

Modélisation des transformateurs de puissance

Sylvian Wenger

Travail de diplôme (2004)

L'objectif de ce travail est la modélisation des transformateurs de puissance sur la base de l'analyse de la réponse fréquentielle. Cette modélisation doit couvrir la bande de fréquence de 10 Hz à 10 MHz et permettre des analyses de sensibilité par simulation.

Nous avons commencé à traiter ce sujet en étudiant les modèles proposés dans la littérature. Nos investigations ont porté sur deux modèles :

- Le modèle de D. A. Douglass.
- Le modèle de J. Pleite.

Le modèle de D. A. Douglass est un modèle d'ordre faible qui ne peut pas représenter l'enroulement d'un auto-transformateur de manière complète. Cependant ce modèle reste très intéressant du point de vue de son élaboration.

Le modèle de J. Pleite est un modèle à géométrie variable. Il est basé sur une mise en série de cellules élémentaires, où le nombre de cellules est égale au nombre de résonances que l'on désire modéliser. L'avantage de ce modèle est qu'il est facile à mettre en oeuvre et représente certaines caractéristiques de l'enroulement. Le désavantage vient des hypothèses de travail de ce modèle :

- Une cellule est opaque à une fréquence de résonance.
- Cette cellule est transparente pour toutes les autres fréquences.

Ces hypothèses font que le modèle est à mi-chemin entre le modèle mathématique et le modèle électrique.

La modélisation mathématique des enroulements de transformateur peut être réalisée aisément par deux méthodes :

- La méthode *invfreqs*, basée sur la méthode des moindres carrés non-linéaire
- La méthode du *vector fitting*, dite *vectfit*, basée sur une méthode non-linéaire de relocalisation des pôles.

La comparaison de ces deux méthodes est effectuée sur des fonctions de transfert simples et des mesures réalisées sur un auto-transformateur. Cette comparaison nous a permis de déterminer que *vectfit* est sans aucun doute la méthode la plus puissante pour évaluer une fonction de transfert.

Vectfit permet d'estimer une fonction de transfert complexe par une somme de fractions partielles que l'on peut réécrire comme un quotient de polynôme. Nous avons réalisé cette estimation pour un enroulement d'un auto-transformateur dans deux cas de figure.

- Transformateur sans la cuve (Isolation dans l'air).
- Transformateur avec la cuve (Isolation dans l'huile).

Dans le cas du transformateur isolé dans l'air, il a été possible de trouver une estimation correcte pour l'ensemble de la plage de fréquences utiles. Par contre, dans le cas de l'isolation dans l'huile, cela n'a pas été possible. La raison est probablement le nombre très important de résonances présentes dans la fonction de transfert. Afin de

trouver tout de même une modélisation pour le transformateur plongé dans l'huile, nous avons décomposé la fonction de transfert en trois parties :

- La gamme “basses fréquences” pour $f \leq 1kHz$.
- La gamme “moyennes fréquences” pour $1kHz \leq f \leq 80kHz$.
- La gamme “hautes fréquences” pour $80kHz \leq f$.

A l'aide de ces estimations, nous avons tenté de trouver un circuit électrique équivalent à l'enroulement du transformateur. La première idée est de pré-définir un schéma équivalent. Afin de pouvoir identifier un modèle qui possède une fonction de transfert du même ordre que la fonction de transfert estimée, nous avons défini des modèles sous forme de mise en série de cellules élémentaires. A l'aide de la matrice de chaîne, nous pouvons déduire l'ordre de la fonction de transfert d'un système composé d'un nombre quelconque de cellules. Ainsi il nous est possible de connaître le nombre de cellules par rapport à l'ordre de la fonction de transfert estimée. L'identification des valeurs des éléments du circuit équivalent est réalisée par une identification terme à terme des coefficients des polynômes du modèle et ceux des polynômes estimés. Malheureusement dans les exemples que nous avons traités, cette identification a toujours été mal conditionnée mathématiquement.

Afin de voir si un modèle peut présenter de meilleures disposition à l'identification, nous avons essayé de modéliser l'enroulement avec des circuits constitués d'une seule cellule, donc des modèles d'ordre faible. Le premier pas de cette méthodologie est de forcer l'ordre de l'estimation. Cet ordre doit toujours être égal à l'ordre du modèle. En testant divers modèles, nous n'avons pas trouvé de cellule élémentaire qui puisse satisfaire à l'identification. Cependant, nous avons réussi à modéliser la partie “basses fréquences” (voire “très basses fréquences”) de l'enroulement isolé dans l'air. Pour l'isolement dans l'huile, la fonction de transfert est moins bien modélisée. Cela est dû au fait que nous n'avons pas réussi à trouver une cellule qui tienne compte des capacités contre terre et qui soit valable pour l'identification.

La dernière tentative de modélisation que nous avons tenté s'inspire de la synthèse des filtres LC. Cette méthode impose certaines hypothèses :

- L'enroulement doit être non-dissipatif.
- L'enroulement doit être un filtre passe-bas.

Aucune de ces deux hypothèses n'est vérifiées. Cependant, nous avons négligé la première hypothèse et nous allons utiliser les méthodes de normalisation des filtres pour transformer la fonction de transfert de l'enroulement en une fonction de transfert du passe-bas équivalent. Malheureusement cette tentative ne s'est pas avérée fructueuse et la synthèse avec la fonction de transfert de l'enroulement ne donne pas de résultat. En fait elle donne des valeurs négatives pour les éléments du circuit.

Enfin, nous avons réalisé des mesures sur un système simple, formé d'un seul enroulement sur un noyau ferromagnétique. Les fonctions de transfert mesurées sont d'ordre assez faible, ce qui nous permet de modéliser l'ensemble de la plage fréquentielle utile à l'aide de modèle ne comportant qu'une seule cellule. Nous prouvons ainsi que la méthodologie est applicable à des systèmes caractérisés par des fonctions de transfert d'ordre faible.

Une autre problématique des transformateurs réside dans le diagnostic. Cette problématique serait très nettement plus simple si nous disposions d'un modèle électrique équivalent. Cependant, elle peut être également traitée uniquement grâce

à la fonction de transfert et son estimation. Nous pouvons établir des critères de détection de défaut. Le fonctionnement général de ces critères est basé sur la comparaison entre une nouvelle fonction de transfert et une fonction de référence. Nous pouvons établir deux catégories de critères :

- Les critères directs qui comparent les mesures.
- Les critères indirects qui comparent les évaluations des mesures.

Nous avons généré des défauts sur un modèle simple d'enroulement et nous avons comparé les critères, notamment leurs variations. Cette étude nous permet de considérer la déviation spectrale comme un critère insuffisant pour la détection des défauts. En ce qui concerne les autres critères, cette étude laisse penser qu'ils sont valables, mais il faudrait confirmer ce résultat avec des essais plus réaliste (par exemple sur un transformateur réel).