

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.008

基于SVG调节配变三相不平衡电流的应用研究

周恒逸, 齐 飞, 毛柳明, 叶会生, 赵 邈, 段绪金, 万 代

(国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007)

摘要: 配电变压器三相电流不平衡对电网系统的设备和用户有着十分严重的影响。文中设计了一种基于静止无功发生器(SVG)的配变三相不平衡电流调节装置,可实现自动平衡三相负荷电流和无功补偿的功能。文中首先分析了该调节装置的工作原理,然后介绍了装置所采用的控制流程,最后给出了多种补偿功能试验和典型供电台区现场运行的结果。结果表明,文中提出的不平衡电流调节装置不仅具有较好的动态调节性能,且具有良好的无功补偿效果,可有效提升电能质量。

关键词: 配电变压器; 不平衡电流; 静止无功发生器; 电能质量

Application Research on Regulating Distribution Transformer Three-phase Unbalanced Current Based on SVG

ZHOU Hengyi, QI Fei, MAO Liuming, YE Huisheng, ZHAO Miao, DUAN Xujin, WAN Dai

(State Grid Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: The three-phase current imbalance of distribution transformer has a very serious impact to power system and user. A three-phase current imbalance adjustment device is designed based on SVG in this paper can automatically balance the distribution transformer three-phase load current and the reactive power compensation. Firstly the working principle of the adjustment device is analyzed; and then the device's control flow is introduced; finally the results of compensation test and typical power station area operation are given. The results show that the current imbalance adjustment device not only has better dynamic performance, but also has good reactive compensation effect, which can effectively improve power quality.

Key words: distribution transformers; current imbalance; SVG; power quality

0 引言

近年来,随着电网系统的发展,低压单相用电负荷增长迅猛,由此引发的配电变压器三相负荷不平衡现象日渐突出^[1]。同时三相负荷不平衡也给电网带来了严重的危害,其导致的配变运行损耗增大、三相电压质量不合格、配变单相过载损坏等问题正受到越来越多的关注^[2-4]。为减少低压不平衡电流对电网系统的影响,在 DL/T 1102—2009《配电变压器运行规程》中明确规定了 Y/yn0 接线的配电变压器运行时的三相电流不平衡度应小于 15%,变压器中性线电流不能超过变压器额定电流的 25%;

Dyn11 接线的配电变压器运行时的三相电流不平衡度应小于 25%,变压器中性线电流不能超过变压器额定电流的 40%。

目前,针对配电变压器三相负荷电流不平衡问题,电网运行单位主要通过调整低压用户分布的方式来解决,但由于供电负荷电流主要受用电时序的影响,导致人工调整的效果不甚理想^[5-8]。此外,文[9-11]提出了采用固定的静止电容器补偿不平衡电流的方法,但由于低压配电系统存在大量的感性负载,且运行工况复杂,使得补偿装置很难达到理想效果,还会造成谐波污染、低频谐振和无功倒送系统的问题。

静止无功发生器(SVG)是一种电压源型逆变

收稿日期:2015-10-21; 修回日期:2015-11-24

基金项目:国网湖南省电力公司科技项目(5216A01300JW)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Company(5216A01300JW).

器^[12-16],其使用可关断的 GTO、IGBT 等电子元件作为开关部件,通过适当的触发控制,SVG 装置可输出幅值可调、相位角可调的电流或电压,从而可实现补偿不平衡电流中的负序分量和无功损耗的作用^[17-20]。因此,文中基于静止无功发生器原理,设计了一种配变三相不平衡电流调节装置,可实现自动平衡三相负荷电流和无功补偿的功能。笔者在分析该调节装置工作原理的基础上,介绍了装置所采用的控制流程,最后给出了多种补偿功能试验和典型供电台区现场运行的结果。应用结果表明,配变三相不平衡电流调节装置不仅具有较好的动态调节性能,且具有良好的无功补偿效果,可有效提升电能质量。

1 基于 SVG 自动调节装置原理及硬件结构

1.1 装置的调节原理

对于任何的三相不平衡负荷,通过适当的并联无功补偿都可以使三相系统的线电流成为三相完全对称的纯有功电流。以考虑较极端且简单的情况,设三相三线系统中只有 a、b 相间接入纯电阻负载,电阻为 R_{ab} ,其电导为 $G_{ab}=1/R_{ab}$,而 b、c 及 c、a 相间没有负载,假定系统三相电压完全对称,即

$$U_a=U_b e^{j120^\circ}=U_c e^{-j120^\circ} \quad (1)$$

显然此时 a、b、c 三相线电流分别为

$$\begin{cases} I_a=(U_a-U_b)G_{ab}=\sqrt{3} U_a e^{j30^\circ} G_{ab} \\ I_b=-\sqrt{3} U_a e^{j30^\circ} G_{ab} \\ I_c=0 \end{cases} \quad (2)$$

如果分别在 b、c 和 c、a 相间并联电容 C_{bc} 和电感 L_{ab} ,满足如下条件

$$\begin{cases} C_{bc}=\frac{G_{ab}}{\sqrt{3}\omega_1} \text{ (即并联电纳 } B_{bc}=\omega_1 C=\frac{G_{ab}}{\sqrt{3}}, \omega_1 \text{ 为基波角频率)} \\ L_{ca}=\frac{\sqrt{3}}{G_{ab}\omega_1} \text{ (即并联电纳 } B_{ca}=\frac{-1}{\omega_1 L}=-\frac{G_{ab}}{\sqrt{3}}) \end{cases} \quad (3)$$

则此时 a、b、c 三相的线电流分别为

$$\begin{cases} I_a=\sqrt{3} U_a e^{j30^\circ} G_{ab}-(U_c-U_a)/(j\omega_1 L)=U_a G_{ab} \\ I_b=-\sqrt{3} U_a e^{j30^\circ} G_{ab}+(U_b-U_c)(j\omega_1 C)=U_a e^{-j120^\circ} G_{ab}=U_b G_{ab} \\ I_c=(U_c-U_a)/(j\omega_1 L)-(U_b-U_c)(j\omega_1 C)=U_a e^{j120^\circ} G_{ab}=U_c G_{ab} \end{cases} \quad (4)$$

可见此时系统三相线电流完全对称而且为纯有功电流。

1.2 装置的硬件结构

基于 SVG 自动调节三相不平衡电流装置的结构见图 1,实物图见图 2。

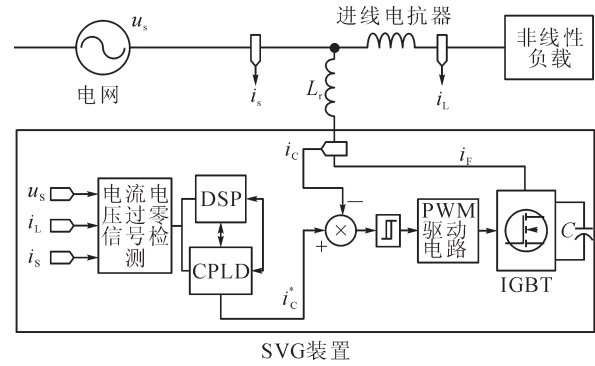


图 1 三相不平衡电流调节装置结构

Fig. 1 The structure of three-phase current imbalance adjustment device



图 2 装置实物图

Fig. 2 Device physical picture

自动调节装置由 IGBT 三相变流器、信号检测电路、基于 DSP 的主控制电路、CPLD 信号接口单元、PWM 信号驱动电路及显示电路构成。其中:信号检测电路用于检测电网侧电压过零信号 U_s 、负载电流 I_L 、输出电流 I_c 和直流母线电容电压 U_c ;DSP 为主控制器件,其功能为完成系统电压、电流信号采集分析、PDI 控制、输出电流基准正弦信号、PWM 控制信号的产生等。CPLD 信号接口单元主要用于接口信号转换,集中处理 IGBT 保护信号、过热保护、风机控制、PWM 信号输出等。

2 软件控制流程

由 SVG 三相不平衡调节工作原理可知,要实现负序电流、无功电流的正确、高效补偿,装置首先对电网侧三相相电压和相电流进行采样,将电压或电流互感器输出的电流信号转化为电压信号并进行适当的滤波与放大;再由控制算法处理模块对模拟量检测环节送来的数字信号进行处理,快速检测出需要补偿的无功和负序电流,并与 SVG 产生的电流进行闭环控制比较,根据其差值产生触发脉冲信号送给触发脉冲发生模块;最后由触发脉冲发生模块根据该信号产生适当的驱动脉冲驱动 IGBT 输出大小相等、方向相反的补偿电流,从而达到补偿的效果,文中设计的基于 SVG 的自动调节装置的主程序

控制流程见图 3。

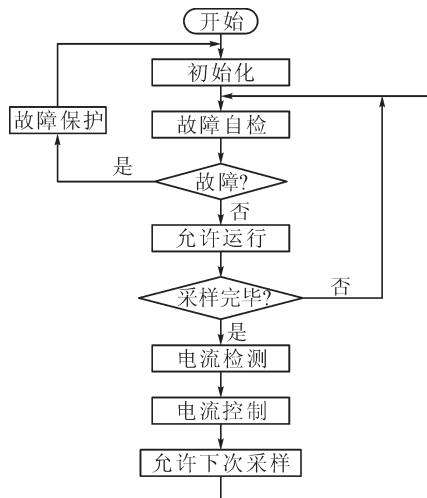


图 3 主程序框图

Fig. 3 The main program block diagram

其中,初始化流程、采样流程、电流检测流程、电流控制流程分别见图 4~7。

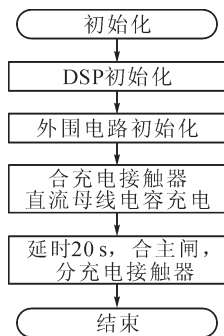


图 4 初始化流程图

Fig. 4 Initialization flow

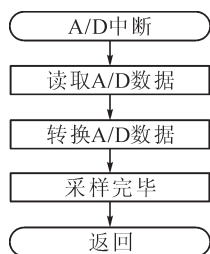


图 5 采样流程图

Fig. 5 Sampling flow chart

3 试验分析和结果

3.1 三相电流不平衡补偿效果试验

为评估基于 SVG 自动调节装置的三相不平衡动态调节功能,文中搭建了见图 8 所示的试验平台,通过在 A、B、C 三相间接入不平衡负载,使 SVG 调节装置工作在电流不平衡补偿运行模式,记录装置启动前后相关运行数据,分别见表 1、2。

由表 1、2 数据可见,装置在电流不平衡补偿模

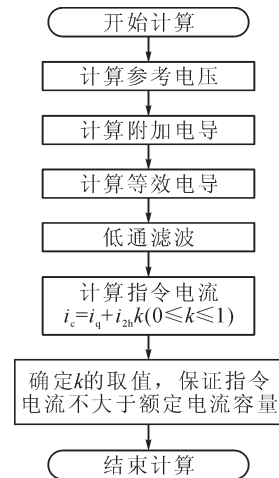


图 6 电流检测流程图

Fig. 6 Current detection flow chart

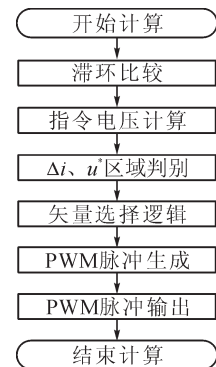


图 7 电流控制流程

Fig. 7 Current control flow chart

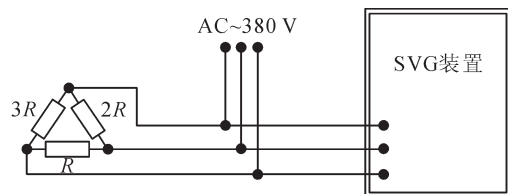


图 8 不平衡补偿试验接线图

Fig. 8 Unbalanced compensation test wiring diagram

表 1 不平衡补偿前测试数据

Table 1 Test data before the imbalance compensation

相别	A相	B相	C相
电网电压/V	410	412	409
电网电流/A	45	83	149
负载电流/A	45	84	150
功率因数	0.967	0.904	0.767

表 2 不平衡补偿后测试数据

Table 2 Test data after the imbalance compensation

相别	A相	B相	C相
电网电压/V	411	412	409
电网电流/A	89	92	90
功率因数	0.990	0.992	0.996
负载电流/A	46	83	150
补偿电流/A	58	57	65

式下, 三相电流不平衡度由补偿前的 69.7% 下降至 3.37%, 补偿效果明显。

3.2 三相电流不平衡及无功补偿效果试验

为进一步验证装置在调节三相不平衡电流时的无功补偿效果, 文中搭建了见图 9 所示试验平台, 在 A、B、C 三相间同时接入不平衡负载和电容, 调节装置设置为不平衡及无功补偿运行模式, 记录装置启动前后的运行数据, 分别见表 3、4。

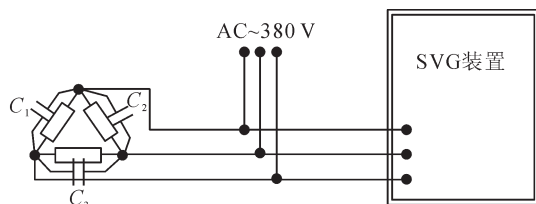


图 9 不平衡及无功补偿试验接线图

Fig. 9 Imbalance and reactive power compensation test wiring diagram

表 3 不平衡及无功补偿前测试数据

Table 3 Test data before the imbalance and reactive power compensation

相别	A相	B相	C相
电网电压/V	410	412	409
电网电流/A	75	93	169
负载电流/A	74	94	170
功率因数	-0.567	-0.604	0.360

表 4 不平衡及无功补偿后测试数据

Table 4 Test data after the imbalance and reactive power compensation

相别	A相	B相	C相
电网电压/V	411	412	409
电网电流/A	90	93	94
功率因数	0.989	0.996	0.997
负载电流/A	74	94	169
补偿电流/A	85	87	92

由补偿前后测试数据可见, 装置在三相电流不平衡及无功补偿模式下, 运行结果满足规程要求, 且自动调节装置的无功补偿效果与负载电流的变化无关系, 在装置的额定输出范围内可实现快速动态无功补偿。

4 现场应用

4.1 典型供电台区应用

通过在电网系统内挑选典型供电台区进行应用, 可以进一步验证文中设计的调节装置对现场负荷的适用性。为此, 笔者选择了两个典型供电台区, 其中台区 1 具有城市供电负荷特征, 台区 2 具有农

村供电负荷特征, 其基本情况见表 5。在调节装置启动前, 该两个台区的三相负荷电流最大不平衡度分别达到了 56.47% 和 79.07%, 均大幅超过了规程允许值(15%), 现场台区电气一次接线图见图 10。装置启动前后两个台区相关数据见图 11-14。

表 5 典型供电台区基本情况表

Table 5 The basic table of typical power station area

序号	配变容量/ (kVA)	最大不平衡时负荷电流/A				不平衡 度/%
		A相	B相	C相	O相	
台区 1	160.0	22.2	51.0	28.8	34.2	56.47
台区 2	80.0	18.0	46.0	86.0	52.4	79.07

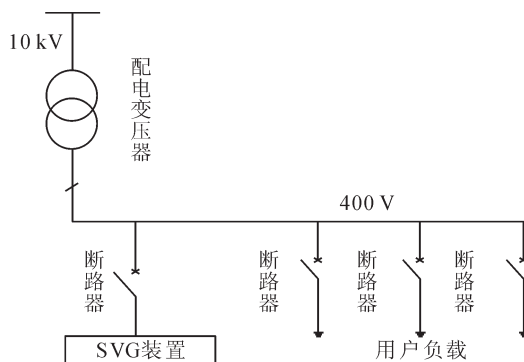


图 10 台区电气一次接线图

Fig. 10 The electrical wiring diagram of power station

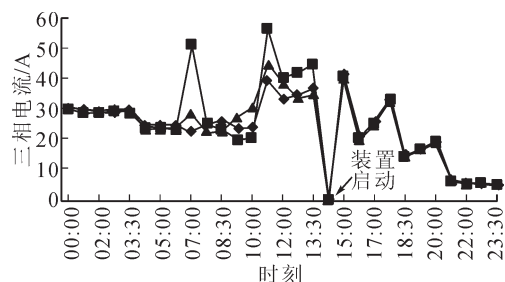


图 11 台区 1 三相电流曲线

Fig. 11 Three-phase current curve of power station 1

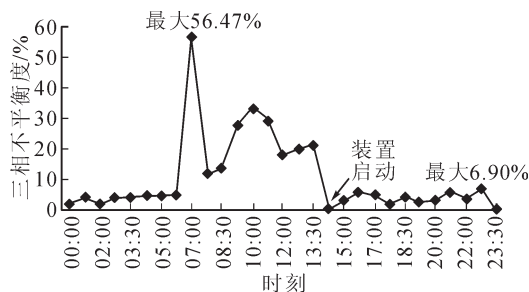


图 12 台区 1 三相电流不平衡度曲线

Fig. 12 Three-phase current unbalance curve of power station 1

由图 11-14 可见, 两个台区的三相不平衡问题在调节装置启动后均得到了改善, 其中台区 2 的最大三相不平衡度由 79.07% 下降至 5.17%, 台区 1 的最大三相不平衡度由 56.47% 下降至 6.90%, 装置的

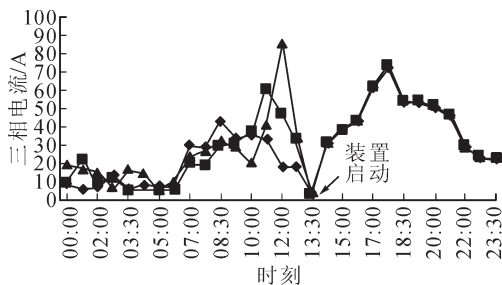


图 13 台区 2 三相电流曲线

Fig. 13 Three-phase current curve of power station 2

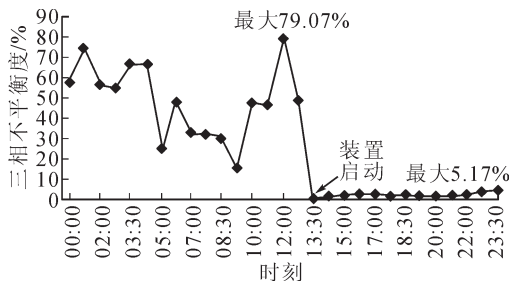


图 14 台区 2 三相电流不平衡度曲线

Fig. 14 Three-phase current unbalance curve of power station 2

应用效果明显,有效增强了配电变压器的供电能力,避免了单相重载现象的发生,用户供电质量大幅提升。

4.2 技术优势

文中设计的基于 SVG 的动态调节装置的应用技术优势见表 6,从表 6 中可见,该装置具有更为快速的调节速度及调节范围,且较 SVC 等静态调节装置所使用的元器件更少,具有故障率低、体积小、运行寿命长的优势,可进一步提升供电可靠性。

表 6 应用技术优势情况表

Table 6 The basic table of technical advantages

技术指标	补偿后功率因素	调节范围	响应时间/ms	体积	使用寿命
SVG动态技术	0.99	全范围	≤5	较小	10年以上
SVC等静态技术	0.80~0.90	非全范围	≥10	较大	3年左右

5 结论

文中基于静止无功发生器原理,设计了一种三相不平衡电流动态调节装置,可实现自动平衡三相负荷电流和无功补偿的功能。在分析该调节装置工作原理的基础上,介绍了装置所采用的控制流程,最后给出了多种补偿功能试验和典型供电台区现场运行的结果。结果表明,该调节装置不仅具有较好的动态调节性能,且具有良好的无功补偿效果,

可有效提升电能质量。

参考文献:

- [1] 杨云龙,王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法[J]. 电网技术,2004,28(8): 73-76.
YANG Yunlong,WANG Fengqing. Additional loss and voltage deviation caused by unbalanced operation of distribution transformer and countermeasures[J]. Power System Technology,2004,28(8):73-76.
- [2] 杜 雄,彭礼明,周维维. N+1 混合无功补偿系统的研究[J]. 电网技术,2008,32(14):39-43.
DU Xiong,PENG Liming,ZHOU Luwei. A hybrid reactive power compensation system consisting of multi capacitor banks and a SVG[J]. Power System Technology,2008,32(14):39-43.
- [3] 李心广,赖声礼,秦华标,等. 电网的无功及三相不平衡综合补偿研究[J]. 电网技术,2001,25(10):30-33.
LI Xinguang,LAI Shengli,QIN Huabiao,et al. An approach of integrated compensation for reactivepower and three phase unbalance[J]. Power System Technology,2001,25(10):30-33.
- [4] 罗 曼,朱 磊. 区域电网无功优化控制系统的研究和应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(6):29-34.
LUO Man,ZHU Lei. Research and application of reactive power optimization and control system in regional grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2014,35(6):29-34.
- [5] 张明江,纪延超,顾 强. 三相不平衡与无功功率的综合补偿方法[J]. 电网技术,2008,32(s1):20-23.
ZHANG Mingjiang,JI Yanchao,GU Qiang. Integrated compensation scheme for three-phase unbalance and reactive power[J]. Power System Technology,2008,32(s1):20-23.
- [6] 彭 辉,黄亦农,王茂海. 配电网中三相不平衡负荷补偿[J]. 电力自动化设备,2002,22(1):32-34.
PENG Hui,HUANG Yinong,WANG Maohai. 3-Phase asymmetric load compensation in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(1):32-34.
- [7] 王茂海,孙元章. 通用瞬时功率理论在三相不平衡负荷补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):60-63.
WANG Maohai,SUN Yuanzhang.Application of universal instantaneous power theory to unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(11):60-63.
- [8] 韦 钢,陈森环,蔡 阳,等. 基于瞬时无功功率理论的三相不平衡负荷补偿[J]. 电力自动化设备,2010,30(2): 59-63.
WEI Gang,CHEN Senhuan,CAI Yang,et al. Compensation for three-phase unbalanced load based on instantaneous reactive power theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):59-63.

- [9] 朱永强, 刘文华, 邱东刚, 等. 基于单相 STATCOM 的不平衡负荷平衡化补偿的仿真研究[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 42-45.
ZHU Yongqiang, LIU Wenhua, QIU Donggang, et al. Simulation of balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 42-45.
- [10] 王 越, 刘晋平, 李向荣. 用新型静止无功发生器抑制由电弧炉引起的闪变之研究[J]. 电网技术, 1998, 22(9): 63-66.
WANG Yue, LIU Jinping, LI Xiangrong. Research on reducing flicker caused by arc furnace with advanced static var generator[J]. Power System Technology, 1998, 22(9): 63-66.
- [11] 李兰芳, 刘开培, 李建奇. 点焊机三相不平衡负荷的静止无功补偿[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 810-815.
LI Lanfang, LIU Kaipei, LI Jianqi. SVC for three-phase unbalanced load of spot welding machine[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 810-815.
- [12] 王光政, 平 增, 卢 伟, 等. SVG 技术在配电网中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(1): 90-93.
WANG Guangzheng, PING Zeng, LU Wei, et al. The application of SVG technology in distribution network[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013, 34(1): 90-93.
- [13] 李 银, 罗 朋, 冯学俊, 等. 载波层叠调制技术在 6 kV 级联 STATCOM 中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(6): 1-4.
LI Yin, LUO Peng, FENG Xuejun, et al. Application of carrier lamination modulation technology in 6 kV cascade STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(6): 1-4.
- [14] 孙 宁. 6 kV 级联型 STATCOM 关键技术的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(3): 29-32.
SUN Ning. Research on key technology of 6 kV cascaded STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(3): 29-32.
- [15] 李 旷, 刘进军, 魏 标, 等. 静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 58-63.
LI Kuang, LIU Jinjun, WEI Biao, et al. Control and optimization of static var generator for grid voltage unbalance mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 58-63.
- [16] 庄淑瑾, 孙玉坤, 任明伟, 等. 静止无功发生器的预测电流控制方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 53-56.
ZHUANG Shujin, SUN Yukun, REN Mingwei, et al. Predictive current control method of static var generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 53-56.
- [17] 赵 伟, 罗 安, 唐 杰, 等. 静止无功发生器与晶闸管投切电容器协同运行混合无功补偿系统[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 92-98.
ZHAO Wei, LUO An, TANG Jie, et al. Hybrid var compensator based on the coordinated operation of STATCOM and TSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 92-98.
- [18] 赵 钢, 刘俊杰. 静止无功发生器在不平衡系统中的控制策略研究[J]. 电气应用, 2012, 31(19): 38-42.
ZHAO Gang, LIU Junjie. Research of control for static var generator in unbalance system[J]. Electrotechnical Application, 2012, 31(19): 38-42.
- [19] 李 旷, 刘进军, 王兆安, 等. 静止无功发生器在电压不平衡下的工作特性及其对不平衡电压的补偿[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 69-74.
LI Kuang, LIU Jinjun, WANG Zhao'an, et al. Operation and control of static var generator for voltage unbalance mitigation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 69-74.
- [20] 郑 伟, 拜润卿, 宋 磊, 等. 静止无功发生器在风电场电网的应用研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(4): 35-37.
ZHENG Wei, BAI Runqing, SONG Lei, et al. The applied research of SVG in wind power system[J]. Power Electronics, 2012, 46(4): 35-37.

周恒逸(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电设备技术研究。

齐 飞(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电设备技术研究。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部