

无源修正技术在互感器宽频等效模型建模中的应用

孟凡超¹, 张绍军²

(1. 河北省电力研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 首先采用一台 HP4395A 型网络矢量分析仪对电压互感器进行了 S 参数的测量, 计算了互感器的 Y 参数。通过矢量匹配拟合得到互感器 Y 参数的频域有理函数表达式, 为了保证所建模型的无源性, 对拟合参数进行了无源修正, 并通过网络综合建立了互感器稳定的 π 型等效电路。最后采用 Matlab/Simulink 软件进行了仿真, 仿真结果表明采用无源修正技术可以保证互感器宽频等效模型的稳定性和精确性。

关键词: 互感器; 宽频建模; 无源修正; 电路综合

A wide frequency circuit model for convert transformer based on passivity modification

MENG Fan-chao¹, ZHANG Shao-jun²

(1. Hebei Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The S parameter of the convert transformer is measured by the analysis meter of HP4395A. The Y parameter is gotten based on S parameter. The frequency response is approximated with a rational function by vector fitting. And then a passivity modification for the parameter is made in order to make the circuit model passive. The circuit model is gotten by circuit synthesis. Finally, it is simulated by the software of the Matlab/Simulink, the results show that the passivity modification technology can make the model of the convert transformer more stable and perfect.

Key words: convert transformer; wide frequency circuit model; passivity modification; circuit synthesis

中图分类号: TM311 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)19-0015-03

0 引言

在电力系统中, 由电磁兼容引发的问题越来越受到关注^[1]。而气体绝缘变电站 (GIS) 内由开关操作而引发的特快速暂态过电压 VFTO (Very Fast Transient Overvoltage) 对二次设备的干扰就是典型的一例。VFTO 在 GIS 内部的传播会引起暂态地电位升高, 地电位的不均会通过二次电缆的外皮传导耦合到二次设备, 这样一次设备内部的暂态过程会传到二次设备, 干扰它们的正常运行。由于 VFTO 的快速瞬变特性, 所以包含有很高的高频分量, 为了计算 VFTO 对二次设备的影响, 传统的低频和中频模型就己不再适用, 这就需要建立互感器的包括中频和高频的宽频模型。GIS 中的 VFTO 的频率可高达几百兆赫, 但其主要分量在 1 MHz 到 10 MHz 之间, 为了更好仿真计算 VFTO 的影响, 本文取频带宽度为 0.1 MHz 到 50 MHz。

在以往的工作中, 己有基于传递函数而建立的互感器宽频模型, 但这些模型缺少输入输出阻抗, 不能用在电路分析程序中, 所以, 有必要建立互感

器的宽频等效电路模型。在建模过程中, 首先由测量得到的互感器宽频段 S 参数得出互感器的 Y 参数或 Z 参数, 由矢量匹配技术对以上参数矩阵拟合得到其频域有理函数表达式, 然后由网络综合实现电路模型。但直接进行网络综合会出现一个很大的问题, 即网络的无源性问题, 如不能保证网络的无源性, 则仿真结果就不收敛, 建模失败。本文在矢量匹配的基础上对匹配结果进行无源修正, 保证了模型的合理性, 准确性。本文结合一实例对所采用方法进行说明并验证。

1 互感器等值电路

本文用一台 HP4395A 型网络矢量分析仪对一电压互感器进行了 0.1 MHz 至 50 MHz 之间的 S 参数测量并由 S 参数与 Y 参数的关系:

$$Y=[R(E+S)]^{-1}(E-S) \quad (1)$$

得到了互感器的 Y 参数, R 为测量时的端口匹配阻抗矩阵, 均为 50 Ω 。

互感器作为二端口元件, 可以建立其 π 型等效电路模型, 见图 1。

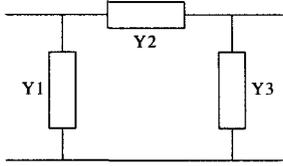


图1 互感器π型等效电路模型

Fig.1 Equivalent π-circuit of the convert transformer

$$Y1 = y11 + y12 \quad (2)$$

$$Y2 = -y12 = -y21 \quad (3)$$

$$Y3 = y12 + y22 \quad (4)$$

其中: $y11$ 、 $y12$ 、 $y21$ 、 $y22$ 为二端口 Y 参数中的元素。图2为 Y 参数中各元素幅频特性,并对其进行矢量匹配,匹配阶数为50阶。图3为相应的相频特性。因 $y11$ 和 $y22$ 无论是幅频特性还是相频特性都很接近,所以在图中被标注在一起。当匹配阶数为50阶时,匹配结果和测量值已经吻合很好。关于矢量匹配技术,可以参阅文献[3]及其它资料。

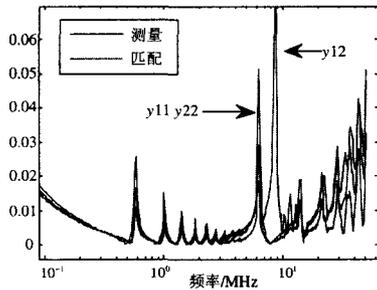


图2 矢量匹配幅频特性

Fig.2 Amplitude frequency characteristics by vector fitting

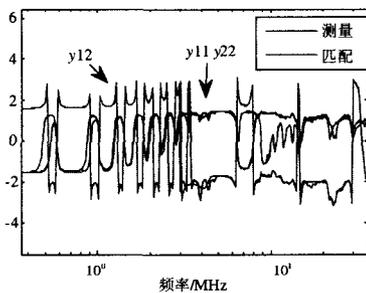


图3 矢量匹配相频特性

Fig.3 Phase frequency characteristics by vector fitting

2 无源修正

对于频域响应中的离散点,如以上的 S 参数和由此得到的 Y 参数,利用矢量匹配技术可以将其拟合为以下简单的有理函数和的形式:

$$f(s) = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{s - a_i} + d + hs \quad (5)$$

其中: s 为复频率, c_i 和 a_i 为相应的留数和极点, N 为匹配的阶数, d 和 h 为常数项。在矢量匹配的应用中,常数项是可以选择有无的,匹配的阶数也是根据需要的精度主观确定的。本文取常数项 h 不存在,匹配阶数为50阶。对 $y11$, $y12$, $y22$ 进行拟合时,为了建模的方便,需要使它们有相同的极点,而留数则是分别独立的。

承接上面所作的矢量匹配结果,一般情况下即可利用网络综合去实现电路,但对于等效模型的建立来说,所建模型可能是不稳定的,不符合无源的要求,对于一个无源网络来说,其 Y 矩阵或 Z 矩阵必须满足以下两个条件:

- (1) 函数 $Y(s)$ 应为解析。
- (2) $\text{Re}Y(s) \geq 0$ 。

第一个条件的实质是要求极点的实部必须小于0,在矢量匹配的过程中,这个条件已经自动得到满足。第二个条件可以简单作如下证明:

对于一个任意端口的网络,各端口输入的总的平均功率不应为负值。

$$\begin{aligned} P &= \text{Re} \sum_{k=1}^N U_k^* I_k = \text{Re} \sum_{k=1}^N U_k^* (Y U_k) = \\ &= \sum_{k=1}^N \text{Re}(U_k^* Y U_k) = \sum_{k=1}^N U_k^* \text{Re}(Y) U_k = \\ &= \sum_{k=1}^N U_k^* \left[\frac{1}{2} (Y^+ + Y) \right] U_k \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中: Y^+ 为 Y 的转置共轭矩阵。

令 $Y_H = \frac{1}{2} (Y^+ + Y)$, 则 Y_H 应是非负定的 Hermite 矩阵,同时 Y 的特征值实部非负。

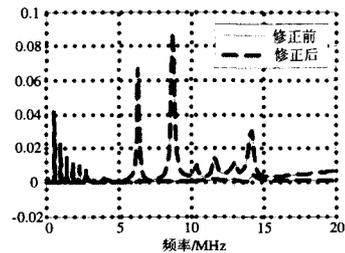


图4 建模所在频段上 Y 矩阵特征值实部

Fig.4 Eigenvalue's real part of Y matrix in model frequency

为了保证无源性,文献[3]提出了一种修正方法,即在约束条件(7)下解方程(8),对由矢量匹配拟合出来的结果进行修正从而保证系统的无源性。

$$\text{eig}(\text{Re}(Y + \sum_{i=1}^N \frac{\Delta c_i}{s - p_i} + \Delta d)) \geq 0 \quad (7)$$

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta c_i}{s - p_i} + \Delta d \cong 0 \quad (8)$$

图 4 即为在所频段上 Y 矩阵特征值的实部, 基本上全大于 0, 图 5 为局部放大, 可以清楚的看到在一些频段修正前小于 0 而经过修正后大于等于 0。

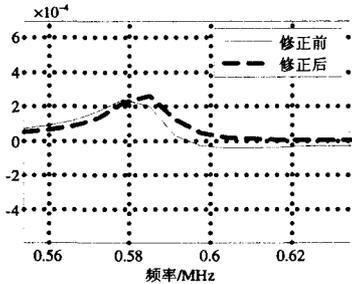


图 5 Y 矩阵特征值实部局部放大

Fig.5 Magnified part of the eigenvalue's real part of Y matrix

3 网络综合

由修正后的数据进行网络综合, 可参阅文献 [4]。式 (5) 中留数 c_i 和极点 a_i 既可以是实数, 也可以是共轭复数对, d 和 h 为实数, N 为极点总数, 假设有 K 对共轭复数极点和 $N-2K$ 个位于左半平面的实极点, 复数极点留数可表示为:

$$\left. \begin{aligned} a_{2n-1} &= -p_m + jp_{in} \\ a_{2n} &= -p_m - jp_{in} \end{aligned} \right\} n=1, 2, \dots, k \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} c_{2n-1} &= -c_m + jc_{in} \\ c_{2n} &= -c_m - jc_{in} \end{aligned} \right\} n=1, 2, \dots, k \quad (10)$$

则式 (5) 可改写为:

$$f(s) = \sum_{n=1}^k \left(\frac{2c_m s + 2c_m p_m - 2p_{in} c_{in}}{s^2 + 2p_m s + p_m^2 + p_{in}^2} \right) + \sum_{n=2k+1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + hs = \sum_{n=1}^k f_{1n}(s) + \sum_{n=2k+1}^N f_{2n}(s) + f_{3n}(s) \quad (11)$$

对 $f_{1n}(s)$ 可得对应电路模型如图 6。

$$R_{1n} = \frac{p_m^2 + p_{in}^2}{2(c_m p_m - c_{in} p_{in})} \quad R_{2n} = \frac{2p_m^2}{c_m p_m + c_{in} p_{in}}$$

$$L_{1n} = \frac{p_m}{c_m p_m - c_{in} p_{in}} \quad L_{2n} = \frac{p_m}{c_m p_m + c_{in} p_{in}}$$

$$C_{1n} = \frac{c_m p_m - c_{in} p_{in}}{(p_m^2 + p_{in}^2) p_m} \quad C_{2n} = \frac{c_m p_m + c_{in} p_{in}}{(p_m^2 + p_{in}^2) p_m}$$

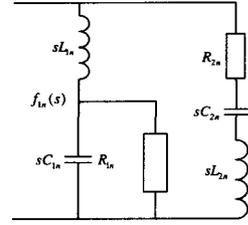


图 6 对应于 $f_{1n}(s)$ 的电路模型

Fig.6 Circuit for the formula $f_{1n}(s)$

对 $f_{2n}(s)$, $f_{3n}(s)$ 可得对应电路模型见图 7。

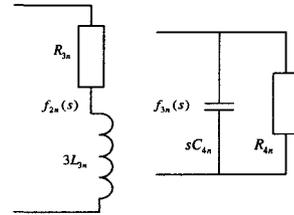


图 7 对应于 $f_{2n}(s)$, $f_{3n}(s)$ 的电路模型

Fig.7 Circuit for the formula $f_{2n}(s)$, $f_{3n}(s)$

$$R_{3n} = -a_n / c_n \quad R_{4n} = 1/d$$

$$L_{3n} = 1/c_n \quad C_{4n} = h$$

由于 Y 矩阵各元素在矢量匹配的时候选择有相同的极点, 所以可以很方便地由式 (2~4) 得 π 型等效电路中各元件的表达式, 由以上所介绍的网络综合方法即可得所求电路模型。

4 仿真结果

由以上结果, 在 Simulink 环境下仿真计算, 结果如图 8, 可以看出, 结果收敛并和测量值有较好的吻合, 证明以上方法的正确性及无源修正的必要性。

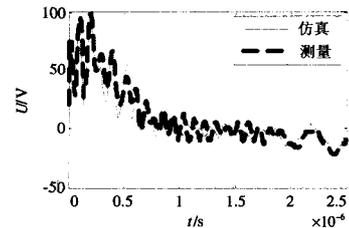


图 8 仿真和测量对比

Fig.8 Comparison of measurement and simulation

5 结论

本文在矢量匹配的基础上, 对匹配结果进行了

(下转第 52 页 continued on page 52)

SHU Hong-chun, XIAO Bai. A Transient-based Study of Fault Line Selection for Single-phase Faults on Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 58-61.

[5] 陈志亮,范春菊.基于 5 次谐波突变变量的小电流接地系统选线[J]. 电力系统及其自动化学报,2006, 18(5):37-41.

CHEN Zhi-liang, FAN Chun-ju. Fault Line Selection for Small Current Neutral Grounding System based on the Fifth Harmonic Current Mutation in Distribution System[J]. Proceedings of CUS-EPSS,2006,18(5):37-41.

[6] 蔡旭,刘勇,胡春强,等.新型偏磁式谐振接地与保护[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):44-49.

CAI Xu, LIU Yong, HU Chun-qiang, et al. New Resonance Earth System with Magnetic Bias and Its Protection[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(6):44-49.

[7] 戴剑锋,张艳霞,侯喆.小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J].电网技术,2004, 28(3):43-47.

DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia, HOU Zhe. Application of Wavelet Reconstruction Algorithm in Phase-to-Ground Fault Detection of Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2004, 28(3):43-47.

[8] 齐郑,陈炯聪,杨奇逊.基于小波变换和LMS自适应滤波器的单相接地选线方法[J].电力系统自动化, 2004, 28(9): 58-61.

QI Zheng, CHEN Jiong-cong, YANG Qi-xun. Selection of Single-phase to Ground Fault Line Based on Wavelet Transform and LMS Adaptive Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 58-61.

[9] 陈炯聪,齐郑,杨奇逊.基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J].电力系统自动化,2004, 28(8):88-91.

CHEN Jiong-cong, QI Zheng, YANG Qi-xun. A Fault Line Detection Device for the Non-Solidly Grounded

System Based on Fuzzy Sets Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 88-91.

[10] 尹忠东,刘虹,陈柏超,等.磁阀式可控电抗器的研究[J]. 变压器,1998, 35(7):1-4.

YIN Zhong-dong, LIU Hong, CHEN Bai-chao, et al. A Study on Magnetic Valve Controllable Reactor[J]. Transformer, 1998, 35(7):1-4.

[11] 王坚,卢继平,薛毅.新型小电流接地故障选线装置的设计[J]. 继电器,2004, 32(14):36-40.

WANG Jian, LU Ji-ping, XU Yi. New Design of Fault Line Selection Device for Indirectly Grounding Power System[J]. Relay, 2004, 32(14):36-40.

[12] 潘永刚.小电流接地选线模拟实验系统的研制[D].北京: 华北电力大学,2002.

PAN Yong-gang. Research and Constitution of Simulative Experimental Systems for Small Current Fault Detection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002.

[13] 陈柏超,陈维贤,尹忠东.10kV电网新型自动调谐消弧线圈及控制装置[J].中国电力,1997, 30(9): 70-71.

CHEN Bai-chao, CHEN Wei-xian, YIN Zhong-dong. A New Controllable Arc-Extinguishing Reactor for 10 kV Networks and Its Control System[J]. Electric Power, 1997, 30(9):70-71.

收稿日期: 2008-06-15; 修回日期: 2008-07-15

作者简介:

潘靖(1981-),男,硕士,研究方向为电力系统过电压及抑制; E-mail:panjing11@sohu.com

郝会锋(1978-),男,硕士,研究方向为配电网运行及管理;

何润华(1977-),男,硕士,研究方向为电力电子与FACTS技术。

(上接第 17 页 continued from page 17)

无源修正,应用电路综合的方法实现了电压互感器的π型等值电路。该方法还可用于T型等值电路的建模和电流互感器的建模。由于采用无源修正技术,保证了模型的稳定性,为GIS站内的电磁传导干扰计算打下基础。

参考文献

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

ZHANG Zhong-yuan, LIANG Gui-shu, CUI Xiang. Modeling of Potential Transformers in Gas Insulated Substation for the Very Fast Transient Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(7): 84-87.

[2] Gustavsen B. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3):1052-1061.

[3] Gustavsen B, Semlyen A. Enforcing Passivity for Admittance Matrices Approximated by Rational Functions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 97-104.

收稿日期: 2007-12-19; 修回日期: 2008-02-20

作者简介:

孟凡超(1978-),男,工程师,研究方向为发电机励磁与继电保护; E-mail:mfc@dys.hbpc.com.cn

张绍军(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统电磁兼容。