

Diagnostic des Transformateurs de Puissance par l'Analyse de la Réponse Fréquentielle (FRA)

L. Bouchaoui*, K. E. Hemsas*, S. Belahneche**

*LAS, Université Ferhat Abbas, Sétif

** Laboratoire d'Analyse Régionale - Sonelgaz- GRTE – SETIF

Abstract- Power transformers constitute the heart of the electricity generation, transmission, distribution networks are, since long is the object of great interest. The frequency response analysis (FRA) is a among diagnosis tool for power transformers condition assessment. It is very sensitive to any deformation or geometrical shifting within the active parts of power transformers. In more it is non destructive method and can be employed like an autonomous tool to detect a windings damages , or like a tool for diagnosis combined with other tests (for example, power factor , leakage reactance, winding resistance or dissolved gases analysis).In this article present a study on use of FRA techniques.

Mots clés – Transformateur de puissance, FRA, diagnostic.

L'application pratique de la technique FRA pour détecter les dommages mécaniques dans un transformateur dépend de sa sensibilité à tout changement dans les inductances et les capacités réparties. Le transformateur peut être modélisé par une chaîne d'inductances à la terre et réunis par leurs capacités parasites entre les enroulements. Le circuit équivalent est utile dans la modélisation de la sensibilité de la FRA au changement dans les enroulements.

L'interprétation de l'approche FRA basée sur la modélisation de circuit du transformateur à pour but de représenter avec précision le comportement d'un transformateur sur toute la gamme de fréquence.

I. INTRODUCTION

L'apparition d'un défaut dans le réseau électrique provoque la circulation de forts courants de court circuit dans le transformateur, induisant des contraintes dans ce dernier. Ces contraintes se traduisent par des forces axiales et radiales appliquées sur les enroulements du transformateur.

La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à des fortes sollicitations mécaniques. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux.

Les techniques classiques de surveillance de l'état telles que l'analyse des gaz dissous (AGD), la mesure de la capacitance et du facteur de puissance ainsi que le test de la réactance de fuite sont incapables de détecter les déformations mécaniques les plus mineures qui se développent par la suite en défauts diélectriques ou thermiques.

Ainsi, la technique FRA a le potentiel pour détecter des problèmes d'enroulement. C'est la technique la plus efficace actuellement disponible qui n'exige pas d'ouvrir le transformateur en raison de sa sensibilité élevée pour détecter les défauts. Cette méthode est basée sur le concept du changement géométrique dans les enroulements en raison de la déformation et des déplacements causés par une modification dans les impédances de l'enroulement du transformateur et par conséquent d'une modification de sa réponse en fréquence. L'impédance du transformateur de puissance est composée d'une configuration complexe faite de résistances, inductances et capacités (circuit RLC).

II. ANALYSE DE LA REPOSE EN FREQUENCE (FRA)

A. Définition :

L'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) est un outil qui peut donner une indication de mouvement de noyau ou d'enroulement dans les transformateurs. Ceci est fait en effectuant une mesure simple, tout en regardant a quel point un enroulement de transformateur peut transmettre un signal de basse tension qui varie en fréquence. Tout cela est lié à son impédance, dont les éléments capacitifs et inductifs sont intimement distribués dans la construction physique du transformateur. [1]

Les changements de la réponse en fréquence mesurée par des techniques fra peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être ensuite identifiée et analysée. [2]

B. Quand faut-il faire un test FRA ?

Les applications typiques de la mesure de la FRA sont :

- Contrôle du transformateur après le test en court-circuit.
- Vérification de l'intégrité des transformateurs après un transport.
- Evaluation de l'état d'un transformateur ayant été soumise à des courants de défaut transitoires élevés
- mesures de diagnostic de routine.
- diagnostic consécutif à une alarme du transformateur ou un déclenchement de protection

- test consécutif à des changements significatifs des valeurs contrôlées en ligne (ex : gaz dissous).
- inspection approfondie consécutive à l'observation de résultats de tests inhabituels.
- Après un séisme.
- Recherches scientifiques. [3], [4]

C. Méthodes d'interprétation de FRA:

L'approche FRA est une méthode comparative, c'est-à-dire qu'elle évalue l'état du transformateur en comparant l'ensemble des résultats de la FRA à des empreintes de référence. Trois méthodes sont généralement employées pour évaluer les traces mesurées basées respectivement sur des comparaisons:

- Dans le temps : les résultats de FRA sont comparés aux résultats précédents obtenus sur le même transformateur. (empreinte digitale).
- Par type : comparaison à des transformateurs identiques. (frères).
- Entre phases: les résultats de la FRA d'une phase sont comparés à ceux des autres phases du même transformateur. [3]

III. DÉTECTION DE DÉFAUTS PAR FRA

L'approche FRA est capable de détecter un certain nombre d'état de défauts, à la fois mécanique et électrique. Le principal rôle de FRA est de détecter des défauts mécaniques, qui ne peuvent être détectés par d'autres mesures. Les principaux défauts détectés par FRA sont:

- Déformation d'un enroulement (axiale et radiale).
- Movement et déplacement d'enroulement haute et basse tension.
- Effondrement partiel d'un enroulement.
- Mouvement du circuit magnétique.
- Rupture de spires et desserrage de l'enroulement de la culasse.
- Court-circuit ou circuit ouvert d'enroulement.
- Mauvaise connexion de prise de terre de la cuve du transformateur.
- Problèmes de connexion interne.

Cependant, La mesure par FRA est souvent la seule méthode qui peut détecter les mouvements axiaux d'enroulements.

Elle détecte également les mouvements radiaux, qui peuvent être aussi vérifiés par les essais de réactance de fuite. Il est utile de mettre en corrélation les deux méthodes pour augmenter la précision du résultat. Cela est également vrai pour les autres défauts, notamment mécanique. [5]

IV. FONCTION DE TRANSFERT D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE

La FRA est généralement appliquée à un réseau complexe d'éléments passifs. Un transformateur est considéré comme un réseau complexe de composants RLC, qui est représenté par trois types d'éléments, des résistances, d'inducteurs et des condensateurs. Comme un réseau de distribution contient un nombre infini de petits composants RLC, Les trois éléments sont utilisés pour représenter la résistance des enroulements de cuivre, l'inductance des bobines d'enroulement et la capacité des couches d'isolation entre les bobines, entre un enroulement et un noyau, entre un noyau et la cuve, et encore entre la cuve et un enroulement, etc. L'objectif principal de la FRA est de déterminer comment l'impédance d'un transformateur d'essai se comporte sur une gamme de fréquences appliquées. La fonction de transfert d'un réseau RLC est le rapport de sortie et d'entrée de la réponse en fréquence, lorsque les états initiaux d'un tel réseau sont égaux à zéro. La relation entre phase et l'amplitude peut être extraite à partir des sorties de la fonction de transfert. L'idée de l'application de la FRA pour l'évaluation de l'état d'enroulement du transformateur est basée sur le fait que le déplacement ou la déformation d'enroulement change les propriétés géométriques, qui sont liées à ses paramètres capacitatives et inductives internes. Les changements de ces paramètres modifient par conséquent les réponses de fréquence d'enroulement, qui peuvent être observées par la mesure de la fonction de transfert. [6]. Dans un essai de FRA, c'est le rapport k de la tension de sortie U_{out} sur la tension d'entrée U_{in} , représenté comme réponse logarithmique magnitude-fréquence en dB-Hz:

$$K = \log \left| \frac{U_{out}}{U_{in}} \right| \quad (1)$$

Où $\{$ est la différence de phase entre U_{in} et U_{out} qui représente la phase -réponse en fréquence en Hz:

$$\{ = \angle \left(\frac{U_{out}}{U_{in}} \right) \quad (2)$$

V. PRINCIPE DE LA METHODE

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductance et de résistances donc un circuit très complexe (comme schématisé dans la figure 1) qui génère une empreinte digitale ou une signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe. [4]

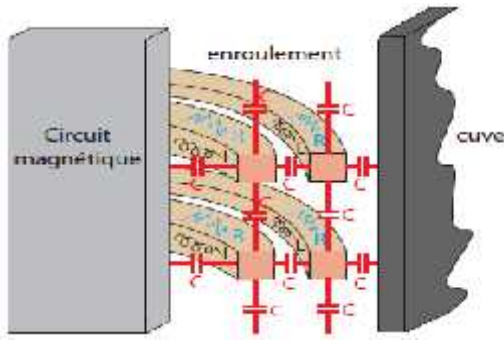


Fig 1: Modèle d'un enroulement de transformateur [3]

Il existe une relation directe entre la configuration géométrique des enroulements et le circuit magnétique à l'intérieur du transformateur de puissance et la distribution des éléments qui le composent tels que : résistances, inductances et capacités. Ce réseau RLC peut être identifié par des fonctions de transfert dépendant de la fréquence. Or le changement dans la configuration géométrique engendre la variation de l'impédance du réseau et de ce fait déplace la fonction de transfert. Les changements dans la fonction de transfert vont révéler un grand rang de modes de défaillance. Donc, l'approche FRA permet la détection des changements dans la fonction de transfert d'un enroulement individuel à l'intérieur du transformateur de puissance et par conséquent, indique un mouvement ou une distorsion dans le circuit magnétique et les enroulements de ce dernier.

Le Principe de fonctionnement est d'injecter un signal d'excitation électrique sur l'un des enroulements et de mesurer le signal de réponse sur une large plage de fréquence (Méthode de balayage en fréquence). Le rapport de ces deux signaux donne la réponse exigée. Ce rapport s'appelle la fonction de transfert du transformateur à partir du quel la grandeur et la phase peuvent être obtenues (Figure 2). [1], [3], [5]

VI ZONES DE FREQUENCE D'ANALYSE FRA

Le Tableau .1 montre le domaine d'interprétation de l'approche FRA compte tenu des limites venant de la géométrie des installations d'essai. En règle générale, les spires court-circuitées, l'aimantation et d'autres défauts liés au noyau magnétique altèrent la forme de la courbe aux basses fréquences. Les moyennes fréquences quant à elles représentent des mouvements axiaux ou radiaux de l'enroulement et les hautes fréquences indiquent des défauts liés aux connexions qui relient les enroulements aux traversées et aux changeurs de prise. [1], [3], [5]

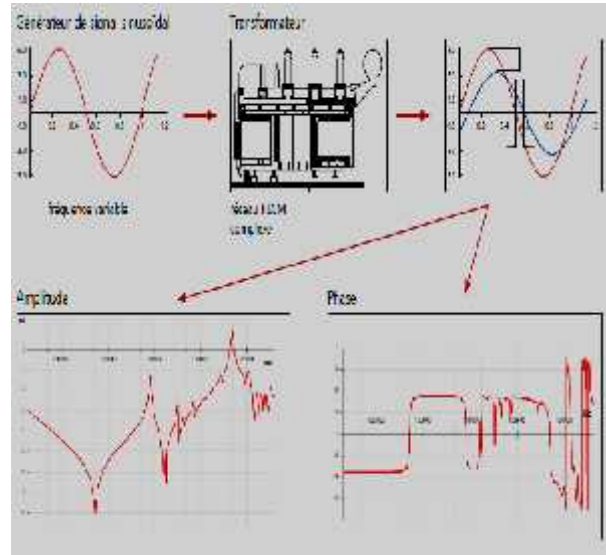


Fig 2: Principe de la FRA [3]

TABEAU .1: DOMAINES TYPQUES D'INTERPRETATION DE L'APPROCHE FRA

$F < 2000 \text{ Hz}$	Déformations du noyau, magnétisme résiduel
$2000 \text{ Hz} < F < 20 \text{ KHz}$	Court-circuit entre spires, circuits ouverts.
$20\text{KHz} < F < 200 \text{ KHz}$	Déplacements relatifs entre les enroulements.
$200\text{KHz} < F < 2 \text{ MHz}$	Déformations Propres de l'enroulement.
$2 \text{ MHz} < F < 10 \text{ MHz}$	Disposition de couplages et câbles de mesure.

I. ALGORITHME D'ANALYSE :

Le logiciel FR Analyser analyse les résultats du test en calculant la différence de deux traces de test comparables (par exemple : la trace du test actuel et la trace du test de référence) et détermine les facteurs d'évaluation d'enroulement

L'analyse et l'évaluation des enroulements de transformateur à l'essai sont basées sur l'un d'algorithmes le plus utilisé décrit ci-dessous [3]:

A. LA NORME DL/T911-2004

DL/T911-2004 est une norme d'analyse de la réponse en fréquence largement répandue dans la République Populaire de Chine. L'algorithme évalue la similarité de deux réponses en fréquence d'enroulement de transformateur (traces de trace) en calculant les facteurs d'évaluation d'enroulement RLF, RMF et RHF.

TABEAU II.2 : FACTEURS D'ÉVALUATION D'ENROULEMENT D'APRÈS LA NORME DL/T911-2004

FACTEUR D'ÉVALUATION	PLAGE DE FRÉQUENCE
----------------------	--------------------

D'ENROULEMENT	
RLF	1KHZ.....100KHZ
RMF	100KHZ.....600KHZ
RHF	600KHZ.....1MHZ

En utilisant les facteurs d'évaluation d'enroulement ci-dessus, les conditions de déformation d'un enroulement de transformateur se définissent ainsi par le Tableau II.3 :

TABLEAU II.3: EVALUATION D'ENROULEMENT D'APRÈS LA NORME DL/T911-2004

Degré de déformation d'enroulement	Facteurs d'évaluation d'enroulement
Enroulement normal	RLF 2,0 ET RMF 1,0 ET RHF 0,6
Légère déformation	2.0 > RLF 1,0 OU 0,6 RMF < 1,0
Déformation évidente	1.0 > RLF 0,6 OU RMF < 0,6
Grave déformation	RLF < 0,6

II. MISE EN ŒUVRE DE LA FRA :

Ce test a été effectué en utilisant le FR Analyzer d'omicron appliqué sur trois phases cotés primaire et secondaire avec différentes positions de régulateur en charge du transformateur Poste el Eulma 120MVA. Des mesures FRA a été introduite à Sonelgaz GRTE de Sétif en 2010 et qui a donnée les réponses en fréquence présentées dans les figures 3 et 4 suivantes :

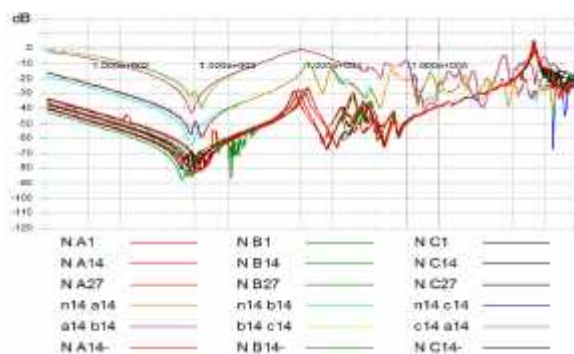


Fig 3 : Amplitudes des réponses en fréquence des enroulements [7]

Visuellement on remarque sur les courbes précédentes une nette déformation de la phase B dans la plage des fréquences inférieures à 2 KHz

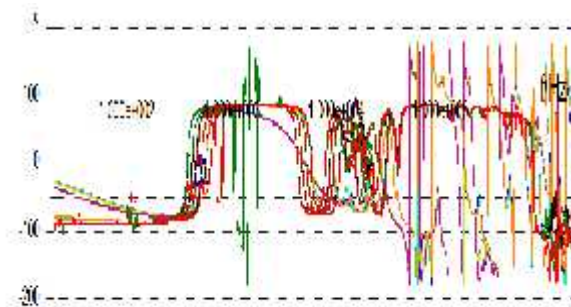


Fig 4 : Phases des réponses en fréquence des enroulements [7]

1. Comparaison entre la phase A et B

D'après le logiciel d'analyse d'omicron la comparaison entre les deux phases A et B, position 1 de régulateur en charge, nous donne les résultats suivants (figure 5 et 6) :

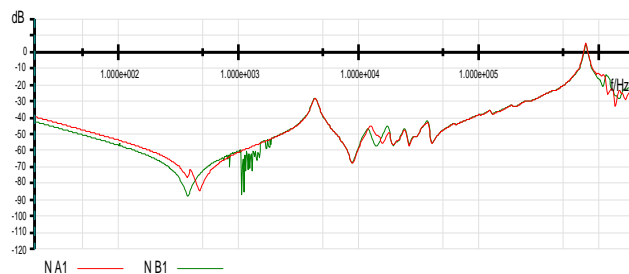


Fig 5 : Comparaison d'amplitudes des réponses en fréquence des enroulements A et B [7]

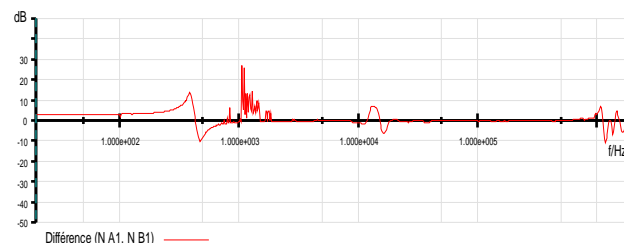


Fig 6 : différences de phase des réponses en fréquence des enroulements A et B [7]

L'interprétation des résultats est donnée automatiquement par le logiciel en utilisant la norme chinoise DL/T911-2004 : Le logiciel indique une **Légère déformation**. Les valeurs des facteurs d'évaluation d'enroulement sur les différentes plages de fréquence sont les suivantes :

- Basse fréquence 1kHz – 100 kHz 1.64
- Moyenne fréquence 100kHz – 600 kHz 3.69
- Haute fréquence 600kHz – 1 MHz 2.07

2. Comparaison entre les phases B et C

D'après le logiciel d'analyse d'omicron la comparaison entre les deux phases, position 1 de régulateur en charge, nous donne les résultats représentés sur les figures 7 et 8 suivantes :

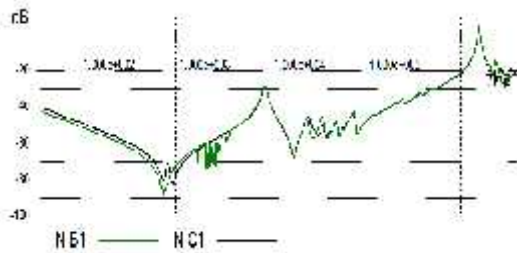


Fig 7 : Comparaison d'amplitudes des réponses en fréquence des enroulements B et C [7]

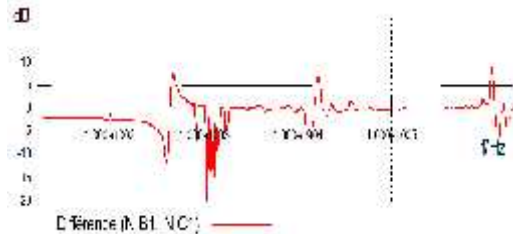


Fig 8 : Différence entre les réponses en fréquence [7]

L'interprétation des résultats est donnée automatiquement par le logiciel en utilisant la norme chinoise DL/T911-2004 : Le logiciel indique une **Légère déformation**. Les valeurs des facteurs d'évaluation d'enroulement sur les différentes plages de fréquence sont les suivantes :

- Basse fréquence 1kHz – 100 kHz 1.63
- Moyenne fréquence 100kHz – 600 kHz 4.04
- Haute fréquence 600kHz – 1 MHz 2.72

3. Comparaison entre la phase A et C :

D'après le logiciel d'analyse d'omicon la comparaison entre les deux phases, position 1 de régulateur en charge, nous donne les résultats indiqués sur les figures 9 et 10 suivantes :

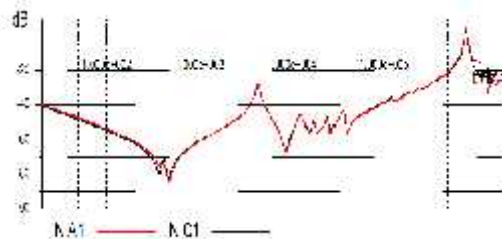


Fig 9 : Comparaison d'amplitudes des réponses en fréquence des enroulements A et C [7]

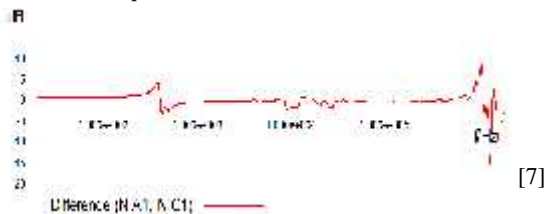


Fig 10 : Différence entre les réponses en fréquence [7]

L'interprétation des résultats est donnée automatiquement par le logiciel en utilisant la norme

chinoise DL/T911-2004 : Le logiciel indique **enroulement normale**. Les valeurs des facteurs d'évaluation d'enroulement sur les différentes plages de fréquence sont les suivantes :

- Basse fréquence 1kHz – 100 kHz 2.57
- Moyenne fréquence 100kHz – 600 kHz 3.65
- Haute fréquence 600kHz – 1 MH 1.84

D'après les résultats obtenus des trois comparaisons entre les phases, on peut déduire que le problème réside dans la phase médiane B dans la plage de fréquence entre 20 Hz et 1.9 KHz ce qui correspond a une déformation au niveau de circuit magnétique d'après le tableau 1.

III. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une étude basée sur la méthode d'analyse de réponse en fréquence (FRA) pour le diagnostic de transformateur de puissance est présentée.

D'abord, une synthèse sur la méthode de la FRA sa définition, les défauts qui peuvent être détectés par cette méthode ainsi que le principe de la méthode seront aussi détaillés. Ensuite nous allons présenter et interpréter les résultats d'un test de mesure FRA effectué dans le laboratoire de Sonelgaz sur un transformateur de puissance en utilisant le FRAnalyzer d'omicon.

Nous perspectives, on doit examiner les modèles de transformateurs à haute fréquence pour être utilisée avec la classification et l'interprétation de FRA.

La comparaison de la FRA de plusieurs modèles avec la signature effective de FRA doit être étudiée et élaborée. Entre autre, on vise à utiliser l'intelligence artificielle spécialement les RNA pour estimer la fonction transfert de l'enroulement du transformateur et par conséquent de nous délimiter les zones de réponse qui nous permettent un diagnostic plus précis.

IV. BIBLIOGRAPHIES :

- [1] Charles Sweetser, B.Sc., M.Sc. Dr. Tony McGrail, 'Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineering' Version 1.0, 01/2003
- [2] Cigre, 'mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)' Working Group A2.26 .2007
- [3] Omicron electronics 'FRAnalyzer Manuel d'utilisation' Référence -VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006.
- [4] Megger 'FRAX 101 Analyzeur de réponse de la fréquence de balayage' FRAX101_DS_fr_V01
- [5] Bergman, C. 'SFRA- an application that creates customer value?' Thesis Department Electrical Engineering Sweden, 2006.
- [6] W. H. Tang _ Q. H. Wu 'Condition Monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence' The University of Liverpool Brownlow Hill. Book 2011
- [7] Rapport FRA des postes, laboratoire régionale d'analyse Sonelgaz GRTE SETIF.