

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①① N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 860 593

②① N° d'enregistrement national : **03 11640**

⑤① Int Cl⁷ : G 01 R 27/02, G 01 R 31/06

①②

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 03.10.03.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public de la
demande : 08.04.05 Bulletin 05/14.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥① Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦① Demandeur(s) : *ALSTOM T&D SA Société anonyme*
— FR.

⑦② Inventeur(s) : RYDER SIMON ANDREW.

⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : BREVATOME.

⑤④ **PROCEDE POUR DIAGNOSTIQUER UN DEFAUT SUR UN ENROULEMENT DE TRANSFORMATEUR.**

⑤⑦ La présente invention concerne un procédé pour diagnostiquer un défaut sur un enroulement de transformateur utilisant une analyse de réponse en fréquence ou FRA (Frequency Response Analysis en anglais). La présente invention est plus particulièrement adaptée aux transformateurs de puissance. Le procédé comporte les étapes suivantes :

- mesure de l'impédance dudit enroulement en fonction de la fréquence, ladite mesure étant représentée sous la forme d'un premier gain k en tension,
- comparaison de ladite mesure de l'impédance avec une mesure de référence représentée sous la forme d'un deuxième gain k' en tension.

Le procédé comporte en outre une étape de détermination de la variation relative de la première fréquence de résonance supérieure à 10 kHz, ladite variation relative étant obtenue en comparant lesdits premier et deuxième gains k et k' .

FR 2 860 593 - A1



PROCEDE POUR DIAGNOSTIQUER UN DEFAUT SUR UN ENROULEMENT DE TRANSFORMATEUR

La présente invention concerne un procédé pour diagnostiquer un défaut sur un enroulement de transformateur utilisant une analyse de
5 réponse en fréquence ou FRA (Frequency Response Analysis en anglais). La présente invention est plus particulièrement adaptée aux transformateurs de puissance.

Les transformateurs de puissance (tels que des transformateurs ayant des tensions primaires de plusieurs centaines de kV et des puissances
10 délivrées allant de quelques MVA à plusieurs centaines de MVA) sont des dispositifs extrêmement coûteux dans les systèmes d'interconnexion des réseaux de transmission. Il est donc très utile de pouvoir garder en service ces transformateurs le plus longtemps possible, une panne ou un défaut du transformateur pouvant avoir des conséquences économiques importantes
15 dues à l'arrêt du réseau de distribution.

En outre, des défauts tels que des courts-circuits peuvent entraîner des risques d'explosion ou d'incendie.

Il est donc très important de pouvoir déterminer la présence de défaut lié à l'enroulement d'un transformateur.

20 Une solution connue à ce problème consiste à utiliser une analyse de réponse en fréquence appelée usuellement FRA (Frequency Response Analysis en anglais). Cette technique consiste à mesurer l'impédance d'un enroulement de transformateur sur une large gamme de fréquence et à comparer le résultat de ces mesures avec un ensemble de référence. Afin de
25 mesurer l'impédance en fonction de la fréquence, on peut effectuer un balayage en fréquence en utilisant un signal sinusoïdal.

Ainsi, la figure 1 représente un schéma de principe d'un circuit 1 d'analyse en fréquence d'une impédance correspondant à l'impédance d'un enroulement de transformateur à mesurer.

30 Le circuit 1 comporte :

- un analyseur de réseau 2,

- trois impédances de test de même valeur $Z1$,
- une impédance ZT correspondant à l'impédance d'un enroulement de transformateur à mesurer.

L'analyseur de réseau 2 génère un signal S de mesure. Le signal S de mesure est un signal sinusoïdal balayé en fréquence. Les impédances $Z1$ sont par exemple les impédances des câbles de mesure et ont généralement une valeur égale à 50 Ohms. R est le signal mesuré entre la première extrémité de ZT et la masse. T est le signal mesuré entre la deuxième extrémité de ZT et la masse. L'analyseur 2 représente ensuite en fonction de la fréquence le gain en tension k défini par la relation suivante :

$$k = 20 \log_{10} \left(\frac{T}{R} \right).$$

Le gain k contient les informations nécessaires à l'étude de l'impédance ZT et vaut : $k = 20 \log_{10} \left(\frac{Z1}{Z1 + ZT} \right)$.

Dans le cas d'une impédance $Z1$ égale à 50 Ohms, on a ainsi :

$$k = 20 \log_{10} \left(\frac{50}{50 + ZT} \right).$$

L'impédance est mesurée sur une gamme très large de fréquence qui peut aller de quelques Hz à une dizaine de MHz.

La même mesure doit être effectuée sur un enroulement de référence. Cet enroulement de référence peut être soit une autre phase pour laquelle on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de défaut, soit le même enroulement sans défaut mesuré auparavant, soit l'enroulement d'un transformateur identique. On obtient donc également un gain k' en fonction de la fréquence correspondant à cet enroulement de référence.

Une première solution consiste alors à examiner à l'œil les différences entre les courbes représentant k et k' en fonction de la fréquence. Cette solution présente cependant certains problèmes.

En effet, l'examen à l'œil effectué par un expert peut présenter une certaine subjectivité et manquer de transparence.

Une deuxième solution consiste à calculer des indicateurs statistiques permettant de mettre en évidence les différences entre les deux courbes. De tels indicateurs statistiques sont par exemple les coefficients de corrélation calculés dans différentes gammes de fréquences.

5 Toutefois, l'utilisation de ces indicateurs statistiques pose également certains problèmes.

Ainsi, certains défauts ne peuvent pas être identifiés ; c'est le cas par exemple d'une mise à la terre du circuit magnétique du transformateur ou d'un courant de circulation entraînant un échauffement du transformateur.

10 De même, cette utilisation des indicateurs statistiques peut conduire à confondre certains défauts ; par exemple, une mauvaise mise à la terre de la cuve du transformateur peut être confondue avec un endommagement de l'enroulement.

Une troisième solution est décrite dans le document « a new method
15 for diagnosing transformer faults using frequency response analysis » (Simon Ryder, actes du colloque du comité A2 de CIGRE, Mérida (Mexico), 1-3 juin 2003, pages 123-135). Selon cette méthode, on calcule trois coefficients de corrélation ρ_1 , ρ_2 et ρ_3 de k et k' sur les trois gammes de fréquences [1kHz-10kHz], [10kHz-100kHz] et [100kHz-1MHz] ainsi que les variations relatives
20 du gain minimal déterminé pour une fréquence inférieure à 10 kHz, de la fréquence de résonance fondamentale et du nombre de fréquences de résonance présentes dans un intervalle prédéterminé. Cette méthode présente l'avantage de permettre une augmentation du nombre de défauts détectables ainsi qu'une meilleure distinction des différents défauts entre
25 eux.

Toutefois, la mise en œuvre de cette troisième solution pose également quelques difficultés ; ainsi, cette méthode ne permet notamment pas de faire la distinction entre un défaut lié à un déplacement axial de l'enroulement à analyser sans que ce dernier soit cependant trop
30 endommagé localement et un défaut lié à un flambage d'un enroulement intérieur.

La présente invention vise à fournir un procédé pour diagnostiquer au moins un défaut sur un enroulement de transformateur et permettant de mieux distinguer les différents défauts entre eux.

La présente invention propose à cet effet un procédé pour
5 diagnostiquer au moins un défaut sur un enroulement de transformateur comportant les étapes suivantes :

- mesure de l'impédance dudit enroulement en fonction de la fréquence, ladite mesure étant représentée sous la forme d'un premier gain en tension,
- 10 - comparaison de ladite mesure de l'impédance avec une mesure de référence représentée sous la forme d'un deuxième gain en tension, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte une étape de détermination de la variation relative de la première fréquence de résonance supérieure à 10 kHz, ladite variation relative étant obtenue
15 en comparant lesdits premier et deuxième gains.

Grâce à l'invention, la détermination de la variation relative de la première fréquence de résonance supérieure à 10 kHz permet de faire la distinction entre un défaut lié à un déplacement axial de l'enroulement à analyser sans que ce dernier soit cependant trop endommagé localement et
20 un défaut lié à un flambage d'un enroulement intérieur. Notons que, de façon générale, la détermination de la variation relative d'une fréquence de résonance se calcule comme suit :

$$VR_f = \frac{f}{f'}$$

où f désigne la première fréquence de résonance associée au premier gain
25 et f' désigne la première fréquence de résonance associée au deuxième gain.

Avantageusement, le procédé comporte une étape de détermination de la variation relative de la dernière fréquence de résonance inférieure à 1 MHz.

Avantageusement, le procédé comporte une étape de détermination de la présence d'une fréquence de résonance inférieure à la fréquence de résonance fondamentale.

Avantageusement, le procédé comporte une étape de détermination
5 de la variation absolue du gain maximal dans un intervalle prédéterminé.

Le gain maximal se définit comme la valeur maximale prise par le gain en tension k tel que décrit en référence à la figure 1 en fonction de la fréquence de mesure ; à titre d'exemple, le gain maximal à déterminer est le gain maximal pour une fréquence qui peut être supérieure à 1 kHz. Il se peut
10 en effet que le gain prenne une valeur maximale pour une fréquence inférieure à 1 kHz mais cette valeur est moins pertinente pour l'identification des défauts. On peut également fixer une borne supérieure pour le calcul du gain maximal qui peut être par exemple de l'ordre de 100 kHz. Notons de plus qu'il s'agit ici de calculer la variation absolue (et non relative) du gain
15 maximal, variation que l'on peut définir comme suit :

$$VA_k = \max(k) - \max(k').$$

Selon ce dernier mode de réalisation, avantageusement, ledit intervalle prédéterminé est [1 kHz ; 100 kHz].

Avantageusement, le procédé comporte une étape de détermination
20 de la variation relative d'une deuxième fréquence de résonance suivant la fréquence de résonance fondamentale.

Selon un mode de réalisation particulièrement avantageux, le procédé comporte les étapes suivantes :

- détermination de quatre coefficients de corrélation desdits premier et
25 deuxième gains dans les quatre gammes de fréquence [100Hz, 1kHz], [1kHz-10kHz], [10kHz-100kHz] et [100kHz-1MHz],
- détermination de la variation relative du gain minimal pour une fréquence inférieure à 10 kHz,
- détermination de la variation absolue du gain maximal dans un
30 intervalle de fréquences prédéterminé ,

- détermination de la variation relative de la fréquence de résonance fondamentale,
- détermination de la présence d'une deuxième fréquence de résonance suivant la fréquence de résonance fondamentale,
- 5 - détermination de la variation relative de ladite deuxième fréquence de résonance suivant la fréquence de résonance fondamentale,
- détermination de la présence d'une fréquence de résonance inférieure à la fréquence de résonance fondamentale,
- détermination de la variation relative de la dernière fréquence de résonance inférieure à 1 MHz,
- 10 - détermination de la variation relative du nombre de fréquences de résonance comprises entre dans un intervalle prédéterminé.

Avantageusement, ladite variation relative du nombre de fréquences de résonance se fait dans l'intervalle [100 kHz ; 1 MHz].

- 15 Avantageusement, ladite détermination de la variation absolue du gain maximal se fait dans l'intervalle [1 kHz ; 100 kHz].

Selon un mode de réalisation particulièrement avantageux, le procédé comporte les étapes suivantes :

- injection des résultats de chacune desdites détermination de variation relative et/ou de présence dans un système informatique expert,
- 20 - détermination et identification du ou des défauts par ledit système expert.

Un système expert est un programme d'ordinateur qui simule le comportement d'un expert humain. Pour cela, le système expert utilise des règles pour l'interprétation de données. Les avantages d'un système expert résident dans le fait que l'expertise est représentée d'une manière très facilement accessible au programmeur ; en outre, un système expert a une structure uniforme basée sur des règles qui sont essentiellement auto-documentées. De plus, l'expertise est complètement séparée du traitement des données. Enfin, un système expert permet de traiter l'incertitude en prenant une décision basée sur une règle particulière et permet également

25
30

de traiter un nombre considérable d'informations impossible à traiter rapidement par un expert humain.

Selon ce dernier mode de réalisation, avantageusement, le procédé comporte les étapes suivantes :

- 5 - attribution d'un facteur de certitude à chaque défaut susceptible d'être déterminé,-
- détermination et identification du ou des défauts par ledit système expert sur la base d'une pluralité de règles modifiant lesdits facteurs de certitude en fonction desdits résultats de chacune desdites
- 10 détermination de variation relative et/ou de présence.

Avantageusement, la méthode de calcul de chaque facteur de certitude est basée sur les principes suivants :

$$15 \quad \begin{array}{l} \text{Si } CF' > 0 \text{ et } CF'' > 0 \text{ alors :} \\ CF = CF' + CF''(1 - CF') \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Si } CF' = 0 \\ CF = CF'' \end{array}$$

$$20 \quad \begin{array}{l} \text{Si } CF' > 0 \text{ et } CF'' < 0 \text{ ou si } CF' < 0 \text{ et } CF'' > 0 \text{ alors :} \\ CF = \frac{CF' + CF''}{1 - \min(|CF'|, |CF''|)} \end{array}$$

$$25 \quad \begin{array}{l} \text{Si } CF' < 0 \text{ et } CF'' < 0 \text{ alors :} \\ CF = CF' + CF''(1 + CF') \end{array}$$

où CF désigne la valeur courante du facteur de certitude, CF' désigne la valeur avant application d'une desdites règles et CF'' désigne la valeur du facteur de certitude déterminée à partir d'une desdites règles et appliquée à CF'.

- 30 La présente invention a également pour objet un système informatique expert pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention caractérisé en ce qu'il comporte :

- une pluralité d'entrées adaptées pour recevoir les résultats de chacune desdites déterminations de variation relative et/ou des indicateurs de présence,
- une pluralité de sorties dites intermédiaires correspondant au nombre de défauts détectables, chaque sortie étant adaptée pour fournir un facteur de certitude calculé à partir de ladite pluralité de règles,
- une sortie dite finale adaptée pour produire un diagnostic du ou des défauts présents sur ledit enroulement de transformateur.

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront dans la description suivante d'un mode de réalisation de l'invention, donné à titre illustratif et nullement limitatif.

Dans les figures suivantes :

- La figure 1 représente schématiquement un circuit d'analyse de réponse en fréquence d'une impédance,
- La figure 2 représente schématiquement un transformateur triphasé,
- La figure 3 représente les gains respectifs en fonction de la fréquence de deux enroulements haute tension de deux phases d'un transformateur triphasé.

La figure 1 a déjà été décrite en relation avec l'état de la technique. Les mesures FRA présentées par la suite seront toujours réalisées à partir d'un circuit d'analyse tel que représenté en figure 1.

La figure 2 représente schématiquement un transformateur triphasé 3.

Le transformateur triphasé 3 comprend :

- un circuit magnétique 4,
- une cuve 5,
- trois enroulements basse tension 6,
- trois enroulements haute tension 7.

Chaque couple d'enroulement haute et basse tension correspond à une phase du transformateur associée à un noyau 9 du circuit 4. Les trois phases du transformateur seront respectivement notées par la suite A, B et C.

Le circuit magnétique 4 et la cuve 5 sont reliés par une liaison 8 et sont à la masse.

Trois mesures d'impédance peuvent être effectuées respectivement pour la haute et la basse tension.

- 5 Ainsi, si on suspecte un défaut sur l'un des enroulements haute tension du transformateur, on mesure le gain de cet enroulement en fonction de la fréquence, on effectue la même mesure pour un autre enroulement haute fréquence et on compare les gains respectifs de ces deux enroulements. Notons qu'une troisième mesure est également possible en
10 utilisant le troisième enroulement haute fréquence.

Notons que l'on peut également effectuer une comparaison entre les mesures sur l'enroulement soupçonné et des mesures réalisées antérieurement sur le même enroulement. On peut aussi faire une comparaison entre les mesures sur l'enroulement soupçonné et un
15 enroulement équivalent d'un autre transformateur de la même conception.

A titre d'exemple, la figure 3 représente les gains k et k' respectifs de deux enroulements haute tension des phases respectives C et A d'un transformateur triphasé tel que celui représenté en figure 2.

Les gains k et k' sont représentés pour une fréquence variant de 10
20 Hz à 1 MHz.

Afin de déterminer la présence d'un éventuel défaut et de diagnostiquer ce dernier, le procédé selon l'invention comporte la détermination des onze paramètres suivants :

Les quatre premiers paramètres sont les coefficients de corrélation
25 ρ_1, ρ_2, ρ_3 et ρ_4 de k et k' calculés sur les trois gammes de fréquences [100Hz, 1kHz], [1kHz-10kHz], [10kHz-100kHz] et [100kHz-1MHz].

Rappelons que le coefficient de corrélation ρ pour deux ensembles de n nombres $X \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ et $Y \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ est défini par la relation :

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2}} .$$

Le cinquième paramètre est défini comme la variation relative VR_{f1} de la fréquence de résonance fondamentale. La fréquence de résonance fondamentale est la première fréquence de résonance de chacun des gains k et k' . Si on appelle $f1$ et $f1'$ les fréquences de résonance fondamentales respectives des gains k et k' , le paramètre VR_{f1} est défini par la relation :

$$VR_{f1} = \frac{f1}{f1'}.$$

Le sixième paramètre est défini comme la variation relative VR_{f2} de la deuxième fréquence de résonance immédiatement après la fréquence de résonance fondamentale. Le paramètre VR_{f2} est défini par la relation :

10 $VR_{f2} = \frac{f2}{f2'}$, où $f2$ et $f2'$ désignent les deuxièmes fréquences de résonance respectives de k et k' .

Le septième paramètre est défini comme la variation relative VR_{f3} de la première fréquence de résonance supérieure à 10 kHz. Le paramètre VR_{f3} est défini par la relation : $VR_{f3} = \frac{f3}{f3'}$, où $f3$ et $f3'$ désignent respectivement

15 les premières fréquences de résonance supérieures à 10 kHz de k et k' .

Le huitième paramètre est défini comme la variation relative VR_{f4} de la dernière fréquence de résonance inférieure à 1 MHz. Le paramètre VR_{f4} est défini par la relation : $VR_{f4} = \frac{f4}{f4'}$, où $f4$ et $f4'$ désignent respectivement

les dernières fréquences de résonance inférieures à 1 MHz de k et k' .

20 Le neuvième paramètre est défini comme la variation relative du gain minimal VR_{k1} en basse fréquence, c'est à dire à une valeur de fréquence inférieure à 10 kHz. Ainsi, si on appelle $k1$ le gain minimal de l'impédance à analyser et $k1'$ le gain minimal de l'impédance de référence, le paramètre VR_{k1} est défini par la relation : $VR_{k1} = \frac{k1}{k1'}$.

25 Le dixième paramètre est défini comme la variation absolue VA_{k2} du gain maximum pour une fréquence comprise entre 1 kHz et 100 kHz. Ainsi, si

on appelle k_2 le gain maximal de l'impédance à analyser et k'_2 le gain maximal de l'impédance de référence, le paramètre VA_{k_2} est défini par la relation :

$$VA_{k_2} = k_2 - k'_2.$$

- 5 Le onzième paramètre est défini comme la variation relative VR_n du nombre de fréquences de résonance comprises entre 100 kHz et 1 MHz. Le paramètre VR_n est défini par la relation : $VR_n = \frac{n}{n'}$, où n et n' désignent

respectivement le nombre de fréquences de résonance supérieures de k et k' dans l'intervalle [100 kHz – 1 MHz].

- 10 Le procédé selon l'invention comporte également la détermination de la présence d'une fréquence de résonance de type rebond (blip en anglais), c'est à dire une fréquence de résonance inférieure à la fréquence de résonance fondamentale et de faible amplitude. La présence d'une fréquence de type rebond se traduit par un indicateur logique prenant deux
15 valeurs selon que la fréquence est ou non présente.

- Le procédé selon l'invention comporte également la détermination de la présence d'une deuxième fréquence de résonance suivant la fréquence de résonance fondamentale. La présence d'une telle deuxième fréquence de résonance se traduit par un indicateur logique prenant deux valeurs selon
20 que la fréquence est ou non présente.

- L'ensemble des onze paramètres accompagnés des indicateurs de présence d'une fréquence de rebond et d'une deuxième fréquence de résonance sont injectés dans un système expert caractérisé par une pluralité de facteurs de certitude C_i . Le nombre de facteur de certitudes correspond
25 au nombre de fautes susceptibles d'être détectées par le système expert. Les quatorze types de fautes détectables ainsi que leurs facteurs de certitude associés sont résumés dans le tableau 1 ci-dessous.

Types de fautes	Facteurs de certitude
1) Mauvaise mise à la terre de la cuve (haute résistance)/ Absence de mise à la terre de la cuve	C1
2) Absence de mise à la terre du circuit magnétique	C2
3) Boucle fermée mise à la terre/ Boucle fermée mise à un potentiel flottant	C3
4) Spire additionnelle en court-circuit (même phase)	C4
5) Défaut entre bornes de l'enroulement (enroulement analysé affecté)	C5
6) Défaut entre bornes de l'enroulement (autre enroulement d'une même phase affecté)	C6
7) Une spire en court-circuit	C7
8) Plusieurs spires en court-circuit	C8
9) Court-circuit sur la seule phase adjacente	C9
10) Court-circuit sur une autre phase que sur la seule phase adjacente	C10
11) Enroulement déplacé	C11
12) Flambage de l'enroulement intérieur	C12
13) Enroulement endommagé	C13
14) Mauvaise continuité	C14

Tableau 1

L'explication suivante des défauts sera faite en référence à la figure 2.

Le défaut 1 correspond à une mauvaise mise à la terre de la cuve 5 ; il peut s'agir d'une absence de mise à la terre ou d'une mise à la terre avec une résistance élevée entre la cuve 5 et la terre (supérieure à 50 Ohms).

Le défaut 2 correspond à une absence de mise à la terre du circuit magnétique 4, c'est à dire à une rupture de la liaison 8.

Le défaut 3 correspond à une boucle de courant de circulation mis soit à la terre soit à un potentiel flottant ; ces boucles entraînent un échauffement du transformateur.

Le défaut 4 correspond à la présence d'une spire additionnelle créant un court circuit sur la phase à laquelle appartient l'enroulement à analyser.

Le défaut 5 correspond à un défaut entre les bornes de l'enroulement à analyser, c'est à dire un court-circuit de l'enroulement entier.

Le défaut 6 correspond à un défaut entre les bornes d'un enroulement appartenant à la même phase que l'enroulement à analyser.

Le défaut 7 correspond à un court-circuit présent sur une spire des enroulements appartenant à la même phase que l'enroulement à analyser. Ce défaut produit un échauffement du transformateur.

Le défaut 8 correspond à un court-circuit présent sur plusieurs spires appartenant à la même phase que l'enroulement à analyser. Ce défaut produit un échauffement du transformateur.

Le défaut 9 correspond à un défaut de court-circuit tel que qu'un court circuit entre spires, entre bornes ou sur une spire additionnelle. Il indique que le défaut se trouve sur une phase à coté de celle où la mesure a été effectuée et que la phase où se trouve le défaut est la seule phase adjacente, c'est à dire immédiatement à coté de la phase où la mesure a été effectuée. Ainsi, si le défaut se trouve sur le noyau central, l'analyse des autres phases produira ce code car la phase centrale est bien la seule phase immédiatement à coté des phases de gauche et de droite.

La défaut 10 correspond également à un défaut de court-circuit tel qu'un court circuit entre spires, entre bornes ou sur une spire additionnelle. Il

indique cependant que le défaut n'est pas sur une phase unique se trouvant immédiatement à côté de la phase où la mesure a été effectuée. Ainsi, si le défaut se trouve sur le noyau de gauche, l'analyse de la phase centrale produira ce code car il y a bien deux phases immédiatement à côté de la phase centrale et non une seule.

Le défaut 11 correspond à un déplacement axial de l'enroulement à analyser sans que ce dernier soit cependant trop endommagé localement.

Le défaut 12 correspond à un flambage d'un enroulement intérieur.

Le défaut 13 correspond à un endommagement mécanique local sur l'enroulement à analyser.

Le défaut 14 correspond à une mauvaise continuité électrique dans l'enroulement à analyser. Cette mauvaise continuité peut être liée à un mauvais contact de mesure.

Comme décrit plus haut, on associe chaque défaut de type i à un facteur de certitude C_i du système expert.

Chaque facteur de certitude C_i est une variable qui peut prendre une valeur réelle comprise entre 1 (certitude du défaut) et -1 (défaut impossible). Chaque facteur de certitude est initialisé à 0.

Appelons C'_i le facteur de certitude associé au défaut i avant l'application d'une règle ; soit C''_i le facteur de certitude associé à ce même défaut i et déterminée par ladite règle ; soit C_i le facteur de certitude courant à calculer. Ce facteur de certitude C_i sera par exemple déterminé selon les principes suivants :

Si $C'_i > 0$ et $C''_i > 0$ alors :

$$C_i = C'_i + C''_i (1 - C'_i)$$

Si $C'_i = 0$

$$C_i = C''_i$$

Si $C'_i > 0$ et $C''_i < 0$ ou si $C'_i < 0$ et $C''_i > 0$ alors :

$$C_i = \frac{C'_i + C''_i}{1 - \min(|C'_i|, |C''_i|)}$$

Si $C'_i < 0$ et $C''_i < 0$ alors :

$$C_i = C'_i + C''_i(1 + C'_i).$$

Prenons l'exemple suivant : $C'_i=0,5$ et $C''_i=0,5$ vont donner un facteur de certitude C_i égal à 0,75.

Ce facteur de certitude C_i égal à 0,75 devient donc le nouveau
5 facteur de certitude C'_i . Si il est nouvellement combiné avec un facteur de certitude C''_i égal à 0,5, le facteur de certitude devient 0,875.

Si le facteur de certitude égal à 0,75 est au contraire nouvellement combiné avec un facteur de certitude C''_i égal à $-0,5$ et non 0,5, le facteur de certitude devient 0,5 et non 0,875.

10 Notons que la combinaison de n'importe quel facteur de certitude, autre que -1 , avec 1 donnera un nouveau facteur de certitude égal à 1.

Notons également que la combinaison de n'importe quel facteur de certitude, autre que 1, avec -1 donnera un facteur de certitude égal à -1 .

Notons enfin que la combinaison de 1 avec -1 donne une valeur
15 indéfinie.

Les règles appliquées par le système expert fixent une valeur de C''_i selon que certaines conditions sur les paramètres sont vérifiées. Les règles appliquées par le système expert sont par exemple les suivantes :

20 /*règle 1*/
si ($p_1 < 0.25$)
alors (C''_4){0.5} [*c'est à dire qu'on combine 0.5 et la valeur existante de C'_4 en utilisant les principes décrits plus haut*]

(C''_8){0.5}
25 (C''_7){-0.5}
(C''_5){0.25}
(C''_6){0.25}

/*règle 2*/
30 si ($p_2 < \text{normal}$)
alors (C''_8){0.25}
(C''_7){-0.25}

(C''5){0.25}

(C''6){0.25}

/*règle 3*/

5 si (($\rho_2 < \text{normal}$) et ($\rho_2 > 0.5$))
then (C''4){0.5}

/*règle 4*/

si (($\rho_2 < \text{normal}$) et ($\rho_2 > 0.7$))
10 alors (C''9){0.1}
(C''10){0.1}
(C''11){0.25}
(C''12){0.25}

15 /*règle 5*/

si ($\rho_3 < \text{normal}$)
alors (C''5){0.5}

/*règle 6*/

20 si (($\rho_3 < \text{normal}$) et ($\rho_3 > 0.7$))
alors (C''11){0.5}
(C''12){0.5}

/*règle 7*/

25 si (($\rho_3 < \text{normal}$) et ($\rho_3 > 0.9$))
alors (C''8){0.1}

/*règle 8*/

si ($\rho_4 < \text{normal}$)
30 alors (C''5){0.25}
(C''6){-0.7}

/*règle 9*/

si $((\rho_4 < \text{normal}) \text{ et } (\rho_4 > 0.7))$

alors $(C''1)\{0.5\}$

5 $(C''11)\{0.25\}$

$(C''12)\{0.25\}$

$(C''13.)\{0.5\}$

/*règle 10*/

10 si $((\rho_4 < \text{normal}) \text{ et } (\rho_4 > 0.9))$

alors $(C''3)\{0.1\}$

$(C''8)\{0.1\}$

/*règle 11*/

15 si (présence fréquence de rebond)

alors $(C''4)\{0.5\}$

$(C''8)\{-0.5\}$

$(C''5)\{-0.7\}$

$(C''6)\{-0.7\}$

20

/*règle 12*/

si (absence de fréquence de rebond)

alors $(C''4)\{-0.25\}$

25 /*règle 13*/

si $(VR_{f1} < 0.75)$

alors $(C''5)\{0.5\}$

$(C''6)\{0.5\}$

30 /*règle 14*/

si $((VR_{f1} < 0.9) \text{ et } (VR_{f1} > 0.75))$

alors (C''2){0.25}
 (C''3){0.5}

/*règle 15a*/

5 si ($VR_{f1} < 0.9$)

alors (C''4){-1}

(C''7){-1}

(C''10){-1}

10 /*règle 15b*/

si ($VR_{f1} < 1.1$)

alors (C''4){-0.5}

(C''8){-1}

(C''9){-1}

15

/*règle 16*/

si ($(VR_{f1} < 1.25)$ et ($VR_{f1} > 1.1$))

alors (C''7){0.5}

(C''10){0.5}

20

/*règle 17*/

si ($(VR_{f1} < 1.5)$ et ($VR_{f1} > 1.25$))

alors (C''9){0.5}

25 /*règle 18*/

si ($VR_{f1} > 1.5$)

alors (C''8){0.5}

/*règle 19*/

30 si ($(VR_{f1} < 5)$ et ($VR_{f1} > 1.5$))

alors (C''4){0.5}

/*règle 20*/

si ($VR_{f1} > 5$)

alors (C''4){-0.25}

5 /*règle 21*/

si (absence de seconde fréquence de résonance)

alors (C''4){0.25}

(C''8){0.25}

(C''7){0.25}

10 (C''9){0.25}

(C''10){0.25}

/règle 22*/

si (présence d'une seconde fréquence de résonance)

15 alors (C''4){-1}

(C''8){-1}

(C''7){-1}

(C''9){-1}

(C''10){-1}

20

/*règle 23*/

si ($(VR_{f2} < 0.9)$ et ($VR_{f2} > 0.75$))

alors (C''2){0.25}

(C''3){0.5}

25

/*règle 24*/

si ($VR_{f3} < 0.95$)

alors (C''11){-0.5}

(C''12){0.5}

30

/*règle 25*/

si ($VR_{f3} > 1.05$)

alors $(C''11)\{0.5\}$
 $(C''12)\{-0.5\}$

*/*règle 26*/*

5 si $((VR_{f3} < 1.05) \text{ et } (VR_{f3} > 0.95))$
 alors $(C''11)\{-0.5\}$
 $(C''12)\{-0.5\}$

*/*règle 27*/*

10 si $((VR_{f4} < 0.9) \text{ ou } (VR_{f4} > 1.1))$
 alors $(C''1)\{0.25\}$
 $(C''13.)\{0.25\}$

*/*règle 28*/*

15 si $(VR_{f4} < 0.9)$
 alors $(C''11)\{-0.25\}$
 $(C''12)\{0.25\}$

*/*règle 29*/*

20 si $(VR_{f4} > 1.1)$
 alors $(C''11)\{0.25\}$
 $(C''12)\{-0.25\}$

*/*règle 30*/*

25 si $(VR_n < 1)$
 alors $(C''13.)\{-0.5\}$

*/*règle 31*/*

si $((VR_n < 1.2) \text{ et } (VR_n > 1.1))$
 30 alors $(C''13.)\{0.25\}$

*/*règle 32*/*

si ($VR_n > 1.2$)
 alors (C"13.){0.5}

/*règle 33a*/

5 si ($VR_{k1} > \text{normal}$)

alors (C"2){-0.25}

(C"4){-1}

(C"8){-1}

(C"7){-0.5}

10 (C"5){-1}

(C"6){-1}

/*règle 33b*/

si ($VR_{k1} = \text{normal}$)

15 alors (C"4){-0.5}

(C"8){-0.5}

(C"5){-1}

(C"6){-1}

20 /*règle 34*/

si ($(VR_{k1} < \text{normal})$ et ($VR_{k1} > 0.8$))

alors (C"2){0.25}

/*règle 35*/

25 si ($(VR_{k1} < \text{normal})$ et ($VR_{k1} > 0.35$))

alors (C"7){0.5}

/*règle 36*/

si ($((VR_{k1} < \text{normal})$ ou ($VR_{k1} < 0.85$)) et

30 ($VR_{k1} > 0.15$))

alors (C"4){0.5}

(C"8){0.5}

/*règle 37*/

si ($VR_{k1} < 0.15$)

alors (C''5){0.5}

5 (C''6){0.5}

/*règle 38*/

si ($VA_{k2} < -3$)

alors (C''14){1}

10

On entend par le terme "normal" dans ce qui précède des variations possibles dans des circonstances normales d'utilisation. Les plages de variation du type « normal » peuvent être ajustées par l'utilisateur.

On peut par exemple utiliser les variations normales données dans le
15 tableau 2 suivant pour un même enroulement :

Paramètre	Variation normale
ρ_2	0.995
ρ_3	0.995
ρ_4	0.995
VR_{k1} (voir ci-dessous)	+/-3 dBm

Tableau 2

Il faut estimer la variation normale de la variation relative du gain minimale en basse fréquence, en fonction de sa valeur dans la mesure de
20 référence et la variation normale en valeur absolue. Si le gain minimal dans la mesure de référence est de -100dBm, la gamme de variation normale est de 0.94 à 1.06. Si le gain minimal dans la mesure de base est de -30dBm, la gamme de variation normale est de 0.80 à 1.20.

25 Le système expert comporte :

- treize entrées correspondant aux onze paramètres et aux deux indicateurs de présence,
- quatorze sorties intermédiaires correspondant chacune à un type de faute,
- 5 - une sortie finale diagnostiquant le ou les types de fautes.

Après que toutes les règles aient été appliquées, chacune des 14 sorties intermédiaires (correspondant à un type de faute) du système expert va être associée à un facteur de certitude C_i (i variant de 1 à 14).

Le diagnostic final se fait en appliquant les principes suivants :

- 10 - si aucune sortie intermédiaire n'a un facteur de certitude supérieur à 0, le diagnostic correspond à une absence de défaut,
- si une ou plusieurs sorties intermédiaires ont un facteur de certitude supérieur à 0 et si une sortie intermédiaire a un facteur de certitude supérieur aux autres, le diagnostic correspond à la présence d'un
- 15 défaut associé à cette dernière sortie intermédiaire,
- si deux (ou plus) sorties ont un facteur de certitude supérieur à 0 et si deux sorties ont un même facteur de certitude supérieur aux autres, le diagnostic correspond à la présence des deux défauts associés aux sorties précédemment citées à moins qu'une des exceptions ci-
- 20 dessous ne se produise :
 - si les deux défauts sont respectivement des défauts de type 4 et de type 8, le diagnostic correspond à la présence d'un défaut de type 4 ou de type 8,
 - si les deux défauts sont respectivement des défauts de type 5
 - 25 et de type 6, le diagnostic correspond à la présence d'un défaut de type 6,
 - si les deux défauts sont respectivement des défauts de type 11 et de type 12, le diagnostic correspond à la présence d'un défaut de type 11 ou de type 12,
 - 30 ○ si les deux défauts sont respectivement des défauts de type 1 et de type 13, le diagnostic correspond à la présence d'un défaut de type 1,

- si les deux défauts sont respectivement des défauts de type 8 et de type 9 (ou de type 10), le diagnostic correspond à la présence d'un défaut de type 8,
- Si trois (ou plus) sorties ont un facteur de certitude supérieur à 0 et si
5 trois (ou plus) sorties ont un même facteur de certitude supérieur aux autres, le diagnostic correspond à un défaut non identifié.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée au mode de réalisation qui vient d'être décrit.

Notamment, le système expert peut utiliser d'autres règles que celles
10 décrites plus haut uniquement à titre d'exemple.

REVENDEICATIONS

1. Procédé pour diagnostiquer au moins un défaut sur un enroulement de transformateur comportant les étapes suivantes :
 - mesure de l'impédance dudit enroulement en fonction de la fréquence, ladite mesure étant représentée sous la forme d'un premier gain (k) en tension,
 - comparaison de ladite mesure de l'impédance avec une mesure de référence représentée sous la forme d'un deuxième gain (k') en tension,
- 10 ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte une étape de détermination de la variation relative de la première fréquence de résonance supérieure à 10 kHz, ladite variation relative étant obtenue en comparant lesdits premier et deuxième gains (k , k').
2. Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce qu'il comporte une
- 15 étape de détermination de la variation relative de la dernière fréquence de résonance inférieure à 1 MHz.
3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2 caractérisé en ce qu'il comporte une étape de détermination de la présence d'une fréquence de résonance inférieure à la fréquence de résonance fondamentale.
- 20 4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3 caractérisé en ce qu'il comporte une étape de détermination de la variation absolue du gain maximal dans un intervalle prédéterminé.
5. Procédé selon la revendication précédente caractérisé en ce que ledit intervalle prédéterminé est [1 kHz ; 100 kHz].
- 25 6. Procédé selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comporte une étape de détermination de la variation relative d'une deuxième fréquence de résonance suivant la fréquence de résonance fondamentale.
7. Procédé selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce
- 30 qu'il comporte les étapes suivantes :

- détermination de quatre coefficients de corrélation (ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4) desdits premier et deuxième gains (k , k') dans les quatre gammes de fréquence [100Hz, 1kHz], [1kHz-10kHz], [10kHz-100kHz] et [100kHz-1MHz],
- 5 - détermination de la variation relative du gain minimal pour une fréquence inférieure à 10 kHz,
- détermination de la variation absolue du gain maximal dans un intervalle de fréquences prédéterminé,
- détermination de la variation relative de la fréquence de résonance fondamentale,
- 10 - détermination de la présence d'une deuxième fréquence de résonance suivant la fréquence de résonance fondamentale,
- détermination de la variation relative de ladite deuxième fréquence de résonance suivant la fréquence de résonance fondamentale,
- 15 - détermination de la présence d'une fréquence de résonance inférieure à la fréquence de résonance fondamentale,
- détermination de la variation relative de la dernière fréquence de résonance inférieure à 1 MHz,
- détermination de la variation relative du nombre de fréquences de résonance comprises entre dans un intervalle prédéterminé.
- 20 8. Procédé selon la revendication précédente caractérisé en ce que ladite variation relative du nombre de fréquences de résonance se fait dans l'intervalle [100 kHz ; 1 MHz].
- 9. Procédé selon l'une des revendications 7 ou 8 caractérisé en ce que
- 25 ladite détermination de la variation absolue du gain maximal se fait dans l'intervalle [1 kHz ; 100 kHz].
- 10. Procédé selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :
- injection des résultats de chacune desdites détermination de variation relative et/ou de présence dans un système informatique expert,
- 30 - détermination et identification du ou des défauts par ledit système expert.

11. Procédé selon la revendication précédente caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :
- attribution d'un facteur de certitude à chaque défaut susceptible d'être déterminé,
 - 5 - détermination et identification du ou des défauts par ledit système expert sur la base d'une pluralité de règles modifiant lesdits facteurs de certitude en fonction desdits résultats de chacune desdites détermination de variation relative et/ou de présence.
12. Procédé selon la revendication précédente caractérisé en ce que la
- 10 méthode de calcul de chaque facteur de certitude est basée sur les principes suivants :
- Si $CF' > 0$ et $CF'' > 0$ alors :
- $$CF = CF' + CF''(1 - CF')$$
- 15 Si $CF' = 0$
 $CF = CF''$
- Si $CF' > 0$ et $CF'' < 0$ ou si $CF' < 0$ et $CF'' > 0$ alors :
- 20
$$CF = \frac{CF' + CF''}{1 - \min(|CF'|, |CF''|)}$$
- Si $CF' < 0$ et $CF'' < 0$ alors :
- $$CF = CF' + CF''(1 + CF')$$
- 25 où CF désigne la valeur courante du facteur de certitude, CF' désigne la valeur avant application d'une desdites règles et CF'' désigne la valeur du facteur de certitude déterminée à partir d'une desdites règles et appliquée à CF'.
13. Système informatique expert pour la mise en œuvre du procédé selon
- 30 l'une des revendications 11 ou 12 caractérisé en ce qu'il comporte :
- une pluralité d'entrées adaptées pour recevoir les résultats de chacune desdites déterminations de variation relative et/ou des indicateurs de présence,

- une pluralité de sorties dites intermédiaires correspondant au nombre de défauts détectables, chaque sortie étant adaptée pour fournir un facteur de certitude calculé à partir de ladite pluralité de règles,
 - une sortie dite finale adaptée pour produire un diagnostic du ou des défauts présents sur ledit enroulement de transformateur.
- 5

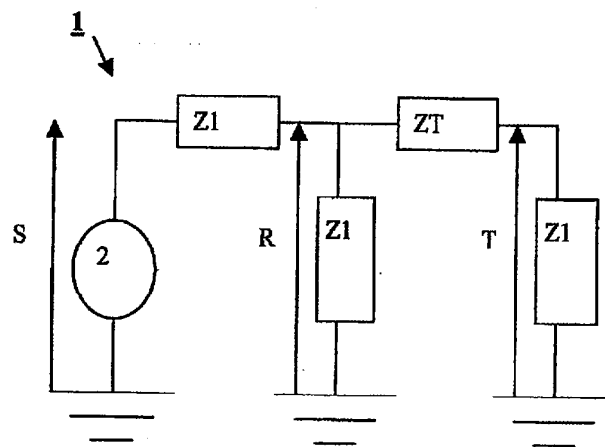


Figure 1

2/3

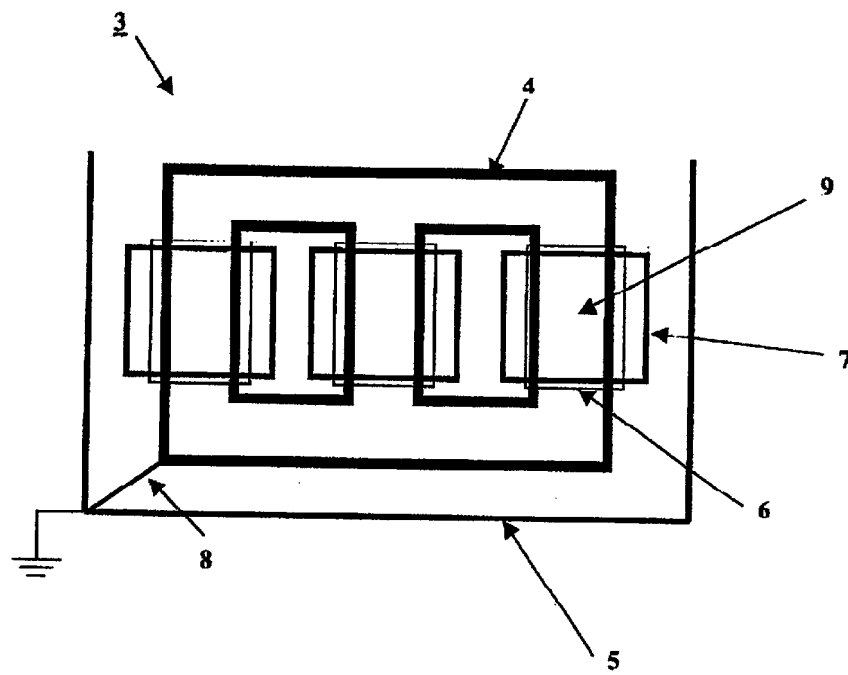


Figure 2

3/3

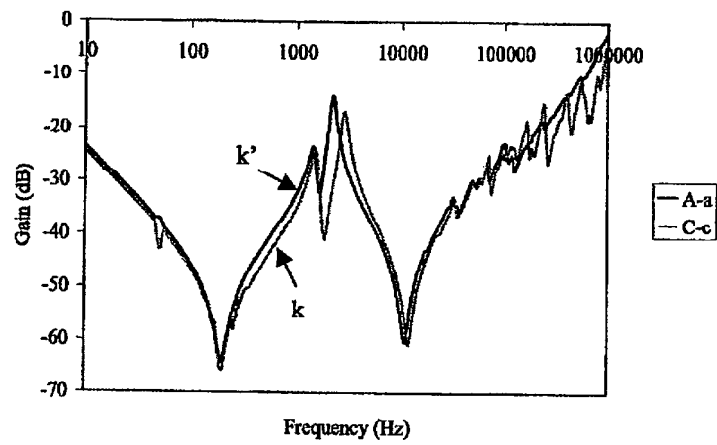


Figure 3



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 646909
FR 0311640

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	C. SWEETSER, T. MCGRIL: "SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS TRANSFORMER APPLICATIONS" 'Online! 27 janvier 2003 (2003-01-27), XP002287739 Extrait de l'Internet: URL: www.doble.com/pdf/sfra_t.pdf 'extrait le 2004-07-02!	1-6, 10	G01R27/02 G01R31/06
Y	* page 44, ligne 1 - page 46, ligne 12; figures 30-35 *	7-9, 11, 13	
A	* page 16, ligne 1 - ligne 28; figure 8 *	12	
X	----- VANAJA R ET AL: "FAULT LOCATION IN POWER TRANSFORMERS DURING IMPULSE TESTS" 2000 IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. WINTER MEETING. CONFERENCE PROCEEDINGS. SINGAPORE, JAN. 23-27, 2000, IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, NEW YORK, NY : IEEE, US, vol. VOL. 3 OF 4, 23 janvier 2000 (2000-01-23), pages 2199-2204, XP000967811 ISBN: 0-7803-5936-4 * page 2201, colonne 2, ligne 39 - ligne 61 *	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
			G01R
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
8 juillet 2004		Koll, H	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 646909
FR 0311640

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
D,Y	RYDER S A ED - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS: "METHODS FOR COMPARING FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS MEASUREMENTS" CONFERENCE RECORD OF THE 2002 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION. (ISEI 2002). BOSTON, MA, APRIL 7 - 10, 2002, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, NEW YORK, NY : IEEE, US, 7 avril 2002 (2002-04-07), pages 187-190, XP001162794 ISBN: 0-7803-7337-5 * le document en entier *	7-9	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
Y	M5100 SEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYZER, juin 2001 (2001-06), XP002287740 Extrait de l'Internet: URL:WWW.DOUBLE.COM/PDF/M5100%20SPEC%20SHEET.PDF> 'extrait le 2004-07-08!	11,13	
A		10,12	
A	J.C. LARSSON: "AN EXPERT SYSTEM FOR FREQUENCY RESONSE ANALYSIS" IEEE, 1994, pages 52-57, XP002287741 * abrégé *	10-13	
----- -/--			
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
8 juillet 2004		Koll, H	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

 1
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 646909
FR 0311640

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	PLEITE J ET AL: "Transformer modeling for FRA techniques" IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION 2002 : ASIA PACIFIC. YOKOHAMA, JAPAN, OCT. 6 - 10, 2002, IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, NEW YORK, NY : IEEE, US, vol. VOL. 1 F 3, 6 octobre 2002 (2002-10-06), pages 317-321, XP010631412 ISBN: 0-7803-7525-4 * page 320, colonne 2, ligne 12 - page 321, colonne 1, ligne 3; figures 4,8,9 * -----	1	
A	LIU XIAOWEI ET AL: "Test research on power transformer winding deformation by FRA method" CONFERENCE PROCEEDINGS ARTICLE, 19 novembre 2001 (2001-11-19), pages 837-840, XP010570041 * page 838, colonne 1, ligne 10 - colonne 2, ligne 14 * -----	1-9	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
8 juillet 2004		Koll, H	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			