

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
24 juillet 2008 (24.07.2008)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2008/087362 A2

(51) Classification internationale des brevets :
G01R 31/02 (2006.01) **G01R 31/12** (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2007/052626

(22) Date de dépôt international :
27 décembre 2007 (27.12.2007)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
06 11484 28 décembre 2006 (28.12.2006) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **ELECTRICITE DE FRANCE** [FR/FR]; 22-30 avenue de Wagram, F-75008 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **GUINIC, Philippe** [FR/FR]; 8 rue Gauguier, F-75014 Paris (FR).
PETIT, André [FR/FR]; 1948 Avenue d'Uriage, F-38410

Vaulnaveys Le Haut (FR). **SCHLUPP, Pierre** [FR/FR]; 22 rue de l'Yvette, F-91120 Palaiseau (FR). **HOTELLIER, Astrid** [FR/FR]; 269 Chemin du Louvarou, F-38560 Jarrie (FR).

(74) Mandataires : **Cabinet Plasseraud** etc.; 52 rue de la Victoire, F-75440 Paris Cedex 09 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD OF LOCATING A ZONE OF REDUCED INSULATION IN AN INSULATOR COVERING A CONDUCTOR OF A WINDING

(54) Titre : PROCÉDÉ DE LOCALISATION D'UNE ZONE DE BAISSSE D'ISOLEMENT DANS UN ISOLANT RECOUVRANT UN CONDUCTEUR D'UN BOBINAGE

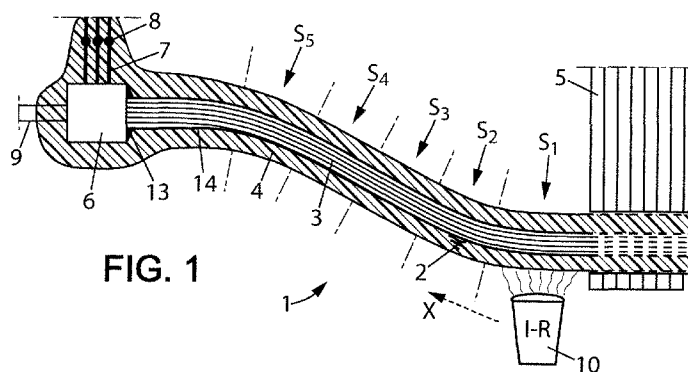


FIG. 1

(57) Abstract: The aim of the method is to locate a degraded zone (2) in an insulator (4) covering a conductor (3) of an electrical winding, the winding comprising a number of portions having a risk of a lower insulation, each portion (S1,..., Sn) at risk being likely to be subject to local degradation of the insulator, which is characterized by an insulation resistance (RD) of less than the insulation resistance (R1,..., Ri) of a sound portion, the method consisting in carrying out the following steps: a) local modification, relative to the ambient temperature of the winding, of the temperature of the insulator (4) of a subassembly consisting of at least one portion (Sk) selected from all the portions at risk; and b) measurement of an electrical characteristic (Cmes) representative of the insulation resistance (RT) of the entire winding during said local temperature modification; measurement (Cmes) obtained in step b), compared with a reference, being representative of the presence of a degraded zone (2) located in said subassembly (Sk).

[Suite sur la page suivante]

WO 2008/087362 A2



GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)*

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

(57) Abrégé : Le procédé vise à localiser une zone dégradée (2) dans un isolant (4) recouvrant un conducteur (3) d'un bobinage électrique, le bobinage comportant un ensemble de tronçons à risque de baisse d'isolement, chaque tronçon à risque ($S_1, \dots, S_n$) étant susceptible d'être sujet à une dégradation locale de l'isolant se caractérisant par une résistance d'isolement (R_D) inférieure à la résistance d'isolement ($R_1, \dots, R_i$) d'un tronçon sain, le procédé consistant à effectuer les étapes suivantes : a) Modification locale, par rapport à la température ambiante du bobinage, de la température de l'isolant (4) d'un sous-ensemble constitué d'au moins un tronçon (S_k) sélectionné parmi l'ensemble des tronçons à risque; b) Mesure d'une caractéristique électrique (C_{Mes}) représentative de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage (R_T) pendant ladite modification locale de la température; la mesure obtenue à l'étape b) (C_{Mes}), comparée à une référence, étant représentative de la présence d'une zone dégradée (2) localisée dans ledit sous-ensemble (S_k).

Procédé de localisation d'une zone de baisse d'isolement dans un isolant recouvrant un conducteur d'un bobinage

La présente invention se rapporte au problème de la localisation d'au moins une zone de baisse d'isolement, aussi appelée zone dégradée dans ce qui suit, dans un isolant recouvrant un conducteur d'un bobinage. Le procédé de localisation selon l'invention s'applique en particulier dans une machine électrique bobinée telle qu'un alternateur, un moteur, ou encore un transformateur. Le bobinage de la machine, y compris les bornes d'alimentation situées aux extrémités du bobinage, comprend généralement un conducteur entouré d'au moins un isolant solide ou liquide, et présente des tronçons dans lesquels l'isolant risque de se détériorer au cours de l'exploitation de la machine.

Dans les machines électriques tournantes, en particulier celles fonctionnant en haute tension (plusieurs kV), le bobinage du stator est généralement formé par un ensemble de barres conductrices parallèles de même longueur, ces barres étant réparties autour de l'axe longitudinal du stator et électriquement reliées entre elles à leurs extrémités selon une configuration formant des spires. Dans les machines de forte puissance, les barres du stator sont généralement refroidies par un liquide tel que de l'eau, le cœur conducteur de chaque barre étant formé par un faisceau de brins conducteurs dont certains sont creux, l'ensemble étant entouré par l'isolant.

Dans les deux régions d'extrémités du stator, les barres émergent de l'empilement de tôles formant la masse magnétique du stator en formant une courbure pour se développer selon tronc de cône qui s'évase en direction de l'extrémité du stator. Dans le métier, les parties émergentes des barres sont couramment appelées les « développantes », du fait qu'elles se développent en s'évasant. Dans ce qui suit, les parties développantes des barres sont nommées les barres développantes. Chaque barre développante présente généralement une extrémité raccordée par brasage à un carter métallique appelé « boîte à eau » transportant le liquide. Les connexions électriques entre les barres sont réalisées grâce à des lamelles métalliques reliant électriquement les boîtes à eau des barres à connecter.

Les barres développantes du stator sont sujettes à des amplitudes de vibrations mécaniques importantes en comparaison avec les parties rectilignes de barres maintenues dans l'empilement de tôles formant la masse magnétique. Les vibrations mécaniques, ou encore les cycles de
5 dilatation thermique subis par une barre dans une région d'extrémité, peuvent provoquer avec le vieillissement de la machine électrique une fissuration de la brasure qui relie les conducteurs de la barre à une boîte à eau. Ces vibrations peuvent aussi provoquer des fissures ou des craquelures ou des délaminages dans l'isolant.

10 Une fissuration de la brasure au niveau d'un conducteur creux provoque une fuite de liquide depuis la boîte à eau, qui se propage le long de la surface interne de l'isolant de la barre et crée généralement au moins une zone de baisse d'isolement. Plus rarement, une fuite de liquide peut aussi provenir d'un défaut dans un conducteur creux. Une baisse d'isolement
15 apparaît par exemple quand du liquide est absorbé par capillarité dans des fissures de l'isolant sur une grande partie de l'épaisseur de la couche d'isolant, ou encore de façon plus lente quand le liquide est « chimiquement » absorbé par l'isolant et dégrade progressivement l'isolant. Les fissures sont généralement causées par un délaminage de l'isolant.
20 L'isolant est généralement un matériau composite stratifié qui même sans être détérioré par des fissures peut néanmoins être progressivement imprégné par le liquide selon un processus de dégradation influencé par les températures relativement élevées en exploitation.

Il est impossible de localiser une fuite de liquide par l'observation
25 de la surface externe de l'isolant, cette surface restant sèche du fait notamment de l'environnement gazeux particulier en exploitation. Un défaut d'isolement préjudiciable pour le fonctionnement de la machine se produit si l'épaisseur d'isolant sec entre la partie imprégnée et la surface externe de l'isolant est trop faible pour tenir le champ électrique en exploitation. Une
30 fuite de liquide sur une barre développante provoque à plus ou moins long terme une baisse d'isolement significative pouvant aller jusqu'à un défaut d'isolement. Les barres développantes ont sensiblement le même risque

chacune de présenter une zone de baisse d'isolement au cours du vieillissement de la machine.

Les machines électriques tournantes à haute tension doivent être régulièrement révisées lors de phases d'inspection où elles sont mises hors service. Typiquement, la résistance d'isolement du bobinage du stator est mesurée en appliquant une tension et en mesurant le courant de fuite traversant l'isolant. Lorsque la résistance d'isolement est jugée trop faible, une intervention est nécessaire sur la machine pour remplacer la partie de bobinage en faiblesse, y compris éventuellement au moins une borne d'alimentation.

Une technique conventionnelle pour localiser la partie de bobinage en faiblesse consiste à découper physiquement des tronçons de bobinage, c'est-à-dire à séparer électriquement certaines barres développantes, afin de procéder à des mesures d'isolement tronçon par tronçon pour de proche en proche localiser au moins un tronçon présentant une résistance d'isolement trop faible. Ceci nécessite de casser la couche d'isolant recouvrant les lamelles de connexion électrique entre les boîtes à eau, puis de faire fondre la brasure de connexion des lamelles. Une fois les mesures d'isolement effectuées, les brasures doivent être refaites ainsi que l'isolant autour, ce qui est une opération longue et difficile comportant en particulier le risque de ne pas rétablir correctement une connexion.

Une méthode ne nécessitant pas un démontage des connexions électriques est décrite dans la demande de brevet EP 1 503 218 A1, ainsi que dans la publication « EPRI - International conference on electric generator predictive maintenance and refurbishment (Jan '03) – Advanced Methods for Detecting Wet Bars in Water-Cooled Stator Windings of Turbine Generators ». L'application de la méthode nécessite une structure particulière de la couche d'isolant des barres développantes du stator. Comme représenté sur la figure 6 de EP 1 503 218 A1, une ou plusieurs électrodes internes radialement espacées sont noyées dans la couche d'isolant d'une barre développante. Une tension alternative est appliquée sur le bobinage de la machine, et le potentiel d'au moins une électrode est

mesuré par une sonde en regard de la surface des barres suspectées d'être contaminées par de l'eau. Le potentiel mesuré est comparé au potentiel mesuré dans les mêmes conditions pour une barre développante sèche de référence. Une différence entre les deux mesures traduit une contamination
5 de la barre suspecte, puisque l'eau imprégnant l'isolant modifie la répartition du champ électrique entre le conducteur et l'électrode interne sondée.

Une telle méthode présente toutefois des inconvénients, notamment du fait qu'elle ne s'applique qu'à une structure de barre développante dont l'isolant est muni d'au moins une électrode interne. En
10 outre, de par la fonction de diviseur capacitif d'une électrode interne, la mesure du potentiel de l'électrode est surtout influencée par le gradient de l'humidité dans l'isolant. La méthode permet une détection surtout qualitative de la présence d'humidité, et ne permet pas de discriminer la barre en défaut lorsque plusieurs barres sont affectées par de l'humidité alors qu'une seule
15 de ces barres présente une baisse substantielle d'isolement qui conditionne à elle seule la baisse d'isolement du bobinage.

Il existe un besoin pour un procédé permettant de localiser efficacement et relativement rapidement toute zone de baisse substantielle d'isolement du bobinage d'une machine électrique à haute tension. Il existe
20 aussi un besoin pour un tel procédé qui soit applicable à diverses technologies d'isolement du bobinage.

A cet effet, l'invention a pour objet un procédé de localisation d'une zone dégradée dans un isolant recouvrant un conducteur d'un bobinage, le bobinage comportant un ensemble de tronçons à risque de
25 baisse d'isolement, chaque tronçon à risque étant susceptible d'être sujet à une dégradation locale de l'isolant se caractérisant par une résistance d'isolement inférieure à la résistance d'isolement d'un tronçon sain,

le procédé consistant à effectuer les étapes suivantes :

a) Modification locale, par rapport à la température ambiante du
30 bobinage, de la température de l'isolant d'un sous-ensemble constitué d'au moins un tronçon sélectionné parmi l'ensemble des

tronçons à risque;

b) Mesure d'une caractéristique électrique représentative de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage pendant ladite modification locale de la température dudit sous-ensemble;

5 la mesure obtenue à l'étape b), comparée à une référence, étant représentative de la présence d'une zone dégradée localisée dans ledit sous-ensemble.

La modification locale de la température de l'isolant d'un sous-ensemble, en particulier par chauffage, a une répercussion importante sur la
10 résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage dès lors qu'une zone dégradée est présente dans ledit sous-ensemble. En effet, la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage est conditionnée par la zone où l'isolement est le plus faible. Si cette zone est chauffée, la diminution de la résistance d'isolement locale qui en résulte va entraîner une baisse notable
15 de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage.

Comme expliqué dans ce qui suit en rapport avec l'application du procédé dans une machine tournante à haute tension refroidie par eau, un chauffage de la surface externe de l'isolant sur la zone dégradée suffit pour diminuer rapidement et notablement la résistance d'isolement locale de cette
20 zone, et par conséquent la mesure de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage traduit la présence de la zone dégradée. En effet, la résistance d'isolement locale de la zone dégradée est essentiellement procurée par une relativement faible épaisseur d'isolant sec en surface. Il n'est donc pas nécessaire de chauffer toute l'épaisseur de la couche
25 d'isolant pour détecter la présence d'une zone de baisse d'isolement dans la partie chauffée du bobinage.

L'étape a) peut donc être effectuée relativement rapidement. Ceci permet de gagner beaucoup de temps d'intervention pour localiser un tronçon comportant une zone de baisse d'isolement, puisque l'étape a) doit
30 généralement être réitérée de nombreuses fois à cet effet.

Dans des modes de mise en œuvre préférés du procédé de localisation selon l'invention, on a recours notamment à l'une ou l'autre des

étapes suivantes :

- comparaison entre la mesure obtenue à l'étape b) et une mesure de référence de la même caractéristique électrique obtenue sensiblement à la température ambiante du bobinage, un écart dans ladite
- 5 comparaison étant représentatif de la présence d'une zone dégradée localisée dans ledit sous-ensemble ;
- observation de la corrélation temporelle entre une variation anormale de la caractéristique électrique mesurée et la modification locale de la température de l'isolant, une corrélation temporelle entre la période de
- 10 variation anormale de la caractéristique électrique mesurée et la période de modification de la température étant représentative de la présence d'une zone dégradée localisée dans ledit sous-ensemble ;
- contrôle de la modification locale de la température de l'isolant à l'aide d'un système de mesure de la température de surface de l'isolant relié
- 15 à un système d'analyse pour établir ladite corrélation temporelle ;
- le procédé étant mis en œuvre dans une machine électrique tournante à haute tension dans laquelle le bobinage du stator comprend des parties développantes de barres, l'étape de modification locale de la température est effectuée à l'aide d'un dispositif thermique qui délimite une
- 20 zone de modification de la température dont le contour est adapté à la géométrie de la machine, ladite zone formant un sous-ensemble de tronçons constitué de plusieurs parties développantes de différentes barres ;
- la forme du dispositif thermique est étudiée pour permettre le déplacement du dispositif le long de chaque partie développante de barre en
- 25 gardant le rotor monté dans la machine ;
- la mesure de la caractéristique électrique représentative de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage est effectuée en permanence pendant la modification locale de la température de chaque sous-ensemble ;
- 30 - l'étape a) de modification locale de la température consiste à chauffer ledit sous-ensemble ;
- une fois qu'un tronçon est identifié comme comprenant une

zone dégradée, une nouvelle étape a) est effectuée en refroidissant l'isolant sur ledit tronçon et l'étape b) est mise en œuvre, la mesure obtenue à l'étape b) comparée à une référence étant représentative de l'absence de zone dégradée dans les autres tronçons ;

5 - l'étape a) de modification locale de la température consiste à refroidir ledit sous-ensemble ;

 - ledit sous-ensemble modifié en température est constitué d'au moins deux tronçons, et en cas de présence d'une zone dégradée localisée dans ledit sous-ensemble, ledit sous-ensemble est scindé en au moins deux
10 nouveaux sous-ensembles, et un desdits nouveaux sous-ensembles est sélectionné pour réitérer les étapes a) et b) jusqu'à ce qu'un nouveau sous-ensemble limité à un seul tronçon soit identifié comme comprenant une zone dégradée ;

 - une fois l'étape de modification locale de la température
15 effectuée et avant que la température moyenne de l'isolant dans le sous-ensemble traité soit revenue à la température ambiante du bobinage, ledit dispositif thermique est déplacé pour traiter un sous-ensemble voisin ;

 - la caractéristique électrique représentative de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage est obtenue en appliquant une
20 tension continue entre le conducteur du bobinage et la masse de la machine ;

 - la caractéristique électrique représentative de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage est obtenue en appliquant une
25 tension alternative entre le conducteur du bobinage et la masse de la machine ;

 - le procédé étant mis en œuvre dans une machine électrique tournante à haute tension dans laquelle le bobinage du stator comprend des parties développantes de barres comportant chacune un conducteur recouvert d'une couche d'isolant, au moins une électrode interne étant
30 prévue dans ladite couche d'isolant, après avoir identifié la présence d'une zone dégradée dans une des parties développantes de barres, la modification locale de la température de ladite zone dégradée est maintenue

et le potentiel de l'électrode interne est mesuré pour être comparé à une mesure du potentiel de la même électrode à la température ambiante du bobinage.

5 D'autres caractéristiques et avantages ressortent de la description qui va suivre d'exemples non limitatifs de modes de réalisation, en référence aux figures dans lesquelles :

La figure 1 représente schématiquement une barre développante de stator d'un alternateur à haute tension refroidi par eau, l'isolement du bobinage du stator étant affecté par une zone de baisse d'isolement située
10 sur la barre.

La figure 2 représente schématiquement une modélisation de l'isolement entre le bobinage et la masse d'une machine électrique bobinée, une zone de baisse d'isolement étant présente sur le bobinage.

La figure 3 représente schématiquement un dispositif de test pour
15 la mise en œuvre du procédé selon l'invention afin de localiser une zone de baisse d'isolement sur un tronçon d'une barre de stator, la barre étant vue en perspective.

Les figures 4a et 4b représentent l'évolution dans le temps de la résistance d'isolement global du bobinage, en corrélation avec l'évolution de
20 la température moyenne de l'isolant, lorsque au moins une barre développante de stator comportant une zone de baisse d'isolement est chauffée quelques minutes après l'application d'une tension continue sur le bobinage.

La figure 5 représente schématiquement le test en température
25 de tronçons d'une barre développante en défaut identifiée par les mesures de la figure 4, la barre étant vue en coupe longitudinale.

La figure 6 représente deux courbes de la mesure en fonction du temps de la résistance d'isolement global du bobinage, obtenues respectivement sans chauffage et avec le test en température en rapport
30 avec la figure 5.

Sur la figure 1, une barre développante 1 du stator d'un alternateur à haute tension refroidi par eau s'étend entre la masse

magnétique 5 du stator et la boîte à eau 6 qui communique avec le conducteur 3 pour la circulation du liquide de refroidissement. Comme représenté sur la figure 3, le conducteur 3 est formé par un faisceau de brins conducteurs 30 par exemple en cuivre, une certaine proportion des brins transportant le liquide de refroidissement. La boîte à eau 6 est raccordée électriquement et de façon étanche au conducteur 3 par une brasure 13, et communique avec une canalisation 9 isolante pour amener ou évacuer le liquide de refroidissement depuis ou vers un échangeur de chaleur. La circulation du liquide de refroidissement s'effectue uniquement en exploitation. Lors des opérations de révision et de maintenance, le circuit de refroidissement est purgé, et le rotor est généralement extrait pour permettre au personnel de maintenance d'opérer à l'intérieur de la machine.

Le raccordement électrique entre la barre développante et une autre barre développante non représentée s'effectue par des lamelles métalliques 7 électriquement reliées à la boîte à eau et reliées par des brasures 8 aux lamelles métalliques d'une autre la boîte à eau. La barre développante 1 comprend une couche d'isolant 4 recouvrant les parties électriquement conductrices. Le matériau isolant est typiquement un diélectrique, par exemple composé d'un stratifié de tissus de fibres de verre recouverts de poudre de mica et liés par de la résine époxy. Au voisinage de la masse magnétique 5, la surface de la couche d'isolant est typiquement recouverte par un verni semi-conducteur ou encore un grillage métallique à fines mailles électriquement relié à la masse de la machine.

En exploitation, les vibrations mécaniques d'origine électromagnétique subies par la barre développante peuvent provoquer des fissures au niveau de la brasure 13 raccordant le conducteur 3 à la boîte à eau 6. Une fuite de liquide s'échappant par les fissures de la brasure 13 progresse le long de l'interface entre le conducteur 3 et la couche d'isolant 4 et ne s'étend généralement pas au-delà de la région coudée où la partie développante de la barre est prolongée par une partie de barre droite rentrant dans la masse magnétique du stator. Comme représenté schématiquement sur la figure 5, la contamination de l'isolant par le liquide

reste généralement localisée dans la partie développante de la barre, et peut générer au moins une zone dégradée 2 de l'isolant se traduisant par une baisse locale de l'isolement.

Lors d'une opération de révision de la machine, la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage est mesurée et une intervention de maintenance est décidée si la valeur mesurée est trop faible. Les opérations de révision et de maintenance s'effectuent après avoir purgé le circuit de refroidissement des barres du stator. Il est généralement impossible de déterminer visuellement la ou les barres développantes du stator qui comportent une zone de baisse d'isolement.

Pour la mise en œuvre du procédé de localisation d'une zone de baisse d'isolement selon l'invention, une zone de modification de la température n'est pas nécessairement une succession de tronçons tels que sur la figure 1 juxtaposés dans le sens du bobinage électrique, mais peut être une zone dont le contour est adapté à la géométrie de la machine et qui contient plusieurs parties développantes 1 de différentes barres. Un sous-ensemble constitué d'au moins un tronçon peut donc comprendre des tronçons de différentes barres développantes 1. Il est ainsi possible de procéder par dichotomie à partir de la totalité des barres développantes 1 du stator pour isoler la ou les barres développantes comportant une zone de baisse d'isolement. Ensuite, il peut être avantageux de localiser précisément la zone en cause sur la barre développante 1 défectueuse. Pour ceci, la barre développante est virtuellement découpée en plusieurs tronçons Sk, comme représentés sur la figure 1, qui vont chacun être modifiés en température.

La modification en température d'un tronçon Sk consiste à chauffer la surface de l'isolant 4 uniquement sur ce tronçon et dans la mesure du possible sur toute la périphérie de la barre, afin que toutes les surfaces latérales du tronçon soient traitées soit simultanément soit successivement. Le dispositif de chauffage consiste par exemple en une lampe à rayonnement infrarouge 10, ou encore en une buse soufflant un gaz chaud. En rapport avec la figure 1, la lampe à infrarouge 10 est déplacée autour du

tronçon S1 pour augmenter substantiellement la température de la surface extérieure de l'isolant 4 par rapport à la température de la surface extérieure de l'isolant sur les autres tronçons S2 à S5 de la barre développante.

Pendant la montée en température du tronçon S1, la mesure d'une
5 caractéristique électrique représentative de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage est effectuée comme expliqué plus loin. Si la mesure de la caractéristique électrique ne traduit pas la présence d'une zone dégradée de l'isolant 4 dans le tronçon S1, la lampe à infrarouge 10 est déplacée pour aller chauffer l'isolant du tronçon voisin S2, et la mesure de la
10 même caractéristique électrique est poursuivie. Il est prévu de déplacer le dispositif de chauffage 10 le long de la direction X de la barre développante jusqu'à ce que la mesure de la caractéristique électrique traduise la présence d'une zone dégradée dans un tronçon Sk. D'autres modes de déplacement sont possibles selon les conditions d'accessibilité du fait notamment de
15 pièces de calage de la barre développante.

Un dispositif de chauffage, et plus généralement un dispositif de modification thermique pour chauffer ou refroidir l'isolant du bobinage, pourra avoir une forme étudiée pour permettre son déplacement le long de chaque partie développante de barre en gardant le rotor monté dans la
20 machine.

Sur la figure 2, l'isolement de l'ensemble du bobinage par rapport à la masse est modélisé par un ensemble de résistances raccordées en parallèle aux bornes A et B de la machine. En effet, du point de vue de l'isolement par rapport à la masse, chaque barre de stator peut être considérée comme une
25 résistance en parallèle avec la résistance des autres barres. Lorsqu'une insuffisance de l'isolement global est constatée par une mesure classique de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage, la valeur R_T de l'isolement global est conditionnée par la résistance d'isolement R_D au niveau d'une faiblesse de l'isolement si cette faiblesse reste localisée, c'est-
30 à-dire si le reste du bobinage est sain.

En conséquence, toute variation substantielle de la résistance R_D de la zone de baisse d'isolement va avoir une répercussion importante sur

l'isolement global du bobinage, alors qu'une variation de la résistance d'isolement $R_1, R_2, \dots R_i$ d'une partie saine du bobinage ne va quasiment pas avoir de répercussion. Par ailleurs, la résistance d'isolement d'un matériau diélectrique est influencée par la température ; par exemple elle est typiquement divisée par 2 lorsque la température s'élève de 10°C. Ainsi, le chauffage d'une zone de baisse d'isolement du bobinage a un effet sur la mesure de la résistance de l'isolement global.

Pour illustrer quantitativement le phénomène, on considère par exemple que l'isolement d'un bobinage peut être modélisé par trente résistances $R_1, R_2, \dots, R_i$ de 100 Gohms (Giga ohms) en parallèle, ce qui équivaut à une résistance R_T de 3,3 Gohms. Si l'isolement du bobinage présente une faiblesse locale se traduisant par la valeur d'une des résistances divisée par 10, c'est-à-dire $R_D = 10$ Gohms, la résistance équivalente R_T est abaissée à 2,6 Gohms. Lorsqu'on augmente la température d'une des résistances de 100 Gohms de 20°C en moyenne, sa valeur chute à environ 25 Gohms et la résistance R_T de l'isolement global du bobinage passe à 2,4 Gohms, ce qui n'est pas très différent des 2,6 Gohms précédant le chauffage. Par contre, lorsque la température de la zone de baisse d'isolement est augmentée de 20°C en moyenne, la valeur de R_D est divisée par 4, c'est-à-dire passe à 2,5 Gohms, et la résistance R_T de l'isolement global du bobinage passe à 1,4 Gohms.

Ainsi, lorsqu'on chauffe successivement plusieurs tronçons du bobinage tout en effectuant la mesure de la résistance R_T de l'isolement global du bobinage, le chauffage d'une zone de baisse d'isolement se traduit par une baisse très nette de la valeur mesurée.

Sur la figure 3, un tronçon d'une barre de stator à tester est représenté partiellement en perspective. Pour localiser une zone de baisse d'isolement sur la barre, la mise en œuvre du procédé selon l'invention nécessite un dispositif de test de la réponse en température du tronçon, le test s'effectuant par la mesure d'une caractéristique électrique représentative de la résistance R_T d'isolement de l'ensemble du bobinage pendant la modification locale en température. Pour procéder au test, une tension

continue ou alternative de quelques centaines de volts à quelques kV est appliquée entre le bobinage 3 et la masse de la machine, en reliant un générateur de tension aux bornes de la machine.

5 Avec une tension continue appliquée, la caractéristique électrique adoptée est préférablement la résistance d'isolement mesurée en fonction du temps et/ou le courant mesuré en fonction du temps. Avec une tension alternative appliquée, la caractéristique électrique adoptée consiste par exemple en la mesure des variations en fonction du temps de l'impédance complexe ou de l'admittance complexe ou encore de l'amplitude et de la
10 phase du courant.

Le dispositif de test représenté sur la figure 3 utilise un générateur 21 produisant une tension continue V_0 par exemple de l'ordre d'un kV entre le conducteur 3 et la masse. Si un ohmmètre est utilisé pour mesurer la résistance d'isolement, seul ou éventuellement associé à un ampèremètre, il
15 doit pouvoir afficher des valeurs de résistance de plusieurs Gohms et préférablement jusqu'à quelques Tohms (Tera ohms).

Un dispositif de chauffage 10 tel qu'une lampe à infrarouge est prévu pour chauffer sélectivement chaque tronçon S1 ou S2 sur la face 15 de la barre. La durée de chauffage de la surface extérieure de la couche d'isolant
20 4 peut être relativement courte, par exemple de l'ordre d'une à quelques minutes. En effet, la résistance d'isolement du bobinage est conditionnée seulement par une petite partie de l'épaisseur de la couche d'isolant sur la zone de faiblesse, et il suffit donc de chauffer une relativement faible épaisseur d'isolant sur la zone de faiblesse pour
25 influencer notablement la résistance d'isolement. Avantageusement, le chauffage est arrêté lorsqu'on détecte que l'augmentation de la température de surface de l'isolant est supérieure à un seuil déterminé. La mesure de la température de surface peut être réalisée par un simple thermocouple ou par une caméra à infrarouge, ou encore par toute autre technique de l'état de
30 l'art.

Des déflecteurs non représentés peuvent être prévus pour focaliser l'apport de chaleur uniquement sur le tronçon sélectionné et éviter une

augmentation substantielle de la température moyenne du tronçon voisin. Des parois métallisées référencées 11 sur la figure 5 peuvent constituer des déflecteurs de rayonnement. Une glissière de guidage 12 est représentée pour matérialiser la direction X de déplacement de la lampe 10, mais en pratique l'espace autour d'une barre de stator est généralement assez limité et le dispositif de chauffage sera le plus souvent guidé manuellement par le personnel de maintenance. Pour chauffer un tronçon sur toutes ses faces latérales 15, 16..., avec un unique dispositif tel qu'une lampe à infrarouges ou un appareil à soufflage d'air chaud de type « sèche cheveux », un opérateur déplacera le dispositif chauffant en faisant le tour du tronçon si l'espace le permet.

On peut prévoir divers dispositifs de chauffage, typiquement par conduction, rayonnement ou convection. Par exemple, il est possible d'installer autour d'une barre développante une couverture chauffante prenant la forme d'un manchon et prévue pour chauffer simultanément toutes les faces de la barre sur au moins un tronçon, voire sur l'intégralité de la barre développante. Il peut être avantageux d'utiliser successivement des dispositifs de chauffage différents en fonction de l'avancement de la localisation d'une zone dégradée de l'isolant. Par exemple, il est possible d'utiliser une ou plusieurs couvertures chauffantes pour chauffer simultanément l'intégralité d'une ou plusieurs barres développantes.

Si la mesure électrique effectuée ne traduit pas la présence d'une zone dégradée dans la ou les barres développantes chauffées, le chauffage est déplacé pour effectuer le test de réponse en température sur le restant des tronçons à risque du bobinage. Il peut être avantageux de procéder par dichotomie avec des couvertures chauffantes ou un dispositif analogue pouvant chauffer simultanément une grande surface, jusqu'à identifier une barre développante comportant une zone dégradée, puis d'effectuer le test de réponse en température de la barre en cause avec un dispositif de chauffage plus petit comme une lampe à infrarouges jusqu'à identifier la partie de la barre responsable de la faiblesse de l'isolement.

Sur la figure 4a, la résistance R_T d'isolement global du bobinage est

mesurée par exemple à intervalles de trente secondes à compter de l'application d'une tension continue sur le bobinage. Pendant une période T_1 allant jusqu'à dix minutes sur l'échelle de temps, le bobinage reste à la température ambiante d'environ 25°C comme représenté sur la figure 4b, et
5 les valeurs mesurées de la résistance R_T croissent régulièrement. Au bout de dix minutes, l'isolant d'une partie du bobinage telle qu'une ou plusieurs barres développantes est chauffé en surface pendant trois minutes. On observe que l'évolution dans le temps de la température moyenne θ en surface de l'isolant lors du chauffage est corrélée avec une évolution
10 anormale des valeurs mesurées de la résistance R_T .

En effet, pendant le chauffage, les valeurs mesurées de R_T décroissent, ce qui fait apparaître une nette cassure dans l'évolution de la courbe de la figure 4a par rapport à une courbe de référence formée par le prolongement de la partie de courbe obtenue avant le chauffage. Une fois le
15 chauffage arrêté, les valeurs mesurées de R_T croissent à nouveau jusqu'à reprendre une évolution normale, après une période T_{2R} correspondant à la période $T_{2\theta}$ pendant laquelle la température moyenne θ dépasse substantiellement la température ambiante. Avantageusement, un système de mesure de la température θ , par exemple une caméra thermographique,
20 peut être relié à un système d'analyse tel qu'un micro-ordinateur qui enregistre les valeurs mesurées de R_T et de θ pour établir automatiquement s'il y a une corrélation temporelle entre une variation anormale dans l'évolution de la courbe de résistance et l'augmentation contrôlée de la température.

25 Une évolution anormale des valeurs mesurées de la résistance R_T , en l'occurrence pendant la période T_{2R} , est représentative en soi d'une très forte présomption de la présence d'une zone de baisse d'isolement localisée dans la partie chauffée du bobinage. La vérification de la corrélation temporelle entre la période T_{2R} d'évolution anormale de R_T et la période $T_{2\theta}$ de
30 modification en température de la partie chauffée du bobinage apporte une confirmation pour s'assurer que la décroissance des valeurs mesurées de R_T n'a pas d'autre cause que le chauffage et signifie donc effectivement la

présence d'une zone de baisse d'isolement.

Sur la figure 5, la barre développante testée est vue en coupe longitudinale tronquée, seul le côté comprenant la zone dégradée 2 de l'isolant étant représenté. La contamination de l'isolant par le liquide de refroidissement est représentée schématiquement par des traits pointillés. Cette contamination ne provoque pas de faiblesse de l'isolement sur les tronçons autres que S2, car l'épaisseur d'isolant sec reste suffisante pour ne pas affecter la valeur R_T de l'isolement global du bobinage. Une modification de la température de l'isolant sur un tronçon autre que S2 n'aura donc pas de répercussion notable sur l'isolement global du bobinage.

Par contre, seule une fine couche d'isolant sec typiquement de l'ordre de 1 mm sépare l'isolant dégradé de la surface extérieure de la barre sur le tronçon S2. Cette fine couche conditionne la valeur R_D de la résistance de la zone de baisse d'isolement, puisque la résistance de l'isolant qui est dégradé en dessous est nettement inférieure à la valeur R_D . En conséquence des propriétés expliquées en rapport avec la figure 2, une augmentation substantielle de la température de la surface extérieure de l'isolant 4 à l'endroit de la zone dégradée 2 va provoquer une baisse importante de la valeur R_T de l'isolement global du bobinage, ceci même si une autre zone dégradée de l'isolant est présente sur un autre tronçon du bobinage.

Le parcours de l'appareil de chauffage 10 pour le test en température des tronçons d'une barre développante de stator peut être initié sur le tronçon S1 le plus proche de la masse magnétique 5. Lorsque le tronçon chauffé correspond à un tronçon unique ou à un des tronçons comportant une zone dégradée 2, l'évolution de la valeur mesurée R_T de l'isolement global ou de la valeur mesurée du courant présente rapidement une nette différence par rapport à l'évolution de la même mesure électrique sur un tronçon sain chauffé dans les mêmes conditions. Comme commenté plus loin en rapport avec la figure 5, la valeur mesurée R_T décroît rapidement avec l'élévation de la température moyenne du tronçon en cause. De la même façon, la courbe de l'évolution de la valeur mesurée du courant (non représentée) présentera une nette inflexion.

Après un laps de temps déterminé à compter du commencement du chauffage d'un tronçon, si l'évolution de la caractéristique électrique mesurée n'est pas représentative de la présence d'une zone dégradée, l'appareil de chauffage 10 est déplacé pour chauffer le tronçon consécutif prévu. La

5 mesure de la caractéristique électrique est poursuivie, jusqu'à ce que la réponse en température d'un tronçon traduise la présence d'une zone dégradée. Si aucun tronçon d'une barre développante ne fournit une réponse en température représentative de la présence d'une zone dégradée, l'isolant des bornes d'alimentation situées aux extrémités du bobinage est

10 susceptible d'être la cause de la faiblesse de l'isolement et on procédera pour ces bornes à un test analogue de réponse en température.

Lorsque la présence d'une zone dégradée est détectée dans un tronçon suite à un chauffage du tronçon, il n'est pas certain que le tronçon soit la seule partie responsable de la faiblesse de l'isolement du bobinage.

15 Une façon de détecter la présence d'une seconde zone dégradée dans un autre tronçon consiste à poursuivre le test de réponse en température pour tous les tronçons qui n'ont pas encore été testés, mais ceci grève la durée du diagnostic complet du bobinage. Une autre façon de procéder consisterait à réparer le tronçon comportant la zone dégradée puis à refaire une mesure de

20 la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage pour vérifier si la valeur mesurée est remontée à un niveau d'isolement acceptable. Toutefois, si la valeur mesurée est à nouveau trop basse, il est nécessaire de rappeler le personnel effectuant les tests de réponse en température du bobinage pour localiser la ou les autres parties du bobinage responsables de la faiblesse de

25 l'isolement.

Une méthode avantageuse pour gagner du temps dans le diagnostic complet du bobinage, tout en permettant une seule intervention du personnel effectuant les tests, consiste à modifier à nouveau la température du dernier tronçon chauffé, c'est-à-dire le tronçon comportant la zone dégradée, en

30 diminuant substantiellement la température moyenne de l'isolant de ce tronçon par rapport à la température ambiante du restant du bobinage. En conséquence des propriétés expliquées en rapport avec la figure 2, une

diminution substantielle de la température de la surface extérieure de l'isolant 4 à l'endroit de la zone dégradée 2 provoque une augmentation significative de la valeur R_T de l'isolement global du bobinage seulement en l'absence de zone dégradée dans les autres tronçons du bobinage.

5 En utilisant par exemple des jets d'un gaz froid tel que produit à partir d'air liquide pour refroidir par conduction le dernier tronçon chauffé, il est possible de diminuer d'au moins 20°C la température moyenne de la fine couche d'isolant sec du tronçon par rapport à la température ambiante du restant du bobinage. Typiquement, la valeur R_D de la résistance d'isolement
10 du tronçon en cause est alors multipliée au moins par 4. L'augmentation de la valeur R_T de l'isolement global du bobinage qui en résulte est détectée, préférablement en poursuivant la mesure de la caractéristique électrique utilisée pour la mise en œuvre des étapes précédentes du procédé.

Si par contre il existe au moins une autre zone dégradée dans les
15 autres tronçons du bobinage, c'est-à-dire s'il n'est pas constaté une augmentation significative de la valeur R_T suite au refroidissement, le procédé de localisation selon l'invention est à nouveau mis en œuvre en effectuant une modification locale de la température par chauffage des tronçons à risque qui n'ont pas encore été testés. Une fois qu'une seconde
20 zone dégradée a été localisée, il est avantageux de procéder au refroidissement local simultané des deux tronçons comportant respectivement les deux zones dégradées identifiées, afin de déterminer de la même façon s'il existe une autre zone dégradée dans les tronçons à risque qui n'ont pas été testés.

25 Le procédé de localisation selon l'invention sera le plus souvent mis en œuvre en effectuant la modification locale en température essentiellement par des opérations de chauffage, une éventuelle opération de refroidissement d'un tronçon étant effectuée uniquement pour déterminer si l'isolement des parties non testées du bobinage est sain.

30 Toutefois, en particulier s'il y a une présomption de la présence d'une unique zone de baisse d'isolement sur l'ensemble du bobinage, il est possible de prévoir uniquement des opérations de refroidissement pour

tester la réponse en température des tronçons à risque de baisse d'isolement du bobinage. Les tronçons doivent être testés jusqu'à ce que la mesure de la caractéristique électrique choisie indique une augmentation de la valeur R_T de l'isolement global, c'est-à-dire traduise la présence de la zone de baisse d'isolement sur le tronçon en cours de test.

Sur la figure 6, deux courbes C_{Ref} et C_{Mes} représentent les mesures en fonction du temps de la résistance d'isolement R_T de l'ensemble du bobinage du stator, obtenues respectivement lors d'un premier test sans chauffer le bobinage et lors d'un second test en chauffant localement le bobinage sur plusieurs tronçons successifs. Un troisième test, complémentaire du second test, peut être effectué en refroidissant le tronçon dans lequel une zone de baisse d'isolement a été identifiée, ce qui donne une nouvelle variation $C_{Mes \theta}$ de la courbe C_{Mes} .

Pour obtenir la courbe de référence C_{Ref} , une tension continue V_0 est appliquée au bobinage du stator à une température ambiante et à un instant t_0 . L'évolution de la résistance d'isolement R_T mesurée s'explique par l'évolution du courant i_p de polarisation généré entre la surface extérieure et la surface intérieure de l'isolant, puisque $R_T = V_0 / i_p$. Le courant i_p chute rapidement selon une forme décroissante linéaire dans des échelles $\log(i)/\log(t)$ pour tendre vers une valeur stable très faible représentative de la conduction.

Pour illustrer la comparaison entre les deux courbes, ces dernières ont été représentées avec pour point de départ en abscisse un même instant t_0 , mais il est entendu que pour obtenir la courbe C_{Mes} , la même tension continue V_0 est appliquée au bobinage du stator après l'obtention de la courbe C_{Ref} . Par ailleurs, d'un point de vue pratique, il n'est pas indispensable de mesurer préalablement les valeurs de la courbe de référence C_{Ref} . En effet, comme expliqué en rapport avec les courbes des figures 4a et 4b, l'analyse des variations dans le temps de la résistance d'isolement R_T en corrélation avec la température de l'isolant lors de chauffages successifs est relativement aisée et peut suffire pour repérer une variation anormale représentative de la présence d'une zone dégradée dans

la zone chauffée. Néanmoins, le diagnostic peut être consolidé par la constitution d'une banque de données de courbes de référence C_{Ref} .

La mesure de la résistance d'isolement R_T est effectuée en permanence, ou à intervalles de temps réguliers, pendant que les tronçons
5 S1 à S5 (Cf. FIG.5) sont chauffés successivement lors des périodes de chauffage respectivement T1 à T5, alors que le restant du bobinage est à la température ambiante. On observe qu'au chauffage du tronçon S1 pendant la période T1, les valeurs mesurées de la résistance d'isolement R_T diminuent très peu par rapport aux valeurs correspondantes dans le temps
10 sur la courbe de référence C_{Ref} . Par contre, dès le commencement de la période T2 de chauffage du tronçon S2, les valeurs mesurées de R_T chutent brusquement, ce qui traduit la présence d'une zone dégradée 2, c'est-à-dire une zone de baisse d'isolement. A la fin de la période T2, le chauffage du tronçon S2 est arrêté et les valeurs mesurées de R_T remontent rapidement.
15 Ensuite, lors du chauffage successif des tronçons S3 à S5, les valeurs mesurées de R_T continuent d'augmenter, ce qui traduit le fait qu'il n'y a pas de zone de baisse d'isolement dans ces tronçons.

Si le tronçon S2 est chauffé à nouveau pendant une période T6, les valeurs mesurées de R_T baissent à nouveau, par exemple comme
20 représenté sur la partie de courbe $C_{Mes \theta+}$, ce qui confirme la présence d'une zone de baisse d'isolement dans S2. Pour déterminer si la barre développante testée est la seule partie du bobinage à comporter une zone de baisse d'isolement, une étape supplémentaire avantageuse du procédé consiste à refroidir le tronçon ayant été identifié comme défectueux, en
25 l'occurrence S2, sur une période déterminée, par exemple T6. Dans l'exemple représenté sur la partie de courbe $C_{Mes \theta-}$, l'évolution des valeurs mesurées de R_T traduit une nette accentuation à la hausse pendant période T6, ce qui signifie que le tronçon S2 est le seul tronçon de l'ensemble du bobinage à comporter une zone de baisse d'isolement.

30 Le procédé décrit dans ce qui précède trouve une application particulièrement avantageuse pour localiser une zone dégradée d'une couche d'isolant dans une machine électrique bobinée à haute tension dont

le bobinage est refroidi par la circulation d'un liquide, une dégradation de l'isolant avec une baisse d'isolement consécutive étant généralement causée par une fuite du liquide de refroidissement ayant diffusé depuis le cœur de l'isolant vers sa surface.

5 Dans ce contexte, le procédé peut aussi être mis en œuvre dans une machine électrique tournante à haute tension dans laquelle au moins une électrode interne est prévue dans la couche d'isolant des parties développantes de barres, selon la technologie décrite dans EP 1 503 218 A1. Après avoir identifié grâce au procédé la présence d'une zone dégradée
10 dans une des parties développantes de barres, la modification locale de la température de la zone dégradée, en particulier par chauffage, peut être maintenue pour effectuer une mesure « en température » du potentiel de l'électrode interne. Il peut être intéressant de comparer la mesure en température à une mesure du potentiel de la même électrode à la
15 température ambiante du bobinage.

Par ailleurs, l'application du procédé n'est pas limitée aux machines électriques tournantes à haute tension. Le procédé pourra par exemple être appliqué dans un transformateur à haute tension dont le bobinage est entouré par un isolant, l'isolant étant susceptible d'être contaminé localement
20 par le dépôt d'un élément conducteur dont la conduction électrique est sensible à la température.

Un tel transformateur peut comporter un isolant à base de papier imprégné d'huile, présentant un risque de dépôt d'un élément conducteur formé de sulfure de cuivre. Un autre type de transformateur dit
25 «transformateur sec» comporte un isolant solide, par exemple un composite à base de résine époxy, et une dégradation interne de l'isolant peut produire un composé chimique conducteur sensible à la température.

Revendications

1/ Procédé de localisation d'une zone dégradée (2) dans un isolant (4) recouvrant un conducteur (3) d'un bobinage électrique, le bobinage comportant un ensemble de tronçons à risque de baisse d'isolement, chaque
5 tronçon à risque ($S_1, \dots, S_n$) étant susceptible d'être sujet à une dégradation locale de l'isolant se caractérisant par une résistance d'isolement (R_D) inférieure à la résistance d'isolement ($R_1, \dots, R_i$) d'un tronçon sain,
le procédé consistant à effectuer les étapes suivantes :

10 a) Modification locale, par rapport à la température ambiante du bobinage, de la température de l'isolant (4) d'un sous-ensemble constitué d'au moins un tronçon (S_k) sélectionné parmi l'ensemble des tronçons à risque ($S_1, \dots, S_n$);

15 b) Mesure d'une caractéristique électrique (C_{Mes}) représentative de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage (R_T) pendant ladite modification locale de la température dudit sous-ensemble (S_k);

la mesure obtenue à l'étape b) (C_{Mes}), comparée à une référence, étant représentative de la présence d'une zone dégradée (2) localisée dans ledit sous-ensemble (S_k).

20 2/ Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte en outre une étape de comparaison entre la mesure obtenue à l'étape b) (C_{Mes}) et une mesure de référence (C_{Ref}) de la même caractéristique électrique obtenue sensiblement à la température ambiante du bobinage, un écart dans ladite comparaison étant représentatif de la présence d'une zone
25 dégradée (2) localisée dans ledit sous-ensemble (S_k).

3/ Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte en outre une étape d'observation de la corrélation temporelle entre une variation anormale de la caractéristique électrique mesurée (C_{Mes}) et la modification locale de la température de l'isolant (4), une corrélation
30 temporelle entre la période (T_{2R}) de variation anormale de la caractéristique

électrique mesurée et la période ($T_{2\theta}$) de modification de la température étant représentative de la présence d'une zone dégradée (2) localisée dans ledit sous-ensemble (S_k).

4/ Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la
5 modification locale de la température de l'isolant (4) est contrôlée à l'aide d'un système de mesure de la température de surface de l'isolant relié à un système d'analyse pour établir ladite corrélation temporelle.

5/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, mis en œuvre dans une machine électrique tournante à haute tension dans laquelle
10 le bobinage du stator comprend des parties développantes (1) de barres, caractérisé en ce que l'étape de modification locale de la température est effectuée à l'aide d'un dispositif thermique qui délimite une zone de modification de la température dont le contour est adapté à la géométrie de la machine, ladite zone formant un sous-ensemble de tronçons constitué de
15 plusieurs parties développantes (1) de différentes barres.

6/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la mesure de la caractéristique électrique (C_{Mes}) représentative de la résistance d'isolement de l'ensemble du bobinage (R_T) est effectuée en permanence pendant la modification locale de la
20 température de chaque sous-ensemble (S_k).

7/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que l'étape a) de modification locale de la température consiste à chauffer ledit sous-ensemble (S_k).

8/ Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'une fois
25 qu'un tronçon (S_2) est identifié comme comprenant une zone dégradée (2), une nouvelle étape a) est effectuée en refroidissant l'isolant (4) sur ledit tronçon (S_2) et l'étape b) est mise en œuvre, la mesure obtenue à l'étape b) comparée à une référence étant représentative de l'absence de zone dégradée (2) dans les autres tronçons ($S_1, S_3, \dots, S_n$).

9/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que l'étape a) de modification locale de la température

30

consiste à refroidir ledit sous-ensemble (Sk).

10/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que ledit sous-ensemble modifié en température est constitué d'au moins deux tronçons, et en ce qu'en cas de présence d'une
5 zone dégradée (2) localisée dans ledit sous-ensemble, ledit sous-ensemble est scindé en au moins deux nouveaux sous-ensembles, et un desdits nouveaux sous-ensembles est sélectionné pour réitérer les étapes a) et b) jusqu'à ce qu'un nouveau sous-ensemble limité à un seul tronçon (S2) soit identifié comme comprenant une zone dégradée (2).

10 11/ Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'une fois l'étape de modification locale de la température effectuée et avant que la température moyenne de l'isolant (4) dans le sous-ensemble traité soit revenue à la température ambiante du bobinage, ledit dispositif thermique est déplacé pour traiter un sous-ensemble voisin.

15 12/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que la caractéristique électrique (C_{Mes} , C_{Ref}) représentative de la résistance d'isolement (R_T) de l'ensemble du bobinage est obtenue en appliquant une tension continue (V_0) entre le conducteur (3) du bobinage et la masse de la machine.

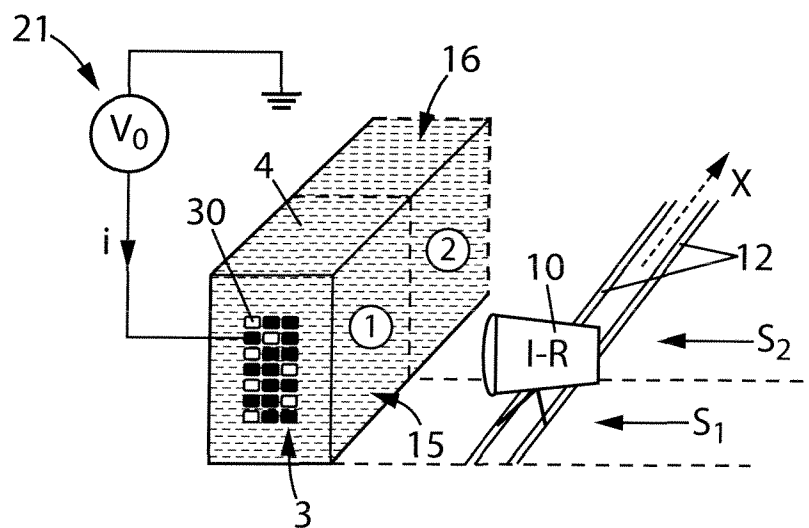
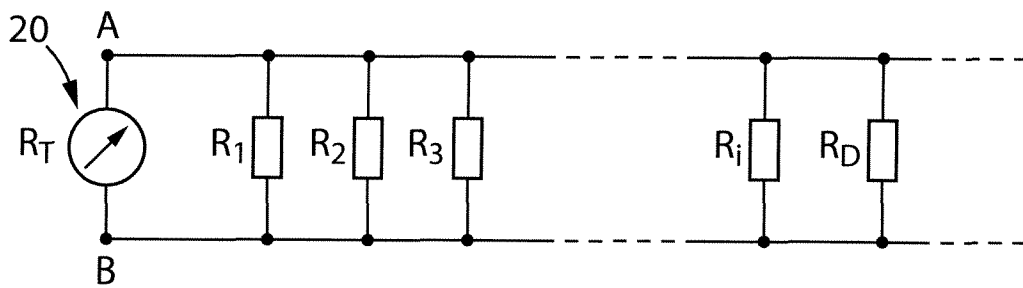
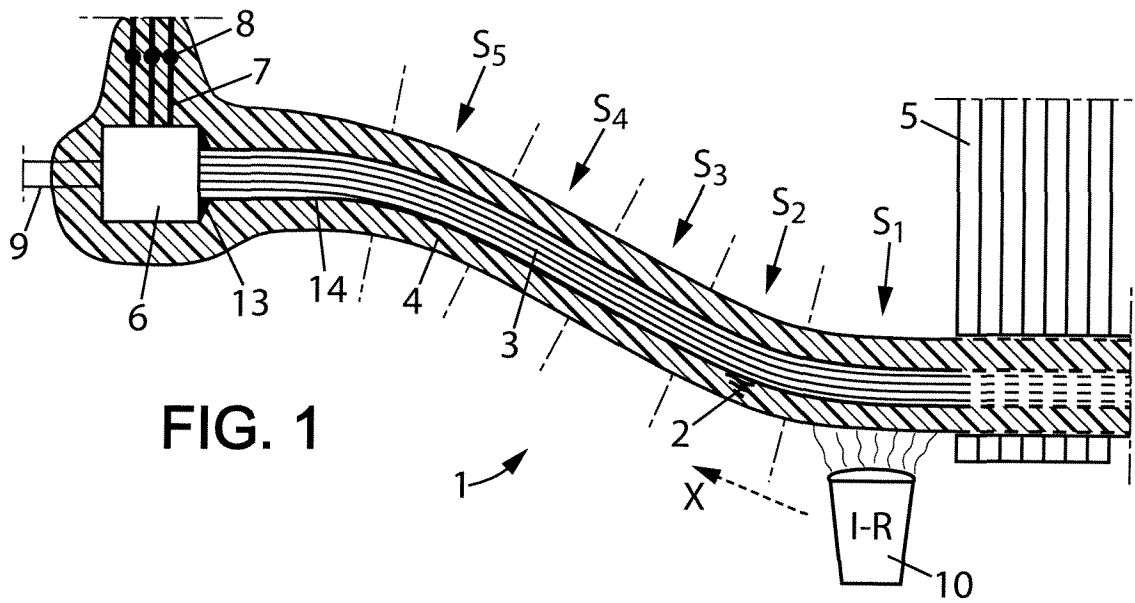
20 13/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que la caractéristique électrique (C_{Mes} , C_{Ref}) représentative de la résistance d'isolement (R_T) de l'ensemble du bobinage est obtenue en appliquant une tension alternative entre le conducteur (3) du bobinage et la masse de la machine.

25 14/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, mis en œuvre dans une machine électrique tournante à haute tension dans laquelle le bobinage du stator comprend des parties développantes (1) de barres, caractérisé en ce que l'étape a) de modification locale de la température est effectuée à l'aide d'un dispositif de modification thermique dont la forme est
30 étudiée pour permettre le déplacement du dispositif le long de chaque partie développante (1) de barre en gardant le rotor monté dans la machine.

15/ Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, mis en œuvre dans une machine électrique tournante à haute tension dans laquelle le bobinage du stator comprend des parties développantes (1) de barres comportant chacune un conducteur (3) recouvert d'une couche d'isolant (4), au moins une électrode interne étant prévue dans ladite couche d'isolant, caractérisé en ce qu'après avoir identifié la présence d'une zone dégradée (2) dans une des parties développantes (1) de barres, la modification locale de la température de ladite zone dégradée (2) est maintenue et le potentiel de l'électrode interne est mesuré pour être comparé à une mesure du potentiel de la même électrode à la température ambiante du bobinage.

16/ Application du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 15 dans une machine électrique bobinée à haute tension dont le bobinage est refroidi par la circulation d'un liquide, pour localiser une zone dégradée (2) d'une couche d'isolant (4), la cause de la dégradation de l'isolant étant une fuite du liquide de refroidissement ayant diffusé depuis le cœur de l'isolant vers sa surface.

17/ Application du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 13 dans un transformateur à haute tension dont le bobinage est entouré par un isolant, l'isolant étant susceptible d'être contaminé localement par le dépôt d'un élément conducteur dont la conduction électrique est sensible à la température.



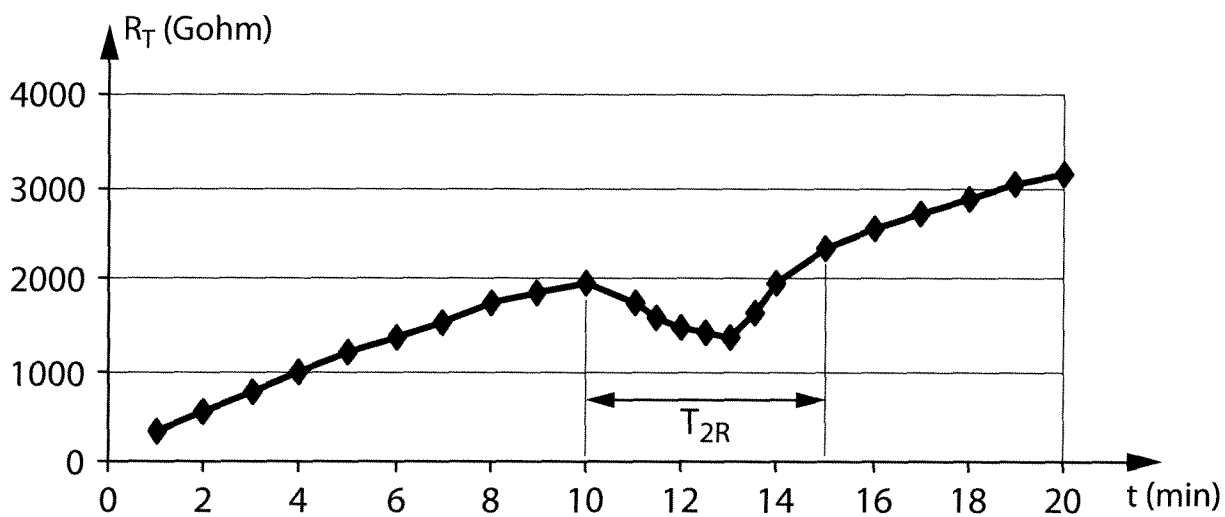


FIG. 4a

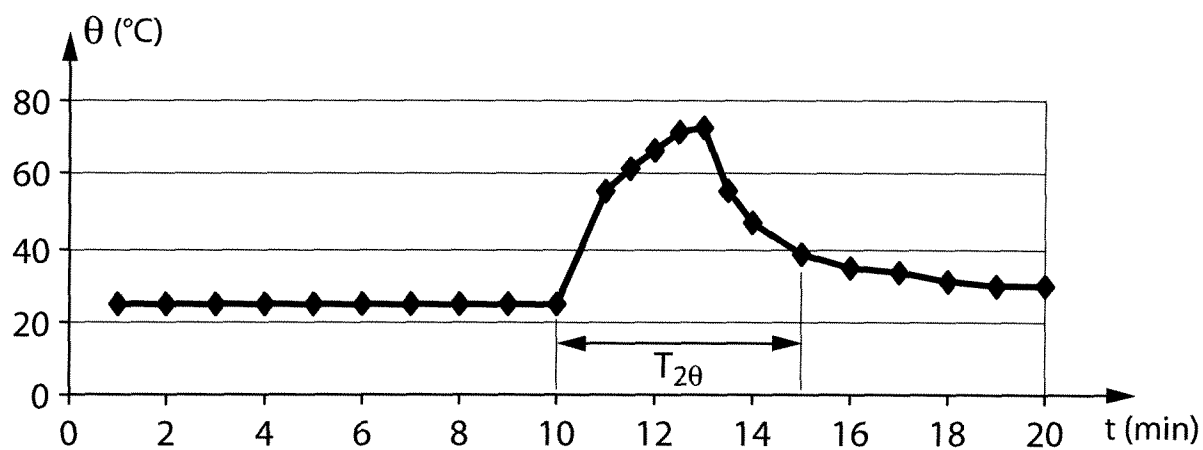


FIG. 4b

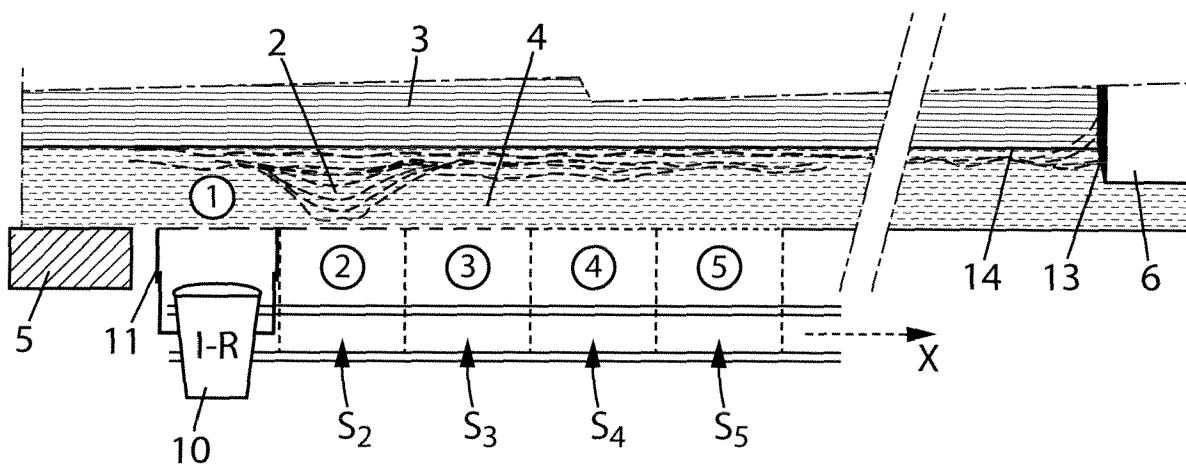


FIG. 5

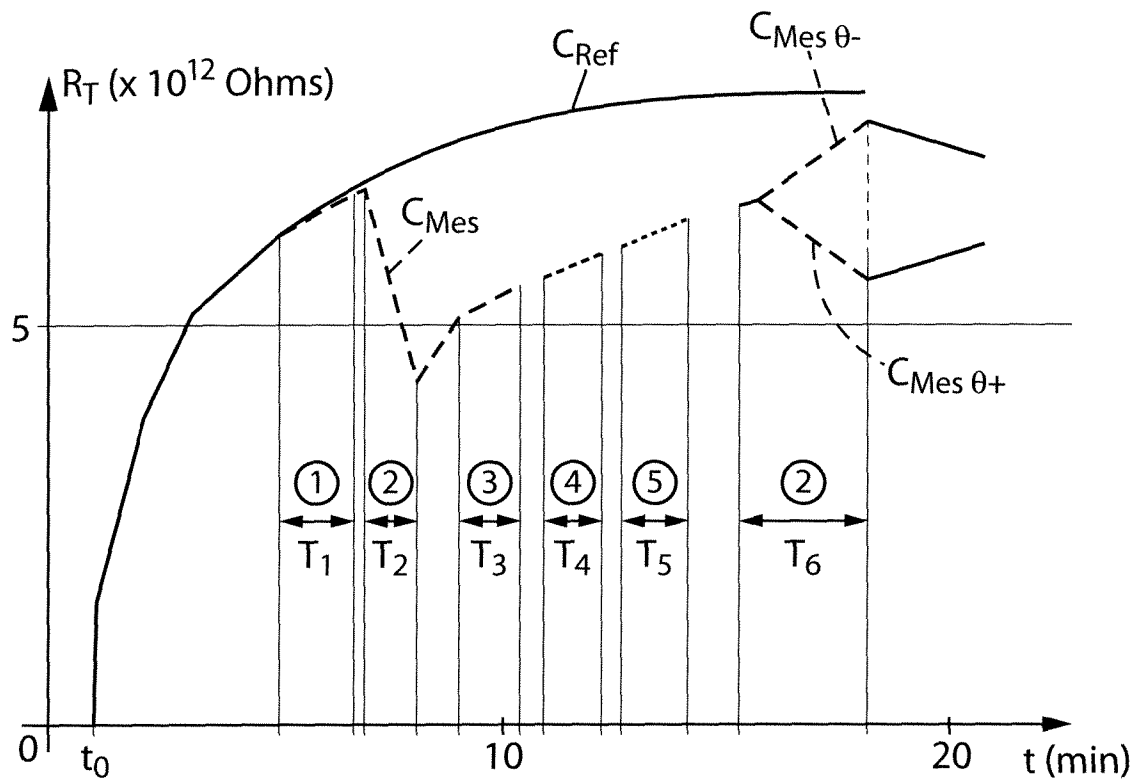


FIG. 6