

电容电压初值对 CVT 铁磁谐振影响的仿真研究

杨育霞,马朝华,许 珉

(郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘要: 电容式电压互感器(CVT)的传统等效电路模型中忽略了电容分压器电容电压初值对等效电路模型的影响,然而在 CVT 暂态时这一因素的影响不能简单地看成是一个误差问题。基于正确的电容分压器的分压比公式,建立了计及电容电压初值的 CVT 完整的等值电路模型。基于此电路模型,利用 Matlab 中的电气系统模块库 PSB 建立了 CVT 铁磁谐振暂态过程的仿真模型。仿真结果表明,在二次侧短路又消除短路这种铁磁谐振激发方式下,不同的短路时刻和消除短路时刻对 CVT 的铁磁谐振过程有影响,甚至出现了持续的振荡过程。在二次电压过零短路同时又在其过峰值时消除短路的情况下,电容电压的初值可以抑制铁磁谐振过电压的持续时间,但电容电压的初值较大时,在系统加压瞬间出现的过电压,可能引起二次侧高速继电保护误动作。

关键词: 电容式电压互感器; 电容分压器; 电容电压初值; 铁磁谐振

中图分类号: TM 864

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0010-04

0 引言

电容式电压互感器 CVT(Capacitor Voltage Transformer)作为一种电压变换元件,在 72.5~800 kV 电力系统中得到普遍应用。在正常状态下,一次系统处于正弦稳态,正确设计和调谐 CVT 的部件可确保二次输出电压的真实性和准确性。然而,由于 CVT 内部存在着电容和非线性电感,当一次系统发生故障时,二次电压不能正确反映一次电压,此时的铁磁谐振现象特别需要关注。发生谐振时,往往产生较高的过电压和较大的过电流,极易使电力系统设备的绝缘破坏。严重情况下还能使设备因过热而爆炸,危及运行人员的人身安全。

到目前为止,国内外对 CVT 铁磁谐振的理论研究^[1]和数值仿真计算^[2-5]都是在 CVT 简化的等值电路基础上进行的。而实际上,CVT 主要是一个电容分压器,电容分压器分压比公式的应用有一定的前提条件。但长期以来,对工程中使用的电容分压器的分压比公式的应用条件讨论较少,以致在设计和使用过程中,经常发现有测量误差。根据文献^[6]给出的正确的分压比公式,建立了 CVT 完整的等值电路模型,说明了电容分压器的电容电压初值对电路模型有影响,因此在 CVT 仿真时需考虑电容电压初值的影响,而不能将其忽视。

再者,就 CVT 铁磁谐振的激发而言,CVT 的铁磁谐振常出现在一次合闸,但在实验室要模拟这种环

境不太现实。因此,目前实验室通过对 CVT 二次端子实施短路又突然消除短路的操作来激发铁磁谐振。传统理论认为,这样激发的铁磁谐振最严重,在这种极端条件下的试验结果应该涵盖其他。但实际情况并非如此,由于故障在二次电压波形上出现的时刻、消除故障的时刻都是随机的,不受 CVT 设计者及使用者的控制,因此,有必要在正常连接的 CVT 仿真模型上,在不同的故障时刻和消除故障的时刻进行仿真、分析,从而全面找出 CVT 出现铁磁谐振的情况,为今后的 CVT 设计、分析提供一个相对可靠、准确的系统仿真模型,以提高预测的准确性。

1 CVT 的结构原理及等值电路

CVT 的基本结构如图 1 所示,图中 C_1 、 C_2 组成电容分压器。补偿电抗器和中间变压器组成电容式电压互感器的电磁单元。通过分压电容将系统一次电压降到 5~15 kV,以此作为中间变压器的输入。补偿电抗器的电抗值在额定频率下,大致等于分压器 2 个部分的电容并联的容抗值,以便在不同的二次负载下使一次电压和二次电压之间能获得正确的相位和变比。额定状态下,中间变压器工作在磁化特性的线性段,输出 $110/\sqrt{3}$ V 的电压,供保护和测量仪器使用。阻尼器的作用是抑制铁磁谐振水平,使其不至于危害绝缘和仪器设备。

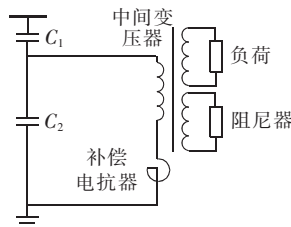


图 1 CVT 结构原理图
Fig.1 Structure of CVT

压为 u 时,电容分压器 C_2 的电压为^[6]

$$u_1 = \frac{u C_1}{C_1 + C_2} + \frac{C_2 u_{C2(0)}}{C_1 + C_2} - \frac{C_1 u_{C1(0)}}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

利用戴维南定理可得电容分压器的等值电容为 $C_e = C_1 + C_2$,将图1中的中间变压器用饱和变压器的电路模型等效,就得到如图2所示的CVT完整的等值电路模型。

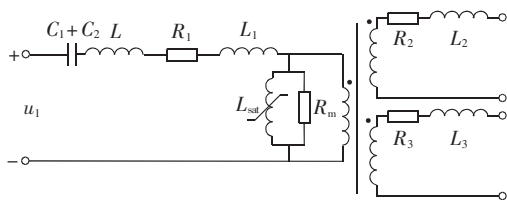


图2 CVT完整的等值电路模型

Fig.2 General equivalent circuit of CVT

由式(1)可知,只有在稳态时,CVT等值电路中等效电源为

$$u_1 = \frac{u C_1}{C_1 + C_2} = k u \quad (2)$$

式(2)即为工程中惯用的、没有考虑应用条件的电容分压比公式。这里 u_1 仅与一次电压有关,但在电路发生故障和切除故障的瞬时, u_1 不仅与一次电压有关还与电容分压器上电容电压的初值有关。电容电压初值对等效电源 u_1 的影响不能简单地看成是一个误差问题,式(1)后面的常数项绝不能想当然地忽略掉,否则就会出现严重的错误而不是可以忽略的误差。

2 CVT自身的谐振现象

尽管CVT从一次侧看呈容性,能够有效地规避电磁式电压互感器(一次侧呈感性)同电源侧开关的断口电容等所构成的串联谐振回路以及电磁式电压互感器抗饱和(耐过电压)能力差的弱点^[7],但是,CVT的补偿电抗器和低压电容在设备内部构成了一个完整的谐振回路。在系统操作出现过电压时,会导致CVT中的中间变压器铁芯饱和,铁芯饱和的变压器,其励磁支路相当于非线性电感。此非线性电感的作用,破坏了CVT正常情况下一二次之间的线性关系,二次电压中激发出了不同频率的谐波分量并出现波形畸变——CVT的铁磁谐振。铁磁谐振在中间电压回路会产生大电流和过电压,其过电压幅值可达2~3倍额定电压,将危害互感器的绝缘,并且会引起二次侧继电保护的误动作。因此,在CVT中必须采用阻尼装置抑制铁磁谐振。

3 仿真模型的建立

结合Matlab(PSB)/Simulink的特点,对CVT的铁磁谐振过程进行了仿真研究。并利用电力系统分析模块Powergui,通过改变电容分压器的初始电容电压值,说明了不同的电容电压初值对铁磁谐振的影响。

3.1 饱和变压器模型的建立

在CVT中,中间变压器是一种非线性电感部件,其励磁特性曲线对CVT的暂态特性有着直接的作用。这里采用文献[8-9]中饱和变压器模型,如图2右半部分所示。此模型是Matlab内建的Simpower库中的元件,充分考虑了中间变压器原、副线圈的铜耗(R_1 、 R_2 、 R_3)和漏抗(L_1 、 L_2 、 L_3),以及模拟铁芯磁化特性的励磁电感(L_{sat})和铁损(R_m)对铁磁谐振的影响,能更准确、有效地模拟中间变压器的工作特点。

3.2 仿真系统接线

利用Matlab(PSB)所建立的用于CVT铁磁谐振过程仿真分析的系统模型如图3所示。图中的变压器、电源、负荷、电容、电感、开关以及测量模块都是Matlab(PSB)模块库中的标准模型。CVT中各元件的参数和中间变压器的伏安特性见文献[4]。

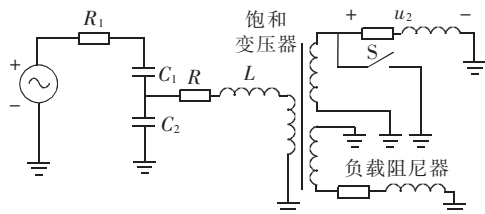


图3 仿真系统接线

Fig.3 Simulation system

4 铁磁谐振仿真结果及分析

4.1 二次短路又突然开路时的铁磁谐振过程

CVT在使用时,比较常见的开关操作是接入系统时的合闸过程,而铁磁谐振试验时采用二次短路又开路的激发方式。在CVT二次侧短路时,中间变压器一次线圈中将流过很大的短路电流,而短路现象消失后,中间变压器一次线圈中的短路电流不会突变。由于全部电流用来励磁,使中间变压器电感急剧下降,从而激发铁磁谐振。由于故障在二次电压波形上出现的时刻、消除故障的时刻都是随机的,因此在不同故障时刻和消除故障时刻进行仿真,从而全面找出CVT出现铁磁谐振的情况。

图3是CVT一次侧施加 $110/\sqrt{3}$ kV的额定电压,计算二次侧输出电压 u_2 的铁磁谐振仿真模型。通过控制接在其二次侧的开关S的关合,模拟二次绕组短路后又突然消除的操作。在仿真模型中通过设置电源初相角和开关S的开关时间控制二次电压短路时刻和消除故障的时刻。在电路中其他参数不变的前提下,分别计算不同短路时刻和消除故障时刻的 u_2 。图4所示为其中的4种典型的谐振波形。

从图4仿真结果可看出3点内容。

a. 在图4(a)(b)(c)3种仿真情况下,在CVT发生二次侧短路故障后1个周期(20 ms)内,二次电压能降至额定电压的5%以下,能满足继电保护快速、准确动作的要求,而在短路消除后3个周期内,二次电压恢复正常波形。

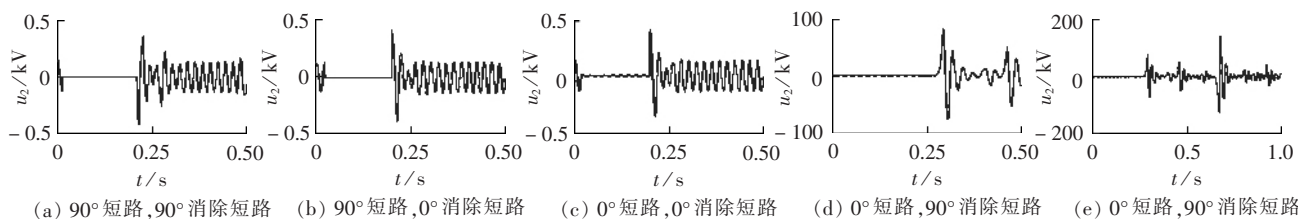


图 4 二次侧短路又突然消除短路的二次侧输出电压

Fig.4 Secondary output voltages during short circuit generation and elimination at secondary side

b. 在图 4(d)(e)所示的二次电压过零时短路同时又在其过峰值时消除短路的情况下,在短路消除后出现了持续的振荡过程,起初的谐振过电压幅值达到了额定电压的 3 倍,但经过几个周期后又出现了更为严重的铁磁谐振现象,谐振过电压幅值达到了额定电压的十几倍。振荡持续时间达 0.8 s,足以引起二次侧高速继电保护误动。

c. 仿真计算时发现,通过二次短路又消除短路这种激发条件下的铁磁谐振,谐振过电压幅值高达额定电压的 3 倍。而且出现了持续的振荡过程(如图 4(d)所示),此时的谐振过电压幅值达到了额定电压

的十几倍,对设备的绝缘和系统的稳定运行不利。随着短路时刻和消除短路时刻的变化,同样可以激发出铁磁谐振,仿真结果与图 4(a)(b)(c)基本相似。

4.2 电容电压初值对 CVT 铁磁谐振的影响

由图 2 中 CVT 完整的等值电路模型可看出,电容分压器的电容电压初值对 CVT 的等值电路模型有影响,因此仿真时要考虑不同电容电压初值对铁磁谐振的影响。利用电力系统分析模块 Powergui,通过改变电容的初始电压值,观察不同的电容电压初值情况下二次侧输出电压波形。图 5、6 是其中的 2 种典型的谐振波形。

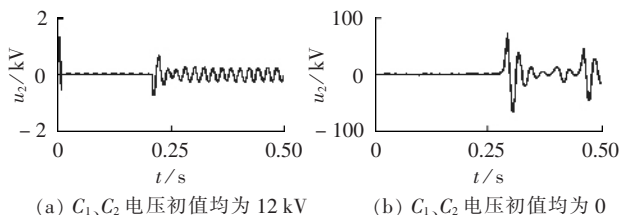
图 5 不同电容电压初值下二次侧输出电压
(0°短路,90°消除短路)

Fig.5 Secondary output voltages with different initial capacitor voltage values(short circuit generated at 0° and eliminated at 90°)

从图 5 仿真结果可看出,在二次电压过零时短路同时又在其过峰值时消除短路的情况下,电容电压初值的大小可以抑制铁磁谐振过电压的持续时间。但当电容电压初值较大时,在系统加压瞬间能在二次侧出现过电压(如图 5(a)所示),持续时间大约为 35 ms,足以引起二次侧高速继电保护(其动作时间小于 20 ms)误动的不正确行为。

从图 6 仿真结果可看出,在二次电压过零时短路同时又在其过零时消除短路的情况下,电容电压初值的大小对铁磁谐振的过程没有影响,但当电容电压的初值较大时,在系统加压瞬间也能在二次侧出现过电压。

其他短路时刻和消除短路时刻情况下,不同电容电压初值对铁磁谐振影响的仿真结果与图 6 类似。

5 结论

利用 Matlab 软件中的电力系统工具箱 Powerlib 可准确、直观、高效地仿真 CVT 铁磁谐振过程,其内建的饱和变压器模型充分考虑了铁芯线圈的铁损、漏抗的作用,在仿真中较真实地模拟了实际的中间变压器的特性,从而取得了更准确的仿真结果,实现对

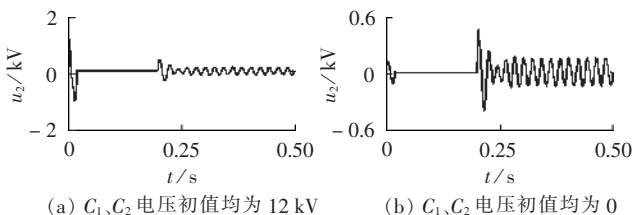
图 6 不同电容电压初值下二次侧输出电压
(0°短路,0°消除短路)

Fig.6 Secondary output voltages with different initial capacitor voltage values(short circuit generated at 0° and eliminated at 0°)

CVT 铁磁谐振现象的准确预测。

忽略电容分压器中电容电压初值的 CVT 等效电路模型是有问题的模型,以往总是把用此模型设计的 CVT 在现场出现意外事故归结为误差。当把电容电压初值考虑进 CVT 电路模型中后,仿真结果表明,电容电压初值对铁磁谐振有影响。其大小可以抑制铁磁谐振过电压持续时间,但在系统加压瞬间出现的过电压,可能引起二次侧高速继电保护误动作。

仿真结果表明,在二次短路又消除短路的铁磁谐振激发方式下,不同的短路时刻和消除短路时刻对 CVT 的铁磁谐振有影响。而且在二次电压过零短路同时又在其过峰值时消除短路情况下出现了持续的振荡过程。此时的谐振过电压幅值达到了额定电压的十几倍,对设备的绝缘和系统的稳定运行不利。

参考文献:

- [1] 谢广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [2] 王德忠. 电容式电压互感器准确度的研究[J]. 电力电容器, 1998(1):5-13.
WANG De-zhong. Research the accuracy of capacitive voltage transformer[J]. Electric Power Capacitor, 1998(1):5-13.
- [3] 李红斌,刘延冰,叶国雄,等. 电容式电压互感器铁磁谐振的数值

- 仿真[J]. 高压电器,2004,40(2):124-128.
- LI Hong-bin, LIU Yan-bing, YE Guo-xiong, et al. Numerical simulation on ferromagnetic resonances of capacitive voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 124-128.
- [4] 穆淑云. 电容式电压互感器(CVT)暂态性能的仿真计算[D]. 西安:西安交通大学,2000.
- MU Shu-yun. The numerical simulation of capacitor voltage transformer transient property[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2000.
- [5] 藏雯,冯志彪. 电容式电压互感器的数字仿真模型[J]. 同济大学学报,2004,32(3):401-406.
- ZANG Wen, FENG Zhi-biao. Digital simulation models of capacitor voltage transformer[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(3): 401-406.
- [6] 杨育霞,鲁改凤. 电容分压器设计中一个不可忽略的问题[J]. 电气自动化,2005,27(4):83-84.
- YANG Yu-xia, LU Gai-feng. A neglected problem in capacitor voltage divider design[J]. Electric Automation, 2005, 27(4): 83-84.
- [7] 赵翠宇,管益斌. 电压互感器与开关断口电容铁磁谐振的分析与预防[J]. 电力系统自动化,2002,26(1):72-74.
- ZHAO Cui-yu, GUAN Yi-bin. Analysis and prevention of ferro-magnetic resonance between the transducer and the switched fracture capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 72-74.
- [8] 张玲,郝春娟. 电压互感器铁磁谐振过电压及防止[J]. 电力自动化设备,2000,20(3):29-31.
- ZHANG Ling, HAO Chun-juan. Ferroresonance overvoltage on power transformer and its prevention[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(3): 29-31.
- [9] 董海波,史丽萍. 电磁式电压互感器和变压器励磁特性曲线转化方法的分析[J]. 电工技术杂志,1999(2):36-38.
- DONG Hai-bo, SHI Li-ping. Analysis and application of conversion method of the excitation character curve of the electric-magnetic type TV and the transformer[J]. Electrotechnical Journal, 1999(2): 36-38.
- [10] 杜志叶,阮江军,王伟刚. 应用 Matlab/Simulink 仿真研究铁磁谐振[J]. 高电压技术,2004,30(9):30-33.
- DU Zhi-ye, RUAN Jiang-jun, WANG Wei-gang. Research of ferroresonance simulation using Matlab / Simulink[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 30-33.
- [11] 石启新,谈顺涛. 基于 Matlab 的电压互感器铁磁谐振数字仿真[J]. 高电压技术,2004,30(8):25-27.
- SHI Qi-xin, TAN Shun-tao. Digital simulation analysis on ferro-resonance of electromagnetic potential transformer based on Matlab[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 25-27.
- [12] 黄绍平,李永坚. 基于 Matlab 的变压器空载合闸瞬变过程仿真研究[J]. 继电器,2004,32(8):19-21.
- HUANG Shao-ping, LI Yong-jian. Matlab based simulation of instantaneous change process when transformer no load switching[J]. Relay, 2004, 32(8): 19-21.
- [13] TZIOUVARAS D A, MCLAREN P, ALEXANDER G, et al. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 62-72.
- [14] MARTI J R, LINARES L R, DORNMEI H W. Current transformers and coupling-capacitor voltage transformers in real time simulations[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, 12(1): 164-168.
- [15] 熊小伏,周家启,周永忠,等. 电容式电压互感器暂态误差的数字校正方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12):154-158.
- XIONG Xiao-fu, ZHOU Jia-qi, ZHOU Yong-zhong, et al. Digital revision method on transient error of capacitor voltage transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 154-158.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

杨育霞(1956-),女,河南郑州人,教授,主要从事非线性电路和信号处理方面的研究(E-mail: yangyx@zzu.edu.cn);

马朝华(1980-),女,河南新野人,硕士研究生,研究方向为信号检测与处理;

许珉(1956-),男,河南开封人,教授,主要从事电气设备故障诊断及数字信号处理等方面的研究。

Simulation research on influence of initial capacitor voltage value on CVT ferroresonance

YANG Yu-xia, MA Chao-hua, XU Min

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The traditional equivalent circuit of CVT (Capacitor Voltage Transformer) neglects the influence of initial capacitor voltage value of capacitor voltage divider, but it is not neglectable in CVT transient process. Using right voltage division formulas of capacitor voltage divider, a general equivalent circuit of CVT is established, based on which, a simulation model is built up with the power system block-set of Matlab to analyze the ferroresonance process of CVT. Simulation results prove that, under the ferroresonance activation mode of short circuit generation and elimination at secondary side, the generation time and elimination time have influences on CVT ferroresonance process, the enduring ferroresonance oscillation occurs occasionally; under the ferroresonance activation mode of short circuit generated when secondary voltage is zero and eliminated when it is peak, the initial capacitor voltage value of the capacitor voltage divider may depress the duration of ferroresonance overvoltage, but if the value is bigger and system causes overvoltage, malfunction of high speed protection may occur.

This project is supported by the Natural Science Foundation of the Education Department of Henan Province (2006470007).

Key words: capacitor voltage transformer; capacitor voltage divider; initial capacitor voltage value; ferroresonance