

变压器中性点接地方式对和应涌流产生的影响分析

毕大强¹, 孙叶¹, 李德佳², 王祥珩¹, 王维俭¹

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084; 2. 核电秦山联营有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘要: 和应涌流影响变压器的正常运行, 目前认为将空载合闸变压器或运行变压器的中性点对地断开, 是切断和应涌流通路, 避免产生和应涌流的有效方法。通过仿真和试验研究, 分析了变压器中性点接地状态对变压器和应涌流产生的影响, 结果表明变压器的中性点断开并不能消除和应涌流的产生, 而且运行变压器或空载合闸变压器中性点断开与否, 一台变压器空载合闸, 运行变压器中都有可能产生和应涌流, 并且中性点在不同接地的不同组合状态下, 运行变压器中产生的和应涌流是不相同的。

关键词: 变压器; 和应涌流; 起始涌流; 中性点

Effects of neutral earthing on the occurrence of sympathetic inrush in transformer

BI Da-qiang¹, SUN Ye¹, LI De-jia², WANG Xiang-heng¹, WANG Wei-jian¹

(1. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Nuclear Power Qinshan Joint Venture Co., Ltd, Haiyan 314300, China)

Abstract: The sympathetic inrush is harmful to the operation of transformer. At present, it is well believed that cutting the passage of inrush is an effective way to avoid the occurrence of sympathetic inrush in transformer by opening the grounding switch at the neutral of operating transformer or energizing transformer. By the numerical simulation and the experiment to analyze the effect of neutral earthing on the occurrence of sympathetic, this paper verifies that whether the neutral of operating transformer or energizing transformer earthing or not, the sympathetic inrush may occur in operating transformer when a transformer energized in parallel or in series. Changing the situation of neutral earthing, the sympathetic inrush will be variable. It is pointed that opening the switch of neutral earthing cannot get rid of the sympathetic inrush and prevent the differential protection to mal-operate, which means that the neutral earthing is not necessary condition for the occurrence of sympathetic inrush in transformer.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50507014) and Electrical Power Science and Technology Foundation of Xuji.

Key words: transformer; sympathetic inrush; initial inrush; neutral

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)20-0007-06

0 引言

一台变压器空载合闸引起相邻运行变压器差动保护或发电机差动保护误动的事例发生多起^[1-5], 目前正引起继电保护界的关注和重视。这类误动事例与变压器的和应涌流直接相关, 围绕变压器和应涌流的产生机理、影响因素及特征展开了深入研究^[6-9], 为差动保护误动的分析提供了理论基础。同时, 为防止变压器和应涌流导致差动保护误动, 已提出了多种措施, 其中一项主要措施是将空载合闸变压器的中性点断开后再合闸^[2]; 或在变压器空载合闸

前将运行变压器的中性点断开^[10,11], 目的是为了消除和应涌流的通道, 认为这样空载合闸变压器只产生初始涌流, 但在运行变压器中却不产生和应涌流。

变压器的中性点断开是否真地能够避免和应涌流的产生是值得研究的问题。目前, 有关和应涌流的研究大都是在空载合闸变压器和运行变压器的中性点直接接地的条件下进行的, 很少触及中性点接地条件的变化。文献[10]中认为, 空载合闸变压器产生励磁涌流中的直流分量, 通过接地回路流过运行变压器, 使其饱和产生和应涌流, 从而认为断开中性点就会消除和应涌流的结论。

文献[12]仿真分析了多台变压器同时合闸时一台运行变压器产生和应涌流的情况, 认为合闸的变压器的接地方式对正常运行变压器的零序电流(由

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50507014); 许继电力科技基金资助项目。

两部分组成,一部分为励磁涌流的零序分量在该变压器的分流,另一部分为和应涌流的零序分量,但实质上这两部分电流很难分离)大小有影响,同时接地点少,则涌流零序分量大大减小,但和应涌流的零序分量基波一致。这个结论只有在运行变压器和应涌流不发生变化成立时,才能够成立。由此可推知,合闸变压器的中性点接地方式对运行变压器和应涌流的产生没有影响。文献[9]中提到对三相变压器而言,无论运行变压器中性点是否接地都可能引起和应涌流,但没有深入分析。文献[13]中通过对并联运行的三相变压器和应涌流模拟试验研究,认为两台变压器中性点不论是否同时接地都会产生和应涌流。本文在此基础上进一步做了仿真和试验,深入研究了变压器中性点接地状态对运行变压器和应涌流产生的影响,并分析了断开中性点接地对避免和应涌流引起差动保护误动的效果。

1 变压器中性点接地状态对和应涌流产生影响的仿真分析

1.1 仿真模型

为了研究中性点接地与否对和应涌流产生的影响,利用 Matlab 中 Power System Block 建立两台 Y, d11 变压器并联运行模型,如图 1 所示。其中运行变压器 T₁ 的参数为:容量 150 MVA,频率 50 Hz,额定电压 500 kV/220 kV,高压和低压绕组的电阻和漏电感相同分别为 0.002 和 0.06,激磁电阻为 450 (标么值),用两段直线模拟饱和特性 $i \sim \psi : 0, 0; 0, 1.15; 1.0, 1.45$ 。空载合闸变压器 T₂ 的参数为:容量 150 MVA,频率 50 Hz,额定电压 500 kV/220 kV,高压和低压绕组的电阻和漏电感相同分别为 0.004 和 0.08,激磁电阻为 450 (标么值),用两段直线模拟饱和特性 $i \sim \psi : 0, 0; 0, 1.15; 1.0, 1.45$,三相的剩磁分别为: 0, -0.8, +0.8。K₁ 和 K₂ 分别为运行变压器和空载合闸变压器的中性点接地开关。两台变压器经过一段线路与系统相联,线路 L

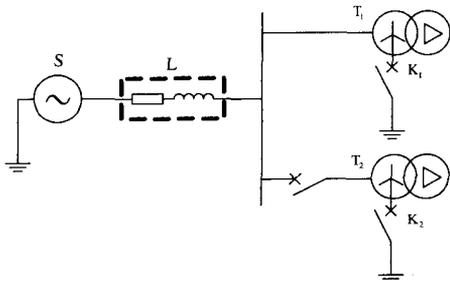


图 1 并联和应涌流仿真模型

Fig.1 Simulation model for sympathetic inrush of transformer in parallel

的参数选取使得运行变压器在邻近变压器空载合闸后易产生和应涌流。

1.2 中性点不同接地状态下和应涌流的产生结果

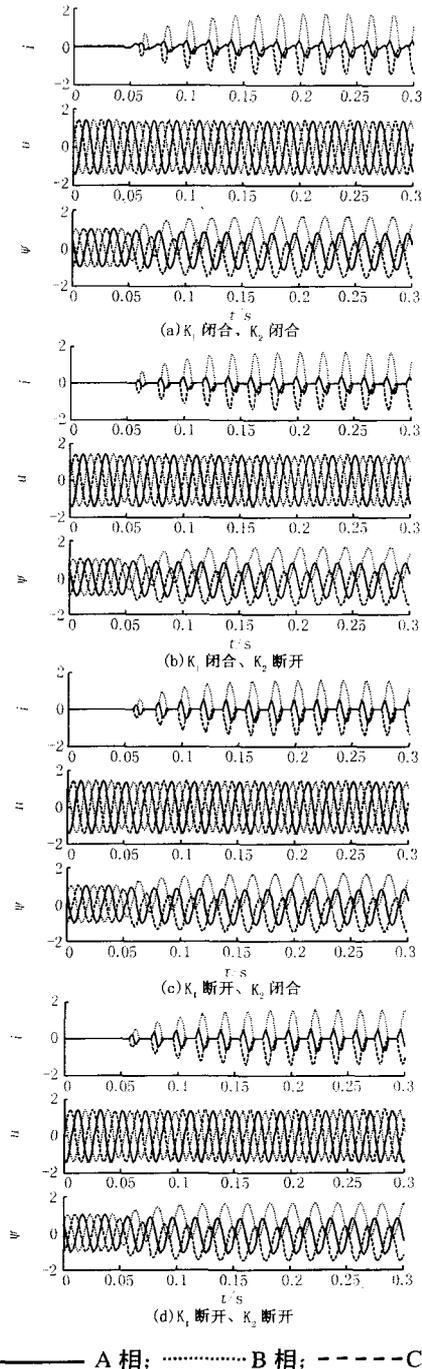


图 2 变压器中性点接地状态对和应涌流产生的影响仿真
Fig. 2 Effect of neutral earthing on occurrence of sympathetic inrush

图 2(a)~(d)分别对应 K₁ 闭合、K₂ 闭合, K₁ 闭合、K₂ 断开, K₁ 断开、K₂ 闭合, K₁ 断开、K₂ 断开四种状态下,变压器 T₁ 已处于运行状态,在相同

时刻、相同剩磁条件下变压器 T_2 空载合闸, 运行变压器 T_1 中各相电流 i 、端口电压 u 和磁链 ψ 的变化, 均为标么值。可以看出, 不同的四种接地状态下, 运行变压器中都会产生和应涌流。运行变压器中性点断开或空载合闸变压器中性点断开, 并没有切断和应涌流的通道。

这是因为变压器 T_2 空载合闸的瞬间, 产生起始涌流, 该涌流由系统供给, 此电流的出现在线路上产生了压降, 从而引起运行变压器端口电压的变化, 也即运行变压器的励磁电压受到影响, 励磁电压的变化必然引起运行变压器磁链的变化, 也即变压器的饱和程度发生变化, 导致运行变压器的励磁电流发生变化, 如果变压器达到饱和, 就会产生和应涌流现象, 这也是和应涌流产生的本质原因。而对于变压器的中性点接地与否, 并非是产生和应涌流的必要条件。

图 3 是图 2(d) 的局部放大, 可以看出, 在运行变压器端口电压发生凹变的区间内, 对应有和应涌流产生。

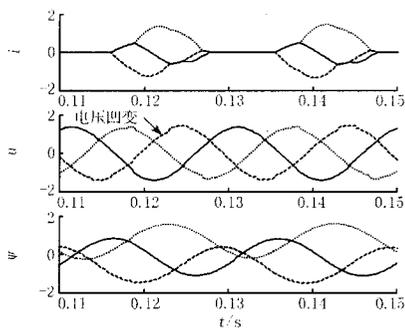


图 3 图 2(d) 波形局部放大

Fig. 3 The local details of waveform in Fig. 2(d)

一台变压器空载合闸时, 在其附近的运行变压器中都可能产生和应涌流, 为了更清晰的分析空投变压器中性点接地状态的影响, 将图 1 中的两台 Y/ Δ 变压器换为 Y/Y 接线并联运行的变压器进行仿真分析, 排除变压器角形绕组环流的影响, 系统不接地, 运行变压器 T_1 的中性点开关 K_1 一直处于闭合状态, 只有空载合闸变压器的中性点接地开关 K_2 状态变化, 图 4 中给出了仿真结果。由图 4(a), 对比变压器 T_2 的中性点开关断开和闭合情况空载合闸时, 运行变压器 T_1 中的和应涌流可以看出, 两种状态下运行变压器中产生的和应涌流的波形是不同的。将中性点接地时的和应涌流减去零序电流后得到的电流与中性点不接地时的和应涌流也不相同, 图 4(c) 中给出了 K_2 闭合时和打开时的和应涌流以及闭合时减去零序的和应涌流中的基波成分, 它们

是不同的。所以, 当运行变压器中性点接地时, 在空载合闸变压器 T_2 的中性点接地和断开的条件下, 运行变压器中的和应涌流产生的零序分量不可能不变, 而并非如文献[12]中所认为的, 空载合闸变压器的中性点接地情况发生变化时, 运行变压器中由和应涌流产生的零序分量保持一致。

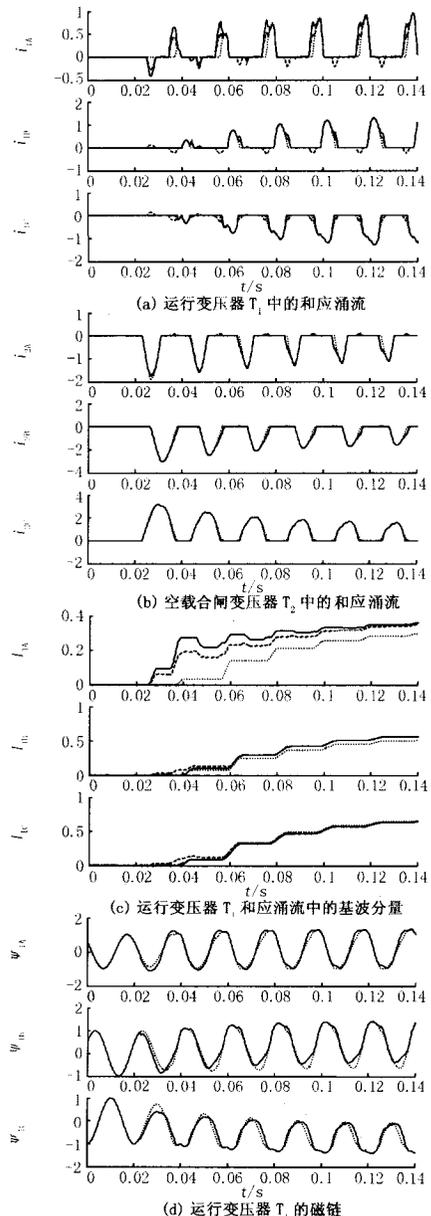


图 4 空载合闸变压器接地状态对和应涌流的影响

Fig. 4 Effect of neutral earthing of energized transformer on zero-sequence sympathetic inrush

空载合闸变压器对比不同的中性点接地情况时运行变压器中的和应涌流特点可以发现, 空载合闸变

压器中性点接地时, 相比不接地时, 如图 4(a) 所示, 运行变压器中的和应涌流在幅值和相位以及出现的时间上都发生了变化。这主要是因为, 空载合闸变压器中性点接地后, 空投时产生零序涌流, 如图 4(b) 所示, 该零序涌流的出现改变了中性点不接地时的起始涌流, 不同的起始涌流在线路上产生的压降不同, 也即运行变压器端口的电压与空投变压器中性点不接地时的机端电压变化不同, 那么由电压和磁链的关系可知, 运行变压器中的磁链变化存在差异, 如图 4(d) 所示, 这样两种情况下运行变压器的饱和程度不一样, 所以两种条件下和应涌流不相同。

在图 4(a) 中, 相比变压器中性点不接地改为接地后, 运行变压器中的和应涌流的间断角可能变大 (A、B 相), 也可能变小 (C 相), 和应涌流出现的时间可能提前 (A、B 相), 也可能延后 (C 相)。和应涌流的幅值可能增大 (A 相), 也可能减小 (B、C 相), 这说明很难定量地确定中性点接地方式对和应涌流大小的影响, 增加了不同接地状态下和应涌流变化的复杂度。

2 试验研究

为了验证以上中性点接地状态对和应涌流存在与否的影响, 进行动模试验研究。按图 1 中的模型建立试验模型, 其中运行变压器 T_1 为 Y, d11 接法, 8.4 kVA, 380 V/380 V; 空载合闸变压器 T_2 为 Y, d11 接法, 6 kVA, 380 V/380 V。图 5(a)~(d) 分别给出了对应 K_1 闭合、 K_2 闭合, K_1 闭合、 K_2 断开, K_1 断开、 K_2 闭合, K_1 断开、 K_2 断开四种状态下, 变压器 T_1 处于运行状态, 变压器 T_2 空载合闸时, 变压器 T_2 中的各相电流 i_2 和运行变压器 T_1 中的各相电流 i_1 的录波图。可以看出, 四种不同接地状态下, 在空载合闸变压器产生起始涌流时, 运行变压器中都可能出现和应涌流。

另外, 还进行了运行变压器 T_1 为 Y/Y 接法, 空载合闸变压器 T_2 为 Y, d11 接法, 两台变压器级联运行试验, 运行变压器中性点不接地, 如图 6 所示, 变压器 T_2 中产生起始涌流, 运行变压器 T_1 中同样有和应涌流产生。

3 防止和应涌流引起误动措施的分析

目前, 文献中提出的防止和应涌流引起差动保护误动的措施主要是提高保护定值、降低二次谐波制动比, 而且普遍认为采取断开变压器中性点的方法, 可以消除和应涌流的通路, 一种是在变压器空载合闸前将合闸变压器的中性点断开, 另一种是

运行变压器的中性点断开。但由以上仿真和试验分析可以看出, 无论是运行变压器的中性点断开, 或是空投变压器的中性点断开, 还是两个都断开, 并非只产生空投初始涌流, 都不能避免和应涌流的出现, 也就不能避免和应涌流引起变压器或发电机的差动保护误动。

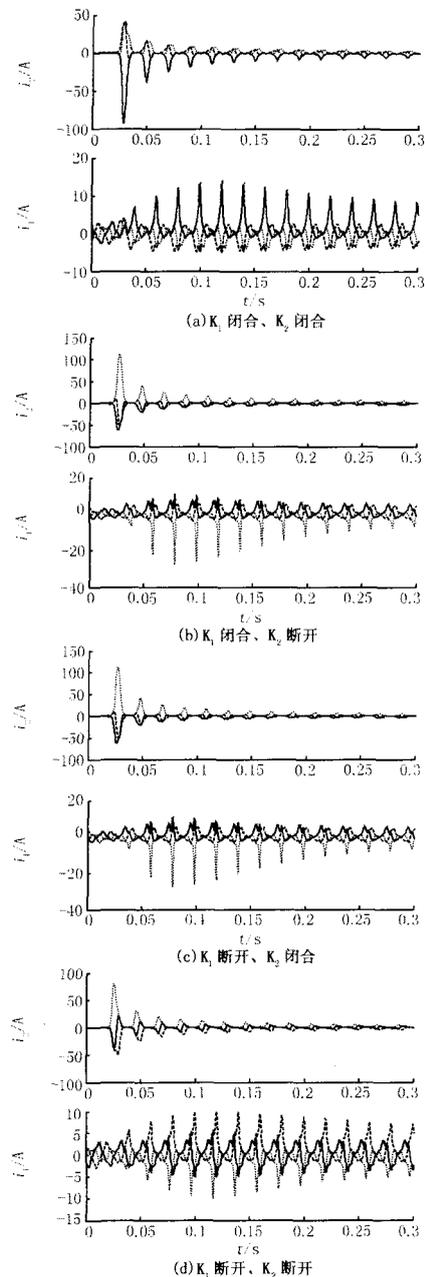


图 5 变压器并联时中性点接地状态对和应涌流产生的影响试验结果

Fig. 5 Experimental results of the effect of neutral earthing on the occurrence of sympathetic inrush in parallel

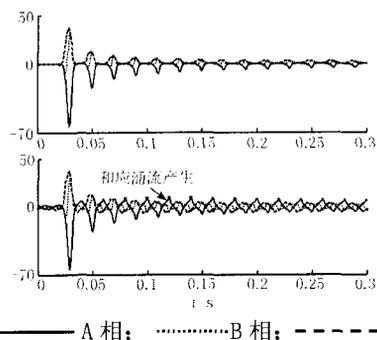


图 6 变压器级联时中性点接地状态对和应涌流产生的影响试验结果

Fig. 6 Experimental results of the effect of neutral earthing on the occurrence of sympathetic inrush in series

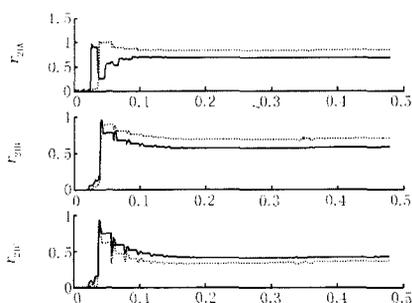


图 7 不同接地方式下和应涌流中二次谐波含量

Fig. 7 Second harmonic in sympathetic inrush under different earthing conditions

图 7 中给出的是图 4 中仿真结果中运行变压器中各相电流的二次谐波分量与基波比值,可以看出,变压器中性点不接地较接地时, A 相和 B 相的二次谐波比变大;但是, C 相的二次谐波比却降低了。虽然此时的二次谐波比大于通常的 15% 的制动整定值,但是若伴随着电流互感器饱和等其它不利因素,二次谐波比可能达到较低的值而使变压器差动保护误动。文献[1]中提到了一起空载合闸变压器 T_1 中性点接地,并联运行变压器 T_2 的中性点经间隙接地, T_1 空载合闸后, T_2 中产生和应涌流,使所带发电机的差动保护误动的事例。防范和应涌流引起的误动,还要致力于寻找鉴别和应涌流的判据。

4 结论

仿真和试验研究证明,对于并联或级联运行的两台三相变压器,无论运行变压器或空载合闸变压器中性点是否断开接地,一台变压器空载合闸,运行变压器中都有可能产生和应涌流。并且中性点接地状态不同,运行变压器中产生的和应涌流并不相同。运行变压器中产生和应涌流的本质原因在于端

口电压的变化使变压器磁链(磁通)发生变化,导致饱和程度发生变化。变压器中性点接地不是和应涌流产生的必要条件,中性点断开接地并不能消除和应涌流的产生,也就不能防止和应涌流导致差动保护误动。

参考文献

- [1] 余高旺, 毕大强, 王志广, 等. 变压器和应涌流现象及实例分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 20-23.
YU Gao-wang, BI Da-qiang, WANG Zhi-guang, et al. Phenomenon of Sympathetic Inrush and Analysis of an Example[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 20-23.
- [2] 上官帖, 谌争鸣, 郭军燕. 和应涌流对变压器差动保护的影响及对策[J]. 华中电力, 2004, 17(5): 50-52.
SHANG Guan Tie, CHEN Zheng-ming, GUO Jun-yan. The Influences and Countermeasures of Sympathetic Inrush Current in Transformer Differential Protection[J]. Central China Electric Power, 2004, 17(5): 50-52.
- [3] 王怀智, 孙显初, 常林. 和应涌流对变压器差动保护影响的试验研究[J]. 继电器, 2001, 29(7): 52-54.
WANG Huai-zhi, SUN Xian-chu, CHANG Lin. Test and Study on the Effect of Surge Current on Differential Protection for Transformer[J]. Relay, 2001, 29(7): 52-54.
- [4] 徐习东, 郭晓明, 周全明. 一次和应涌流造成过流保护动作的分析与对策[J]. 华东电力, 2005, 33(6): 37-39.
XU Xi-dong, GUO Xiao-ming, ZHOU Quan-ming. Overcurrent Protection Maloperations Caused by Sympathetic Current and Its Countermeasures[J]. East China Electric Power, 2005, 33(6): 37-39.
- [5] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.
YUAN Yu-bo, LU Yu-ping, XU Yang, et al. The Influence and Countermeasure to Transformer Differential Protection of CT Partial Transient Saturation Caused by External Fault Removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [6] 毕大强, 王祥珩, 李德佳, 等. 变压器和应涌流的理论探讨[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 1-8.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, LI De-jia, et al. Theory Analysis of the Sympathetic Inrush in Operating Transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 1-8.
- [7] 李德佳, 王维俭, 毕大强. 变压器暂态饱和与和应涌流实例分析[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 12-15.
LI De-jia, WANG Wei-jian, BI Da-qiang. Analysis of Transient Saturation and Sympathetic Inrush of Transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 12-15.

- [8] 袁宇波, 李德佳, 陆于平, 等. 变压器和应涌流的物理机理及其对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 9-14.
YUAN Yu-bo, LI De-jia, LU Yu-ping et al. Physical Mechanism of Sympathetic Inrush of Transformer and Its Influence on Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 9-14.
- [9] 张雪松, 何奔腾, 张建松. 变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 15-19.
ZHANG Xue-song, HE Ben-teng, ZHANG Jian-song. Principle and Influencing Factors of the Transformer Sympathetic Inrush[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 15-19.
- [10] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
WANG Wei-jian. Application of Relay Protection on Generator and Transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [11] 贺勋, 束洪春, 李立新. 变压器和应涌流现象分析及应对措施[J]. 电气应用, 2006, 25(4): 43-46, 96.
HE Xun, SHU Hong-chun, LI Li-xin. Analysis and Countermeasure of Sympathetic Inrush in Operating Transformers[J]. Electrotechnical Journal, 2006, 25(4): 43-46, 96.
- [12] 维铮. 变压器差动保护及和应涌流的研究(硕士学位论文)[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
LUO Zheng. Studies on Differential Protection and Sympathetic Inrush of Transformers, Thesis[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2005.
- [13] 李德佳, 毕大强, 王维俭. 由和应涌流导致变压器声音增大的分析和探究[A]. 全国电力主设备保护学术研讨会论文集[C]. 南京: 2004. 109-113.
LI De-jia, BI Da-qiang, WANG Wei-jian. Analysis That the Sympathetic Causes the Sound of the Voltage Transformer to Increase and Probing into[A]. In: Proceedings of Symposium on Main Equipment Protection in Power System in China[C]. Nanjing: 2004. 109-113.

收稿日期: 2007-04-27; 修回日期: 2007-07-08

作者简介:

毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电气主设备继电保护研究; E-mail: bidaqiang@mail.tsinghua.edu.cn

孙叶(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事变压器继电保护研究;

李德佳(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护的调试和运行。

(上接第6页 continued from page 6)

- [29] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术(博士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 1991.
XU Bing-yin. Technique of Transient Traveling Wave Based Transmission Lines Fault Location, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.
- [30] Sweetana A. Transient Response Characteristics of Capacitive Potential Devices[J]. IEEE Trans on PAS, 1970, 89(6): 1989-1997.
- [31] Agrawal P. An Investigation into a Method of Detecting the Fault Induced High Frequency Voltage Signals of EHV Transmission Lines for Protection Applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(1): 119-126.
- [32] Lee H, Mousa A M. GPS Travelling Wave Fault Locator Systems: Investigation into the Anomalous Measurements Related to Lightning Strikes[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1214-1223.
- [33] 曾祥君, 尹项根, 林福昌, 等. 基于行波传感器的输电线路故障定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 42-46.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, LIN Fu-chang, et al. Study on Fault Location for Transmission Lines Based on the Sensor of Travelling Wave[J]. Proceedings of CSEE, 2002, 22(6): 42-46.
- [34] 刘晔, 王采堂, 等. 电力系统适应光学电流互感器的研究新进展[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 60-64.
LIU Ye, WANG Cai-tang, et al. New Direction of Study of Optical Current Transducer Used in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 60-64.
- [35] 邹建龙, 刘晔, 王采堂, 等. 电力系统适用光学电压互感器的研究新进展[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 64-67.
ZOU Jian-long, LIU Ye, WANG Cai-tang, et al. Development of Study of Optical Voltage Transducer Used in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 64-67.

收稿日期: 2007-04-25

作者简介:

邹贵彬(1971-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护和系统模拟仿真的教学和研究工作; E-mail: guibinzou@yahoo.com.cn

高厚磊(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护和广域测量的教学和研究工作。