

Introduction générale

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.

Au cours de l'exploitation des systèmes électrotechniques, les conditions d'exploitations sont définies comme étant l'ensemble des paramètres physiques pouvant avoir une influence sur leurs fonctionnements. A ces paramètres, 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 démarrage, la durée d'alimentation ou de charge. Les conditions d'exploitation influent de manière accentuée sur la fiabilité des moteurs. Par exemple, le nombre de défaillances mensuel moyen varie selon les mois ; cela est lié à la température et à l'humidité de l'air.

La présence sur l'enroulement statorique d'une couche de poussière ou un autre élément entraîne son « suréchauffement » dont la valeur est liée à l'épaisseur de cette couche causant ainsi la réduction de sa durée de vie. Pour les moteurs alimentés à partir des lignes aériennes, le nombre mensuel moyen de claquage des enroulements augmente à peu près de 2 fois à cause de l'action des décharges de la foudre.

L'oscillation et la variation de la tension du réseau entraînent la diminution du couple du moteur et l'augmentation du bruit, des vibrations et de

l'échauffement des moteurs. Comme conséquence, on obtient une réduction de la durée de vie moyenne de l'isolation des enroulements.

1. Défaillances des machines électriques

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 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 endurances 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 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.

1.2 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 facilitée 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.

1.3 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.

1.4 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.

On arrive à l'évidence qui nous permet de conclure que 70 à 100% des cas de défaillances de tout système électrotechnique (machine électrique

tournante, transformateur, appareil électrique, ...) sont dues à la défaillance de leurs isolants.

2. 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.

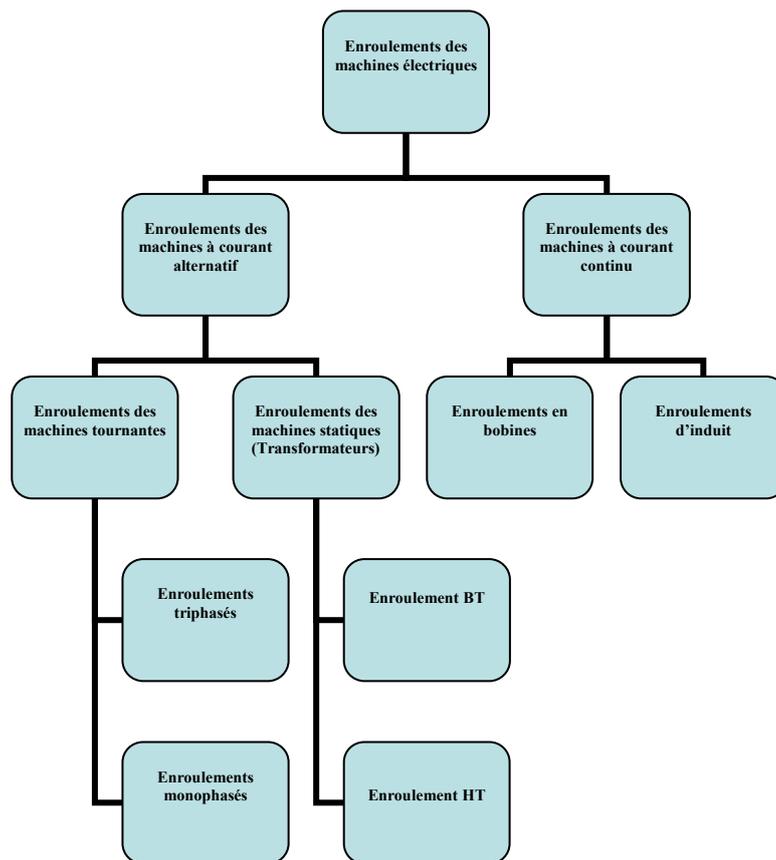


Fig.1 Les enroulements des machines électriques

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.

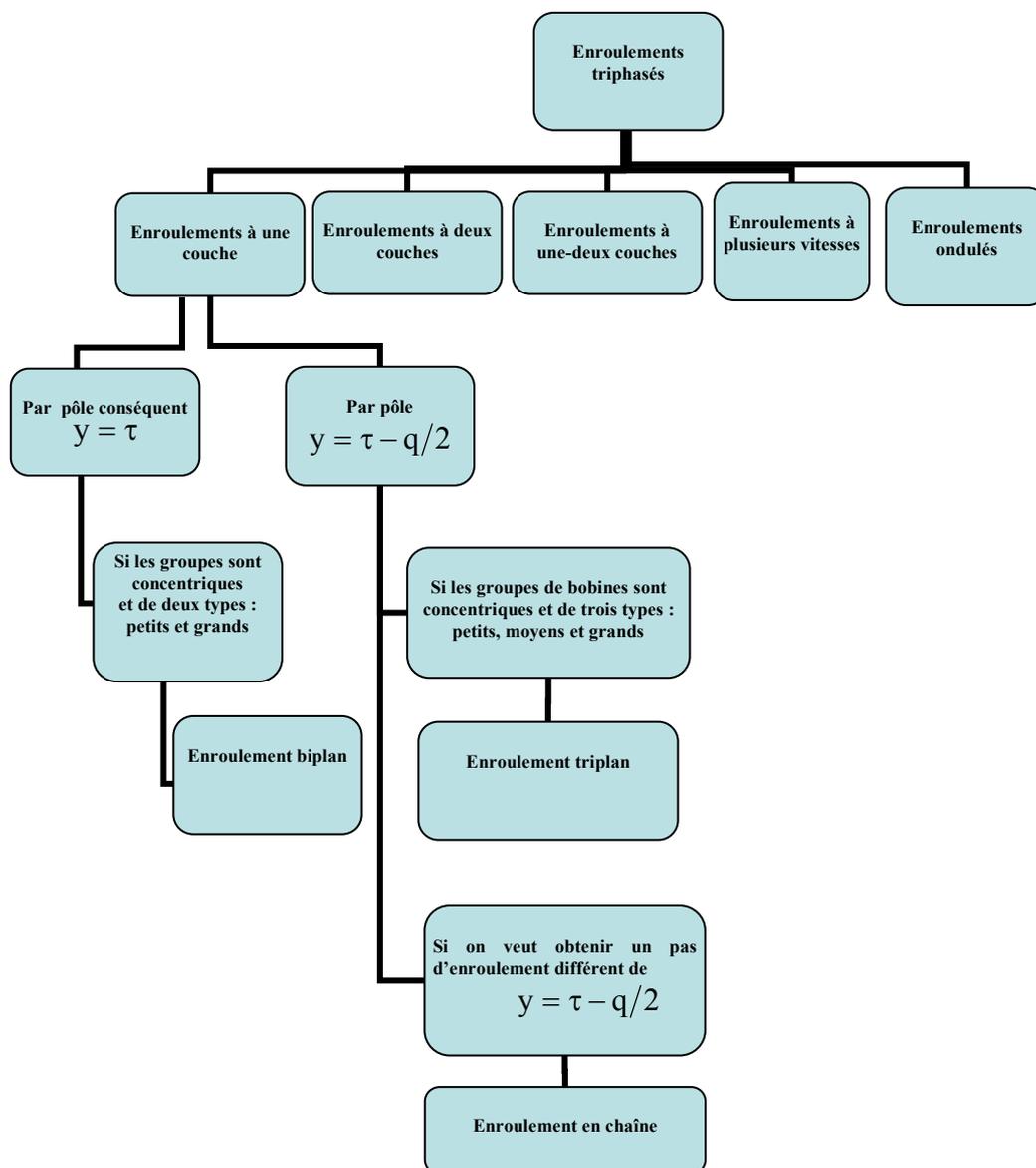


Fig.2 Les types d'enroulements à une couche.

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.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.

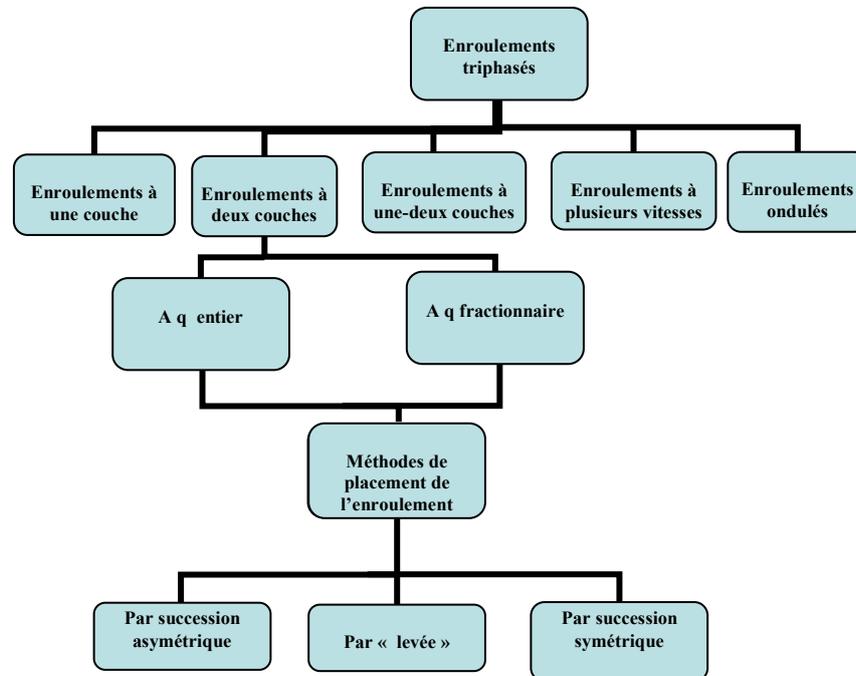


Fig.3 Enroulements triphasés à deux couches

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.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 $N = q - 2$.

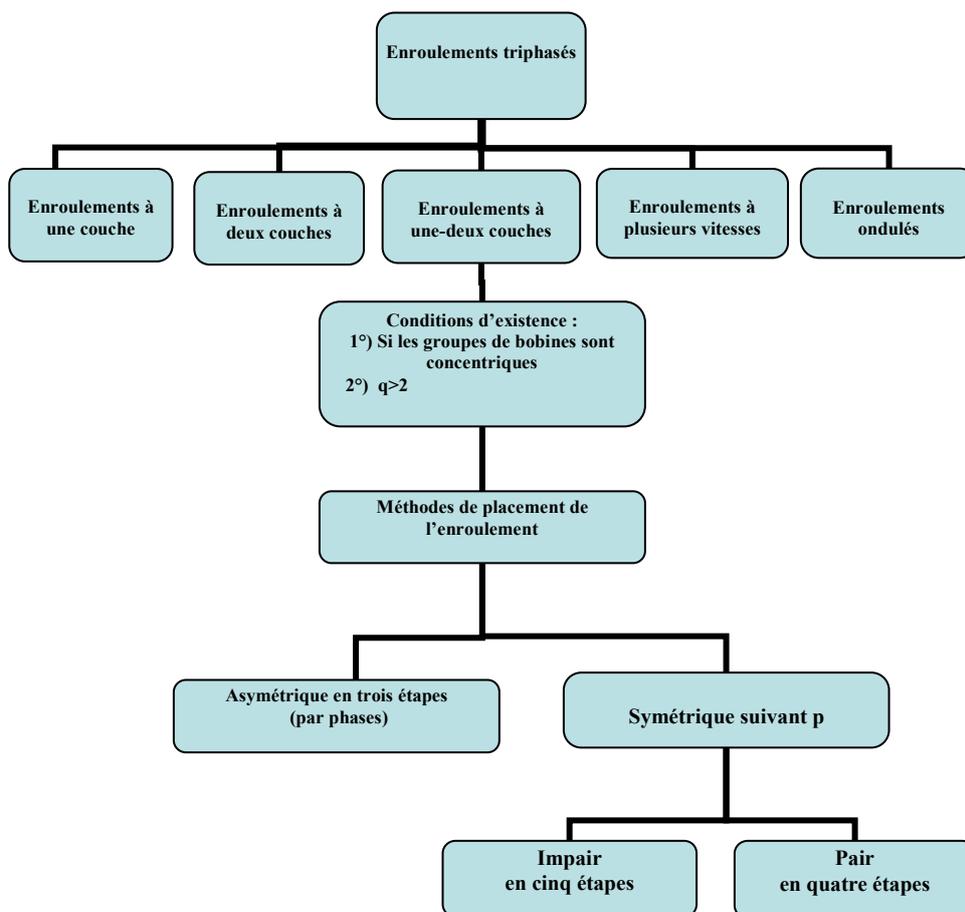


Fig.4 Enroulements triphasés à une-deux couches

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.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.

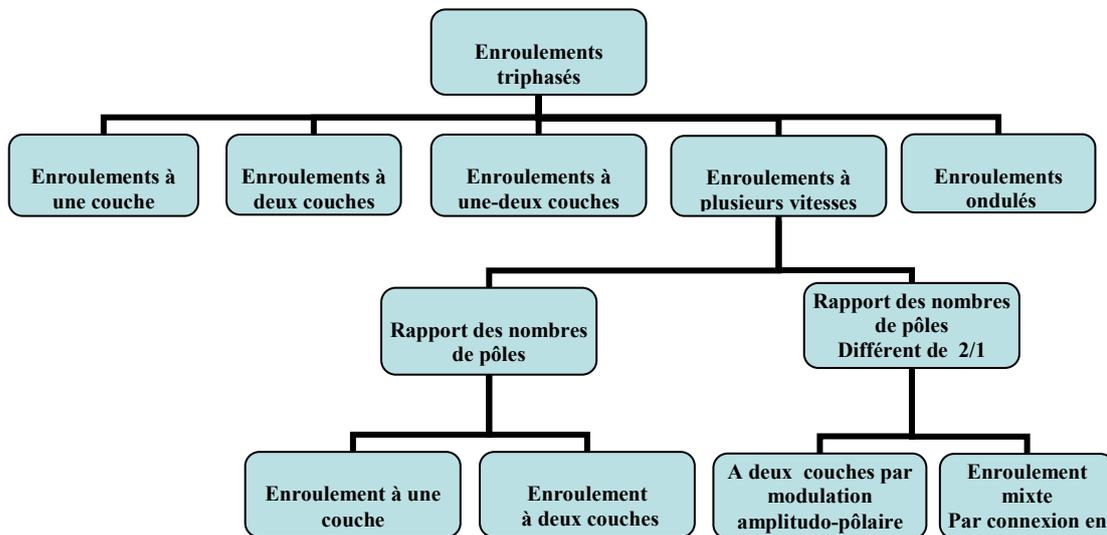


Fig.5 Enroulements triphasés à plusieurs vitesses

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

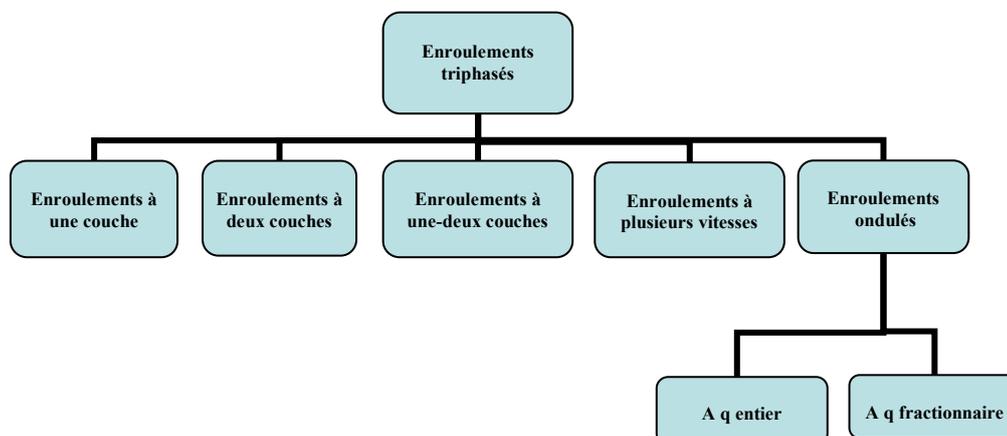


Fig.6 Enroulements ondulés triphasés

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.

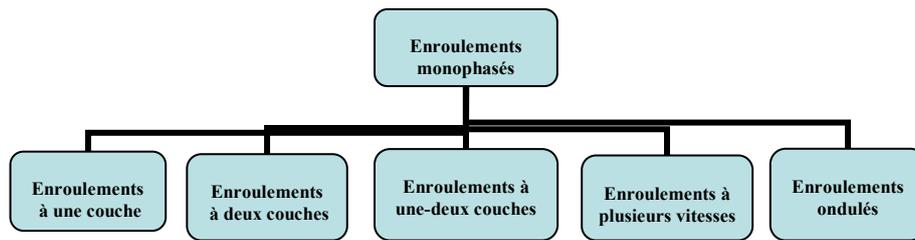


Fig.7 Enroulements monophasés

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.

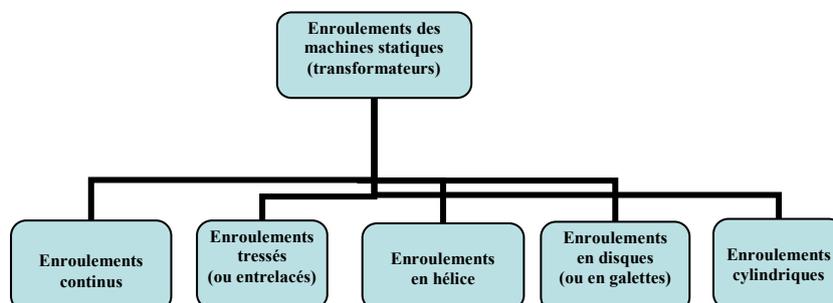


Fig.8 Enroulements des transformateurs

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.

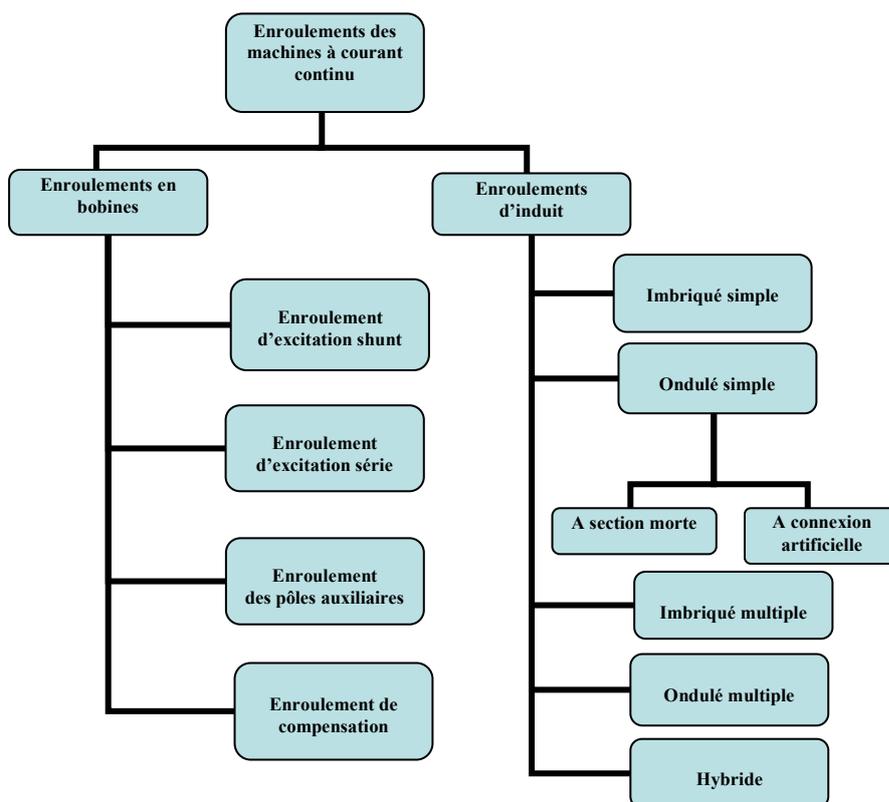


Fig.9 Enroulements des machines à courant continu

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.

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.

Les résistances des isolants au niveau du stator peuvent chuter jusqu'à des valeurs critiques à cause de l'échauffement. L'humidification de l'isolant a lieu lors des journées de repos, quand les températures des moteurs électriques sont réduites à des températures ambiantes et l'isolation est soumise à l'action atmosphérique pour une longue durée. 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 la poussière industrielle entraîne l'apparition des processus physico-chimiques, accélérant la détérioration de l'isolation et la diminution de sa résistance.

Au moment de l'alimentation des moteurs électriques, il y a un processus non stationnaire de «charge –décharge» du diélectrique où la résistance de l'isolant est réduite de 1,1 jusqu'à 2 fois, et au cours des cinq premières minutes augmente jusqu'à atteindre son niveau initial. Si l'humidification est plus intense, la résistance diminue instantanément de 5 à 10 fois, [3]. 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.

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. Par la suite, la résistance diminue à cause de l'échauffement de l'isolation. 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.

Au cours de l'exploitation de l'isolation, l'enroulement statorique est soumis à l'interaction des forces électrodynamiques et thermomécaniques qui influent de manière directe 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 la majorité des claquages apparaissent aux angles 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 donnée, elles entraînent le déplacement des sections dans l'encoche dans le sens radial. Plus importantes sont, particulièrement, 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 0,04s, il y a action d'un couple dynamique choc, dépassant le couple nominal de 10 à 15 fois.

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. Ce fait va entraîner le déplacement des sections dans l'encoche dans le sens axial. Aussi, le vieillissement thermomécanique accélère la diminution de la tension de

claquage de l'isolation par rapport au vieillissement thermique seul de plusieurs fois.

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. Cependant, la partie de la section logée dans l'encoche se détériore plus rapidement et le pourcentage de son claquage augmente de façon continue.

Dans l'industrie électrotechnique, l'un des problèmes majeurs dans la fabrication des machines électriques reste le taux élevé de travail manuel, principalement 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 [1]. Cependant, celle des enroulements à deux couches reste toujours posée. Dans le domaine des grandes puissances, ce travail dans sa grande majorité est manuel.

En considérant un grand nombre de machines électriques 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 [2]:

- 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 concerne la conception des éléments de l'enroulement (les groupes de bobines). La deuxième étape est dédiée au placement de ces groupes dans les encoches. Vu le temps important alloué, le placement des enroulements prend environ 20 à 30% 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 peuvent être réparties comme suit [2]:

- 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%.

Les statistiques montrent une fois de plus que la fiabilité des machines électriques dépend des propriétés des isolants.

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

Par ailleurs, négliger les processus électromagnétiques transitoires lors de l'analyse des régimes des moteurs asynchrones conduit à des erreurs importantes d'évaluation des échauffements de ces machines, et à un manque de précision lors de la détermination du temps de freinage, d'inversion, etc...

Par conséquent, la maîtrise des phénomènes physiques ayant lieu lors des processus transitoires dans les machines électriques, l'évaluation qualitative des variations des courants, des tensions, des couples, la prédiction de la conduite de la machine dans de tels régimes comme la perte ou l'augmentation brusque de charge, le fonctionnement en régime asynchrone des machines synchrones, etc..., sont nécessaires pour une conception rationnelle et fiable des machines électriques pouvant supporter des situations d'avarie quel que soit le régime de fonctionnement.