



T H E S E



Présentée à

l'Université Hadj Lakhdar Batna

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

EN ELECTROTECHNIQUE

Présentée par

ABDESSEMED VERA

Maître Assistante A à L'Université de Batna



CONTRIBUTION A L'ANALYSE ET L'AMELIORATION DE LA FIABILITE DES MACHINES ELECTRIQUES



Thèse soutenue devant le jury :

Salah SAAD	Président	Professeur	Univ. Annaba
Rachid ABDESSEMED	Rapporteur	Professeur	Univ. Batna
Hamoud RADJIAI	Examineur	Maître de Conférences	Univ. Setif
Djamel RAHEM	Examineur	Maître de Conférences	Univ. O.E.Bouaghi
Med Lokmane BENDAAS	Examineur	Maître de Conférences	Univ. Batna

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr ABDESSEMED Rachid Professeur à l'Université de Batna et directeur du laboratoire de recherche LEB pour la confiance et l'aide qu'il m'a accordé.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur SAAD Salah, Professeur à l'Université de Annaba, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'être président du jury.

Il m'est agréable de pouvoir exprimer ma reconnaissance envers ;
Monsieur Hammoud RADJEAI, Maître de Conférences à l'Université de Sétif,
Monsieur Djamel RAHEM, Maître de Conférences à l'Université de
O.E.Bouaghi,
Monsieur Mohamed Lokmane BENDAAS, Maître de Conférences à
l'Université de Batna ;

Pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers mon étudiant et collègue le regretté Professeur Mohamed KADJOU DJ, pour ses encouragements continus et son souci envers ma personne.

Mes remerciements vont également à tous mes Collègues du département d'électrotechnique et à son corps administratif.

Résumé: le travail réalisé dans cette thèse concerne l'analyse et l'étude des possibilités d'amélioration de la fiabilité des machines électriques. Dans la première partie, un état de l'art sur les enroulements des machines électriques suivi d'une étude des causes et de détection des défauts apparaissant lors de leur fonctionnement sont présentés. Suite à cela, et après avoir situé la fiabilité dans le concept global de la sûreté de fonctionnement, un aperçu sur les conditions d'exploitation et de fonctionnement est donné. Dans le but de pouvoir apporter des améliorations de la fiabilité des machines électriques, des propositions basées sur les technologies des processus de fabrication des enroulements statoriques ont été soulignées. Aussi, des méthodes de traitement statistique portant sur la fiabilité des machines électriques sont introduites. La seconde partie concerne, d'une part, l'étude de l'influence des processus technologiques de mise en encoches des enroulements à deux couches sur la durée de vie de ces machines; d'autre part, et partant du fait que les enroulements mixtes à une-deux couches sont l'une des solutions au problème de mise en encoches automatiques des enroulements précités, une étude approfondie de leur durée de vie est mise en évidence à travers les résultats obtenus.

Mots clés: machine électrique, enroulement statorique, isolation, fiabilité, tension de claquage, défaillance, durée de vie.

Abstract: the work carried out in this thesis concerns the analysis and study of the possibilities of improving the reliability of electrical machines. In the first part, a state of the art was presented on the windings of electrical machines followed by a study of the causes and detection of defects appearing during their operation. Following this, and after having located the reliability in the overall concept of dependability, an overview of operating conditions is given. In order to be able to make improvements in the reliability of the electrical machines, proposals based on the technologies of the manufacturing processes of stator windings were highlighted. Also, statistical processing methods relating to the reliability of electrical machines are introduced. The second part concerns, on the one hand, the study of the influence of the placement technological process of the two-layer windings on the lifespan of these machines; On the other hand, knowing that the hybrid one-two-layer windings are one of the solutions to the problem of automatic placement of the aforementioned windings, a study of their lifespan is demonstrated through the obtained results.

Key words: Electric machine, stator winding, insulation, reliability, breakdown voltage, failure, lifespan.

Introduction générale	8
CHAPITRE 1	
Causes, analyses et détection des défauts dans les machines électriques à induction.	
I.1. Aperçu sur les enroulements des machines électriques	12
I.2 Causes et analyses des défaillances statoriques.....	21
I.2.1 Contraintes thermiques.....	21
I.2.2 Efforts électriques.....	22
I.2.3 Efforts mécaniques.....	23
I.2.4 Effets de l'environnement	24
I.3 Analyses des défaillances des enroulements.....	24
I.4 Causes et analyses des défauts du stator,.....	26
I.4.1 Effet thermique.....	26
I.4.2 Effets magnétiques	26
I.5 Méthodes de détections des défauts.....	27
I.5.1. Détection de défauts entre spires d'un enroulement statorique	28
I.5.2. Essai d'isolation de l'enroulement statorique.....	29
I.5.2.1 Résistance d'isolation et indice de polarisation IP.....	29
I.5.2.2 Décharge Partielle.....	30
I.6 Protection thermique du rotor.....	31
I.6.1 Eléments thermiques	31
I.6.2 Protection thermique à base de microprocesseurs.....	32
I.6.3 Protection thermique basée sur la résistance statorique.....	32
Conclusion.....	33

CHAPITRE 2**Approche sûreté de fonctionnement et concepts de fiabilité**

II.1. La sûreté de fonctionnement	34
II.2. Introduction à la fiabilité.....	36
1.3. Approche de la fiabilité d'une machine asynchrone.....	48
1.3.1. Analyse fonctionnelle de la machine asynchrone	48
II.3.2. Arbre des causes de l'enroulement rotorique	49
II.3.3. Arbre des cause de l'enroulement statorique	51
Conclusion.....	52

CHAPITRE 3**Conditions d'exploitation et de fonctionnement des machines électriques.**

III.1 Caractère de défaillance des moteurs électriques.	54
III.2 Lois physiques de vieillissement de l'isolation électrique.....	55
III.3. Possibilités d'amélioration de la fiabilité	59
III.4 Base de données et traitement statistique sur la fiabilité des moteurs électriques.....	62
II.4.1. L'observation.....	62
III.4.2. Essais déterminants.....	63
III.4.3 Essais déterminants en présence d'échantillons complets.....	64
III.5. Vérification de l'hypothèse sur la concordance des distributions expérimentale et théorique	68
III.6 Evaluation de l'indice de fiabilité	75
Conclusion.....	77

CHAPITRE 4**Influence des processus technologiques sur la fiabilité des machines électriques**

IV.1 Modèle mathématique.....	79
IV.2 Expérimentation et résultats.....	89
IV.3 Etude de l'utilisation optimale de la méthode de placement sans « levée »	92
IV.4 Formulation du problème d'asymétrie par les Perméances.....	94
Conclusion.....	100

CHAPITRE 5**Fiabilité des enroulements à une-deux couche**

V. 1. Planification des expériences ou plan d'expérience.....	101
V.1.1. Expérience factorielle totale (EFT).....	102
V.1.2. Expérience factorielle fractionnaire (EFF)	107
V.1.3. Traitement des résultats d'expérience.....	109
V.2 Durée de vie des machines électriques à enroulements une –deux couches.	112
V.3 Expérimentation et modélisation.....	119
Conclusion.....	125
Conclusion générale.....	126
Bibliographie.....	129

Introduction générale

Dans le génie électrique, les performances de systèmes se sont amplement développées au cours de ces dernières décennies et les améliorations substantielles sont apparues dans tous les domaines. Cependant cet accroissement de performances et ces améliorations ont entraîné un accroissement de la complexité des systèmes.

Dans le domaine de l'électrotechnique, l'utilisation de convertisseurs statiques a permis aux machines à courant alternatif d'accéder au domaine de la vitesse variable et de remplacer de nombreux systèmes purement mécaniques. Cela a permis d'améliorer les performances et de réduire considérablement les coûts d'exploitation. De tels systèmes, qui sont relativement complexes et qui sont constitués de sous systèmes d'origines diverses, appartiennent totalement au domaine d'application du concept de sûreté de fonctionnement. En effet, le nombre et l'hétérogénéité de sous systèmes associés constituent une difficulté supplémentaire dans l'obtention d'un haut niveau de sûreté de fonctionnement (SdF) pour le système complet.

La fonction de fiabilité est définie comme le caractère de sécurité de fonctionnement d'un matériel, exprimé par la probabilité pour qu'il accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant un temps donné. De cette définition, on peut retenir la nécessité de son omniprésence dans les entreprises et les services. Les études de fiabilité des défaillances d'éléments et de systèmes remontent au tout début de l'ère industrielle où le souci de bon fonctionnement des systèmes s'imposait déjà.

Après avoir démontré la rentabilité de la fonction fiabilité, et de son action dans les diverses entreprises, elle occupe actuellement sa place dans le monde industriel sans cesse en évolution. Elle est un enjeu économique considérable pour toute

entreprise, multinationale ou pays disposant d'outils de production disponibles et performants.

Si on revient vers la composition des systèmes de production, on remarque que l'un des éléments clefs est reconnu comme étant la machine électrique. Dans la plus petite des entreprises, le nombre de machines est de 30 à 50, alors que dans un avion de ligne, il est en moyenne de 200 machines. Cela ne fait que confirmer l'importance de ces machines dans l'assurance de la continuité de service et la SdF de façon générale.

Dans ce contexte, on se propose, dans ce travail de thèse qui est une continuité des travaux de Magister, d'analyser la fiabilité des machines électriques à induction en présence de certains aspects technologiques et de mettre en évidence les outils mathématiques qui participent aux décisions afin d'apporter une amélioration aux niveaux des performances et de la durée de vie de ces dernières.

Pour ce faire, le travail est réparti en cinq chapitres.

Le premier chapitre est dédié à la présentation des différents types d'enroulements, à l'analyse des causes de défaillances et les méthodes de détection des défauts dans les machines électriques à induction.

Le second chapitre est une introduction à la sûreté de fonctionnement et aux concepts de la fiabilité.

Le troisième chapitre est consacré aux conditions d'exploitation et de fonctionnement des machines électriques.

Le quatrième chapitre porte sur l'étude de l'influence des processus technologiques sur la fiabilité de ces machines.

Le cinquième chapitre concerne l'étude de la fiabilité des enroulements à une-deux couches destinés à la mise en encoches automatique.

Le travail est clôturé par une conclusion générale.

Les travaux de thèse ont fait l'objet de publications :

- 1)- Abdessemed R; Tomachevitch V.F.; Vakoulenko K.N.
Influence of Coils Double Flexion on the Reliability of Two-Layer Winding AC Machines. Electrical Power Components and systems, Taylor & Francis, Vol.30, N°7 (2002).

2) - R. Abdessemed, V. F. Tomachevitch, L. I. Grinetch., “ Modeling of the hybrid stator winding lifespan of induction motors ”. Electrical Power Components and Systems, Taylor&Francis , Vol.31, no.9, pp.831-839, 2003.

3) - Tomachevitch V.F., R. Abdessemed Evaluation of the even P 1-2 layer stator winding lifespan using accelerated tests. AMSE, Modeling A-2004, Vol.77, n°6,

4) - Abdessemed R.; Tomachevitch V. F., “ Windings of the rotating electrical machines”. Batna University Press, 1995.

CHAPITRE 1

Causes, analyses et détection des défauts dans les machines électriques à induction.

La majorité des défaillances du stator et du rotor sont provoquées par une combinaison de contraintes diverses qui agissent sur ces derniers.

Pour le stator, ces contraintes peuvent être groupées comme suit :

1. Thermiques : démarrages fréquents, surcharges .
2. Electriques : diélectriques.
3. Mécaniques : défaillances des roulements, coupure des barres du rotor.
4. Environnement: humidité ,objets étrangers (poussières).

Pour le rotor, ces contraintes peuvent être regroupées en :

- a) thermiques,
- b) courant de surcharge,
- c) électromagnétique,
- d) dynamique,
- e) mécanique,

Ces contraintes sont le résultat des forces et des conditions suivantes :

- 1) couple de fonctionnement,
- 2) vibration et couples transitoires,
- 3) forces dynamiques déséquilibrées,
- 4) forces magnétiques provoquées par la vibration du flux de fuite,
- 5) forces provoquées par excentricité d'entrefer,
- 6) forces centrifuges,
- 7) contrainte thermique provoquée par la différence de température (effet de peau),
- 8) contrainte thermique provoquée par dilatation.

Suivant le fonctionnement et l'entretien, la durée de vie change d'une machine à une autre.

I.1 Aperçu sur les enroulements des machines électriques

Dans l'industrie électrotechnique, l'un des problèmes majeurs dans la fabrication des machines électriques reste principalement la mise en encoches des enroulements. Le taux élevé de claquage des conducteurs ronds s'explique par le fait que l'émail du conducteur, l'isolation à la masse et entre phases de la machine sont soumis à un nombre significatif de chocs et d'autres actions mécaniques. Comme résultat, des micro-fissures apparaissent dans l'isolant, particulièrement entre les spires et les bobines. Celles-ci vont évoluer dans le cas où la machine fonctionne dans des conditions d'humidité, de vibrations, de surtensions de commutation, de forces dynamiques de démarrage et d'inversion.

Les enroulements des machines électriques diffèrent par leurs sources d'alimentation à courant alternatif ou à courant continu. De même qu'ils diffèrent par les modes de conversion en machines tournantes ou statiques (transformateurs). Ils peuvent être répartis suivant le schéma ci-dessous.

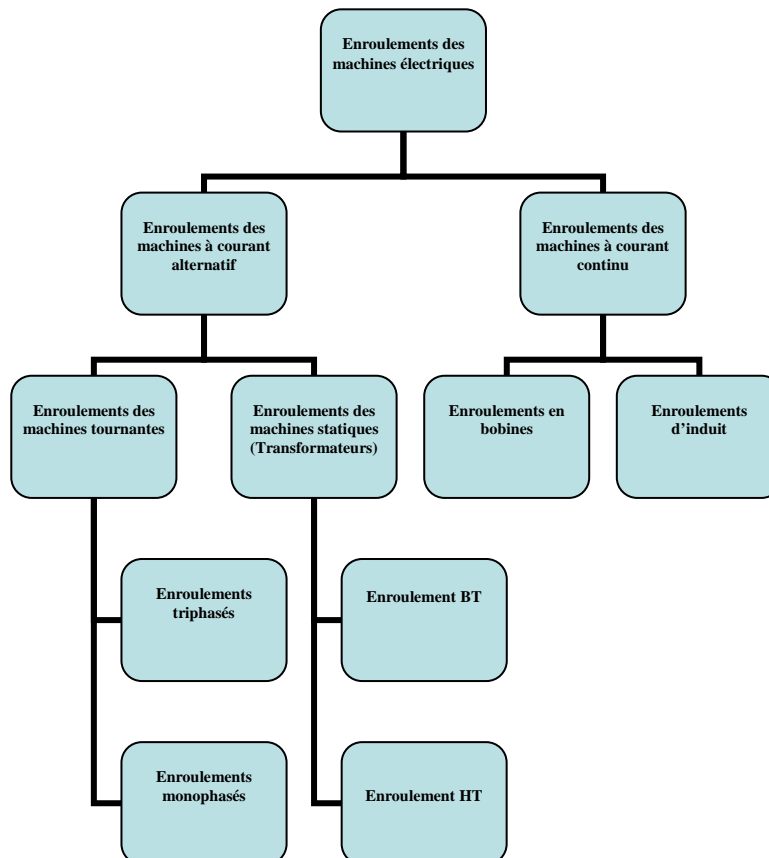


Fig.I.1 Les enroulements des machines électriques

Les enroulements à une couche constituent le premier type d'enroulements triphasés. Ils peuvent être subdivisés en enroulements par pôle conséquent et par pôle comme le montre le schéma ci-dessous.

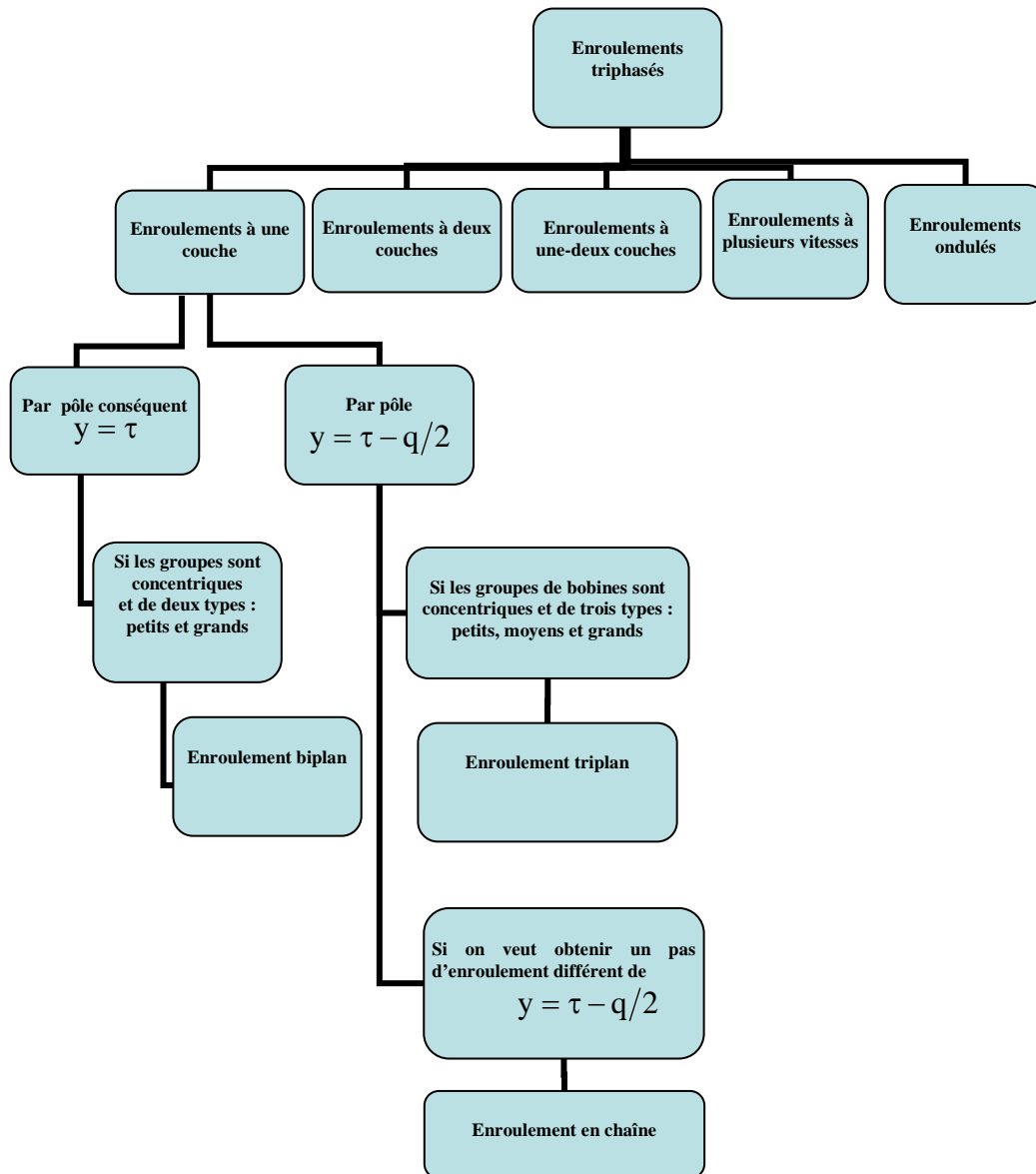


Fig.I.2 Les types d'enroulements à une couche.

L'utilisation de ces enroulements est destinée particulièrement aux machines de faibles puissances (à petits diamètres intérieurs statoriques), et aux machines de grandes puissances quand le nombre de pôles est élevé.

Le second type est représenté par les enroulements à deux couches destinés aux machines électriques de moyennes et grandes puissances, (Fig.I.3).

Ce type d'enroulement est réalisé à pas raccourci en section par pôle.

Le nombre de possibilités de raccourcissement est égal à q .

Il possède plusieurs avantages dont principalement :

- la possibilité d'éliminer les harmoniques supérieures ;
- une économie en cuivre (diminution de la longueur moyenne de la bobine).

L'inconvénient principal de ce type d'enroulement est la présence de faisceaux appartenant à différentes phases dans la même encoche, ce qui nécessite le renforcement de l'isolation entre eux.

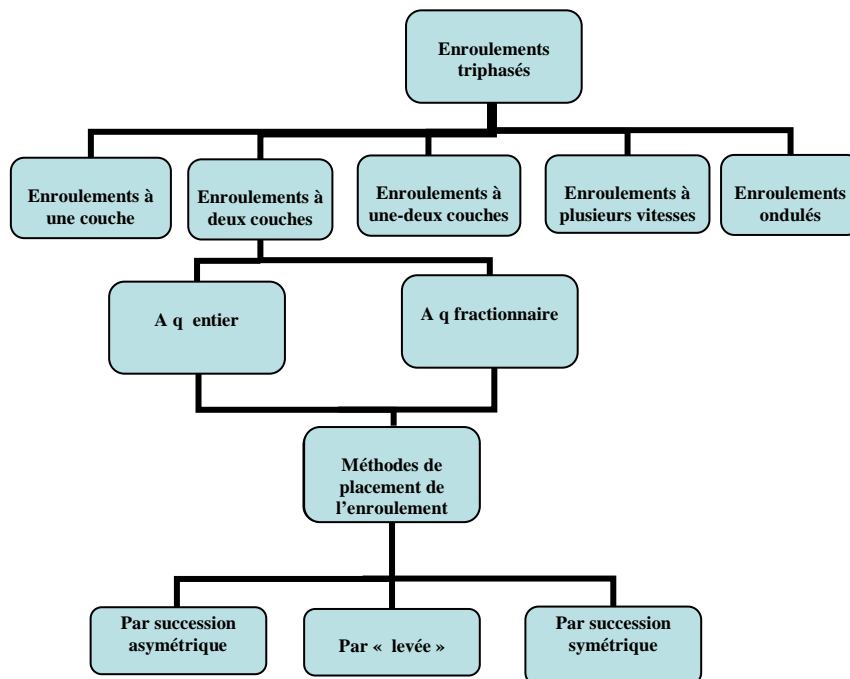


Fig.I.3 Enroulements triphasés à deux couches

Les enroulements à une-deux couches constituent le troisième type d'enroulement. Par leurs propriétés électromagnétiques, ils ne diffèrent pas des enroulements à deux couches. Cependant, ils s'adaptent mieux au processus automatique de mise en encoche, (Fig.I.4).

Ils ne doivent être utilisés que si une mise en encoche automatique est possible. Dans le cas d'un placement manuel, une presse centrifuge est nécessaire pour le traitement des parties frontales. En effet, ce type d'enroulement donne naissance à des "gonflements" (épaississements) au niveau des parties frontales et ces dernières ne sont pas uniformes par rapport à la circonférence du stator. En outre la présence des grandes bobines rend la manipulation des têtes de bobines très délicate et peut même affecter l'état de l'isolant.

Un enroulement à une-deux couches est un enroulement constitué de groupes concentriques constitués de petites bobines dont les faisceaux n'occupent que la moitié de l'encoche et des grandes bobines dont les faisceaux occupent toute l'encoche. La réalisation d'un tel enroulement n'est possible que si $q > 2$.

Le nombre de possibilités de réalisation d'un enroulement à une deux – couches pour de mêmes paramètres est de $N = q - 2$.

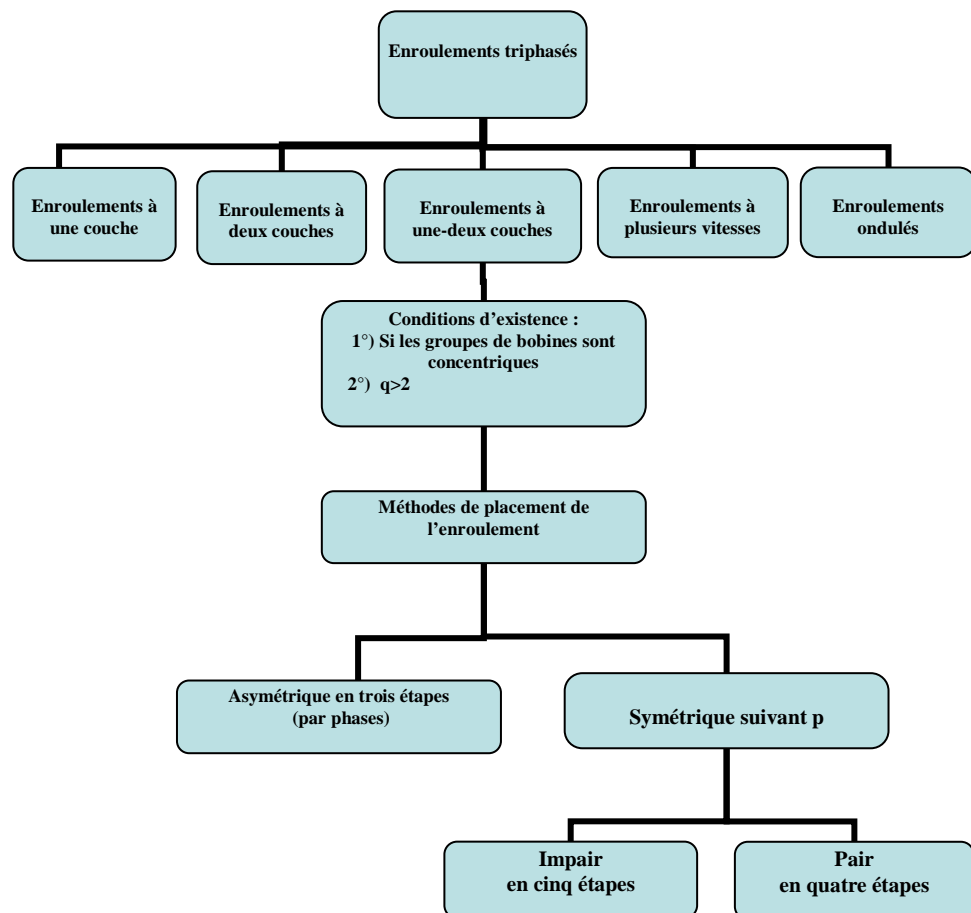


Fig.I.4 Enroulements triphasés à une-deux couches

Les enroulements à plusieurs vitesses représentent le quatrième type d'enroulement des systèmes triphasés. Ils sont utilisés dans les machines électriques nécessitant deux, trois ou quatre vitesses de rotation, (Fig.I.5).

Les enroulements triphasés à plusieurs vitesses sont généralement réalisés pour deux, trois ou quatre vitesses de rotation.

Les moteurs à deux vitesses pour un rapport $2/1$: $2p=4/2$; $8/4$; $12/6$ ont un seul enroulement à une ou deux couches.

Les moteurs à deux vitesses dont les nombres de pôles ne sont pas dans le rapport $2/1$ (ex. $2p=6/4$) ont, en général, deux enroulements indépendants logés dans les mêmes encoches. Ces enroulements sont réalisés à une couche. Cependant, pour un tel rapport il existe des méthodes qui permettent d'obtenir deux vitesses de rotation avec un seul enroulement.

Les moteurs à trois et quatre vitesses de rotation ont aussi deux enroulements indépendants.

Lors du fonctionnement de l'un d'eux et que l'autre est connecté en triangle ou possède des branches parallèles, il est recommandé d'ouvrir son circuit, car dans le cas contraire, le champ magnétique tournant créé par l'enroulement en fonctionnement peut induire une f.e.m et un courant indésirables.

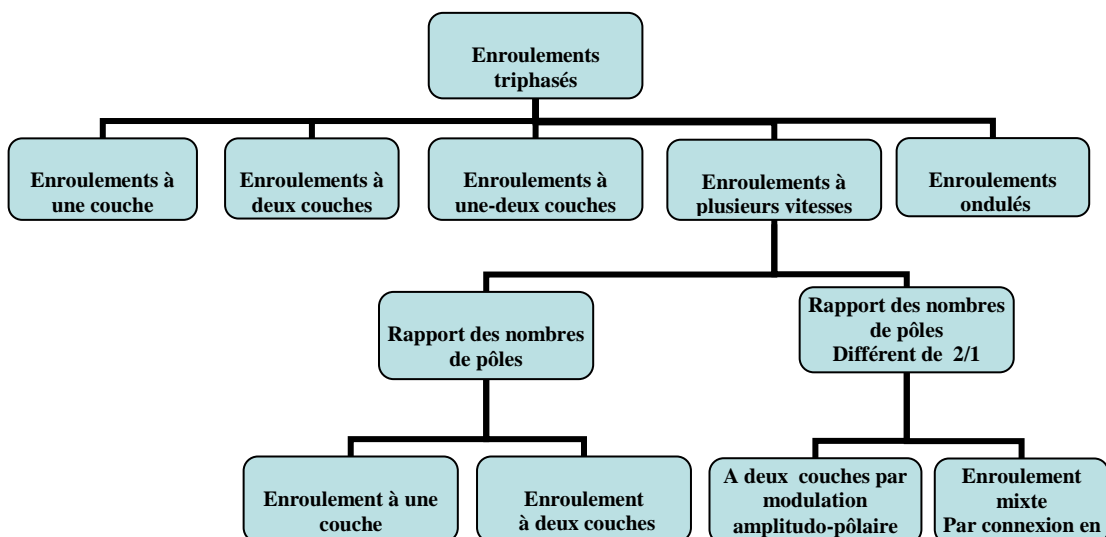


Fig.I.5 Enroulements triphasés à plusieurs vitesses

Les enroulements ondulés triphasés représentent le cinquième type d'enroulement des systèmes triphasés, (Fig.I.6).

Dans les machines électriques de grandes puissances, en particulier dans les hydro et turboalternateurs, la tension nécessaire de l'enroulement statorique est obtenue pour un nombre de spires dans la bobine $W_b = 1$ à cause des grandeurs du flux magnétique et du nombre important de bobines,

Dans les enroulements à deux couches à nombre de pôles important, on obtient un nombre conséquent de liaisons (ponts) de bobines ou groupes de bobines. De ce fait, la réalisation des enroulements à l'aide de conducteurs en méplat de section importante avec des groupes composés seulement d'une seule bobine (coefficient de distribution $k_d = 1$) mène à une dépense supplémentaire de cuivre. L'utilisation des enroulements ondulés basés sur le principe de l'enroulement à courant continu permet d'obtenir de manière automatique la connexion des groupes composant la phase sans la nécessité de recourir aux ponts.

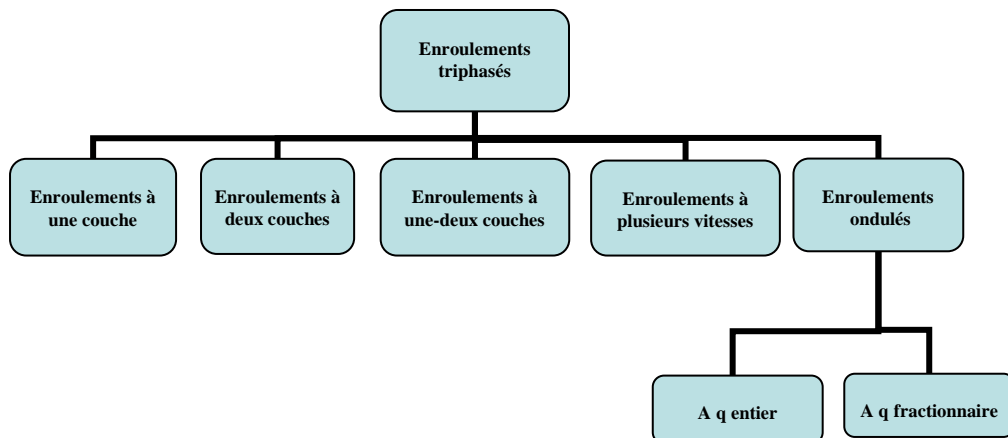


Fig.I.6 Enroulements ondulés triphasés

Dans les machines électriques monophasées, on retrouve les mêmes types d'enroulements que dans les machines triphasées. Ceux-ci ne diffèrent que par la source d'alimentation.

Tous les types d'enroulements triphasés sont applicables aux enroulements monophasés.

La conception des machines électriques monophasées est identique à celle des machines triphasées. La seule différence se situe au niveau du circuit électrique.

Il est souvent assimilé à une machine biphasée alimentée par une seule source monophasée.

Le circuit électrique comporte deux enroulements:

- a) L'enroulement principal (fonctionnel) ;
- b) L'enroulement auxiliaire.

Les deux enroulements sont alimentés en parallèle. On place un élément de déphasage (généralement une capacité ; il peut être aussi une bobine ou une résistance) en série avec l'enroulement auxiliaire.

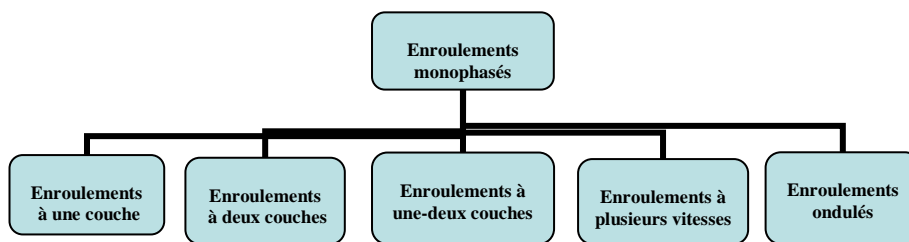


Fig. I.7 Enroulements monophasés

Les enroulements des transformateurs se présentent comme des configurations cylindriques particulières qui diffèrent l'une de l'autre par les puissances et les tensions mises en jeu.

Le transformateur est constitué d'un enroulement primaire qui reçoit l'énergie électrique et la convertit en énergie magnétique, d'un circuit magnétique qui canalise l'énergie magnétique et d'un enroulement secondaire qui convertit l'énergie magnétique en énergie électrique. La tension aux bornes des enroulements est proportionnelle au nombre de spires.

Les transformateurs triphasés, selon leurs puissances, sont subdivisés en :

- transformateurs secs ;
- transformateurs immergés.

Les transformateurs secs nécessitent un refroidissement efficace et une maintenance régulière. Ils doivent être montés dans des cellules interdisant l'accès aux parties sous tension. Leurs enroulements sont généralement moulés sous vide dans un isolant à base de résine époxy et dont le refroidissement est assuré par l'air environnant. La surveillance thermique des enroulements est assurée par des sondes de températures entraînant la mise hors service en cas d'élévation de température.

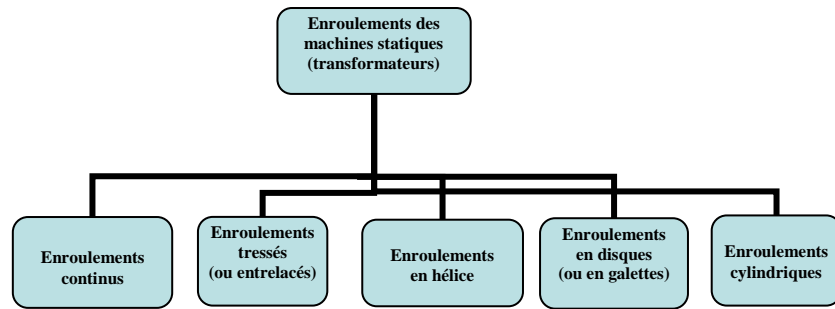


Fig. I.8 Enroulements des transformateurs

Les enroulements des machines à courant continu représentent une catégorie à part dictée par la nature de la source d'alimentation.

La machine à courant continu est caractérisée par plusieurs circuits électriques ou enroulements, dont le nombre varie suivant la puissance.

Dans les machines de faible puissance, on trouve l'enroulement d'induit et l'enroulement inducteur ou enroulement d'excitation.

Dans les machines de moyennes et de grandes puissances, à part les enroulements d'induit et d'excitation, on trouve aussi l'enroulement auxiliaire, l'enroulement stabilisateur pour les moyennes puissances, et l'enroulement de compensation pour les grandes puissances.

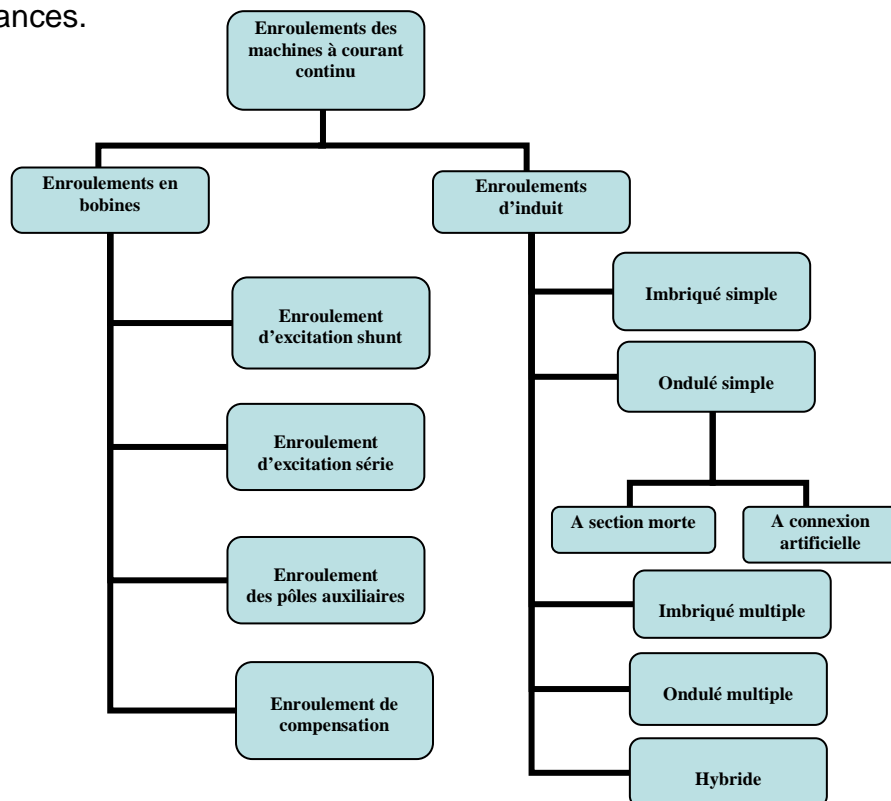


Fig.I.9 Enroulements des machines à courant continu

Aujourd'hui, les machines électriques rendent de plus en plus de services au citoyen. Elles constituent un élément essentiel de toute installation énergétique ou industrielle, et sont à la base du fonctionnement de bien des réalisations d'ingénierie telles les chaînes automatiques de production, les locomotives ou encore les grues.

La défaillance d'un simple moteur dans une unité de production entraînera l'arrêt, partiel ou total, de chaînes entières pour des périodes considérables, et s'accompagne généralement par des arrêts de production.

La fonction d'une machine électrique est la transformation d'énergie d'une forme à une autre, dont au moins une est de nature électrique. Cette transformation, qui est à la base un phénomène électromagnétique, dépend dans une large mesure des propriétés des enroulements de la machines (le type, la qualité de l'isolant, le procédé de mise en encoches) ainsi que d'autres opérations technologiques intermédiaires.

Des études statistiques menées par plusieurs institutions sur les défaillances des machines électriques ont montré que 70% à 90% de tous les incidents entraînant un arrêt ou pas, impliquent les enroulements des machines.

Les matériaux isolants utilisés dans la construction des machines électriques sont divisés selon leurs tenues à la chaleur en sept classes : Y, A, E, B, F, H et C. Ils sont identifiés par le tableau ci-dessous.

Désignation de la classe de tenue à la chaleur	Température admissible (°C)	Caractéristiques sommaires des principaux types de matériaux
Y	90	Matériaux fibreux en cellulose et en soie imprégnés
A	105	Matériaux fibreux en cellulose et en soie imprégnés
E	120	Certaines pellicules organiques synthétiques
B	130	Matériaux à base de mica et de fibre de verre

F	155	Matériaux à base de mica et de fibre de verre avec des imprégnants synthétiques
H	180	Tissu de verre imprégné ; stratifié de tissu de verre, élastomères de silicone
C	>180	Matières céramiques, verre, quarts

Tab.1.1 Classification des matériaux isolants

I.2 Causes et analyses des défaillances statoriques,[1][2][4].

Cette partie constitue une analyse des diverses contraintes et leurs influences sur le stator contribuant ainsi à une défaillance prématurée.

I.2.1 Contraintes thermiques

L'effet du vieillissement thermique rend le système d'isolation vulnérable pour d'autres contraintes qui produisent la défaillance.

Une fois que le système d'isolation a perdu son intégrité physique, il ne résiste plus et perd ses durées diélectrique et thermique. Si l'une de ces contraintes devient critique, la défaillance se produira indépendamment de la quantité de vieillissement thermique. Pour éviter cette situation, il faut réduire la température de fonctionnement ou augmenter la classe des matériaux d'isolants.

Le déséquilibre de la tension d'alimentation entraîne une augmentation de la température des enroulements. Pour cette raison, dans tous les cas de figure, on doit assurer une tension d'alimentation triphasée équilibrée.

Suite aux variations de la tension, ces moteurs électriques sont susceptibles d'être endommagés. Ces variations affectent leurs performances. C'est pourquoi ils sont conçus pour fonctionner de manière satisfaisante avec une variation de tension ne dépassant pas les 10%. Fonctionner en dehors de cette gamme pourrait réduire considérablement la durée de vie du moteur.

Lors des démarrages, le courant peut atteindre de cinq à huit fois le courant nominal. Un moteur soumis à un régime intermittent à temps de repos court verra la température de ses enroulements augmenter.

Les moteurs électriques sont conçus pour fonctionner en dessous des limites normales pour un usage spécifique d'isolation avec une estimation en dessous de la température de fonctionnement. Dans certains cas, on peut estimer que la température des enroulements augmentera à mesure que la charge augmente. De ce fait, il est possible d'estimer la contrainte de la surcharge sur la durée de vie des enroulements.

les moteurs standards sont conçus pour fonctionner à des températures de 40°C max. Le dépassement de cette limite entraîne une réduction de la durée de vie de l'isolation.

La chaleur produite dans la machine est absorbée par conduction, convection et le rayonnement. Toute obstruction à l'écoulement d'air au dessus du moteur empêchera le rayonnement de la chaleur et causera une augmentation de température des enroulements.

I.2.2 Efforts électriques

Les défaillances des enroulements sont liées à la classe d'isolant et son vieillissement.

Il existe une relation entre la durée de vie de l'isolation et les effets de tension qui sont appliquées aux isolants (diélectriques) Ces derniers possèdent une résistance à la tension appelée tension de claquage.

Ces contraintes peuvent être décomposées suivant trois groupes :

- 1- Entre phases ;
- 2- Entre spires ;
- 3- à la terre.

Un choix adéquat de l'isolant permet d'assurer une meilleure durée de vie.. lors du fonctionnement des machines électriques l'apparition d'une micro fissure à la surface du fil de bobinage, sous l'influence des conditions d'exploitation et entraîne le contact à la masse ou avec un autre conducteur. Cette évaluation est facilité et amplifiée en présence de l'humidité. Le pourcentage d'humidité est directement lié à la vitesse de dégradation de l'isolant. Pour cette raison, on doit maintenir un environnement de fonctionnement propre et sec.

les coupures de tension ont pour conséquence de réduire la durée de vie des enroulements et entraîne une défaillance prématurée.

Ces tensions passagères peuvent être provoquées soit :

- par un défaut entre phases, entre ligne et terre, entre ligne et la masse ou un défaut de tension triphasée qui causent des surtensions;

- l'absence de mise à la terre entraînant une mise à la terre intermittente qui fait apparaître des oscillations de haute tension;

- la fermeture d'un contact entraîne l'apparition d'une impulsion se propageant dans le circuit influençant ainsi la tension d'alimentation du moteur;

- la présence de condensateurs utilisés pour l'amélioration du facteur de puissance peut entraîner une montée subite de la tension. Des montées subites des tensions peuvent se produire lors de la commutation entre un moteur, un condensateur et la source d'énergie. Cette montée est indépendante de la valeur de la capacité;

- quand une panne de l'isolation sur un système d'alimentation se produit en un point, les montées subites d'impulsion peuvent se développer. Une telle panne dans des conceptions à haute tension peut causer des montées subites de tension;

- des montées subites de tension peuvent être provoquées par la foudre. Ces tensions se propagent dans les lignes en fonction du temps de montée et de l'impédance du système;

- On peut observer lors de la marche / arrêt ou même pendant la commutation des pointes de tension. Les coupures provoquées par ces derniers apparaissent habituellement sur les enroulements en tant que défauts entre spires ou défaut spires /masse.

I.2.3 Efforts mécaniques ,[3].

Le courant dans l'enroulement du stator produit une force sur les enroulements. cette force atteint son maximum lors du cycle de démarrage , faisant vibrer les enroulements. Ce mouvement peut endommager l'isolation des enroulements, détacher les clavettes et endommager les conducteurs. Ce phénomène est amplifié dans les machines de grande vitesse comparativement

souffrent généralement davantage du mouvement d'enroulement que les machines à ceux de faibles vitesses. Plus les parties frontales de l'enroulement sont longues, plus le problème est grand et plus la fréquence est grande au démarrage, et plus le temps d'accélération est long, ce qui affaiblit le système d'isolation.

I.2.4 Effets de l'environnement

Pour assurer une plus longue durée de vie sans panne, il faut maintenir la machine propre et sèche, intérieurement et extérieurement.

La présence de matériel étranger peut avoir les effets suivants sur le moteur:

- 1- Réduction de la dissipation thermique, qui augmentera la température de fonctionnement.
- 2- Défaillances des roulements .

I.3 Analyse des défaillances des enroulements, [1][4].

Les différents défauts qui peuvent avoir lieu sont de l'ordre de cinq : les court-circuits entre spires, entre bobines, entre phases, bobine à la masse et circuit ouvert, (fig.1.10).

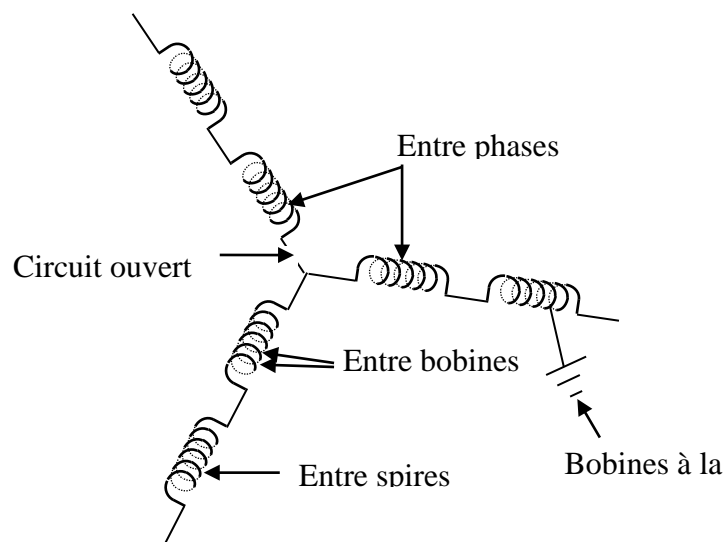


Fig. 1.10 Différents types de défauts dans l'enroulement statorique
Connecté en étoile.

En analysant le défaut de bobinage, il est très difficile de déterminer les causes exactes du défaut et les résultats du problème. Un simple exemple permettra d'illustrer cette difficulté.

Une fissure du moteur commence aléatoirement. Elle est due au mouvement excessif de bobine et quelques spires sont court-circuitées entre elles. Dans ces conditions, il y a une généralisation de propagation de chaleur avec un court circuit de bobine, ainsi la détérioration de l'isolation et éventuellement un défaut à la masse dans les encoches. En fonction du type de protection du moteur, le moteur continue à tourner avec l'élévation de température qui se généralise dans la phase ou l'isolation à la masse est détruite. A ce stade, un court circuit entre phases ou à la masse se produit, et le moteur est rapidement mis hors circuit.

L'inspection révèle que tous les cinq types de défauts sont présents, mais la condition de défauts entre spires est le problème initial ; les autres défauts ne sont que les conséquences du défaut initial. Le contact entre spires est d'habitude très difficile à reconnaître.

Habituellement l'aspect général du moteur donne un indice sur la cause possible de la défaillance.

Généralement, il est difficile de reconstruire les conditions de fonctionnement réelles à l'heure de la défaillance. Cependant la connaissance des conditions générales de fonctionnement sera utile.

On différencie Les défaillances des enroulements selon le type de court-circuit. Le court-circuit symétrique entraîne un suréchauffement uniforme dans toutes les phases.. La chaleur ainsi produite est provoquée par une surcharge du courant ou par l'incapacité du moteur à refouler la chaleur dégagée.

Les causes possibles sont:

- a) - charge excessive ;
- b) - nombre de démarrages ;
- c) - ventilation insuffisante ;
- d) - température ambiante élevée ;
- f) -rotor défectueux ;
- g) - défaillance des roulements.

Quand l'enroulement est à la masse, il y a apparition d'un court-circuit asymétrique. Le défaut à la masse peut provoquer des destructions importantes au niveau du bobinage à cause des courants de défaut élevés . De plus, ce genre de défaut peut engendrer des chocs d'électrocution au personnel opérant sur la machine.

Les causes possibles sont :

- frottement du rotor avec le stator;
- isolation endommagée : entre spires ou entre phases;
- tension transitoire, l'éclair, coups de foudre ;
- humidité élevée, matériaux étrangers à la machine ;
- baisse de tension;
- mouvement des bobines dans les encoches.

I.4 Causes et analyses des défauts du stator, [2][4].

I.4.1 Effet thermique

La surcharge en courant peut se produire pendant l'accélération, le fonctionnement, l'arrêt brusque. Les conditions d'arrêt sont la cause principale d'endommagement du rotor. Les capteurs thermiques sont généralement installés dans le stator, et leurs réactions à l'élévation de température produite dans le rotor peut être tardive.

Les déséquilibres thermiques peuvent être causés par les conditions de démarrage et de fonctionnement.

I.4.2 Effets magnétiques

L'action du flux de fuite sur les encoches, résulte des courants de barres, qui génèrent des forces électrodynamiques.

L'entraînement magnétique déséquilibrée est un problème potentiel qui peut causer le fléchissement du rotor et toucher l'enroulement du stator. En principe, le rotor est centré dans l'entrefer, et les forces magnétiques sont équilibrées dans les directions opposées ne causant aucun débattement du rotor. En réalité, les rotors ne sont pas parfaitement centrés au niveau de l'entrefer et des phénomènes tels que l'excentricité, le poids du rotor et l'alignement de la machine présentent une opposition contre le centrage du rotor .

L'excentricité se produit dans l'espace entre le rotor et le stator. Elle est diminuée d'un côté et augmentée de l'autre.

La reluctance du flux magnétique est dans ce cas réduite d'un côté et augmentée de l'autre. Par conséquent, ce sont les forces déséquilibrées qui agissent sur le rotor.

Si une certaine excentricité du rotor est toujours prévue sans l'accrochage, c'est grâce à la rigidité de l'arbre.

La probabilité que le rotor accroche le stator est généralement plus grande lors du démarrage où les ampères-tours sont les plus grands.

L'élimination du défaut passe par la correction de l'entrefer en alésant le stator ou en équilibrant le rotor.

En plus des problèmes d'accrochage du stator, l'excentricité peut causer des bruits ou des vibrations.

I.5 Méthodes de détections des défauts, [19]

Pour assurer le fonctionnement conforme et fiable des systèmes industriels modernes, la surveillance de l'état des machines électriques a connu un intérêt particulier dans l'industrie, ce qui a entraîné une attention particulière de ces machines.

Ainsi, le but principal est de développer des approches pour la détection fiable de défauts à une étape précoce, ce qui permettra de procéder à l'arrêt de la machine d'une façon contrôlée et dans un cadre de programme d'entretien réduisant de ce fait les pertes de production, le temps d'arrêt, et les dommages au matériel. Des études approfondies ont montré qu'un grand pourcentage de pannes dans une machine à induction est associé aux enroulements, [1]-[6].

Par conséquent, l'objectif est de procéder à une étude technique sur la situation actuelle de la surveillance et la détection des défauts liés au stator dans les machines à induction. Cette étude couvre les éléments suivants : les défauts de spires d'enroulement du stator, les défauts du noyau du stator, la surveillance de la température et la protection thermique, ainsi que les tests d'isolations de l'enroulement statorique.

Les origines des causes de l'apparition de défaut, les techniques disponibles pour sa détection et les recommandations de recherche sont les étapes à suivre. Bien qu'une attention particulière est donnée aux méthodes directe et sans capteurs, qui utilisent les tensions et les courants de la machine pour extraire les signatures du défaut, des techniques indirectes telles que la détection par la décharge partielle sont également employées.

1.5.1 Détection de défauts entre spires d'un enroulement statorique

L'enroulement statorique d'une machine à induction est sujet à des effets induits par plusieurs facteurs, qui comprennent les surcharges thermiques, les vibrations mécaniques, ainsi que les pics de tension causés par les dispositifs de régulation de la vitesse. La détérioration de l'isolation d'enroulement commence habituellement par l'apparition de défauts entre spires. Le courant de défaut, qui est de l'ordre de deux fois le courant correspondant à un test de rotor bloqué, peut causer un grave échauffement local provoquant un élargissement rapide de la zone de défaut dans l'enroulement statorique. Un défaut d'isolation entre l'enroulement et la terre peut faire apparaître un fort courant vers la terre, lequel entraînerait des dommages irréversibles du noyau de la machine. Si le défaut est détecté à un instant précoce, la machine peut être remise de nouveau en service après rebobinage du stator. La protection type contre les défauts d'isolation du stator inclut l'utilisation des relais de défaut à la terre et les relais de séquence de phases ou des relais d'équilibre de phases. Les relais de séquence de phase causeraient des problèmes avec des tensions d'alimentation non équilibrées. Les relais de défaut à la terre ne sont pas efficaces pour la détection précoce de défaut.

Des méthodes sans capteurs pour la détection des défauts entre spires sont basées sur la surveillance de courants, de tensions et de l'asymétrie de la ligne électrique. Cette asymétrie est causée par des courts-circuits entre spires de l'enroulement. Pour les machines raccordées directement au réseau, le courant de séquence négatif est une signature fondamentale du défaut d'enroulement.

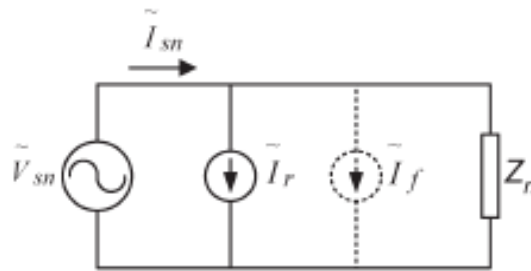


Fig.I.11. Circuit équivalent de séquence négative pour un moteur ayant un défaut statorique entre-spices [12].

Parmi les travaux proposés, l'approche de la composante de séquence fournit un meilleur rapport signal/bruit. Elle est plus facile à mesurer et n'exige aucune instrumentation spéciale en plus des sondes de courant. La sensibilité basée sur la séquence des composantes pour la détection de défaut entre-spices dépend de la compensation de l'effet de non linéarité du modèle. Le courant est affecté par le déséquilibre dans l'alimentation d'énergie et par les asymétries dans la machine et l'instrumentation.

Les Méthodes qui emploient les modèles de la machine à induction [7], [13] peuvent compenser seulement et approximativement l'effet des tensions non équilibrées à l'aide du circuit équivalent de séquence négatif.

I.5.2. Essai d'isolation de l'enroulement statorique [12] [19]

I.5.2.1 Résistance d'isolation et indice de polarisation IP

La résistance d'isolation et les essais de IP sont des indicateurs très utiles de contamination et d'humidité sur les surfaces exposées de l'isolant d'un enroulement, en particulier quand il y a des micro-fissures dans l'isolation. Ces essais sont facile à réaliser.

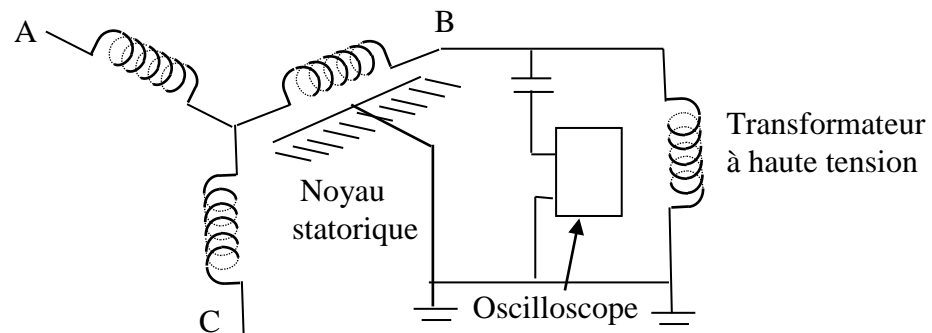


Fig.I.12 Système de mesure de décharge partielle (DP)

La résistance d'isolation est le rapport de la tension de court circuit (CC) appliquée entre les conducteurs d'enroulement et la terre, au courant résultant. Quand une tension CC est appliquée, quatre composantes de courants apparaissent:

- 1) un courant de charge de la capacité de l'enroulement ;
- 2) un courant de polarisation;
- 3) un courant de conduction à travers l'isolation vers la terre, (généralement nul en absence de fissures;
- 4) un courant de fuite entre les conducteurs dénudé et la terre.

Les deux premiers courants vont s'atténuer avec le temps. Les deux derniers, a peu près constants, sont dictés par la présence de l'humidité. Ainsi pour connaître les degrés d'humidité et de propreté de l'enroulement, la résistance d'isolation est souvent mesurée après 1 minute et après 10 minutes, et le rapport de la lecture 10 minutes à 1 minute s'appelle IP. Lors d'un défaut ou perforation d'isolement, la résistance d'isolation est proche de zéro. La résistance d'isolation est très dépendante de la température et de l'humidité de l'enroulement. L'avantage de l'IP est qu'il n'est pas dépendant de la température, et par conséquent, il est plus fiable.

I.5.2.2 Décharge Partielle

Les décharges partielles (DP ne sont que des décharges d'étincelles qui peuvent se produire dans l'isolation à haute tension dans le vide et à la surface des enroulements.

Les décharges sont dites "partielles" lorsque la panne 'est pas totale. La DP contribue principalement au vieillissement de l'isolation.

I.5.2.2.1 Test indirect(Offline) de DP

Dans ce test, l'enroulement est alimenté par une tension externe AC normale (ph-N), où un détecteur de DP est utilisé pour mesurer l'activité du DP dans l'enroulement. Cet essai est réalisé de manière échantillonnée sur des moteurs et des générateurs de 4 kilovolts et plus. Beaucoup d'utilisateurs réalisent cet essai pendant les pannes courtes. Chaque étincelle de décharge est une impulsion courte et rapide qui se propage à travers l'enroulement statorique [21]. Plus la décharge est

grande, plus l'impulsion de courant et la tension d'impulsion qui l'accompagne sont grands.

La méthode d'essai habituelle consiste à augmenter graduellement la tension AC jusqu'à l'observation des impulsions de DP. L'augmentation continue de l'activité du PD entre tests est une indication que le vieillissement se produit et qu'une inspection visuelle des conditions de l'enroulement est nécessaire.

I.5.2.2.2 Test direct(Online) de la DP

L'essai direct (online) de DP est semblable à l'essai indirect (offline) sauf qu'une alimentation de l'enroulement n'est pas nécessaire. Dans ce cas, le stator du moteur est relié à la source de tension et fonctionne normalement. L'activité de la DP est mesurée par plusieurs détecteurs de DP.

Contrairement au test de la DP off line, on observe une interférence électrique considérable à partir de la source de tension. Plusieurs méthodes ont été développées pour éliminer ces interférences [22], [23], [25]. La méthode la plus utilisée dans les cas du moteur est celle qui emploie un couplage capacitif par phase installée sur les bornes du moteur, où la DP est séparée du bruit électrique sur la base de la forme d'impulsion.

I.6 Protection thermique du rotor

L'analyse des défaillances des machines électriques montre que la surcharge thermique est la source fondamentale des défauts [1]-[5][19]. Celle-ci accélère la dégradation des principaux éléments du moteur. La protection thermique est la caractéristique principale des dispositifs de suivi de protection d'un moteur. L'isolation du stator est l'élément le plus vulnérable à la surcharge thermique, car sa température limite est atteinte avant toute autre partie du moteur. Par conséquent, la surveillance thermique du stator est primordiale pour prolonger la durée de vie du moteur.

I.6.1 Éléments thermiques

Les dispositifs les plus répandus pour la protection thermique sont les fusibles, les disjoncteurs magnéto-thermique, et les relais de surcharge. Les fusibles ou les disjoncteurs magnéto-thermique sont principalement employés en tant qu'éléments

de secours pour la protection de court circuit et de défaut à la terre. Généralement, la protection thermique des moteurs se base sur les fusibles et des relais de surcharge, qui assurent la protection lors des régimes dynamiques et transitoires. Cependant, ces dispositifs sont limités car il est difficile de couvrir les conditions thermiques du moteur par un seul élément thermique. Pour cela, on utilise des relais de perte de phase et de déséquilibre de courants.

I.6.2 Protection thermique à base de microprocesseurs

L'apparition des microprocesseurs a permis la mesure des différents paramètres de la protection thermique. Cette approche est fondée sur l'estimation de température basée sur un modèle de transfert thermique [26]-[28]. Beaucoup de modèles thermiques sont proposés pour une protection thermique où la complexité du modèle est un compromis entre la précision dans l'estimation de température et le calcul requis.

L'un des inconvénient majeurs de la protection thermique du modèle thermique est l'incapacité de répondre aux changements dans les caractéristiques thermiques du moteur telles que les conditions anormales de refroidissement [26], [29].

I.6.3 Protection thermique basée sur la résistance statorique

Une approche alternative pour estimer la température de l'enroulement statorique T_s , qui est l'élément le plus vulnérable en cas d'une surcharge thermique, est l'estimation de la résistance d'enroulement statorique R_s , et le calcul de T_s par :

$$\hat{T}_s = T_{s0} + (\hat{R}_s - R_{s0}) / \alpha R_{s0}$$

Où T_{s0} et R_{s0} représentent T_s et R_s à une température de référence, et α est le coefficient de température de la résistivité $1 / ^\circ\text{C}$. Beaucoup de méthodes de surveillance thermique du moteur basées sur l'estimation de R_r sont proposées. La résistance rotorique peut également être employée comme indicateur de la température du moteur.

En conclusion, la maîtrise des enroulements et les processus de fabrication peuvent dans une commune mesure assurer un faible taux de défaillances. Cependant, en raison de la nature destructive de la plupart de ces dernières, il n'est pas facile, et parfois même impossible, de déterminer la principale cause de défaillance. Par un processus d'élimination, on peut généralement être assuré de bien identifier la cause la plus probable de l'échec. Le point essentiel dans la marche par le biais de ce processus d'élimination est d'utiliser les principales étapes de l'analyse de la classe de défaillance en notant l'aspect général du moteur, identifiant l'état de fonctionnement au moment de la défaillance, ainsi que l'acquisition de connaissances de l'historique du moteur.

CHAPITRE 2

Approche sûreté de fonctionnement et concepts de fiabilité

II.1. La sûreté de fonctionnement , [31].

L'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un système repose sur l'identification des défaillances qui peuvent affecter ses composants, puis sur l'étude des combinaisons de ces défaillances susceptibles d'entraîner sa mise en panne. Avant de décrire les diverses méthodes utilisées, il est essentiel de préciser les principaux concepts mis en jeux.

Un système est un ensemble identifiable d'éléments discrets (ou composants), interconnectés ou en interaction. Il se définit généralement pour sa mission c'est-à-dire une ou plusieurs fonctions qu'il doit accomplir dans des conditions et dans un environnement donnés. Un système est donc caractérisé par ses fonctions, sa structure, ses conditions de fonctionnement et d'exploitation ainsi que pour son environnement.

Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'une entité (système, sous-système ou composant) à accomplir une fonction requise. Elle résulte d'une cause de défaillance qui est définie comme une circonstance liée à la conception, la fabrication ou l'emploi de l'entité et qui a entraîné la défaillance. Après l'apparition d'une défaillance, on considère que l'entité est en panne, c'est-à-dire inapte à accomplir une fonction requise.

La Sûreté de fonctionnement d'un système est son aptitude à remplir sa mission. Ce concept regroupe quatre disciplines : Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité.

Celle-ci permet de garantir la disposition de performances fonctionnelles spécifiées d'un système, au moment voulu pendant une durée prévue, sans dommage pour lui-même ou son environnement.

Les quatre disciplines se définissent comme:

- « la fiabilité » est quantifiée par la probabilité qu'un dispositif (ou système) puisse accomplir une mission requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné ;
- « la disponibilité » est quantifiée par la probabilité qu'un dispositif (ou système) soit en état d'accomplir une mission requise dans des conditions données, à un instant donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée » ;
- « la maintenabilité » est quantifiée par la probabilité, pour un dispositif (ou système) donné, qu'une opération de maintenance active puisse être effectuée pendant un intervalle de temps donné lorsque cette maintenance est assurée dans des conditions données et avec l'utilisation de procédures et de moyens prescrits ;
- « la sécurité » est quantifiée par la probabilité qu'un dispositif (ou système) possède l'aptitude à éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques dans des conditions données.

Ces quatre définitions mettent en évidence le fait que l'on est passé d'un concept qualitatif (SdF) à des concepts quantitatifs basés sur des considérations probabilistes.

L'étude du besoin à l'origine de l'analyse de sûreté de fonctionnement du système est une étape indispensable. Elle est souvent menée de manière informelle, mais elle doit faire l'objet d'une attention particulière pour les systèmes complexes.

Que l'objectif du travail soit qualitatif, ou quantitatif, la démarche consiste à appréhender la logique d'un système pour déterminer ses états de bon fonctionnement, ceux de mauvais fonctionnement et les liaisons entre états.

Une analyse doit donc identifier les méthodes susceptibles de permettre une conservation de l'information principale tout en automatisant le raisonnement qualitatif ou quantitatif.

II.2 Introduction à la fiabilité, [32-36].

Le mot fiabilité s'applique à deux concepts majeurs, celui de la sécurité et celui de la compétitivité.

Le premier concept est relié au développement du progrès scientifique, par contre le second dépend essentiellement de la rentabilité car toute conception doit trouver sa place sur un marché de plus en plus saturé.

C'est à ce difficile compromis et devant la complexité croissante des ensembles mécanique, électriques, électroniques que la fiabilité est passée progressivement du réflexe du concepteur à une science possédant ses bases et ses principes,[34].

II.2.1. Notion de base de la fiabilité

La fiabilité, traduit le terme anglo-saxon « RELIABILITY » introduit dans les années soixante pour signifier la science des défaillances.

Un élément défaillant engendre des arrêts fréquents du système, ce qui provoque des perturbations dans la chaîne de production. Littéralement la fiabilité est la probabilité de bon fonctionnement d'un équipement dans des conditions données pendant un temps donné ; ou degré de confiance que l'on peut accorder à une chose. Par conséquent la fiabilité est caractérisée par :

a) la probabilité

Une probabilité se définit par le rapport entre le nombre de cas favorables et le nombre de cas possibles, pour réaliser un événement quelconque.

b) accomplissement d'une fonction

Le dispositif à étudier du point de vue fiabilité devra être dans un état tel qu'il lui permette d'accomplir la fonction requise d'une manière satisfaisante.

c) conditions données

Les conditions sont les contraintes dues à l'environnement : physiques, chimique, électrique et mécaniques (température, humidité, pression, vibration etc...) et humain (mode opératoire, contrôle, maintenance).

d) le temps

Généralement il exprime un nombre de cycles d'opération à effectuer ou le temps entre deux défaillances.

II.2.1. Organisation du programme de fiabilité

Pour parvenir à la construction d'un produit avec un minimum de risques, on doit organiser un programme d'étude de la fiabilité qui devra se dérouler parallèlement et dans un temps que le programme de développement, de mise en fabrication et de mise en clientèle de ce produit.

Donc au départ on devrait établir des spécifications de fiabilité. En cours d'études de tout système, on doit procéder à une évaluation théorique, un développement des prototypes, des essais de fiabilité, et lors de la mise en fabrication, à une qualification des produits fabriqués. Enfin lorsque le produit est en clientèle, on doit mettre en place un système de retour d'informations concernant les défaillances de ce produit.

Finalement la fiabilité peut être divisée en trois parties :

a) fiabilité prévisionnelle

Elle est calculée par le concepteur sur la base d'un modèle mathématique de fiabilité de l'ensemble du système. Ce modèle est constitué par des relations permettant de déterminer la probabilité de bon fonctionnement du système.

b) fiabilité estimée :

Elle est mesurée au cours d'essais spécifiques effectués dans le cadre d'un programme d'essais bien défini.

c) fiabilité opérationnelle

Cette fiabilité est mesurée par l'utilisateur en se basant sur des observations et l'analyse du comportement du produit pendant le fonctionnement.

En général on peut schématiser les méthodes d'évaluations de la fiabilité à l'aide de l'organigramme suivant :

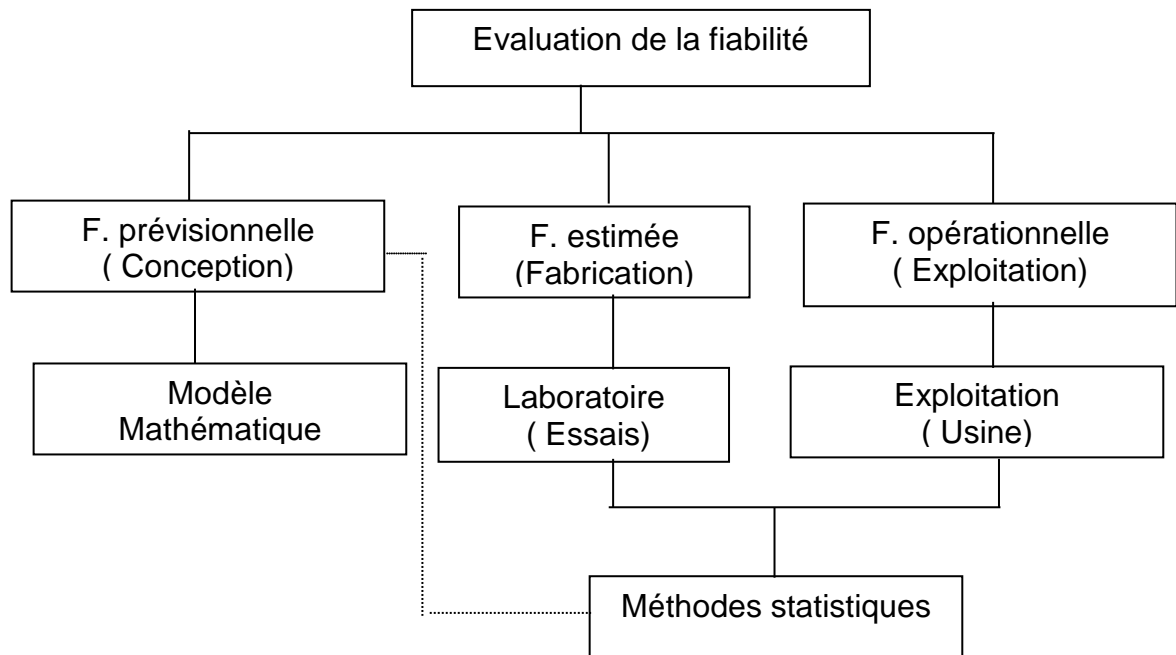


Fig.II.1 Méthodes d'évaluation de la fiabilité

II.2.2 Défaillances

Une défaillance est caractérisée par la fin de l'aptitude d'un dispositif (ou d'un système) à accomplir la fonction qu'on requiert de lui. Cette définition est générale, elle peut être précisée par le degré de gravité de la défaillance. Pour se situer dans cette vague définition, prenons deux exemples courants.

La rupture de la chaîne de distribution d'un moteur de l'automobile constitue une défaillance grave, totale, empêchant complètement le moteur d'accomplir sa fonction.

Par contre la défaillance de l'avertisseur oblige le conducteur d'être plus prudent, celle-ci est moins grave, réduisant les performances, mais n'interdisant pas l'accomplissement de la fonction.

Ces deux exemples nous mènent à faire une classification de défaillances en fonction de certaines conditions :

- 1) En fonction de la rapidité de manifestation
 - défaillance soudaine, qui n'aurait pas pu être prévenue par un examen antérieur des caractéristiques ;
 - Défaillance progressive, qui aurait pu être prévenue par un contrôle antérieur des caractéristiques.

- 2) En fonction du degré d'importance
 - Défaillance partielle, déviation d'une ou de plusieurs caractéristiques au-delà des limites spécifiées telles qu'elles n'entraînent pas une disparition complète de la fonction requise du dispositif ;
 - Défaillance complète, disparition complète de la fonction requise.

- 3) En fonction de la rapidité de manifestation et du degré d'importance.
 - Défaillance catalectique, soudaine et complète ; exemple : défaillance d'un composant électronique suite à un court-circuit ;
 - Défaillance par dégradation, progressive et partielle ; Exemple : la corrosion est une dégradation d'ordre chimique ou électrochimique subie par les matériaux métalliques par action de l'environnement.

- 4) En fonction des causes.
 - Défaillance primaire, problème d'usure ou de défauts de conception ou de fabrication ;
 - Défaillance de commande, émissions de signaux incorrects de commande ou de contrôle.

- 5) En fonction des conséquences
 - Défaillances mineures, significatives, critiques ou catastrophiques.

- 6) En fonction de la période d'apparition
 - Défaillance précoce, à taux constant et défaillance d'usure.

C'est trois dernières défaillances peuvent être représentées par une courbe appelée « courbe en baignoire ».

II.2.3. Courbe en baignoire

Cette courbe représente, dans la majorité des cas, le taux de défaillance d'un matériel ou d'un composant en fonction de son âge. Elle a une forme particulière représentée sur la figure (II.2). L'expérience a montré qu'il est possible de distinguer généralement trois périodes qui sont :

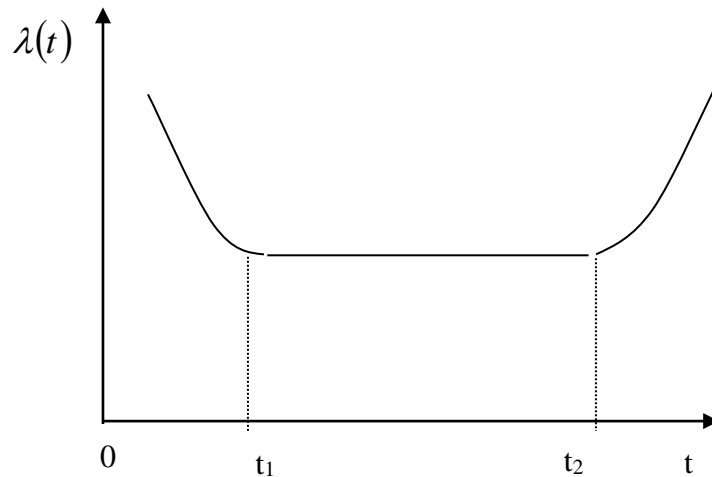


Fig.1.2 Taux de défaillance (courbe en baignoire)

La période de jeunesse ($0 \leq t \leq t_1$) à taux de défaillance décroissant, correspond à la période de jeunesse ou de rodage, au cours de laquelle le taux de défaillance décroît rapidement (du à des défauts de fabrication qui peuvent être éliminés avant que le système ne soit mis en exploitation) ;

La période de vite utile ($t_1 \leq t \leq t_2$) à taux sensiblement constant, correspond à la maturité. Cette zone correspond à l'apparition de défaillances survenant sans cause systématique semblant obéir à un hasard. De durée très courte pour les pièces mécaniques et très longue pour les composants électroniques. ;

La période d'usure ($t > t_2$) à taux de défaillance croissant. Cette période caractérise la fin de vie utile du produit. Elle correspond aussi à une dégradation irréversible des caractéristiques.

II.2.4. Durée de vie

C'est la durée de fonctionnement d'un équipement jusqu'à la défaillance. Autrement dit, c'est la durée de fonctionnement d'un dispositif réparable entre deux défaillances successives. On remarque que certains dispositifs n'étant utilisés qu'une seule fois, sont détruit par leur utilisation comme les fusibles, boulons, explosifs. Dans ce cas on parle de la probabilité de bon fonctionnement.

Ajoutons une seconde remarque concernant cette notion de temps. Elle est équivalente à tout phénomène associé à une succession d'événements.

La représentation schématique de tous les intervalles de temps est la suivante (fig.II.3) :

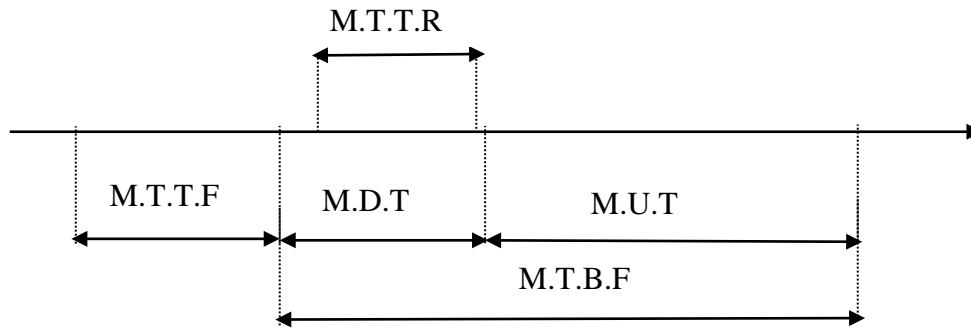


Fig.II.3 Représentation des temps

M.T.T.F : « Mean Time To Failure »- la durée moyenne de bon fonctionnement d'un système avant la première défaillance ;

M.T.T.R : « Mean Time To Repair »- la durée moyenne du temps de réparation ;

M.U.T : « Mean Up Time »- la durée moyenne de bon fonctionnement après réparation ;

M.D.T : « Mean Down Time » - la durée moyenne de défaillance qui correspond à la détection de la panne, la durée d'intervention, la durée de la réparation et la durée de remise en service. Le M.D.T traduit en fait la moyenne des durées des indisponibilités consécutives à des défaillances.

M.T.B.F : « Mean Time Between failure » - la moyenne des temps entre deux défaillances d'un système réparable.

Dans le cas général, un dispositif peut être réparable ou non.

Un dispositif réparable est caractérisé par la possibilité de remplacer un ou plusieurs de ses constituants défaillants par d'autres neufs. Ceci implique que le nombre de constituants échangés doit être inférieur au total de sa nomenclature.

La fiabilité d'un tel dispositif sera exprimée par :

- Le taux de défaillance λ ;
- Le temps de fonctionnement t ;
- La M.T.B.F : temps moyen de bon fonctionnement ;
- La M.T.T.F : temps moyen jusqu'à la première défaillance.

Quant au dispositif non réparable, il se présente comme un ensemble de pièces dont la défaillance de l'une entraîne le remplacement de l'ensemble.

1. La fiabilité d'un tel dispositif est exprimée par les mêmes paramètres à l'exception de la MTBF.

II.2.5. Fiabilité prévisionnelle

Considérons deux étapes : l'étude du système et de son environnement et l'analyse prévisionnelle des défaillances.

II.2.5.1. Etude du système et son environnement

La phase initiale de la fiabilité prévisionnelle a pour but l'estimation à priori des limites et des points faibles de l'équipement et l'orientation des choix techniques et technologiques.

Ces objectifs peuvent se traduire par les performances souhaitées telles que niveau de qualité, disponibilité,...

II.2.5.2. Analyse prévisionnelle des défaillances

Cette analyse a pour but :

- 1) d'identifier les principaux événements (avec une optique de défaillance) pouvant survenir sur l'équipement en fonctionnement ou non,
- 2) d'étudier les effets et les cause,
- 3) de les hiérarchiser afin de ne pas développer que les seuls dignes d'intérêt (souci d'optimisation).

Une telle analyse ne peut être que le résultat d'équipe constituée de spécialistes d'étude, de maintenance, de sécurité et de fiabilité.

II.2.5.3. Estimation du taux d'avarie

L'estimation du taux d'avarie pouvant se faire de différentes façons selon que le comportement est connu ou inconnu, (fig.II.4).

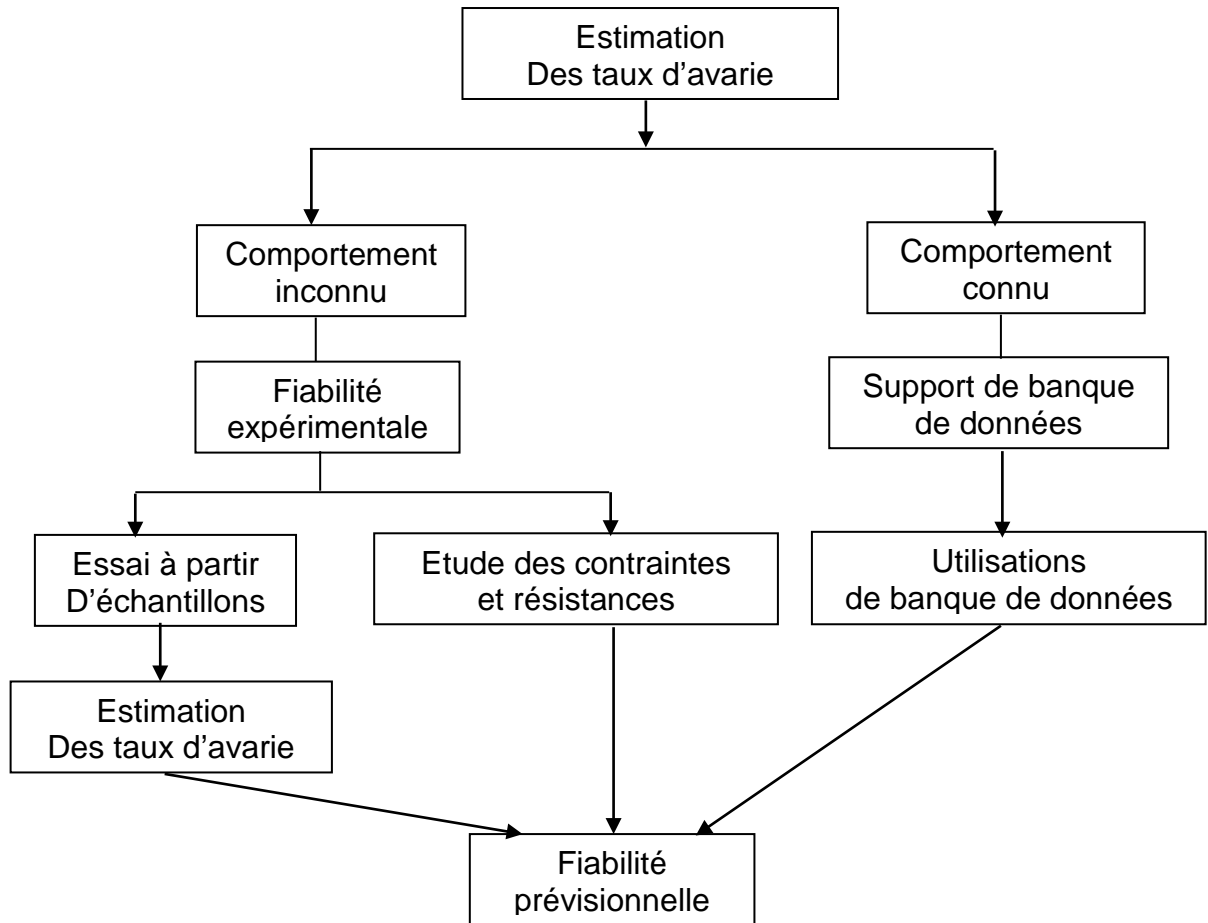


Fig.1.4 : diagramme d'estimation du taux d'avarie

II.2.6. Fiabilité expérimentale

La fiabilité expérimentale est basée sur la technique des plans d'expériences, elle a pour but d'estimer, par des méthodes statistiques, des paramètres de fiabilité de tout ou partie d'un dispositif. Notons que les considérations d'ordre pratique et économique qui se greffent obligatoirement dans tout plan d'expériences, sont les facteurs déterminants des limites d'utilisation de la fiabilité expérimentale.

On fait appel à la fiabilité expérimentale à chaque fois que :

- 1) la fiabilité prévisionnelle fait défaut et que les connaissances des paramètres correspondants s'impose,
- 2) une démonstration de fiabilité ou un essai de conformité est contractuellement à effectuer.

II.2.7. Outils d'aide à la décision

II.2.7.1. Banque de données

La nature statistique de la fiabilité repose sur l'observation de défaillances sur un échantillon. L'expérience acquise est réutilisée pour prévoir le futur. Il est important de pouvoir disposer d'une banque de données de fiabilité contenant des informations les plus objectives possibles, permettant d'effectuer des analyses en fonction d'observations concrètes.

II.2.7.2. Modes de défaillance

La méthode la plus employée pour des équipements de production est celle des Analyses des Méthodes de Défaillances, de leurs effets et de leur Criticité (A.M.D.E.C) connue également sous les initiales anglo-saxonnes F.M.E.C.A (Failure Mode, Effects and Criticaly Analysis).

Cette méthode consiste à répertorier tout ce que peut arriver sur un élément ou un sous système défaillant.

II.2.7.3. Arbre de défaillances

L'objectif de l'arbre de défaillance (ou arbre des causes) est de déterminer les diverses combinaisons possibles de défaillances de composants du système qui entraînent la réalisation d'un événement indésirable unique.

L'arbre de défaillance est une construction graphique représentant ces combinaisons au moyen d'une structure arborescente. Il est formé de niveaux successifs tels que chaque événement se déduit des événements de niveau inférieur par l'intermédiaire de portes logiques. Le processus déductif est poursuivi jusqu'à la prise en compte des défaillances élémentaires, appelées événements de base. Un événement indésirable est un événement particulier qui empêche le système d'accomplir une fonction. L'analyse doit le définir de façon précise à partir de l'étude qualitative du système (AMDEC).

Contrairement à l'analyse des modes de défaillances, l'arbre de défaillance est une méthode déductive. Elle permet de savoir comment un système peut être indispensable.

II.2.7.4. Arbre d'événements

L'objectif de l'arbre d'événement (ou arbre de conséquences) est d'élaborer les scénarios pouvant être développés à la suite d'un événement initiateur dont l'occurrence provoque la mise en œuvre d'une procédure et (ou) le fonctionnement d'une ou plusieurs protections.

L'arbre d'événements est une construction graphique représentant les séquences acceptables ou inacceptables (c'est-à-dire conduisant ou non à l'état de panne du système) issues de l'initiateur. Une séquence d'événements ou de pannes de composants (appelés événements génériques) conduisant à un événement indésirable.

Un événement initiateur est, par définition, le premier élément d'une séquence. Il est identifié par l'analyse, soit à partir d'une évaluation technologique prenant en compte la conception de l'installation ou l'expérience d'exploitation du système, soit à partir d'études menées précédemment : événement d'un arbre de défaillance ou mode de défaillance du système dû à des causes internes ou externes et mis en évidence par une AMDEC. Un événement générique correspond au fonctionnement ou non fonctionnement d'un composant. L'ensemble des événements génériques s'obtient à partir d'une AMDEC, en recensant les modes de défaillance autres que ceux retenus comme événements initiateurs. Trois facteurs aident à la construction d'un arbre des événements : le temps, les interactions entre fonctions du système et les interactions entre systèmes. Le temps permet de fixer l'ordre des pannes, les interactions entre fonctions sont généralement déterminées grâce à l'AMDEC.

II.2.7.5. Echantillonnage

Pour tirer des conclusions valides à propos de groupes étendus ou d'objets, au lieu de considérer le groupe en entier, dit population, ce qui peut être compliqué, on n'envisage qu'une petite partie de celui-ci que l'on appelle un échantillon. On établit les faits concernant la population à partir de résultats obtenus sur l'échantillon. C'est le procédé de l'inférence statistique et la procédure de choix de l'échantillon est l'échantillonnage.

La fiabilité des informations obtenues concernant une population dépend du choix de l'échantillon. L'une des façons d'y parvenir s'est d'assurer pour chaque

.....

membre de cette population la même chance d'être tiré et de faire partie de l'échantillon aléatoire.

II.2.7.6. Essais de fiabilité

Ils sont destinés à fournir les données d'événements lorsque l'observation du comportement du matériel en exploitation est difficile voir impossible à obtenir (matériel nouveau non exploité par exemple).

On distingue principalement deux types d'essais :

Type I : L'essai se termine au temps t avant que tous les composants (N) ne soient défectueux. Le critère d'arrêt de l'essai est donc une durée.

Type II : L'essai se termine au temps de la r -ième défaillance ($r < N$). Le critère d'arrêt de l'essai est donc un nombre de défaillances.

Dans le type I, le temps t est fixé et les instants de défaillances correspondent à des variables aléatoires.

Dans le type II, le nombre r de défaillances ainsi que les instants de défaillances sont fixés. Ces instants correspondent à des variables aléatoires.

Dans ce dernier cas, si on suppose que le taux de défaillance est constant, on peut démontrer que les bornes de l'intervalle de confiance sont telles que :

$$\lambda_{\text{inf}} = \frac{\chi_{\alpha/2}^2}{2T}$$

$\chi_{\alpha}^2(v)$ est déduit de χ^2 à v degrés de liberté pour des tests de type I.

Les essais de fiabilité ne permettent généralement pas de reproduire, avec fidélité, les conditions d'environnement de l'exploitation, par conséquent, les valeurs de paramètres obtenus à partir d'essais présentent toujours le risque d'être mal adaptés à l'application qu'on se propose d'en faire.

En outre, les essais de fiabilité sont souvent très coûteux à la fois en moyens et en temps. Pour ces raisons, on accorde la préférence (si le choix existe bien sûr) au recueil de données en exploitation. Dans ce recueil on observe le comportement des composants dans les conditions réelles d'exploitations et on relève toutes les données événementielles, qui après traitement, donneront accès aux paramètres recherchés.

Les paramètres de fiabilités qui en sont déduits peuvent être très différents de ceux résultant d'essais de fiabilité.

II.2.7.7. Estimations

C'est d'attribuer une valeur à un paramètre de la population à partir des renseignements fournis par l'échantillon extrait de la population. On peut associer une valeur unique (estimation ponctuelle) ou un intervalle qui peut couvrir sa valeur inconnue dit intervalle de confiance.

Dans l'estimation d'un paramètre de la population à partir des renseignements fournis par un échantillon pour tout coefficient de sécurité α , on associe un intervalle $[x_1, x_2]$ appelé intervalle de confiance avec la probabilité α de ne pas se tromper, en affirmant que la valeur du paramètre appartient à l'intervalle.

En pratique, l'intervalle de confiance est déterminé pour $\alpha = 0.95$ et $\alpha = 0.99$.

II.2.7.8 Test d'hypothèse

Après avoir estimé les paramètres d'une loi, il s'agit de définir si la variable aléatoire obéit effectivement à cette loi. Pour cela, on procède au test d'hypothèses qui permet de vérifier si la variable aléatoire suit bien une loi définie avec les paramètres estimés.

Le test de Kolmogorov-Smirnov est préféré aux autres tests si la taille de l'échantillon est petite. Il a été démontré dans plusieurs études que le test de Kolmogorov-Smirnov est plus puissant et plus sensible. Ce test est basé sur la comparaison de la fonction de distribution expérimentale ou observée de l'échantillon $F_n(x)$ et la fonction de distribution $F(x)$ de la population.

Le principe de ce test consiste à déterminer l'écart maximal existant entre la fonction de distribution expérimentale et la fonction de distribution théorique. Cet écart est donné en valeur absolue : $D = \max |F_n(x) - F(x)|$.

Souvent, on fait appel au test χ^2 de Pearson. C'est un test qui nécessite un nombre important de données et qui est applicable à toutes les distributions.

.....

II.3. Approche de la fiabilité d'une machine asynchrone, [33],[34].

L'apport de l'analyse fonctionnelle dans le contexte global de la sûreté de fonctionnement qui comprend aussi les analyses qualitative, quantitative et la synthèse est primordiale pour l'étude de la fiabilité de la machine asynchrone.

II.3.1. Analyse fonctionnelle de la machine asynchrone

a) Analyse fonctionnelle externe

La fonction d'un moteur électrique est de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique qui est transmise à la charge.

La description fonctionnelle externe représente la première étape de cette analyse. Elle permet de recenser les éléments du milieu extérieur qui sont en liaison avec la machine. La figure ci-dessous montre cette relation.

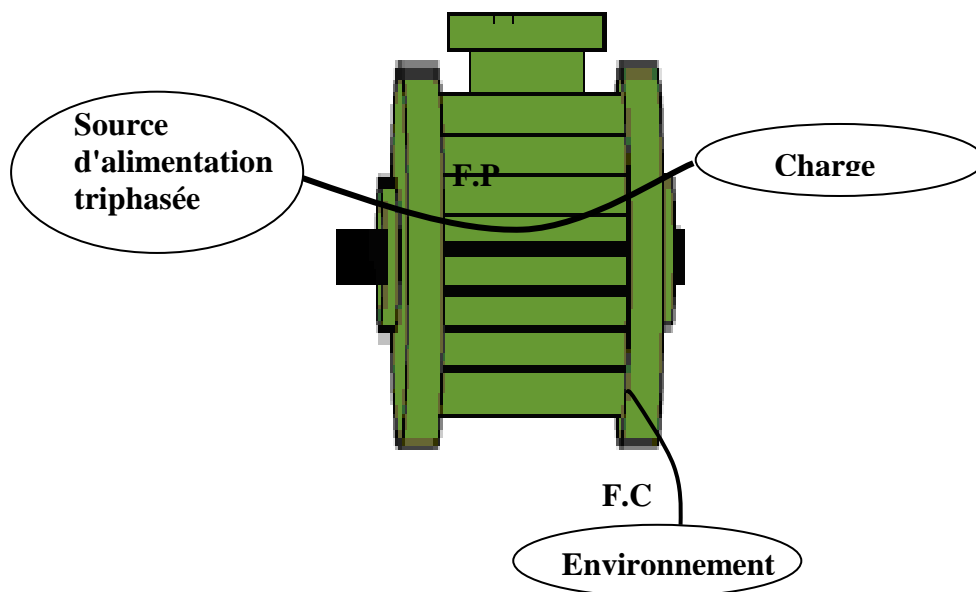


Fig.II.5

b) Analyse fonctionnelle interne

L'analyse fonctionnelle interne permet de faire apparaître tous les éléments présents dans la machine et les relier par des fonctions service suivant le schéma fonctionnel ci-dessous.

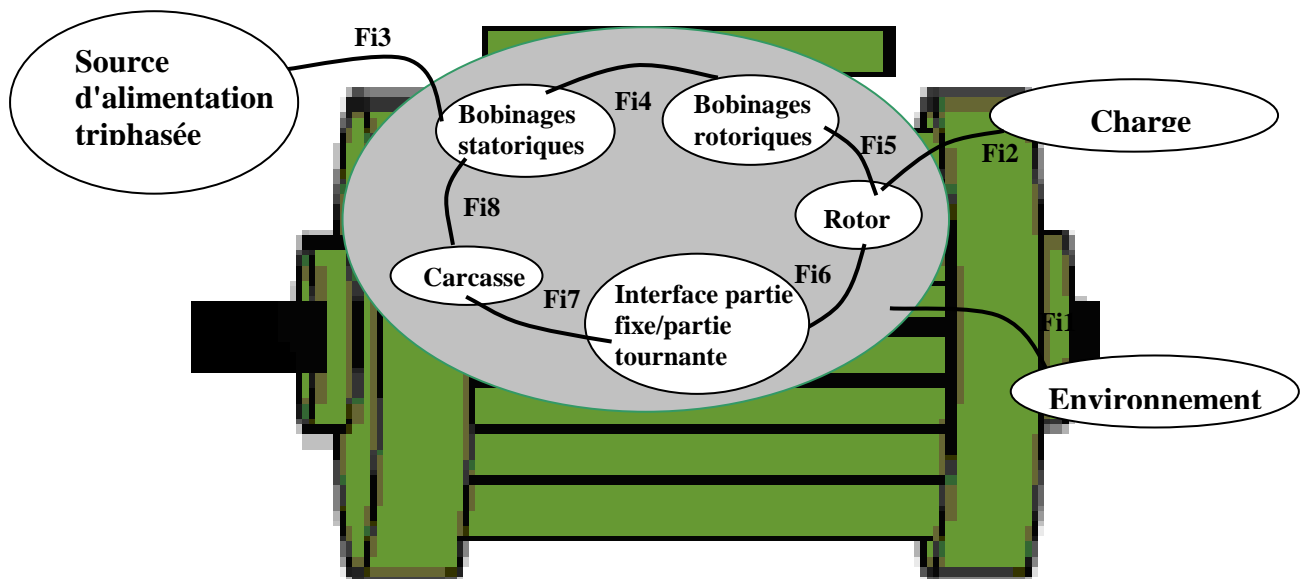


Fig.II.6

En se basant sur cette analyse, on peut établir l'arbre des causes de la machine électrique, et delà développer les arbres dont les plus dominants sont ceux des bobinages rotorique et statorique qui sont généralement les parties les plus sensibles.

II.3.2. Arbre des causes des bobinages rotoriques

Les causes d'apparition de cet événement sont identifiées par l'arbre ci-dessous (fig.II.7).

Il existe deux causes de défaillances des bobinages rotoriques : une d'origine mécanique et l'autre d'origine thermique.

La défaillance d'origine mécanique peut être causée par un contact entre le stator et le rotor . L'augmentation du niveau de vibration peut être la cause d'apparition de mouvements des faisceaux dans leurs encoches et favoriser la rupture de l'isolant , et par conséquent, à un court-circuit.

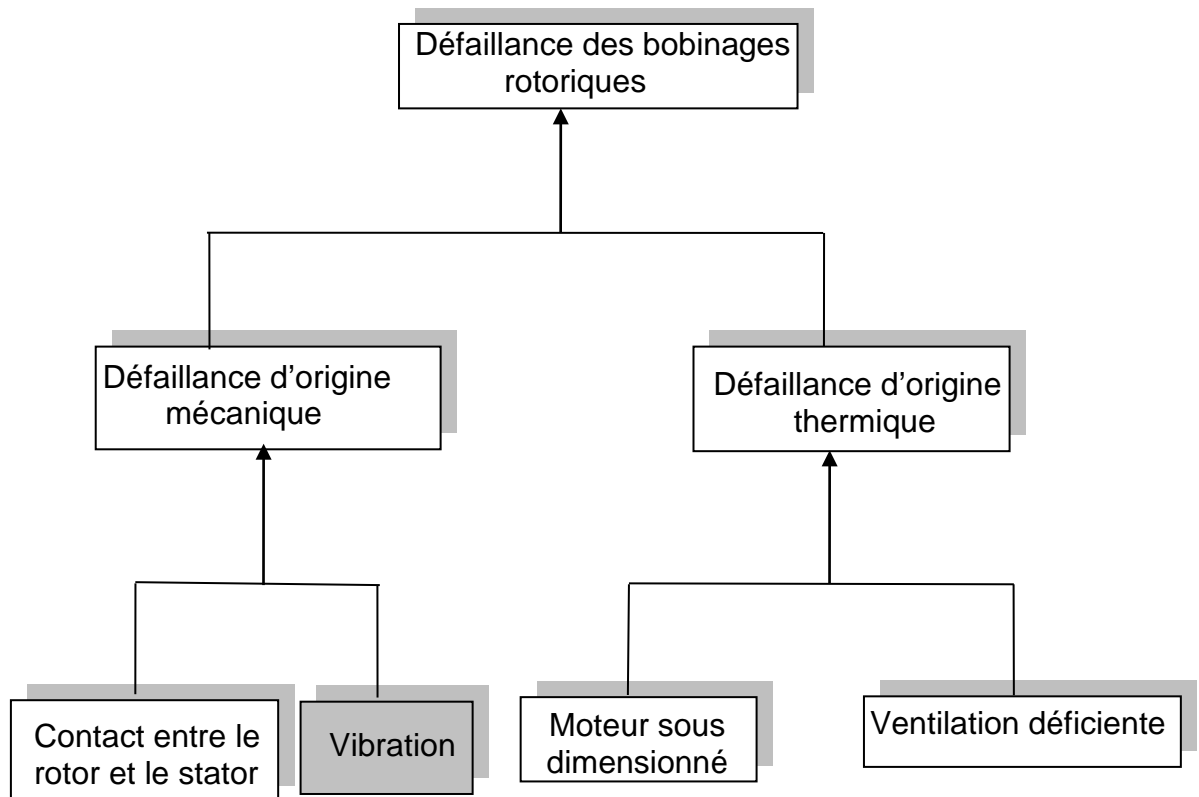


Fig.II.7 Arbre des causes des bobinages rotoriques

La défaillance d'origine thermique peut être due à l'insuffisance de la ventilation de la machine. Généralement, le refroidissement de la machine est réalisé par un ventilateur fixé en bout d'arbre. Les performances de ce refroidissement sont liées à la vitesse de rotation de cette arbre.

En pratique, c'est aux basses vitesses et forts couples qu'on observe le manque de ventilation qui est la source de défaillance d'origine thermique qui se traduit par le vieillissement ou bien la rupture de l'isolant.

II.3.3. Arbre des causes des bobinages statoriques

Les causes d'apparition de la défaillance des enroulements statoriques sont données par l'arbre ci-dessous. (fig.II.8).

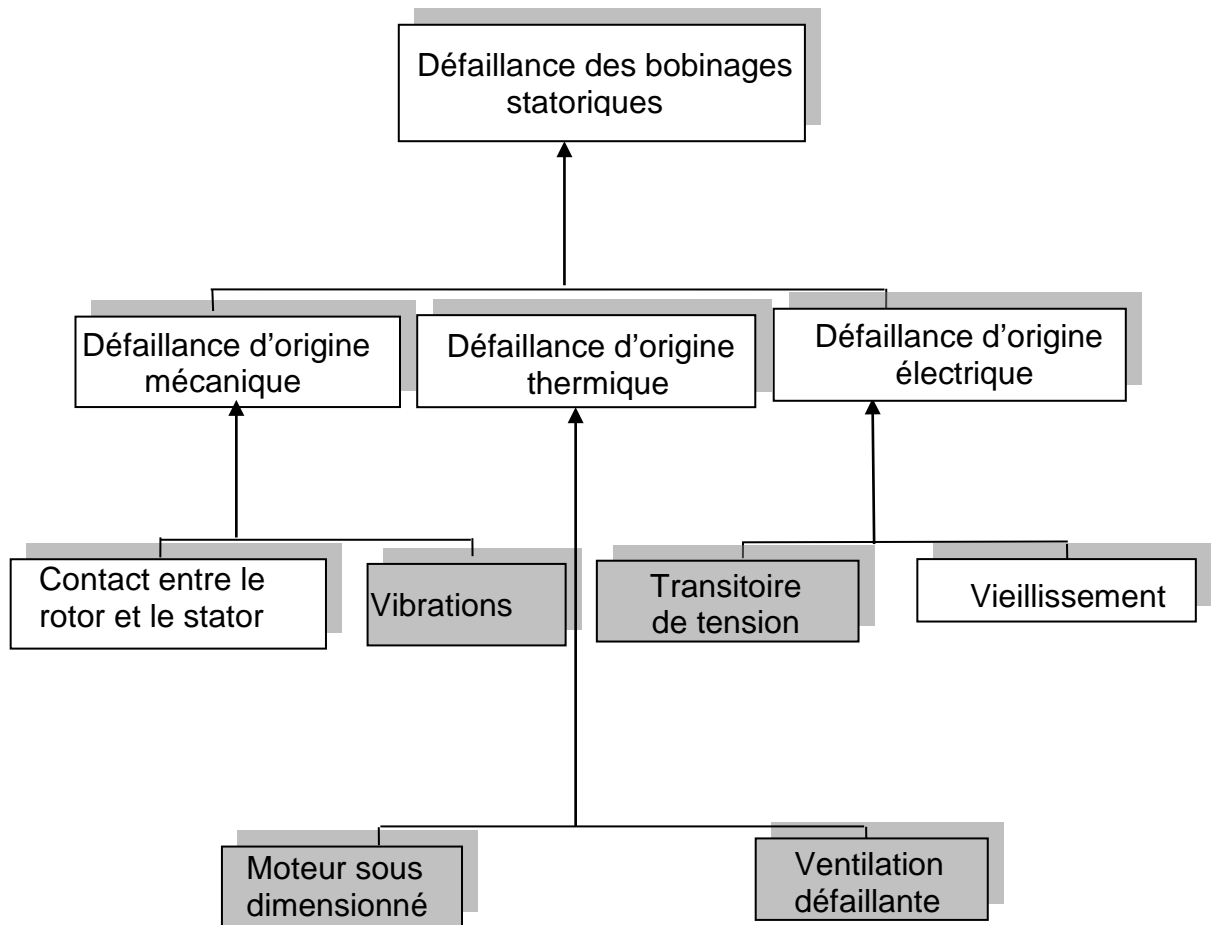


Fig.II.8 Arbre des causes des bobinages statoriques.

En conclusion, en partant du concept de la sûreté de fonctionnement pour bien situer la place de la fiabilité et présenter les fondements de cette dernière, il est possible, à travers l'analyse fonctionnelle, de monter des arbres des causes que ce soit de la machine asynchrone proprement dite ou des parties électrique et mécanique qui la constituent. A travers ces causes, une mise en évidence des liens qui conduisent à ces défaillances peut être établie.

CHAPITRE 3

Conditions d'exploitation et de fonctionnement des machines électriques.

On comprend par conditions d'exploitation, l'ensemble des paramètres physiques, qui, au cours de l'exploitation des systèmes électrotechniques, peuvent avoir une influence sur leurs fonctionnements. Aux conditions d'exploitations, on peut associer les facteurs comme la température ambiante, la poussière, les charges dues aux vibrations et aux chocs. Les conditions de fonctionnement des moteurs électriques sont caractérisées par les facteurs suivants : les fonctionnements journalier et annuel, le nombre de démarrages, la durée d'alimentation ou de charge. Les conditions d'exploitation influent de manière remarquable sur la fiabilité des moteurs. Par exemple, le nombre de défaillances mensuel moyen varie suivant les saisons d'environ de trois fois plus en hiver qu'en été; c.à d. qu'il est fonction de la température et de l'humidité de l'air, [37].

La présence sur l'enroulement statorique d'une couche de charbon ou de poussière d'épaisseur 1 mm entraîne son « surchauffement » à peu près de 10°C ; c.à d. entraîne la réduction de sa durée de vie. Pour les moteurs alimentés à partir des lignes aériennes , à cause de l'action des décharges de la foudre, le nombre mensuel moyen de claquage des enroulements augmente à peu près de 1,7 fois, [40].

Les conditions de fonctionnement influent sur la fiabilité des moteurs. L'exploitation annuelle moyenne des moteurs varie d'un type d'industrie à un autre de plusieurs fois. Les plus grandes exploitations annuelles sont propres aux moteurs des industries chimiques, de transformations pétrolières et énergétiques fonctionnent en régime permanent ; alors que les exploitations moyennes sont observées en

métallurgie, dans l'industrie de fabrication des matériaux de construction ; alors que les plus faibles exploitations annuelles concernent les moteurs des industries de construction mécanique et de transformation métallique fonctionnant en régime intermittent. La durée moyenne de fonctionnement des moteurs ayant un régime intermittent avec un nombre important de démarrage est de 2,4 fois inférieur à celle des moteurs ayant un régime permanent, [38].

L'oscillation et la variation de la tension du réseau entraînent la réduction du couple, l'augmentation du bruit, les vibrations et l'échauffement des moteurs. La diminution de la tension de 0,1 de la tension nominale entraîne une réduction de la durée de vie moyenne de l'isolation des enroulements statoriques des moteurs asynchrones de 1,5 jusqu'à 2 fois [2].

III.1 Caractère de défaillance des moteurs électriques.

Pour pouvoir déterminer les pièces les plus défaillantes des moteurs électriques des analyses ont été réalisées sur 250 machines, dont les types de défaillance sont reportés sur le tableau (3.1).

Type de défaillance	Nombre de moteurs en défaut
Court-circuit entre spires et entre phases dans les parties frontales	5
Court-circuit entre phases à la sortie de l'encoche	3
Court-circuit à la masse	3
Diminution de la résistance de l'isolation d'encoche	14
Rupture du point de connexion du schéma de l'enroulement	1
Fusion de l'enroulement rotorique	13
Cassure de l'arbre	5
Rupture de la clavette de l'arbre	11

Rupture des roulements	4
Rupture de la soudure des conducteurs de sortie	13
N'ont pas subi de défaillance	178

Tab.2.1 Types de défaillance dans les machines électriques [39].

III.2 Lois physiques de vieillissement de l'isolation électrique.

Au cours du fonctionnement des moteurs électriques, l'isolation des enroulements statoriques est soumise à des échauffements et refroidissements périodiques, une humidification de longue durée et au vieillissement thermique. Au cours de l'échauffement des isolants, leurs résistances volumiques spécifiques diminuent et en présence d'une polymérisation incomplète des vernis servant à imprégner les enroulements, celle-ci change le caractère de la conductivité électrique de l'isolant. La diminution de la résistance de l'isolant de l'enroulement statorique à base de silicone est représentée sur la figure (3.1).

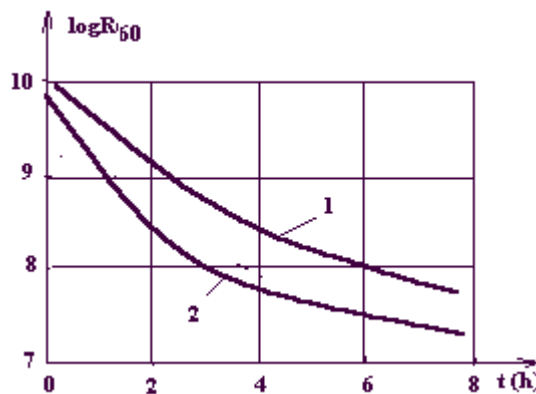


Fig.3.1 Variation de la résistance de l'isolant de l'enroulement statorique [40].

- 1- Epaisseur de l'isolant par imprégnation sous pression ;
- 2- Isolation plus fine par imprégnation en absence de pression.

Au cours de l'exploitation, les résistances des isolants statoriques de $500\text{k}\Omega$ peuvent chuter jusqu'à des valeurs critiques de $10\text{--}30\text{k}\Omega$ à cause de l'échauffement, [41]. L'humidification de l'isolant se fait généralement dans les journées de repos, quand les températures des moteurs électriques sont réduites à des températures ambiantes et l'isolation est soumise durant une longue période à l'action atmosphérique. La résistance à l'humidité des isolants dépend de la structure et des caractéristiques des matériaux isolants utilisés ayant une tendance à l'humidification superficielle ou volumique. L'encrassement des surfaces des moteurs par de l'huile, ou par des poussières industrielles entraîne l'apparition des processus physico-chimiques, accélérant la détérioration de l'isolation et la diminution de sa résistance, (Tab.3.2), [40], [42].

Résistance de l'isolant d'enroulement	Enroulement statorique ayant une présence de :					
	Humidité		Poussière		Huiles	
	Quantité	%	Quantité	%	Quantité	%
Plus de 100	8	36,4	87	79,1	122	84,2
De 10 jusqu'à 100	1	4,5	2	1,8	1	0,7
De 0 jusqu'à 10	2	9,1	5	4,5	6	4,1
De 0,1 jusqu'à 1	4	18,2	6	5,5	7	4,8
Moins de 0,1	7	31,8	10	9,1	9	6,2

Tab.3.2. Détérioration de la résistance de l'isolant en présence d'un encrassement de surface

Au moment de l'alimentation des moteurs électriques, il y a présence d'un processus non stationnaire de « charge – décharge » du diélectrique où la résistance de l'isolant est réduite de 1,5 jusqu'à 2 fois, et au cours des trois à cinq minutes suivantes augmente jusqu'à atteindre son niveau initial. Si l'humidification est plus intense, la résistance diminue instantanément de 5 à 10 fois, [42]. L'échauffement d'un isolant humide par alimentation du moteur entraîne l'apparition de deux processus de réduction de la résistance spécifique : son augmentation avec le séchage et sa diminution pour cause d'échauffement de l'isolation. La variation de la résistance par rapport au temps dépend de la prédominance du ou des processus.

La fig.3.2 représente la variation de la résistance de l'enroulement statorique des moteurs avec une isolation à base de silicone.

Initialement, au cours de l'échauffement de l'enroulement humidifié, il y a évaporation rapide de l'humidité de la couche superficielle de l'isolant et sa résistance augmente (point A). Par la suite, la résistance diminue à cause de l'échauffement de l'isolation (point B). Au cours d'un échauffement de longue durée, la résistance augmente de nouveau à cause du séchage et de l'évaporation de l'humidité des couches internes de l'isolation (point C).

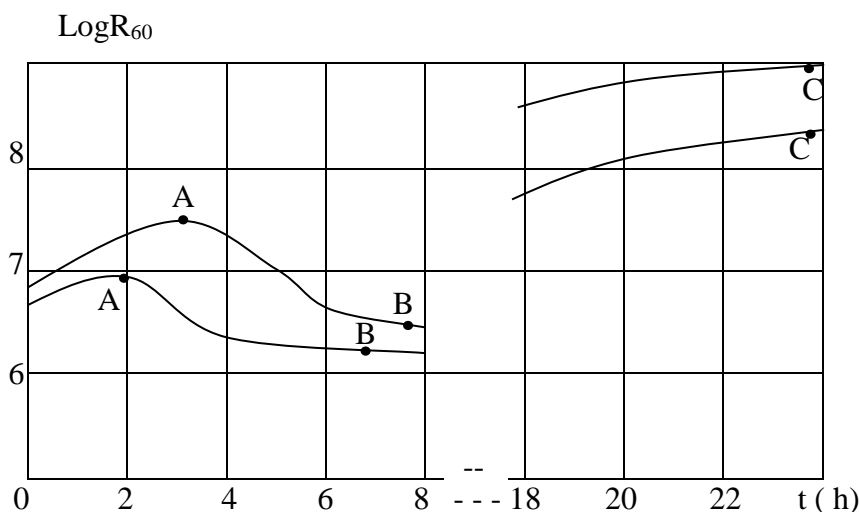


Fig.2.2 Variation de la résistance de l'isolation de l'enroulement statorique au cours des processus d'échauffements continus de l'isolation humidifiée jusqu'à 250°C

[40], [38] 1 – Épaississement de l'isolation à base de silicone

avec imprégnation sous pression ;

2 – Isolation plus mince avec imprégnation sans pression.

Les lois physiques du vieillissement thermique des matériaux de l'isolant à partir des résultats de recherche obéissent à la loi de Van-Goff- Arrhénius, qui stipule que la durée de vie moyenne de l'isolation dépend linéairement du paramètre représentant l'inverse de la température absolue, [32] [39] [40] :

$$\log T_k = A + \frac{B}{273 + \theta} \quad (3.1)$$

Où T_k - la durée de vie moyenne (h) ;

A – indice de l'efficacité d'interaction des molécules ;

B – rapport de l'énergie active de la matière et de la constante universelle du gaz.

Au cours de l'exploitation de l'isolation, l'enroulement statorique est soumis à l'interaction des forces électrodynamiques et thermomécaniques, lesquelles de manière absolue influent sur la fiabilité de l'isolation des enroulements des machines de grandes puissances. L'étude de la tension de claquage de l'isolation à la masse des moteurs montre que pour les machines neuves, presque tous les claquages apparaissent aux angles de courbures des sections ou bien aux points de connexion des ponts ; c. à d. que l'isolation de l'encoche est plus rigide que l'isolant des parties frontales.

Les forces électrodynamiques agissant sur la section sont proportionnelles au carré du courant et au cours du démarrage ou en régime de court circuit augmentent de 35 à 50 fois par rapport au régime nominal. Avec une fréquence de 100 Hz, ils entraînent le déplacement des sections dans l'encoche dans le sens radial. Plus importantes sont les forces électrodynamiques dues aux inversions du sens de rotation des moteurs asynchrones à cage quand, dans un intervalle de temps de 0,02 à 0,05s, il y a action d'un couple dynamique choc dépassant le couple nominal de 10 à 15 fois, [43].

Au cours du fonctionnement du moteur en régime de démarrages fréquents ou de court circuit, le cuivre des sections se dilate plus fortement que l'acier du circuit magnétique à cause de sa température qui est plus importante et du coefficient de dilatation linéaire du cuivre qui est de 1,4 fois plus grand que celui de l'acier entraînant un déplacement des sections dans l'encoche dans le sens axial. Le vieillissement thermomécanique accélère la diminution de la tension de claquage de l'isolation par rapport au vieillissement thermique seul de plusieurs fois.

Même si la température des parties frontales de l'enroulement statorique est supérieure à celle des encoches, à cause des déformations dues aux vibrations et le vieillissement thermomécanique, la partie de la section qui est dans l'encoche se

détérioré plus rapidement et le pourcentage de claquage dans la partie de l'encoche augmente de façon continue.

Au cours du passage du moteur au régime de court circuit en étant alimenté par une tension du réseau, la température de l'enroulement augmente brusquement jusqu'à plusieurs dizaines de degrés et son isolation est soumise à un choc thermique. La rigidité à cette action ne dépend pas de la rigidité thermique de l'isolation et se présente comme une caractéristique indépendante.

III.3. Possibilités d'amélioration de la fiabilité

Pour pouvoir formuler des exigences envers les performances de machines électriques, il faut avant tout fixer sa durée de bon fonctionnement définie par la durée de vie de l'enroulement statorique. En partant des conditions d'exploitation en régime nominal, sous des températures proches des limites tolérées et la classe d'isolant considérée, la durée d'exploitation est fixée à 20.000 heures. Après cela, il faut établir économiquement la probabilité d'un fonctionnement sans défaillance. Pour les conducteurs ronds émaillés et les matériaux isolants synthétiques, cette probabilité est de l'ordre de 0,8 à 0,85% pour 20.000 heures de fonctionnement. Aussi, il est important de souligner que les paramètres données de fiabilité sont garantis sous des conditions d'exploitation des machines électriques proches de ceux du régime nominal; entre autres la température, le nombre de démarrage, les conditions environnementales, l'assurance d'une protection appropriée, les autres régimes d'avarie, ainsi que le respect des règles d'exploitation.

Pour espérer apporter des améliorations futures au niveau de la fiabilité, une analyse détaillée de chaque étape du processus technologique de bobinage est nécessaire. De ces observations, on essaie de repérer les éventuelles opérations ou instants qui peuvent affecter la fiabilité des enroulements. La figure (3.4) représente le schéma technologique du processus de bobinage de l'enroulement statorique.

D'après ce schéma, les étapes qui peuvent avoir un intérêt sont:

1°) le bobinage des sections dont la fiabilité dépend de la tension mécanique du conducteur qui peut entraîner le craquage mécanique. Par conséquent, une optimisation de ce paramètre est plus que nécessaire;

2°) la mise en encoches des bobines manuellement ou par un procédé automatique est une opération technologique de première importance. Celle-ci suppose qu'il y a absence de bavures, une tension du fils optimisée et que le coefficient de remplissage de l'encoche par le cuivre reste dans les limites tolérées afin d'éviter des efforts supplémentaires pouvant entraîner le craquage de l'isolant.

3°) la formation des parties frontales de l'enroulement suppose l'utilisation d'extenseurs cylindrique en bakélite ou en caoutchouc pour ne pas affecter l'isolant

4°) des essais complets permettent d'obtenir les caractéristiques de bobinage correctes et l'excellente isolation du système. Tous les stators fabriqués en usine ont des bobinages qui possèdent un nombre de tours correct et des dimensions de fils appropriés, conformément aux cahiers des charges techniques respectifs. Des essais de résistance du bobinage, des essais d'isolation et des tests de surtension sont effectués sur tous les stators afin d'obtenir des bobinages dotés des caractéristiques correctes. Toutes les extrémités de bobine des stators sont également contrôlées, afin d'assurer leur conformité aux tolérances dimensionnelles.

5°) la connexion des ponts et des conducteurs d'alimentation constituent les points chauds de l'enroulement pouvant entraîner une rupture. L'assurance de contacts parfaits par soudure et le choix de gaines thermiques comme isolants au niveau de la partie frontale constitue une amélioration de sa durée de vie;

6°) le choix du verni (composition, viscosité, ...) et son application constitue la touche finale du bobinage de l'enroulement. L'imprégnation des stators optimise les performances générales. Elle résiste aux contraintes et aux variations de température générées par le fonctionnement d'un entraînement à fréquence variable, réduit le risque de courts-circuits dans les bobinages et améliore le transfert de chaleur ce qui, à son tour, prolonge la durée de vie du moteur. Une méthode d'imprégnation incorrecte ou insuffisante pourrait écourter considérablement la durée de vie du moteur.

Les techniques d'imprégnation utilisées comme le goutte à goutte et le trempage avec un traitement thermique permettent d'obtenir un remplissage massif de résine et d'éliminer les poches d'air autour du bobinage. Ceci donne une isolation compacte et homogène, avec un remplissage de résine en tout point entre les conducteurs, ce qui réduit le risque de décharges partielles dans le bobinage.

Les vernis d'imprégnation sont déposés sur les bobinages déjà formés. Leur rôle est d'augmenter la tenue mécanique du bobinage, la dissipation calorifique, la protection par rapport à l'environnement et la tenue diélectrique pour les moyennes et hautes tensions. Ces polymères sont de natures différentes selon principalement la gamme de température d'utilisation. Pour obtenir une bonne imprégnation, il est nécessaire de bien maîtriser les paramètres comme la pénétration à cœur des enroulements, le point de gélification pour fixer celui-ci dans le bobinage et enfin la polymérisation de ce vernis pour garantir les propriétés recherchées. Les plus utilisés sont généralement des vernis époxydes, polyester ou polyesterimide. Ils sont adaptés aux géométries et à la conception des pièces à imprégner.

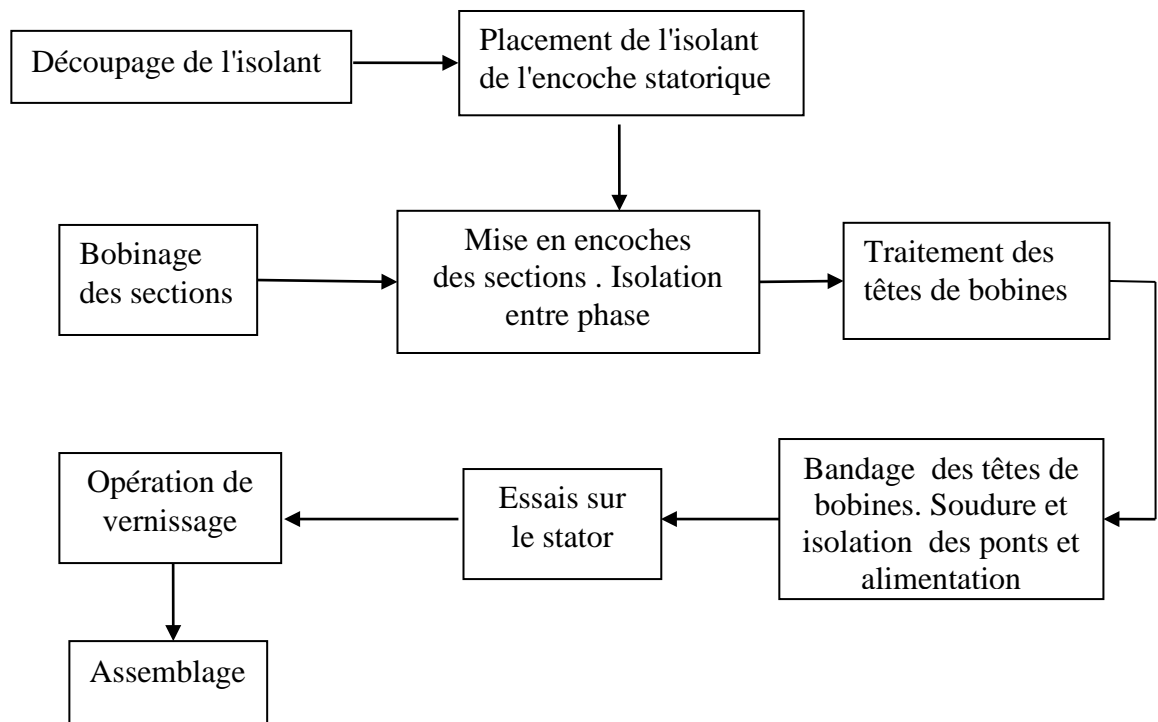


Fig.3.3 Schéma du processus de bobinage de l'enroulement statorique

III.4. Base de données et traitement statistique de fiabilité des moteurs électriques,[40]

II.4.1. L'observation.

Au cours de l'évaluation de la fiabilité des machines électriques, principalement, les moteurs asynchrones, on utilise le traitement statistique de l'information d'exploitation, car une telle méthode possède les avantages suivants :

1 – un grand nombre de prototype se trouve sous observation, ce qui assure une exactitude (crédibilité) des résultats ;

2 – les prototypes sont exploités dans des conditions réelles d'actions de facteurs climatiques et mécaniques, de charge, de fréquence de démarrage, etc...

Au cours du processus d'observation sur le fonctionnement des moteurs, avec l'apparition de l'information sur la fiabilité, on fixe les données qui seront soumis au traitement statistique futur sur une carte appropriée : la durée de la période d'observation, le fonctionnement pour une durée d'exploitation totale, le nombre de défaillances, le temps de réparation, le temps de repos du à l'avarie, la durée du traitement (contrôle), le nombre de prototypes soumis à la réparation.

De plus, la durée de fonctionnement de chaque moteur pour la période d'observation est déterminée par l'une des expressions, [40] :

$$t_i = \frac{D_i t_a}{D_p} \quad (3.2)$$

$$t_i = D_i n_{cm} t_{cm} k \mu \quad (3.3)$$

où D_i - la durée de fonctionnement du $i^{\text{ème}}$ moteur à l'exception des périodes d'arrêt ;

D_p - le nombre de jours de fonctionnement par an pour le processus technologique donné ;

t_a - le temps machine annuel, (heure) ;

n_{cm} - le nombre d'équipes en 24h ;

t_{cm} - la durée de travail de l'équipe, h ;

k_{μ} - le coefficient du temps machine en 24 h.

Au cours de l'analyse des résultats d'observations, pour le calcul des défaillances et de la durée de vie, on prend en compte les défaillances apparaissant au cours du fonctionnement des moteurs électriques et entraînant leur mise hors service immédiate, de même que les défaillances mises à jour lors du contrôle technique. Les observations peuvent être planifiées et menées comme des essais déterminants, ou bien comme des essais de contrôle.

Au cours des essais déterminants, on recherche la répartition du temps de fonctionnement sans défaillance et on détermine le degré de fiabilité. Le plus souvent, on considère le problème de planification et le traitement des résultats d'observation comme étant la détermination du volume minimal d'expérimentation, lequel assure l'évaluation ou bien le contrôle du degré de fiabilité avec des exigences données vers la précision et la validité des résultats.

III.4.2. Essais déterminants

Au cours de la planification des essais déterminants, les données initiales sont des valeurs données par rapport à l'erreur et l'intervalle de confiance. Le nombre minimum nécessaire d'échantillons soumis aux essais en fonction de la répartition supposée du temps de fonctionnement sans défaillance est défini comme suit, [40] :
Pour une distribution de Weibull :

$$(\delta_o + 1)^b = \frac{2n}{\chi_{1-\alpha, 2n}^2} \quad (3.4)$$

Pour une distribution exponentielle

$$\delta_o + 1 = \frac{2n}{\chi_{1-\alpha, 2n}^2} \quad (3.5)$$

Pour une distribution normale

$$\frac{\delta_o}{V} = \frac{t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

Pour une distribution lognormale

$$n = \frac{U_{\alpha}^2}{\delta_o^2} \ln(V^2 + 1) \left[1 + \frac{\ln(V^2 + 1)}{2} \right]; \quad (3.7)$$

$$\delta_o = \frac{\varepsilon}{t}$$

Où n – le nombre minimum nécessaire d'échantillons soumis aux essais ;

δ_o - l'erreur relative du degré de fiabilité t (généralement dans l'intervalle 0,01–0,2) égale à la moitié de la longueur relative de l'intervalle de confiance ;

b – le paramètre (de forme) de la distribution de weibull ;

V - le coefficient de variation espéré du degré de fiabilité ;

α - la probabilité de confiance avec laquelle δ_o et n sont définis (donnés dans l'intervalle 0,80–0,99) ;

ε - l'erreur absolue ;

$\chi_{1-\alpha, 2n}^2$ – la valeur du critère de Pearson pour $(1-\alpha)$ et un nombre de degrés de liberté $2n$;

$t_{\alpha, n-1}$ - la valeur du critère de Student pour un nombre de degrés de liberté

$k = n - 1$ et une probabilité de confiance α ;

U_{α} - le paramètre de la distribution normale pour une probabilité de confiance α .

III.4.3 Essais déterminants en présence d'échantillons complets

On appelle échantillon complet, l'échantillon où tous les éléments ont eu un arrêt ou bien ont atteint un état limite.

Si des éléments de l'ensemble n'ont pas eu de défaut, ou n'ont pas atteint l'état limite, alors l'échantillon est dit incomplet.

Si les durées de fonctionnement des éléments non défailants sont égales entre elles, et supérieure à la plus grande durée des éléments défailants, alors celle-ci est dite réduite.

Au cours du calcul de l'indice du temps de la remise en marche, le volume du travail et le coût, le temps de service et le temps d'arrêt du à l'avarie, tous les échantillons sont considérés complets.

L'algorithme du traitement statistique pour des échantillons complets est représenté sur le tableau (3.3).

Si on suppose qu'il y a lieu d'une distribution normale de la variable aléatoire, alors il faut mener une évaluation d'anormalité des résultats d'observation.

Pour cette évaluation, on calcule la moyenne arithmétique et l'écart quadratique moyen de l'échantillon

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (3.8)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t)^2}{n-1}}; \quad (3.9)$$

où t_i - le i ème valeur de la variable aléatoire ;

n - le volume de l'échantillon.

Par la suite, on calcule Le critère U de Smirnov pour les valeurs extrêmes de l'échantillon t_{\min} et t_{\max} :

$$U_1 = \frac{t - t_{\min}}{S};$$

$$U_n = \frac{t_{\max} - t}{S};$$

où t_{\min} et t_{\max} - les valeurs min et max de la variable aléatoire dans l'échantillon.

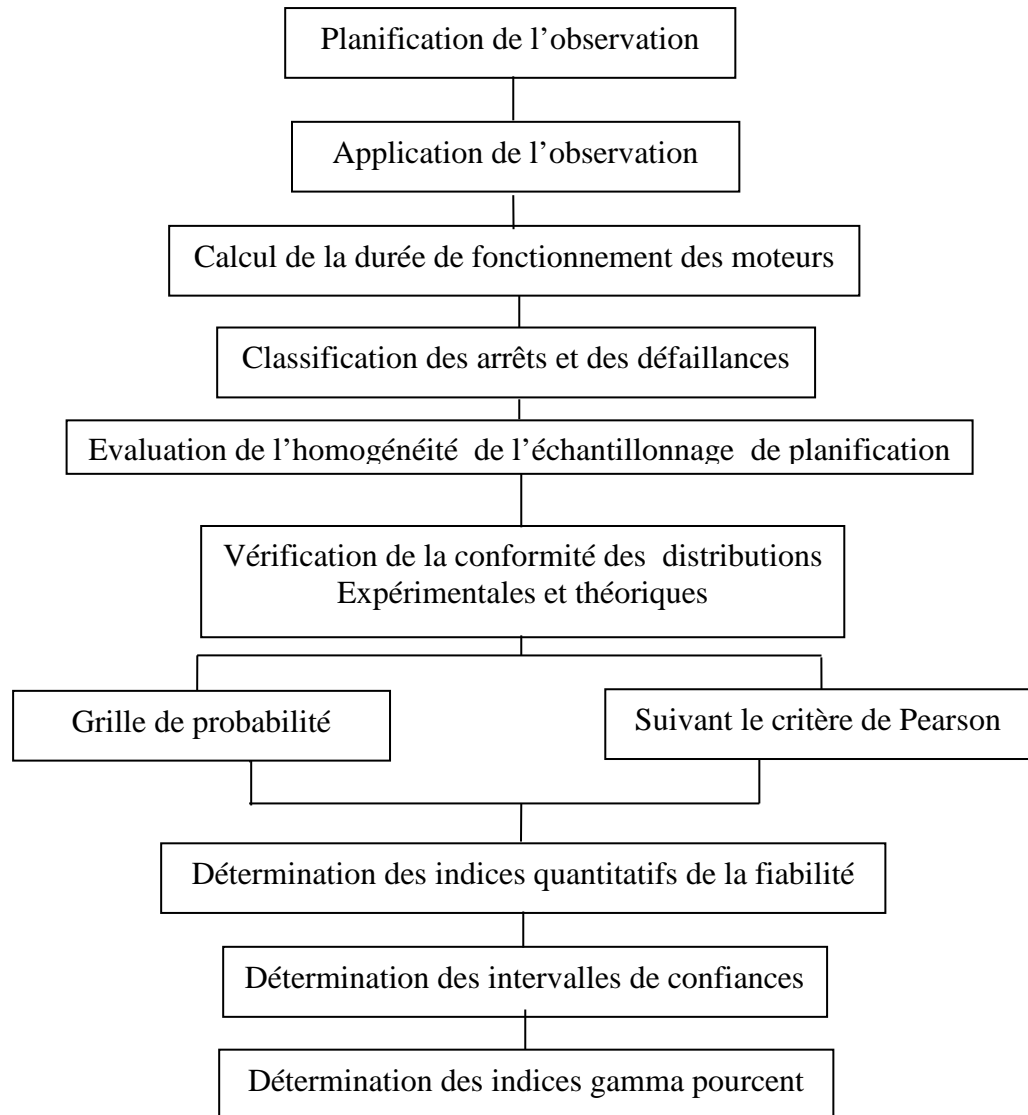


Fig.3.4 Algorithme du traitement statique
en présence d' échantillons complets, [40]

Les valeurs théoriques obtenues U_1 et U_n sont comparées à celles des abaques du critère U_T pour le volume donné de l'échantillon n . Si $U_1 \geq U_T$ ou bien $U_n \geq U_T$, alors le résultat (respectivement t_1 ou t_n) est rejeté de l'échantillon.

La vérification de l'hypothèse de l'homogénéité de l'échantillon permet de déterminer la cause de la différence des données entre les échantillons : l'influence des indices suivant lesquels les échantillons se divisent (les facteurs technologique

et constructif, les conditions d'exploitation,...) ou bien l'influence de causes aléatoires liées à des nombres d'éléments observés réduits. L'hypothèse sur l'absence de différence les paramètres aléatoires est appelée hypothèse nulle H_0 . L'hypothèse contraire à l'hypothèse nulle est appelée hypothèse alternative H_1 . L'hypothèse nulle est confirmée ou rejetée avec une probabilité de confiance déterminée. Au cours de la vérification de l'hypothèse nulle H_0 à partir de chaque échantillon, on détermine la valeur arithmétique moyenne et l'écart quadratique. Par la suite on calcule le critère expérimentale de Fischer à partir de :

$$F_{\text{exp}} = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (3.10)$$

où S_1 et S_2 - les écarts quadratiques moyens de la comparaison de deux échantillons, avec $S_1 > S_2$. A l'aide de la table F- distribution [84], en fonction des degrés de liberté K_1 et K_2 et la probabilité de confiance α , on détermine la valeur du critère F_T , où

$$K_1 = n_1 - 1; \quad (3.11)$$

$$K_2 = n_2 - 1; \quad (3.12)$$

où n_1 et n_2 - le nombre de valeurs de données expérimentales dans le 1^{er} et le 2^{ème} échantillons.

Si $F_{\text{exp}} \geq F_T$, alors l'hypothèse sur l'homogénéité de deux échantillons est rejetée, car il existe une différence importante entre leurs variances respectives.

Si au contraire $F_{\text{exp}} < F_T$, alors on mène une vérification supplémentaire. Pour cela, on calcule le critère t de Student à partir de l'expression :

$$t_{\text{exp}} = \frac{t_1 - t_2}{\sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}; \quad (3.13)$$

où t_1 et t_2 - les moyennes arithmétiques des échantillons, avec $t_1 > t_2$.

A partir de la table t- de distribution [40][45], en fonction du nombre de degrés de liberté K, on définit la valeur du critère t_T , avec

$$k = n_1 + n_2 - 2 ; \quad (3.14)$$

Si $t_{\text{exp}} > t_T$, alors l'hypothèse sur l'homogénéité est rejetée. Si $t_{\text{exp}} < t_T$, les échantillons sont considérés homogènes.

III.5. Vérification de l'hypothèse sur la concordance des distributions expérimentale et théorique.

Pour des échantillons complets, cette vérification est menée par l'une des méthodes suivantes :

- Pour un nombre de variables aléatoires dans l'échantillon supérieur à 50, on utilise la méthode graphique ;
- pour un nombre de variables aléatoires dans l'échantillon supérieur à 100, on utilise le critère de Pearson.

Par la méthode graphique, les résultats obtenus sont disposés dans une série variationnelle et tout le diapason de variation de la variable aléatoire est divisé en plusieurs intervalles où dans chacun d'eux il y a un minimum de cinq valeurs. Le nombre d'intervalles « r » en fonction du nombre de données dans l'échantillon est :

Pour :

n	70	100	200	400	1000
r	10	12	18	25	35

La longueur de l'intervalle est :

$$\Delta t = \frac{t'' - t'}{r}, \quad t' \leq t_{\min}, \quad t'' \geq t_{\max} \quad (3.15)$$

Pour chaque intervalle, on détermine les paramètres suivants : le nombre de valeurs de la variable aléatoire n_j dans l'intervalle donné j ; le nombre total de

valeurs de la variable aléatoire $\sum_1^j n_j$ de 1 jusqu'à la fin du $j^{\text{ième}}$ intervalle. Dans le premier intervalle, le nombre de valeurs de la variable aléatoire n_1' diminue de 0,5 :

$$n_1 = n_1' - 0,5 \quad (3.16)$$

Pour chaque intervalle, on définit les valeurs statistiques de la fonction de distribution

$$F_j = \sum_1^j n_j / n \quad (3.17)$$

La vérification de l'accord des données statistiques avec la distribution théorique suivant les grilles de probabilités est réalisée de la manière suivante : les distributions de weibull, exponentielle, normale, logarithmique normale, extrême sont utilisées suivant les grilles de probabilité respectives. Dans la grille de probabilité on place les points de coordonnées (t_j, F_j) et par ces points, on trace une droite d'approximation. Pour cela, on calcule les valeurs des paramètres de distribution. Au cours de la vérification de la distribution de Weibull pour l'évaluation de ses paramètres (l'échelle a , la forme b et le décalage a_c), on calcule l'asymétrie à partir de l'expression :

$$\rho_b = \frac{\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (t_i - t)^3}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - t)^2 \right]^{3/2}} ; \quad (3.18)$$

A partir de la valeur calculée de ρ_b , on trouve l'évaluation du paramètre b et les valeurs des coefficients g_b et k_b .

L'évaluation des paramètres a et a_c est définie par les expressions :

$$a = \frac{S}{g_b} ; \quad (3.19)$$

$$a_c = \bar{t} - ak_b = \bar{t} - a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \quad (3.20)$$

où \bar{t} et S sont calculés à partir de (3.8) et (3.9).

L'évaluation du paramètre pour la vérification de la distribution exponentielle est :

$$\lambda = \frac{1}{\bar{t}} ; \quad (3.21)$$

Pour la vérification de la distribution normale, l'évaluation de ses paramètres qui sont la valeur arithmétique moyenne \bar{t} et l'écart quadratique moyen S sont calculés à partir de (3.8) et (3.9).

Pour la vérification de la distribution logarithmique normale, l'évaluation de ses paramètres à partir des expressions [45] :

$$\overline{\ln t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i ; \quad (3.22)$$

$$S_1 = \frac{1}{n(n-1)} \sqrt{n \sum_{i=1}^n \ln^3 t_i - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i\right)^2} ; \quad (3.23)$$

Pour la vérification de la distribution extrême, ses paramètres de forme δ et d'échelle q ont respectivement pour expressions :

$$\delta = \frac{\sigma_n}{S} ; \quad (3.24)$$

$$q = \bar{t} + \frac{\bar{y}_n}{\delta} ; \quad (3.25)$$

où \bar{y}_n et σ_n - valeur moyenne normalisée et l'écart quadratique moyen pour les n nombres de valeurs de la variable aléatoire.

Pour la vérification de la distribution extrême des membres maximums, l'évaluation du paramètre δ est calculée à partir de (3.24), alors que :

$$q = t - \frac{y_n}{\delta} ; \quad (3.26)$$

Pour tracer la droite d'approximation sur la grille de probabilité, on désigne, en plus des points d'expérimentation, deux points supplémentaires par où passe la droite qu'on doit tracer. Les coordonnées de ces points sont :

- pour une distribution de Weibull : $(a, F = 0,632)$ et $(a + \frac{1}{b}, F = 0,934)$, les abscisses des points a et $(a + \frac{1}{b})$ sont placés suivant une échelle logarithmique supplémentaire $\ln t$, (Fig.3.5).

- pour une distribution normale $(\bar{t}, F = 0,500)$ et $(\bar{t} + S, F = 0,841)$, (Fig.3.6).

Par la suite, sur la grille, on détermine l'écart des points statistiques représentés par rapport à la droite d'approximation suivant l'axe des ordonnées, on choisit le plus grand parmi eux D_{app} , à partir du critère de Kolmogorov [45]

$$D_{app} \leq D_T \quad (3.27)$$

Si $D_{app} \geq D_T$, alors il n'y a pas de concordance entre les distributions statistique et théorique.

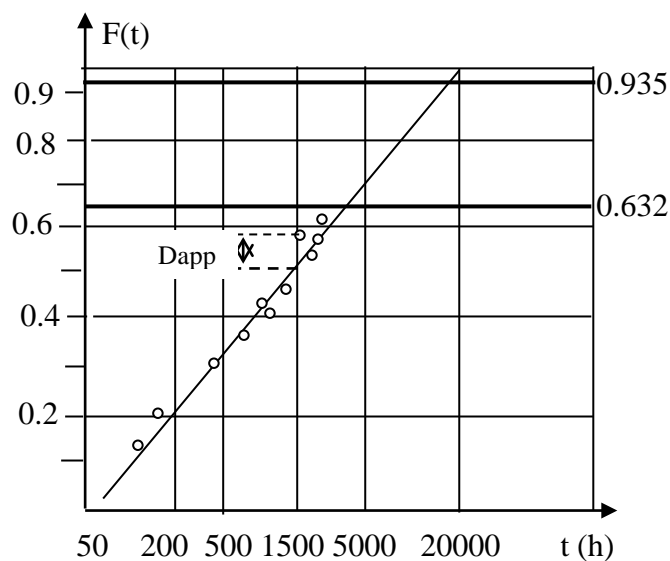


Fig.3.5 Grille de probabilité pour une distribution de Weibull.

Pour la vérification de la conformité des données statistiques avec celles théoriques, la distribution suivant le critère de Pearson est définie par l'écart entre les valeurs statistiques et théoriques de la densité de distribution :

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^r \frac{(n_j - np_j)^2}{np_j}$$

où p_j probabilité théorique que la variable aléatoire soit située dans le $j^{\text{ième}}$ intervalle.

Pour cela, les données d'observations obtenues sont divisées en intervalles de la même façon que pour la méthode graphique. Par la suite pour chaque intervalle $(t_{j-1} - t_j)$ on définit les paramètres n_j et p_j et on les présente sous forme de tableau. S'il apparaît que, pour un quelconque intervalle, $np_j < 10$, les probabilités théoriques aux points de divisions des intervalles t_1, t_2, \dots, t_{r-1} sont déterminées à partir des fonctions :

$$P_1 = F(t_1) ; \quad (3.28)$$

$$P_j = F(t_j) - F(t_{j-1}) ; \quad (3.29)$$

$$P_r = 1 - F(t_{r-1}) ; \quad (3.30)$$

où $F(t_j)$ - une fonction théorique de distribution.

Pour le calcul de la fonction théorique de distribution, initialement, comme pour la méthode graphique, à partir des expressions (3.8), (3.9), (3.18)-(3.19), on calcule les paramètres de distribution, et par la suite on définit $F(t_j)$ à partir de :

- pour une distribution de Weibull :

$$F(t_j) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t_j - a_e}{a} \right)^b \right] ; \quad (3.31)$$

- pour une distribution normale

$$F(t_j) = F_0 \left(\frac{t_j - t}{s} \right); \quad (3.32)$$

A part la mesure de la divergence χ^2 , il est nécessaire de déterminer aussi les degrés de liberté à partir de :

$$K = r - 1 - \omega; \quad (3.33)$$

où ω - le nombre de paramètres de distribution, qui ont déjà été déterminés (pour la distribution de Weibull pour $a_e > 0$ on a $\omega = 3$; pour $a_e \approx 0$, $\omega = 2$).

Pour un nombre de degré de liberté k et une probabilité de confiance donnée α , à partir des abaques du critère de Pearson [45], on détermine la valeur critique χ_T^2/k et delà, on tire χ_T^2 . Si $\chi^2 \leq \chi_T^2$, alors il y a concordance des données statiques et ceux de la distribution théorique.

Application. Le temps de non défaillance d'un échantillon complet de 150 moteurs est réparti entre 198 et 19678 heures. Déterminons la concordance entre les distributions expérimentale avec la distribution normale.

Choisissons le nombre d'intervalles $r = 15$ et à partir de (2.15) déterminons la valeur des intervalles :

$$\Delta t = \frac{19678 - 198}{15} \approx 1200 \text{ heures}$$

Introduisons les frontières des intervalles, la répartition des défaillances suivant les intervalles et le nombre total des défaillances du premier jusqu'à la fin du $j^{\text{ième}}$ intervalle. Le nombre de défaillances dans le premier intervalle est calculé à partir de (3.9) ; les intervalles ayant moins de cinq défaillances sont réunis.

A partir de (3.17), on calcule les valeurs de F_j .

$n^{\circ} \text{int}$	$t_{j-1} - t_j$	n_j	$\sum_1^j n_j$	F_j
1	190 - 1488	4,5	4,5	0,03
2	1488 - 2786	4	9,5	0,063
3	2786 - 4084	9	18,5	0,123
4	4084 - 5382	16	34,5	0,23
5	5382 - 66880	13	47,5	0,316
6	6680 - 7978	10	57,5	0,383
7	7978 - 9276	11	68,5	0,456
8	9276 - 10574	20	88,5	0,59
9	10574 - 11872	11	99,5	0,663
10	11872 - 13170	10	109,5	0,73
11	13170 - 14468	9	118,5	0,79
12	14468 - 15766	6	124,5	0,83
13	15766 - 17064	8	132,5	0,883
14	17064 - 18362	6	138,5	0,923
15	18362 - 19660	5	143,5	0,956

Tab.3.3

Calculons les valeurs des paramètres de la distribution normale à partir de (3.8) et (3.9) :

$t = 9740 \text{ heures}$; $S = 4300 \text{ heures}$. Reportons sur la grille des probabilités deux points aux coordonnées $(t = 9740, F = 0,500)$; $(t = 9740 + 4300 = 14040; F = 0,841)$ et traçons la droite d'approximation. Choisissons sur la grille l'écart maximum des ordonnées des points par où passe la droite d'approximation. Lequel est de $D_{\text{app}} = 0,025$. La valeur critique du critère de Kolmogorov pour un intervalle de confiance $\alpha = 0,95$ et $n = 150$.

$$D_T = 1,36/\sqrt{150} = 0,111$$

Vu que $D_{\text{app}} < D_T$, la concordance entre les distributions expérimentale et théorique n'est pas contredite.

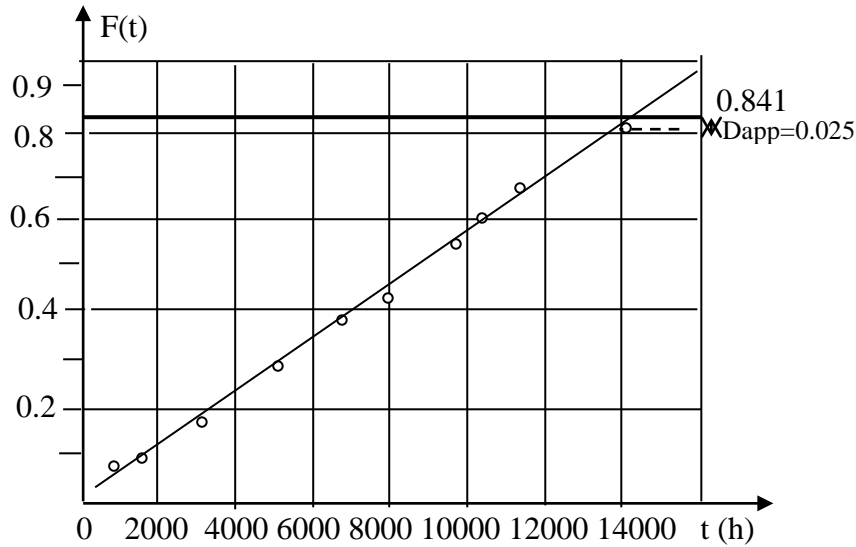


Fig.3.6 Grille de probabilité d'une distribution normale

III.6. Evaluation de l'indice de fiabilité

L'indice le plus représentatif de la fiabilité est la probabilité de non défaillance, c'est-à-dire la probabilité telle que dans l'intervalle donné de fonctionnement, la défaillance n'apparaît pas. La probabilité de non défaillance statistiquement est définie comme étant le rapport du nombre d'objets ayant fonctionnés sans défaillance jusqu'au moment t , sur le nombre total d'objet en état de fonctionnement à l'instant $t = 0$. Il est clair que $0 \leq P(t) \leq 1$; $P(0) = 1$ et $P(\infty) = 0$.

La probabilité de non défaillance est définie par :

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N} ; \quad (3.34)$$

où N – le nombre d'éléments au moment initial de l'observation ou de l'expérimentation ;

$n(t)$ - le nombre d'éléments défectueux durant la période t .

Souvent on utilise un autre paramètre - la probabilité de défaillance :

$$q(t) = 1 - P(t) \quad (3.35)$$

La probabilité statistique de défaillance est déterminée par :

$$q(t) = \frac{n(t)}{N} ; \quad (3.36)$$

L'un des indices de fiabilité est l'intensité de défaillance. Il est défini comme suit :

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t} ; \quad (3.37)$$

où $\lambda(t)$ - l'intensité de défaillance ; $N(t)$ - le nombre d'éléments en état de fonctionnement à l'instant t , $N(t + \Delta t)$ - le nombre d'éléments en état de fonctionnement à l'instant $(t + \Delta t)$; Δt - l'intervalle de temps.

Le temps moyen jusqu'à l'arrêt - c'est l'espérance mathématique de fonctionnement de l'objet jusqu'à la première défaillance. Cet indice est défini statistiquement comme étant le rapport de la somme des temps de fonctionnement des moteurs expérimentés jusqu'à l'arrêt sur le nombre de moteurs observés. La détermination du temps moyen de fonctionnement jusqu'à l'arrêt est :

$$T = \frac{1}{N} \sum_i^N t_i ; \quad (3.38)$$

où t_i - le temps de fonctionnement du $i^{\text{ème}}$ objet.

La probabilité de non défaillance, l'intensité de défaillance et le temps moyen de fonctionnement jusqu'à l'arrêt sont liés entre eux par les expressions :

$$P\{t\} = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} ; \quad (3.39)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P\{t\}} ; \quad (2.40)$$

où $f(t)$ - la densité de distribution du temps de fonctionnement jusqu'à l'arrêt.

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} dt ; \quad (3.41)$$

L'indice de la durée de vie des dispositifs non réparables est la durée de vie gamma-pourcent. Elle est définie comme étant le temps de fonctionnement durant lequel l'objet n'atteint pas son état limite avec une probabilité donnée $\gamma, \%$. Le pourcentage donné γ des dispositifs est une probabilité normalisée. Elle est déterminée à partir de l'expression :

$$P\{t\} = \frac{\gamma}{100}, \quad (3.42)$$

En conclusion, après avoir fait une brève présentation de ce qu'on appelle conditions d'exploitation et de fonctionnement qui sont des données de base de toute étude de fiabilité, une loi de vieillissement des isolants, parmi les plus utilisées dans les machines électriques, a été présentée et discutée. Une approche du traitement statistique des données sur la fiabilité des moteurs électriques est présentée. Le chapitre est clôturé par l'étude des voies possibles pouvant mener à une amélioration des machines électriques.

CHAPITRE 4

Influence des processus technologiques sur la fiabilité des machines électriques

En considérant un grand nombre de machines qui diffère non seulement par le processus technologique de production, mais aussi par les conditions de fonctionnement, on remarque que les défaillances sont réparties comme suit [40], [46]:

- Défaillance de l'enroulement statorique: 70 - 100%;
- Défaillance des roulements: 00 - 16.3%;
- Défaillance de l'axe rotorique: 00 - 12.2%;
- Défaillance rotorique: 00 - 01.2%.

La réalisation des enroulements peut être divisée en deux étapes. La première étape est la conception des éléments d'enroulement (c.a.d. les groupes de bobines). La deuxième étape est le placement de ces groupes dans les encoches. Vu le temps important alloué, le placement des enroulements prend environ 30 à 40% du temps global nécessaire pour la fabrication d'une machine électrique. Ce temps augmente avec l'augmentation de la tension et de la puissance de la machine.

L'analyse des causes de défaillance sur des moteurs asynchrones montre que les causes liées aux défauts des enroulements peut être réparties comme suit [40], [46] :

- court-circuit entre spires: 70 – 75%;
- court-circuit entre phases: 12 – 15%;
- court-circuit à la masse: 2 – 5%;
- rupture de conducteurs d'alimentation: 4 – 7%.

L'analyse des résultats acquis pendant des essais réels confirme le pourcentage élevé de pannes dû au court-circuit entre les spires de l'enroulement.

Le taux élevé de claquage des conducteurs ronds est expliqué par le fait que l'émail du conducteur, l'isolation à la masse de la machine et entre phases sont soumis à un nombre significatif de chocs et d'autres actions mécaniques. Comme résultat, des micro-fissures apparaissent dans l'isolant, particulièrement entre les spires et les bobines. Celles-ci vont évoluer dans le cas où la machine fonctionne dans des conditions d'humidité, de vibrations, de surtensions de commutation, et de forces dynamiques de démarrage et d'inversion.

Les micro-fissures peuvent également être provoquées par la double flexion des bobines lors du placement de l'enroulement à deux couches.

Ce problème et son effet sur la durée de vie des machines est l'objet d'étude dans ce chapitre.

IV.1 Modèle mathématique

Le modèle de la fiabilité des machines électriques est relativement établi.

Cependant, il ne tient pas compte de l'influence des processus technologiques.

La probabilité d'absence de claquage de l'isolant d'enroulement statorique est donnée par l'expression (4.1).

$$R(t) = P_A(t) \cdot P_B(t) \cdot P_C(t), \quad (4.1)$$

où,

$P_A(t)$ la probabilité d'absence de claquage de l'isolant entre spires;

$P_B(t)$ la probabilité d'absence de claquage de l'isolant entre les bobines et la masse;

$P_C(t)$ la probabilité d'absence de claquage de l'isolant entre phases.

Pour la conception d'un modèle mathématique de la fiabilité de l'isolation entre spires de l'enroulement d'un moteur asynchrone, on peut représenter l'enroulement comme un système, composé d'une série d'éléments dont les caractéristiques influent directement sur la fiabilité de ce système. De tels éléments peuvent être considérés comme deux conducteurs, situés côte à côte dans l'encoche ou bien dans la partie frontale de l'enroulement et séparés par une isolation entre spires. Pour obtenir un fonctionnement performant du système (enroulement), un état de bon fonctionnement de tous les éléments faisant partir de celui-ci est nécessaire, car le claquage de l'isolation entre une paire de spires de deux conducteurs voisins

entraîne la défaillance de tout l'enroulement. On considère que la défaillance de chaque élément est indépendante de celle des autres éléments. Une telle supposition est tout à fait naturelle. Pour que le système série fonctionne sans défaillance dans un intervalle de temps t , il est nécessaire que chaque élément fonctionne sans défaillance dans cet intervalle.

La défaillance de l'enroulement est définie par l'apparition du court-circuit entre spires. C'est pourquoi on peut considérer la valeur de la tension de claquage de l'isolation entre spires comme étant la caractéristique la plus représentative. Réellement, la variation des autres caractéristiques de l'isolation entre spires (par exemple la résistance de l'isolant, la tangente de l'angle des pertes, les propriétés mécaniques) mènent à la diminution de la tension de claquage et le claquage de l'isolant.

Par conséquent, on va considérer la tension de claquage entre spires comme étant la caractéristique définissant la fiabilité de l'enroulement.

Les éléments de l'enroulement peuvent être considérés identiques. La tension de claquage de toutes les paires de conducteurs voisins obéissent à une distribution fixée de probabilités. L'enroulement est défaillant si il y a au moins claquage d'une paire de conducteurs voisins. La défaillance apparaît quand la tension appliquée aux conducteurs voisins est supérieure à la tension de claquage de l'isolation entre spires. La tension appliquée possède aussi une certaine distribution de probabilités. La probabilité que l'isolation entre spires ne va pas claquée serait égale à la probabilité que la tension de claquage de l'isolation entre spires soit supérieure à la tension qui lui est appliquée.

Pour l'élaboration du modèle [39][40], déterminons la fiabilité d'un élément P_e . Par la suite, sachant que la fiabilité du système est égale à la fiabilité de son élément le plus défaillant, on détermine la fiabilité du système composé de n éléments.

Désignons par $f(u_B)$ la densité de distribution de la tension de claquage de l'isolation et $F(u_B)$ la fonction de distribution correspondante. Alors l'expression

$$F(u_{B2}) - F(u_{B1}) = \int_{u_{B1}}^{u_{B2}} f(u_B) dU_B \quad (4.2)$$

permet de déterminer la probabilité que la valeur de la tension de claquage de l'isolation entre spires est située dans l'intervalle U_{B1}, U_{B2} .

De manière analogue pour la tension appliquée à la section, posons $g(U_C)$ - la densité de distribution de la tension appliquée et $G(U_C)$ - la fonction de distribution correspondante. Alors,

$$G(u_{C2}) - G(u_{C1}) = \int_{u_{C1}}^{u_{C2}} g(u_C) dU_C \quad (4.3)$$

est égale à la probabilité que la valeur de la tension appliquée est située dans l'intervalle U_{C1}, U_{C2} .

Introduisons des variables aléatoires positives :

X, proportionnelle à la tension de claquage U_B de l'isolation entre spires ;

Y, proportionnelle à la tension U_C appliquée à la section.

Alors les probabilités peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} P\{X \leq U_B\} &= F(U_B) \\ P\{Y \leq U_C\} &= G(U_{BC}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

On considère que X et Y comme des variables aléatoires indépendantes. La fiabilité de l'élément (une paire de conducteurs voisins) est égale à la probabilité d'absence de claquage sous l'influence de la tension appliquée, c.à.d :

$$P_e = P\{X > Y\} \quad (4.5)$$

Le terme $P\{X > Y\}$ peut être exprimé sous forme intégrale en fonction de la densité de probabilité $f(U_B)g(U_C)$ dans le domaine où $X > Y$. Alors,

$$P_e = P\{X > Y\} = \int_0^{\infty} \int_{U_C}^{\infty} f(U_B)g(U_C)dU_BdU_C \quad (4.6)$$

ou bien

$$P_e = \int_{U_c}^{\infty} g(U_c)[1 - F(U_c)]dU_c \quad (4.7)$$

Pour déterminer la fiabilité de l'enroulement, on suppose que le système est conçu de n éléments choisis d'un ensemble avec une densité de distribution de la rigidité électrique de l'isolation entre spires $f(U_B)$. Cela est identique au cas où on prendrait (considérerait) un échantillon aléatoire $U_{B1}, U_{B2}, \dots, U_{Bn}$ valeurs de la tension de claquage de l'isolation entre spires à partir de l'ensemble avec une densité de probabilité $f(U_B)$. La tension de claquage de l'enroulement (système) $U_{enr.}$ composé de n éléments est égale au minimum de U_{Bi} .

Exprimons la distribution des probabilités $U_{enr.}$ en fonction de $f(U_B)$. Soit $f_n(Y)$ - la densité de probabilités $U_{enr.}$; Considérons que $U_{enr.} = U_{B1}$, c.à.d que U_{B1} - est le minimum de U_{Bi} .

Sachant que dans le cas considéré, le modèle tolère plusieurs solutions, la distribution doit être multinominale. A l'aide de cette distribution on peut calculer la probabilité d'avoir U_{Bi} dans l'intervalle $(y, y + dy)$, et U_{B2}, \dots, U_{Bn} - dans le domaine des grandes valeurs de Y. Alors, après transformations, on obtient :

$$P\{y < y + dy\} = P\{U_{enr.} < U_{enr.} + dU_{enr.}\} = nf(y)[1 - F(y)]^{n-1} \quad (4.8)$$

A partir de (7), la fonction de distribution de la tension de claquage de l'enroulement composée de n éléments est égale à :

$$F_n(y) = \int_0^y f_n(v)dv = \int_0^y n[1 - F(v)]^{n-1} f(v)dv \quad (4.9)$$

Après intégration, on obtient

$$F_n(y) = F(U_{enr.}) = 1 - [1 - F(y)]^n \quad (4.10)$$

Pour toute valeur de la tension appliquée U_C ayant une densité de distribution des probabilités $g(U_C)$, la probabilité que la tension de claquage de l'enroulement dépasse la tension U_C , sur la base de (4.7) devient :

$$P_n = P\{U_{\text{enr.}} > U_C\} = \int_0^{\infty} g(U_B)[1 - F_n(U_B)]dU_B \quad (4.11)$$

En tenant compte de (4.10), on obtient :

$$P_{\text{enr.}} = \int_0^{\infty} g(U_B)[1 - F(U_B)]^n dU_B \quad (4.12)$$

L'expression (4.12) représente le modèle mathématique recherché de la fiabilité de l'isolation entre spires de l'enroulement composé de n paires de conducteurs.

Il est facile de montrer que la fiabilité réelle de l'isolation entre spires $P_{\text{enr.}}$ est située dans l'intervalle

$$P_e^n \leq P_{\text{enr.}} \leq P_e \quad (4.13)$$

c.à.d. qu'entre le nième degré de fiabilité de l'élément et son premier degré. Est ce que la fiabilité de l'isolation entre spires de l'enroulement serait égale à l'une de ces valeurs limites ou à une quelconque valeur de cet intervalle, tout cela dépendra du type de distribution de $f(u_B)$ et $g(U_C)$.

La valeur supérieure de la fiabilité $P_{\text{enr.}} = P_e$ serait observée quand la variance de la tension de claquage de l'isolation entre spires est nulle, c.à.d. quand toute la probabilité est concentrée au point $U_B = \overline{U_B}$.

La limite inférieure de la fiabilité de l'enroulement $P_{\text{enr.}} = P_e^n$ est spécifique au cas, quand la valeur de la tension appliquée à la section U_C ne peut prendre qu'une seule valeur.

Si on désigne par N le nombre de conducteurs efficaces de l'enroulement, alors le nombre d'éléments du modèle peut être déterminé par :

$$n \approx 2,7N \quad (4.14)$$

$$N = SCZ \quad (4.15)$$

où s – le nombre efficace de conducteurs dans une section ;

C – le nombre de côtés de la section dans l'encoche (pour l'enroulement à une couche C=1, et pour deux couches C=2) ; Z – le nombre d'encoches.

A partir de (4.12), implique que pour calculer la fiabilité de l'isolation entre spires de l'enroulement, il est nécessaire de connaître la distribution de la tension de claquage de l'isolation entre spires, ainsi que les tensions appliquées. Considérons de plus près les lois de distributions de ces tensions.

La tension appliquée à la section est définie par les facteurs suivants : la valeur de la tension simple, les surtensions de commutation et la disposition mutuelle des conducteur dans la section.

Les surtensions de commutation dans l'enroulement des machines de faibles tensions peuvent atteindre trois et sept fois les tensions simples [34].

Les moteurs asynchrones de puissances de 0,6 jusqu'à 100 kW possèdent généralement des encoches à demi fermées et un enroulement à conducteurs émaillés. Le processus technologique d'exécution de l'enroulement à conducteur rond est le suivant :

On bobine les sections sur un chablon, et par la suite, on les introduit dans l'encoche par un, deux ou trois conducteurs à la fois. Il faut signaler que la disposition des conducteurs dans l'encoche est aléatoire, et n'est pas conservée telle qu'elle est obtenue dans le chablon. De la disposition mutuelle des conducteurs dans l'encoche dépend la valeur de la tension entre eux.

Si on considère le processus de mise en encoche des conducteurs tout à fait aléatoire, alors la probabilité de leurs dispositions dans l'encoche peut être déterminée à partir du modèle probabiliste suivant :

Supposons que le faisceau possède S conducteurs. Attribuons à chacun d'eux un numéro de 1 à S' suivant la succession de bobinage). Alors la tension appliquée à deux conducteurs voisins est proportionnelle à la différence des numéros de ces conducteurs l, c.à.d : $U_C \equiv l$.

La probabilité de formation d'une paire à partir de deux conducteurs avec une différence donnée de numéros, par définition, est égale au rapport du nombre de résultats favorables sur le nombre total possible.

Le nombre total possible dans notre cas correspond au nombre total de paires de conducteurs dans la section, égal au nombre de combinaisons de S par 2,[39]; c.à d,

$$\frac{S(S-1)}{2}.$$

Les résultats favorables sont les apparitions des paires de conducteurs avec une différence de numéros égale à 1. De telles paires dans la section peuvent être $(S-1)$.

Alors la probabilité recherchée $P\{1\}$ est :

$$P\{1\} = \frac{2(S-1)}{S(S-1)} \quad (4.16)$$

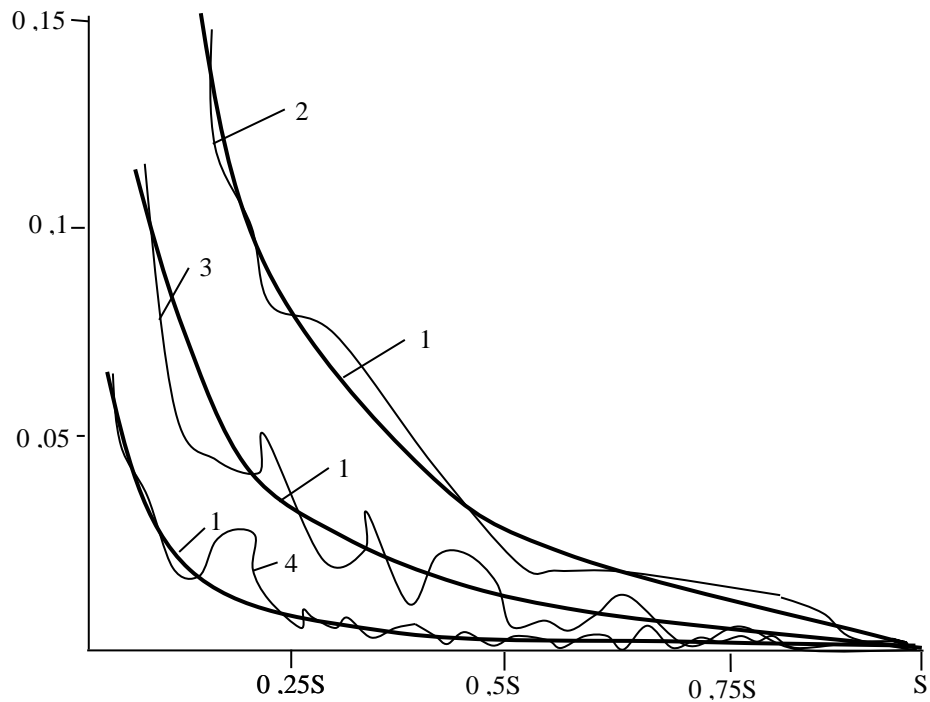


Fig.4.1 Probabilité de distribution des conducteurs dans l'encoche.

1- Courbes théoriques à partir de (4.12) ; 2 - Courbes empiriques pour une encoche à 18 spires ; 3 – Même chose pour une encoche de 32 spires ; 4 – Même chose pour une encoche de 72 spires [40].

En réalité le processus de mise en encoche des conducteurs n'est pas tout à fait aléatoire. Cela a été démontré expérimentalement.

Dans des moteurs bobinés, mais non imprégnés de vernis, les parties frontales des sections ont été coupées (d'un seul côté). Toutes les spires coupées ont été numérotées suivant la succession de leur bobinage ; de même que la différence des numéros pour toutes les paires voisines a été calculée. La comparaison des distributions empiriques obtenues de la différence des numéros des conducteurs avec la distribution théorique suivant (4.16), à l'aide du critère de Pearson a montré

que l'hypothèse nulle est rejetée, c.à d. que le processus de mise en encoche des conducteurs n'est pas tout à fait le fait du hasard.

Les recherches sur des encoches de moteurs, ainsi que sur des modèles d'encoches (fig.4.1) ont montré que la probabilité réelle de distribution des conducteurs dans l'encoche peut être déterminée à partir de l'expression empirique suivante, [39] :

$$P\{l\} = \frac{\ln \frac{S}{1}}{0,98S - 1,6} \quad (4.17)$$

L'expression (4.17) détermine aussi la probabilité de distribution de la tension entre spires ; c. à d. $p\{U_C\} = P\{l\}$.

En supposant que les surtensions de commutation sont appliquées principalement à la première section de la phase d'enroulement, on peut écrire :

$$U_C = \frac{U_{ph} k}{S} l \quad (4.18)$$

où U_{ph} - la tension simple ;

k – le rapport des surtensions de commutation.

En réalité la distribution des surtensions de commutation est plus complexe. De plus, au cours du calcul de la fiabilité, il est nécessaire de tenir compte des différents degrés d'influence des tensions impulsionnelles (commutation) et sinusoïdales de fréquence industrielle sur l'isolation entre spires. Cependant, ces questions exigent encore des recherches supplémentaires.

Déterminons l'espérance mathématique et la variance de la distribution de la tension entre spires dans l'encoche :

$$E(U_C) = \sum_{U_C = \frac{U_{ph} k}{S} l}^{\frac{U_{ph} k}{S} \cdot (S-1)} U_C P\{U_C\} \quad (4.19)$$

En remplaçant (4.17) et (4.18) dans (4.19), et après transformation, on obtient :

$$E(U_C) \approx 0,25 U_{ph} k \quad (4.20)$$

Déterminons la variance :

$$V(U_C) = \sum_{U_c = \frac{U_{ph.k}}{s}}^{\frac{U_{ph.k}}{(s-1)}} U_C^2 P\{U_C\} - [M(U_C)]^2 \quad (4.21)$$

En remplaçant (4.17), (.18 et (4.20) dans (4.21), on obtient :

$$V(U_C) \approx 0,035 U_{ph.k}^2 \quad (4.22)$$

L'écart quadratique moyen (ou écart type)

$$S = \sigma(U_C) \approx 0,185 U_{ph.k} \quad (4.23)$$

Le coefficient de variation

$$v = \frac{\sigma(U_C)}{E(U_C)} \cdot 100\% = 74\% \quad (4.24)$$

Les résultats obtenus montrent le changement de position des conducteurs au cours de leur placement dans les encoches, la tension entre les conducteurs en moyenne est de 25% de la tension appliquée à la section, c.à d. relativement importante. Le coefficient de variation de la tension est aussi important 74%. Cette situation réduit la fiabilité des enroulements à conducteurs ronds par rapport à l'enroulement dont les conducteurs des sections sont placés dans les encoches dans le même ordre.

La distribution de la tension de claquage de l'isolation entre spires d'une paire de conducteurs voisins nécessaire pour le calcul de la fiabilité de l'isolation entre spires à partir de l'expression (4.12) doit être obtenues expérimentalement. Le mieux serait d'obtenir ces données sur un enroulement imprégné avec une coupe sur la partie frontale. En faisant claquer les paires de conducteurs voisins d'un tel enroulement, on peut obtenir la courbe de distribution de la tension de claquage recherchée.

La figure (4.2) représente la construction graphique qui explique le sens de ce modèle. Suivant le modèle conçu, on peut déterminer la fiabilité de l'isolation entre spires de l'enroulement d'un moteur asynchrone pour n'importe quel moment d'exploitation. Pour cela il s'agit seulement de connaître la variation de la distribution statique de la tension de claquage en fonction du temps d'exploitation

sous l'influence des facteurs d'exploitation tels que la chaleur, la tension, l'humidité, les vibrations, les surtensions de commutation et les forces exercées lors des démarrages (ou les inversions), ... On peut obtenir ces résultats sur les stators des moteurs électriques après un temps d'exploitation donné, en coupant d'un côté la partie frontale de l'enroulement et en faisant claquer les conducteurs voisins.

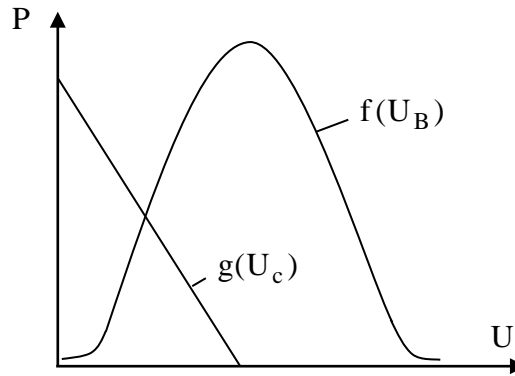


Fig.4.2 Courbes du modèle de fiabilité de l'isolation entre spires à conducteur rond [39].

La précision du calcul de la fiabilité de l'isolation entre spires de l'enroulement suivant le modèle développé dépend de la précision de la courbe expérimentale de distribution de la tension de claquage entre spires obtenue.

La distribution expérimentale des tensions de claquage des paires de spires de l'enroulement statorique à une couche est conforme à la distribution du premier type [40].

L'analyse des méthodes d'essai permet de conclure qu'il est préférable de calculer la tension de claquage d'enroulement en tenant compte de tous les processus technologiques, y compris la double flexion.

La probabilité d'absence de claquage d'un élément donné de l'isolant est définie par le système d'équations (4.25) [40],[46] :

$$\begin{aligned}
 P_i &= C_i \exp(-\exp y_i) \\
 C_i &= \exp\left[\exp - (\delta'_i \cdot q'_i)\right] \\
 q'_i &= K_{im} U'_i + \frac{\bar{y}}{\delta'_i} \quad , \quad (4.25)
 \end{aligned}$$

$$y_i = \delta'_i (K_s K_T M 2U_{ph} - q'_i)$$

$$\delta'_i = \frac{\delta_m}{S_i}$$

où

y_i - variable normalisée;

K_s - le rapport de surtension;

M - coefficient tenant compte de l'action de la tension sur de simples spires placées côte à côte.

Il indique des défauts d'isolation entre les spires d'enroulement pour une tension donnée lors du fonctionnement ;

U - la tension moyenne de claquage de l'isolant;

S - l'écart type de la tension de claquage ;

K_s , K_T et M doivent être définis indépendamment pour chaque type d'isolant.

IV.2 Expérimentation et résultats

Une tension est appliquée aux conducteurs placés côte à côte selon le chemin 1-2 ; 2-3 ; 3-4 ; 4-5. Illustre l'influence de la double flexion pendant le placement d'enroulements à deux-couches par « levée » sur la défaillance d'isolant entre les spires de l'enroulement, c.-à-d. sur la fiabilité. Deux populations d'échantillons d'enroulement ont été conçus. Ces échantillons ont été préparés comme suit.

L'enroulement a été conçu à l'aide d'un conducteur émaillé placé dans les encoches du stator par la méthode de « levée » comme représenté sur la figure (4.3) [49][50]. Les bobines, dont le nombre est égal au pas d'enroulement, sont placées d'un côté en bas des encoches , de l'autre laissées en attente selon le processus technologique requit, c.-à-d. la double flexion.

Les bobines restantes sont automatiquement placées d'un côté en haut, de l'autre en bas des encoches. Enfin on place les faisceaux laissés en attente. Ensuite, sans procéder au vernissage de l'enroulement, les bobines sont retirées et deux échantillons de conducteurs de 100 millimètres chacun sont réalisés: le premier avec les conducteurs des bobines soulevées, et le second avec des conducteurs du reste des bobines.

Les essais ont été effectués en utilisant des électrodes de planes, qui permettent un bon contact avec le conducteur. Une tension de fréquence 50Hz a été appliquée et augmentée progressivement.

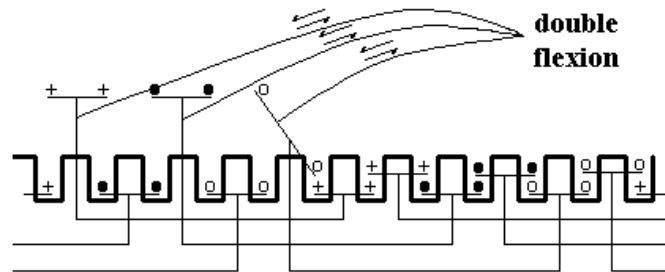


Fig.4.3 Méthode de placement par "levée" des enroulements triphasés à deux couches.

La méthode définie dans [46] a été utilisée pour déterminer la tension d'essai. La valeur moyenne de la tension efficace de claquage de l'isolant du conducteur $U_d = 0.516\text{kV}$. L'écart type de la valeur efficace de la tension de claquage d'isolant $\sigma_d = 0.315\text{kV}$. La tension d'essai efficace calculée $U_{\text{test}} = 1.6\text{kV}$.

La figure (4.4) montre les résultats expérimentaux, qui sont présentés par des courbes de défaillance en fonction de la tension. La défaillance est définie comme étant le nombre d'éléments défaillants, comparé au nombre d'éléments soumis pour l'essai sous une tension donnée. Le taux de défaillance pour les bobines soulevées durant le processus du placement dans les encoches est plus important que celui du reste des bobines.

Pendant le fonctionnement des moteurs électriques, la valeur de la tension entre les spires de l'enroulement d'enroulement n'excède généralement pas 0.6 kV. Par conséquent, seul l'intervalle de (0.3 à 0.6 kilovolt) a été considéré. La détermination des défaillances entre les phases et à la masse du moteur a été effectuée d'une manière identique, en examinant deux groupes d'échantillons se composant de 100 conducteurs chacun et en augmentant la tension entre les électrodes cylindrique avec les paramètres suivants $U_{\text{test}} = 3.0\text{kV}$, et $\sigma_d = 0.21\text{kV}$.

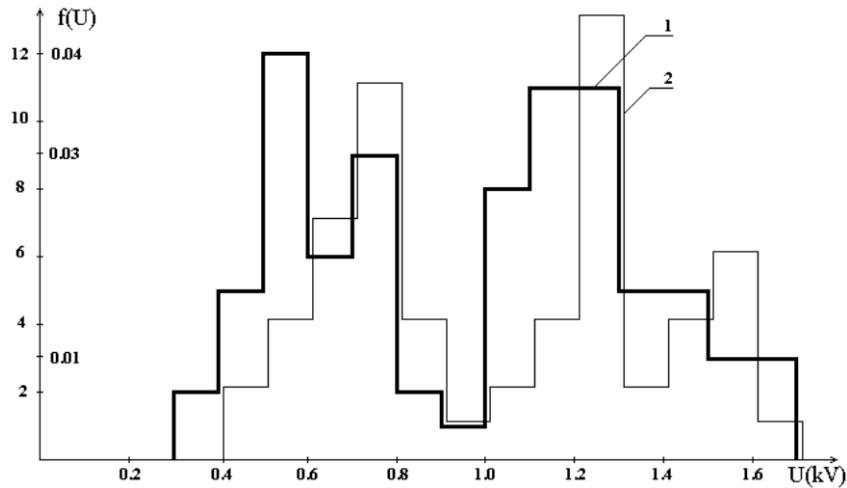


Fig. 4.4a. Courbes de défaillance (moteur AO2-81-2) ;
 1 – Bobines ayant été soumises à la double flexion ;
 2 – bobines non soumises.

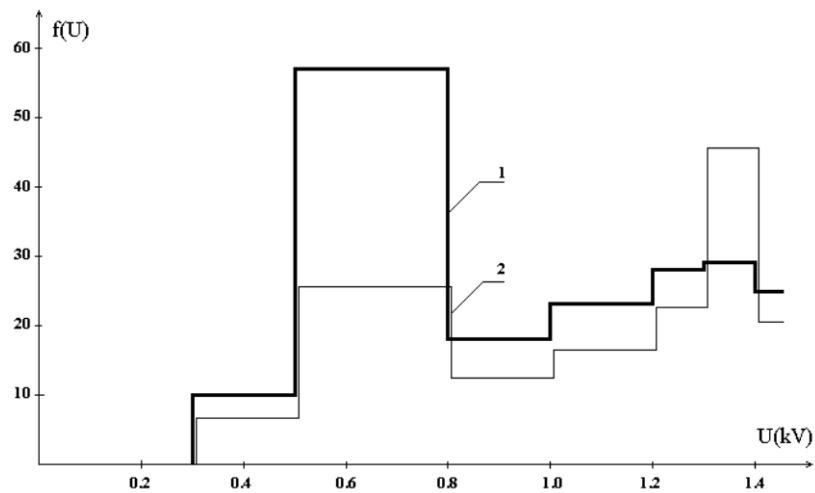


Fig.4.4b. Courbes de défaillance (moteur AO2-81-4) ;
 1 – Bobines ayant été soumises à la double flexion ;
 2 – bobines non soumises.

La figure (4.5) montre que l'utilisation de la méthode de placement par « levée », nécessitant la double flexion, entraîne une réduction de la durée de vie de 1.000 heures pour une période de fonctionnement de 15.000 heures comparée à la méthode de placement asymétrique. La méthode symétrique de placement de succession [47] peut être considérée comme solution au problème.

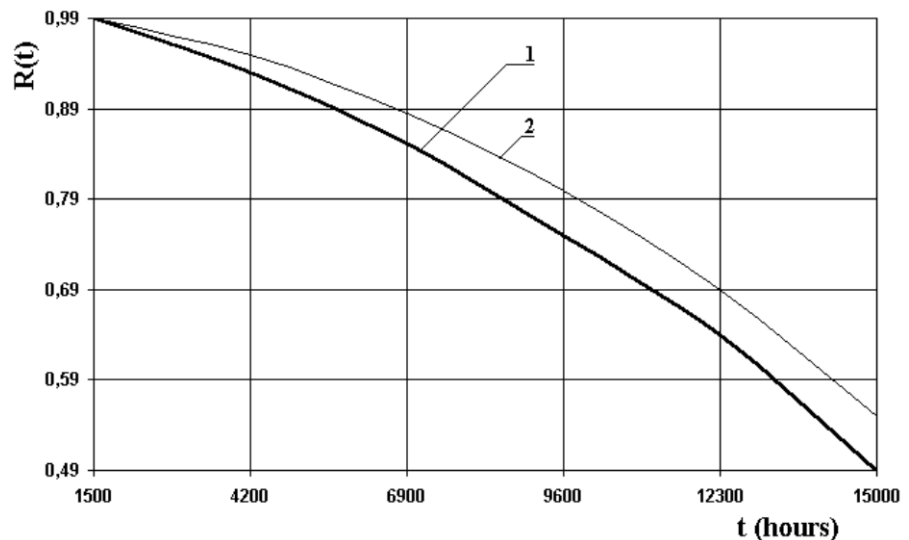


Fig. 4.5 Probabilité de non défaillance (moteur AO2-81-4)

- 1 – Méthode de placement par “levée” des enroulements triphasés à deux couches.
- 2 – Méthode de placement asymétrique des enroulements triphasés à deux couches.

La recherche bibliographique approfondie a permis de confirmer qu’il existe plusieurs méthodes de placement des enroulements à deux couches avec des conducteurs émaillés. Cependant, la plupart des sociétés continuent d’employer le processus par "levée" traditionnel. En plus de la difficulté du processus et du temps nécessaires à son exécution, cette étude a montré que la double flexion incluse dans le processus réduit la durée de vie de la machine de 6 à 8% à cause de l’apparition de micro fissures. Cette valeur varie en fonction de la qualité de isolant du conducteur. L'utilisation de la méthode symétrique de placement de succession [47] peut être considérée comme solution à ce problème.

IV.3 Etude de l’utilisation optimale de la méthode de placement sans « levée »

L’enroulement par « levée » désigné utilisant le conducteur rond émaillé est décrit par la figure (4.6). Le principal avantage d’un tel enroulement est contenu dans la possibilité de pouvoir obtenir un enroulement parfaitement symétrique où chaque bobine est placée d’un côté en haut de l’autre en bas des encoches. Quand le nombre d’encoches par pôle et par phase est entier, cela permet de réaliser un nombre de branches parallèles égal à $2p$.

Cependant, en plus des difficultés du processus et le temps nécessaire à son exécution, cette méthode ne peut être utilisée dans les machines de faibles diamètres.

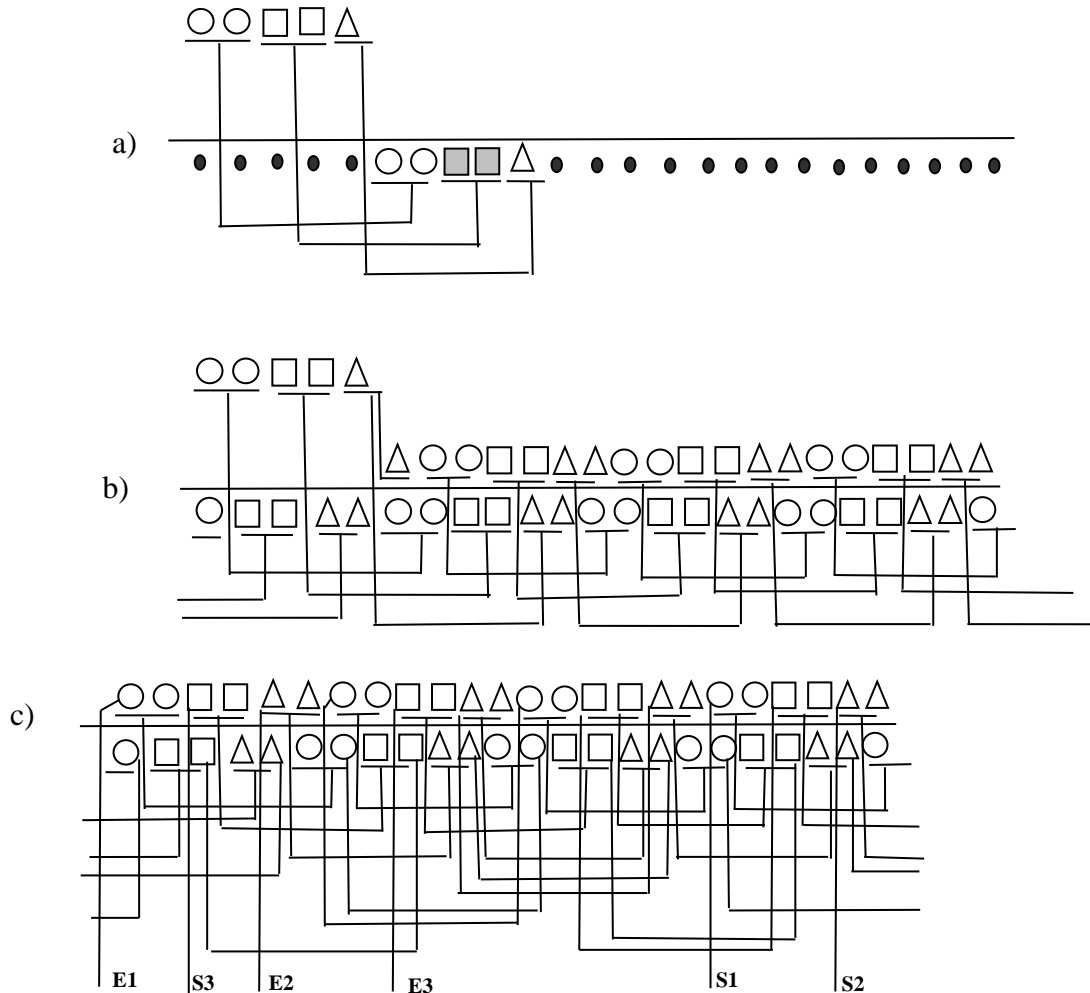


Fig.4.6 Méthode de placement par "levée" d'un enroulement à deux couches (MPL).

C'est pour cela qu'on trouve, en pratique, plusieurs méthodes de placement par succession asymétriques (MPSA). L'inconvénient principal de ces méthodes est caractérisé par la distribution non uniforme des faisceaux en haut et en bas des encoches, ce qui rend difficile la réalisation des branches parallèles. Généralement ces méthodes sont utilisées dans les ateliers de réparation.

Les méthodes asymétriques existantes entraînent une différence de courants entre les phases et les branches parallèles à cause du flux de fuite qui croît avec le raccourcissement du pas d'enroulement. Les critères de performances des MPSA et

la durée de vie de méthodes de placement symétriques (MPS) sont l'objet de cette étude

IV.4 Formulation du problème d'asymétrie par les Perméances [39][46].

La réactance des perméances d'encoches de l'enroulement avec un nombre de branches parallèles "a" :

$$X_s = 4\pi\mu_0 f \frac{\omega^2}{pq} I_\delta \lambda_s, \tag{4.26}$$

où I_δ - la longueur du stator.

Dans le cas général, les perméances d'encoches des enroulements à deux couches sont définies par :

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1 + \lambda_h + 2g.\lambda_g}{4} \tag{4.27}$$

Les perméances des côtés haut et bas de la bobine sont définies par (fig.4.7):

$$\lambda_1 = \lambda_h = \frac{4h'_1}{3b} + \frac{h'_1 + h'_2}{b} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4} \tag{4.28}$$

Les perméances dues à la mutuelle inductance quand les courants sont en phase:

$$\lambda_g = \frac{h_1}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{b} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4} \tag{4.29}$$

où g – coefficient tenant compte du déphasage entre les courants en haut et en bas des encoches [49]: $g = \frac{3\beta + 1}{4}$, où β - le pas relatif de l'enroulement.

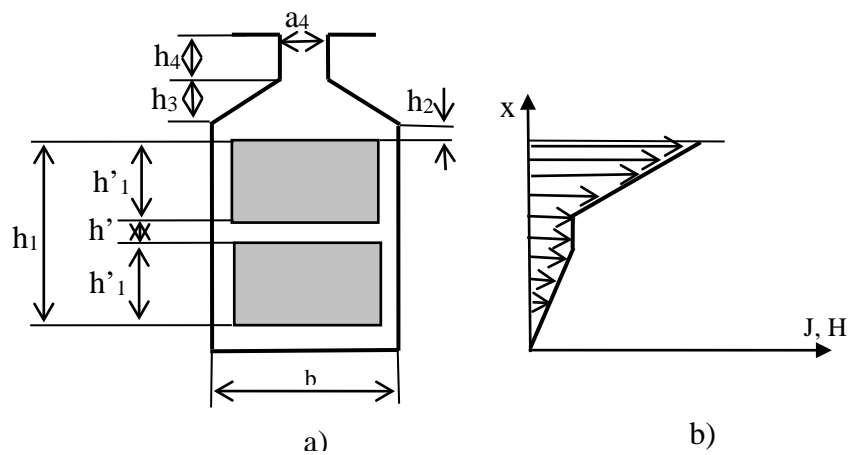


Fig.4.7 a) Encoche statorique ;

b) Distribution du courant par rapport à la hauteur de l'encoche.

L'expression de la perméance moyenne de l'encoche d'un enroulement à deux couches:

$$\lambda_s = \frac{1}{4} \left[\frac{23 + 9\beta}{12} \cdot \frac{h_1'}{b} + \frac{h_1'}{b} + \frac{3\beta + 5}{2} \left(\frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4} \right) \right] \quad (4.30)$$

Cette expression ne tient pas compte du placement de l'enroulement et suppose que ce dernier est parfaitement symétrique. Si l'enroulement est réalisé par la méthode de « levée », le nombre de faisceaux en bas et en haut des encoches dans chaque branche parallèle est le même, et égal à $2pq/a$.

Dans les enroulement asymétriques à deux couches, le nombre de faisceaux en bas et en haut des encoches de l'une des branches parallèles de la phase B est toujours plus grand que celui des faisceaux situés en bas. Ce qui signifie qu'en haut, on aura $(2pq/a) + d$ et en bas $(2pq/a) - d$.

où d – le nombre de faisceaux dans une branche parallèle supérieure à la valeur moyenne.

Pour pouvoir tenir compte de la non uniformité de distribution des faisceaux dans les encoches, exprimons les perméances sous la forme :

$$\lambda_s = \left[\sum \lambda_l + \sum \lambda_h + \frac{pq}{a} 2g\lambda_g \right] \frac{a}{4.2pq} \quad (4.31)$$

Avec l'introduction du nombre de faisceaux en haut et en bas de la phase B, les perméances moyennes deviennent :

$$\lambda_s = \left[\frac{2pq}{a} (\lambda_l + \lambda_h + 2g\lambda_g) + d(\lambda_l + \lambda_h) \right] \frac{a}{8pq} \quad (4.32)$$

En introduisant les dimensions de l'encoche (fig.4.7):

$$\lambda_s = \frac{1}{4} \left[\frac{23 + 9\beta}{12} \cdot \frac{h_1'}{b} + \frac{h_1'}{b} + \frac{3\beta + 5}{2} \left(\frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4} \right) \right] - \frac{da}{8pq} \left(\frac{h_1'}{b} + \frac{h_1'}{b} \right) \quad (4.33)$$

Si l'enroulement est symétrique :

$$\lambda_{so} = \frac{1}{4} \left[\frac{23+9\beta}{12} \cdot \frac{h_1'}{b} + \frac{h'}{b} + \frac{3\beta+5}{2} \left(\frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4} \right) \right] \quad (4.34)$$

Si l'enroulement est à une couche ($\beta = 1$) :

$$\lambda_{s1} = \frac{32}{48} \cdot \frac{h_1'}{b} + \frac{12h'}{48b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4} \quad (4.35)$$

Sachant que $h_1 = 2h_1' + h'$:

$$\lambda_{s1} = \frac{h_1'}{3b} - \frac{h'}{12b} + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4} \right) \quad (4.36)$$

A partir de [46], les perméances d'encoches d'un enroulement à une couche ont comme expression:

$$\lambda_{s1*} = \frac{h_1'}{3b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4} \quad (4.37)$$

De plus: $\lambda_{s1} = \lambda_{s1*} - \frac{h'}{12b}$.

Si $\frac{h'}{12b}$ est très petit (ce qui est généralement le cas), alors $\lambda_{s1} = \lambda_{s1*}$.

Quand $\beta \neq 1$, la comparaison entre (4.30) et (4.33) dans le cas d'un enroulement asymétrique, on peut noter que les perméances sont réduites d'une valeur de:

$$\frac{da}{8pq} \left(\frac{h_1'}{b} + \frac{h'}{b} \right) \quad (4.38)$$

Dans le cas particulier d'un enroulement obtenu par la méthode de placement par succession asymétrique (la méthode asymétrique la plus utilisée, fig.4.8) qui consiste dans le placement des groupes de bobines successivement dans un même sens jusqu'à l'obtention de l'enroulement; l'expression (4.38) devient :

$$\frac{3a}{8p} \left(\frac{h'_1}{b} + \frac{h'}{b} \right) (\beta - 1) \quad (4.39)$$

Ce qui signifie que l'application de l'expression généralement présentée aux enroulements asymétriques à deux et à une-deux couches entraînent une surévaluation de ce coefficient. Il est à signaler, à partir de (4.38) et (4.39) que l'asymétrie dépend principalement de β , a et p .

Par conséquent, pour une utilisation effective des enroulements asymétriques, il est nécessaire d'introduire un critère liant les paramètres de l'enroulement et la valeur admissible de l'asymétrie. Choisissons le critère basé sur la variation des courants :

$$\Delta I^* = \frac{I_h - I_m}{I_m} \leq \delta_{cr} \quad (4.40)$$

où I_h - la plus grande valeur de courant dans une branche parallèle; I_m - le courant moyen d'une branche parallèle.

Sachant que $\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_h + \lambda_o$, où λ_o - les perméances frontales, D le nombre de faisceaux en haut dans une branche parallèle et $4pq/a$ le nombre de faisceaux dans une branche; alors $(4pq/a) - D$ - sera le nombre de faisceaux en bas. Le coefficient de perméance d'une branche parallèle:

$$\lambda_s = D\lambda_h - \left(\frac{4pq}{a} - D \right) \lambda_1 + \frac{2pq}{a} \lambda_o \quad (4.41)$$

Les perméances moyennes sont obtenues quand $D = (4pq/a) - D$;ou $D = 2pq/a$; alors,

$$\lambda_{s.m} = \frac{2pq}{a} (\lambda_1 + \lambda_h + \lambda_o).$$

La variation du courant dans une branche parallèle (ou phase) en comparaison au courant moyen est:

$$\Delta I^* \approx \frac{1/X_{\min} - 1/X_{\text{moy}}}{1/X_{\text{moy}}} = \frac{X_{\text{moy}} - X_{\min}}{X_{\min}} = \frac{\lambda_{\text{moy}} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\min}} \quad (4.42)$$

où X_{\min} , X_{moy} les réactances de court-circuit minimale et moyenne.

A partir des normes électrotechniques, la variation du courant doit être inférieure à 0,03 . E tenant compte de l'effet rotorique, cette valeur peut-être portée à 0,06 ;

dans ce cas:

$$\Delta I^* \approx \frac{\lambda_{\text{moy}} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\min}} \leq 0,06 \quad (4.43)$$

λ_{\min} correspond à la branche où le nombre de faisceaux en haut est supérieur à celui des faisceaux situés en bas

$$\lambda_{\min//} = D\lambda_h - \left(D - \frac{4pq}{a}\right)\lambda_1 + \frac{2pq}{a}\lambda_o \quad (4.44)$$

Sachant que $2pqm = Z$, la variation du courant devient:

$$\Delta I^* \approx \frac{\left(\frac{Z}{3a} - D\right)\left(\frac{\lambda_h}{\lambda_h + \lambda_1} - \frac{\lambda_1}{\lambda_h + \lambda_1}\right)}{\frac{\lambda_h}{\lambda_h + \lambda_1} D - \left(D - \frac{2Z}{3a}\right)\frac{\lambda_1}{\lambda_h + \lambda_1} + \frac{Z}{3a}\frac{\lambda_o}{\lambda_h + \lambda_1}} \quad (4.45)$$

A partir des acquis de conception des machines électriques [49]:

$$\frac{\lambda_h}{\lambda_h + \lambda_1} \approx 0,2 ; \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_h + \lambda_1} \approx 0,8$$

$$\frac{\lambda_o}{\lambda_h + \lambda_1} \approx 0,4 \quad \text{pour } 2p = 2 ; \quad \frac{\lambda_o}{\lambda_h + \lambda_1} \approx \frac{13}{5} \quad \text{pour } 2p = 4; 6 ;$$

et $\frac{\lambda_o}{\lambda_h + \lambda_1} \approx 2 \quad \text{pour } 2p = 8; 10$

Alors:

$$\Delta I \approx \frac{D - \frac{Z}{3a}}{\frac{28Z}{9a} - D} \leq 0,06 \quad \text{pour } 2p = 2$$

$$\Delta I \approx \frac{D - \frac{Z}{3a}}{\frac{7Z}{3a} - D} \leq 0,06 \quad \text{pour } 2p = 4; 6 \quad (4.46)$$

$$\Delta I \approx \frac{D - \frac{Z}{3a}}{\frac{2Z}{a} - D} \leq 0,06 \quad \text{pour } 2p = 8; 10$$

Ces expressions représentent les critères de symétrie des enroulements à deux et à une-deux couches des machines à courant alternatif de puissances allant jusqu'à 100 kW.

Dans le cas particulier d'un placement par succession asymétrique, le critère devient:

$$\chi = \frac{Z}{aq|(1-\beta)|} \quad (4.47)$$

$\chi \geq 19$ pour $2p = 2$; $\chi \geq 26,5$ pour $2p = 4; 6$ et $\chi \geq 32$ pour $2p = 8; 10$.

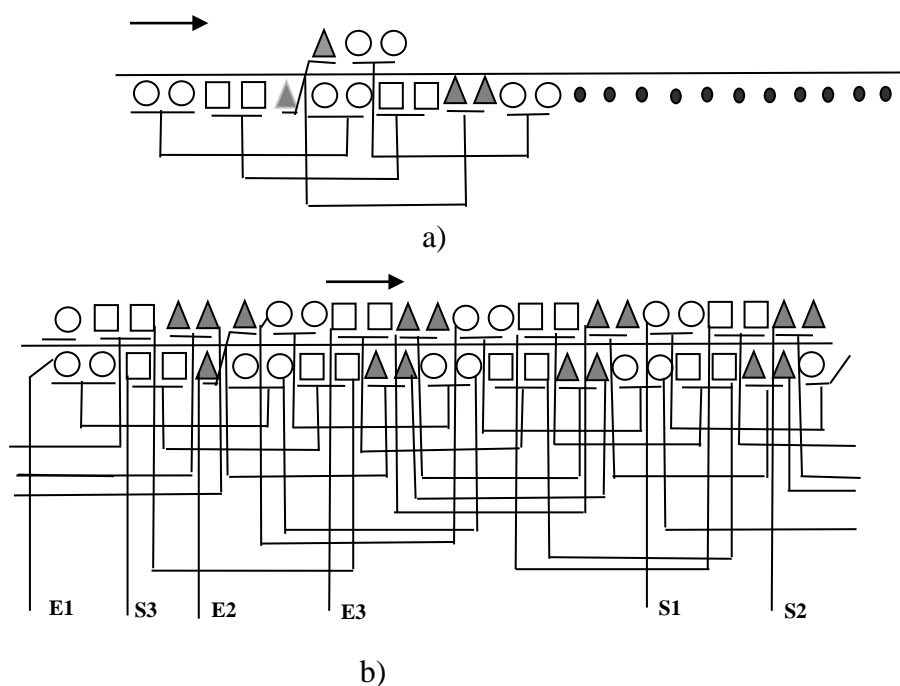


Fig.4.8. Méthode de placement par succession asymétrique

En conclusion, l'analyse du procédé traditionnel utilisé pour la mise en encoche des enroulements dans l'industrie électrotechnique caractérisé par la double flexion inclue lors du placement des bobines dans les encoches a été étudié et un modèle mathématique de fiabilité de la machine a été établi. Les résultats obtenus montrent clairement que cette double flexion réduit la durée de vie de la machine de 6 à 8% à cause de l'apparition de micro fissures favorisant l'apparition de court circuits entre spires. Cette valeur varie en fonction de la qualité de l'isolant du conducteur.

En pratique, pour éviter ce problème, beaucoup de méthodes de placement des enroulements sont proposés. Cependant, leur exploitation a montré que les machines électriques ainsi bobinées ont une durée de vie moindre. A partir delà, à l'aide d'une formulation par les perméances, des critères de performances basés sur les paramètres de l'enroulement ont été développés balisant ainsi l'intervalle et les conditions de leur application dans les machines électriques de puissances allant jusqu'à 100 kW.

CHAPITRE 5

Fiabilité des enroulements à une-deux couches

Confrontés à la mise en point des produits dans un marché où la concurrence s'exerce avec férocité, les industriels forgent des outils de plus en plus performants au service d'un concept : la qualité. Parmi ces outils, les plans d'expériences, constituent pour l'ingénieur un puissant moyen d'intervention sur les systèmes lors des phases de conception des procédés ou pour le réglage des processus en cours de production.

V. 1. Planification des expériences ou plan d'expérience, [54][55].

Au cours de la recherche de l'influence de deux facteurs sur le sujet à étudier, le nombre d'essais d'une expérience factorielle totale est de τv , où τ - le nombre de niveaux du premier facteur, v - celui du deuxième facteur. Le nombre d'essais qu'il faut réaliser pour l'étude de l'influence de k facteurs, est calculé à partir de l'expression

$$N = v^k$$

où v - le nombre de niveau de chaque facteur.

S'il est nécessaire d'étudier, par exemple, 10 facteurs dont chacun possède quatre niveaux, alors

$$N = 4^{10} = 1048576 \text{ essais}$$

La théorie de la planification des expériences permet de répondre à la question : combien et quelles essais faut-il introduire (impliquer) dans l'expérience.

La planification des expériences commence par le choix de l'objet de recherche qui est étudié dans un but précis (pour la recherche des conditions optimales d'exécution des processus mécaniques, chimiques, électrotechnique ou autres...)

Le but de recherche est appelé fonction objectif ou bien le paramètre d'optimisation. Les méthodes d'action sur l'objet de recherche sont appelées facteurs. La relation fonctionnelle du paramètre d'optimisation par rapport aux facteurs est de la forme

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Au cours de la planification de l'expérience, on suppose l'existence d'un optimum unique et la fonction recherchée est représentée sous forme d'un polynôme de degré donné dont les paramètres sont évalués à partir des données expérimentales.

V.1.1. Expérience factorielle totale.

Après avoir choisi l'objet de recherche, la formulation de la fonction et la description des facteurs, il est nécessaire de répondre à la question sous quelles combinaisons de facteurs doit-on mener les essais ?

En qualité de référence, on choisit le point correspondant à la meilleure combinaison des facteurs ; c'est-à-dire celle pour laquelle, la valeur de la fonction objectif est maximale (minimale) par rapport aux autres combinaisons de facteurs. Le point d'origine (initial) de l'expérimentation est appelé niveau nul ou bien niveau principal. Le choix du niveau est arbitraire ; cependant les coordonnées du point doivent être situées à l'intérieur du domaine de définition des facteurs.

Par la suite, on passe au choix des intervalles de variation de chacun des facteurs. On comprend par intervalle de variation, le nombre ajouté au niveau principal pour obtenir le niveau supérieur, et ou en soustrayant – le niveau inférieur.

Dans la première étape de la planification de l'expérience, on varie toujours les facteurs sur deux niveaux.

Soit x_{j0} - le niveau principal ;

h_j - l'intervalle de variation ;

j - la valeur du facteur.

Désignons la valeur du j ème facteur par X_j . La valeur de X_j est liée à x_j par l'expression suivante :

$$X_j = \frac{x_j - x_{j0}}{h_j}, \quad (5.1)$$

A partir de cette formule implique que x_{j0} prend la valeur nulle ; le niveau supérieur $x_{j0} + h_j = x_{jH}$ la valeur (+1) ; alors que le niveau bas $x_{j0} - h_j = x_{jB}$ la valeur (-1).

Considérons un processus défini par deux facteurs. Le niveau principal et les intervalles de variation sont données par le tableau ci-dessous

Données	x_1	x_2
Niveau principal	1,2	3
Intervalle de variation	1	2

Tab.5.1.

Comme résultat des essais, on obtient le point A avec les coordonnées $x_1 = 2$, et $x_2 = 4$. Il est nécessaire de calculer à partir de chaque facteur les niveaux haut et bas, les valeurs des niveaux principaux, des hauts et des bas, de même que le point A.

A partir du choix du niveau principal et de l'intervalle de variation, on définit les niveaux hauts : $x_{10} + h_1 = 1,2 + 1 = 2,2$

$$x_{20} + h_2 = 3 + 2 = 5$$

Les niveaux bas : $x_{10} - h_1 = 1,2 - 1 = 0,2$

$$x_{20} - h_2 = 3 - 2 = 1$$

La valeur des niveaux :

$$\text{Principal } X_{10} = \frac{1,2 - 1,2}{1} = 0 ; \quad X_{20} = \frac{3 - 3}{2} = 0$$

$$\text{Haut } X_{1H} = \frac{2,2 - 1,2}{1} = +1 ; \quad X_{2H} = \frac{5 - 3}{2} = +1$$

$$\text{Bas } X_{1B} = \frac{0,2 - 1,2}{1} = -1 ; \quad X_{2B} = \frac{1 - 3}{2} = -1$$

$$\text{Le point A } X_1 = \frac{2 - 1,2}{1} = 0,8 ; \quad X_2 = \frac{4 - 3}{2} = 0,5.$$

L'expérience où toutes les combinaisons des facteurs sont réalisées est appelée expérience factorielle totale. Si le nombre de facteurs est connu, alors en faisant varier les facteurs sur deux niveaux, le nombre d'essais peut être calculé par La formule :

$$N = 2^K, \quad (5.2)$$

où N – le nombre d'essais ;

K – le nombre de facteurs.

Composons la matrice de planification des expériences pour une expérimentation factorielle totale (Tab.5.2)

N° d'essais	X_1	X_2	Y
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Tab.5.2

Dans la matrice, on montre toutes les combinaisons possibles des niveaux haut et bas suivant chaque facteur du modèle ; dans la dernière colonne, on inscrit la valeur du paramètre de sortie correspondant à une combinaison bien définie. En général on élimine l'unité (1), alors la matrice devient (Tab.5.3)

N° d'essais	X_1	X_2	Y
1	-	-	y_1
2	+	-	y_2
3	-	+	y_3
4	+	+	y_4

Tab.5.3

Pour deux facteurs, toutes les combinaisons peuvent être trouvées facilement ; cependant avec l'augmentation des facteurs, il est nécessaire d'avoir une méthode de construction de la matrice d'expérience. Il est clair qu'en introduisant un nouveau facteur, chaque combinaison des niveaux du plan initial est répétée deux fois en combinaison avec les niveaux haut et bas du nouveau facteur. Considérons le passage de l'expérience 2^2 à l'expérience 2^3 . Ecrivons la matrice 2^2 deux fois. De cette manière, on peut obtenir la matrice de n'importe quelle dimension.

N° d'essais	X_1	X_2	X_3	Y
1	-	-	+1	y_1
2	+	-	+1	y_2
3	-	+	+1	y_3
4	+	+	+1	y_4
5	-	-	-1	y_1
6	+	-	-1	y_2
7	-	+	-1	y_3
8	+	+	-1	y_4

Tab.5.4

Considérons les principales propriétés de la matrice d'expérience :

1°) la symétrie par rapport au niveau principal ; c'est-à-dire que la somme algébrique des éléments de la colonne de chaque facteur est nulle ;

2°) la somme des éléments élevée au carré de la colonne de chacun des facteurs est égale au nombre d'essais ;

3°) le produit de deux vecteurs colonnes quelconques des facteurs est nul ;

4°) les variances des valeurs prédites du paramètre d'optimisation sont identiques sur une égale distance par rapport au niveau principal.

Après avoir réalisé l'expérience sur la base de la matrice choisie, on passe généralement vers l'évaluation des paramètres de la fonction objectif. Si, par exemple on étudie deux facteurs, alors la fonction recherchée peut avoir la forme suivante :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2, \quad (5.3)$$

En considérant que les facteurs sont variés sur deux niveaux, à partir de la matrice (Tab.5.5), on obtient les valeurs de b_0 , b_1 , b_2 .

N° d'essais	X_0	X_1	X_2	Y
1	+1	-	-	y_1
2	+1	+	-	y_2
3	+1	-	+	y_3
4	+1	+	+	y_4

Tab.5.5

En réalisant l'expérience factorielle totale, on peut quantitativement évaluer, non seulement la degré d'influence des facteurs sur le paramètre d'optimisation, mais aussi les effets d'interaction qui souvent influent sur la fonction objectif. Par conséquent, au cours de l'analyse de deux facteurs, l'expérience factorielle totale permet d'évaluer quantitativement les paramètres du modèle suivant :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2$$

Aussi pour obtenir les valeurs de b_0, b_1, b_2, b_{12} , il est nécessaire de faire appel à la matrice développée sous forme du tableau (5.6). Les éléments de la colonne X_1X_2 sont obtenus en multipliant les éléments des colonnes X_1 et X_2 .

N° d'essais	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	Y
1	1	+1	+1	+1	y_1
2	1	-1	+1	-1	y_2
3	1	-1	-1	+1	y_3
4	1	+1	-1	-1	y_4

Tab.5.6

Au début de l'étude, on utilise le modèle linéaire où le nombre d'essais de l'EFT est déterminé à partir de l'expression (5.2). Les combinaisons numériques entre les nombres de facteurs, des paramètres du modèle linéaire et celui des essais de l'EFT sont données dans le tableau (5.7).

Nb. de facteurs	Nb. De paramètres	Nb. D'essais de l'EFT	Différence entre le nombre d'essais et le nombre de paramètres
2	3	4	1
3	4	8	4
4	5	16	11
5	6	32	26

6	7	64	57
7	8	128	120
8	9	256	247
9	10	512	502
10	11	1024	1013
11	12	2048	2026
12	13	4096	4083
13	14	8192	8178
14	15	16384	1639
15	16	32768	32752

Tab.5.7

Comme le montre le tableau (5.7), la différence entre le nombre d'essais et le nombre de paramètres d'un modèle linéaire avec l'augmentation du nombre de facteurs devient énorme. Il existe des méthodes permettant d'étudier le modèle linéaire utilisant moins d'essais par rapport au nombre d'essais d'une EFT.

V.1.2. Expérience factorielle fractionnaire (EFF)

Supposons que pour la description d'un objet d'étude, on demande de calculer les coefficients b_0, b_1, b_2, b_3 de l'expression

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3, \quad (5.4)$$

Pour la détermination des valeurs des quatre paramètres, il faut avoir quatre équations dont les inconnues sont des paramètres de la fonction considérée ; c'est pourquoi il faut réaliser quatre essais

$$\begin{array}{l} \text{1er essais} \\ \text{2ième essais} \\ \text{3ième essais} \\ \text{4ième essais} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} y_1 = b_0 + b_1x_{11} + b_2x_{21} + b_3x_{31} \\ y_1 = b_0 + b_1x_{12} + b_2x_{22} + b_3x_{32} \\ y_1 = b_0 + b_1x_{13} + b_2x_{23} + b_3x_{33} \\ y_1 = b_0 + b_1x_{14} + b_2x_{24} + b_3x_{34} \end{array} \right.$$

où y_i - valeur du paramètre d'optimisation dans le $i^{\text{ème}}$ essais ;

x_{ji} - valeur du $j^{\text{ième}}$ facteur dans le $i^{\text{ième}}$;

$j=1,2,3$; $i=1,2,3,4$

A partir du tableau (5.7), on voit qu'il existe une matrice d'expérience ayant quatre essais. Cette matrice est bifactorielle définie dans le tableau (5.6).

Si on suppose que les effets d'interaction entre les facteurs sont absents, alors le vecteur colonne X_1X_2 peut être utilisé pour le nouveau facteur X_3 . La matrice dans ce cas est (Tab.5.8) :

N° d'essais	X_0	X_1	X_2	X_3 X_1X_2	Y
1	1	+1	+1	+1	y_1
2	1	-1	+1	-1	y_2
3	1	-1	-1	+1	y_3
4	1	+1	-1	-1	y_4

Tab5.8

En utilisant trois facteurs suivant le plan EFT, il est nécessaire de réaliser 8 essais différents. En supposant qu'il y a absence d'interaction, on peut évaluer les paramètres du modèle (5.4) à l'aide de 4 essais (suivant le Tab.5. 8).

Considérons la matrice EFT pour 3 facteurs 2^3 (Tab.5.9).

° d'essais	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y
1	-	-	+1	+1	-1	-1	+1	y_1
2	+	-	+1	-1	+1	-1	+1	y_2
3	-	+	+1	-1	-1	+1	+1	y_3
4	+	+	+1	+1	+1	+1	+	y_4
5	-	-	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
6	+	-	-1	-1	-1	+1	-1	y_2
7	-	+	-1	-1	+1	-1	-1	y_3
8	+	+	-1	+1	-1	-1	-1	y_4

Tab.5.9

Les 3 premières colonnes sont identiques aux colonnes de la matrice 4. Les éléments des autres colonnes sont obtenus par multiplication des trois premières colonnes.

En formant la matrice 4, le plan 2^2 est répété deux fois, c'est pourquoi on l'appelle demi réplique de l'EFT 2^3 et désignée par 2^{3-1} (4 essais). La demi réplique contient la matrice des essais d'une expérience factorielle totale.

Le nombre maximum de facteurs qu'on peut étudier à l'aide de la matrice du tableau 9 est égal à 7 : $X_1X_2 = X_4$, $X_1X_3 = X_5$, $X_2X_3 = X_6$ et $X_1X_2X_3 = X_7$.

Dans ce cas, les quatre facteurs X_4 , X_5 , X_6 et X_7 sont assimilés aux effets d'interaction.

Si on utilise le tableau (5.9) pour l'analyse de 7 facteurs, dans ce cas, on le désigne par 2^{7-4} (8 essais) et on l'appelle 1/16 de réplique d'une EFT 2^7 .

Le plan avec un nombre limite de facteurs et un modèle linéaire appelé plan saturé.

V.1.3. Traitement des résultats d'expérience

Toutes les informations nécessaires pour réaliser l'expérience sont introduites dans le tableau (5.10).

Données	x_1	x_2	x_k
Niveau principal	x_{01}	x_{20}		x_{k0}
Intervalle de variation h_j	h_1	h_2		h_k
Niveau supérieur (+1)	x_{1H}	x_{2H}		x_{kH}
Niveau bas (-1)	x_{1B}	x_{2B}		x_{kB}

Tab.5.10

Dans la théorie de la planification des expériences, pour chaque combinaison de facteurs, on mène non pas un essai, mais plusieurs. De tels essais sont appelés essais parallèles. Généralement il est suffisant de réaliser deux essais parallèles.

Après avoir rempli le tableau (5.10), on compose le plan d'expérience où on introduit les résultats des essais parallèles (Tab.5.11).

N° d'essais	X_1	X_2	...	X_3	Essais parallèles				\bar{Y}_i
					y_1	y_2	...	y_m	
1	+1	+1	...	+1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1m}	\bar{Y}_1
2	+1	-1	...	-1	y_{21}	y_{22}	...	y_{2m}	\bar{Y}_2
.
4	-1	-1	+1	y_{n1}	y_{n2}	y_{nm}	\bar{Y}_n

Tab.5.11

Vu qu'on ne peut éliminer totalement l'action des facteurs extérieurs, les essais parallèles ne donnent pas des résultats tout à fait similaires.

L'erreur d'essai peut être évaluée par l'expression:

$$\hat{S}_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{Y})^2_i}{m - 1}, \quad (5.5)$$

où $j = 1, 2, \dots, m$ et $i = 1, 2, \dots, n$

\hat{S}_i^2 - la variance de réexécution du $i^{\text{ième}}$ essai.

Au cours de l'analyse des essais, il est nécessaire d'utiliser les critères prédéfinis.

Par exemple, les valeurs qui apparaissent rarement peuvent être rejetées suivant le critère t de Student, et vérifier l'homogénéité des variances \hat{S}_i^2 suivant le critère de Fisher.

Si les variances \hat{S}_i^2 sont homogènes, alors la variance du paramètre d'optimisation est :

$$\hat{S}^2(y) = \sum_{i=1}^n \frac{\hat{S}_i^2}{n}, \quad (5.6)$$

Après avoir réalisé l'expérience, rejeté les valeurs obtenues par erreur, et vérifié l'homogénéité de la variance, on passe au calcul du modèle et son analyse.

Les paramètres de l'équation de liaison peuvent être recherchés à l'aide de la méthode du moindre carré. Si la fonction recherchée ou bien l'équation de régression est de la forme (5.3), alors à l'aide de la méthode du moindre carré, il est nécessaire

de rechercher b_0, b_1, b_2 , pour cela, on mène l'expérience suivant le plan du tableau (5.5).

Pour le modèle analysé, on obtient le système suivant :

$$\begin{aligned}nb_0 + b_1 \sum X_1 + b_2 \sum X_2 &= \sum Y ; \\b_0 \sum X_1 + b_1 \sum X_1^2 + b_2 \sum X_1 X_2 &= \sum X_1 Y ; \\b_0 \sum X_2 + b_1 \sum X_1 X_2 + b_2 \sum X_2^2 &= \sum X_2 Y\end{aligned}$$

En remplaçant X_0, X_1 et X_2 par leurs valeurs concrètes, à partir du tableau 5, on a $n=4$:

$$\begin{aligned}\sum X_1 &= \sum X_2 = 0, \\ \sum X_1^2 &= \sum X_2^2 = 4, \\ \sum X_1 X_2 &= \sum X_2 X_1 = 0\end{aligned}$$

Par conséquent, le système d'équations peut être écrit sous la forme

$$\begin{aligned}4b_0 &= \sum Y \\ 4b_1 &= \sum X_1 Y \\ 4b_2 &= \sum X_2 Y\end{aligned}$$

$$\text{d'où } b_0 = \frac{\sum Y}{4} ; \quad b_1 = \frac{\sum X_1 Y}{4} ; \quad b_2 = \frac{\sum X_2 Y}{4} .$$

Si on considère le modèle linéaire avec k facteurs, on obtient l'expression pour le calcul des coefficients de l'équation de régression b_j sous la forme générale :

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{Y}_i X_{ij}}{n} ; \quad (5.7)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, k \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n .$$

V.2 Durée de vie des machines électriques à enroulements une –deux couches.

Dans l'industrie électrotechnique, l'un des problèmes principaux pour la fabrication des machines électriques reste le taux élevé de travail manuel, surtout la mise en encoches des enroulements. La mise en encoches automatique des enroulements à une couche, dans le domaine des puissances allant jusqu'à 10 kW, a été résolue depuis quelques décennies grâce à la proposition de différents systèmes automatisés permettant soit le bobinage de l'enroulement directement dans les encoches statoriques, soit par attraction électromagnétique des bobines, préalablement conçues, dans les encoches [51]. Cependant, celle des enroulements à deux couches reste toujours posé. Le problème repose sur deux difficultés essentielles :

1°) un nombre d'étapes important pour le placement de tous les groupes formant l'enroulement, théoriquement il est de $6p$, contrairement à l'enroulement à une couche où celui-ci est de 3 ;

2°) la nécessité de placer $6p(\tau - y)$ isolants entre les faisceaux d'une même encoche appartenant à différentes phases.

Parmi les résultats de recherche dans ce sens, on note la proposition d'utilisation d'un nouveau type d'enroulement à une-deux couches (ou hybride) permettant le placement mécanisé avec un nombre d'étapes moins important [52].

Pour mieux définir cet enroulement, considérant celui à deux couches ayant un nombre d'encoches statoriques : $Z = 36$, $2p = 4$ et $y = 8$ (fig.5.1), [52][53][63].

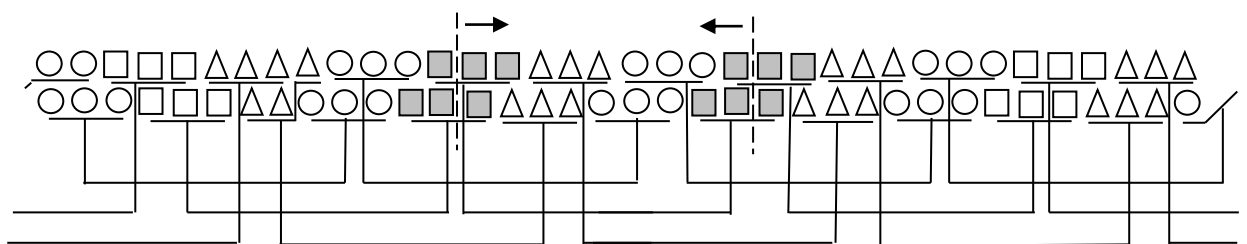


Fig.5.1 Enroulement à deux couches.

Traçons deux traits fictifs départageant les pôles fictifs instantanés en deux parties égales. On remarque qu'on peut concevoir pour ce même enroulement un nouveau

groupe de bobines concentriques constitué d'une grande bobine occupant toute l'encoche et une deuxième petite dont les faisceaux n'occupent que la moitié des encoches, (fig.5.2).

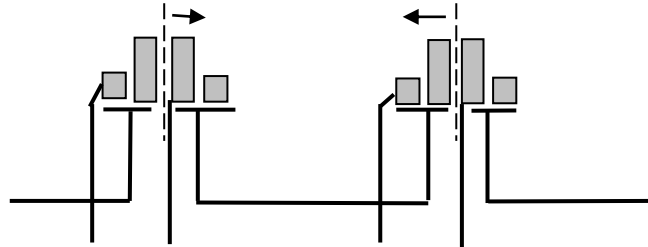


Fig.5.2 Groupe de bobines à une deux couches.

Pour pouvoir concevoir un tel type d'enroulement, il faut que:

- 1°) les groupes de bobines soient concentriques ;
- 2°) le nombre d'encoches par pôle et par phase $q > 2$.

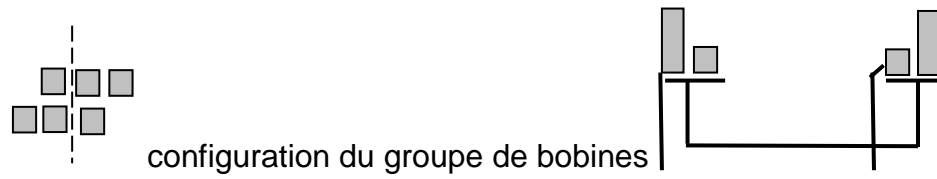
Théoriquement, le nombre d'enroulements qu'on peut réaliser par rapport au raccourcissement du pas y est de $(q - 2)$.

L'autre avantage de cet enroulement est qu'il possède, pour une même configuration du pôle fictif instantané, un pas d'enroulement moyen inférieur à celui à deux couches.

On peut concevoir n'importe quel enroulement à une -deux avec juste la configuration du pôle fictive instantané de l'enroulement à deux couches et par la variation du pas d'enroulement. Considérons les applications suivantes.

1°) Pour $Z = 12$, $2p = 2$, $m = 3$, $q = 2$. Il n'y a pas d'existence d'enroulement; car l'une des conditions d'existence est que $q > 2$;

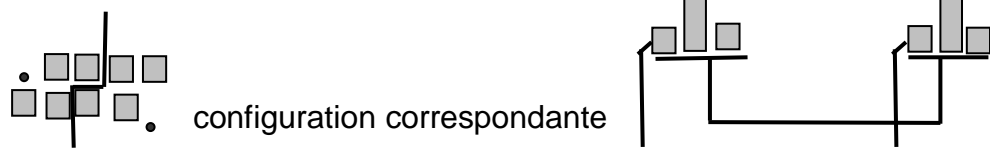
2°) Pour $Z = 18$, $2p = 2$, $m = 3$, $q = 3$. En considérant le pôle fictive de l'enroulement à deux couches, on remarque qu'il n'y a qu'une seule possibilité



a)

2°) Pour $Z=24$, $2p=2$, $m=3$, $q=4$. Dans ce cas, nous avons deux possibilités:

- la première avec $y = \tau - 1$



b)

- la seconde avec $y = \tau - 2$



configuration correspondante :

c)

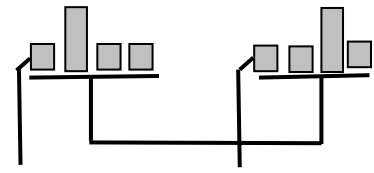
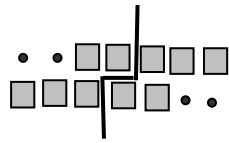
3°) Pour $Z=30$, $2p=2$, $m=3$, $q=5$. Dans ce cas, nous avons trois possibilités:

- la première avec $y = \tau - 1$



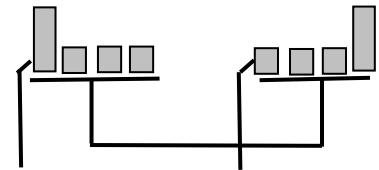
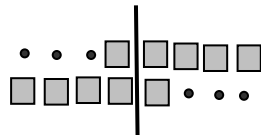
d)

- la seconde avec $y = \tau - 2$



e)

- La troisième avec $y = \tau - 3$



f)

Fig.5.3 Pôles fictifs d'un enroulement à deux couches et les configurations correspondantes des groupes de bobines d'un enroulement à une-deux couches.

Actuellement, la méthode la plus utilisée pour le placement automatique de ce type d'enroulement est celle du placement par phase en trois étapes.

La première étape (fig.5.4):

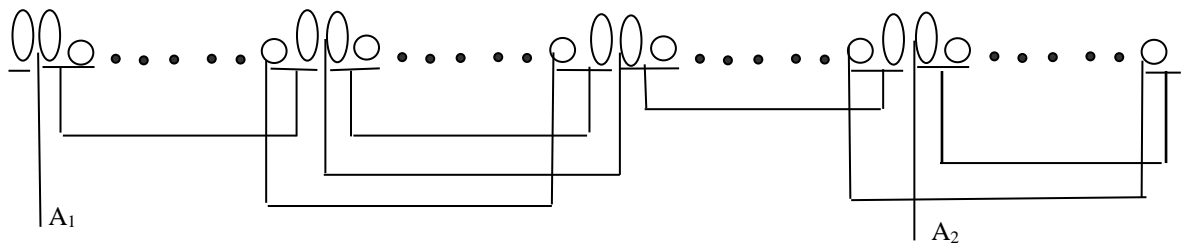


Fig.5.4 Placement de la première phase.

La seconde étape (fig.5.5):

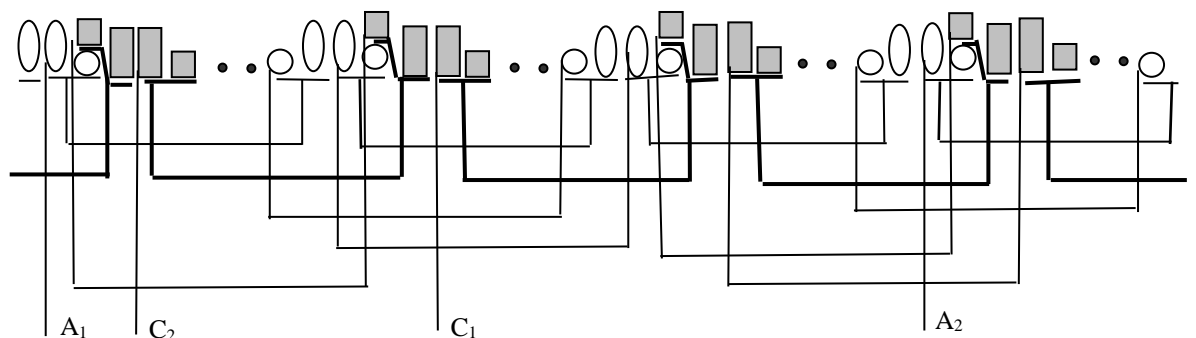


Fig.5.5 Placement de la seconde phase.

La troisième étape (fig.5.6):

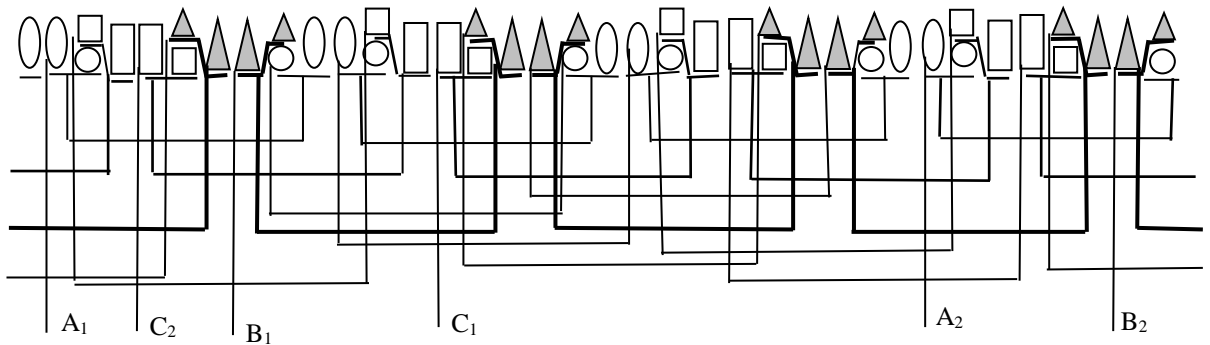


Fig.5.6 Placement de la troisième phase.

Les inconvénients principaux de ce type d'enroulement placé par phase sont la différence des courants entre les trois phases principalement entre A₁-A₂ et B₁- B₂ à cause des perméances d'encoches d'une part, et l'absence de possibilité de formation de branches parallèles d'autre part.

Si l'utilisation d'un tel enroulement d'un point de vue efficacité technologique est très performante, l'étude de sa durée de vie reste à établir.

L'étude à priori de sa durée de vie est réduite en comparaison avec celle de l'enroulement à une et à deux couches. En régime de fonctionnement nominal, le courant dans la phase B₁-B₂ est supérieur à celle de la valeur nominale. Cette valeur augmente avec l'augmentation du nombre de pôles.

Quand p est pair, il est possible de placer les groupes de bobines de l'enroulement en quatre étapes. L'enroulement obtenu est symétrique et le nombre maximum de branches parallèles qu'on peut réaliser est de $a_{max} = p$.

La première étape (fig.5.7):

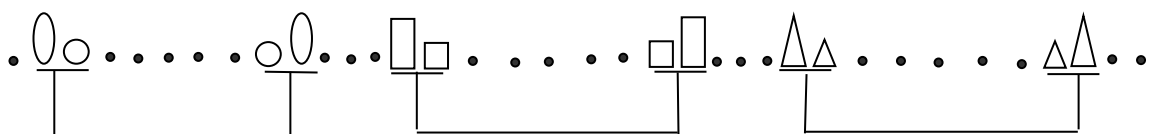


Fig.5.7 Première étape

La second étape (fig.5.8):

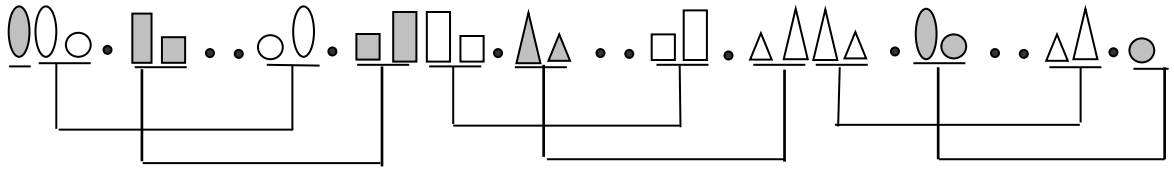


Fig.5.8 Seconde étape

La troisième étape (fig.5.9):

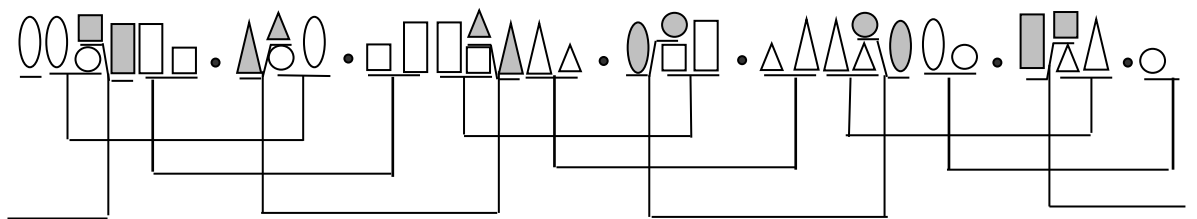


Fig.5.9 Troisième étape

Dernière (quatrième) étape (fig.5.10)

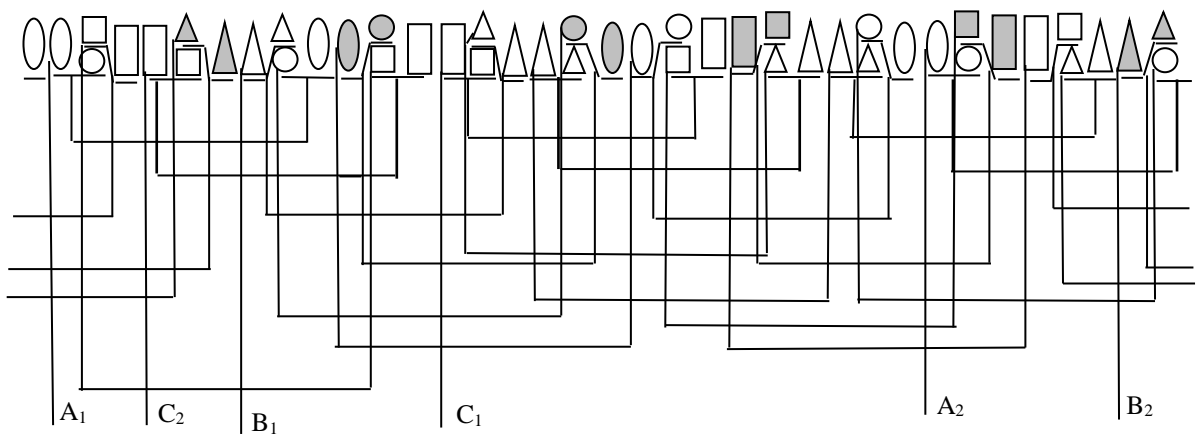


Fig.5.10 Enroulement triphasé à une- deux couches place en quatre étapes.

Actuellement, dans le domaine des essais accélérés des enroulements statoriques, il existe deux tendances principales. La planification des essais et leur évaluation menée sur la base de modèles mathématiques de claquage des isolants de type :

$$F(u) = 1 - \exp[-\exp \delta_{isol}(U - q_{isol})] \quad (5.9)$$

où δ_{isol} et q_{isol} - représentent les paramètres de distribution de premier type.

A l'aide des méthodes statistiques multifactorielles d'expérimentation planifiées, on définit seulement la relation des paramètres de distribution des tensions de claquage de l'isolation entre spires et les actions des facteurs d'essais. Suivant les résultats des essais accélérés, en fonction du nombre de défaillances pour un temps donné, on évalue la probabilité de non défaillance des enroulements statoriques des moteurs électriques.

L'évaluation de la fiabilité des moteurs à l'aide de telles méthodes entraîne une accumulation d'erreurs du modèle mathématique du claquage de l'isolant, de l'expérimentation multifactorielle et des essais eux mêmes.

Actuellement, on a tendance à mener la planification et l'évaluation des résultats sur la base de la relation de modèles mathématiques liant la durée de vie moyenne de l'enroulement et les facteurs d'essais calculés directement suivant les résultats de l'expérimentation multifactorielle.

Le lieu d'expérimentation est équipé de systèmes de chauffage et de refroidissement, de ventilateurs et d'humidificateurs. Le contrôle de la température est réalisé à l'aide d'une assistance de thermocouples, doublé de thermomètres à mercure; le contrôle de l'humidité est réalisé à l'aide d'un psychromètre.

Les paramètres du moteur testé sont:

La puissance $P = 4 \text{ kW}$; le nombre de pôles $2p = 4$; le nombre de spires dans une bobine $W = (33 + 33)$; le courant $(\Delta/Y) (A) I = 14.2/8.2$; le diamètre du conducteur $d = 1.08$; le facteur de puissance $\cos \varphi = 0.88$; le type d'enroulement – une-deux couches; le pas d'enroulement $y_{\text{av.}} = 7.33$; la vitesse de rotation $n = 1447 \text{ tr/mn}$; la résistance statorique $r = 1.10 \Omega$; le type de protection IP44; la classe d'isolant B.

V.3. Expérimentation et modélisation

Pour l'élaboration d'une méthode accélérée d'essais sur des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, une expérience multifactorielle a été considérée pour l'évaluation de la durée de vie de l'enroulement à une-deux couches placé en quatre étapes selon les facteurs suivants: la température de l'enroulement X_1 , période de repos du moteur X_2 , les vibrations X_3 et humidité X_4 .

Les expériences ont été entreprises selon le diagramme ci-dessous, (Tab.5.11)

Les cycles d'expérimentation sont [56][60][61][62]:

L'expérimentation est constituée de cycles successifs identiques avec trois régimes dans chacun d'eux : 1°) l'échauffement de l'enroulement statorique en régime d'inversion à vide ; la fréquence d'inversion pour tous les moteurs 240h^{-1} ; une durée d'échauffement pour le niveau haut de 16h ; pour le niveau bas de 48h ; 2°) la durée d'humidification 24h ; 3°) le séchage sous une température de 80°C pour une durée de 4h et 120°C pour 8h .

Les cycles se succèdent avec une interruption de 30min .

L'expérimentation s'est effectuée jusqu'à l'arrêt de tous les moteurs. On considère comme critère de défaillance le claquage de l'isolant (entre spires, entre phase et à la masse).

Après chaque défaillance, on mesure la résistance de l'enroulement du stator, la vérification des isolants (entre spires, entre phases et à la masse). Par la suite, le démontage du moteur pour définir le lieu, le caractère ainsi que la cause de défaillance. L'élément le plus sensible de l'enroulement est situé sur la partie frontale du côté des connexions. La défaillance caractéristique est le court-circuit entre spires de la phase placée en dernière étape (88%).

Pour décrire le processus de vieillissement de l'isolant, sachant que la relation de la durée de vie de l'enroulement et de la température est une fonction linéaire, la forme polynomiale a été choisie comme modèle [54],

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1; j=1; i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (5.91)$$

où y – la réponse d'expérience ; k – le nombre de facteurs utilisés; x_i, x_j - les

facteurs d'essais ; $x_i = \frac{(\phi_i - \bar{\phi}_i)}{I_i}$, $I_i = \phi_i^H - \bar{\phi}_i = \bar{\phi}_i - \phi_i^B$

b_o, b_i, b_{ij}, b_{ii} - coefficients de régression du polynôme ;

k - le nombre de facteurs étudiés ;

x_i, x_j - facteurs d'essais;

ϕ_i - valeur naturelle du $i^{\text{ème}}$ facteur ;

ϕ_i^H, ϕ_i^B - valeurs naturelles supérieure et inférieure du $i^{\text{ème}}$ facteur ;

I_i - intervalle de variation du $i^{\text{ème}}$ facteur.

Les coefficients de régression b_{ui} sont définis par [54]:

$$b_{ui} = \frac{1}{n'} \sum_{j=1}^{n'} x_{uj} x_{ij} \bar{y}_j, \quad (5.10)$$

où

$u, i = 1, 2, 3, 4$ - numéros des facteurs, $u \neq i$;

n' - nombre de variantes expérimentées dans la matrice de planification ;

j - le numéro de la ligne de la matrice de planification, $j = 1, 2, \dots, 16$;

\bar{y}_j - la valeur moyenne de la réponse dans la ligne de la matrice (pour la variante d'expérimentation donnée).

La valeur théorique du critère de Student pour la vérification de l'importance de chaque coefficient b_{ui} est définie par :

$$t_{\text{exp}} = \frac{b_{ui} \sqrt{n}}{S(y)} ;$$

$$k = n - k' - 1; \quad (5.11)$$

$$S^2(y) = \frac{S_f}{n - n'} \quad \text{et} \quad S_f = \sum_{j=1}^{n'} \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 ;$$

y_{ji} - la réponse dans le $i^{\text{ème}}$ essai parallèle de la $j^{\text{ème}}$ ligne de la matrice de planification ;

m - nombre de tests parallèles dans chaque expérience ;

n - nombre total d'essais ;

k' - le nombre de coefficients de régression dans le modèle mathématique.

$X_1 = +1$ (200°C)	$X_2 = +1$ (1.5s)	$X_3 = +1$ (0.095 N.m)	$X_4 = +1$ (100%)	1
			$X_4 = -1$ (70%)	5
		$X_3 = -1$ (0.005 N.m)	$X_4 = +1$ (100%)	2
			$X_4 = -1$ (70%)	6
	$X_2 = -1$ (0.5s)	$X_3 = +1$ (0.095 N.m)	$X_4 = +1$ (100%)	3
			$X_4 = -1$ (70%)	7
		$X_3 = -1$ (0.005 N.m)	$X_4 = +1$ (100%)	4
			$X_4 = -1$ (70%)	8
$X_1 = -1$ (180°C)	$X_2 = +1$ (1.5s)	$X_3 = +1$ (0.095 N.m)	$X_4 = +1$ (100%)	9
			$X_4 = -1$ (70%)	13
		$X_3 = -1$ (0.005 N.m)	$X_4 = +1$ (100%)	10
			$X_4 = -1$ (70%)	14
	$X_2 = -1$ (0.5s)	$X_3 = +1$ (0.095 N.m)	$X_4 = +1$ (100%)	11
			$X_4 = -1$ (70%)	15
		$X_3 = -1$ (0.005 N.m)	$X_4 = +1$ (100%)	12
			$X_4 = -1$ (70%)	16

Tab. 5.11 Diagramme d'expériences des moteurs.

L'étude de la durée de vie de l'enroulement statorique en fonction de l'action des facteurs a été faite suivant la matrice de type 2^4 (plan factoriel total) , [54], [56], [57], [58], [59].

La matrice d'expérimentation est donnée par le tableau ci-dessous:

N° du test	Niveau du facteur											
	X ₁ Température (°C)			X ₂ Excentricité (N.m)			X ₃ Période de repos entre les inversions (s)			X ₄ Humidité (%)		
	Haut 200°C (+)	Bas 180°C (-)	Interval. De variat. 10	Haut 0.095 (+)	Bas 0.005 (-)	Interv. de variat. 0.045	Haut 1.5 (+)	Bas 0.5 (-)	Interval De variat. 0.5	Haut 100 (+)	Bas 70 (-)	Interv. De variat. 15
1	+			+			+			+		
2	-			+			+			+		
3	+			-			+			+		
4	-			-			+			+		
5	+			+			-			+		
6	-			+			-			+		
7	+			-			-			+		
8	-			-			-			+		
9	+			+			+			-		
10	-			+			+			-		
11	+			-			+			-		
12	-			-			+			-		
13	+			+			-			-		
14	-			+			-			-		
15	+			-			-			-		
16	-			-			-			-		

Tab.5.12 Matrice d'expérimentation .

Après chaque défaillance, l'isolant (entre phase, entre spires et à la masse) est contrôlé. Par la suite, le moteur est démonté afin de localiser l'origine de la défaillance. L'élément le plus sensible est situé sur la partie frontale du côté où sont réalisées les connexions.

Le contrôle suivant le critère t de Student [61] montre que seul les coefficients b_0 , b_1 et b_4 sont déterminants et seront pris en considération.

L'équation de régression de la durée de vie moyenne à partir des essais accélérés devient :

$$Y = 1045,36 - 474,61X_1 - 15,61X_4, \quad (5.12)$$

La vérification de l'adéquation de l'expression a été faite en comparant les valeurs expérimentale F_{exp} et théorique F_t du critère de Fisher [61]. Celle-ci confirme l'adéquation de l'expression avec les résultats expérimentaux.

Pour l'extrapolation de la durée de vie dans le domaine des conditions d'exploitation, on transforme l'expression (5.12) sous la forme [40], [61]:

$$\log Y_{\text{av.}} = A + \frac{B}{273+\theta}, \quad (5.13)$$

où $Y_{\text{av.}}$ - la durée de vie moyenne ;

θ - la température

A et B doivent être définies à partir de (5.11) en tenant compte des valeurs des niveaux de X_1 et X_4 .

Après avoir déterminé la durée de vie pour les niveaux haut et bas pour les niveaux du facteur X_1 , le système d'équations obtenu, à partir de (5.13), devient :

$$\left. \begin{aligned} \log Y_{100} &= -7,05 + \frac{463310}{273+\theta} \\ \log Y_{70} &= -6,69 + \frac{447448}{273+\theta} \end{aligned} \right\}; \quad (5.14)$$

ce qui permet d'évaluer la durée de vie de l'enroulement en fonction de la température dans un intervalle d'humidité compris entre 70 et 100% .

La figure (5.11) montre qu'au delà de 160°C , la durée de vie de l'enroulement ne dépend plus de l'humidité quand la température dépasse la valeur tolérée de l'isolant (dans notre cas 130°C pour la classe B).

En comparant la courbe obtenue avec celle correspondent à un placement d'un enroulement à une -deux couches placé en trois étapes [62], on remarque une amélioration de la durée de vie. L'étude entreprise montre qu'il est souhaitable

d'utiliser le placement en quatre étapes quand p est pair. Quand $2p = 2$, le placement par phase est justifié par les conditions technico-économiques.

En comparant les résultats obtenus avec ceux à une couche, la durée de vie est à peu près la même. Concernant l'enroulement à deux couches, en plus du travail manuel du processus technologique et le temps nécessaire à son exécution, la double flexion contenue dans le processus réduit sa durée de vie. Par conséquent, en tenant compte de l'amélioration des performances par l'élimination des harmoniques et la possibilité de réaliser une économie de cuivre obtenue grâce un pas raccourci réduit d'une demi encoche par rapport à celui à deux couches, l'utilisation de l'enroulement à 1-2 couches placé automatiquement est fortement recommandée.

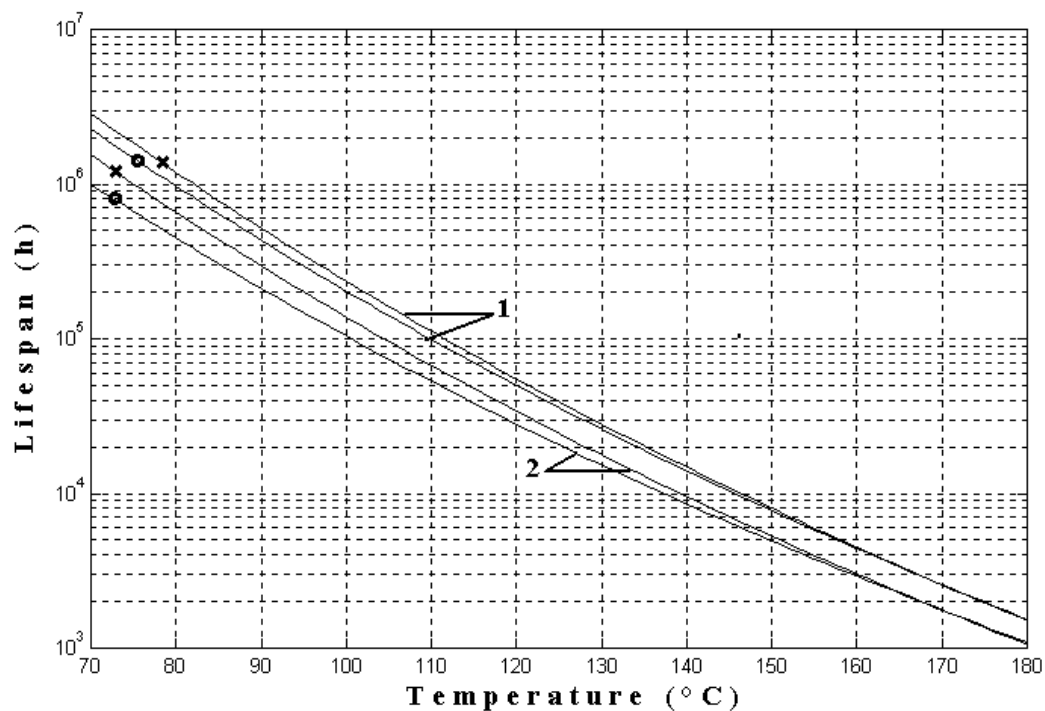


Fig.5.11 Durée de vie de l'isolant de l'enroulement du moteur avec:
 1- un enroulement à 1-2 couches en quatre étapes;
 2 – un enroulement à 1-2 couches en trois étapes [62];
 x – 70% et o – 100% d'humidité.

En conclusion, les résultats du travail élaboré montrent la loi de variation de la durée de vie en fonction des conditions de fonctionnement (principalement la température). Sous de conditions normales de fonctionnement, une amélioration de la durée de vie des enroulements à une deux-couches à p paires placés en quatre étapes a été observée, en comparaison avec ceux placés par phase. Cette amélioration est justifiée par une égalité des courants grâce à une distribution identique des petites bobines en haut et en bas des encoches dans les branches parallèles de toutes les phases

La méthode de placement par phase entraîne une différence de courants: faible dans la première phase, important dans la seconde par rapport à la troisième qui est optimale. Cela est du au flux de fuite qui augmente avec la réduction du pas raccourci et le nombre de pôles. Les conditions technico-économiques justifient l'utilisation des enroulements à une-deux couches placés en trois étapes si $2p = 2$. Cependant, dans les deux cas, il est nécessaire d'entreprendre d'autres expériences tenant compte des facteurs tels que les vernis, la puissance, la vitesse, ...

Conclusion générale

Le travail de cette thèse se rapporte à l'étude de la fiabilité des machines électrique à induction. En raison de la nature destructive de la plupart des défaillances, il n'est pas facile, et il est parfois impossible, de déterminer la principale cause de défaillance des machines électriques. Par un processus d'élimination, il est possible d'identifier les causes les plus probables de l'échec. Le point essentiel dans cette démarche passe par le biais du processus d'élimination et l'utilisation des principales étapes de l'analyse de la classe de défaillance et du modèle, en notant l'aspect général du moteur, identifiant l'état de fonctionnement au moment de la défaillance, et l'acquisition de connaissances de l'historique de la machine.

A travers l'analyse fonctionnelle, il est possible d'établir l'arbre des causes de la machine électrique à induction. Concernant la défaillance mécanique du rotor, l'une des premières causes trouve son origine dans les phénomènes de torsion. La rupture soudaine serait la conséquence de l'excitation d'une pulsation propre de torsion à laquelle est associé un très faible coefficient d'amortissement. Dans ce cas, la résonance est excitée par un transitoire mécanique. Aussi, l'utilisation d'un convertisseur statique pour alimenter la machine conduit à la présence d'harmoniques de couple qui sont à mettre en relation avec le phénomène de résonance en torsion. La rupture par la fatigue a un lien direct avec le convertisseur statique et les cycles d'arrêt et de démarrage. Les possibilités offertes par le convertisseur statique lors des démarrages, des accélérations et des décélérations peuvent accélérer le processus de fatigue.

Pour le blocage du rotor, à part la présence de corps extérieurs dans l'entrefer, l'événement peut être issu d'un déplacement des bobinages statoriques ou des bobinages rotoriques dans le cas d'une machine à rotor bobinée.

Le déséquilibre des tensions d'alimentation va conduire à un déséquilibre des courants. Ceci aboutit à un échauffement non uniforme des enroulements et donc à un risque de rupture des isolants, c.à.d à une défaillance thermique du bobinage.

En se basant sur les conditions d'exploitation, une méthodologie de calcul basée sur l'échantillonnage et l'expérimentation pouvant être utilisée dans les usines de production des machines électriques a été présentée. Elle peut être un des outils pour la certification du produit.

L'analyse du procédé traditionnel utilisé pour la mise en encoche des enroulements dans l'industrie électrotechnique caractérisé par la double flexion inclue lors du placement des bobines dans les encoches a été étudié et un modèle mathématique de fiabilité de la machine a été établi. Les résultats obtenus montrent clairement que cette double flexion réduit la durée de vie de la machine de 6 à 8% à cause de l'apparition de micro fissures favorisant l'apparition de court circuits entre spires. Cette valeur varie en fonction de la qualité de l'isolant du conducteur.

En pratique, pour éviter ce problème, beaucoup de méthodes de placement des enroulements sont proposés. Cependant, leur exploitation a montré que les machines électriques ainsi bobinées ont une durée de vie moindre. A partir de là, à l'aide d'une formulation par les perméances, des critères de performances basés sur les paramètres de l'enroulement ont été développés balisant ainsi l'intervalle et les conditions de leur application dans les machines électriques de puissances allant jusqu'à 100 kW.

A partir de plans d'expérience, une loi de variation de la durée de vie en fonction de la température, sous des conditions d'humidité et d'excentricité, a été établie. Sous des conditions normales de fonctionnement, une amélioration de la durée de vie des enroulements à une deux-couches à p paires de pôles placés en quatre étapes a été observée, en comparaison avec ceux placés par phase. Cette amélioration est justifiée par une égalité des courants grâce à une distribution identique des petites bobines en haut et en bas des encoches dans les branches parallèles de toutes les phases

La méthode de placement par phase entraîne une différence de courants: faible dans la première phase, important dans la seconde par rapport à la troisième qui est optimale. Cela est dû au flux de fuite qui augmente avec la réduction du pas raccourci et le nombre de pôles. Les conditions technico-économiques justifient l'utilisation des enroulements à une-deux couches placés en trois étapes dans le cas où $2p = 2$. Cependant, dans les deux cas, il est nécessaire d'entreprendre d'autres expériences tenant compte des facteurs tels que le type de vernis, la puissance, la vitesse, ...

Bibliographie

- [1] P. O'Donnell, "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations: Part II," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 865–872, Jul. 1985.
- [2] P. F. Albrecht, J. C. Appiarius, and D. K. Sharma, "Assessment of reliability of motors in utility applications—Updated," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. EC-1, no. 1, pp. 39–46, Mar. 1986.
- [3] P. O'Donnell, "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations: Part I," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 853–864, Jul. 1985.
- [4] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Causes and analysis of stator and rotor failures in three-phase induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, Jul./Aug. 1992.
- [5] O. V. Thorsen and M. Dalva, "Failure identification and analysis for high voltage induction motors in the petrochemical industry," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 4, pp. 810–818, Jul./Aug. 1999.
- [6] S. Nandi and H. A. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines—An overview," in *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 1999*, vol. 1, pp. 197–204.
- [7] S. Williamson and K. Mirzoian, "Analysis of cage induction motors with stator winding faults," *IEEE Trans. PowerApp. Syst.*, vol. PAS-104, no.7, pp. 1838–1842, Jul. 1985.
- [8] J. L. Kohler, J. Sottile, and F. C. Trutt, "Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors," in *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 1989*, vol. 2, pp. 1586–1589.
- [9] R. Maier, "Protection of squirrel-cage induction motors using instantaneous power and phase application," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 2, pp. 376–380, Mar./Apr. 1992.
- [10] J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, and W. T. Fink, "Detection and

-
- location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 9, no. 4, pp. 652–658, Dec. 1994.
- [11] F. C. Trutt, J. Sottile, and J. L. Kohler, “Condition monitoring of induction machine stator windings using electrically excited vibrations,” in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 2002, vol. 4, pp. 2301–2305.
- [12] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Hoegl, and D. Hoeweler, “A new approach to on-line turn fault detection in ac motors,” in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 1996, vol. 1, pp. 687–693.
- [13] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “Transient model for induction machines with stator winding turn faults,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 3, pp. 632–637, May/Jun. 2002.
- [14] D. K. Perovic, M. Arkan, and P. J. Unsworth, “Induction motor fault detection by space vector angular fluctuation,” in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 2000, vol. 1, pp. 388–394.
- [15] M. A. Cash and T. G. Habetler, “Insulation failure detection in the stator windings of ASD-driven induction machines using standard deviation of line currents,” in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 1998, vol. 1, pp. 299–303.
- [16] M. A. Cash and T. G. Habetler, “Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 6, pp. 1234–1239, Nov./Dec. 1998.
- [17] J. Sottile, F.C. Trutt, and J. L. Kohler, “Condition monitoring of stator windings in induction motors: Part II—Experimental investigation of volt-age mismatch detectors,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 5, pp. 1454–1459, Sep./Oct. 2002.
- [18] R. M. Tallam, T. G. Habetler, R. G. Harley, D. J. Gritter, and B. Burton, “Neural network based stator winding turn fault detection for induction motors,” in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, Rome, Italy, 2000, vol. 1, pp. 375–380.
- [19] R. M. Tallam, and all “A survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines,” IEEE Trans. on industry applications, vol. 43, n°4 Nov. 2007.
- [20] R. Bartnikas and E. J. McMahon, Engineering Dielectrics, Volume 1, Corona Measurement and Interpretation. ASTM Publ. STP 669, 1979.
- [21] S. A. Boggs and G. C. Stone, “Fundamental limitations in the measurement of corona and partial discharge,” IEEE Trans. Electr. Insul., vol. EI-17, no. 2, pp. 143–150, Apr. 1982.
-

-
- [22] S. R. Campbell and G. C. Stone, "Examples of stator winding partial discharges due to inverter drives," in Proc. IEEE Int. Symp. Electr. Insul., 2000, pp. 231–234.
- [23] T. E. Goodeve et al., "Experience with compact epoxy mica capacitors for rotating machine PD detection," in Proc. IEEE Electr. Insul. Conf., 1995, pp. 685–689.
- [24] G. C. Stone and J. Kapler, "Stator winding monitoring," IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 4, no. 5, pp. 15–20, Sep./Oct. 1998.
- [25] K. Itoh et al., "New noise rejection techniques on pulse-by-pulse basis for on-line partial discharge measurement of turbine generators," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 11, no. 3, pp. 585–594, Sep. 1996.
- [26] S. F. Farag, R. G. Bartheld, and W. E. May, "Electronically enhanced low voltage motor protection and control," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 3, pp. 776–784, May/Jun. 1994.
- [27] R. J. Brighton and P. N. Ranade, "Why overload relays do not always protect motors," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-18, no. 6, pp. 691–697, 1982.
- [28] S. F. Farag and M. K. Jhaveri, "Intelligent microprocessor based devices provide advanced motor protection, flexible control and communication in paper mills," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, no. 3, pp. 840–847, May/Jun. 1997.
- [29] K. D. Hurst and T. G. Habetler, "Thermal monitoring and parameter tuning scheme for induction machines," in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 1997, vol. 1, pp. 136–142.
- [30] S. B. Lee and T. G. Habetler, "An on-line stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 3, pp. 685–694, May/Jun. 2003.
- [31] Villemeur A. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Collection EDF DER. Editions ; Paris 1988.
- [32] Ermolin N.P., Gerikhin I.P. Fiabilité des machines électriques. L, Energy ; 1976.
- [33] Kouybechev Y.B. Fiabilité des moteurs asynchrones. Editions Standarts, 1972.
- [34] Colonnec P. Contribution à l'étude de l'influence des convertisseurs statiques sur la fiabilité de la machine asynchrone. Thèse de Doctorat , université du Havre , 1997.
- [35] Mouraviev V.P., Razguldiaev G.I. Fiabilité des systèmes d'alimentation dans les exploitations souterraines. M., Nedra 1970.
- [36] Schwob M., Peyrache G. Traité de fiabilité. Masson&Cie Editeurs, Paris, 1969.
- [37] Chousky V.I., Plashansky L.A., Slivaev I.A. Fiabilité d'exploitation des moteurs

- électriques de tension jusqu'à 1000V utilisées dans les mines. Industrie Electrotechnique, Technique du Câble, 1979.
- [38] Kravtchik A.E., Trebilsky E.K. Influence des données initiales sur la géométrie et les conditions technico-économiques des moteurs asynchrones. Electrotechnika, n°11, 1976.
- [39] Golberg B.N. Qualité et fiabilité des moteurs asynchrones. M., Energy, 1968.
- [40] Vaneev B.N. Fiabilité des moteurs asynchrones. Kiev ; Tekhnika, 1983.
- [41] Kritishev F.N., Fishman K.S. Variation des propriétés de l'isolation au cours du processus d'exploitation des machines. Energy et Electrification, Karaganda, Institut Polytechnique ; 1972.
- [42] Pokholkov Y.P., Pikhtin V.V., Matialis A.V. recherche de l'influence des facteurs d'exploitation sur la formation de défauts dans l'isolation des enroulements des moteurs asynchrones d'utilisation usuelle. Institut Polytechnique de Tomsk, n°86 ; 1976.
- [43] Derievkina T.O., Popova N.V., Khvalkovsky A.V. Etude de l'influence des charges statiques de flexion sur les propriétés de l'isolation. Industrie Electrotechnique – Matériaux Electrotechniques ; 1978.
- [44] Goumbell E. Statistiques des valeurs extrêmes. M., Mir, 1965.
- [45] Shor Y.B., Kouzmin F.I. Tableaux pour l'analyse et le contrôle de la fiabilité. M., Sov. Radio, 1968.
- [46] Vakoulenko K.N., Abdessemed R. Amelioration of the reliability of asynchronous motors with two-layer windings. Kiiiv, "Znanie" 1981.
- [47] Vakoulenko K.N., Abdessemed R. Brevet N°924796 ; H02K 15/06. Two layers three-phase winding placing methods.
- [48] Tomachevich V.F., Tomachevich L.I. Vector-point geometry and its application in the probability theory. Kharkiv, "Vishaya shkola" 1979.
- [49] Abdessemed R. Design of AC electrical machines. "Batna University Press" 1995.
- [50] Abdessemed R; Tomachevitch V.F.; Vakoulenko K.N. Influence of Coils Double Flexion on the Reliability of Two-Layer Winding AC Machines. Electrical Power Components and systems, Taylor & Francis, Vol.30, N°7 (2002).
- [51] Skorokhodov E. A., Bilibin K. I., "Mechanisation and automation of the winding production processes". M., Energuya, 1988.
- [52] Vakoulenko K. N., Abdessemed R., "Two types of one - two layer windings".

-
- Energy and Electrification , no.2, pp. 49-50, 1982.
- [53] Vakoulenko K. N., Abdessemed R., "Improvement of the asynchronous machines reliability with two-layer windings". Kiev, Edition – Znanie, 1981;
- [54] Ivibotenko B. A., Ilinsky N. F., Kopilov I. P., "Planning of the experiment in electromechanics ". M., Energuya , 1975.
- [55] Irtechsky E.B., Bortnik G.M., " Use of the planning experiment for the determination of the accelerated test coefficients of the asynchronous motor winding reliability". Tr. VNIEM, Vol.43, pp. 86-108, 1975.
- [56] Filippini J., Souvay P. and Hans T., " Control adjustment by experimental designs". Revue l'automaticien, 1993.
- [57] IEEE Gold Book, "IEEE Recommended Practice for Design of reliable Industrial and Commercial Power Systems". IEEE Press, 1991.
- [58] Vigier M.G., " Practical of the experimental designs. Taguchi Methodology ". Les Editions d'Organisation, 1988.
- [59] Pillet M., " Introduction to the experimental designs by the Taguchi method. Les éditions d'organisation, 1992.
- [60] Ostrovskaya E.L., Poyberg A.B., Tigai E.A., " Kit for tests of the asynchronous motors winding synchronous motors ". Technology of the Electrotechnical Production, no.11, pp. 63-78, 1975.
- [61] Kroug G. A., Sosoulin Y. A., Fatiev V. A., " Planning of the experiment in the identification and extrapolation problems ". M., Naouka, 1978.
- [62] R. Abdessemed, V. F. Tomachevitch, L. I. Grinetch., " Modeling of the hybrid stator winding lifespan of induction motors ". Electrical Power Components and Systems, Taylor&Francis , Vol.31, no.9, pp.831-839, 2003.
- [63] Abdessemed R.; Tomachevitch V. F., " Windings of the rotating electrical machines". Batna University Press, 1995.