

高压输电线路短路故障早期检测研究

吴巧玲¹, 缪希仁¹, 叶臻芳²

(1. 福州大学电气工程及其自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网厦门供电公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 为提高电力系统供电可靠性和电能质量, 高压快速转换开关应运而生, 而现有故障检测技术大多需要数个毫秒的时间, 对高压快速转换开关而言略为缓慢。提出将小波变换应用于高压输电线路短路故障早期检测上, 采用小波变换第四尺度细节分量作为故障特征量。基于 Matlab/Simulink 仿真平台, 通过设置合理的短路判断阈值, 可将短路故障与空载合闸、功率补偿及负荷投切等系统操作引起的过电压和涌流区分开来, 验证了此方法的可行性。仿真结果表明, 小波变换方法最短可在 0.2 ms 时间内辨识出短路故障。小波变换短路故障早期检测技术与高压快速转换开关的有机结合将为电力系统可靠稳定运行提供有利的保障。

关键词: 高压快速转换开关; 小波变换; 短路故障; 早期检测; 过电压和涌流

Research on early detection for short-circuit fault in high-voltage transmission line

WU Qiaoling¹, MIAO Xiren¹, YE Liufang²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. State Grid Xiamen Electric Power Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: High-voltage fast transform switch is applied to improve the reliability of the power supply and power quality. However, most of the existing fault detection technologies need several milliseconds to detect short-circuit fault. It's a bit longer for fast transform switch. In this paper, wavelet transform is applied to high-voltage transform line on the early detection, being characterized with the fourth dimension detail component of wavelet transform. The method is verified on Matlab/Simulink platform. It can separate short-circuit fault from overvoltage and inrush current caused by no-load switching, load switching and reactive power compensation. The simulation result shows the wavelet transform can identify the fault within 0.2 ms. Combining wavelet transform early detection technology with high-voltage fast transform switch will contribute to a stable and reliable power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377023).

Key words: high-voltage fast transform switch; wavelet transform; short-circuit fault; early detection; overvoltage and inrush current

0 引言

随着坚强电网的建设, 电力系统朝着高电压、大容量方向发展。为提高供电系统可靠性及电能质量, 众多学者前赴后继地研究和开发高压快速转换开关。目前主要的快速操动机构有电磁推力机构。电磁推力机构速度比传统的气动机构、液压机构和弹簧储能机构等迅速, 并且动作分散性小。电磁推力机构可在若干毫秒内实现分闸, 平均速度可达到 $10\text{m/s}^{[1-2]}$, 大于现有普通交流真空断路器 $1\sim 2\text{m/s}$ 的

平均分闸速度^[3]。

快速操纵机构动作指令来源于系统保护提供的故障确认信号。在实际应用中, 大容量高速开关装置动作判据一般是基于电流变化率、电流瞬时值及电流变化量等方法, 即短路电流变化率、短路电流值或者电流变化量大于整定值, 此时距离短路故障发生已有几个毫秒的时间^[4-8]。目前, 短路电流早期检测已在低压配电系统中加以技术实现, 已可在 $300\mu\text{s}$ 内实现低压短路电流的早期故障判别^[9], 因此, 本文将早期检测技术引入高压输电线路短路故障处理, 利用尽量短的时间判断出短路故障。在此基础上, 利用快速操动机构快速分断故障电流或者

投入限流器^[10], 以减少短路故障带来的过热损坏和导体间大机械应力破坏, 在对电网电压质量要求极高的情况下, 也可将线路在几个毫秒的时间内切换到备用电源上, 很大程度上提高了供电可靠性, 保证系统安全运行^[2]。

本文在 Matlab/Simulink 仿真平台上建立高压输电线路模型, 从而验证短路故障早期检测方法的适用性和快速性。结果表明, 此方法可迅速而准确地判断出短路故障, 最短故障识别时间为 0.2ms, 为高速开关装置动作奠定可靠的操作基础。

1 基于小波变换的早期故障检测理论

1.1 短路故障检测现状

在电力系统中, 短路故障是最常见且危害性大的一种故障类型, 因此, 尽早检测出系统中的短路故障, 并采取一定的保护措施具有极大的意义。目前, 针对短路故障检测已有大量的研究文献, 并取得了一系列研究成果。传统的短路故障检测方法采用电流瞬时值或真有效值法作为短路判据^[4], 鉴于高压线路短路故障电流最大值通常发生在故障后 5~10ms^[11], 以此为判据速度较慢。文献[6]和文献[7]提出以电流变化率作为短路故障特征, 利用短路瞬间电流变化率大的特点判断短路故障的发生, 此法也需要毫秒量级的判断时间。文献[8]提出一种综合实时电网电压和功率异常变化的方法来检测电网中的短路故障, 此方法对滤波处理有较高要求, 检测判断时间为 2~4ms。文献[12]采用线路电流波形曲率判别短路故障, 利用故障电流突变点进行判断, 但电流突变点波形曲率值较小, 易受现场环境干扰, 此判断并不十分可靠。以上的短路故障检测方法检测时间都在若干毫秒, 相对于快速操纵机构来说, 检测速度略为缓慢。

1.2 小波变换原理

本文提出应用小波变换检测线路短路故障, 在短路故障发生初始时刻, 由于负荷急剧减小, 电流幅值变化相当明显。被誉为信号的“显微镜”的小波变换, 很适合于探测故障信号中由于电流变化突出而带来的瞬态反常现象, 可快速提取出短路故障特征量。基于多分辨率分析的小波变换, 利用正交小波基将信号分解为一组高频细节分量和低频平滑分量, 再继续将低频分量分解为下一级高频和低频分量^[13], 其快速递推公式如下。

$$S_{2^j} f(n) = \sum_{k=-1}^2 h_k S_{2^{j-1}} f(n - 2^{j-1} k)$$

$$W_{2^j} f(n) = \sum_{k=0}^1 g_k S_{2^{j-1}} f(n - 2^{j-1} k)$$

式中: $S_{2^j} f$ 为输入信号; j 为分解尺度; h_k 为低通滤波器的系数; g_k 为高通滤波器的系数; $S_{2^j} f(n)$ 为第 j 尺度下的平滑分量; $W_{2^j} f(n)$ 为第 j 尺度下的细节分量。

考虑到 B 样条正交半波函数具有显式解析式, 计算简单, 易于实现, 且多尺度三次 B 样条分解得到的细节分量可剔除高频噪声干扰, 又可表征信号突变量大小^[14], 本文以三次 B 样条函数的导函数为小波函数, 其低通及带通滤波器的脉冲响应系数为 $g_0=-2, g_1=2; h_{-1}=h_2=0.125, h_0=h_1=0.375$ 。

由于第四尺度小波分量既能适当地剔除噪声干扰, 又保留足够的故障信号奇异性强度以检测出早期短路故障^[15-16], 因此本文利用经多尺度小波分解得到的第四尺度细节分量作为特征量, 作为故障判断依据。以下阐述中 s00 表示原始信号, cd1、cd2、cd3、cd4 分别表示原始信号经小波分解得到的第一到第四尺度细节分量 $W_{2^1} f$ 、 $W_{2^2} f$ 、 $W_{2^3} f$ 、 $W_{2^4} f$ 。细节分量的幅值大小可表现出信号的奇异性, 为使分解结果跟直观明了, 本文所有的细节分量都经绝对值处理。

2 短路故障早期检测的仿真实验

本文基于 Matlab/Simulink 仿真平台, 建立 110 kV 输电线路短路故障仿真模型如图 1, 其中线路参数来自于福建厦门某地。主要设备参数如下: 三绕组变压器 SFSZ9-180000/220, 各容量比为 180/180/90 MVA, 电压比为 220/121/10.5 kV, 连接组别 YN, yn0, d11, 其中 220kV 和 110 kV 绕组变压器中性点接地; 输电线路总长度为 7.5 km, 电抗为 0.34 Ω , 电阻为 0.098 Ω 。当输电线路长度不超过 100km 时, 可忽略线路中电容的影响, 用 RLC 串联电路来等效表示。本文选用 ode23tb 变步长解算器对仿真模型进行解算。

小波变换可在短时间内检测出信号的奇异性, 当线路发生短路时, 信号发生突变, 小波第四尺度特征明显, 可作为短路故障判断依据。然而当线路在空载合闸、功率补偿及负荷投切等情况下, 电流信号也会产生变化。本文对这些情况下的负载变化也进行了仿真, 并且将小波变换第四尺度细节分量 cd4 的算法写入 S-function 模块, 直接在示波器上显示 cd4 的标么值 cd4*, 其中 cd4 标么值的基准值为故障点正常运行条件下其值对应的最大值, 使得仿真结果更为实用直观。结果表明, 合适的短路故障判断阈值 cd4* 的选择即可避免其他负荷变化情况下的误判。

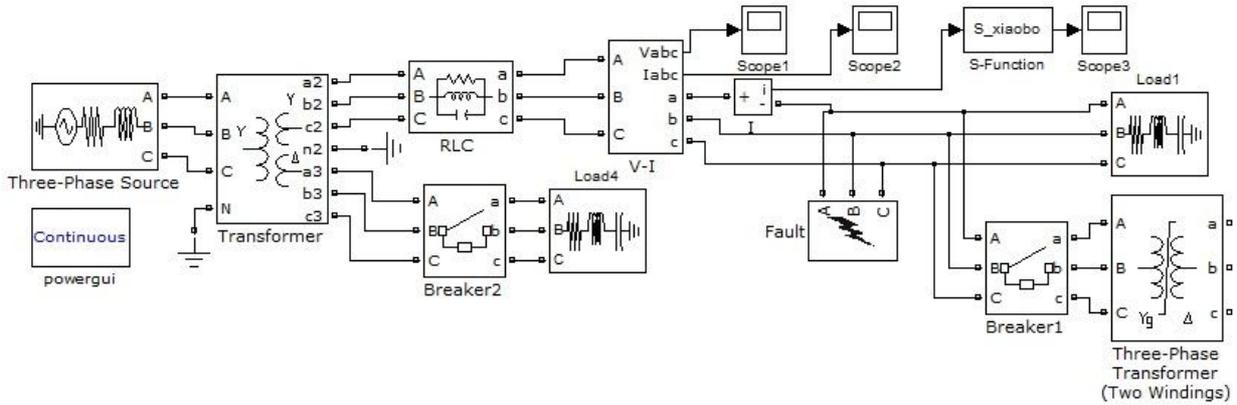


图 1 110 kV 输电线路短路故障仿真模型

Fig. 1 110 kV transmission line fault simulation circuit

2.1 短路故障

在 Matlab/Simulink 仿真平台上可对输电线路任意位置任意故障类型进行设置。本文选取 A 相短路故障进行仿真，短路故障点设置在线路末端。设置短路故障发生在 0.04s 时刻，持续时间 0.08s，故障在 0.12s 时刻短路结束。利用小波变换对短路故障信号进行分解，得到图 2。

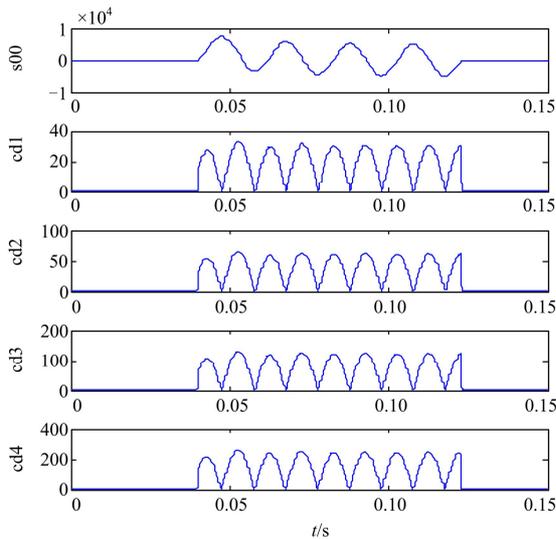


图 2 短路电流信号小波分解各细节分量

Fig. 2 Wavelet decomposition of each detail component of short-circuit current signal

由图 2 可知，经过小波变换逐层提取高频分量作为故障特征，特征值数量等级逐渐增加，特征量越明显，cd4 足以快速而准确地判断出短路故障，具备足够的识别故障能力。此外，小波变换具有一定的滤波作用，采用 cd4 作故障特征量可在一定程度上消除噪声的干扰。故本文选取小波变换第四尺度细节分量 cd4 作为故障特征量。在此说明，由公

式可知，小波分解需要一定量的历史数据，随着分解程度增加，需要的历史数据也逐渐增加，即分解起步时间逐渐变长。本文选择第四尺度小波高频分量作为特征量，此时分解起步延迟 29 个点，在采样频率为 100 kHz 的条件下，延迟时间为 0.29ms，即延迟时间内并不可判断短路故障，故本文均假设故障发生时刻在延迟时间之后。

由图 3 可知，短路故障发生瞬间，对应的 cd4* 分量突增至 20，最大值可达到 30。若取短路判断阈值为 15，对应的时间为 0.0402s；若取短路判断阈值为 20，对应的时间为 0.0409s；若取短路判断阈值为 25，则对应的时间为 0.042s。由此可见，小波变换第四尺度细节分量可快速提取故障特征，故障特征量变化明显，具体的故障识别时间取决于短路判断阈值的大小。短路故障的阈值选取必须适当，才能同时确保快速性和准确性。

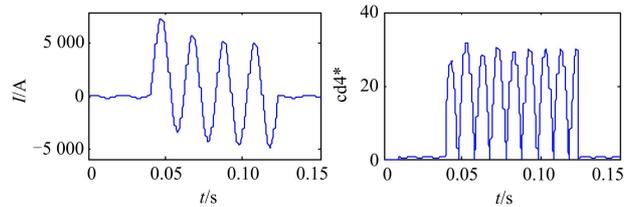


图 3 短路电流波形及其对应的 cd4* 波形

Fig. 3 Short-circuit current and its appropriate cd4* waveforms

2.2 变压器空载合闸励磁涌流

输电线路变压器空载合闸会产生励磁涌流^[17]。由于变压器是感性负载，铁芯磁路不能发生突变，合闸瞬间系统外加电压使得磁路需要产生一个暂态磁通来平衡磁路，引起磁通密度饱和，导致励磁电流激增，产生励磁涌流。这使得空载合闸电流产生巨大的波动，并且需要几个周波甚至数秒之后才可达到稳定状态。变压器空载合闸具有随机性，一般

不会出现无瞬态励磁现象,而在有瞬态励磁现象中,最为严重的励磁涌流发生在系统电压过零合闸时刻,最大幅值可达到额定电流值的5~8倍^[18-19]。空载合闸励磁涌流与合闸时电压初相角、铁芯剩磁、变压器容量等有关^[20]。为验证小波变换第四尺度细节分量 $cd4^*$ 辨别空载合闸和短路故障的能力以及提供参考阈值的设定,本文的仿真在110kV输电线路末端连接一个变压器,额定功率为50MVA,电压比为121:10.5kV,变压器带空载,在电压为0时刻合闸,此时产生涌流最大,仿真结果如图4。

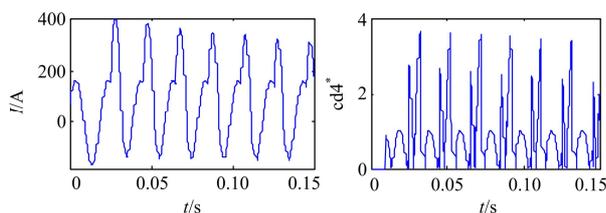


图4 空载合闸励磁涌流波形及其对应的 $cd4^*$ 波形

Fig. 4 No-load switching inrush current and its appropriate $cd4^*$ waveforms

由图4可知,变压器空载合闸引起的铁芯饱和导致励磁电流剧增,使得线路上的电流发生畸变。经小波变换分解之后,励磁涌流的 $cd4^*$ 的最大值还不到4,远小于短路故障 $cd4^*$ 的最大值。

2.3 无功补偿涌流

因电力系统中存在变压器、电动机等感性设备,造成输电线路功率因数下降、电压降低,为提高电能质量和电力系统运行稳定性,需要对输电线路进行无功补偿。现有的无功补偿朝着高压方向发展,高压线路无功补偿对电网运行效率的提高起到至关重要的作用^[21-22]。然而对电力系统进行无功补偿时,由于电容器投切的随机性,可能出现合闸过电压的最大值为线路正常电压值的两倍,对应出现的最大合闸涌流可达到正常运行电流值的5倍左右^[23]。线路具体的过电压和过电流与无功补偿器件参数有关,无功补偿电容器通常会串联电抗器以限制合闸涌流,即无功补偿既给系统注入容性无功,也包含少量的感性无功。考虑到无功补偿对短路故障早期检测的影响,对此进行仿真验证,在110kV输电线路末端并联一个容量为1000kvar容性无功和2kvar感性无功的负载取代原模型图中的变压器。当系统电压最大时投入负荷,本模型负荷投入后产生约1.6倍于额定电流的涌流,如图5所示。

输电线路上的无功补偿易使得系统的电流值发生异常的变化,对线路造成冲击。由图5可知,无功补偿的 $cd4^*$ 的最大值约为9,电流畸变明显,

但其最大值还是明显小于短路故障信号 $cd4^*$ 的值,仅约为其最大值的三分之一。

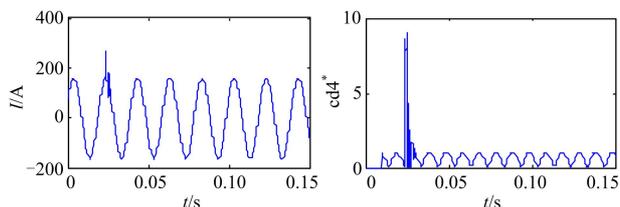


图5 无功补偿涌流波形及其对应的 $cd4^*$ 波形

Fig. 5 Reactive power compensation current and its appropriate $cd4^*$ waveforms

2.4 线路合闸负荷变化

当输电线路末端因故障或者检修需要开断后,重新投入线路负荷,即系统又并联了一条线路,必然会引起线路电流增大。计及此情况下的负荷变化,本文的模型在输电线路末端并联了另一负载代原模型图中的变压器,设置负载功率为20MW,仿真结果如图6所示。

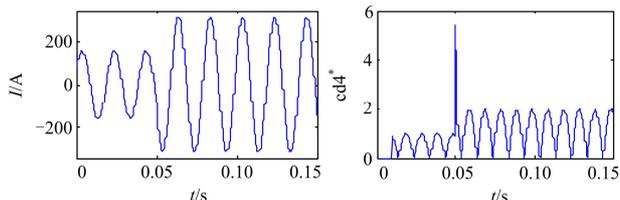


图6 负荷变化电流波形及其对应的 $cd4^*$ 波形

Fig. 6 Load change current and its appropriate $cd4^*$ waveform

由仿真结果可知,输电线路末端的负荷投切时引起系统电流变化,对应的 $cd4^*$ 的最大值约为5,适当的短路阈值选取能够完全避开负荷变化带来的干扰。

3 结论

基于Matlab/Simulink仿真平台所建立的高压输电线路早期检测模型验证了小波变换第四尺度细节分量 $cd4$ 辨识短路故障的快速性和有效性,短路识别时间极短,在避开空载合闸、功率补偿及负荷投切等负载变化的干扰情况下,当短路判断阈值 $cd4^*$ 取15时,仅需0.2ms即可判断出短路故障。况且,随着相控技术的发展成熟,此技术在变压器空载合闸、电容器投切等领域的应用,可抑制系统出现的过电压和涌流^[24-25]。这就使得小波变换在短路故障早期检测方面的应用上如虎添翼,有望更进一步缩短故障检测时间,提高短路故障早期检测的灵敏性和可靠性。小波变换早期检测技术与高压快速转换开关的结合可为坚强电网稳定可靠运行提供有利的技术保障。

参考文献

- [1] 夏克鹏, 李岩, 南玉华, 等. 新型电磁推力机构设计仿真分析[J]. 电气技术, 2009(12): 33-36.
XIA Kepeng, LI Yan, NAN Yuhua, et al. Design and simulation analysis of novel electromagnetic repulsion mechanism[J]. Electrical Engineering, 2009(12): 33-36.
- [2] 王冠, 李庆民, 孙庆森, 等. 解决电能质量的快速转换开关技术[J]. 低压电器, 2005(3): 50-54.
WANG Guan, LI Qingmin, SUN Qingsen, et al. Fast transfer switch technology for power quality issues[J]. Low Voltage Apparatus, 2005(3): 50-54.
- [3] 史宗谦, 贾申利, 朱天胜, 等. 真空直流断路器高速操动机构的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 18-22.
SHI Zongqian, JIA Shenli, ZHU Tiansheng, et al. Investigations on high-speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 18-22.
- [4] 郭银婷, 缪希仁. 低压配电短路电流检测与分断机构技术[J]. 低压电器, 2013(7): 18-22.
GUO Yinting, MIAO Xiren. Short circuit fault current detection and rapid breaking actuator technologies of low voltage distribution system[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(7): 18-22.
- [5] 曹莉. 浅析 DDL 保护装置在轨道交通牵引中的应用[J]. 轨道交通, 2008(6): 50-51.
CAO Li. Analyse the application of DDL protective device in rail transit traction[J]. Rail Transit, 2008(6): 50-51.
- [6] 冯如鹤, 冯密罗, 孔金生. 基于电流变化率的短路检测保护方法[J]. 煤矿机械, 2008, 29(5): 171-173.
FENG Ruhe, FENG Miluo, KONG Jinsheng. Based on current rate of change of short-circuit protection methods[J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(5): 171-173.
- [7] 赵敏. 基于电流变化率的电网短路保护原理[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 105-108.
- [8] 吴浩伟, 周樑, 孙朝晖, 等. 电力系统短路故障快速检测方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 88-92.
WU Haowei, ZHOU Liang, SUN Chaohui, et al. Study on detecting scheme of power system short-circuit fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 88-92.
- [9] 陈丽安, 张培铭, 缪希仁. 基于形态小波的低压系统短路故障早期检测[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 24-28.
CHEN Li'an, ZHANG Peiming, MIAO Xiren. Early detection for short-circuit fault in low-voltage systems based on morphology-wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 25-28.
- [10] 陈金祥, 董恩源. 具有串联补偿作用的新型故障限流器 (FCL)的研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 48-51.
CHEN Jinxiang, DONG Enyuan. Study of a new fault current limiter (FCL) with series compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 48-51.
- [11] 徐向东. 快速限流装置在电力系统中的应用[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 295-297.
XU Xiangdong. Application of I_g -limiter in electrical network[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 295-297.
- [12] 杨尚瑾, 武守远, 戴朝波. 基于电流波形曲率的短路故障快速识别方法[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 551-556.
YANG Shangjin, WU Shouyuan, DAI Chaobo. A method to fast recognize short-circuit fault based on curvature of line current waveform[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 551-556.
- [13] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [14] 陈丽安. 保护电器的短路故障早期检测及实现的研究[D]. 福州: 福州大学, 2004.
CHEN Li'an. Research on early detection and implementation of short-circuit faults for protection apparatus[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [15] 陈丽安, 张培铭, 缪希仁. 基于小波变换的低压系统短路故障的早期预测[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 91-94.
CHEN Li'an, ZHANG Peiming, MIAO Xiren. Prediction for the short-circuited fault based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(2): 91-94.
- [16] 陈丽安, 张培铭. 基于小波变换的短路故障早期检测门限值的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 64-69.
CHEN Li'an, ZHANG Peiming. Research on threshold of early prediction for short circuit fault based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 64-69.

- [17] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.
- [18] 谢静波. 10kV 供电系统中励磁涌流的产生及控制[J]. 建筑安全, 2009(4): 32-34.
- [19] 杨祺金. 变压器励磁涌流产生机理及抑制措施[J]. 科技与创新, 2015(1): 103-104.
YANG Qijin. Mechanism and suppression measures of transformer inrush current[J]. Science and Technology & Innovation, 2015(1): 103-104.
- [20] 陈忠. 降低励磁涌流不良影响的措施[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 170-171.
CHEN Zhong. The way of lowering the bad innocence of the magnetic inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 170-171.
- [21] 董军涛. 高压无功补偿技术及发展趋势[J]. 科学中国人, 2014(11): 144-144.
- [22] 陈灵峰. 关于 220 kV 变电站无功补偿容量配置的探讨[J]. 华东科技: 学术版, 2015(1): 195-195.
- [23] 邓雨荣. 无功补偿电容器合闸过电压及涌流的仿真计算[J]. 广西电力, 2006(6): 6-9.
DENG Yurong. Simulated calculation of overvoltage and surge current at switch-on of capacitor for reactive power compensation[J]. Guangxi Electric Power, 2006(6): 6-9.
- [24] 王凯, 李庆民. 电力系统相控开关技术及其应用[J]. 安徽电力, 2005, 21(4): 5-7.
WANG Kai, LI Qingmin. Application of phase-controlled switching technology in power system[J]. Anhui Dianli, 2005, 21(4): 5-7.
- [25] 李庆民, 王冠, 李清泉. 电力系统相控开关技术及其智能控制策略[J]. 电气开关, 2004, 42(3): 42-46.
LI Qingmin, WANG Guan, LI Qingquan. Phase-controlled switching technology in power systems and its intelligent control strategy[J]. Electric Switchgear, 2004, 42(3): 42-46.

收稿日期: 2015-07-20; 修回日期: 2015-10-12

作者简介:

吴巧玲(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能电器及在线监测技术; E-mail: qiaoqiaoling_fzu@163.com

缪希仁(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事电器及其系统智能化技术、电气设备在线监测与诊断、新型电器技术等方面的研究;

叶臻芳(1990-), 女, 助理工程师, 研究方向为智能电器及在线监测技术。

(编辑 魏小丽)