

电流互感器宽频等效电路模型的分频段建模

陈少伟, 崔翔

(华北电力大学电气工程学院, 河北保定 071003)

Modeling in Different Frequencies for Wide Frequency Equivalent Circuit of Current Transformer

CHEN Shao-wei, CUI Xiang

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘要: 变电站内开关操作时,会在母线上产生包含着很多高频分量的瞬态过电压和过电流。为了预测这种瞬态过程中某一频段对二次回路的传导干扰电流,需要建立变电站内电流互感器各个频段的模型。先用矢量匹配法拟和测量电流互感器所得到的宽频电流传输特性数据,然后在得到传输函数的基础上介绍了一种输入端接电阻的二端口网络综合方法。为了验证该方法的正确性,对一台500 kV的电流互感器用该方法进行了分频段建模,并用Pspice软件对电路模型进行了仿真计算,其结果表明电路模型传输特性和测量得到的电压的传输特性吻合。

关键词: 电流互感器; 瞬态过电流; 网络综合; 分频段建模

中图分类号: TM63

文献标识码: A

Abstract: In substation, the switch operation will cause the fast transient overvoltage and high current including a great deal of high frequency components in the bus bar. In order to predict the current stress in secondary circuits caused by the transient process, the model of current transformer in different wide frequency characteristic is necessary to be set up. In this paper, based on matching vector quantity method, characteristic data of current transformer in wide frequency band is obtained firstly. Then with the transfer function, a synthesis method of two terminal network by means of connecting a resistance at the input terminal is introduced. To verify this method, a model of 500 kV CT in different frequencies has been built. A good simulation result using Pspice has been achieved, and the result shows that the method is accurate.

Key words: current transformer; transient high current; network synthesis

0 引言

电力系统内的电磁兼容问题突出地表现为一次

系统对二次系统的干扰^[1]。大量的研究和实验发现,在空气绝缘变电站内,开关操作是最主要的电磁干扰源,此时会在母线上产生非常复杂且含有丰富高频成分(主要集中在10 MHz)的瞬态电压或电流。瞬态电流会通过电流互感器耦合到二次设备中去,从而对二次设备造成干扰^[2-5]。为了预测某一频段内的干扰电流,需要建立电流互感器各个频段的电路模型。国内对互感器模型的建立已经作了一些研究,但是主要工作是建立电压互感器的模型^[6-7],对于电流互感器的模型研究的较少。

笔者先采用矢量匹配法^[8]对测量得到的电流互感器的宽频传输特性的数据进行了拟和,得到了电流互感器的宽频传输函数,然后将传输函数分成奇、偶两部分,这样对于每一奇函数或偶函数,其零点将只会出现在虚轴上,使得传输函数稳定。最后将奇函数和偶函数转换成与导纳有关的函数,并在输入端接电阻的基础上分别进行建模,最后将得到的奇函数和偶函数的两个电路模型的输入端串联,输出端并联,从而得到电流互感器各个频段的电路模型^[9-12]。

1 网络综合方法

1.1 输入端接电阻的二端口网络 y 参数与电流传输特性的关系

二端口网络的转移函数是表征二端口网络传输性能的重要函数,这些转移函数又可以用网络参数来表示。如图1所示,根据二端口网络的性质,传输函数可表示如下:

$$H_i(s) = \frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{R_1 y_{12}}{1 + y_{11} R_1} \quad (1)$$

1.2 奇、偶电流传输函数的建立

用矢量匹配法对测量电流互感器宽频电流传输

收稿日期: 2005-10-09

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50325723)。

作者简介: 陈少伟(1979-),男,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术。

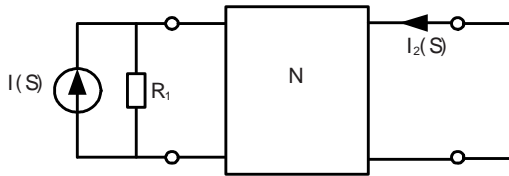


图 1 输入端接电阻的二端口网络

特性所得到的数据进行转换和有理逼近, 其最终结果可表示为如下形式的有理逼近表达式:

$$H_i(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad (2)$$

其中: 极点 a_n 及其对应留数 c_n 既可以是实数, 也可以是共轭复数; d 为实数; N 是极点总数。

式(2)中分子多项式与分母多项式的阶数相同。

将式(2)分解成偶函数和奇函数的和, 可以写成:

$$H_i(s) = \frac{N_e(s) + N_o(s)}{D_e(s) + D_o(s)} = H_e(s) + H_o(s) \quad (3)$$

其中: $H_e(s) = \frac{N_e(s)}{D_e(s) + D_o(s)}$; $H_o(s) = \frac{N_o(s)}{D_e(s) + D_o(s)}$

偶函数 $H_e(s)$ 可写为: $H_e(s) = \frac{N_e(s)/D_o(s)}{1 + D_e(s)/D_o(s)}$, 和

式(1)相对比, 可认为式(1)中的 $y_{12} = N_e(s)/D_o(s)$, $y_{11} = D_e(s)/D_o(s)$, $R_1 = 1$ 。

奇函数 $H_o(s)$ 可以写为 $H_o(s) = \frac{N_o(s)/D_e(s)}{1 + D_o(s)/D_e(s)}$,

和式(1)相对比, 可认为式(1)中的 $y_{12} = N_o(s)/D_e(s)$, $y_{11} = D_o(s)/D_e(s)$, $R_1 = 1$ 。

1.3 电路综合

如果已知只含 LC 元件的二端口网络的 y 参数, 且它们可以表述成以下形式:

$$\begin{cases} y_{11} = \frac{K_{11}^{(0)}}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{2K_{11}^{(i)} s}{s^2 + \omega_i^2} + K_{11}^{(\infty)} s \\ y_{22} = \frac{K_{22}^{(0)}}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{2K_{22}^{(i)} s}{s^2 + \omega_i^2} + K_{22}^{(\infty)} s \\ y_{12} = y_{21} = \frac{K_{12}^{(0)}}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{2K_{12}^{(i)} s}{s^2 + \omega_i^2} + K_{12}^{(\infty)} s \\ K_{11}^{(i)} \quad 0, \quad K_{22}^{(i)} \quad 0 \\ K_{11}^{(i)} K_{22}^{(i)} - (K_{12}^{(i)})^2 \quad 0, \quad i=0, 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (4)$$

式(4)就可以写成如下矩阵形式:

$$Y = Y^{(0)} + \sum_{i=1}^n Y^{(i)} + Y^{(\infty)} \quad (5)$$

式(5)中的矩阵可用图 2 所示的二端口网络实现, 元件均为电感, 其中:

$$\begin{cases} Y_b^{(0)} = \frac{1}{s} (K_{11}^{(0)} - n_0 K_{12}^{(0)}) \\ Y_c^{(0)} = \frac{1}{s} (n_0^2 K_{22}^{(0)} - n_0 K_{12}^{(0)}) \\ Y_a^{(0)} = \frac{1}{s} n_0 K_{12}^{(0)} \end{cases} \quad (6)$$

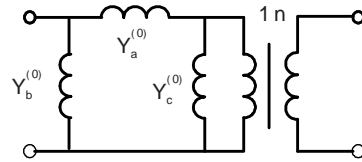


图 2 感性阻抗所对应的模型

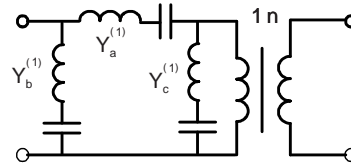


图 3 电感和电容串联所对应的模型

式(5)中的矩阵可用图 3 所示的二端口网络实现, 其中:

$$\begin{cases} Y_b^{(i)} = \frac{2s}{s^2 + \omega_i^2} (K_{11}^{(i)} - n_i K_{12}^{(i)}) \\ Y_c^{(i)} = \frac{2s}{s^2 + \omega_i^2} (n_i^2 K_{22}^{(i)} - n_i K_{12}^{(i)}) \\ Y_a^{(i)} = \frac{2s}{s^2 + \omega_i^2} n_i K_{12}^{(i)} \end{cases} \quad (7)$$

它们均是 LC 串联电路, $1/\sqrt{L_i C_i} = \omega_i$, 其中: $L_i = 1/2K_{11}^{(i)}$; $C_i = 2K_{12}^{(i)}/\omega_i^2$ 。

式(5)中的矩阵 $Y^{(\infty)}$ 可用图 4 所示的二端口网络实现, 元件均为电感, 其中:

$$\begin{cases} Y_b^{(\infty)} = s (K_{11}^{(\infty)} - n K_{12}^{(\infty)}) \\ Y_c^{(\infty)} = s (n^2 K_{22}^{(\infty)} - n K_{12}^{(\infty)}) \\ Y_a^{(\infty)} = s n K_{12}^{(\infty)} \end{cases} \quad (8)$$

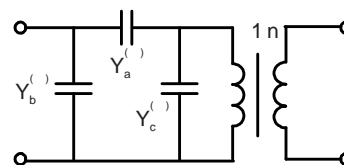


图 4 容性阻抗所对应的模型

上述电路图中变压器的变比 n 的符号应取与 K_{12} 相同, 如果为负值, 可把理想变压器的输出两断点颠倒一下来实现。变比 n 除了满足式(6)~(8)中的条件以外, 还应该满足式(9):

$$\frac{|K_{12}^{(i)}|}{K_{11}^{(i)}} \leq \frac{1}{n} \leq \frac{|K_{22}^{(i)}|}{K_{12}^{(i)}} \quad (9)$$

从式(3)的推导可以得到网络的 y_{11} 和 y_{12} 参数, 由于电流传输函数对 y_{22} 没做要求, 因此可以根据需要选取, 一般取 y_{22} 的极点与 y_{11} 相同, 其对应的留数应满足式(4)中的条件。

在得到上述矩阵表示的电路之后, 将他们并联起来, 即可得到 Y 矩阵所表示的电路模型, 见图 5。从图中可以看出, 理想变压器的采用, 保证了二端口网络并联时连接的正规范性。

同理, 用上述方法得到奇函数的电路模型, 然后

将偶函数和奇函数两个电路模型的输入端串联, 输出端并联, 就可得到该频段的整体电路模型, 见图 6。

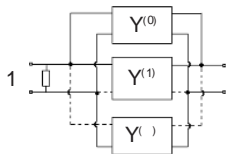


图 5 并联综合电路

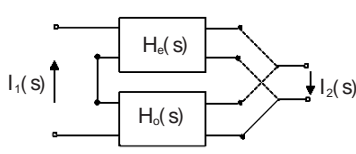


图 6 电流传输函数所对应的电路模型

2 应用实例

对一台 500 kV、额定电流的变比为 1 250 A/1 A 的电流互感器在 10 Hz ~ 20 MHz 频率范围内进行了测量, 并用矢量匹配法对测量数据分两个频段进行了拟和, 得到了该互感器的分频段电流传输函数, 下面用上述的网络综合方法对该 CT 进行分频段建模。

2.1 低频段的电路模型

该频段的频率范围为 10 Hz ~ 826 kHz, 拟和得到的电流传输函数的阶数为 6 阶。用上述方法对该频段的偶、奇传输函数分别进行建模, 得到的元件参数见表 1, 表 2。

表 1 对应低频段偶函数的综合电路的元件

| 感性支路 | | 容性支路 | |
|-----------------------------|---------------|-------|---------------|
| n_0 | 1.188 4 e+003 | n | 5.498 8 e+001 |
| L_b | 5.386 7 e-002 | C_b | 4.119 2 e-012 |
| L_c | 7.080 9 e-003 | C_c | 3.023 7 e-012 |
| L_a | 4.532 8 e-006 | C_a | 2.265 1 e-007 |
| LC 串联支路 $n_1=1.012 9 e+002$ | | | |
| L_b | 6.767 0 e-003 | C_b | 1.008 6 e-011 |
| L_c | 4.873 1 e-002 | C_c | 1.400 6 e-012 |
| L_a | 6.680 6 e-007 | C_a | 1.021 6 e-007 |
| $n_2=3.905 9 e+002$ | | | |
| L_b | 1.530 8 e-002 | C_b | 4.538 1 e-011 |
| L_c | 3.277 3 e-002 | C_c | 2.119 6 e-011 |
| L_a | 3.919 1 e-007 | C_a | 1.772 5 e-006 |

表 2 对应低频段奇函数的综合电路的元件

| LC 串联支路 $n_1=2.346 3 e+002$ | | | |
|-----------------------------|---------------|-------|---------------|
| L_b | 8.715 1 e-003 | C_b | 4.219 0 e-012 |
| L_c | 9.082 2 e-003 | C_c | 4.048 4 e-012 |
| L_a | 3.714 4 e-007 | C_a | 9.899 1 e-008 |
| $n_2=4.365 4 e+001$ | | | |
| L_b | 3.355 2 e-002 | C_b | 3.899 1 e-012 |
| L_c | 2.623 7 e-002 | C_c | 4.986 1 e-012 |
| L_a | 7.685 8 e-007 | C_a | 1.702 1 e-007 |
| $n_3=1.536 2 e+003$ | | | |
| L_b | 3.646 7 e-002 | C_b | 2.774 9 e-010 |
| L_c | 2.118 6 e-003 | C_c | 4.776 4 e-009 |
| L_a | 2.3738 e-006 | C_a | 4.263 0 e-006 |

从电路图中可以看出, 由于电感支路的存在, 保证了瞬态电流中直流分量的通过。图 7 给出了该频

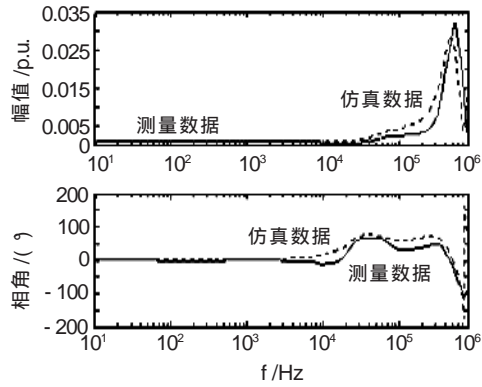


图 7 电压互感器低频段的传输特性

段 PsPice 的仿真结果。

2.2 高频段的电路模型

该频段的频率范围为 826 kHz ~ 20 MHz, 拟和得到的电流传输函数的阶数为 6 阶。用上述方法对该频段的偶、奇传输函数分别进行建模, 得到的元件参数见表 3, 表 4。图 8 给出了该频段 PsPice 的仿真结果。

表 3 对应高频段偶函数的综合电路的元件

| 感性支路 | | 容性支路 | |
|------------------------------|---------------|-------|---------------|
| n_0 | 6.980 7 e+000 | n | 6.310 2 e+000 |
| L_b | 1.743 6 e-002 | C_b | 3.430 3 e-013 |
| L_c | 2.052 1 e-002 | C_c | 3.981 8 e-013 |
| L_a | 2.497 8 e-007 | C_a | 2.164 6 e-008 |
| LC 串联支路 $n_1=-4.250 8 e+000$ | | | |
| L_b | 4.345 9 e-003 | C_b | 1.718 6 e-013 |
| L_c | 2.767 1 e-003 | C_c | 2.699 1 e-013 |
| L_a | 1.022 4 e-007 | C_a | 7.305 3 e-009 |
| $n_2=1.885 1 e+001$ | | | |
| L_b | 1.602 1 e-003 | C_b | 1.035 7 e-011 |
| L_c | 1.407 0 e-003 | C_c | 1.179 3 e-011 |
| L_a | 8.498 6 e-008 | C_a | |

表 4 对应高频段奇函数的综合电路的元件

| LC 串联支路 $n_1=-2.697 9 e+001$ | | | |
|------------------------------|---------------|-------|---------------|
| L_b | 1.289 6 e-003 | C_b | 3.784 3 e-013 |
| L_c | 6.869 3 e-004 | C_c | 7.104 6 e-013 |
| L_a | 4.780 2 e-008 | C_a | 1.021 0 e-008 |
| $n_2=-3.879 9 e+000$ | | | |
| L_b | 1.723 4 e-003 | C_b | 1.123 3 e-012 |
| L_c | 3.321 5 e-003 | C_c | 5.828 5 e-013 |
| L_a | 4.441 8 e-008 | C_a | 4.358 4 e-008 |
| $n_3=1.368 5 e+001$ | | | |
| L_b | 4.952 7 e-003 | C_b | 1.431 9 e-011 |
| L_c | 2.669 6 e-002 | C_c | 2.656 5 e-012 |
| L_a | 3.618 9 e-007 | C_a | 1.959 6 e-007 |

3 结语

首先用矢量匹配法对测量电流互感器宽频特性的数据分频段进行了有理逼近, 得到了各频段的电流传输函数。在此基础上, 将 (下转第 289 页)

表 2 绝缘缺陷实例

| 设备型号 | 线圈端绝缘 tan /% | 支架绝缘 tan /% | 缺陷判断 | 检查结果 |
|-----------|-------------------|-------------|------|-----------|
| JCC1- 220 | 3.5 | 24.6 | 支架不良 | 支架分层 |
| JCC1- 220 | 10.8 | 24.9 | 器身受潮 | 器身下部有水 |
| JCC1- 220 | 15.2 (干燥后 0.3) | 2.0 | 器身受潮 | 上部油柜及低部有水 |

一般采用常规的反接线法, 加压 10 kV, 所测 tan 值应符合绝缘试验规程规定。当 tan 值与出厂值或上一次试验值相比较有明显变化, 或试验电压由 10 kV 升到 $UN/\sqrt{3}$ 时, tan 增量超过 $\pm 0.3\%$, 设备不应继续运行。

电容式电流互感器一般测量一次对末屏间的 tan 值, 加压为 10 kV。当末屏对地绝缘低于 1 000 M 时, 则需测量其末屏对地的 tan 值, 加压 2 kV, 所测值不应大于 2%。当主绝缘电容量与初始值或出厂值差别超过 $\pm 5\%$ 时, 应查明原因。如所测 tan 值超过最大允许值, 存在的缺陷很可能是由于胶垫老化、龟裂及螺丝应力不均, 造成密封不良而引起的绝缘受潮、劣化。

4 结语

随着电网的不断发展, 对供电的连续性、可靠性

提出越来越高的要求。传统的定期停电预防性试验和检修具有一定的盲目性, 存在不能及时发现电气设备潜在绝缘缺陷的不足。设备离线停电试验施加的试验电压最高为 10 kV, 而运行电压远高于此电压, 所以停电试验不能真正反映运行情况下的绝缘状况。在线监测系统[4]逐步得到发展与完善, 利用带电介质损耗测试仪在运行电压下对电气设备进行在线监测, 将是绝缘测试的一个必然发展趋势。在线监测技术已在部分地区开始推广使用, 监测到的实时数据能够为电力设备实现状态检修提供强有力的科学依据。

参考文献:

- [1] 王学勤, 许书燕. 电气试验与油化验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 西南电业管理局试验研究所. 高压电气试验方法 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [3] 湖南电力行业协会. 电力设施试验方法: 输配电部分 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 龙峰, 王富荣, 李大进, 等. 容性设备介质损耗因数在线监测方法及误差分析研究[J]. 电力科学与工程, 2004(2): 19-21.
- [5] 吕延锋, 钟连宏, 王建华. 电气设备绝缘介质损耗测量方法的研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 38-42.
- [6] 一种提高 CVT 绝缘介质损耗及电容量测量准确度的有效方法[J]. 电力设备, 2004, 5(5): 52-55.

(上接第 286 页)

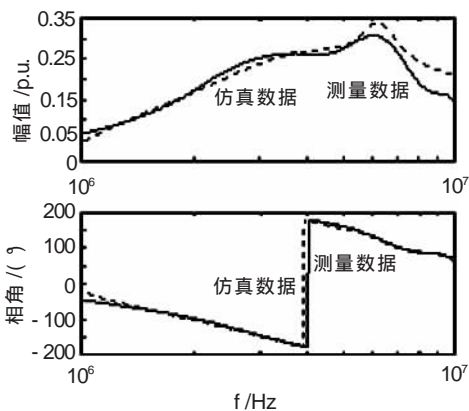


图 8 电流互感器高频段的传输特性

传输函数分成奇、偶两部分, 并将奇函数 y_{11} 或 y_{12} 偶函数转换为 y_{11} 或 y_{12} 参数的函数, 然后采用输入端接电阻的方法对奇函数和偶函数进行了综合, 从而得到了电流互感器不同频段的电路模型。PsPice 的仿真结果表明了该方法的正确性。

参考文献:

- [1] 崔翔. 2002 年国际大电网会议系列报道- 电力系统电磁兼容研究进展[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 1-5.
- [2] 卢铁兵, 崔翔. 变电站空载母线波过程的数值分析 [J]. 中

- 国电机工程学报, 2000, 20(6): 39-42
- [3] 孙竹森, 张禹方, 张广州, 等. 500 kV 变电站电磁骚扰和防护措施的研究(1)[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 16-18
- [4] 孙竹森, 张禹方, 张广州, 等. 500 kV 变电站电磁骚扰和防护措施的研究(2)[J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 26-27
- [5] Wiggins C M, Thomas D E. Transient Electromagnetic inference in substations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(4): 1 869-1 881.
- [6] 吴茂林, 崔翔. 电压互感器宽频传输特性的建模 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 1-5.
- [7] 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, 111.
- [8] Gustavsen B, Semlyen A. 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.
- [9] HO E C. RLC Transfer Functions Synthesis [J]. IEEE Trans. on Circuit Theory, 1956, 3(9): 188-190.
- [10] Darlington S A History of Network Synthesis and Filter Theory for Circuits Composed of Resistors, Inductors, and Capacitors [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, January 1999, 46(1): 4-13.
- [11] 汪文秉, 邹理和. 网络综合原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [12] 颜绍书. 网络综合原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1985.