



**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Université El-chahid Hamma Lakhder d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de**

LICENCE ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques**

Thème

**Dégradation des isolants dans les
machines électriques**

Réalisé par:

TAMMA EL abbas

KOUIDRI Moussa

DEBBAR Youcef

ZAID Mansour

Encadré par:

Dr. HALEM Noura

Soutenu en Juin 2015

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur la dégradation des isolants dans les machines	
électriques	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Causes de détérioration des enroulements.....	4
1.3 Fils corona résistant	6
1.4 Aspect normatif concernant les SIE soumis à des impulsions de tension répétitives.	8
CHAPITRE II : Effet de dégradation des isolants et défauts des machines	
électriques.	11
2.1 Les défaillances dans les machines électriques.....	12
2.2 Quelques statistiques sur les défauts dans la machine asynchrone.....	12
2.2.1 Défaillances au stator.....	14
2.2.2 Défauts d'isolant dans un enroulement.....	15
2.2.3 Court-circuit entre spires.....	16
2.3 Défaillance du transformateur de puissance:.....	17
2.3.1 Dégradation des isolants.....	17
2.3.2 Calcul du vieillissement.....	18
CONCLUSION GENERALE.....	20
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	22

Introduction générale

Introduction générale

Le bobinage statoriques des machines électriques sont soumises à des contraintes particulières, la répartition de la tension dans les enroulements se fait d'une manière non linéaire car les convertisseurs statiques modernes imposent des fronts de tension très raides qui correspondent. Les oscillations pseudopériodiques qui suivent les fronts raides sont à l'origine de champs électriques intenses. Dans les isolants qui peuvent dépasser le seuil d'apparition des décharges partielles souvent appelé *partial discharge inception voltage* et provoquer une dégradation rapide des isolants classiques à base de polymères.

La dégradation de l'isolant reste le facteur le plus important qui cause le défaut de court-circuit dans les machines électriques, et le défaut de court-circuit reste le plus dangereux puisque il cause la cessation rapide de la machine.

À la suite ce qui précède, ce mémoire set partagé comme suit:

Un premier chapitre qui contient une étude théorique sur l'isolant et sa nature chimique.

Un deuxième chapitre présente les différents défauts qui peuvent affecter la machine électrique asynchrone triphasée, et l'effet de dégradation de l'isolant dans le bobinage statorique. On a choisi cette machine puisque elle est la plus utilisée dans l'industrie.

Chapitre 1

Généralités sur la dégradation des isolants dans les machines électriques

Chapitre 1

Généralités sur la dégradation des isolants dans les machines électriques

1.1 Introduction

La qualité de l'isolation électrique des bobinages statoriques des machines électriques est un facteur important de leur fiabilité. Une étude portant sur les causes des défaillances des machines électriques utilisées dans le milieu industriel montre que 37% des défauts constatés sont provoqués par une rupture d'un élément du bobinage statorique. Cette étude montre également que la plupart des autres défauts sont d'origine mécanique et que la probabilité qu'ils surviennent peut être fortement réduite par des opérations de maintenance préventive, ce qui est impossible pour prévenir les problèmes d'isolation.

1.2 Causes de détérioration des enroulements

La détérioration des enroulements statoriques peut être décomposée en trois parties :

- L'isolation par rapport à la carcasse métallique de la machine (encoche) ;
- L'isolation entre les phases ;
- L'isolation inter-spires.

L'isolation par rapport à la carcasse métallique de la machine constitue une partie importante d'une machine électrique. Cette isolation subit des contraintes électriques et mécaniques plus importantes que l'isolation inter-spires. Elle doit donc avoir une tenue en tension plus grande ; elle est d'une épaisseur plus importante. L'isolation entre les phases est également plus épaisse que l'isolation inter-spires. En basse tension ces deux parties d'isolation sont obtenues par des feuilles de matériaux isolants organiques à base des polymères (Nomex, Mylar, ...) qui ont de très bonnes caractéristiques mécaniques. Ils tiennent des températures assez élevées et présentent des résistances thermiques assez faibles de façon à évacuer facilement la chaleur produite par les pertes Joules dans les bobinages.

L'isolation inter-spires est la plus vulnérable aux contraintes car elle est la plus fine. Les machines électriques basse tension sont souvent bobinées en vrac et les différents conducteurs sont soumis à des tensions différentes. Le premier et le dernier conducteur peuvent être adjacents, dans ce cas leur isolation est soumise à la tension entière de la bobine.

Dans le cas d'un bobinage en vrac, l'isolation inter-spires doit donc supporter la totalité de la tension d'alimentation de la bobine.

Les critères de choix des propriétés de l'isolant sont également mécaniques car la couche isolante doit résister aux contraintes subies par le fil émaillé pendant le processus automatique de fabrication de la machine. L'épaisseur des couches isolantes a une influence sur le dimensionnement du moteur et son efficacité énergétique : des isolants fins permettent des encoches plus petites, donc moins de fer. La température maximale admissible est un autre facteur important, elle détermine la classe de température de la machine et donc, indirectement, sa densité volumique de puissance.

La plupart des machines basse tension sont actuellement fabriquées avec des isolants organiques à base de polymères. La Figure 1 présente les couches isolantes d'un fil émaillé classique qui est largement utilisé pour fabriquer les bobinages statoriques. Ce fil est d'abord isolé avec un vernis à base des polyesters modifiés par des groupes imides, le polyester-imide (THEIC). La surcouche de polyamide-imide lui confère une thermo-plasticité élevée, une très bonne tenue aux chocs thermiques et d'excellentes performances mécaniques. Ces deux couches de base peuvent être recouvertes d'un polyamide aromatique thermo-adhérent. Cette couche supplémentaire permet le maintien des bobines par simple collage. Elle peut en effet être utilisée pour remplacer le vernis d'imprégnation. Dans ce cas, le collage des bobines est le plus souvent obtenu en augmentant leur température par effet Joule en faisant passer un fort courant pendant un court laps de temps [1].

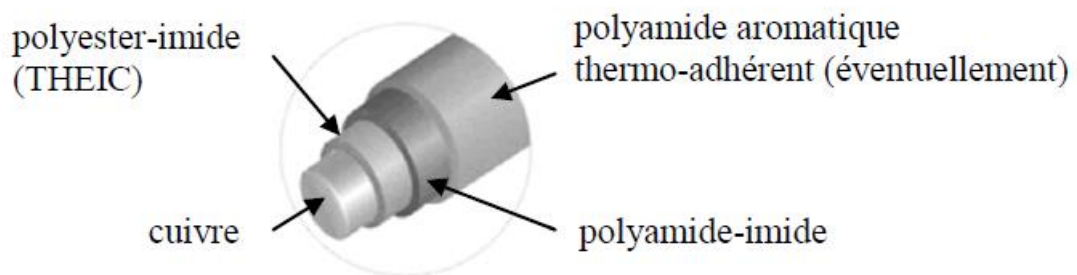


Figure 1.1 : Les différentes couches d'isolant d'un fil émaillé.

Les polymères sont composés de macromolécules organiques complexes intégrées autour d'un squelette central constitué d'atomes de carbone. Les mécanismes du vieillissement

sont multiples et agissent principalement sur les liaisons de valence entre les atomes des macromolécules. Le vieillissement de l'isolant est associé aux contraintes thermiques, mécaniques, électriques et environnementales. Les mécanismes de dégradation des isolants sont issus de combinaisons complexes de différentes actions physico-chimiques : la scission des chaînes moléculaires, l'oxydation, la perte des agents plastifiants, la réticulation de la surface isolante.

- ❖ **Les contraintes thermiques** sont liées à l'augmentation de la température du moteur causée principalement par les pertes Joules. L'augmentation de la température entraîne alors l'accélération de processus chimiques irréversibles dans l'isolant et un vieillissement plus rapide.
- ❖ **Les contraintes mécaniques** sont générées par les forces électromagnétiques diverses dans le moteur. Les forces électromagnétiques ont tendance à faire vibrer les bobinages. Si les bobines ne sont pas totalement solidaires du stator, l'isolation sera exposée à des frottements mécaniques qui accélèrent le vieillissement.
- ❖ **Les contraintes électriques** sont diverses mais la présence de décharges partielles dans les vacuoles résiduelles d'air présentes dans les bobinages jouent un rôle important. Les décharges partielles provoquent une accélération nette du processus de vieillissement. Dans les machines basse tension alimentées en alternatif basse fréquence il n'y a pas de décharges partielles car habituellement la tension d'alimentation est inférieure au PDIV. De plus, la répartition de la tension au sein du bobinage se fait d'une manière linéaire de façon qu'il n'y a pas de spires soumises à des contraintes plus fortes que les autres. Pour ce type d'alimentation l'influence des capacités inter-spires est négligeable. Il n'en est pas de même lorsque la machine est connectée à un convertisseur statique fonctionnant en MLI qui impose des fronts de tension très raides et des phénomènes oscillatoires hautes fréquences dans les bobinages [2].

1.3 Fils corona résistant

Des études menées en partenariat avec l'industrie ont permis de mettre au point des fils émaillés qui résistent mieux aux décharges partielles. Dans la littérature on parle des fils corona résistant. Ces fils sont obtenus en joignant aux vernis des composites inorganiques sous forme des poudres formées des grains à l'échelle microscopique ou des nano composants (SiO_2 , TiO_2). La qualité des fils dépend de l'uniformisation de dispersion de

ces micro ou nanoparticules dans les polymères. Cependant, pour obtenir ceci, il subsiste des difficultés car les nanoparticules possèdent une très haute énergie de surface et vont naturellement former des agglomérats. Il existe plusieurs techniques pour charger les polymères avec des nanoparticules, parmi les plus importantes on peut citer la technique Sol-Gel et le mécanisme avec ultrasons.

Beaucoup d'études présentent des études comparatives entre les fils émaillés classiques et *corona résistant*, la conclusion est la même : les fils *corona résistant* résistent beaucoup mieux aux DP et ont une durée de vie nettement supérieure aux fils émaillés classiques. La Figure I.5 présente une comparaison entre le fil *corona résistant* Kapton® 100CR et le fil émaillé classique Kapton® 100HN fabriqués par DuPont. Pour une contrainte de 20 kV/mm, 50 Hz le fil *corona résistant* a une durée de vie plus de 100000 heures en comparaison avec le fil classique qui a une durée de 200 heures. Les mesures ont été faites suivant la norme CEI 60343 qui prévoit des essais accélérés destinés à estimer le stress correspondant à une durée de vie de 100000 heures [1].

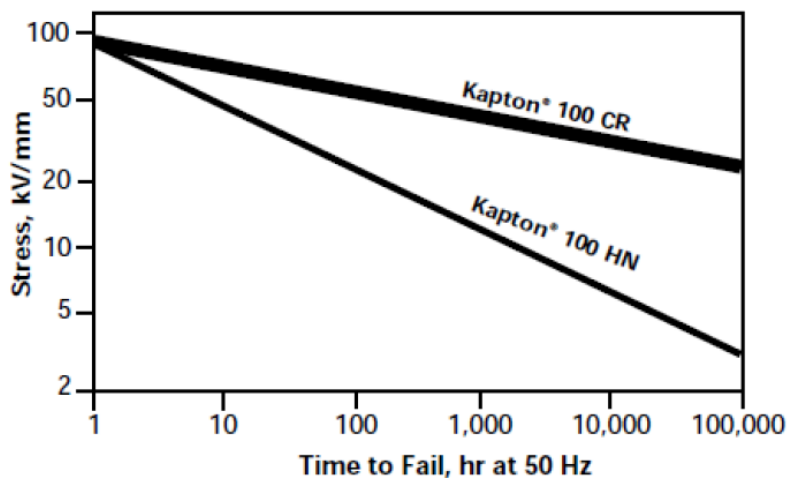


Figure 1.2 : Comparaison entre le fil *corona résistant* Kapton® 100CR et le fil émaillé classique Kapton® 100HN fabriqués par DuPont (selon les données techniques fournies par le fabricant).

Plusieurs travaux montrent que l'ajout des nanoparticules dans les vernis d'imprégnation du bobinage augmente également le PDIV.

En contrepartie les fils *corona résistant* ont des caractéristiques mécaniques moins bonnes principalement à cause de la dispersion des particules minérales dans le polymère qui n'est pas toujours parfaite. En effet, pour un allongement du fil de 9%, qui correspond à l'ordre de grandeur des contraintes imposées lors des essais de qualification des fils émaillés

classiques, les contraintes mécaniques provoquent une réduction de la durée de vie de 60 à 70%.

1.4 Aspect normatif concernant les SIE soumis à des impulsions de tension répétitives

CEI 62068-1 et CEI/TR 62068-2

Les normes CEI 62068-1 et CEI/TR 62068-2 sont deux documents normatifs importants concernant les systèmes d'isolation électriques soumis à des impulsions de tension répétitives. La première partie éditée en 2003 est la norme proprement dite qui définit les méthodes générales d'essais qui permettent de faciliter la sélection des systèmes d'isolation électriques et de déterminer, de façon relative, l'endurance d'une isolation soumise à des impulsions de tension appliquées périodiquement. Ce document ne précise pas la nature de l'échantillon soumis au vieillissement, il rappelle les lois générales et les méthodes de test et donne également des précisions sur la nature des impulsions de tension.

La deuxième partie est un rapport technique qui fait le point sur l'état de l'art à sa date de publication (2001). Il fait référence à de nombreux articles scientifiques (74 articles). Des études expérimentales à caractère industriel, mettant en œuvre des convertisseurs et des machines entières, montrent que les machines électriques alimentées par des convertisseurs statiques subissent un vieillissement accéléré de leur isolation. Deux références de ce rapport disent que les phénomènes de réflexion des impulsions de tension produites par un onduleur placé en extrémité d'un câble peuvent provoquer le doublement, voire le triplement de la valeur initiale de la tension crête appliquée. Une conclusion importante est faite dans ce rapport : lorsque la valeur du dV/dt de la tension imposée par l'onduleur augmente, la contrainte sur l'isolation des premières spires des bobinages augmente. Les phénomènes physiques liés au vieillissement de l'isolation soumis à des impulsions de tension sont présentés. Chaque référence, citée dans ce rapport, est plus ou moins en relation avec les phénomènes suivants :

- ❖ Les décharges partielles qui sont un des mécanismes les plus défavorables aux systèmes d'isolation électriques;
- ❖ Les effets liés à la polarité des impulsions : la durée de vie des isolants soumis à des impulsions unipolaires est plus longue que pour les impulsions bipolaires de même

amplitude. Ce phénomène peut s'expliquer par les différences qui existent lors de la formation des charges d'espace dans les isolants ;

- ❖ L'effet de la fréquence des impulsions: avec la fréquence les contraintes sont plus nombreuses et donc le vieillissement plus rapide;
- ❖ Les effets de la température et de l'humidité.

IEC/TS 60034-25

Le document IEC/TS 60034-25 édité en 2007 est un rapport technique qui présente des indications à prendre en compte lors de la conception d'une machine destinée à une alimentation à MLI. Les indications trouvées dans ce rapport ne concernent pas seulement le système d'isolation électrique mais le moteur dans son ensemble. Les performances du moteur sont influencées par le système de conversion d'énergie dans son ensemble, c'est-à-dire le convertisseur, les câbles de connexion, le moteur et l'arbre de transmission mécanique. L'influence des différents paramètres est présentée, par exemple l'influence des courants de mode commun sur l'usure prématurée des roulements [1].

Des surtensions qui dépassent deux fois la tension du bus continu peuvent apparaître dans les cas suivants :

- Lors d'une transition double, lorsqu'une phase commute dans un sens pendant qu'une autre commute en sens inverse ;
- Lorsque le temps entre deux impulsions est le même que le temps de propagation entre le convertisseur et le moteur ;
- Lorsque les fils du câble de connexion sont de différentes sections, cela cause des différences dans les impédances caractéristiques.

CEI/TS 60034-18-41

Le document IEC/TS 60034-18-41 publié en 2006 est un rapport technique qui présente la qualification et les essais des systèmes d'isolation dans les machines alimentées par les convertisseurs de tension. Ce rapport concerne les systèmes d'isolation de type I, c'est-à-dire les SIE qui ne sont pas susceptibles d'endurer des décharges partielles pendant leur fonctionnement. Ce type d'isolation est généralement utilisé dans des machines dont la tension d'alimentation est inférieure à 700 V et dont le bobinage est généralement en vrac.

La Figure I.3 montre les différentes isolations d'un bobinage qui vont subir des contraintes supplémentaires lors d'une alimentation à fronts raides : entre les conducteurs des phases différentes dans les encoches et dans les têtes de bobines (repère a) ; entre un conducteur et la terre (repère b) ; entre des spires adjacentes (repère c). Les contraintes correspondantes sont appliquées respectivement aux parties conductrices repérées par 1, 2 et 3.

Une attention particulière est donnée à l'isolation inter-spires, car c'est cette isolation qui est la plus vulnérable. Ce document met également en évidence le caractère non-linéaire de la distribution de la tension inter-spires et explique que cela dépend aussi de la position relative des spires dans les encoches. Lorsque la bobine est en vrac, la première et la dernière spire peuvent être adjacentes et la différence de tension entre ces spires peut être celle correspondant à l'ensemble de la bobine. Les effets associés aux décharges partielles sont décrits dans ce document, et il est mis en évidence que c'est l'isolation inter-spires qui va céder en premier conduisant à un court-circuit entre les spires.

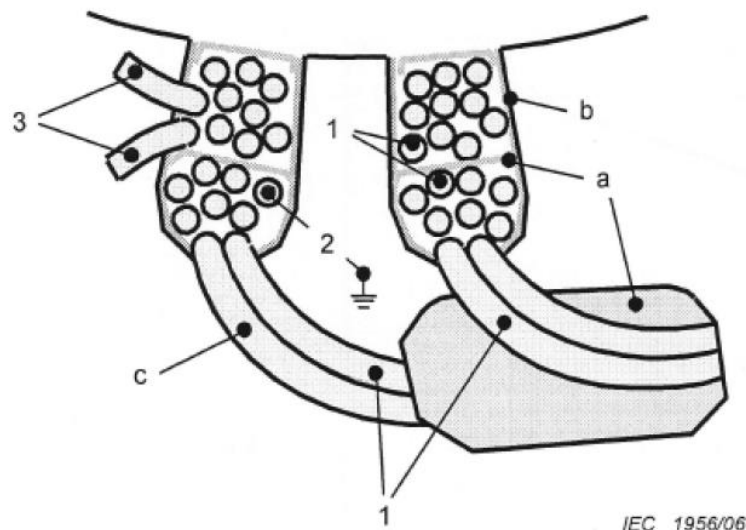


Figure 1.3 : Exemple de contraintes dans les bobinages aléatoires (selon IEC/TS 60034-18-41).

Chapitre 2

Effet de dégradation des isolants et défauts des machines électriques

Chapitre 2

Effet de dégradation des isolants et défauts des machines électriques

2.1 Les défaillances dans les machines électriques

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [3, 4]:

- *Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts* : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, ...
- *Les amplificateurs de défauts* : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, ...
- *Les vices de fabrication et les erreurs humaines* : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, ...

2.2 Quelques statistiques sur les défauts dans la machine asynchrone

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels [5] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a montré que 60% des pannes se situent au stator, 22% au rotor et le reste (18% dans les autres régions de la machine telles que les roulements, les borniers,...etc (figure 2.1) :

D'autre part, les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988, les pannes au stator sont, passées de 78% à 60% et les pannes au rotor sont passées de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est donnée sur la figure suivante :

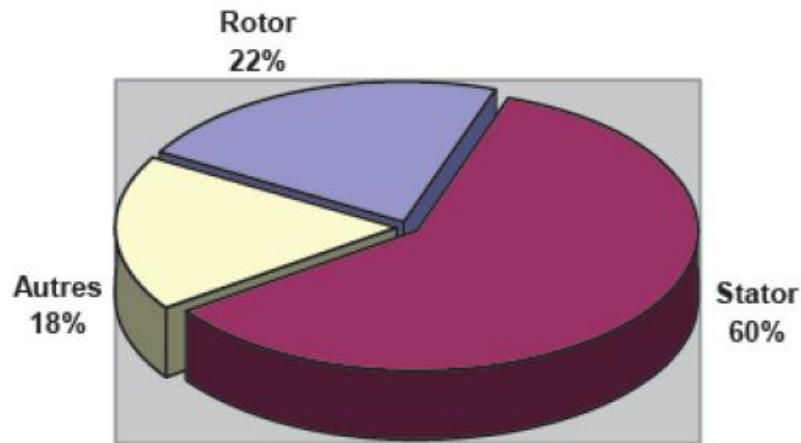


Figure. 2.1 : Proportion des défauts dans les machines asynchrones de moyenne puissance [5].

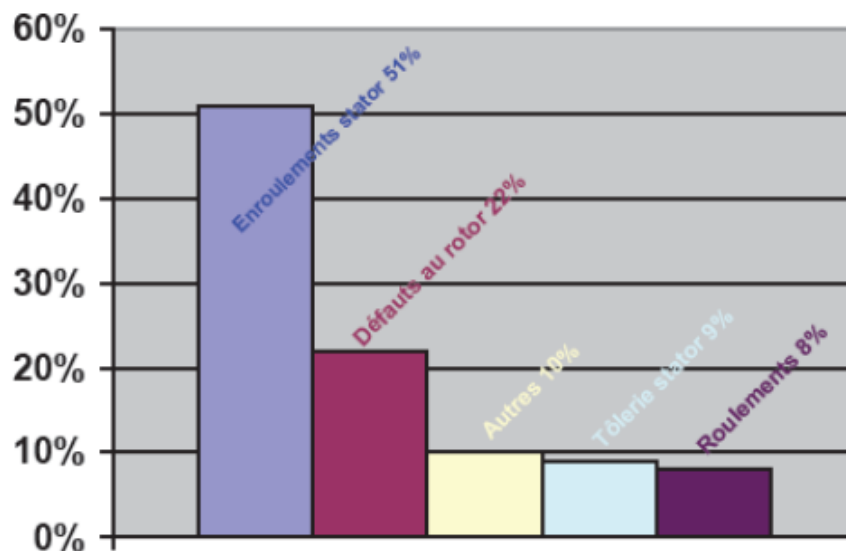


Figure 2.2 : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [5].

De ces exemples, nous constatons que les défauts dans le stator sont plus fréquents dans les machines de moyenne puissance. Evidemment, ces statistiques évoluent avec le type de machines, le type d'alimentation, par exemple l'alimentation par onduleur, l'augmentation de la vitesse, et l'environnement de fonctionnement de la machine qui peut être plus ou moins hostile. Ceci s'explique « peut être » par le manque de place pour renforcer l'isolation des bobinages d'une part ou alors l'augmentation d'autres types de pannes pour les grandes puissances telle que les roulements comme nous venons de le signaler.

2.2.1 Défaillances au stator

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème [3, 4]:

- ❖ **Thermique** : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement (Figure. 2.3). Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante.
- ❖ **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de dV/dt du à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut).
- ❖ **Mécanique** : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration. Une modélisation assez fine de ces phénomènes est présentée dans.
- ❖ **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et bâti, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique.

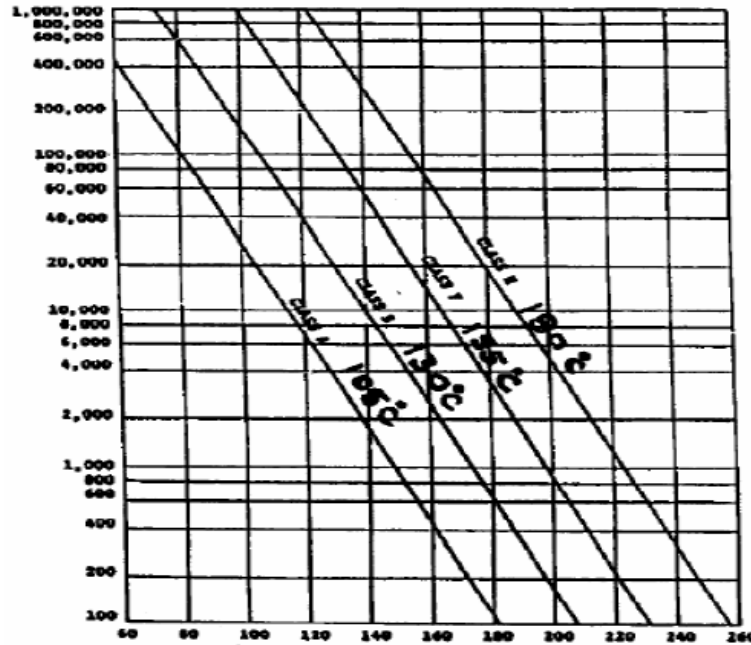


Figure 2.3 : Durée de vie en fonction de la température de fonctionnement

2.2.2 Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Vibrations mécaniques.
- Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie

- Limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

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

Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts [3].

2.2.3 Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [3].

2.3 Défaillance du transformateur de puissance:

Les effets des défauts latents à l'intérieur du transformateur de puissance sont souvent remarquables, qui peuvent dégrader à la fois ses tenues: diélectriques, thermiques et mécaniques à des valeurs inacceptables, au dessous des contraintes appliquées. Ceci peut progresser à un point où l'isolation ne peut résister face à ces surcharges provoquées par le courant de défaut ou de surtension (court circuit, vibrations, surcharges, décharges partielles, foudre...). Ainsi, le diagnostic de ces défauts est étroitement lié à l'évaluation de l'état d'isolation solide et liquide.

2.3.1 Dégradation des isolants

Le vieillissement des isolants est le résultat d'une détérioration graduelle due à des réactions physico-chimiques affectant la tenue mécanique et diélectrique du système d'isolation. La détérioration du papier enrobant les spires des enroulements sont normalement touchées par la pyrolyse, l'oxydation et l'hydrolyse qui se produit dans les matériaux.

Par ailleurs, elles sont accélérées par toute augmentation de la température, de l'oxygène et du taux d'humidité.

La dégradation chimique des papiers et des cartons se manifeste par l'affaiblissement des propriétés mécaniques de la cellulose. Cependant, bien que les pertes diélectriques tendent à augmenter, cependant, la rigidité diélectrique du papier n'est pas touchée de manière significative par ces détériorations. L'huile isolante est également altérée par la détérioration chimique. Elle s'oxyde, ce qui forme des composés acides et des boues.

Ceux-ci réduisent la rigidité diélectrique et affectent la capacité d'évacuation de chaleur du transformateur. Un certain nombre de facteurs, avec leur combinaison, accélérant souvent ces détériorations, notamment :

- ❖ La chaleur;
- ❖ La présence des forces mécaniques;
- ❖ L'application d'une tension;
- ❖ La contamination.

Les vibrations, les efforts électrodynamiques causés par les courts-circuits et les courants d'appel, les chocs au cours du transport ainsi que les efforts résultant des variations des différents matériaux sont les principales contraintes mécaniques qui altèrent le papier et le

carton. Si celles-ci sont suffisamment fortes, elles détruiront les matériaux isolants et entraîneront une défaillance diélectrique. En outre, les efforts de compression entraînent le tassement des isolants solides et par conséquent une prise de jeu de l'ensemble de l'assemblage et du serrage. Ceci rendra le transformateur plus vulnérable en cas de court-circuit. Les contraintes occasionnées par l'application d'un champ électrique provoquent également un vieillissement de l'isolation électrique. Sous l'action de ce champ, le matériau est le siège de décharges partielles qui conduisent à son érosion et affectent par conséquent sa rigidité diélectrique et sa tenue mécanique.

Cependant, dans les transformateurs modernes bien imprégnés, cet effet est très faible: en fonctionnement normal, les isolants sont soumis à des champs dont le niveau est inférieur au seuil d'apparition des décharges partielles. Enfin, le vieillissement peut être accéléré par la contamination de l'huile, les particules métalliques et conductrices, les fibres humides et les bulles de gaz présentes dans l'huile peuvent pénétrer dans des endroits où le champ électrique est élevé. De plus, la rigidité diélectrique de la cellulose peut diminuer en raison d'infiltration d'humidité [3].

2.3.2 Calcul du vieillissement

La durée de vie d'un transformateur dépend beaucoup d'événements exceptionnels, tels que les surtensions, les courts-circuits sur le réseau et les surcharges.

En plus, des paramètres de fonctionnement normal, ils représentent autant de grandeurs susceptibles d'influencer le vieillissement des isolants. Le phénomène de vieillissement est complexe et difficile à modéliser. À ce jour, seule l'influence des contraintes thermiques sur l'évolution des propriétés mécaniques et chimiques fait l'objet d'un modèle mathématique [6-8].

En négligeant toutes les autres influences, sous l'effet de la température de l'huile, comme cela a été expliqué au paragraphe précédent, l'isolation subit une dégradation chimique. Après un certain temps d'exploitation, selon un certain critère retenu, l'isolation est affaiblie. La loi d'Arrhenius sur les réactions chimiques donne l'intervalle de temps pour atteindre ce point final:

$$\text{Durée de vie} = \alpha e^{(\beta/T)}$$

Où α est la vie initiale, β est une constante dépendant des propriétés du matériau à étudier et T la température absolue en Kelvin (K).

Comme il est difficile de déterminer de manière univoque la fin de vie d'un transformateur du fait, aussi qu'elle est liée aussi à la vie du papier, la vitesse de vieillissement a été définie sur la base de la durée de vie selon Montsinger et la norme CEI :

$$\text{Vitesse de vieillissement } [\%/ \Delta] = 2^{\frac{\theta_{hs} - 98}{6}}$$

θ_{hs} : Température du point chaud.

En pratique, un incrément de 6°C au delà de 98°C multiplie de deux fois la vitesse du vieillissement (cas du papier non amélioré thermiquement).

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire résume une recherche théorique sur la composition des isolants des enroulements. Ce sujet est largement abordé par plusieurs travaux.

Le premier chapitre présente une étude théorique sur la composition de l'isolant à base de polymère, en présentant quelques normes.

Le deuxième chapitre expose l'effet de dégradation des isolants sur la machine asynchrone, c'est la première cause de défaut statorique.

Références bibliographiques

- [1] V. Mihaila, " Nouvelle Conception des Bobinages Statoriques des Machines à Courant Alternatif pour Réduire les Effets Négatifs des dV/dt ", Thèse de Doctorat, Université de d'Artois, France, 2011.
- [2] P. Werynski, "Vieillissement des Diélectriques et surveillance des Machines Electriques", Thèse, LSEE-Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement, Université d'Artois, Béthune, 2006.
- [3] B. Vaseghi, "*Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut*", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.
- [4] A. Lebaroud, "*Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables*", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2006.
- [5] "*Présentation des Avaries. Machines Electriques Tournantes*", Cahier des préventions. CP2, Allianz. 1988.
- [6] N. Mezari, "*Diagnostic Des Transformateurs De Puissance* " Mémoire de Magister, Université de Tizi-ouzou, Algérie, 2010.
- [7] L. Bouchaoui, "*Diagnostic Des Transformateurs De Puissance Par La Méthode D'analyse Des Gas Dissous: Application Des Réseaux De Neurones*" Mémoire de Magister, Université de Sétif, Algérie, 2010.
- [8] M. Bélanger "*Transformateur de Puissance à l'huile Minérale*" Recherche du Dysfonctionnement Méthodologie de l'entretien Expertise, Seidel, Janvier 2002.

Normes

- [CEI 60317-0-1] "Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage", CEI, 2008.
- [CEI 60317-38] "Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage - Fil de section circulaire en cuivre émaillé avec polyester ou polyesterimide et avec surcouche polyamide-imide, classe 200, avec une couche adhérente", 2000.