isolation, Cette contrainte est liée à la distribution non homogène de la température dans le fil lors des cycles thermiques de température qui entraîne des taux de dilatation différents du conducteur et de l'isolant.

La dilatation thermique relative entre les deux matériaux est proportionnelle à la fois à la différence entre leurs coefficients de dilatation et à la différence entre leur température. [33]

Lorsque la température augmente, la température dans le conducteur devient moins uniforme.

La contrainte thermomécanique peut être considérée comme une fonction de la variation de la température par rapport au temps  $v$ .

A cause de la nature mécanique de ce processus de vieillissement, la durée de vie de l'isolation sous une contrainte thermomécanique constante peut être modélisée à l'aide d'un modèle de loi de puissance inverse, équation (2.2), où :  $L_M$  est la durée de vie de l'isolant sous une variation constante de température, tandis que  $k$  et  $N$  sont des paramètres déterminés à partir d'essais de vieillissement accéléré.

$$L_M(v) = (1 + k|v|)^{-N} \quad (2.2)$$

Comme il est montré dans plusieurs travaux, le vieillissement dû à des contraintes constantes appliquées simultanément peut être modélisé avec précision par le produit de taux de vieillissement due aux à une contraintes et en ajoutant la correction appropriée. [34]

Par conséquent, la durée de vie  $L$  d'un enroulement soumis à la fois à des contraintes thermiques et thermomécaniques constantes est donnée par l'équation (2.3), où  $G$  est le terme de correction proposé dans [34].

$$L(T, v) = L_T(T)L_M(v)G(T, v) \quad (2.3)$$

$$G(T, v) = (1 + K|v|)^N \left( \frac{B}{T} - \frac{B}{T_0} \right) \quad (2.4)$$

Cependant, pour un cycle d'utilisation donné, il n'est pas possible d'avoir un profil de température de l'enroulement dont la température et sa variation sont toutes les deux constantes, sauf lorsque la variation de température est nulle.

Par conséquent, afin de proposer un modèle qui relie la durée de vie du bobinage à son cycle thermique, il est nécessaire de trouver une forme locale du modèle qui estime la durée de vie au temps  $t$ , étant donné que  $T(t)$  la température et  $v(t)$  sa dérivée temporelle.

Pour ce faire, une fonction  $f(t)$  est définie, qui représente la durée de vie restante de l'isolation au moment  $t$  si sa température est maintenue constante à  $T_0$ . Cette fonction est  $f(t_0)=L_0$  au l'instant initial  $t_0$  où il n'y a pas eu de vieillissement et  $f(t_f)=0$  au moment de la défaillance( $t_f$ ), où toute la durée de vie de l'isolation a été consommée. La fonction  $f(t)$  va diminuer donc en fonction du temps conformément à l'équation (2.5).

$$\frac{df}{dt}(t) = - \frac{L_0}{(T(t)L_M(v(t)))} \quad (2.5)$$

En intégrant l'équation (5), une relation entre la durée de vie de l'enroulement  $t$  et son profil de température est finalement obtenue cette relation est décrite par l'équation (2.6).

$$\int_{t_0}^{t_f} \frac{1}{L(T(t),v(t))} dt = 1 \quad (2.6)$$

## 2.2 Modèle de dégradation de l'isolation de l'enroulement du stator dans les grands alternateurs

### 2.2.1 Modèle général de dégradation de l'isolation

Différentes méthodes et modèles proposés pour étudier le vieillissement de l'isolation électrique provoqué par les contraintes électriques et thermiques.

Parmi ces modèles le plus connu est celui de Simoni [35], qui dépend des contraintes thermiques et électrique.

Les hypothèses suivantes sont faites dans ce modèle :

- La force électrique est la propriété de base pour l'évaluation du vieillissement.
- le processus de vieillissement est traité comme une quantité cumulative.
- le modèle d'Arrhenius proposé précédemment reste valide.

L'équation générale du modèle de la force électrique de Simoni est la suivante :

$$\left(\frac{ES}{ES0}\right)^{N+1} = 1 - \left(\frac{t}{L0}\right) * \left(\frac{E}{E0}\right) \exp(B * TS) \quad (2.7)$$

$$N = n - b * TS \quad (2.8)$$

$$TS = \frac{1}{T0} - \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

Tableau 2.1 Variables et constantes pour le modèle de force électrique de Simoni

$E_{S0}$	Force électrique
$E_S$	Résistance électrique des spécimens non sollicités
$N$	Exposant de la loi de puissance inverse
$B$	Constante représentant la synergie entre $E$ , $b$ et $T$
$T_S$	contrainte thermique
$T_0$	Température ambiante (en Kelvin)
$T$	Température réelle (en Kelvin)
$E$	Tension appliquée
$B$	Constante pour le modèle d'Arrhenius : $B=AW/k$
$E_0$	Tension électrique en dessous de laquelle le vieillissement électrique cesse
$L_0$	Durée de vie à $E < E_0$ et à température ambiante

La plupart des modèles de vieillissement des isolants prenant en compte les contraintes thermiques sont basés sur la théorie du taux chimique de Dakin. Ce dernier a développé un modèle d'estimation de la durée de vie de l'isolation basé sur l'équation de vitesse de réaction chimique d'Arrhenius. Le modèle de Simoni adopte la constante  $B$  de ce modèle, qui représente l'énergie d'activation de la réaction.

Les autres paramètres sont dépendent du matériau d'isolation et des conditions de fonctionnement.

### 2.2.2 Application du modèle général de dégradation de l'isolation de l'enroulement du stator d'un alternateur

Le problème de l'application d'un modèle de dégradation à un matériau spécifique est le manque d'information sur les paramètres et le comportement des variables dans ce matériau.

De nombreux modèles sont proposés et vérifiés expérimentalement pour différents matériaux d'isolation.

Le modèle de Simoni présente les mêmes difficultés, les paramètres  $n$ ,  $b$ ,  $B$ ,  $T_0$ ,  $E_0$  et  $L_0$  sont fortement dépendent du matériau d'isolation et des conditions de fonctionnement auxquelles ce matériau est soumis. Il peut être possible d'approximer ou de calculer tous ces paramètres si les données sur la surveillance des générateurs synchrones (historique et conditions de fonctionnement) sont disponibles.

Les paramètres utilisés dans ce travail ont été obtenus de la littérature, nous avons utilisé les données publiés dans les références. [36-37]

### 2.2.3 Définition du seuil de défaillance (Failure threshold)

Pour évaluer le niveau de détérioration d'un équipement ou d'un matériel il est impératif de définir une valeur de seuil de défaillance (failure threshold), sans ce seuil, on ne peut pas déclarer une défaillance. Dans les références [35][38], une réduction de 50 % de la résistance électrique initiale ( $ES$ ) du matériau d'isolation est considérée comme une défaillance de l'isolation.

Les figures (1.1), présente les courbes du modèle de Simoni montrant la valeur du seuil de défaillance (ligne pointillée) de  $0,5E_{S_0}$  pour des tracés à température constante et à tension constante.

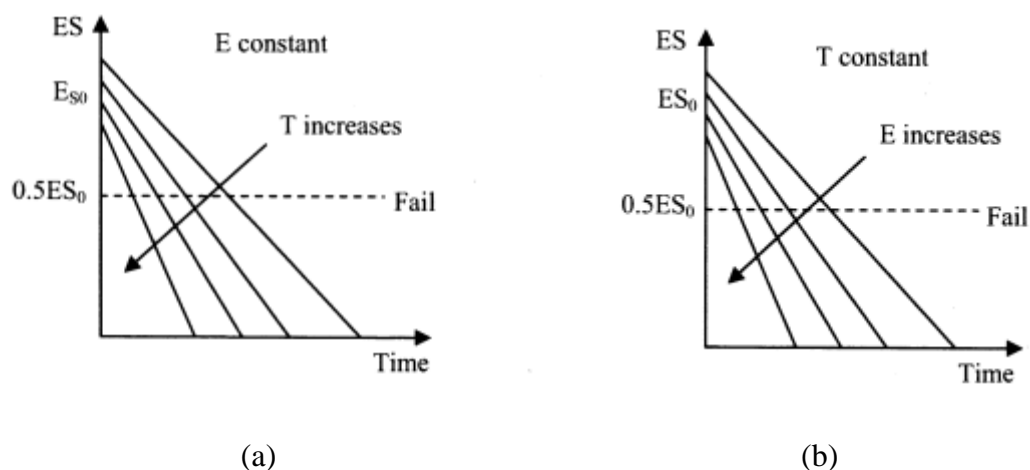


Figure (2.1) Tracés du modèle de dégradation de Simoni pour tension constante (a) et température constante (b)

## 2.2.4 Application pour le calcul de la durée de vie de l'isolation d'un enroulement statorique

### 2.2.4.1 Modèle de dégradation

Pour notre exemple, un générateur synchrone, 13.8 kV, 100 MVA, 4184 A et possède une résistance d'induit ( $R_a$ ) de 0.0035 pu.

L'isolation de l'enroulement de l'induit est faite de Mica lié à l'Epoxy. Cette isolation est sujette à une augmentation de tension de 10% (13.8 à 15.2 kV) et une augmentation de courant de 125 % de sa valeur nominale (4184 à 9413 A).

Dans ce travail, nous considérons seulement une augmentation du courant plutôt que de la tension puisque dans la plupart du temps, les générateurs fonctionnent avec une tension constante.

Le courant de sortie par contre peut augmenter suite à une augmentation soudaine et significative de la charge.

Le cas dans lequel la température est maintenue constante et la tension varie (Figure 2.1) (b)) ne sera pas considérée car cette situation ne correspond pas à notre application.

Le modèle de dégradation de l'isolation de Simoni est strictement lié à la tension appliquée et à la température à laquelle le matériau est soumis.

Il est nécessaire de relier l'augmentation de la température à l'augmentation du courant.

Cette relation est développée en identifiant que la chaleur ( $\Delta Q$ ) est le changement d'énergie avec le temps ( $\frac{dE}{dt}$ ) qui est en même temps la puissance consommée par une résistance dans l'équation (2.10). [10]

$$\Delta Q = \frac{dE}{dt} = p = |I|^2 R_a \quad (2.10)$$

Ensuite, la variation de la chaleur en fonction du temps ( $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ ) est définie comme le débit de chaleur est donné comme suit :

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|^2 R_a \quad (2.11)$$



Le flux de chaleur ( $H$ ) se déplace à travers une zone de section ( $A$ ) d'un câble conducteur, d'une température élevée à une température basse ( $\Delta T$ ) et sur une petite distance ( $\Delta x$ ) est définie comme suit [8] :

$$H = KA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.12)$$

$K$  est la constante de conductivité thermique, qui dépend du matériau. Pour le cuivre,

$$K = 93 \text{ cal/m}^\circ \text{ Cs.}$$

En combinant l'équation (2.11) et (2.12), on obtient une expression pour la de température ( $\Delta T$ ) en fonction du courant de sortie du générateur ( $\Delta I$ ) exprimée comme suit :

$$\Delta T = \frac{|\Delta I|^2 Ra \Delta x}{KA} \quad (2.13)$$

Nous approximos l'enroulement du stator avec un cylindre creux où le courant circule à travers sa surface. La température est plus élevée à l'intérieur du cylindre figure (2.2).

( $\Delta x$ ) Est considéré comme le diamètre de l'enroulement en cuivre, la température  $T_1$  sera la température rencontrée au niveau de l'enroulement.  $T_2$  et la température à l'extérieure.

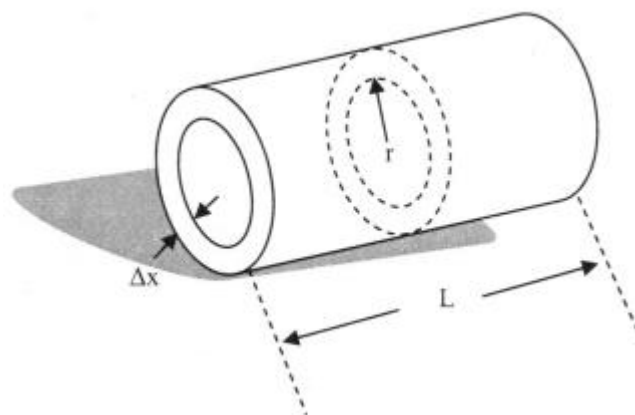


Figure 2.2 Diagramme montrant le concept de flux de chaleur à travers un cylindre

Soit ( $\Delta I$ ) dans l'équation (7) le pourcentage d'augmentation du courant par rapport à sa valeur nominale, Pour des augmentations de courant de 0%, 50%, 75%, 100% et 125%, la température augmente de 41°C à 125%.

Dans l'équation (7) les valeurs suivantes ont été utilisées :  $\Delta x = 0.1524$  m ,

$L=4.57$  m,  $r=0.762$  m.

L'évolution de la température du bobinage pour les différentes valeurs de courant est montrée sur la figure (2.3).

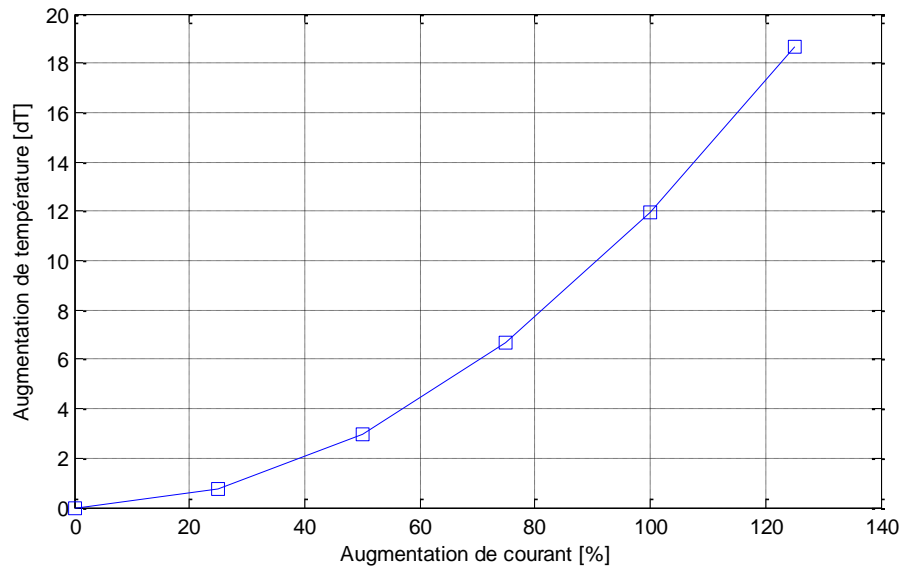


Figure 2.3 Augmentation de la température en fonction du courant de charge

Dans [40], Simoni détermine les paramètres de son modèle de dégradation de l'isolation en utilisant les résultats de l'expérience réalisée par Ramu dans. [41]

Ramu conduit des expériences de vieillissement avec des spécimens d'enroulement de stator de 11 kV avec une isolation de classe H testés à des tensions de 20kV et des tensions supérieures, nous avons choisi une machine synchrone d'une tension similaire (13.8kV) à celle des échantillons et une capacité de 100 MVA.

Le tableau (2.2), montre les paramètres du modèle de dégradation de l'isolation obtenus par Simoni.

Tableau 2.2 Paramètres du modèle de dégradation de l'isolation

paramètres	valeurs	Dimensions
b	5898	Kelvin
B	16747	Kelvin
N	8.1	Adimensionnel
T <sub>0</sub>	428	Kelvin
E <sub>0</sub>	4.9	KV
L <sub>0</sub>	3.58 × 10 <sup>8</sup>	Heures

L<sub>0</sub>: La durée de vie de l'isolation en l'absence de contrainte appliquée est très importante.

Le paramètre T<sub>0</sub> défini comme la température ambiante, il a été fixé à 155 °C (428K), car c'est la température la plus basse pour laquelle Ramu avait effectué les tests accélérés sur les spécimens. Puisque nous devons mesurer la dégradation de l'isolation aux températures réelles qui se produisent dans un générateur et non à des contraintes accélérées, nous avons fixé la température nominale de l'enroulement de l'induit, T<sub>0</sub>, à 100°C.

Cette valeur a été obtenue à partir de la référence [42] où la température moyenne de l'enroulement du stator a été trouvée pour être environ 100°C.

Nous devons maintenant déterminer la température maximale à laquelle notre générateur fonctionnera.

Cette température maximale définira une plage de température crédible pour notre étude de la dégradation de l'isolation dans les enroulements du stator. [43]

### 2.2.5 Dégradation de l'isolation des enroulements du stator

Ces augmentations de température sont basées sur une température de refroidissement maximale de 40°C pour les machines refroidies à l'air.

Par exemple, L'élévation de température maximale autorisée au-dessus de la température de refroidissement est de 110 °C pour les enroulements d'induit ayant une puissance nominale de 10000 KVA ou plus, et une isolation de classe H.

Ainsi, la limite de température maximale adoptée pour les enroulements d'induit dans notre exemple est la somme de 40°C, liée à la température maximale de refroidissement. L'élévation maximale au-dessus de cette température de refroidissement, spécifiée précédemment comme étant de 110 °C, ce qui donne une valeur totale de 150 °C.

L'augmentation maximale de la température de 41 °C trouvée précédemment pour des augmentations de courant de 0% à 125% est dans la plage de température réelle de fonctionnement de notre machine, ce qui entraîne un changement de température de 100 °C à 141 °C.

En utilisant les paramètres trouvés précédemment, le modèle de Simoni est appliqué sur la machine que nous avons choisie.

Les résultats de l'implémentation du modèle dans Matlab sont montrés sur les figures ci-dessous.

La figure (2.4), montre la variation de la durée de vie de l'isolation en fonction de la température pour deux valeurs de la tension appliquée (13.8 kV et 15.2 kV).

On remarque bien que la durée de vie diminue considérablement lorsque le courant de charge augmente de 125 % de sa valeur nominale. Cette augmentation du courant de charge est accompagnée d'une augmentation de la température de 41°C.

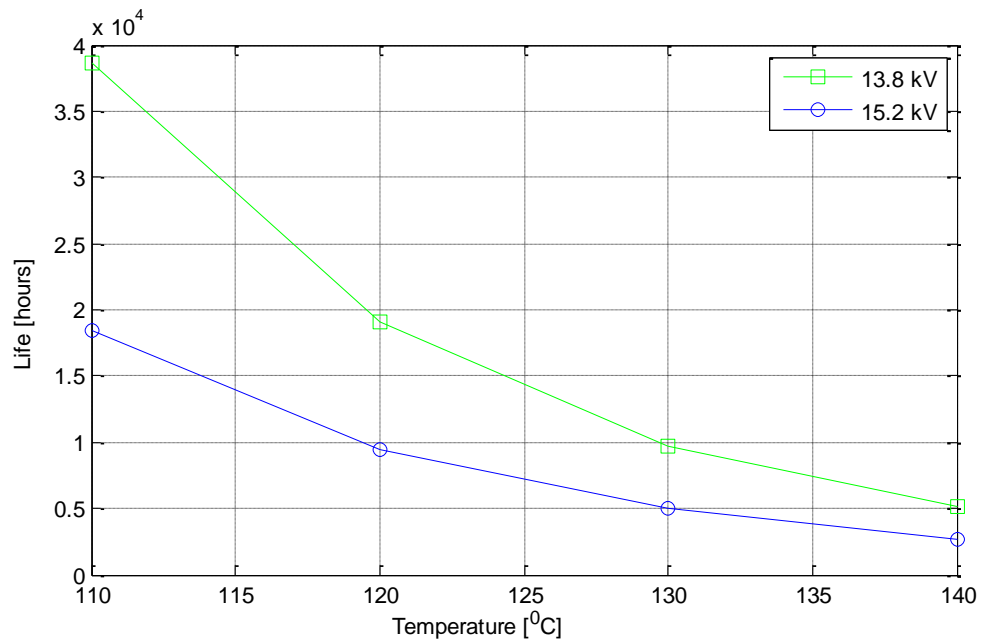


Figure (2.4) variation de la durée de vie en fonction de température de fonctionnement

Dans les figures (2.3) et (2.4), nous avons tracé la variation de la force électrique appliquée sur l'isolation en fonction de la durée de vie pour plusieurs températures de fonctionnement et pour deux niveaux de tension appliquées.

Les résultats obtenus sur ces deux figures confirment l'effet de la température sur la durée de vie de matériau d'isolation. Nous remarquons aussi qu'une augmentation de tension de 13.8 kV à 15.2 kV conduit à une réduction de la durée de vie de plus de la moitié.

Pour l'effet de la force électrique, nous remarquons que l'application d'une force au-dessous de la valeur de seuil ( $0.5 E_0$ , threshold value) n'a pas d'influence sur la durée de vie de l'isolation. Par contre lorsque cette force dépasse ce seuil, la durée de vie l'isolation diminue au fur et à mesure que cette valeur de la force appliquée se rapproche d' $E_0$ .

Les modèles utilisés sont tous issues de la théorie d'Ahreniuos

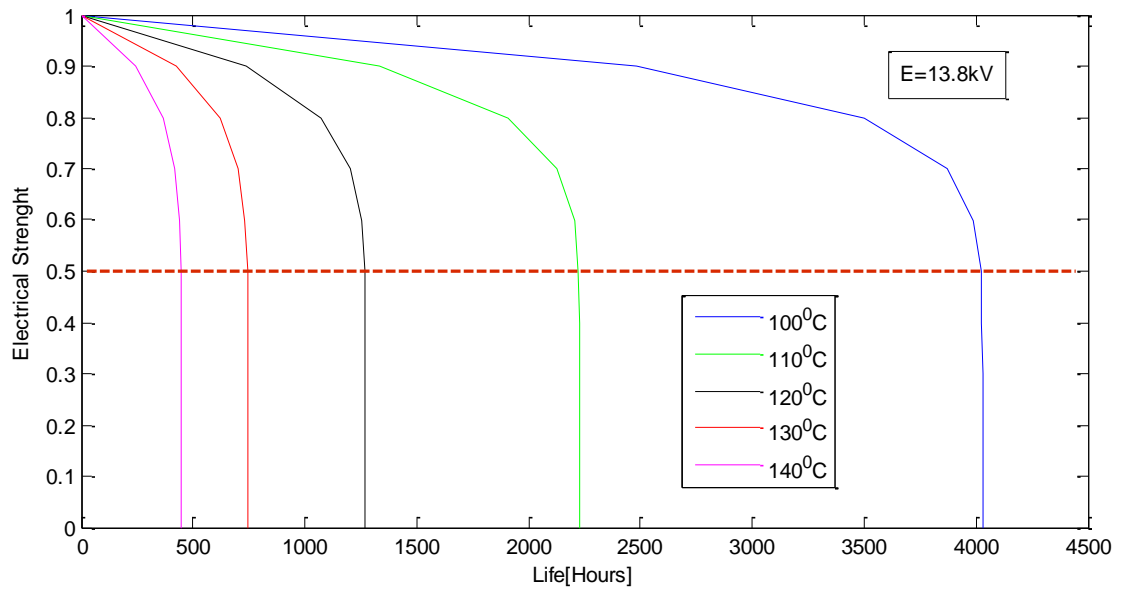


Figure (2.5) La durée de vie en fonction des contraintes appliquées pour  $E=13.8\text{ kV}$

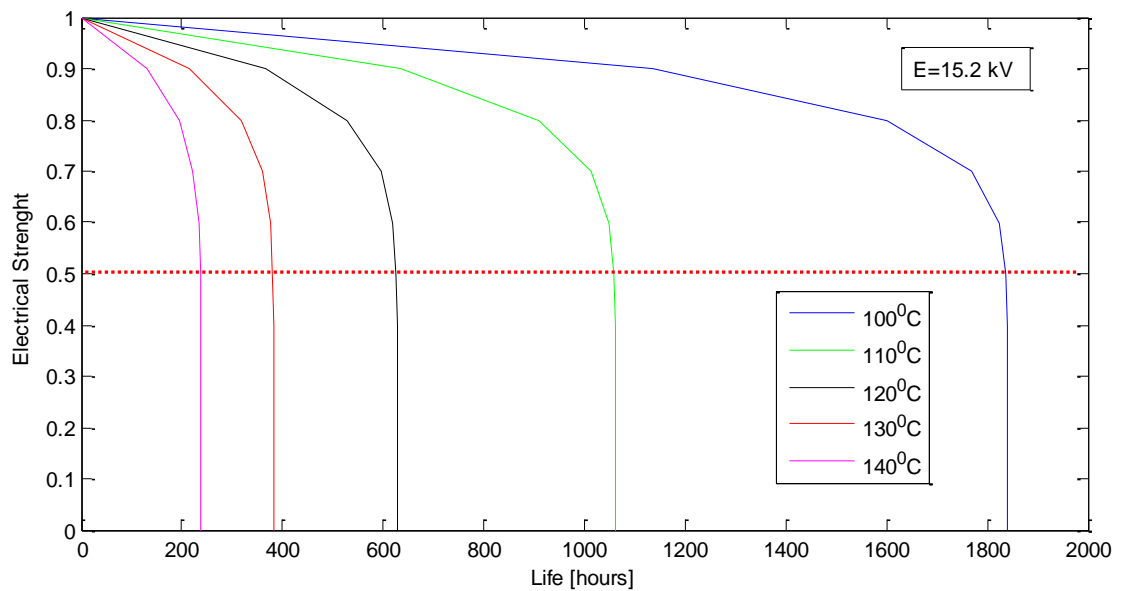


Figure (2.6) La durée de vie en fonction des contraintes appliquées pour  $E=15.2\text{ kV}$

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous présentés les modèles de calcul de la durée de vie de l'isolation d'une machine électrique. Ces modèles tiennent en compte l'effet des différentes contraintes rencontrées par le matériau d'isolation. Ces contraintes sont d'origine électrique, thermique ou mécanique.

La première partie de chapitre traite les modèles de dégradation de l'isolation à cause de la température.

La deuxième partie est la plus importante, dans cette partie nous avons présenté le modèle de Simoni pour étudier la dégradation de l'isolation d'un alternateur. Ce modèle qui tient en compte de l'effet de la tension appliquée, de la température ainsi de l'effet de la force électrique appliquée sur l'isolant a été implémenté dans Matlab. Les résultats de simulation permettent de mettre en évidence l'effet de ces paramètres sur la durée de vie d'un isolant.

## *Chapitre III*

*Effet des fluctuations de la tension  
sur le vieillissement de l'isolation  
d'une machine asynchrone*



## INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la l'étude de la durée de vie de l'isolation du bobinage d'une machine asynchrone. L'effet de la fluctuation de la tension d'alimentation sur la durée de vie du bobinage sera étudié. Le modèle électrique – thermique –calcul de la durée de vie est implémenté dans Matlab. Ce modèle permet d'estimer la durée de vie de l'isolation pour plusieurs couples de charge et en présence d'une fluctuation uniforme de la tension d'alimentation.

### 3.1 Estimation de la durée de vie du moteur à induction

La durée de vie d'une machine peut être considérée comme la période de temps écoulé entre la mise en service de la machine et le moment où elle ne peut plus servir.

Pendant cette période l'isolation de la machine peut être affectée par plusieurs contraintes. Ces contraintes sont de nature thermique, électrique, mécanique ou environnementale. Cependant, la contrainte thermique est considérée comme dominante par rapport aux autres contraintes, de plus, l'expérience et l'analyse ont montré que le processus de vieillissement de l'isolation est complètement dépendent de la valeur de la température de fonctionnement.

Par conséquent, en tant qu'indicateur, la température du point chaud peut être appliquée pour estimer l'état de l'isolation et prédire la durée de vie du moteur à induction.

Bien que le moteur à induction, la température de fonctionnement est affectée par de nombreux facteurs, la principale contribution provient de la perte de puissance électrique, y compris les pertes par effet Joule. Pendant ce temps, les pertes par effet Joule de cuivre représente le plus grand pourcentage de la perte de puissance totale.

La durée de vie générale d'un moteur à induction peut être estimée en utilisant un modèle électrique, un modèle thermique et enfin un modèle de durée de vie. La structure du modèle de prédiction de la durée de vie est représentée sur la figure (3.1) [44]

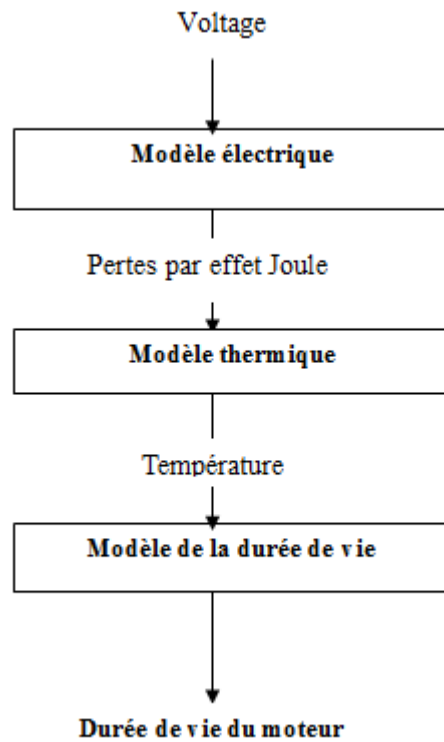


Figure (3 .1) modèle développé pour le calcul de la durée de vie de la machine

Le modèle électrique permet le calcul des valeurs efficaces du courant pour différentes valeurs de couple de charge et en présence d'une fluctuation de tension d'alimentation.

La modélisation de la machine asynchrone est donc nécessaire.

### 3.2 Modèle électrique

#### 3.2.1 Hypothèses simplificatrices

Le modèle électrique s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses :

- Entrefer constant.
- Le courant homopolaire ne peut circuler (pas de neutre utilisé).
- parfaite symétrie de construction.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constant.
- Pertes ferromagnétiques négligées.

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure (3.2) et dont les phases sont repérées respectivement par SA, SB, SC.

L'angle électrique  $\theta$  variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases SA et Ra choisis comme axes de référence [45].

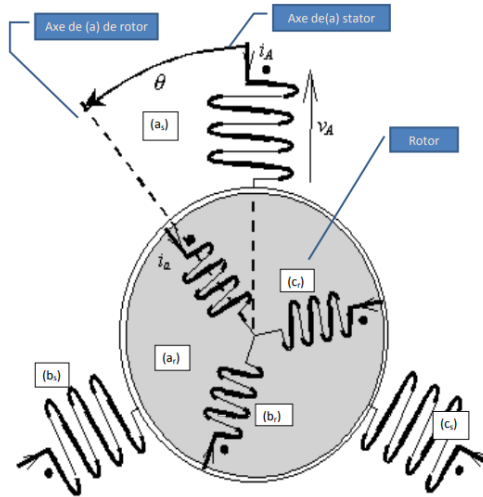


Figure (3.2) Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

### 3.2.2.1 Équations générales de la machine asynchrone triphasée

Dans ces conditions, si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et au rotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont [46]:

- a. Equations électriques :** Les équations de tension des trois phases statorique et des trois phases rotoriques sont:

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (3.2)$$

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$ : Flux totaux à travers ces enroulements.

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$ : Tensions rotoriques

$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$ : Courants rotoriques

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$ : Flux rotoriques.

$R_s$ : Résistance d'une phase statoriques.

$R_r$ : Résistance d'une phase rotorique.

La loi de faraday permet d'écrire :

$$[V_{abc}] = R[i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \quad (3.3)$$

**Pour le rotor :**

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

**Pour le stator :**

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

### b. Equations magnétiques

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matriciellement comme suit : [46]

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Tel que :  $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$

On désigne par:

$[L_r]$  : Matrice des inductances statoriques.

$[L_s]$  : Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$  : Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$  : Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = [M_0] \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$L_s$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$L_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$\theta$  : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

$M$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor

### c. Équations mécanique

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) :

$$C_e = P \left[ i_{s(abc)} \right]^T \frac{d}{dt} [M_{sr}] \left[ i_{r(abc)} \right] \quad (3.10)$$

Pour avoir un modèle complet de la machine il nécessite d'introduire l'équation du mouvement de la machine est exprimée comme suivant :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (3.11)$$

$J$  : Moment d'inertie des masses tournantes.

$C_r$  : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

$\Omega_r$  : Vitesse rotorique. : Couple électromagnétique.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

### 3.3 Prise en compte de la fluctuation de tension dans le modèle électrique

Dans la réalité la fluctuation de la tension est aléatoire. Il est difficile de prendre en considération une telle fluctuation dans un modèle.

Dans ce travail nous avons utilisé une tension à fluctuation sinusoïdale. Cette fluctuation peut être modélisée par l'équation suivante.

$$v(t) = V_p \sin(2\pi f_c t) [1 + m \sin(2\pi f_m t)] \quad (3.12)$$

$$m = \frac{\Delta V}{2V_p} \quad (3.13)$$

Où  $V_p$  est l'amplitude de la tension alternative.

$f_c$  est la fréquence fondamentale.  $f_m$  la fréquence de modulation de l'amplitude.

La variation de l'amplitude de la tension est représentée par  $\Delta V$ . La quantité de la modulation est représentée par  $m$ .

L'équation (3.12) peut être exprimée comme suit :

$$v(t) = V_p \sin(2\pi f_c t) + \frac{mV_p}{2} \sin(2\pi(f_c + f_m)t - \frac{\pi}{2}) + \frac{mV_p}{2} \sin(2\pi(f_c + f_m)t + \frac{\pi}{2}) \quad (3.14)$$

Selon (3.14), la source de tension fluctuante contient deux composantes fréquentielles; une fréquence super-synchrone, également connu sous le nom de bande latérale supérieure

(USB) et une fréquence sous-synchrone, également connue sous le nom de bande latérale inférieure (LSB). Cette fluctuation de tension influe aussi sur la valeur du courant statorique. Avec la modulation de la fréquence et l'augmentation de l'amplitude de la tension le courant au stator augmente de manière significative. De point de vue thermique cela provoque une augmentation des pertes par effet Joule et de la température du bobinage conduisant à une accélération du processus de vieillissement.

### 3.3.1 Modèle thermique

La conception actuelle des machines vise une taille compacte et une haute efficacité. Cette tendance à conduire à des matériaux de machine très sensible à la température en raison de la concurrence cruelle du marché résultant en moins de marge de conception pour réduire les dépenses.

Pour prédire et de calculer précisément la température à l'intérieur du moteur à induction, un modèle thermique complet doit être établi. Cependant, les modèles thermiques des machines de faible à moyenne puissance ne doivent pas être excessivement complexes en raison de la nature fondamentale de leur construction.

La défaillance thermique de ces machines est plus susceptible de se produire dans les enroulements du stator ou du rotor.

Les auteurs dans les références [48] et [49] établissent un modèle thermique qui dépend de la structure géométrique du moteur. Aussi le modèle thermique peut être développé en utilisant la méthode expérimentale.

La température du bobinage influe beaucoup sur la durée de vie de l'isolation. Cette température est proportionnelle aux pertes au stator.

### 3.3.2 Estimation du vieillissement de l'isolation dû à la température

Il a fallu de nombreuses années pour comprendre la relation entre le temps de fonctionnement de la machine, la température et l'état du matériau d'isolation.

Enfin, la fameuse équation d'Arrhenius (l'augmentation de température est proportionnelle à l'énergie d'activation) est proposée comme loi fondamentale pour déterminer les taux de vieillissement de l'isolation. Cette équation peut être exprimée comme suit :

$$L = Be^{\frac{E}{KT}} \quad (3.15)$$

Où :

L La durée de vie en unités de temps

B Une valeur constante.

E L'énergie d'activation de la réaction de vieillissement 1,05 pour l'isolation de classe F

K Constante de Boltzmann  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  joule/°Kelvin =  $0,8617 \cdot 10^{-4}$  eV/K

T La température absolue en K.

Si l'on prend le logarithme des deux membres de l'équation (3.15) :

$$\ln L = \ln B + \frac{E}{KT} \quad (3.16)$$

L'équation (3.16) montre le logarithme de la durée de vie de l'isolation diminution linéaire correspondant à la température absolue augmenter. Par conséquent, si la durée de vie à une certaine température est connue, la durée de vie à une autre température peut être estimée en convertissant en une base de temps équivalente sur la référence la durée de vie et la température, ce qui peut être expliqué comme [44] :

$$\ln t_1 - \ln t_2 = \left(\frac{E}{K}\right) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (3.17)$$

$t_1$  Temps de vieillissement à température absolue  $T_1$ (k).

$t_2$  Temps de vieillissement à température absolue  $T_2$ (k).

Par exemple, si la durée de vie d'un moteur à induction de classe d'isolation Fest de 20 ans ( $t_1 = 20$ ) fonctionnant à la température du point chaud de  $100^\circ\text{C}$  ( $T_1 = 100 + 273 = 373\text{K}$ ), la durée de vie du moteur à induction ( $t_2$ ) qui fonctionnant à  $150^\circ\text{C}$  ( $T_2 = 150 + 273 = 423\text{K}$ ) peut être calculé comme :

$$\ln \left(\frac{20}{t_2}\right) = \left(\frac{1,05}{0,8617 \times 10^{-4}}\right) \left(\frac{1}{373} - \frac{1}{423}\right) \quad (3.18)$$

$$t_2 = 0,421 \quad (\text{Y})$$



De plus, pour les applications de machines industrielles, l'expérience de vieillissement thermique à 10°C qui montre que la durée de vie de l'isolation est réduite à la moitié pour chaque augmentation de 10°C est largement appliquée, peut. La durée de vie dans ce cas est donnée par :

$$L_x = L_0 \cdot 2^{\left(\frac{T_b - T_x}{HIC}\right)} \quad (3.19)$$

$L_x$  La durée de vie estimée à température  $T_x$

$L_0$  La durée de vie de référence à charge nominale.

$T_b$  La température totale admissible qui dépend de la classe d'isolation.

$T_x$  La température du point chaud pour la classe d'isolation.

**Tableau 3.1 Classification d'isolation**

classe	Température maximale (°C)	Augmentation de la température (°C)
A	105	65
B	130	90
F	155	115
H	180	140
H'	220	180

HIC moitié de l'intervalle de (14, 11, 9.3, 8 et 10 pour la classe A, B, F, H et H', respectivement).

Le tableau (3.1) montre la limite de température et l'augmentation admissible de la température pour chaque classe d'isolation.

Et indique la limite thermique du type de classe d'isolation et l'élévation de température admissible à une température ambiante de 40°C.

Les matériaux et systèmes d'isolation peuvent être classés en fonction de la température rapportée à la limite de durée de vie de presque 20 000 heures, en fonction des caractéristiques température-durée de vie [47].

Ainsi, 20 000 heures est généralement considérées comme la durée de vie de l'isolation de la machine à température nominale ( $L_0 = 20\ 000h$ ). Par exemple, supposons un moteur avec un système d'isolation de classe F fonctionnant à 124°C. La durée de vie de la machine peut être calculée par la formule (3.20) :

$$L_x = 20,000.2^{\left(\frac{155-124}{9.3}\right)} = 201.587 \text{ h} \quad (3.20)$$

Comme mentionné précédemment, si la température incrémentale au point critique est considéré comme proportionnelle aux pertes par effet de Joule au stator. La durée de vie du moteur asynchrone peut être estimée approximée, comme suit :

$$L_x = L_0 2^{\left(\frac{T_b - R_{th} \cdot P_{LOSS}}{HIC}\right)} \quad (3.21)$$

$$P_{LOSS} = 3I_s^2 R_s \quad (3.22)$$

$R_{th}$  Résistance thermique équivalente ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ).

$P_{LOSS}$  Perte par effet Joule aux enroulements du stator (W)

$I_s$  Courant du stator (A)

$R_s$  Résistance d'une phase du stator ( $\Omega$ )

### 3.4 Application pour l'estimation de la durée de vie de l'isolation d'un moteur asynchrone

Dans cette partie, un moteur asynchrone 5.5 kW, 50 Hz et qui possède une isolation de classe F a été simulé pour estimer la durée de vie du moteur à induction soumis à des différentes fluctuations de tension et différents niveaux de couple de charge.

Un modèle magnétique électrique de la machine asynchrone a été développé dans Matlab-Simulink. Les résultats de cette simulation sont montrés sur les figures ci-dessous.

La figure (3.3), montre l'allure de la tension des phases dans l'état normal et sans fluctuation. La figure (3.4) montre l'allure du courant dans la même condition.

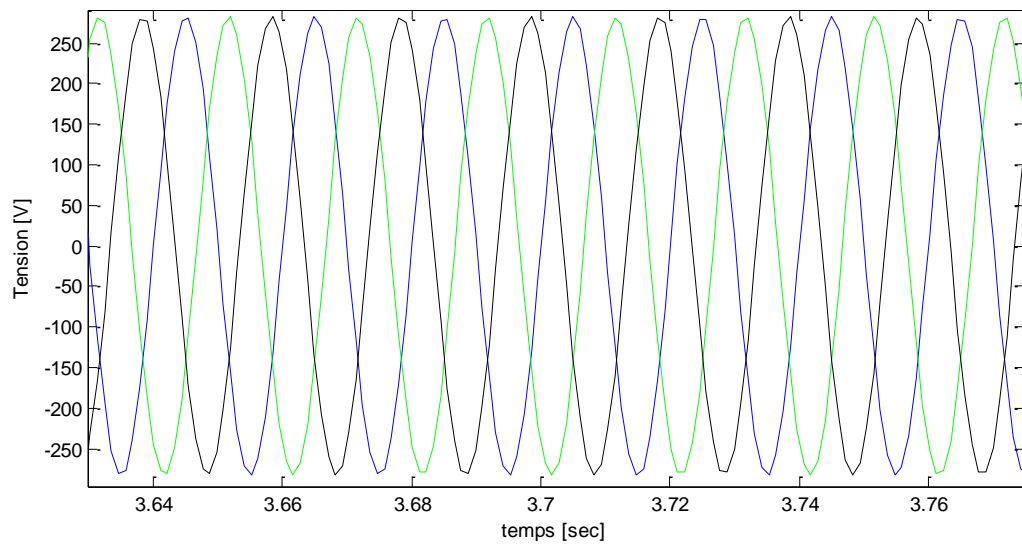


Figure (3.3) L'allure de la tension des phases dans l'état normal

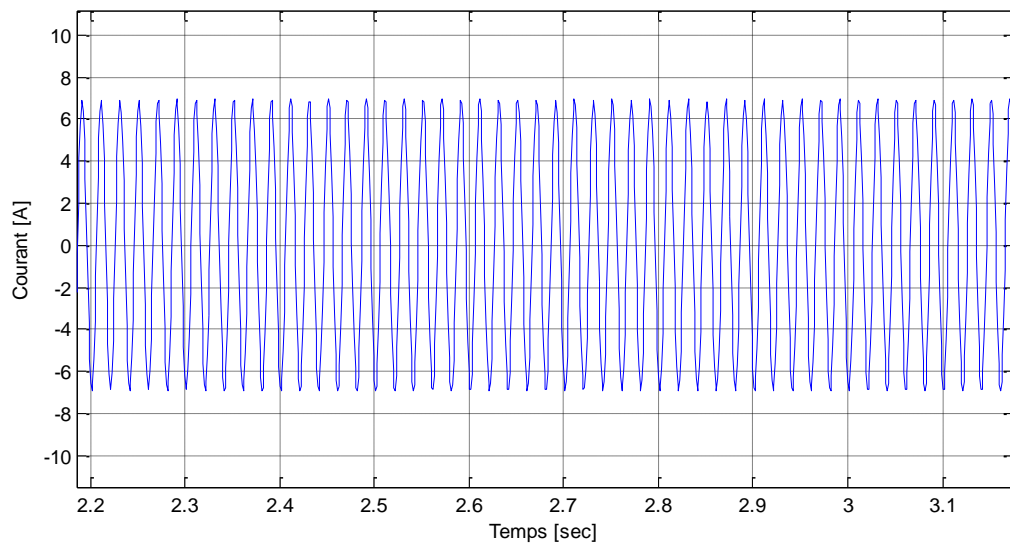


Figure (3.4) L'allure du courant dans la même condition

Dans la deuxième partie nous avons simulé le fonctionnement de la machine en présence d'une fluctuation uniforme de la tension. Les figures (3.5) et (3.6) montrent l'allure de la tension de phases pour une valeur de fluctuation de  $\Delta V = 17 V$  et une fréquence de fluctuation de 15 Hz et 25 Hz respectivement.

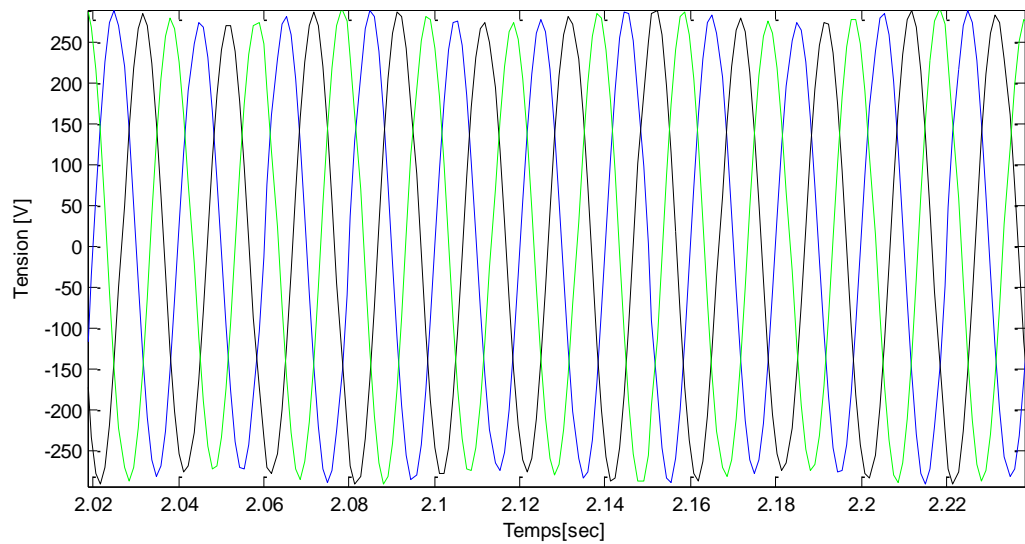


Figure (3.5) Tensions des phases pour une fluctuation de 17 V et  $f_m=15\text{Hz}$

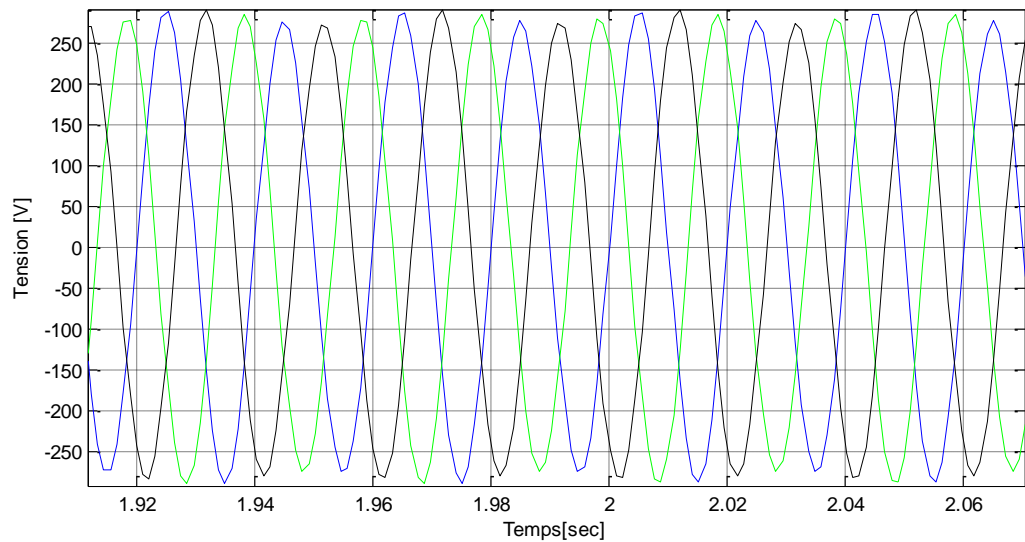


Figure (3.6) Tensions des phases pour une fluctuation de 17 V et  $f_m=25\text{Hz}$

Figure (3.7), montre l'allure du courant de la première phase pour une fluctuation de  $\Delta V = 17\text{ V}$  et une fréquence de  $f_m=25\text{ Hz}$ .

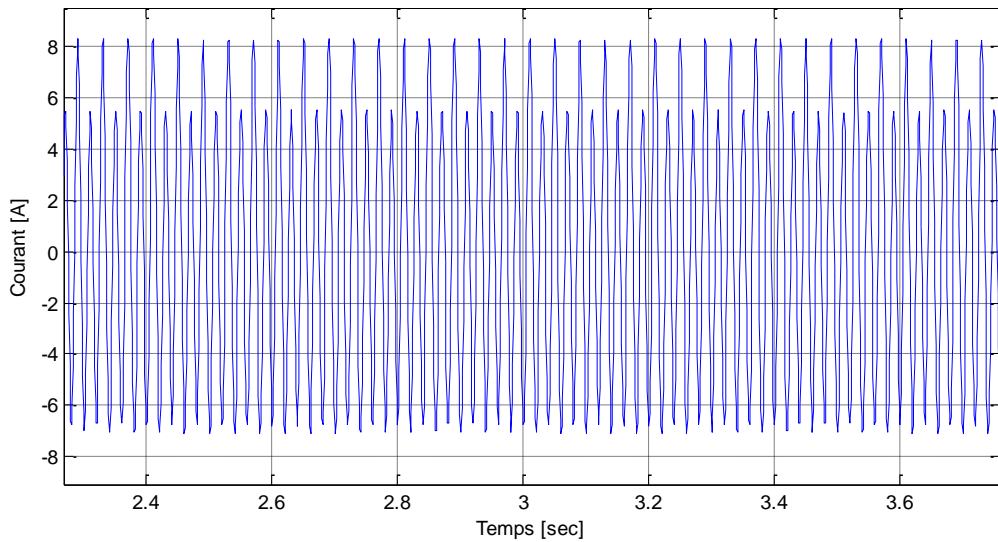


Figure (3.7) Courant de la phase A pour une fluctuation de 17 V et  $f_m=15\text{Hz}$

A partir de ces figures, on remarque clairement que la fluctuation de la tension influe sur la forme de courant et par la suite sur sa valeur efficace. Cette dernière intervient dans le calcul de la température du bobinage et sa durée de vie.

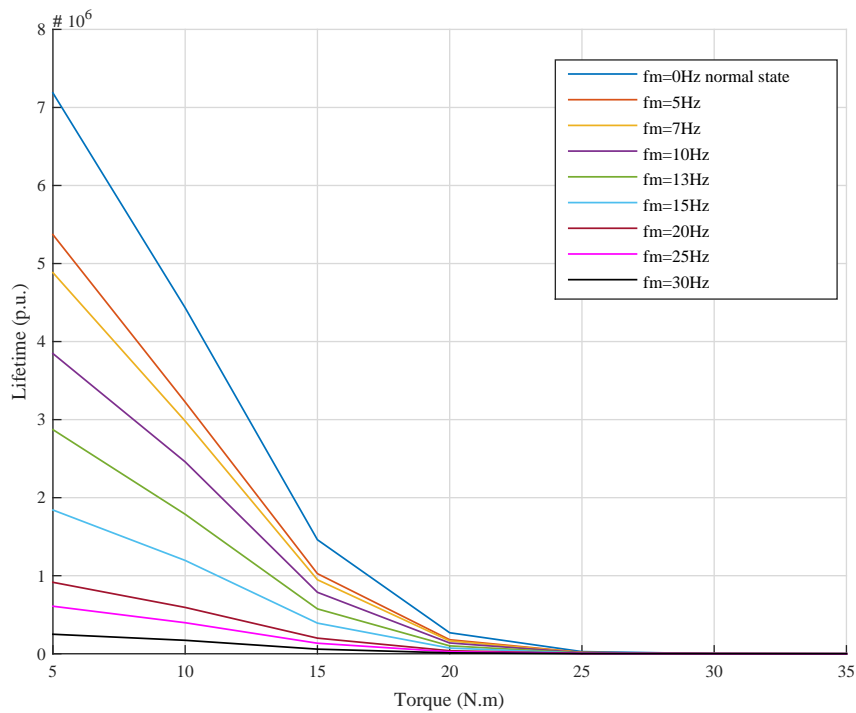


Figure (3.8) variation de la durée de vie du bobinage en fonction du couple charge et pour plusieurs valeurs de la fréquence des fluctuations de la tension

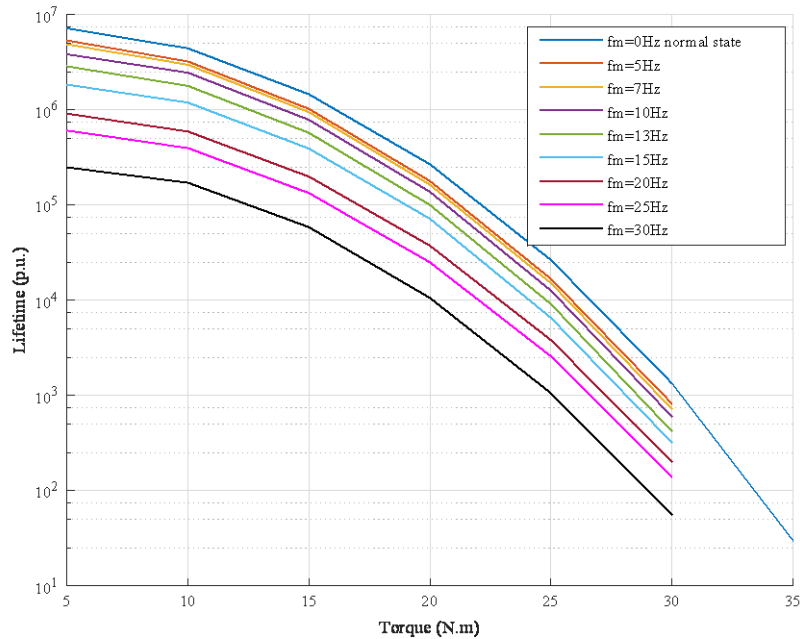


Figure (3.9) variation de la durée de vie du bobinage en fonction du couple charge et pour plusieurs valeurs de la fréquence des fluctuations de la tension (échelle logarithmique)

La valeur du courant est calculée pour plusieurs valeurs du couple de charge et plusieurs fréquences de la fluctuation de la tension. Dans chaque point de fonctionnement, la durée de vie est estimée en utilisant la procédure décrite dans le paragraphe (3.2). Les résultats de ce calcul sont montrés sur la figure (3.8) et (3.9). A partir de ces résultats on peut conclure que :

- Le fonctionnement de la machine en pleine charge réduit sa durée de vie même en absence des fluctuations de la tension.
- Le fonctionnement de la machine en présence des fluctuations de la tension réduit aussi sa durée de vie. Cet effet devient très grave si la fréquence des fluctuations augmente.

## CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié l'effet de la fluctuation de la tension de phases sur la durée de vie du bobinage d'une machine asynchrone. Au début nous expliqués l'approche utilisée pour calculer la durée de vie d'un bobinage pour une température de fonctionnement lorsque on connaît sa durée de vie à une température de base. Après nous avons appliqué cette démarche pour estimer la durée de vie d'une machine asynchrone pour plusieurs valeurs du couple de charge et en présence des fluctuations dans la tension d'alimentation. Nous remarquons que le fonctionnement de la machine avec des charge qui dépasse la charge nominale réduit considérablement sa durée de vie. D'une côté, la présence des fluctuations dans la tension réduit aussi sa durée de vie.

***CONCLUSION***  
***GENERALE***



## CONCLUSION GENERALE

Le bon fonctionnement des systèmes utilisant des machines électriques dépend la fiabilité de ces dernières. Donc le diagnostic des défauts dans ces machines est une tâche primordiale.

Il existe plusieurs types de défauts qui peuvent être survenus pendant l'utilisation d'une machine électrique. Pour les machines de grande puissance et vu le niveau du courant qui circule dans les bobines, la dégradation de l'isolation est considéré comme le défaut le plus rencontré.

Cette dégradation est due aux différentes contraintes dans lesquelles la machine fonctionne. En plus de la température, on trouve la contrainte mécanique provoquée par les vibrations et la contrainte électrique due aux niveaux de tension appliquée.

La dégradation d'isolation peut conduire à des court-circuités entre spires. Ce défaut peut évoluer à des défauts plus grave.

Le pronostic de la durée de vie restante d'une isolation soumise à des contraintes multiples est alors très important.

Au début de ce travail nous présenté le système d'isolation d'une machine électrique et les paramètres qui influent sur ce système. L'accent est mis particulièrement sur l'effet de la température de fonctionnement et la tension appliquée.

Nous avons aussi présenté les différents modèles de prédiction de la durée de vie d'une isolation. Ces modèles sont multi contraintes. Nous avons focalisé sur deux modèles : Le premier relie le vieillissement thermique au taux d'une réaction chimique dépendant de la température, par l'utilisation de l'équation d'Arrhenius. Le deuxième appelé modèle de Simoni, utilise le même principe et étendu aux contraintes électriques et mécaniques. Ce dernier est utilisé pour l'étude de vieillissement de l'isolation du bobinage des grands alternateurs. La difficulté de l'utilisation de ces modèles qui sont généralement empiriques réside dans le fait que ses paramètres dépendent des conditions d'utilisation des machines électriques. Donc l'application des modèles à une machine est conditionnée par la possession

des résultats des tests accélérés pour des prototypes dans la même catégorie et dans les mêmes conditions d'utilisation. Ces tests sont très coûteux.

Dans une partie de travail, nous avons étudié l'effet de la fluctuation uniforme de la tension sur la durée de vie de l'isolation du bobinage d'une machine asynchrone. Bien que dans la pratique la fluctuation de la tension n'est pas uniforme et plutôt aléatoire, nous avons remarqué que le fonctionnement continu sous une tension fluctuante conduit à la réduction considérable de la durée de vie de la machine.

En perspective, nous envisageons l'extension des modèles de vieillissement de l'isolation des à des dispositifs de haute performance subissant des cycles de température courts.

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUE***

## **Références Bibliographiques**

- [1] A. S. Babel and E. G. Strangas, “Condition-based monitoring and prognostic health management of electric machine stator winding insulation,” in *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*, Sept 2014, pp. 1855–1861.
- [2] K. Younsi, P. Neti, M. Shah, J. Y. Zhou, J. Krahn, K. Weeber, and D. Whitefield, “Online capacitance and dissipation factor monitoring of AC motor stator insulation,” in *2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, May 2010, pp. 530–533.
- [3] P. Zhang, K. Younsi, and P. Neti, “A novel online stator ground-wall insulation monitoring scheme for inverter-fed AC motors,” in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sept 2013, pp. 3541–3547.
- [4] J. Yang, J. Cho, S. B. Lee, J. Y. Yoo, and H. D. Kim, “An advanced stator winding insulation quality assessment technique for inverter-fed machines,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 2, pp. 555–564, March 2008.
- [5] N. Lahoud, M. Q. Nguyen, P. Maussion, D. Malec, and D. Mary, “Lifetime model of the inverter-fed motors secondary insulation by using a design of experiments,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 6, pp. 3170–3176, December 2015.
- [6] Z. Huang, A. Reinap, and M. Alak“ula, “Predictive monitoring of turn-to-turn insulation in single tooth coils,” in *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Sept 2015, pp. 171–177
- [7] Z. Huang, “Dielectric properties modeling and measurement of single tooth coil insulation system under accelerated degradation test,” in *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Sept 2016, pp. 2698–2703.
- [8] : Définitions lexicographiques et étymologiques de « isolant » (sens B1) du Trésor de la langue française informatisé, sur le site du Centre national de ressources textuelles et lexicales, consulté le 20 février 2015.

[9] : Kittel, Charles. (Trad. de l'anglais), Physique de l'état solide : cours et problèmes, Paris, Dunod, 2007, 640 p. (ISBN 978-2-10-049710-2, OCLC 213053150, lire en ligne).

[10] file:///F:/%C2%A0/Bourekba-Marwa%20(1).pdf

[11] <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02096922/document>

[12] <http://mellah.e-monsite.com/medias/files/1-rappel-sur-les-materiaux-pour-les-machines-electriques-isolants-conducteurs-magnetiques-.pdf>

[13] IEC 60085 (2007): Electrical insulation - Thermal evaluation and designation

[14] C. Menguy, Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides, Techniques de l'ingénieur, Matériaux / Matériaux fonctionnels, 1997

[15] [https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8998/HammiSamira\\_KacerSamia\\_Rahmani\\_Ferroudja.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8998/HammiSamira_KacerSamia_Rahmani_Ferroudja.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[16] D. Saad : « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces Métalliques ». Thèse magistère en électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.

[17] [https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/9047/DiramiLinda\\_FerhaouiNadia.pdf?sequence=1](https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/9047/DiramiLinda_FerhaouiNadia.pdf?sequence=1)

[18] L. M. Rux, P. E., 2004. Advantages of the Ramped Direct High-Voltage Method of Assessing Stator Winding Insulation Condition. HCI Publications.

[19] L. M. Rux, 1997. « High-Voltage DC Tests for Evaluating Stator Winding Insulation: Uniform Step, Graded Step, and Ramped Test Methods ». IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. (Minneapolis, 1997), pp. 19-22.

[20] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, 2014. *Electrical Insulation*

*For Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, 2nd Edition.*

IEEE Press Series on Power Engineering. Published by John Wiley & Sons (July 2014), 629p.

[21] United State Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1991. *Testing Solid Insulation of Electrical Equipment*, Facilities Instructions, Standards, and Technique smanual, Denver, Vol. 13-1, 53p.

[22] C. Guillermin, “Vieillissement électrique et thermique d’un composite résine époxyde-silice : étude des charges d’espace et de la conduction,” Université Joseph Fourier Grenoble I, thèse soutenue, 2004.

[23] O. Gallot-la vallee, “Etude de la charge d’espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d’une résine époxy utilisée dans l’isolation haute tension,” Université Paul Sabatier (Toulouse III), thèse soutenue, 2004.

[24] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, “A review of stator fault monitoring techniques of induction motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 106–114, 2005.

[25] M. Geoffriaul, “Réduction active des vibrations et des bruits d’une machine électrique par la stratégie de commande,” Centrale Supélec, thèse soutenue, 2015.

[26] C. Hudon, N. Amyot, T. Lebey, P. Castelan, N. Kandev, 2000. « Testing of low-voltage motor turn insulation intended for pulse-width modulated applications ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Volume 7, Issue 6, pp. 783 – 789.

[27] Ken Kimura, 1993. « Progress of Insulation Ageing and Diagnostic of High Voltage Rotating Machine Winding in Japan ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Vol. 9, pp. 702-714.

[28] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcov, *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & sons, Ltd, 2008.

[29] <https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/597/Belkacemi%20Djamal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [30] Livre electrical –insulation-for-rotating-machines  
[file:///D:/fichiers%20chapitre%202/epdf.pub\\_electrical-insulation-for-rotating-machines.pdf](file:///D:/fichiers%20chapitre%202/epdf.pub_electrical-insulation-for-rotating-machines.pdf)
- [31] IEC 60034, Part 18, Section 34, "Rotating Electrical Machines: Functional Evaluation of Insulation Systems: Test Procedures for Form-Wound Windings—Evaluation of Thermo mechanical Endurance of Insulation Systems.
- [32] T. W. Dakin, "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon," American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, vol. 67, pp. 113-122, 1948. ransactions on, vol. 28, pp. 755-776, 1993.
- [33] V. I. J. Kokko, "Ageing due to thermal cycling by start and stop cycles in lifetime estimation of hydroelectric generator stator windings," in Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International, 2011, pp. 318-323.
- [34] G. C. Montanari and L. Simoni, "Aging phenomenology and modeling," Electrical Insulation, IEEE
- [35] L. Simoni, G. Mazzanti, G. C. Montanari, "Life models for insulating materials in combined-stress conditions", Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 827 - 832, 1994.
- [36] P. Cyang, J. R. Laghari, "Models for insulation aging under electrical and thermal multistresses", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No.5, pp. 923-934, 1990
- [37] G. C. Montanari, G. Mazzanti, L. Simoni, "Progress in electromechanical life modeling of electrical insulation during the last decades", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 5, pp. 730-745, 2002.
- [38] M. B. Srinivas, T. S. Ramu, "Multifactor aging of HV generator stator insulation including mechanical vibrations", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 5, pp. 1009-1021, 1992.
- [39] D. Halliday, R. Resnick, Fundamentals of Physics, Wiley, 1981.
- [40] G. Mazzanti, G. C. Montanari, L. Simoni, M.B. Srinivas, "Combined electro-thermo-mechanical model for life prediction of electrical insulating materials", Electrical Conference on Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 274-277, 1995.

- [41] M. B. Srinivas, T. S. Ramu, "Multifactor aging of HV generator stator insulation including mechanical vibrations", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 5, pp. 1009-1021, 1992.
- [42] L. Weili, Z. Feng, H. Yunpeng, C. Shukang, "The Influence of End Part Leakage on stator Temperature Field", Conference on Electrical Machines and Systems, Vol. 1, pp. 111-115, 2001.
- [43] American National Standard Requirements for Cylindrical-Rotor Synchronous Generators, ANSI Standard C50.13, 1977.
- [44] [file:///C:/Users/Mn/Downloads/C](file:///C:/Users/Mn/Downloads/C%20InductionMotorsLifetimeExpectancyAnalysisSubjecttoRegularVoltageFluctuations-2017%20(1).pdf)  
InductionMotorsLifetimeExpectancyAnalysisSubjecttoRegularVoltageFluctuations-2017%20(1).pdf
- [45] Tamrabet Hanene " Robustesse d'un Control Vectoriel de Structure Minimal d'une Machine Asynchrone " Thèse de magistère, Batna, 20.05.2006.
- [46] Tchiali Fouad, Maghraoui Noura " Modélisation et Commande des Onduleurs Multi niveaux Asymétriques ", PFE. Dép. d'électrotechnique, U.S.T.H.B 2004.
- [47] Benyahia. M, "commande non linéaire et prédictive application à la machine asynchrone " thèse de magister, Université de Batna 2001.
- [48] H. Oraee, "A quantitative approach to estimate the life expectancy of motor insulation systems," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 7, no. 6, pp. 790–796, dec 2000.
- [49] J. de Abreu and A. Emanuel, "Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 38, no. 1, pp. 12–20, Jan/Feb 2002
- [50] G. C. Stone, S. Campbell et S. M. Tetrault, « Inverter-fed drives: which motor stators are at risk », IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 6, Issue 5, Septembre-Octobre 2000.



**ملخص: دراسة تأثير عدم استقرار التوتر الكهربائي المطبق على العمر الافتراضي للآلات الكهربائية**

تلعب العوازل الكهربائية دورا هاما في اشتغال الآلات الكهربائية فهي تمنع حدوث دارات قصيرة قد تشكل خطرا على الآلة وعلى محيطها.

نوعية وقوة هذه العوازل تتأثران بشكل كبير بالظروف التي تشتغل فيها الآلة الكهربائية ووجد أن الحرارة ومستوى الجهد الكهربائي المطبق والاهتزازات الميكانيكية كلها عوامل تساهم في التقليل من العمر الافتراضي للعوازل.

في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير هذه العوامل على نوعية العوازل في الآلة الكهربائية وذلك بالاستعانة بنماذج تحليلية. من جهة أخرى درسنا تأثير عدم استقرار التوتر الكهربائي المطبق على قوة العوازل.

---

### **Résumé : Influence des fluctuations de la tension sur la durée de vie des machines électriques**

Les isolants jouent un rôle important dans le fonctionnement d'une machine électrique. Leur rôle principal est d'empêcher les courts-circuits qui peuvent être dangereux pour la machine et même pour son environnement.

La qualité et la force de ces isolants dépendent des conditions dans lesquelles la machine fonctionne. Il est montré que la température de fonctionnement, la tension appliquée et les vibrations mécaniques sont tous des contraintes qui influent sur la durée de vie d'un isolant.

Dans ce travail nous avons réalisé une étude sur l'influence des contraintes sur la qualité de l'isolation dans une machine en utilisant des modèles analytiques. D'un autre coté nous avons étudié l'influence de l'instabilité de la tension d'alimentation sur la force des isolants.

---

### **Abstract : Effect of unbalanced voltage on lifetime of electrical machines**

Insulation play an important role in the operation of an electrical machine. Their main role is to prevent short circuits which can be dangerous for the machine and even for its environment.

The quality and strength of these insulation depend on the conditions under which the machine operates. It has been shown that operating temperature, applied voltage, and mechanical vibration are all stresses that affect the life of an insulator.

In this work we carried out a study on the influence of stresses on the quality of insulation in a machine using analytical models. On the other hand, we have studied the influence of unbalanced supply voltage on the strength of insulators.