

CHAPITRE 4

ENROULEMENTS STATORIQUES ET MATÉRIAUX COMPOSITES

4.1 Les enroulements statoriques des moteurs et des générateurs

Les enroulements statoriques des grandes machines synchrones sont composés de trois différentes phases montées en étoile. Le neutre est mis à la masse afin de minimiser l'effort électrique auquel l'isolation de masse statorique est soumise. Chaque phase peut comprendre un circuit simple d'enroulements connectés en série ou deux ou plusieurs circuits parallèles, tel qu'illustré à la figure 18.

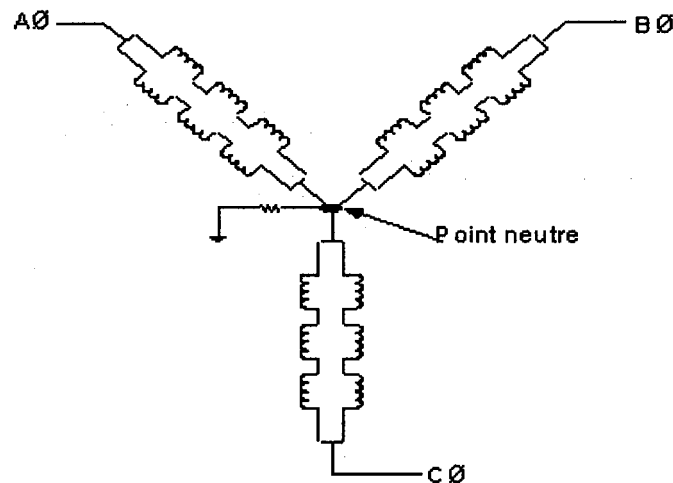


Figure 18 Enroulements statoriques composés de trois phases montées en étoile à deux circuits parallèles par phase

Les enroulements statoriques peuvent être fabriqués soit sous forme de bobines complètes ou de barres (appelées aussi barres à conducteurs transposés de type Roebel) figure 19 (a et b). Le bobinage de ces enroulements est en fonction de la tension nominale de la machine et du nombre d'enroulements connectés en série par phase.

Le nombre d'enroulements par phase est déterminé par le nombre de pôles dans le rotor et le nombre d'encoches dans le noyau statorique.

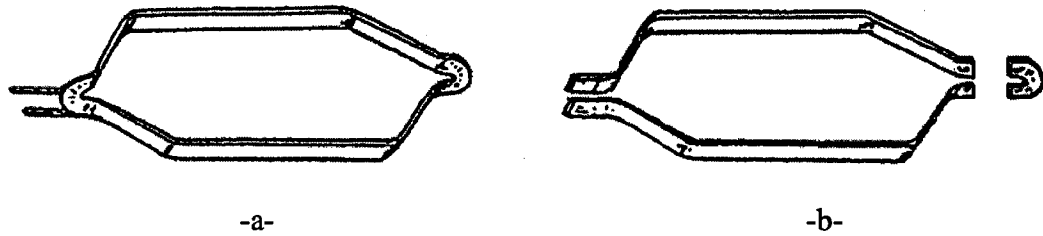


Figure 19 -a- Enroulement composé d'une bobine complète
-b- Enroulement composé de deux barres

Lors de la fabrication des enroulements statoriques, les conducteurs en cuivre sont assemblés puis ils sont enrubannés manuellement sur toute la longueur de la barre au moyen d'un ruban composite constitué par deux rubans très minces de tissu de verre préimprégnés de résine, entre lesquels est disposée une couche de mica. Chaque barre est ensuite imprégnée dans un autoclave par la méthode VPI (Vacuum Pressure Impregnation). Dans la zone de développante (extrémité courbée de barre), une électrode interne (figure 20) en matière conductrice est utilisée pour améliorer la distribution du champ à fin de limiter l'apparition des décharges partielles [36].

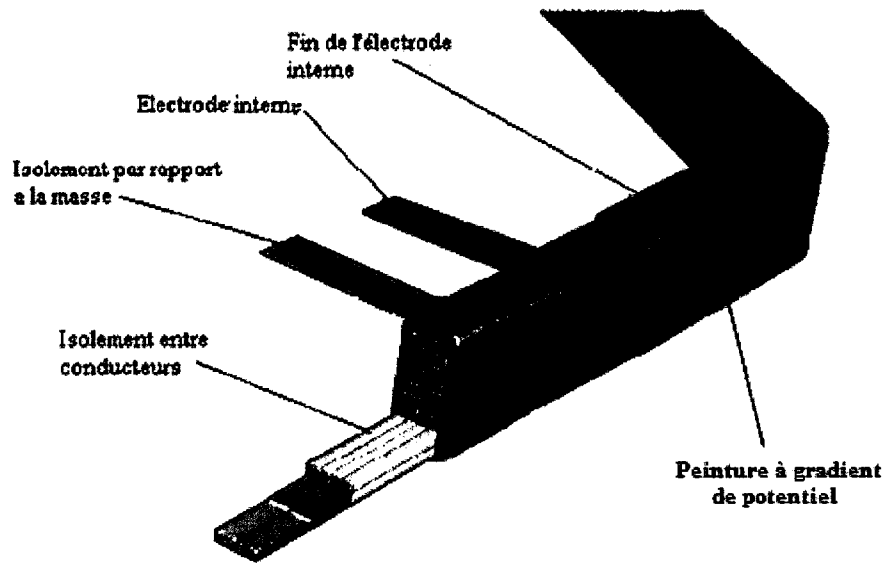


Figure 20 Une barre isolée avec un matériau composite utilisée dans la construction d'une bobine de stator d'un alternateur de puissance²

Les trois principaux composants dans un enroulement statorique sont: les conducteurs en cuivre, le noyau de stator, et l'isolation électrique. Le cuivre est le conduit du courant statorique. Le noyau statorique est composé de feuilles minces d'acier magnétique qui agissent comme un chemin à faible réluctance (faible impédance magnétique) pour le champ magnétique du rotor vers le stator dans un générateur ou dans un moteur. L'isolation électrique est le composant principal dans un enroulement statorique puisqu'elle empêche des courts-circuits de se produire entre les conducteurs et la masse. À la différence des conducteurs de cuivre et du noyau statorique, qui sont des composants actifs en faisant une fonction de moteur ou de générateur, l'isolation est passive. Cette dernière contient plusieurs composants et dispositifs, qui assurent ensemble que des courts circuits électriques ne se produisent pas, que les pertes de chaleur en cuivre (I^2R) sont transmises au radiateur, et que les conducteurs ne vibrent

² Pour plus de détails voir [37].

pas sous l'effet des forces magnétique (figure 21). Les composants de base d'un système d'isolation statorique sont : l'isolation des conducteurs, l'isolation des spires et l'isolation de masse.

4.1.1 L'isolation des conducteurs (ou des conducteurs secondaires)

Cette isolation a deux raisons d'être distinctes. D'un point de vue mécanique, si la section d'un conducteur est assez grande (pour une grande intensité de courant désiré), il est difficile de plier et de façonner un tel conducteur à la forme de l'enroulement. Pour y remédier, on le découpe en brins ou en petits conducteurs. Du point de vue électrique, si la section du conducteur en cuivre est assez grande, le courant qui le traverse circulera sur sa périphérie. Ce phénomène est connu sous le nom de l'effet pelliculaire. La profondeur de pénétration du champ électrique dans un conducteur en cuivre est de 8,5 millimètres à 60 hertz. Si la section de ce conducteur est supérieure à 8,5 millimètres, il y a une tendance pour que le courant passe par la périphérie du conducteur au lieu de son centre. L'isolation des conducteurs doit être fiable et capable de résister à des hautes températures (jusqu'à 155°C pour l'équipement de classe F). Elle est à base de films de verre, de fibres de verre, ou de verre et de fibres de polyester fondues (Daglas™).

4.1.2 L'isolation des spires

Le but de l'isolation des spires dans les stators à enroulement préformé ou à fils jetés est d'empêcher des courts-circuits entre les spires dans un enroulement. Si un court-circuit d'une spire se produit dans l'enroulement secondaire, par exemple, dans un enroulement à 100 spires entre la borne de phase et le neutre (l'enroulement primaire), un courant de 100 fois le courant normal traversera la spire court-circuitée, endommageant ainsi l'enroulement. Pour des machines fonctionnant à 4 160 V et plus, chaque spire est isolée par un ruban en mica qui fournit une excellente résistance aux décharges partielles.

4.1.3 L'isolation de masse

La détérioration de l'isolation de masse de l'enroulement statorique affecte directement le fonctionnement et la durée de vie des grands moteurs et générateurs électriques. L'isolation de masse est le matériau qui sépare les conducteurs en cuivre du noyau statorique relié à la terre. Un défaut d'isolation de masse occasionne un arrêt immédiat d'un moteur ou d'un générateur. Pour une longue durée de vie de ces moteurs ou générateurs, l'isolation de masse doit avoir une bonne immunité face aux efforts électriques, thermiques et mécaniques auxquels les enroulements statoriques sont soumis. L'isolation de masse des enroulements statoriques des grandes machines tournantes est souvent à base de mica renforcé, de colle, et de matériaux imprégnés. Actuellement, les machines électriques en service sont à base des résines d'asphalte, de polyester, ou d'époxy. Une isolation de masse solide peut être composée de 55% de mica, 30% de résine et de 15% de matériau de renforcement.

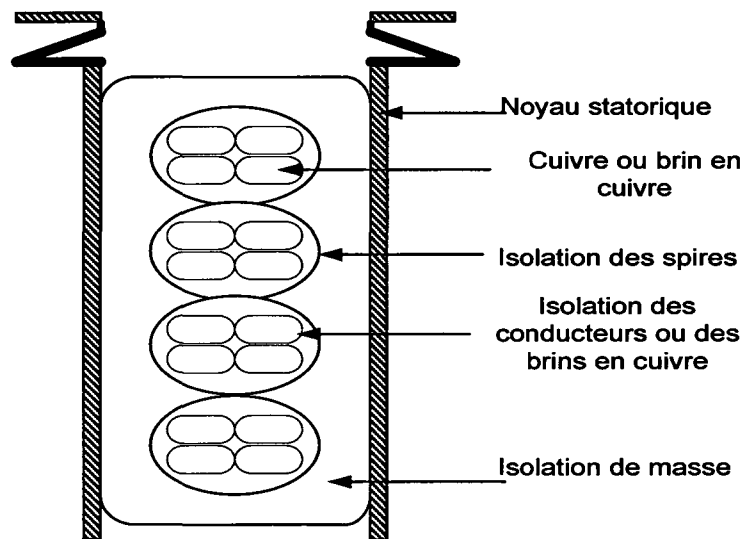


Figure 21 Vue en coupe d'une bobine d'un alternateur illustrant ces principales composantes

4.2 Revues des matériaux isolants les plus utilisés dans l'industrie

4.2.1 Isolation de masse

L'isolation de masse des grands générateurs et moteurs à courant alternatif est typiquement composée de mica renforcé organiquement, de collage, et de matériaux imprégnés. Aujourd'hui les isolations statoriques des machines en service sont principalement fabriquées à l'aide de résines à base de polyester ou d'époxy.

La structure chimique d'un matériau isolant a une influence profonde sur les modes de détérioration de l'isolation. Les propriétés électriques et physiques telles que la constante diélectrique, la rigidité diélectrique, la conductivité, la dureté, le point de fusion, etc., sont corrélées avec la structure moléculaire d'un composé. Pour comprendre entièrement les caractéristiques électriques d'un matériau isolant et son vieillissement, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de sa structure chimique.

4.2.2 Mica

Les deux classes de mica les plus généralement utilisées dans les applications électriques sont la muscovite (mica de potassium) et la phlogopite (mica de magnésium). Leurs formules chimiques sont respectivement :



Les minéraux de mica sont composés de couches de silicate séparées par des couches d'oxyde métallique en alternance avec des couches d'ions métalliques. Structurellement, le mica peut être considéré comme un système de répétition de trois couches, tel qu'illustré à la figure 22. Les deux couches externes sont composées du tétraèdre de silicate dont un quart des atomes de silicium est remplacé par des atomes d'aluminium. Chaque atome de silicium ou d'aluminium est entouré par quatre atomes d'oxygène. La

couche intérieure se compose d'atomes d'aluminium (ou d'atomes de magnésium, dans le cas du mica de phlogopite) disposés octaédralement.

L'atome en aluminium est entouré par une répétition d'un cortège d'atomes d'oxygène et de groupes hydroxydes (OH). Des ions positifs de potassium sont localisés entre les couches de tétraèdre-octaèdre-tétraèdre, et puisque l'attraction cohésive entre le potassium et l'oxygène est faible, les liaisons ioniques sont facilement brisées. En conséquence, le mica montre généralement une morphologie fendue donnant des feuilles fortes et flexibles pouvant être très légères [40].

La structure du mica aide également à la compréhension de ses propriétés électriques. La séparation des ions positifs de potassium par rapport aux ions négatifs d'oxyde entraîne une augmentation du moment dipolaire permanent, même en absence d'un champ électrique externe. En raison de cette polarité naturelle, le mica présente une constante diélectrique relativement haute. En outre, la structure bidimensionnelle infinie des couches de tétraèdre-octaèdre-tétraèdre, offre relativement peu de chemin conducteurs, ce qui confère au mica une haute rigidité diélectrique et une basse conductivité. La caractéristique la plus importante du mica en ce qui concerne son utilisation dans les machines tournantes est sa résistance supérieure à l'érosion due aux décharges partielles. En effet, les barres et les bobines des gros alternateurs 13,8 kV (la grande majorité des machines du parc d'Hydro-Québec) sont affectées de façon naturelle par des décharges internes à la tension de service [41]. Cependant, le mica est légèrement hygroscopique en raison de sa structure cristalline et de son affinité chimique avec l'eau [42].

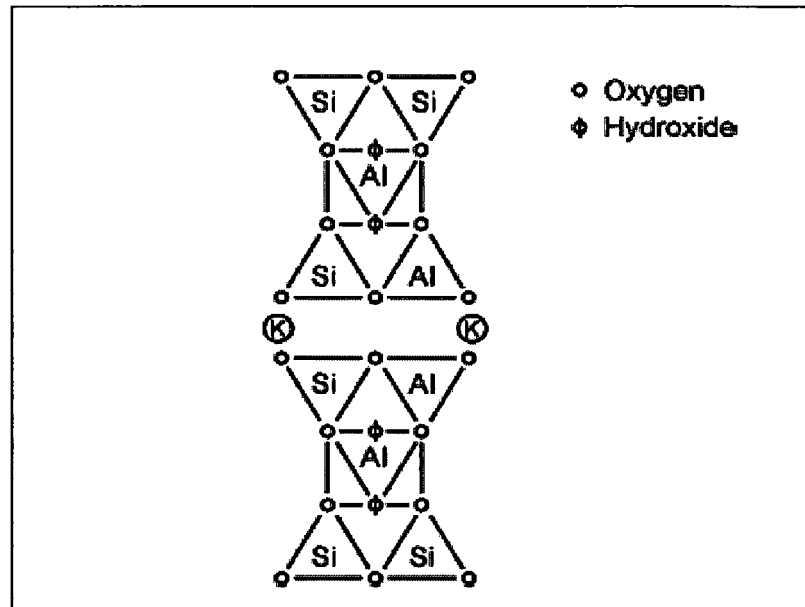


Figure 22 Coupe de mica de miscivite : Chaque structure de trois couches est séparée par une couche d'ions de potassium³.

4.2.3 Asphalte

Du début des années 20 jusqu'à la fin des années 60, des composants à base d'asphalte ont été employés intensivement comme agents de liaison et d'imprégnation dans l'isolation à haute tension de petites et moyennes machines. Beaucoup de générateurs et des moteurs de cette ère sont toujours en service aujourd'hui, en particulier ceux qui étaient opérationnels à des niveaux thermiques et électriques modérés. Les substances asphaltiques se produisent naturellement ou dérivent du pétrole. Les asphaltes sont des thermoplastiques qui se liquéfient graduellement une fois chauffés. Elles sont composées de mélanges d'hydrocarbures et contiennent typiquement un peu de soufre, d'azote, et d'oxygène [44].

³ Pour plus de détails voir [43].

Bien que la composition chimique de l'asphalte soit complexe et varie largement, les molécules insaturées sont fortement réactives, permettant à l'asphalte de se combiner avec une grande variété de groupes fonctionnels. En conséquence, les substances asphaltiques présentent des pertes diélectriques relativement élevées et une rigidité diélectrique modérée. La double liaison covalente entre les atomes de carbone et d'oxygène mène à un dipôle permanent significatif dans lequel l'oxygène est négatif et le carbone est positif. Ce déséquilibre des forces électrochimiques influence fortement sur les caractéristiques physiques et les propriétés électriques du matériau.

Plusieurs composés en asphalte sont polaires [45]. Quand un champ électrique est appliqué à un matériau isolant, les dipôles permanents induits par ces groupes polaires tendent à s'aligner dans la direction du champ, causant ainsi une augmentation de la polarisation, et par conséquent, une augmentation de la constante diélectrique. Les asphaltes présentent un fort coefficient de rigidité diélectrique négatif avec une augmentation de la température, ce qui limite leur utilisation à des systèmes d'isolation de classe B (130°C). Une fois chauffés à haute température, les constituants d'huile présents dans l'asphalte disparaissent par volatilisation ou sont détruits soit par oxydation chimique, soit par craquage moléculaire. À très hautes températures, l'asphalte peut se carboniser, menant ainsi à la formation de chemins de carbone et à une augmentation des pertes diélectriques et de la conductivité.

Dans les systèmes d'isolation basés sur l'asphalte, des défauts d'isolation de masse au niveau des extrémités du noyau statorique peuvent survenir dus aux agents migratoires et au décollement du ruban adhésif causés par le cycle thermique. Ce mode de détérioration d'enroulement statorique est généralement désigné sous le nom "craquage de périmètre". Bien que les asphaltes aient une bonne résistance à la transmission de l'humidité, cette dernière peut pénétrer par les fissures et les craquages.

4.2.4 Polyester

Les premières machines électriques furent isolées en utilisant des matériaux qui se trouvent à l'état naturel (air, mica, asphalte, et semblables) ou des dérivés de sources naturelles (huile minérale, colophane, et cellulose). Cependant, les développements dans le domaine énergétique ont imposé un grand besoin pour des matériaux isolants caractérisés par une grande stabilité thermique, mécanique et électrique. Dans les années 40 et les années 50, l'avancement de la chimie des polymères a mené à l'utilisation des composants à isolation synthétique, tels que les résines de polyester et d'époxy. Les polymères sont généralement subdivisés en deux larges classifications : thermoplastique et thermodurcissable. Les matériaux solides qui se ramollissent et fondent réversiblement, sont classés comme étant thermoplastique. En revanche, un matériau thermodurcissable, une fois chauffé, subit une réaction chimique et devient un solide qui ne se ramollit pas au moment de son réchauffement. Les résines de polyester peuvent être thermoplastiques ou thermodurcissables, selon leur structure moléculaire. Les polymères thermoplastiques sont composés d'une longue chaîne de molécules linéaires. Les polyesters thermoplastiques, tels que le Mylar et Dacron, sont flexibles et élastiques. Cependant, l'utilisation des polyesters thermoplastiques dans les applications à haute température est limitée par leur thermoplasticité. Les polyesters thermodurcissables possèdent des groupes à chaînes linéaires qui sont réticulés à diverses positions, formant ainsi un polymère tridimensionnel ou spatial. Les réticulations créent des liens intermoléculaires très forts qui ne se brisent pas une fois exposées aux températures pour lesquelles les thermoplastiques fondent ou se ramollissent. Les polyesters sont polymérisés suite à la réaction de condensation d'un acide polybasique avec un alcool polyhydrique. Les molécules d'alcool et d'acide doivent contenir au moins deux groupes fonctionnels pour ces réactions afin de produire une longue chaîne de polymère. La formation d'un polyester linéaire est montrée à la figure 23 [46]. Dans beaucoup d'applications, la résine de base du polyester est mélangée avec un monomère réactif tel que le styrène. La présence de bandes insaturées dans les polyesters à haut degré de réticulation produit des

matériaux infusibles et insolubles. La structure tridimensionnelle du polyester est illustrée sur la figure 24 [47]. Les résines de polyester sont relativement peu coûteuses, et sont caractérisées par de bonnes propriétés électriques, une bonne résistance thermique et un bon impact mécanique. Puisque ces composés sont souvent de nature polaire (selon le degré de réticulation), leurs propriétés diélectriques sont inférieures à celles exhibées par les époxydes.

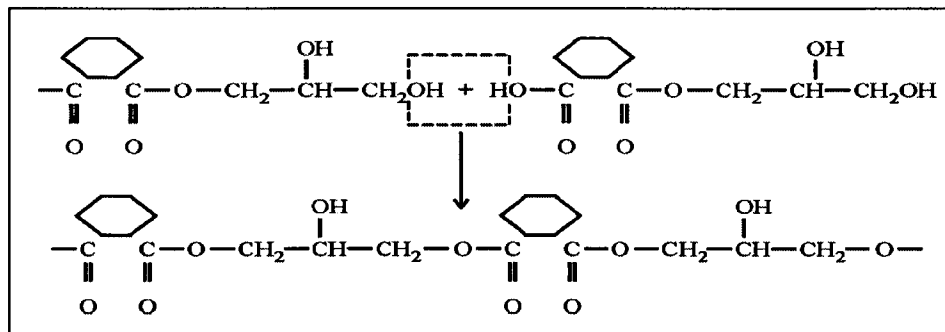


Figure 23 Formation d'une chaîne linéaire de polyester par la réaction de condensation des demi-esters.

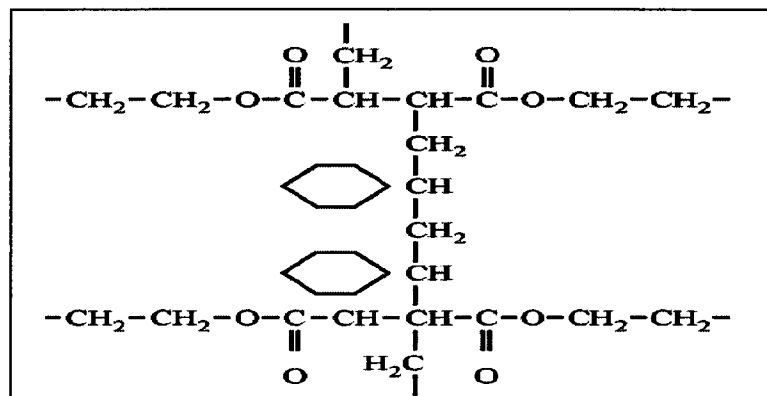


Figure 24 Résine de polyester réticulée par le styrène. Le nombre de groupes styrènes formant les réticulations est variable.

4.2.5 Époxy

Les résines d'époxy sont caractérisées par leur haute résistance mécanique, leur bonne adhérence à la plupart des matériaux y compris les métaux, leur résistance à l'humidité, aux solvants, et aux autres produits chimiques. Les époxydes prennent leur nom du groupe fonctionnel d'époxyde (l'anneau à trois membres contenant de l'oxygène). Ils sont formés en partie à partir de la molécule d'epichlorhydrine, un des deux réactifs utilisé pour préparer la résine. L'autre composant généralement employé est le propane diphénylique, plus souvent appelé bisphénol A. La réaction de polycondensation de ces deux substances résulte en une structure prépolymérique tel qu'illustré à la figure 25, dont le degré de la polymérisation est habituellement décrit par n [48].

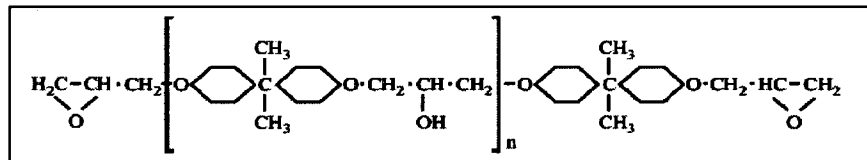


Figure 25 Structure d'un époxy prépolymère

Pour qu'il soit transformé en un produit fini utile, le prépolymère visqueux illustré à la figure 25, doit être traité par l'action des durcisseurs. Différents agents de réticulation peuvent être employés pour provoquer la réticulation dans la chaîne. En raison de leur nature non polaire, les résines époxydes montrent une constante diélectrique relativement basse, une haute résistivité électrique, et une bonne résistance à l'absorption d'humidité.

4.3 Développements récents des systèmes d'isolation des enroulements statoriques

Les systèmes d'isolation des enroulements statoriques actuels possèdent une plus haute rigidité diélectrique. Une fois l'isolation correctement faite, les niveaux de décharges partielles sont très bas par comparaison avec les systèmes utilisés dans les années 60. Les coûts de ces nouveaux produits sont également moins chers, ce qui leur donne un excellent rapport qualité/prix. Ces changements technologiques ont améliorés la stabilité thermique des matériaux en fournissant une isolation plus dense avec peu de vacuoles.

Actuellement le domaine de recherche des matériaux isolants se trouve focalisé sur deux domaines de développement :

- a- L'augmentation de la conductivité thermique des systèmes d'isolation;
- b- L'augmentation de la résistance des systèmes d'isolation face aux décharges partielles.

Dans un système d'isolation, les résines d'agglomération de polymère se caractérisent par une plus basse conductivité thermique. De ce fait, la première approche est d'ajouter à la résine imprégnée des renforts ou des supports présentant une haute conductivité thermique. Dans ce sens, une addition de matériaux semblables au ruban mica a été essayée, donnant un résultat mécanique généralement faible dû aux particules de renfort qui tendent à perturber l'intégrité des morceaux de mica une fois la formation du ruban faite. Récemment, Toshiba, a présenté un nouveau système d'isolation qui utilise des rubans contenant un support de nitrure de bore dans la résine d'agglomération des supports de verre. Ceci va permettre à Toshiba d'augmenter le mégavolt-ampère de ses générateurs à pas moins de 15%, pour les mêmes dimensions d'encoches et les mêmes températures de fonctionnement [49]. Bien que les fibres de verre, utilisées pour le renforcement du ruban aient une bonne conductivité thermique, le tissu de verre contient un nombre assez important des petits vides. Les fournisseurs Japonais ont développés une version de papier mica calciné mélangé avec l'Amaride contenant une gamme de fibres

d'Aramid d'environ 3 à 6%. La société Toshiba, vient de constater que ce type de papier est facile à imprégner donnant une meilleure conductivité thermique en service, puisque l'Aramid réduit la séparation des particules de mica aux températures élevées [50].

En plus de ces nouveaux progrès technologiques, des nouveaux films de polyester faits avec le naphthalate de polyéthylène, ayant une meilleure stabilité thermique sont disponibles dans le commerce depuis la fin des années 90, remplaçant ainsi les films faits avec le terephthalate de polyéthylène dans quelques applications. Le produit de Dupont, du nom commercial Kaladex™, a une température de transition vitreuse (T_V) qui est d'environ 42°C plus haute que celle des films faits avec le terephthalate de polyéthylène. Ce produit a un plus haut module, ce qui lui donne une rigidité de 25% plus grande et une force électrique moyenne aussi de 25% plus haute que les films faits avec le terephthalate de polyéthylène. Au début des années 90, Dupont a présenté un film en polyimide, du nom commercial Kapton CR™, basé sur un germanium organique breveté résistant aux décharges partielles. Une fois celui-ci combiné avec du mica non calciné, le résultat améliore la rigidité diélectrique, en plus de donner une excellente stabilité diélectrique et thermique.

4.4 Revue des méthodes de diagnostic de l'état de dégradation de l'isolation des enroulements statoriques

4.4.1 Le diagnostic hors service (Off-line Test)

4.4.1.1 Diagnostic par des paramètres non-électriques [51, 52, 53]

Il s'agit de méthodes acoustiques pour détecter les cavités et les délaminations à l'interface matrice/renfort, ainsi que de méthodes basées sur l'inspection visuelle. On peut en effet estimer l'état de l'isolant en observant le changement de sa couleur ainsi que la présence de dépôt symptomatique de la présence de décharges partielles.

4.4.1.2 Diagnostic basé sur l'histoire de fonctionnement [52]

Le nombre d'heures de fonctionnement est considéré comme l'indice standard du vieillissement de la machine. La fréquence des cycles marche/arrêt et les variations de charges fréquentes accélèrent également le vieillissement.

4.4.1.3 Essai résistance d'isolation et indice de polarisation (Insulation resistance and index polarization test)

C'est probablement l'essai le plus utilisé dans l'industrie pour le diagnostic des enroulements des moteurs et des générateurs. Son application est valable pour toutes machines et enroulements, à l'exception des enroulements rotoriques des moteurs à induction à cage d'écureuil, puisqu'ils ne contiennent pas une isolation à tester. Ce type d'essai est très puissant pour la détection des problèmes de pollution et de contaminations des enroulements. Il peut même détecter la détérioration thermique pour les anciens systèmes d'isolation. Ce type d'essai est utilisé depuis plus de soixante dix ans. Les deux mesures (IP, RI) utilisent la même instrumentation et sont habituellement réalisées en même temps. Le tableau III, représente les recommandations établies par la norme IEEE Std 43-2000 [9], pour la grandeur de la tension à appliquer durant les mesures de la résistance d'isolation (RI) et de l'indice de polarisation (IP). Les tableaux I et II, présentés en premier chapitre, représentent respectivement, les valeurs minimales de la résistance d'isolation recommandées par la même norme lorsque corrigé à 40°C et les valeurs minimales de l'indice de polarisation selon la classe d'isolation.

Tableau III

Directives pour l'application des tensions
continues lors des essais RI et PI

Tension nominale de l'enroulement V	Essai de la résistance d'isolation à tension continue V
<100	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Un autre critère, R'C, est aussi utilisé pour l'évaluation de l'état d'isolation de masse. Ce paramètre représente le produit de la résistance en décharge par la capacité de l'échantillon. La résistance en décharge est définie comme le rapport de la tension appliquée sur le courant de décharge mesuré après une minute du début de la décharge [54]. Cette résistance est corrigée à 40°C selon la procédure décrite dans [8]. La grandeur de ce paramètre dépend du type de matériau et de son degré de vieillissement. Il présente les avantages suivants :

- Indépendant de la taille de la machine;
- Comparable avec une barre de réserve du même type de matériau;
- Indépendant de la présence de saleté ou de l'absorption d'humidité.

Le tableau IV, ci-dessous, représente les critères basés sur les valeurs de $R'C$ [32].

Tableau IV

Recommandations selon les valeurs de $R'C$

Type d'isolant	Bon	Âgé	Dégradé
Asphalte-mica	$R'C > 45$	$10 < R'C < 45$	$R'C < 10$
Époxy-mica	$R'C > 450$	$100 < R'C < 450$	$R'C < 100$

4.4.1.4 Essai à haute tension continue (DC hipot test)

Ce genre d'essai est valable pour tous les types d'enroulements statoriques et rotoriques à l'exception des rotors des moteurs à induction à cage d'écureuil (SCI : Squirrel Cage Induction). L'idée fondamentale est que si l'enroulement arrive à supporter l'effort électrique suite à l'application de la haute tension continue pendant toute la durée d'essai, l'isolation de masse est jugée bon (non vieillée) et l'enroulement peut retourner en service pour un fonctionnement normal. Par contre, si l'enroulement échoue pendant le test, il est nécessaire d'effectuer une réparation ou procéder à un rebobinage complet car certainement l'isolation de masse a été perforée durant cet essai. Il y a plusieurs méthodes d'essai à haute tension continue, dont on fera une brève description dans les paragraphes suivants:

4.4.1.4.1 Essai conventionnel à haute tension continue (Conventional DC hipot test)

Dans ce cas, la haute tension continue est appliquée sous forme d'une série d'échelons de tension uniforme séparés par des périodes de décharge suivant un cycle de temps régulier (figure 26). Des lectures de courant sont prises à chaque intervalle, et instantanément une courbe de courant en fonction de la tension est visualisée via le système d'acquisition. Pendant et après l'essai, cette courbe est examinée pour de possibles indications de faiblesse de l'isolation de masse. Une importante partie des variations du courant de fuite peut être masquée par les courants d'absorption diélectrique qui dominent les mesures. Pour réduire au minimum ces effets, la tension appliquée peut être maintenue assez longtemps à chaque niveau pour permettre au courant d'absorption de tendre à une valeur négligeable. Ce temps de stabilisation peut excéder une heure pour quelques machines.

Pour l'exécution de cet essai, un bloc d'alimentation haute tension continue approprié (fournit par plusieurs fournisseurs) est utilisé. Il est relié, soit à un appareillage de connexion (switchgear), soit aux bornes de la machine afin de charger l'enroulement statorique. Chaque niveau de tension d'essai est rapidement atteint et reste maintenu pour une période de 1 minute ou de 5 minutes. Par la suite, la tension est rapidement remise à zéro et l'enroulement est solidement mis à la terre. Si les disjoncteurs d'alimentation se déclenchent, alors il est fort probable qu'une perforation de l'isolation de masse s'est produite. Cette action se manifeste par une chute rapide de la résistance d'isolation à une faible valeur, et, selon la loi d'Ohm, le courant devient très grand et l'alimentation ne peut fournir ce courant. L'enroulement endommagé doit obligatoirement subir des réparations ou doit être remplacé par un autre en bon état.

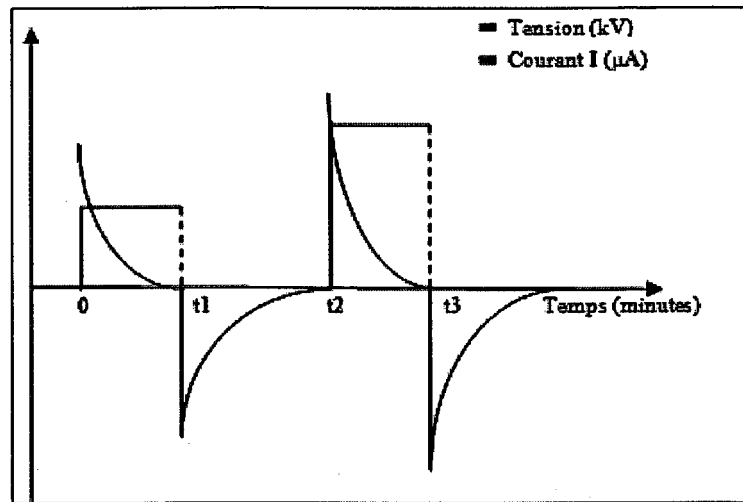


Figure 26 Courbe typique d'un essai conventionnel

4.4.1.4.2 Essai haute tension à plusieurs échelons (Step-Stress hipot test)

Cet essai a été développé par Schleif dans les années 50. Ce développement a été réalisé à l'époque où l'isolation de masse à base d'asphalte mica était présente dans la plupart des machines électriques. Le principe est semblable à celui de l'essai conventionnel avec l'utilisation de la même instrumentation, mais cette fois-ci la tension est augmentée graduellement avec des échelons uniformes (figure 27). La tension continue peut avoir un incrément de 1 kilovolt pour chaque niveau de tension et qui sera maintenu pendant 1 minute avant le prochain incrément de tension. L'acquisition du courant se fait à la fin de chaque niveau de tension (bien entendu le courant capacitif à ce moment-là aura déjà chuté à une très faible valeur). Cette acquisition est reproduite sur un graphique du courant en fonction de la tension.

Il n'est habituellement pas pratique que le maintien d'un niveau de tension soit assez long pour rendre le courant d'absorption négligeable. Pour y remédier, des programmes d'essais complexes ont été développés, ils sont plus détaillés dans [55]. L'idée de base

de ces programmes est d'ajuster préalablement dans un ordre décroissant les durées des niveaux des tensions appliquées (figure 28), puisque la composante d'absorption du courant mesuré est proportionnelle à la tension appliquée. De cette façon, le courant d'absorption sera linéarisé de telle sorte que les changements du courant de conduction deviennent relativement perceptibles. Idéalement, la forme de la courbe du courant en fonction de la tension sera une ligne droite avec quelques légères fluctuations. Cependant, parfois le courant augmente abruptement à un certain niveau de tension. Ceci peut être un avertissement d'une éventuelle perforation de l'isolation qui risque de se produire. Conséquemment, si la tension à laquelle l'instabilité du courant a été détectée, est inférieure au niveau maximal de la tension d'opération, il est très risqué de retourner l'enroulement en service sans lui faire subir une réparation.

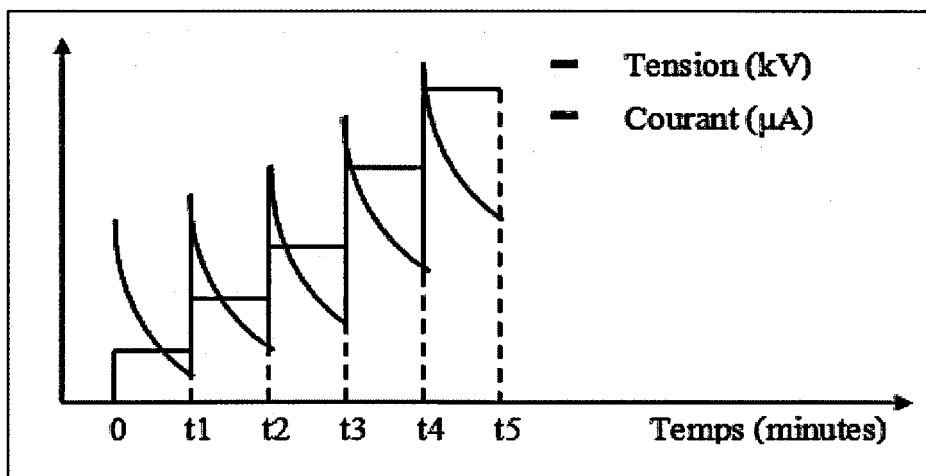


Figure 27 Courbe typique d'un échelon de tension graduel uniforme

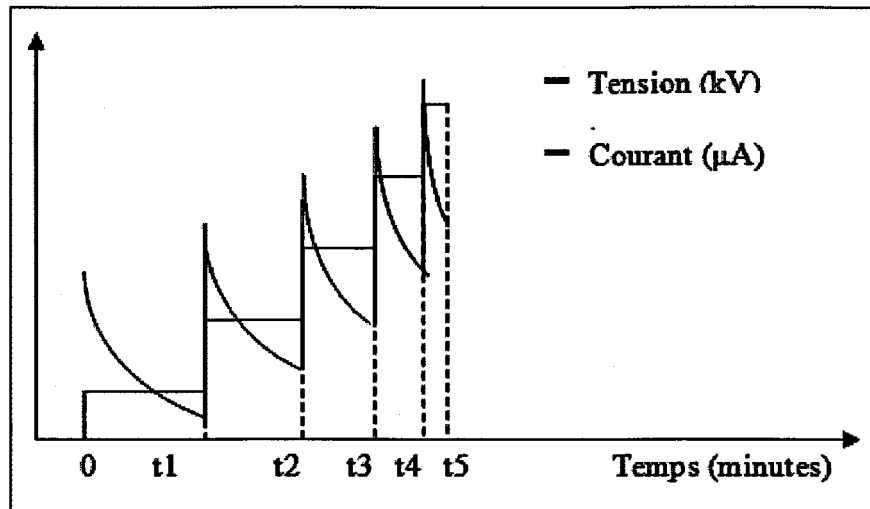
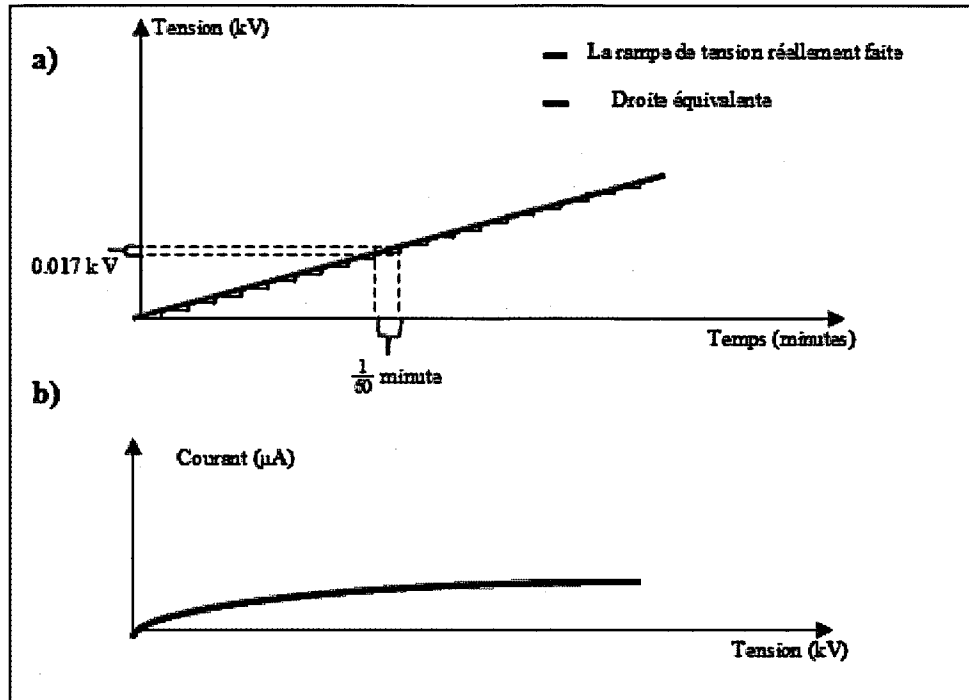


Figure 28 Courbe typique d'un échelon de tension graduel non uniforme

4.4.1.4.3 Essai en montée progressive en haute tension continue (DC Ramp Hipot Test)

En 2003, Adwel a présenté un model commercial d'un essai de montée progressive (rampe) en haute tension continue. Dans ce cas, la tension continue est lentement et linéairement augmentée jusqu'au niveau maximal avec une pente constante d'environ 1 ou 2 kV/minute. Cette approche correspond à une montée progressive en tension à des intervalles temporels très courts (figure 29-a). La composante d'absorption du courant d'isolation se linéarise automatiquement, et les déviations du courant de fuite seront facilement visualisées. Le courant en fonction de la tension est reproduit automatiquement sur un graphique (figure 29-b). À la différence des essais à échelon de tension décrits ci-dessus, cette forme de montée progressive en tension donne un courant capacitif constant. Bien qu'aucun test de diagnostic ne puisse détecter avec succès tous les types de défaut d'isolation de l'enroulement statorique, cet essai simplifie considérablement l'analyse des mesures de courant de fuite. Il est donc un moyen efficace pour établir une bonne maintenance préventive afin éviter des éventuels échecs en service [56]. Une seule personne est requise pour l'exécution et le bon contrôle de cet

essai. Cette opération prend moins de temps pour être exécutée que les autres essais haute tension.



L'autre avantage de cette technique, est qu'on peut arrêter l'exécution à n'importe quel moment si une instabilité importante du courant se produit, après que le courant capacitif soit devenu constant. En conséquence, ce type d'essai permet éventuellement d'éviter une perforation de l'isolation de masse. Notre travail dans le cadre de ce mémoire est axé principalement sur cette méthode qui sera le sujet des prochains chapitres.

4.4.1.5 Essai haute tension à courant alternatif (AC high potential)

Cet essai est semblable à l'essai haute tension continue, mais la tension employée dans ce cas est alternative d'une fréquence de 50 ou 60 Hz [57]. Parfois une fréquence de 0,1 Hz est également utilisée. Pour les essais à haute tension continue décrits dans le paragraphe précédent, la tension chute à travers les composantes de l'isolation de masse et les extrémités de l'enroulement statorique, en fonction des résistances (résistivité) de ces mêmes composantes. Ces derniers auront une chute de tension plus faible à leurs bornes si leurs résistances sont faibles. En revanche, pour un essai à haute tension à courant alternatif, la tension chute à travers chaque composant de l'isolation de masse ou au niveau des extrémités de l'enroulement, en fonction cette fois-ci de la capacité de chaque composante. Ainsi, il y a tendance à avoir une distribution de l'effort électrique complètement différente au niveau des têtes de bobines (voir la norme IEEE 433 [57]) de masse entre les deux essais. Chez les plus anciens systèmes d'isolation, en particulier les systèmes en asphalte-mica, cette différence dans la distribution de l'effort électrique était moins prononcée parce que la résistivité au niveau des anciennes isolations de masse était moindre à cause de l'absorption de l'humidité. Cependant, avec des isolations en époxy-mica moderne, la résistivité est très grande. L'essai de tenue en tension AC exige l'utilisation d'un transformateur à courant alternatif pour charger la capacité de l'enroulement. Occasionnellement, ce transformateur est remplacé par une alimentation à très basses fréquences (Very Low Frequency Supply), c'est-à-dire à 0,1 Hz. Il faut noter, que cet essai est un essai "tout ou rien" (go-no-go test). Donc si à l'issue de cet essai l'enroulement n'échoue pas, l'isolation de masse est jugée bonne, mais s'il échoue, alors probablement que l'isolation de masse vient de subir une perforation. Cette technique est plus généralement appliquée aux enroulements préformés (Form Wound Winding). Les essais de maintenance à haute tension alternative sont rarement employés en Amérique du Nord, mais trouvent une application plus répandue en Asie et en Europe.

4.4.1.6 Essai de montée de capacité (Capacitance Tip-up Test)

La mesure de la capacité d'un enroulement peut parfois indiquer des problèmes tels que la détérioration thermique ou la saturation de l'isolation par l'humidité. Cet essai est seulement valable pour les enroulements statoriques préformés évoluant à 2 300 V et plus. Ainsi il n'y a aucune procédure normalisée pour son exécution.

Initialement, une alimentation de tension à courant alternatif suffisante pour charger la capacité de l'enroulement à la tension voulue est nécessaire pour cet essai. Cette opération peut se faire via un transformateur conventionnel, une alimentation résonnante ou même une alimentation de très basse fréquence. Pour un grand stator, une puissance de 20 à 30 kVA est nécessaire. Un autre instrument est aussi nécessaire, capable de mesurer la capacité à au moins la tension nominale phase-neutre de l'enroulement statorique. Pour qu'il soit valable pour toutes les machines électriques, cet instrument doit être capable d'opérer jusqu'à environ 25 kilovolts, avec une précision de plus de 1%. Le pont de Schering et le pont de rapport de transformateur sont les plus utilisés [58]. La meilleure façon d'exécuter cet essai, est d'isoler et d'interconnecter les phases du reste de l'équipement, afin d'avoir une bonne sensibilité.

Une phase à la fois est examinée, avec les deux autres phases mises à la terre. La capacité de basse tension (C_{BT}) est d'abord mesurée, habituellement à environ 0,2E, où E est la tension nominale phase-phase du stator. Puis la tension appliquée est augmentée à environ la tension nominale phase-neutre (environ 0,58E). On mesure ainsi la capacité à haute tension (C_{HT}). La montée de capacité est donnée par :

$$\Delta C = \frac{C_{HT} - C_{BT}}{C_{BT}} \quad (4.1)$$

Ce rapport est habituellement exprimé en pourcentage.

Une valeur de ΔC élevée est caractéristique d'une isolation contenant un grand nombre de vides (des poches d'air ou de gaz). Les masses statoriques à époxy-mica moderne devraient avoir un ΔC inférieur à 1%, alors que celui des anciens enroulements à base d'asphalte-mica doit être inférieur à 3 ou 4%. Si ΔC est plus haut que ces valeurs, cela indique qu'il y a une détérioration de l'isolation, ou cela peut indiquer la présence de certains problèmes de fabrication. Ainsi, cette méthode présente quelques limitations qui affectent l'interprétation des résultats.

4.4.1.7 Essai de facteur de dissipation (Dissipation factor)

Le facteur de dissipation fournit une indication des pertes diélectriques dans l'isolation. Certains processus de détérioration, comme la détérioration thermique et l'absorption d'humidité, augmenteront ces pertes. Il y a deux manières principales de mesurer les pertes diélectriques : la première est la technique du facteur de dissipation ($\tan \delta$) et la seconde est celle du facteur de puissance. Ces deux techniques sont utilisées seulement pour les enroulements statoriques et plus précisément pour les enroulements préformés.

Considérant que l'enroulement est essentiellement un condensateur avec des pertes diélectriques, la mesure des pertes diélectriques se fait par les deux méthodes suivantes :

1. Facteur de dissipation (FD) ou $\tan \delta$: ce facteur est mesuré avec un instrument à pont équilibré, où le réseau résistif-capacitif est varié pour donner la même tension et le même facteur de dissipation ($\tan \delta$) que ceux déjà mesurés à travers l'enroulement statorique (figure 30). Le FD est alors calculé à partir des éléments de R et de C du pont au point d'équilibre (tension nulle). Cette méthode peut facilement atteindre une précision de 0,01%.

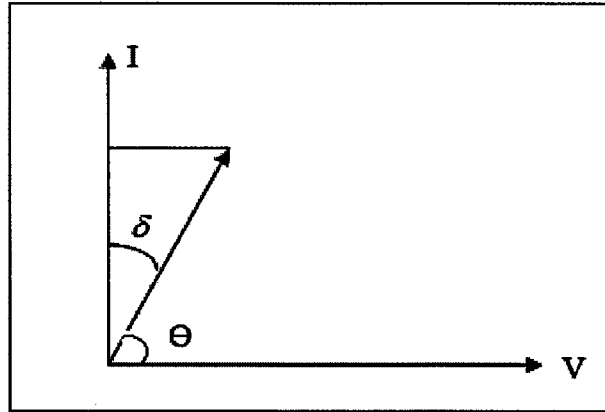


Figure 30 Calcul de l'angle de phase pour les mesures de $\tan \delta$ ($\cos \theta = FP$)

2. Facteur de puissance (FP) : pour des matériaux avec un facteur de dissipation relativement faible, ce qui est le cas pour la plupart des isolations des enroulements statoriques, le facteur de puissance et le facteur de dissipation sont à peu près identiques. Le facteur de puissance est déterminé en mesurant la tension (V), appliquée entre le cuivre et le noyau de l'enroulement, puis le courant résultant (I). En même temps, la puissance (W) de l'enroulement est mesurée avec un Wattmètre précis. le facteur de puissance *FP* est :

$$FP = \frac{W}{VI} \quad (4.2)$$

Comme avec le FD, le FP est habituellement exprimé en pourcentage. L'essai de FP est moins précis pour la mesure des pertes diélectriques par rapport à l'essai FD, mais l'instrumentation a tendance à être moins chère puisqu'elle n'emploie pas d'instrument à pont équilibré. Le FD peut être converti en FP on utilisant :

$$FP = \frac{FD}{(1 + FD^2)^{0.5}} \quad (4.3)$$

Les valeurs de FD sont environ de 0,5% pour les deux isolations en époxy moderne et en polyester, et il est sont environ de 3 à 5% pour des enroulements en asphalte mica. Si le FD est mesuré de façon régulière, par exemple à toutes les années, et demeure constant pendant plusieurs années, cela indique qu'aucun vieillissement thermique ou contamination de l'enroulement ne se sont produits. En revanche s'il augmente d'environ 1% ou plus de sa valeur initiale, ceci est une indication soit une surchauffe de l'isolation soit d'une contamination de l'enroulement due à l'humidité ou à des contaminants partiellement conducteurs.

4.4.1.8 Essai de montée du facteur de puissance (Power Factor Tip-up Test)

Cet essai est également appelé l'essai de montée du facteur de dissipation. C'est une technique indirecte pour la détection des décharges partielles au niveau de l'enroulement statorique à haute tension, qui est complémentaire à l'essai de montée de capacité (décrit ci-dessus). Cet essai est seulement valable pour les enroulements statoriques évoluant à 2 300 V et plus.

Tous les matériaux d'isolation utilisés en pratique, présentent des pertes diélectriques qu'on peut mesurer par ce genre d'essai. Aux basses tensions, le facteur de puissance ne dépend pas de la tension. Cependant, à mesure que la tension alternative augmente à travers l'isolation des enroulements préformés (Form-Wound Coil), et si des vacuoles sont présentes au niveau de l'isolation de masse, alors à un certain niveau de tension des décharges partielles commencent à se produire. Ces décharges se manifestent par une diffusion de la chaleur, de la lumière, ainsi que la génération d'un signal acoustique au niveau de l'équipement électrique. Le même phénomène se produit en cas d'un décollement ou d'une délamination dans l'enroulement. Ces décharges partielles vont accroître la valeur du facteur de puissance à des valeurs supérieures à la normale, puisqu'elles représentent une composante additionnelle de perte dans l'isolation.

Dans cet essai, le facteur de puissance FP est mesuré à deux niveaux de tensions. Un premier facteur de puissance est mesuré à basse tension, FP_{bt} , et est un indicateur des pertes diélectriques normales de l'isolation. Il est habituellement mesuré à environ 20% de la tension nominale phase-neutre du stator. Puis cette tension est augmentée à la tension nominale phase-neutre pour mesurer un deuxième facteur de puissance à haute tension, FP_{ht} . En fin, la montée du facteur de puissance ΔFP est calculée comme suit :

$$\Delta FP = FP_{HT} - FP_{BT} \quad (4.4)$$

Il est à noter que certaines compagnies font des mesures à plusieurs niveaux de tension puis calculent plusieurs ΔFP entre ces différents niveaux de tension. Cependant si après une période de quelques années, selon le cycle d'entretien, on constate que ΔFP s'éloigne de la valeur normale, l'enroulement en question est en présence d'une importante activité des décharges partielles, causée par les détériorations thermiques et les cycles de charge.

Pour un nouvel enroulement présentant un ΔFP supérieur à environ trois écarts types de sa valeur moyenne, cela signifie que son isolation de masse était mal imprégnée.

4.4.1.10 Mesure de décharges partielles [53, 57, 58, 59, 60]

Cet essai lorsque utilisé hors service, exige une alimentation d'énergie capable de charger l'enroulement à au moins la tension nominale phase-neutre. Dans le cas des stators des grands générateurs, un transformateur conventionnel ou résonnant d'une puissance nominale de 20 à 40 kVA est nécessaire. Lors d'un arrêt temporaire de la machine, un condensateur de haute tension relié aux bornes du stator, d'ordre de 80 pF à 1 000 pF, est employé pour séparer le signal haute fréquence des décharges partielles de l'alimentation 60 Hz (figure 31). On peut alors mesurer et d'observer l'évolution de la tension d'initiation des décharges (Discharge Inception Voltage-DIV). Le potentiel est augmenté graduellement à la tension nominale phase-neutre. L'enroulement reste soumis à ce

potentiel pendant 10 à 15 minutes pour enregistrer les pics des impulsions (Q_m) des décharges (figure 32). La durée de maintien est importante puisque ces décharges partielles tendent à être plus haute dans les premières minutes après l'application de la tension. Ensuite, la tension est graduellement abaissée jusqu'au niveau où les décharges ne sont plus discernables. Ceci représente la tension d'extinction des décharges (DEV : Discharge Extinction Voltage). Cette dernière est habituellement inférieure à celle d'initiation des décharges (DIV). Comme montré sur la figure 32, des impulsions positives et négatives sont mesurées lors d'un essai DP.

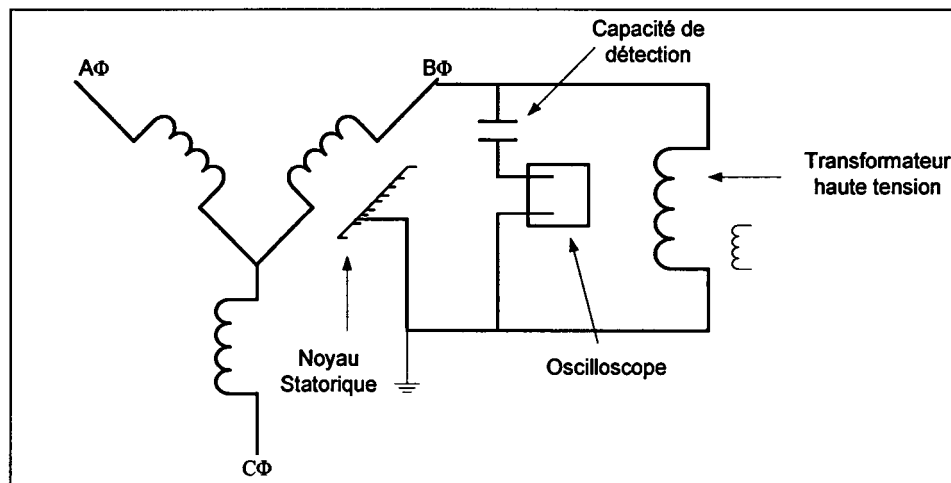


Figure 31 La mesure des impulsions du courant des décharges partielles

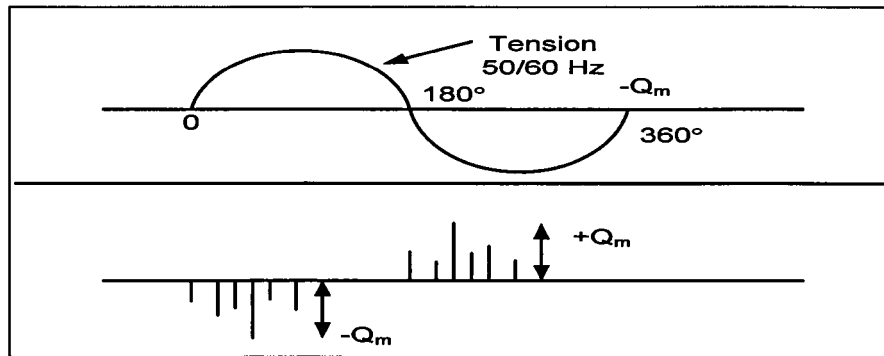


Figure 32 Affichage d'oscilloscope des impulsions de décharges partielles en fonction de la tension

4.4.2 Le diagnostic en service (On-line)

4.4.2.1 Les mesures de décharges partielles [49, 52, 58, 61, 62, 63]

La méthode de mesure des décharges partielles « on-line » est similaire à celle off-line sauf qu'on n'utilise pas de source extérieure puisque la machine reste toujours en marche. L'avantage de cette méthode est de pouvoir estimer l'état de l'isolation sans arrêter la machine. Mais son interprétation est rendue difficile par le bruit haute fréquence provenant de sources autre que les décharges partielles.

4.4.2.2 Les autres méthodes « on-line » [49]

Sont également utilisées en service les méthodes suivantes: la mesure de la vibration des barres au cours du fonctionnement, de la température d'isolation par rapport à celle en fonctionnement normal. L'annexe 1 fait une récapitulation et une comparaison de la plupart des essais que l'on vient de mentionner.