

基于 LC 振荡频率变化量的电容器组早期故障 在线智能预警方法及其实现

陈晓宇^{1,2}, 郑建勇¹, 梅军¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏金智科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 电容器组是电网中的重要设备, 常有内部轻微故障的发生, 若无法及时发现, 将逐步发展为严重故障, 导致电容器组的损坏。为解决此问题, 根据电容器组早期单个元件损坏的理论特征分析, 提出了针对电容器组早期内部元件故障的一个全新的预警方法: LC 振荡频率变化量法。该方法通过采集放电 PT 电压和母线电压, 计算出串联电抗器与电容器形成的 LC 回路的振荡频率, 记录该频率初始值。再通过电容器运行过程中该频率的变化量进行预警判断。该方法的优点是判别精度高, 且能判断出故障相别, 可以躲过系统电压的波动。根据预警方法的需求, 设计了专用的电容器组的在线监测和预警装置, 并将这些方法实现了工程应用。通过现场运行的各种数据也验证了所提新的预警方法。该装置方便了电容器组的运行管理, 并为其早期故障的及时发现提供了新的途径。

关键词: 电容器故障预警; 电容器在线监测; LC 振荡频率; 智能预警

Power capacitor banks failure warning method based online intelligence LC oscillation frequency variation and its implementation

CHEN Xiaoyu^{1,2}, ZHENG Jianyong¹, MEI Jun¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 211100, China;

2. Wiscom System Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Power capacitor bank is an important device, when it occurs a minor fault, if not be found in time, will gradually develop into a serious malfunction, causing damage to the capacitor bank. To solve this problem, this paper proposes a new method of early capacitor bank internal component failure warning: the LC oscillation frequency variation method based on early theoretical characteristics of a single component damage analysis. The method calculates the oscillation frequency by collecting discharge PT voltage and bus voltage, records the frequency of initial value, and then compares the variation in the process to propose early warning. The advantages of this method are of high detection precision, and can judge the fault phase and avoid the system voltage fluctuation. According to the warning method needs, an on-line monitoring and early warning device of capacitor bank is designed to realize the engineering applications of this method. A variety of data after the field operation also verify this warning method. Thus this device is convenient for the operation and the management of the capacitor banks, and provides a new way to find the early fault in time.

Key words: capacitor fault warning; capacitor on-line monitoring; LC vibration frequency; intelligent warning

中图分类号: TM53

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)05-0144-06

0 引言

电容器组是电力系统中的重要设备, 其安全运行对提高输电容量、维护电网无功平衡和电网电压正常、实现变压器的经济运行有重要作用^[1]。

当前电容器组的实际运行情况如下所示:

1) 随着电网规模的日益扩大和负荷需求的不

断增加, 电网对电压及无功的调节越来越频繁。尤其在配电网或微网系统中, 电容器组的投切更加频繁^[2-3]。

2) 内部元件损坏导致熔丝动作的故障时有发生。因为电容器组为电容元件串联并联组成, 当其中单个电容元件损坏时, 其他电容元件因为过流或过压更容易损坏, 所以经常导致许多轻微故障发展

成了严重故障甚至直接导致出现群爆故障^[4-5]。

3) 现场运行的电容器组基本没有配置在线监测或预警装置, 因此在发生内部轻微故障时无法及时发现并进行处理。

4) 运行管理中有周期性检修, 而这样的常规检修经常无法发现内部单个元件损坏^[4-5]。

因此, 研发出能够实现电容器组的在线监测及智能预警装置是非常有必要的。该设备应至少具有以下功能^[6-7]:

1) 实时数据采集, 并传输到监控主站或就地监控后台。

2) 单个元件损坏实时预警, 做到不漏报, 不误报。预警时能判断出哪一相有几个元件损坏。

3) 严重故障时发出报警, 提醒运行管理人员本电容器需要停电检修。

4) 各种预警报告的保存, 预警时刻的电流电压波形保存, 历史数据保存, 并可以实时查看记录波形和历史数据。

1 不同类型电容器组内部故障时的特征分析

1.1 单星形接线外熔丝结构电容器组

单星型电容器组结构示意图如图 1 所示。

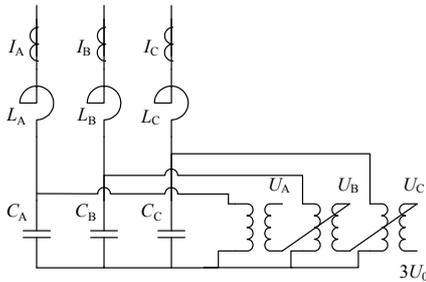


图 1 电容器接线图

Fig. 1 Capacitor wiring diagram

假设电容器组每相内部 N 串联 M 并联, 其中单台电容器内部元件间的接线方式为 n 串联 m 并联, 当一台电容器单元内部某一串联段有 k 个元件 (k 个元件为串联关系) 发生击穿, 则故障相的电容值变化为

$$C_{\varphi} = \frac{n(N-1)[(M-1)(n-k)+n]+Mn(n-k)}{mM[(M-1)(n-k)+n]} C_0 \quad (1)$$

电容器故障相的电流 I_{φ} 为

$$I_{\varphi} = \frac{3N[M(n-k)+k]}{3N[M(n-k)+k]-2k} \times I_E \quad (2)$$

正常相电流 I_{η} 为

$$I_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{k}{3MN(n-k)+k(3N-2)}\right)^2 + \frac{3}{4}} \times I_E \quad (3)$$

由以上公式可以看出, 外熔丝结构电容器组, 当某个元件被击穿后, 所在串联段被短路, 故障相由于阻抗减小而电流增大, 正常相由于电压有所升高, 而导致电流略有增大。

1.2 单星形接线内熔丝结构电容器组

假设电容器组每相内部 N 串联 M 并联, 单台电容器内部元件间的接线方式为 n 串联 m 并联, 当一台电容器单元内部某一串联段有 k 个元件因发生击穿而被内熔丝动作切除, 故障元件被隔离, 故障相电容量变化为

$$C_{\varphi} = \frac{mMMn(m-k)+mMk(M-1)k}{n[MNn(m-k)+kN(M-1)+k]} C_0 \quad (4)$$

电容器故障相的电流 I_{φ} 为

$$I_{\varphi} = \frac{3N[Mn(m-k)+k(M-1)]}{3N[Mn(m-k)+k(M-1)]+2k} \times I_E \quad (5)$$

正常相电流 I_{η} 为

$$I_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{-k}{3N[Mn(m-k)+k(M-1)]+2k}\right)^2 + \frac{3}{4}} \times I_E \quad (6)$$

由以上公式可以看出, 内熔丝结构电容器组由于元件击穿, 内熔丝熔断, 故障元件切除, 故障相电压略有增大, 故障相电流由于阻抗增大而减小, 正常相电压略有下降, 电流略有减小^[8-9]。

2 电容器组内部故障时的预警方法

当前针对电容器在线监测装置主要功能集中于以下几个指标: 1) 电流幅值变化; 2) 阻抗或电容值的变化; 3) 介质损耗角正切值; 4) 局部放电检测等^[10-13]。

以电流幅值变化法为预警判据时, 根据式(2)或者式(5)计算出元件损坏后的电流变化量, 当三相电流变化量超过该值时认为电容器发生了元件损坏。假设某台单星形接线内熔丝电容器组, 其内部结构为 $N=2$, $M=8$, $n=4$, $m=3$ 。当某相发生故障后, 故障相的电流幅值变化为 0.467%。但是该判据在系统电压波动会造成误判; 其次随着电容器组容量的增大, 其中电容元件数会更多, 从而电流的变化量会更小, 更易受干扰。

以介质损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 为预警判据时, 现场工程实施中也会遇到相同的问题。通常电容器在工

频交流额定电压下,温度为 20 °C 时,损耗角正切值 $\text{tg}\delta$ 应符合以下值:纸膜复合介质的电容器应不大于 0.08%;全膜介质的电容器在有放电电阻和内熔丝的情况下应不大于 0.05%,无放电电阻和内熔丝的情况下应不大于 0.03%。由此可见,测准介质损耗角 δ 的数值需要整个采样回路的精度很高,而且需要复杂的采集硬件和软件支持^[14]。而且损耗角正切值的计算会用到电容器放电 PT 电压,通常电容器放电 PT 的精度会到 2.5 级,更加难以满足高精度的要求。同理,当以电容器组各相电容值的变化为判据时,也会碰到以上问题。现有的比较准确的方法几乎都需要在现场额外增加电压互感器或电流互感器,难以推广。

由此可见,虽然很多方法理论上可以反映电容器组的内部故障,但是在现场实施时会受到很多影响,难以实现预计功能。因此需要转变思路,从电容器组的一些特征入手,研究实用的方法。

2.1 LC 振荡频率变化量预警法的理论推导

通常电容器组会与电抗器串联使用。串联电抗器的主要作用是抑制谐波和限制涌流。当电网中谐波含量甚少,装设串联电抗器的目的仅为限制电容器组追加投入时的涌流,电抗率可选得比较小,一般不超过 1%。当电网中存在的谐波不可忽视时,则应考虑利用串联电抗器抑制谐波。当电网背景谐波为 5 次及以上时,可配置电抗率 4.5%~6%。因为 6% 的电抗器有明显的放大三次谐波的作用,因此在抑制 5 次及以上谐波,同时又要兼顾减小对 3 次谐波的放大,电抗率可选用 4.5%。当电网背景谐波为 3 次及以上时,电抗率配置有两种方案:全部配置 12% 电抗率,或采用 4.5%~6% 与 12% 两种电抗率进行组合。

因此如果测出该回路的 LC 振荡频率,当电容器发生内部元件故障时,LC 串联回路的振荡频率相对于初始的振荡频率会发生变化,因而可以通过这一变化来发现并分析故障,并通过其变化量来反映电容器组的故障。采用变化量是可以避免现场的各环节测量误差(默认初始电容器为正常状态)。该方法还可以发现串联电抗器的早期故障,实现对串联电抗器的智能预警。

以单星形内熔丝电容器为例,当一台电容器单元内部某一串联段有 k 个元件因发生击穿而被内熔丝动作切除,该故障相的电容器组的阻抗变化由式(4)可知,则故障相的容抗变为

$$X_c' = \frac{n[MNn(m-k) + kN(M-1) + k]}{mMMn(m-k) + mMk(M-1)k} X_{c0} \quad (7)$$

而其感抗不变,故此时的振荡频率 f_r' 为

$$f_r' = F \sqrt{\frac{n[MNn(m-k) + kN(M-1) + k]}{mMMn(m-k) + mMk(M-1)k} \frac{X_{c0}}{X_L}} = \sqrt{\frac{n[MNn(m-k) + kN(M-1) + k]}{mMMn(m-k) + mMk(M-1)k}} f_0 \quad (8)$$

$$\frac{f_r'}{f_0} = \sqrt{\frac{n[MNn(m-k) + kN(M-1) + k]}{mMMn(m-k) + mMk(M-1)k}} \quad (9)$$

同理,可以推出单星形接线外熔丝电容器:

$$\frac{f_r'}{f_0} = \sqrt{\frac{mM[(M-1)(n-k) + n]}{n(N-1)[(M-1)(n-k) + n] + Mn(n-k)}} \quad (10)$$

式中: f_r' 为电容器组某相 k 个元件损坏后的 LC 振荡频率; f_0 为电容器组某相的初始 LC 振荡频率; F 为 50 Hz; X_{c0} 为 LC 回路初始容抗; X_L 为 LC 回路感抗。

2.2 谐波分析法计算 LC 振荡值

为了能实时计算出电容器电抗器组的 LC 振荡值,我们采用母线三相电压和电容器组回路的三相电流的基波及各次谐波值,通过列方程直接解出 LC 的值,即电容器组和串联电抗器的振荡频率。

以 A 相为例,列出以下方程

$$\begin{cases} \dot{I}_{A1} \times j\omega L_A + \dot{I}_{A1} / (j\omega C_A) + \dot{I}_{A1} \times R_A = \dot{U}_{A1} \\ \dot{I}_{A3} \times j3\omega L_A + \dot{I}_{A3} / (j3\omega C_A) + \dot{I}_{A3} \times R_A = \dot{U}_{A3} \\ \dot{I}_{A5} \times j5\omega L_A + \dot{I}_{A5} / (j5\omega C_A) + \dot{I}_{A5} \times R_A = \dot{U}_{A5} \end{cases} \quad (11)$$

式中,下标中的数字 1、3、5 为 A 相电流或电压中的 1、3、5 次谐波分量。

以上方程组分解计算后,实际为 3 个未知量,所以根据 3 次谐波和 5 次谐波幅值的大小来选择采用哪个方程。经解方程计算后,直接得到 A 相的 LC 值,即该电容器电抗器组的 LC 振荡值。

2.3 采用母线电压和电容器放电 PT 电压计算 LC 值

考虑到电容器组的继电保护装置现场一般可以接入母线电压和放电 PT 电压,因此通过电容器组的端电压与电抗器的端电压计算出 LC 振荡值。

根据 LC 振荡频率的定义,推导出 LC 串联支路的振荡频率为

$$f_r' = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = F \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = F \sqrt{\frac{U_c}{U_L}} \quad (12)$$

式中: X_L 为所述的 LC 串联支路的感抗值; X_c 为所述的 LC 串联支路的容抗值; F 为 50 Hz; U_c 为

所述的电容器组的端电压; U_L 为所述的电抗器的端电压。

通过记录电容器组和串联电抗器的初始 LC 振荡值, 并实时计算目前的 LC 振荡值, 与初始的 LC 振荡值比较得出变化量, 该变化量通过与由电容器组参数所计算出的预警阈值比较, 大于该值则发预警信号。

此方法采用电容器组的放电 PT 电压和母线电压来计算 LC 振荡频率变化量, 精度较高, 且可以躲过系统的波动。

在利用 LC 串联支路的振荡频率的变化来分析故障时, 还需利用电容器组的各项参数(包括串并联数、接线方式、熔丝设置等), 分析判断导致振荡频率变化的原因, 才能分析得出电容器中元件的损坏个数及影响程度。通过电容器监测系统发出预警或告警信号, 便于及时安排检修。

3 电容器在线监测和预警装置设计

除了以上不平衡电流变化量判据, 装置还有其他几个主要判据: 1) 2~25 次谐波越限; 2) 中性点电压变化量; 3) 相电流差值; 4) 过电压、低电压等^[15-16]。

根据这些判据的需求, 装置需同时具备较高精度的基波和各次谐波, 因此设计独立双通道、双 DSP 的硬件结构。

装置的模块设计如图 2 所示, 按照 CPU 的分布来看, 主要由 DSP1、DSP2、管理 CPU 共三个大模块组成。

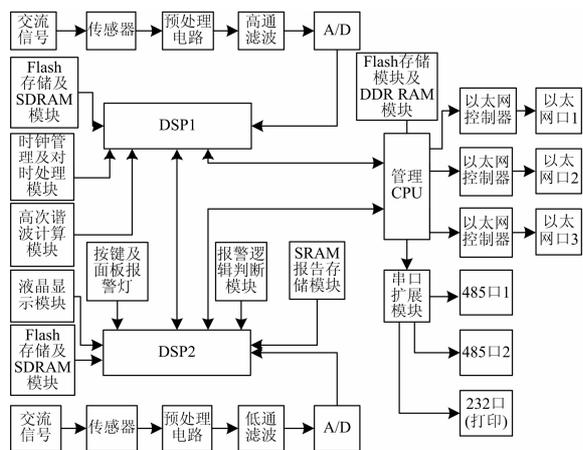


图 2 装置硬件框图

Fig. 2 Hardware block diagram

采用独立双 DSP, 经独立双通道采集, 每个通道经过不同的隔离互感器、采集电路并经不同的算法, 分别实现基于电压电流通道的各次谐波监测和

基于电压电流通道基波的损耗角正切值计算。一组电流电压, 经过具有高精度基波特性的互感器和滤波电路、A/D 采样电路, 由 DSP 采样计算得到准确的电压电流基波值, 用于不平衡电流和电压的计算。另外一组电流电压, 经过具有高精度谐波特性的互感器和谐波放大电路、A/D 采样电路, 由 DSP 采样计算得到准确的谐波电流电压。

两个高速 DSP(DSP1 和 DSP2)以及相应的完全独立的 16 位 A/D 转换器、存储器以及 I/O 扩展电路, 分别用于装置的各种计算功能, 两部分电路完全冗余配置, 确保装置的可靠性。其中 DSP1 部分包含交流量的采集、预处理模块、高通滤波模块、AD 采样模块和高次谐波计算、时间管理及对时功能, 以及 FLASH 和 SDRAM 的处理模块。DSP2 部分包含交流量的采集, 预处理模块、低通滤波模块、AD 采样模块和基波各数据计算、告警判断、以及 FLASH 和 SDRAM 的处理模块, 掉电保持 SRAM 报告及录波保存模块, 以及液晶显示模块和按键指示灯模块。

管理 CPU 完成与监控计算机或 RTU 的连接, 设置了 3 个用于向监控计算机或 RTU 传送报告的 100 M 以太网接口, 可以选择双绞线方式或光纤方式。另外还配置有 2 个 RS485 接口和 1 个 RS232 打印接口用于连接打印机。时钟同步端口用于装置的硬对时, 其电平接口符合 RS422/485 标准, 该接口接收 GPS 对时装置发送的秒脉冲信号或 IRIG-B 对时信号。

4 现场数据

为了对新的预警方法与监测装置进行验证, 在某地区的数个 110 kV 变电站, 安装了电容器监测及预警装置。

其中, 现场某台电容器的参数如表 1。初装时, 装置实测数据如表 2。

表 1 电容器组参数

Table 1 Capacitor parameters

电流互感器一次/二次额定值	200 A/5 A
母线电压互感器一次/二次额定值	10.0 kV/100 V
放电 PT 互感器一次/二次额定值	11.0 kV/173.2 V
整组容量	2 400 kVA
单台容量	100 kVA
电容器串联数	1
电容器并联数	8
元件串联数	4
元件并联数	3
内熔丝方式	0
电抗率	5%

表 2 初装时装置实测数据

Table 2 Initial device data

放电 PT	母线	电抗器	LC 振荡
电压/kV	电压/kV	电压/kV	频率/Hz
A 相 6.348	5.897	0.460	186.1
B 相 6.332	5.880	0.451	187.7
C 相 6.348	5.882	0.461	185.8

以初装时的实测数据为基准值，根据式(10)计算出故障元件个数 $k=1$ 时的变化量为 -2.06% 。考虑到测量误差的影响，该变化量乘以 0.95 作为预警变化量。从而得到故障元件个数 $k=1$ 时的三相预警振荡频率为：A 相 $182.5(\text{Hz})$ 、B 相 $184.0(\text{Hz})$ 、C 相 $182.2(\text{Hz})$ 。运行数月后，集控终端收到 A 相预警信号，远程查看后，装置实测数据如表 3。

表 3 装置实测数据

Table 3 Device data

放电 PT	母线	电抗器	LC 振荡
电压/kV	电压/kV	电压/kV	频率/Hz
A 相 6.378	5.898	0.480	182.3
B 相 6.338	5.885	0.454	186.8
C 相 6.354	5.886	0.467	184.4

由此可见，该判据能有效判断出故障，并找到故障相。

5 结语

通过以上理论推导与现场数据，可以得到如下结论：

- 1) 电容器组的在线监测及预警装置对于维护其安全运行能起到重要作用。
- 2) 由理论分析和模拟仿真可知，电容器组的早期故障预警是可行的，当单台电容器一个元件发生故障时，可以及时预警。
- 3) 文中提出的基于 LC 振荡频率变化量法能够准确地反映电容器早期内部故障。

电容器早期故障预警为电容器故障处理赢得了时间，避免了电容器故障的深入发展与扩大，有利于提高电容器装置的运行管理水平。

参考文献

[1] 郝福忠, 赵锋, 李晋城, 等. 考虑电网谐波影响的电容器投切研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 79-84.
HAO Fuzhong, ZHAO Feng, LI Jincheng, et al. Research of capacitor switching considering harmonic influence[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4):

79-84.
[2] 胡泽春, 钟明明, 王佳贤, 等. 考虑多负荷水平的中低压配电网无功补偿优化规划[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 167-173.
HU Zechun, ZHONG Mingming, WANG Jiaxian, et al. Optimal reactive power compensation for medium and low voltage distribution network considering multiple load levels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 167-173.
[3] 陈瑶潘, 久平, 姚大伟, 等. 厂用电系统协调无功控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 188-195.
CHEN Yaopan, JIU Ping, YAO Dawei, et al. Study of coordinated reactive power control strategy for power plant electrical auxiliary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 188-195.
[4] 陈庆祺, 刘锦兰. 35 kV 并联电容器组群爆故障分析及其零序差流保护的参数整定[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 67-71.
CHEN Qingqi, LIU Jinlan. Analysis on colony fusing failure of 35 kV parallel capacitors and parameters set on its zero sequence difference current protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 67-71.
[5] 孔飘红, 韩雪莲, 李芳. 电容器组群爆的故障分析与运行建议[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(6): 43-47.
KONG Piaohong, HAN Xuelian, LI Fang. Fault analysis of external fuse group explosion in capacitor banks and operation suggestion[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 31(6): 43-47.
[6] WANG Pei, RAGHUVeer M R, MCDERMID W, et al. A digital technique for the on-line measurement of dissipation factor and capacitance[J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2001, 8(2): 228-232.
[7] 张建军, 孙红华. 高压并联电容器在线监测系统的研究[C]// 输变电年会 2012 论文集.
ZHANG Jianjun, SUN Honghua. Research of on-line monitoring system of high voltage parallel capacitor[C]// Power Transmission and Transformation Conference Proceedings of 2012.
[8] 江卫中, 刘海燕, 周建良. 10 kV 单星形接线电容器组早期故障预警方案[J]. 供用电, 2012, 29(2): 59-62.
JIANG Weizhong, LIU Haiyan, ZHOU Jianliang. 10 kV single star connection capacitor bank failure early warning program[J]. Distribution & Utilization, 2012, 29(2): 59-62.
[9] 冯顺萍, 刘文泽, 蔡泽祥. 并联电容器组中性线电流不平衡保护的分析研究[J]. 电力科学与工程, 2010,

- 26(2): 47-51.
FENG Shunping, LIU WENZE, CAI ZEXIANG. Study on neutral-line unbalance current protection in shunt capacitor bank[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(2): 47-51.
- [10] LACHMAN M F, et al. On line diagnostic of high voltage bushings and current transformers using the sum current method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 325-332.
- [11] GASPERI M L. Life prediction modeling of bus capacitors in AC variable frequency drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1430-1435.
- [12] 王钰, 孙红华. 对高压并联电容器组中单台电容值在线监测的研究[J]. 电力学报, 2013, 28(2): 128-132.
WANG Yu, SUN Honghua. Research of on-line monitoring system for high voltage shunt capacitors based on single capacitance[J]. Journal of Electric Power, 2013, 28(2): 128-132.
- [13] AHMAD A S, GHOSH P S, ALJUNIDS A K. Modeling of various meteorological effects on contamination level for suspension type of high voltage insulators using ANN[C]// IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002, 10(3): 1030-1035.
- [14] 陈天翔, 张保会, 陈天韬, 等. 新型电容型电力设备 tan δ 在线高精度测量系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 67-70.
CHEN Tianxiang, ZHANG Baohui, CHEN Tiantao, et al. New on-line high precision tan δ monitoring system for capacitive equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 67-70.
- [15] 熊兰, 席朝辉, 肖波, 等. 基于 SCADA 的并联电容器在线监测与预警[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(1): 54-58.
XIONG Lan, XI Zhaohui, XIAO Bo, et al. On-line monitoring and early warning of the shunt capacitor based on SCADA[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 54-58.
- [16] 马亮, 钱珞江. 谐波对集合式并联电容器内部故障保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 87-91.
MA Liang, QIAN Luojiang. Impact of harmonics on the internal fault protections of assembling capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 87-91.

收稿日期: 2014-06-03; 修回日期: 2014-07-07

作者简介:

陈晓宇(1979-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、电气设备智能化、继电保护及智能化变电站等; E-mail: xiaoyuchen@wiscom.com.cn

郑建勇(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子、电气设备智能化等方面的研究工作;

梅军(1971-), 男, 副教授, 主要从事电力电子、电气设备智能化等方面的研究工作。

(编辑 魏小丽)