

基于网络函数的 VFTO 下变压器绕组响应的计算

梁贵书¹, 王晓晖¹, 张喜乐², 崔翔¹

(1. 华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003; 2. 保定天威保变电气股份有限公司, 河北 保定 071000)

Calculating the Response of Transformer Windings under VFTO Based on Network Function

LIANG Gui-shu¹, WANG Xiao-hui¹, ZHANG Xi-le², CUI Xiang¹

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Baoding Tianwei Baobian Electric Co. Ltd., Baoding 071000, China)

摘要: 提出了一种基于网络函数的 VFTO 下变压器绕组响应计算的有效方法。该方法首先由网络分析仪测量得到的散射参数计算所需的电压传输函数, 然后通过矢量匹配法对电压传输函数进行有理函数的拟合, 最后, 利用与拟合的电压传输函数对应的指数形式的激励响应和输入信号进行时域递归卷积, 以获得电压响应。与实测电压响应比较的结果表明: 利用传输函数仿真计算得到的结果与测量结果吻合。这说明该方法简单、准确。

关键词: 快速暂态过电压; 矢量匹配法; 变压器绕组; 递归卷积

中图分类号: TM41

文献标识码: A

Abstract: An efficient method is presented for calculating the response of transformer windings under VFTO based on network function in this paper. Firstly, the voltage transfer functions are calculated from the scattering parameters of each section which is measured by network analyzer. Secondly, the voltage transfer functions are fitted with rational functions by vector fitting codes. Finally, the voltage responses of each section are calculated via recursive convolution using the pulse response and the input signal. They are compared with the measured voltage responses in time domain. The calculated voltages are in agreement with the measured voltages. It shows that the method is simple and correct.

Key words: very fast transient overvoltage(VFTO); vector fitting; transformer windings; recursive convolution

1 引言

GIS 中由于电站结构的小型化和 SF₆ 气体的特殊性质, 隔离开关等操作会引起陡波前过电压(简称 VFTO)和暂态地电位升高等特快速暂态信号^[1]。研究表明, VFTO 是一种瞬时过电压, 通常是单极性的并有叠加振荡, 其波前时间小于 0.1 μs, 总持续时间小于 3 ms, 振荡频率在 30 kHz~100 MHz 之间。这

样陡的电压会对电力设备造成破坏。为了开展 VFTO 对变压器影响的研究, 建立变压器绕组在 VFTO 作用下的等效模型是非常必要的。运用该模型可以通过计算机仿真变压器在 VFTO 作用下绕组内部的波过程, 为防止 VFTO 对变压器的绝缘造成损坏和改进变压器绝缘设计提供理论依据。

目前, 变压器高频模型的建立有两种方法, 一是利用分布参数电路理论建立变压器绕组的多导体传输线模型^[2-4], 这种方法需要根据绕组的具体结构进行复杂的电磁场计算^[5]; 二是采用“黑盒子”技术, 通过测量输入、输出端口之间的频率响应特性来建立它们的传递函数模型, 或直接计算获得传递函数模型。笔者采用第 2 种方法, 首先将绕组看成一个“黑盒子”^[6], 通过实际测量来获得所需的频率特性, 建立它的传输函数模型; 然后通过激励与表征线性模型动态特性的冲激响应的卷积计算得到时域下绕组的电压响应。然而, 普通卷积存在的问题是它必须在整个时间轴上展开, 计算效率低。如果用低阶有理函数近似来代替原来的频域响应, 则可以通过递归卷积^[7]更有效地实现时域模拟。因此, 在建模过程中, 找到一个好的有理函数近似是很重要的。理论上可以通过用有理多项式匹配数据来得到有理函数近似, 但由于固有的病态, 这一方法只局限于对低阶的近似; 而且所得匹配结果中的一些极点是不稳定的。矢量匹配法^[8,9]提供了一种获得有理函数近似式的简单有效方法, 该法可以保证匹配结果中的极点是稳定的。

2 基于散射参数测量的电压传输函数

为了验证笔者提出的方法, 特别制作了图 1 所示变压器绕组线圈模型, 其基本参数列于表 1。绕组的各饼由两板夹紧, 用一个接地的铁桶固定在绕组内部来代替铁心。绕组的下端接地, 上端为输入端, 由上到下各饼序号依次记做 1, 2, 3, …, 18。

测量频率响应的方法主要有两种, 一是扫频法,



图1 变压器绕组模型



图2 测量绕组端口间散射参数的实验装置

表1 变压器线圈的基本参数

线饼数	每饼匝数	导体宽度/mm	导体高度/mm	导体平均长度/(m·匝 ⁻¹)	匝间距/mm	绝缘介电常数
18	10	6.95	11.2	1.482 8	3.00	3.5

二是脉冲响应法。

扫频法是指在被测设备的输入端口用信号发生器施加一系列频率不同的正弦波,用示波器读取该设备的频率特性。目前,由于网络分析仪同时具有产生信号和测量的功能,故可用其完成扫频法。

脉冲响应法是指在被测设备输入端口用信号发生器施加一及时域脉冲波,所加的脉冲应能满足频率范围的需要,用示波器测量输出端口的时域响应,通过傅立叶变换把输入信号和响应信号变换到频域,由此获得频率响应。

笔者采用第1种方法,用4395A网络分析仪测量绕组输入端与各饼之间的散射(S)参数,测量装置见图2。测量频率范围为1 kHz~50 MHz。现以第2饼为例进行原理说明。

设输入端与地构成输入端口,第2饼与地构成输出端口(输出端口处于开路状态),则根据Z参数和S参数之间的关系,由测量得到的S参数 S_{11}, S_{12}, S_{21} 和 S_{22} 表示的 Z_{11} 和 Z_{21} 为:

$$Z_{11} = Z_0 \frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$$

$$Z_{21} = Z_0 \frac{2S_{12}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}$$

其中: Z_0 为测量系统的参考阻抗。因此,由S参数表示的电压传输函数为:

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} = \frac{2S_{12}}{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}$$

式中: s 为复频率。根据上述电压传输函数公式,通过测量得到的S参数计算输入端与第2饼之间的电压传输函数的幅频特性曲线和相频特性曲线分别见图3(a)和图3(b)。

3 基于矢量匹配法的电压传输函数拟合

3.1 矢量匹配法简介

矢量匹配法是B Gustavsen提出的一种稳定、有效的拟合方法。矢量匹配法特别适用于电力系统中有关频变效应的建模,与其它拟合方法相比具有以下几个优点:

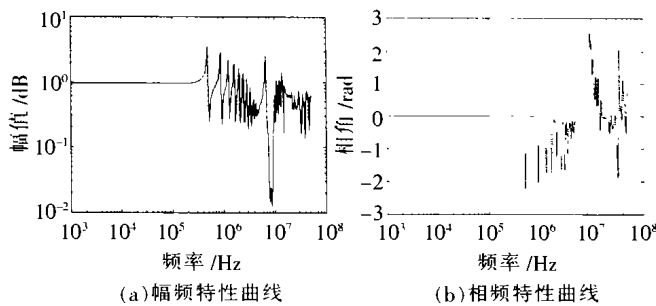


图3 第2饼与输入端之间的电压频率特性曲线

(1)矢量匹配法在原理上通过求解两个线性最小二乘方程组直接寻优,迭代次数少,速度快。

(2)用高阶的有理函数(复频率 s 为变量)在很宽的频率范围内对某一实测频率响应进行拟合时,其它的拟合方法会遇到数值问题,特别是在该频率响应有噪声的情况下问题更为严重,而矢量匹配法不受影响。

(3)矢量匹配法不仅可以使使用实数的极点拟合平滑的曲线,也可以使用复数的极点拟合具有谐振性质的曲线,且不需要预估曲线的零点、极点。

(4)在拟合时可以通过选择拟合条件,保证拟合函数的稳定性。

该方法采用有理函数近似地拟合网络函数 $H(s)$,其部分分式和的形式为:

$$H(s) \approx \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s-a_n} + d + sh$$

式中:常数项 d 和 h 可选择, c_n 和 a_n 分别为留数和极点。近似拟合实现的方法是用一组修正的极点代替初始极点,修正极点的获得是基于线性最小二乘的极点重定位方法,拟合的阶数等于初始极点数。对于拟合有谐振峰值的函数,初始极点选择具有弱衰减的复共轭极点,极点的虚部应覆盖感兴趣的频率范围。每对共轭极点选择如下:

$$a_n = -\alpha + j\beta, a_{n+1} = -\alpha - j\beta, \text{其中: } \alpha = \beta/100$$

在感兴趣的频率范围内,如果要逼近的曲线有 n 个峰值点,则使用的逼近有理函数至少需要有 $2n$ 个极点。

3.2 实测数据的拟合结果

对由测量S参数数据计算得到的电压传输函数,利用矢量匹配法进行有理函数的拟合,拟合的阶数为60阶。为保证拟合出来的电压传输函数的稳定性,选择极点全部位于复平面的左半平面,幅频特性曲线和相频特性曲线的拟合结果分别见图4(a)和图4(b)。可见实测曲线和拟合曲线吻合得很好。

4 时域仿真与实测验证

在输入端加输入脉冲 $u_s(t)$,计算绕组中2,6,10,14饼上的电压。显然,绕组中各饼电压传输函数的准确表示是非常重要的。在1 kHz~50 MHz的频率范围内分别对各饼电压传输函数进行匹配拟和,为

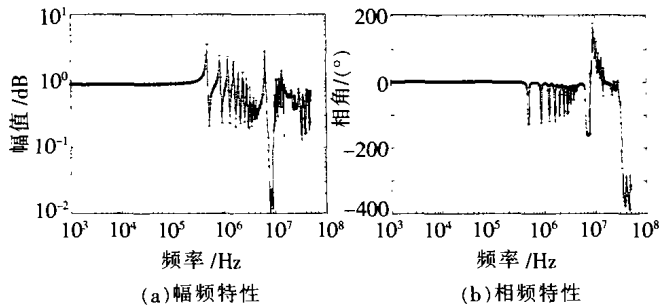


图4 频率特性曲线的拟合结果(实线为实测曲线,点线为拟合曲线)

了减少计算量,根据匹配拟和得到的电压传输函数,利用时域递归卷积计算各饼上的电压。

在输入端加输入脉冲 $u_s(t)$,直接测量各饼的电压,实际测量装置见图5。它由加在线圈输入端的高频脉冲发生器、线圈和测量各饼电压的数字存储示波器(HP54645D)组成。脉冲发生器在空载和变压器线圈为负载时产生的输出电压波形分别见图6(a)和图6(b),上升时间分别为5 ns 和 20 ns。



图5 测量装置

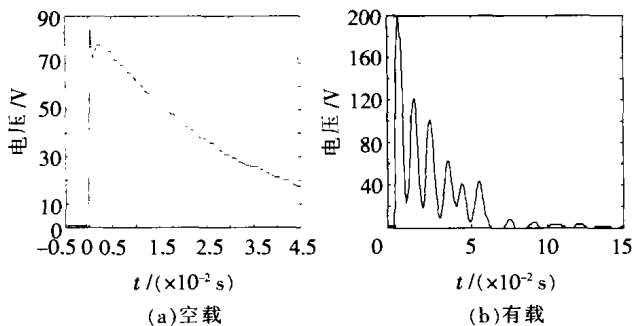


图6 脉冲发生器输出电压波形

当绕组输入端施加图6(b)所示的电压波形时,仿真结果和实际测量得到的各饼电压波形分别见图7和图8。比较可知,利用电压传输函数仿真计算得到的电压波形与测量得到的波形相一致,这表明利用上述方法计算VFTO下变压器绕组的响应是可行的,而且这个模型能够正确地反映时域下的输出情况。

5 结语

提出了利用基于网络分析仪测量计算得到的电压传输函数仿真高频下变压器绕组的电压响应的方法。计算结果与实验中直接测量得到的结果相一致。为了在时域模拟时提高计算效率,基于矢量匹配法用有理函数逼近得到电压传输函数,然后利用递归卷积计算电压的响应。该方法简单、准确、实用。

参考文献:

[1] S Fujita, N Hosokawa, Y Shibuya. Experimental Investigation

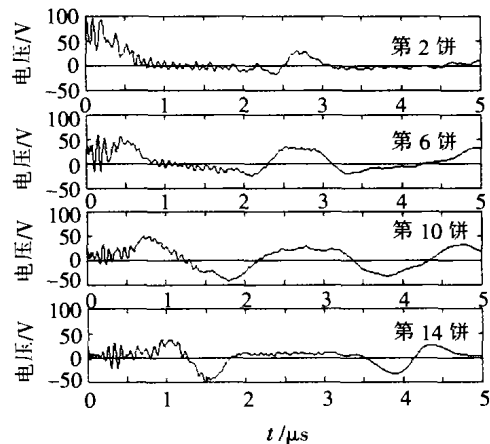


图7 计算得到的各饼电压

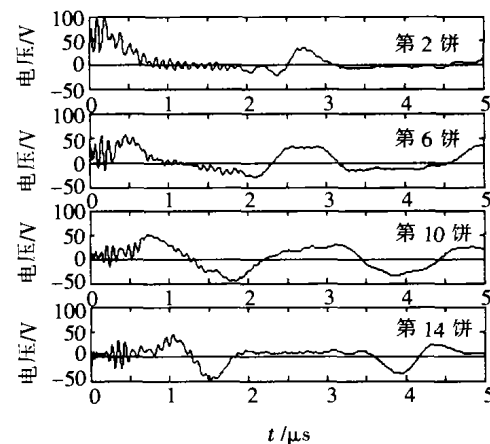


图8 测量得到的各饼电压

of High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Windings[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1 201-1 206.

[2] J Guardado, K Cornick. A Computer Model for Calculating Steep-fronted Surge Distribution in Machine Windings [J]. IEEE Trans. Energy Convers., 1989, 4(1): 95-101.

[3] Y Shibuya, S Fujita, E Tamaki. Analysis of Very Fast Transients in Transformers [J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., 2001, 148(5): 377-383.

[4] M Popov, L van der Sluis, H de herdt, et al. Computation of Very Fast Transient Overvoltages in Transformer Windings[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1 268-1 274.

[5] F de Leon, A Semlyen. Efficient Calculation of Elementary Parameters of Transformers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1992, 7(1): 376-383.

[6] 张重远, 梁贵书, 崔翔. 气体绝缘变电站内PT的特快速瞬态仿真建模[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 84-87.

[7] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.

[8] B Gustavsen. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(3): 1 052-1 061.

[9] B Gustavsen, A Semlyen. Application of Vector Fitting to State Equation Representation of Transformers for Simulation of Electromagnetic Transients [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(3): 834-842.

作者简介:梁贵书(1961-),男,教授,主要研究领域为电网理论及其在电力系统中的应用。