

文章编号: 1006-4710(2012)04-0459-05

静止同步补偿器不平衡控制的伴生谐波与对策

张新闻^{1,2}, 同向前¹, 李隆鹏¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 北方民族大学 电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 采用静止同步补偿器(STATCOM)对配电系统中公共连接点处不平衡电压和电流进行控制是改善电网电能质量的一种有效方法。本研究利用开关函数基频模型,分析了 STATCOM 在不平衡控制时因交直流侧的调制耦合而导致 STATCOM 输出电流波形畸变的机理,提出了一种改进的开关函数,切断了 STATCOM 直流侧与交流侧的耦合通路,消除了不平衡补偿对 STATCOM 输出补偿电流的影响。以三相负荷不平衡控制为例,搭建了三相不平衡控制系统的仿真模型,验证了理论分析的正确性。

关键词: 静止同步补偿器;不平衡控制;开关函数;谐波

中图分类号: TM46

文献标志码: A

Associated Harmonics with the Unbalance Control in STATCOM and Its Countermeasure

ZHANG Xinwen^{1,2}, TONG Xiangqian¹, LI Longpeng¹

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Information Engineering, North University of Nationalities University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: STATCOM adopted to control over unbalanced voltage and currents at the point of common coupling in power distribution system is a kind of effective method to improve electric power qualities in power grid. The switching function model is used in this paper to analyse the STATCOM output current waveshape distortion mechanism caused by modulation coupling between DC and AC sides in unbalanced control, whereby an improved switch function is presented to cut off the coupling passageway from DC side to AC side so as to eliminate the influence of unbalanced control over the AC side current of STATCOM. With three-phase loading unbalance control as an example, the simulation model of three-phase unbalance control system is established to test the correctness of theoretical analysis.

Key words: STATCOM; unbalanced control; switching function; harmonic

配电网普遍存在着电压电流不平衡的现象,因而会给系统中的用户带来多种危害,例如,引起旋转电机的附加发热和振动,引起以负序分量为启动判据的保护元件误动,甚至可能对电网的安全运行造成严重影响等^[1]。

静止同步补偿器(STATCOM)作为一种提高电能质量的有效手段^[2-3],在电压不平衡条件下的研究主要分为两个方面,即:抑制公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)不平衡电压对 STATCOM

装置自身性能的影响^[4-6];对 STATCOM 进行不平衡控制,通过向系统注入无功功率来稳定 PCC 电压、提高电源功率因数和降低三相电压电流的不平衡度^[7-13]。对于后者,文献[7]通过调节 STATCOM 输出电压相位实现 PCC 负序电压幅值最小,以实现 PCC 电压平衡。文献[8-9]采用正负序双环叠加控制策略使 PCC 电压平衡。文献[10]开发了带变压器隔离的级联 H 桥型 STATCOM 对不平衡负荷进行补偿。文献[11]对不平衡负荷的 3 种无功电流检

收稿日期: 2012-07-19

基金项目: 陕西省重点学科建设专项基金资助项目(00X901);陕西省工业攻关计划基金资助项目(2010K09-09)。

作者简介: 张新闻(1976-),男,宁夏中宁人,博士生,研究方向为谐波和无功功率检测与控制方面的研究。E-mail: cindazm@126.com。同向前(1961-),男,陕西户县人,教授,博导,研究方向为无功补偿、电力谐波抑制和柔性直流输电技术。E-mail: xqtong@nxu.edu.cn。

测及控制方法作了详细的对比分析。文献[12]采用基于双 dq 变换的控制策略抑制 PCC 电压不平衡对装置的影响,同时可实现不平衡负荷的平衡补偿。文献[13]基于瞬时功率理论,分别采用直接电流、直接电压控制法实现不平衡负荷补偿和 PCC 不平衡电压的控制。STATCOM 不论是用于平衡 PCC 电压,还是补偿不平衡负荷,鲜有文献讨论 STATCOM 不平衡控制对装置性能带来的影响。

本研究采用开关函数法,深入分析了 STATCOM 不平衡控制对其输出性能的影响,并据此提出了改进的开关函数,以消除 STATCOM 不平衡控制对其输出性能的影响。最后,以不平衡负荷引起 PCC 电压不平衡的控制为例,搭建了装置的仿真模型,验证了理论分析的正确性。

1 不平衡控制分析

1.1 不平衡控制开关函数模型

本研究所针对的 STATCOM 主电路拓扑见图 1。图 1 采用典型的二电平电压源变换器(VSC)结构。图 1 中, u_s 为三相对称的电源电压, u_p 为 PCC 电压, u_c 为 VSC 逆变输出电压, u_{dc} 为 VSC 直流侧电压, Z_s 为电源等值阻抗, Z_l 为负荷等值阻抗, L 为交流滤波电感, C 为直流滤波电容。

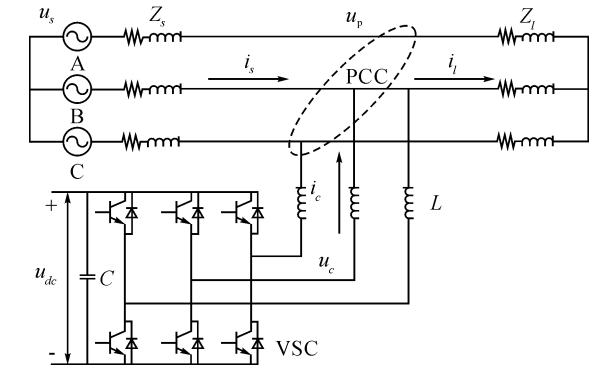


图 1 STATCOM 主回路拓扑结构
Fig. 1 The main circuit of STATCOM

设 VSC 采用 SPWM 调制策略。对 STATCOM 进行不平衡控制时,控制目标为 VSC 交流侧输出幅值可调的基波正负序电压,忽略 VSC 开关工作方式引入的高频谐波分量,VSC 开关函数 s 可表示为:

$$s = s_+ + s_- \tag{1}$$

$$s_+ = \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$s_- = \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) \\ \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) \\ \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \end{bmatrix}$$

式中, s_+ 和 s_- 为与 VSC 输出基波正负序电压对应的开关函数; ω 为调制信号角频率; λ_1 、 λ_2 分别为 VSC 正负序调制波信号的幅值; φ 为正负序调制信号相位差。

VSC 交直流侧电压和交直流侧电流分别为:

$$[u_{c,a} \quad u_{c,b} \quad u_{c,c}]^T = \frac{1}{2}u_{dc} \cdot [s_a \quad s_b \quad s_c]^T \tag{2}$$

$$i_{dc} = \frac{1}{2}[i_{c,a} \quad i_{c,b} \quad i_{c,c}] \cdot [s_a \quad s_b \quad s_c]^T \tag{3}$$

直流侧电压和电流的关系为:

$$u_{dc} = U_{dc0} + u_d = U_{dc0} + \frac{1}{C} \int i_{dc} dt \tag{4}$$

式中, U_{dc0} 为 STATCOM 稳定状态下直流侧电压的平均值。

1.2 不平衡补偿电流对装置性能的影响

假设 VSC 直流电压恒定且为 U_{dc0} 。由式(2)知,VSC 交流侧的等值电路为图 2 所示。

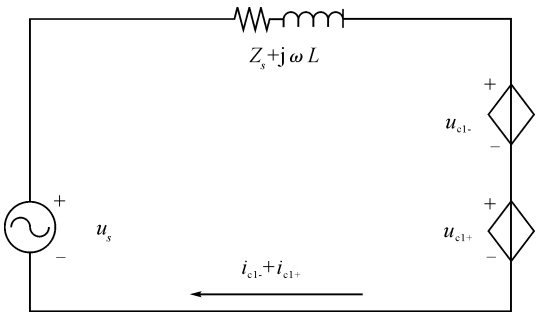


图 2 STATCOM 交流等值电路
Fig. 2 The AC equivalent circuit of STATCOM

图 2 中, i_{c1-} 由逆变输出的负序电压 u_{c1-} 产生, i_{c1+} 由逆变输出的正序电压 u_{c1+} 和电源电压 u_s 共同作用产生,其表达式分别为:

$$\begin{bmatrix} i_{c1+,a} \\ i_{c1+,b} \\ i_{c1+,c} \end{bmatrix} = \left(\frac{2U_s - \lambda_1 U_{dc0}}{2(Z_s + j\omega L)} \right) \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \text{ 和}$$
$$\begin{bmatrix} i_{c1-,a} \\ i_{c1-,b} \\ i_{c1-,c} \end{bmatrix} = \left(\frac{-\lambda_2 U_{dc0}}{2(Z_s + j\omega L)} \right) \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix} \tag{5}$$

定义电流不平衡度^[14]为:

$$\varepsilon_I \% = \frac{I_{c1-}}{I_{c1+}} \times 100\% \tag{6}$$

式中, I_{c1+} 和 I_{c1-} 分别为 i_{c1+} 和 i_{c1-} 的幅值。

综合式(3)~(6),STATCOM 输出的不平衡补偿电流与 VSC 开关函数交叉耦合作用后,在 VSC 直流侧产生的电压波动分量为:

$$u_d = \frac{3\varepsilon_1\%I_{c1+}(U_s + 2I_{c1+}|Z_s + j\omega L|)}{4CU_{d0}}\cos(2\omega t + \varphi) \quad (7)$$

STATCOM 进行不平衡控制时会引起 VSC 直流侧电压的波动。当 STATCOM 输出的正序补偿电流 I_{c1+} 一定时,直流侧电压波动幅值与补偿电流的不平衡度成正比。图 3 为本研究仿真示例的仿真结果,直观反映了电压波动幅值与补偿电流不平衡程度的关系。

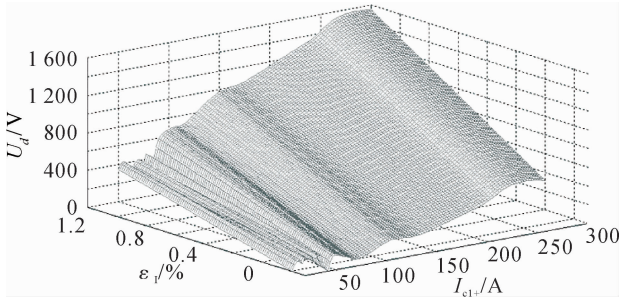


图3 直流电压波动随补偿电流不平衡度的变化

Fig.3 DC voltage fluctuation with unbalanced current

STATCOM 输出的负序补偿电流会引起直流电压的波动,而波动的直流电压反过来也会影响到 STATCOM 输出的交流电流。下面分析 VSC 直流电压波动 u_d 对交流输出电流的影响。为了书写方便,设电压波动分量 u_d 的幅值为 U_d 。由式(2)和式(3)表示的 VSC 交直流侧的耦合机理可知,在 s_+ 的调制作用下, u_d 在 VSC 逆变输出电压中产生的分量为:

$$\begin{bmatrix} u_{c,a}^d \\ u_{c,b}^d \\ u_{c,c}^d \end{bmatrix} = \frac{1}{2}u_d \begin{bmatrix} s_{+a} \\ s_{+b} \\ s_{+c} \end{bmatrix} = \frac{-\lambda_1 U_d}{4} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) - \sin(3\omega t + \varphi) \\ \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) - \sin(3\omega t + \varphi - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) - \sin(3\omega t + \varphi + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)表明, u_d 在 VSC 交流侧产生基波负序电压分量和 3 次正序谐波电压分量。同理, u_d 在 s_- 的作用下将在 VSC 交流侧产生基波正序电压分量和 3 次负序谐波电压分量,交流侧 3 次正负序谐波电流分量经 VSC 开关函数耦合后,将使 VSC 交直流侧的电流和电压频谱更加丰富,其作用过程如图 4 所示。

由图 4 可知,在开关函数的作用下,VSC 直流侧出现频率为 $2n$ 频次的直流电压波动分量,交流侧出

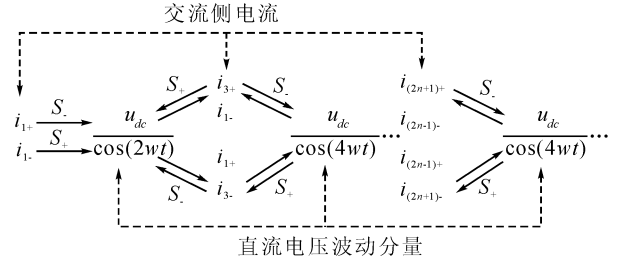


图4 VSC 交直流耦合关系

Fig.4 The coupling relation between AC side and DC side of VSC

现 $2n \pm 1$ 频次的正负序谐波电流分量。不过,随着 n 的增大,交流侧谐波阻抗增大,交流侧谐波电流分量和直流电压波动分量减小。

2 改进的开关函数

当 VSC 直流侧电压有波动时,根据式(4)可将直流侧电压表达式改写为:

$$u_{dc} = U_{d0} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} d_n \cos(2n\omega t) \right) \quad (9)$$

$$d_n = \frac{U_{dn}}{U_{d0}} < 1$$

式中, U_{dn} 表示 VSC 直流电压波动中的 $2n$ 次谐波电压幅值。令 u_{dc}^* 为:

$$u_{dc}^* = \frac{u_{dc}}{U_{d0}} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} d_n \cos(2n\omega t) \quad (10)$$

将式(1)表示的开关函数改写为:

$$\begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} = \frac{\lambda_1}{u_{dc}^*} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} + \frac{\lambda_2}{u_{dc}^*} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(11)代入(2)式,则 VSC 交流侧逆变输出电压 u_c 为:

$$u_c = U_{d0} \cdot \left\{ \lambda_1 \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} + \lambda_2 \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix} \right\} \quad (12)$$

(12)式与(1)式等价,表明(11)式所示改进后的开关函数能有效切断直流侧电压波动分量向交流侧耦合的通路。对 VSC 逆变输出电压而言,一个直流电压波动但采用(11)式改进开关函数的 VSC,在效果上等同于一个直流电压恒定但采用(1)式传统开关函数的 VSC。因此,改进开关函数消除了

STATCOM 不平衡控制引起的直流侧电压波动对装置输出性能的影响。

3 系统仿真

本研究设某配电系统的三相负荷不平衡,现拟在配电母线上并接一台具有不平衡补偿功能的 STATCOM,以平衡系统的三相无功电流。以下通过仿真来比较 STATCOM 分别采用传统开关函数和改进开关函数时其输出电流的特性。

仿真系统采用 PSIM 软件,主电路如图 1 所示,图 5 给出了 STATCOM 逆变输出电压参考信号的形成原理。表 1 列出了仿真系统的相关参数。

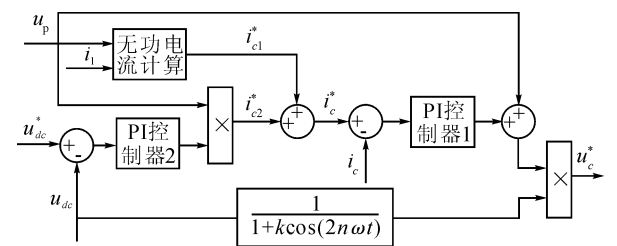


图 5 不平衡负荷控制框图

Fig. 5 The unbalanced reactive load control diagram

表 1 STATCOM 仿真系统参数

Tab. 1 The parameters of STATCOM simulation system		
符号	参数说明	数值
u_s	电源电压	380 V/50 Hz
Z_s	电源等值内阻抗	$0.031 + j0.074 \Omega$
S_N	装置额定容量	100 kvar
C	直流电容	1 000 μ F
L	交流滤波电感	1 mH
R	L 等值电阻	10% ωL
Z_l	负荷等值阻抗	A: $1 + j1.57 \Omega$ B: $0.091 + j0.12 \Omega$ C: $1 + j1.57 \Omega$

图 6 给出了未投入 STATCOM 时配电母线电压和电源电流(也即负荷电流)的时域波形。由图可见,三相负荷不平衡严重,功率因数低。

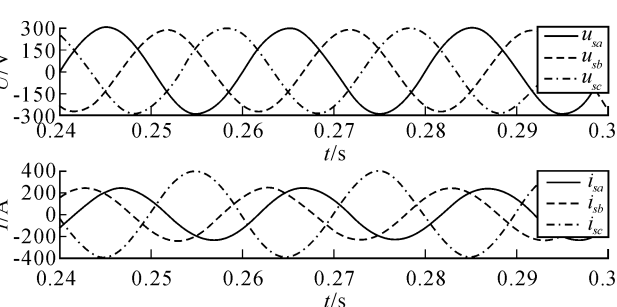


图 6 STATCOM 不投入时电源电压与电流

Fig. 6 The voltage and current waveforms without STATCOM

图 7 给出了 STATCOM 投入运行且 STATCOM 采用传统开关函数时的配电母线电压、电源电流和直流电压波形。由图 7 可见,配电母线电压基本平衡,三相电源电流基本平衡,三相功率因数接近单位 1。但是,三相电流波形发生了较大程度的畸变,VSC 直流侧电压也出现了较大幅度的波动。傅里叶分析表明,电源电流中含有较大的 3、5、7 等奇次谐波电流,直流电压主要含有较大的 2、4、6 等偶频次的波动分量。可见,此处电源电流的畸变来自于 STATCOM 补偿电流的畸变。

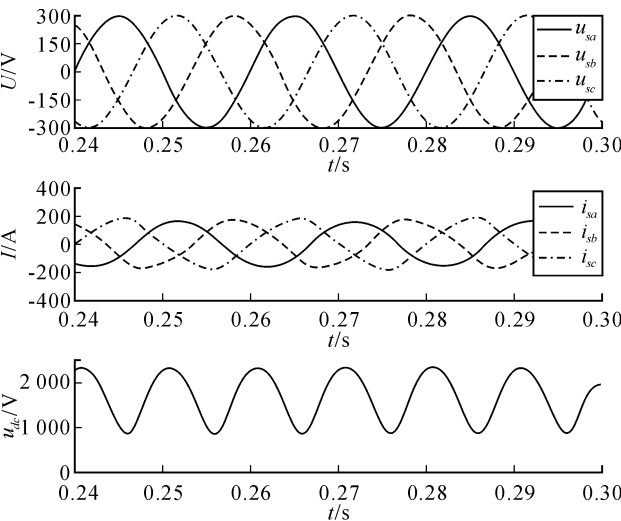


图 7 开关函数未改进时 STATCOM 的电压电流

Fig. 7 The voltage and current waveforms with STATCOM under unimproved switching function

图 8 给出了 STATCOM 投入运行且 STATCOM 采用改进开关函数时的配电母线电压、电源电流和直流电压波形,可以看出,配电母线电压基本平衡,

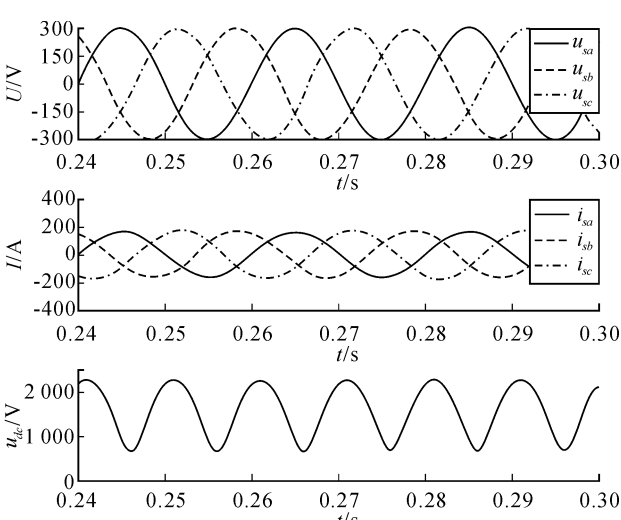


图 8 开关函数改进后 STATCOM 的电压电流

Fig. 8 The voltage and current waveforms with STATCOM under improved switching function

三相电源电流基本平衡,三相功率因数接近单位1。而且,尽管VSC直流侧电压仍存在较大幅度的波动,但三相电流波形的正弦程度良好。

表2给出了开关函数改进前后仿真系统运行参数的分析处理结果,地,以便进一步说明改进开关函数对STATCOM输出电流性能的改善作用。

表2 开关函数改进前后相关参数的比较
Tab.2 The comparison of relative parameters under unimproved and improved switching function

工况	$\varepsilon_I(i_s)$	$\cos\varphi$	THD(i_s)		
			A	B	C
未投入	41.83	0.510 6	0.00	0.00	0.00
投入后	改进前	2.85	8.09	7.36	8.16
	改进后	4.18	1.73	2.57	2.81

由表2可见,未投入STATCOM时,电源电流的三相不平衡度高达41.83,经STATCOM补偿后,三相电流不平衡度显著降低,而采用改进的开关函数也显著降低了电流的总谐波畸变率。

4 结 论

理论分析表明,STATCOM补偿不平衡负荷时,补偿电流中的负序分量会引起直流电压的波动,而直流电压波动通过调制又会导致补偿电流出现谐波。本研究推导了STATCOM直流电压波动与输出电流三相不平衡度成正比的解析关系,提出了一种改进的开关函数,通过在VSC调制信号中引入直流电压波动成分,既实现了三相负荷的不平衡补偿,又显著降低了补偿电流中的谐波含量。

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.

[2] Singh B, Saha R, Chandra A, et al. Static synchronous compensators (STATCOM): a review[J]. IET Power Electron, 2009, 2(4):297-324.

[3] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[4] 唐杰,邓志勇,杨志红,等. 配电网静止同步补偿器的不平衡综合控制策略[J]. 高电压技术,2009,36(10):2588-2593.

Tang Jie, Deng Zhiyong, Yang Zhihong, et al. Control strategy of D-STATCOM under unbalanced power supply voltage conditions[J]. High Voltage of Engineering, 2009, 36(10):2588-2593.

[5] 马晓军,刘文华,王仲鸿. 新型同步补偿器直流侧储能电容值的选取方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10):31-35.

Ma Xiaojun, Liu Wenhua, Wang Zhonghong. Selecting method of the DC storage capacitor of static synchronous compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10):31-35.

[6] 涂春鸣,李慧,唐杰. 电网电压不对称对D-STATCOM的影响分析及抑制[J]. 电工技术学报,2009,24(8):114-121.

Tu Chunming, Li Hui, Tang Jie. Analysis and suppression of influence on D-STATCOM under unbalanced voltage of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8):114-121.

[7] Kuang Li, Jinjun Liu, Zhaoan Wang, et al. Strategies and operating point optimization of STATCOM control for voltage unbalance mitigation in three-phase three-wire systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):413-419.

[8] Han Jian, Tong Xiangqian, Ning Dalong. The influence of grid voltage quality on STATCOM and the countermeasure: Asia-Pacific power and energy engineering conference[C]. Chengdu:China,2010.

[9] 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 Jianbo, Tang Jie, et al. Research on control method of DSTATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6):55-60.

[10] Song Qiang,Liu Wenhua. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(1):45-58.

[11] Xu Y L M,Tolbert J D K. Voltage and current unbalance compensation using a static var compensator[J]. IET Power Electron, 2010, 3(6):977-988.

[12] Bhim Singh, Jitendra Solanki. A comparison of control algorithms for DSTATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7):2738-2745.

[13] Blazic B, Papic I. Improved D-STATCOM control for operation with unbalanced currents and voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1):225-233.

[14] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. GB/T15543-2008 电能质量 三相电压不平衡[S]. 北京:中国标准出版社,2009.