

无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制

辛业春^{1,2}, 李国庆¹, 王朝斌¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 将静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)并入电网来补偿无功功率和配电网三相负荷不平衡。通过对称分量法和叠加原理,对配电网三相负荷不平衡情况下正序、负序等效电路进行分析,提出一种新的正、负序补偿电流叠加补偿控制方法。正序控制环采用 $\delta-\theta$ 控制,实现配电网无功功率补偿和保持STATCOM直流侧电压稳定;负序控制环采用 $\varphi-\theta$ 控制,实现STATCOM补偿三相负荷不平衡产生的负序电流,使电网侧三相负荷保持平衡。仿真和实验结果表明,该方法可以有效地补偿电网无功功率和三相负荷不平衡。

关键词: 电力系统; 无功补偿; 静止同步补偿器; 负荷不平衡; 对称分量法; 叠加原理

Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component

XIN Ye-chun^{1,2}, LI Guo-qing¹, WANG Chao-bin¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: A static synchronous compensator (STATCOM) is used into distribution grid for compensating reactive power and three-phase unbalance load for the distribution grid. According to analyzing the positive sequence equivalent circuit and negative sequence equivalent circuit under the three-phase unbalance load of distribution grid, using the symmetrical component method and superposition principle, a new cascade loop control strategy of positive sequence current and negative sequence current is proposed. Using $\delta-\theta$ control, the positive sequence loop compensates reactive power of distribution grid and maintains stability of STATCOM DC voltage. Using $\varphi-\theta$ control in the negative sequence loop can make STATCOM compensate negative-sequence current caused by three-phase load unbalance and keep distribution grid side three-phase load balanced. Simulation and experiment results are presented to verify the validity of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377016).

Key words: power system; reactive power compensation; static synchronous compensator; unbalance load; symmetrical component method; principle of superposition

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0072-07

0 引言

由于交流电弧炉、电力机车等不平衡负荷大量接入,以及存在随机的单相负荷,使得配电网三相负荷不平衡。三相负荷不平衡会导致供电网络三相电压、电流不平衡,进而增加变压器、线路损耗,对电力系统安全运行产生不利影响^[1-2]。电力系统线路、变压器、异步电动机等设备都要消耗无功功率,无功功率增加了线路和变压器损耗,增大了输电网

络的电压降落,对电力系统的安全、稳定和经济运行产生不利影响。

近年来,国内外同行对配电网电能质量补偿控制进行了系列研究^[3-14]。文献[3]研究了基于瞬时功率理论的三相负荷不平衡补偿计算方法,得出了只利用无功元件就能够完全补偿三相负荷不平衡的结论。文献[4-5]提出了一种求出补偿导纳后利用SVC补偿无功功率和三相负荷不平衡的方法,但需要配置大量的无源滤波装置;文献[6]研究了三相负荷不平衡补偿导纳的计算,然后投切电容器组来补偿三相负荷不平衡,采用这种方法,要得到相对准确的

补偿导纳支路, 必然要增加电容器组级数, 难以保证补偿精度。由于这类补偿方法含有大量无源元件, 使得补偿装置体积庞大; 此外, 这类方法的补偿效果受接入点电压质量的影响较大, 如果接入点电压存在不平衡, 补偿效果将难以得到保证。文献[8-9]分别采用了三个相互独立的单相STATCOM组成三相STATCOM来补偿三相负荷不平衡, 采用这类方法由于直流侧电容相互隔离, 流过电容的电流不同导致直流侧电容电压不平衡, 为了控制电容电压不平衡在一定范围内, 需要增大直流电容容量, 且控制算法复杂。文献[10-11]采用STATCOM进行无功功率补偿和三相电压不平衡补偿控制, 未研究三相负荷不平衡的补偿控制方法, 但建议研究合适的控制方法能够使STATCOM具有补偿三相负荷不平衡能力, 进一步扩展STATCOM的功能。文献[12]提出了一种基于双d-q变换的补偿电流计算方法和载波移相矢量调制的D-STATCOM补偿三相负荷不平衡控制方法。

本文研究将静止同步补偿器并入电网来补偿无功功率和平衡配电网三相负荷。通过对称分量法和叠加原理, 对配电网三相负荷不平衡情况下正序、负序等效电路进行分析, 提出一种新的正、负序补偿电流叠加补偿控制方法; 正序控制环采用 δ - θ 控制, 实现无功功率补偿和保持STATCOM直流侧电压稳定; 负序控制环采用 φ - θ 控制, 补偿三相负荷不平衡产生的负序电流; 补偿控制方法以系统无功功率和负序电流为目标值进行反馈控制, 能够实现无功电流和不平衡电流的快速、精确补偿; 控制方法简单, 易于在STATCOM数字控制系统中实现。无须增加硬件成本, 进一步扩展了STATCOM的功能。仿真和实验结果表明, 该方法可以有效地实现无功补偿和三相负荷不平衡补偿。

1 对称分量法

1.1 稳态条件下的对称分量法

在三相电路中, 对于任意一组不对称的三相电压或电流相量, 可以分解为三组三相对称的电压或电流相量^[15-16]; 以电流为例, 当选择a相作为基准相时, 三相电流相量与其序分量之间的关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a(1)} \\ \dot{I}_{a(2)} \\ \dot{I}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a = e^{j2\pi/3}$; \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 为三相电流相量; $\dot{I}_{a(1)}$ 、 $\dot{I}_{a(2)}$ 、 $\dot{I}_{a(0)}$ 为a相电流的正序、负序和零序分量。

1.2 瞬时对称分量法

本文所研究的控制方法需要对三相电流瞬时值进行对称分量变换, 需要采用瞬时对称分量法。瞬时对称分量法可描述为

$$\begin{bmatrix} i_{a(1)} \\ i_{a(2)} \\ i_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 为三相电流瞬时值; $i_{a(1)}$ 、 $i_{a(2)}$ 、 $i_{a(0)}$ 为a相电流的正序、负序和零序瞬时值。

2 补偿方法研究

2.1 采用 STATCOM 补偿的系统结构

本文研究的是适合于10 kV配电系统的无功功率和负荷不平衡补偿系统, 在10 kV配电变压器低压侧进行补偿, 系统结构如图1所示。

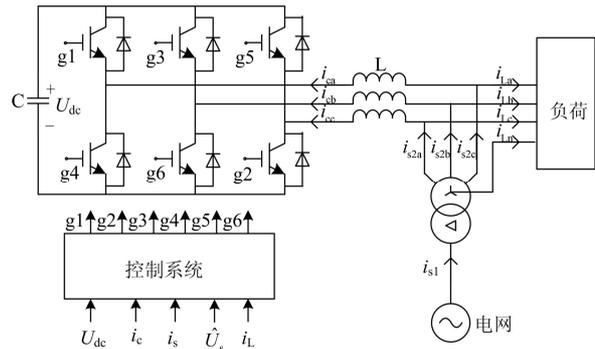


图1 采用 STATCOM 补偿的系统结构图

Fig. 1 System configuration of STATCOM

STATCOM 装置主电路采用 PWM 电压源型变换器, 通过串联电抗器接入电网。采取正、负序补偿电流叠加补偿控制方法, 分别针对电网无功功率和三相负荷不平衡进行补偿; 假设电源为理想三相电源, 负荷为不平衡三相负荷。10 kV 配电系统为三相三线制系统, 由于零序电流没有通路, 所以采用对称分量法对电压和电流进行分解时, 只存在正序分量和负序分量, 没有零序分量, 补偿系统只需要补偿负序电流分量, 就可使得电网三相电流平衡。

系统电压 $\mathbf{u}_s = [u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}]^T$, 系统电流 $\mathbf{i}_s = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$, STATCOM 逆变器交流侧基波电压 $\mathbf{u}_c = [u_{ca}, u_{cb}, u_{cc}]^T$, STATCOM 输出电流 $\mathbf{i}_c = [i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}]^T$, 负荷电流 $\mathbf{i}_L = [i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}]^T$ 。由基尔霍夫电流定律 (KCL) 可知

$$\dot{\mathbf{i}}_s = \dot{\mathbf{i}}_c + \dot{\mathbf{i}}_L \quad (3)$$

因此, 可以将图 1 所示电路分解为图 2 所示 STATCOM 部分 (a) 和负荷部分 (b) 叠加的等效电路。



图 2 系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the system

2.2 正序网络等效电路

为了实现 STATCOM 同时补偿电网无功功率和三相负荷不平衡, 需要 STATCOM 逆变器交流侧电压 \mathbf{u}_c 、电流 \mathbf{i}_c 分别包含正序分量 $\mathbf{u}_{c(1)}$ 、 $\mathbf{i}_{c(1)}$ 和负序分量 $\mathbf{u}_{c(2)}$ 、 $\mathbf{i}_{c(2)}$, 对应关系如公式(4)、式(5)所示。

$$\mathbf{u}_c = \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ca(1)} \\ u_{cb(1)} \\ u_{cc(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ca(2)} \\ u_{cb(2)} \\ u_{cc(2)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{i}_c = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ca(1)} \\ i_{cb(1)} \\ i_{cc(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ca(2)} \\ i_{cb(2)} \\ i_{cc(2)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, 控制 STATCOM 逆变器交流侧基波电压正序分量, 用于产生相应的正序电流 $\mathbf{i}_{c(1)}$, 控制补偿系统无功功率^[17-22]。等效电路如图 3 所示, 其中 R 为逆变器损耗折算到交流侧的等效电阻。

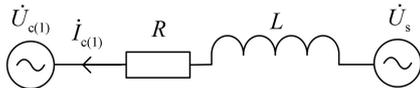


图 3 STATCOM 正序等效电路图

Fig. 3 Positive sequence equivalent circuit of the STATCOM with grid

STATCOM 补偿的无功功率为

$$Q_c = \frac{U_s^2}{2R} \sin 2\delta \quad (6)$$

2.3 三相负荷不平衡补偿方法分析

对于三相负荷不平衡系统, 可将电源侧电流 \mathbf{i}_{s1} 采用对称分量法进行分解, 得到正序电流分量 $\mathbf{i}_{s1(1)}$ 和负序电流分量 $\mathbf{i}_{s1(2)}$, 其关系如式(7)所示。

$$\mathbf{i}_{s1} = \begin{bmatrix} i_{s1a} \\ i_{s1b} \\ i_{s1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s1a(1)} \\ i_{s1b(1)} \\ i_{s1c(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{s1a(2)} \\ i_{s1b(2)} \\ i_{s1c(2)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过 STATCOM 装置补偿三相负荷不平衡, 使得电网侧负荷是平衡的, 需要控制 STATCOM 产生

负序电流 $\mathbf{i}_{c(2)}$ 将三相负荷不平衡产生的负序电流 $\mathbf{i}_{s1(2)}$ 完全抵消; 本系统在变压器低压侧进行补偿, 实现方法是使逆变器产生的负序电流完全抵消负荷产生的负序电流, 即

$$\begin{bmatrix} i_{ca(2)} \\ i_{cb(2)} \\ i_{cc(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{La(2)} \\ i_{Lb(2)} \\ i_{Lc(2)} \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

2.4 负序网络等效电路

控制 STATCOM 装置逆变器输出产生负序电压 $\mathbf{u}_{c(2)}$, 得到式(8)所需要的负序电流, 负序网络等效电路如图 4 所示。

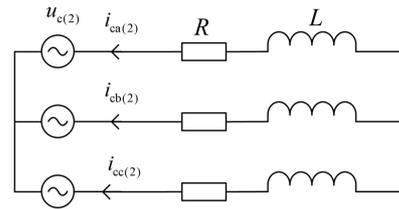


图 4 负序网络等效电路图

Fig. 4 Negative sequence equivalent circuit

STATCOM 装置产生的负序电流为

$$\mathbf{i}_{c(2)} = -\frac{\mathbf{u}_{c(2)}}{R + j\omega L} \quad (9)$$

3 无功电流、负序电流补偿控制方法

采取正序控制环和负序控制环叠加控制, 实现无功电流和三相负荷不平衡的同时补偿, 控制原理如图 5 所示。

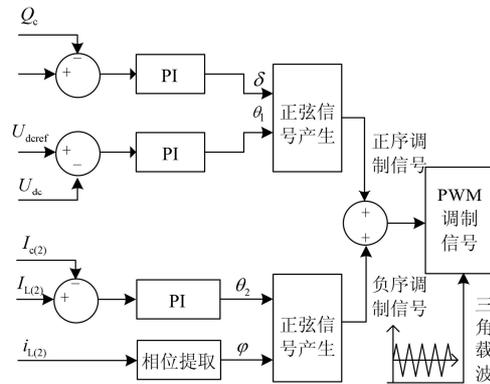


图 5 STATCOM 控制原理图

Fig. 5 Control principle chart of STATCOM

3.1 无功电流补偿

为了提高配电网功率因数, 需要补偿负荷产生的无功功率; 因为不平衡负荷产生的负序电流分量

$i_{L(2)}$ 通过STATCOM装置完全抵消, 所以需要补偿无功功率为正序电流 $i_{L(1)}$ 所对应的无功功率 Q_L 。本文采用 δ - θ 电流间接控制法进行正序电流控制^[20-22]。通过调节 δ 实现无功功率的跟踪补偿, 调节 θ_1 实现STATCOM直流侧电容电压保持恒定。

3.2 三相负荷不平衡补偿

为了消除不平衡负荷产生的负序电流 $i_{L(2)}$, 需要控制逆变器产生式(8)所对应的负序电流 $i_{c(2)}$ 。通过调节负序控制对应的相位 φ 和调制比 θ_2 来调整STATCOM产生负序电流的幅值和相位, 根据图4和公式(9)对应的关系产生负序电流 $i_{c(2)}$, 完全抵消不平衡负荷产生的负序电流 $i_{L(2)}$ 。

正序电压调制信号和负序电压调制信号相叠加后作为STATCOM输出电压调制信号, 经三角载波调制后产生PWM驱动信号去控制IGBT模块, 维持直流侧电容电压恒定, 产生需要的无功功率和负序电流, 实现配电网的无功补偿和三相负荷平衡。

4 仿真与实验

4.1 仿真验证

本文采用PSCAD/EMTDC仿真软件对图1所示系统进行了仿真。仿真系统电路图如图6(a)所示。仿真系统中, 电网侧电源设定为理想电源, 负荷为阻感性三相不平衡负荷, 参数如表1所示。

表 1 仿真系统电源及负荷参数

Table 1 Parameter of source voltage and load

项目	A 相	B 相	C 相
电源电压/ kV	$\dot{U}_{sa} = 10.5e^{j0^\circ}$	$\dot{U}_{sb} = 10.5e^{j240^\circ}$	$\dot{U}_{sc} = 10.5e^{j120^\circ}$
负荷功率/ kVA	$S_a = 150 + j100$	$S_b = 100 + j80$	$S_c = 180 + j100$

仿真系统中, 设定STATCOM系统在2 s的时刻投入运行; 在2.08 s的时刻A相断路器断开, A相负荷被切断。

由图6(c)可以看出, 补偿装置投入运行前, 由于三相负荷不平衡的存在, 使得系统三相电流存在严重不对称; 补偿系统投入运行以后, 产生相应的负序补偿电流分量, 使得电网三相电流平衡。由图6(b)可以看出, STATCOM系统投入运行后, STATCOM系统产生无功补偿电流, 补偿了负荷产生的无功电流, 提高了配电网功率因数。由图6(c)、6(d)可以看出, 当负荷发生变化时, 补偿装置能够快速、准确地补偿负荷的无功电流和负序电流。

4.2 实验验证

为了进一步验证本文所提方法的有效性, 最后

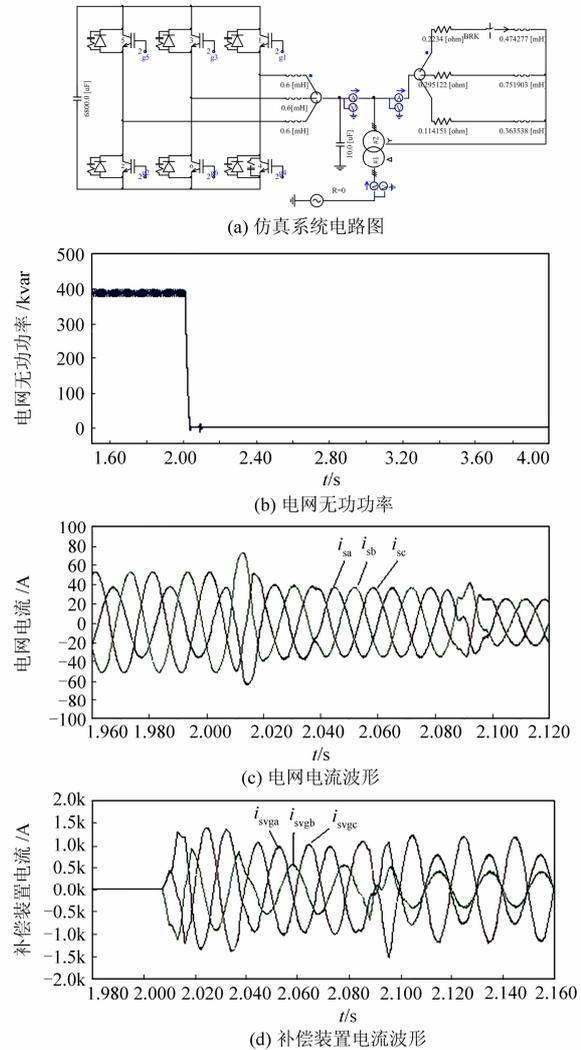


图 6 STATCOM 投入前后仿真结果

Fig. 6 Simulation results comparison before and after putting into STATCOM

进行了实验。实验中, 利用输变电运行实验中心 10.5/0.4 kV 250 kVA 变压器进行供电, 一台 0.4 kV 80 kW 分档可调电阻柜和一台 0.4 kV 80 kvar 分档可调电抗柜作为负荷, STATCOM 样机容量 50 kVA。

分别对阻性不平衡负荷、阻感性三相平衡负荷和阻感性三相不平衡负荷工况进行实验, 实验参数如表2所示。

表 2 实验系统负荷参数

Table 2 Load parameter of experiment

工况	A 相/kVA	B 相/kVA	C 相/kVA
工况 1	$S_a=25$	$S_b=15$	$S_c=5$
工况 2	$S_a=15+j10$	$S_b=15+j10$	$S_c=15+j10$
工况 3	$S_a=25+j10$	$S_b=15+j10$	$S_c=5+j10$

图7(a)、图7(b)、图7(c)分别为不同工况下 STATCOM投入前与投入后的系统三相电流，图7(d)、图7(e)分别为工况2、工况3下STATCOM投入前电网无功功率；可以看出，STATCOM投入后系统三相负荷不平衡电流得到抑制，系统无功电流得到补偿，达到了STATCOM补偿负荷三相不平衡和无功电流的效果。

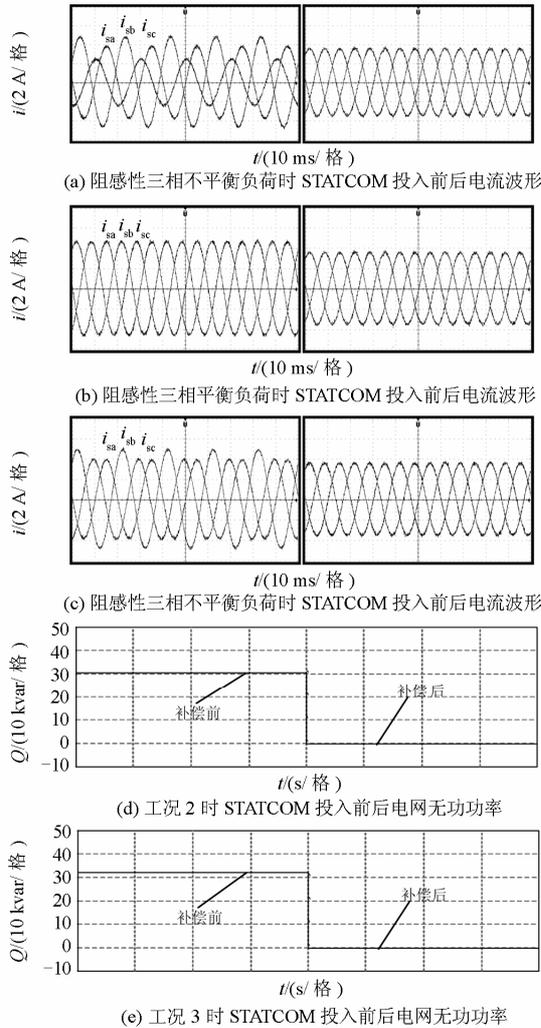


图 7 不同负荷情况下的实验结果

Fig. 7 Experiment results under different load conditions

5 结论

本文利用对称分量法和叠加原理，对配电网三相负荷不平衡情况下正序、负序等效电路进行分析，提出一种新的正、负序补偿电流叠加补偿控制方法。采用所提出的控制方法，使 STATCOM 在完成无功功率补偿的同时，能够有效的补偿三相负荷不平衡，无须增加硬件成本，进一步扩展了 STATCOM 的功能，充分地发挥了 STATCOM 的作用；所设计的

STATCOM 装置，特别适合于工业园区和居民小区等存在大量单相随机负荷的配电台区，在提高配电网功率因数的同时，改善了配电设备的运行工况。仿真和实验结果表明，该方法可以有效地补偿配电网无功功率和三相负荷不平衡。

参考文献

[1] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
LIN Hai-xue. Three phase asymmetry in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

[2] 刘小河, 赵刚, 于娟娟. 电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 30-34.
LIU Xiao-he, ZHAO Gang, YU Juan-juan. Simulations on the impaction in power supply network caused by the nonlinear characteristics of electric arc furnace system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 30-34.

[3] 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): 56-59.
WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang. Application of universal instantaneous power theory to unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 56-59.

[4] 纪飞峰, 周荔丹, 姚钢, 等. 基于同步对称分量法的静止无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 24-29.
JI Fei-feng, ZHOU Li-dan, YAO Gang, et al. Static var compensator based on the method of synchronous symmetrical component[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 24-29.

[5] 胡应宏, 王建曠, 任佳佳, 等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 98-105.
HU Ying-hong, WANG Jian-ze, REN Jia-jia, et al. Balance component decomposition and compensation method for unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 98-105.

[6] 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 Xin-guang, LAI Sheng-li, QIN Hua-biao, et al. An approach of integrated compensation for reactive power and three phase unbalance[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 30-33.
- [7] 郑建, 陈劲操. 混合级联逆变器在 STATCOM 中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 57-62.
- ZHENG Jian, CHEN Jin-cao. Study of STATCOM based on hybrid cascaded multilevel inverter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 57-62.
- [8] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善配电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
- YUAN Jia-xin, CHEN Bai-chao, WAN Li, et al. The method to improve power quality of distribution system by distribution static var compensator[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 81-84.
- [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): 42-46.
- ZHU Yong-qiang, LIU Wen-hua, QIU Dong-gang, et al. Simulation of balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 42-46.
- [10] 罗安, 欧剑波, 唐杰, 等. 补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 55-60.
- LUO An, OU Jian-bo, TANG Jie, et al. Research on control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60.
- [11] 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 Jin-jun, 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.
- [12] 许树楷, 宋强, 朱永强, 等. 用于不平衡补偿的变压器隔离型链式 D-STATCOM 的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 137-142.
- XU Shu-kai, SONG Qiang, ZHU Yong-qiang, et al. Research on the transformer-isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 137-142.
- [13] 熊以旺, 程浩忠, 王海群, 等. 基于改进 AHP 和概率统计的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 48-53.
- XIONG Yi-wang, CHENG Hao-zhong, WANG Hai-qun, et al. Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 48-53.
- [14] 叶小军, 曾江, 王克英, 等. 并联有源电力滤波器双滞环电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 60-54.
- YE Xiao-jun, ZENG Jiang, WANG Ke-ying, et al. Double hysteresis current control strategy for shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 60-54.
- [15] PAAP G C. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 522-528.
- [16] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 52-58.
- YUAN Xu-feng, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu. An improved method of instantaneous symmetrical components and its detection for positive and negative sequence current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 52-58.
- [17] 蔡超, 陈博, 袁傲, 等. 电磁混合式高铁供电系统负序优化补偿方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 265-273.
- CAI Chao, CHEN Bo, YUAN Ao, et al. Electromagnetic hybrid optimized compensation method of negative sequence for high-speed railway traction supply

- system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 265-273.
- [18] 许胜, 杨振宇. 一种基于电流分离补偿的级联型 DSTATCOM 及其建模与控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 25-33.
- XU Sheng, YANG Zhen-yu. Modeling and control of cascaded H-bridge DSTATCOM based on current separation compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 25-33.
- [19] 王茂海, 孙元章. 三相电路中功率现象的解释及无功功率的分类[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 63-66.
- WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang. Analysis of power phenomenon and classification of reactive power in three-phase circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 63-66.
- [20] 丁洪发, 段献忠, 何仰赞. 同步检测法的改进及其在三相不对称无功补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 17-20.
- DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan. Improvement of synchronous detection method and application for VAR compensation of unbalanced three-phase systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 17-20.
- [21] CZARNECKI L S. On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2004, 9(3): 828-836.
- [22] 赵国鹏, 韩民晓, 刘进军. 基于间接电流控制方法下系统稳定性的静止无功发生器参数设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 17-24.
- ZHAO Guo-peng, HAN Min-xiao, LIU Jin-jun. Design of parameters in static synchronous compensator with indirect current control based on the system stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 17-24.

收稿日期: 2013-10-11; 修回日期: 2013-12-10

作者简介:

辛业春(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: xinyechun@163.com

李国庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和配电系统自动化等领域的理论与应用;

王朝斌(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。