

链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制

刘钊, 刘邦银, 段善旭, 康勇, 史晏军, 陈仲伟

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

DC Capacitor Voltage Balancing Control for Cascade Multilevel STATCOM

LIU Zhao, LIU Bang-yin, DUAN Shan-xu, KANG Yong, SHI Yan-jun, CHEN Zhong-wei

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: In order to balance DC capacitor voltage of cascade multilevel static synchronous compensator (STATCOM), a novel method was proposed based on active power voltage vector superposition in hierarchical control structure. Decoupling control method was adopted to realize both active and reactive power control in the upper layer. The proposed balancing control was applied in the lower layer through adding an active power voltage vector paralleling with output current to the upper output control vector, so active power among homophase chains could be distributed and DC capacitor voltage balance could be achieved. Steady state operation area and operation region of the proposed control method were also analyzed. A prototype of three-phase 36-chain STATCOM had been developed to verify the theory analysis.

KEY WORDS: static synchronous compensator(STATCOM); cascade multilevel; DC capacitor voltage balance; hierarchical control; vector analysis

摘要: 针对链式静止同步补偿器中直流电容电压平衡的问题, 在分层控制架构的基础上, 提出基于有功电压矢量叠加的平衡控制方法。上层通过解耦控制完成三相链接总的有功和无功控制; 下层采用所提出的平衡控制, 在上层输出的控制量上叠加一个与输出电流方向平行的有功电压矢量对同相链节间的有功进行分配, 实现直流电容电压平衡控制。对直流电容电压平衡控制进行矢量分析, 得到其稳定工作区域以及所提控制方法的物理意义和调控范围。研制了一台三相36个链节的物理样机, 并在样机上进行了实验验证, 证明了所提控制方法的有效性和可行性。

关键词: 静止同步补偿器; 级联多电平; 直流电容电压平衡; 分层控制; 矢量分析

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2009CB219701)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB219701).

0 引言

链式静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)相对于传统的变压器多重化结构的STATCOM, 具有无需多重化接入变压器、占地面积小、效率高、可实现分相控制和冗余运行等优点^[1-5], 近年来得到了广泛研究和应用。

在链式STATCOM中, 直流侧电容彼此独立, 而每个链节的并联损耗、开关损耗、调制比和脉冲延时等又存在差异^[1], 导致链式STATCOM存在直流侧电容电压不平衡的问题。直流电容电压不平衡会带来许多不利的影 响, 电容电压的不平衡会使STATCOM输出电压的谐波畸变率增大, 当其不平衡度较大时, 某些链节的电容电压会偏高, 影响到装置的安全运行, 严重时会导致系统崩溃^[6]。

目前直流电容电压平衡控制有2类实现方式: 一类是通过外部的平衡控制电路来实现^[7-10], 另一类是通过自身的平衡控制算法来实现^[4,6,11-13]。通过外部平衡控制电路的方法可以简化控制程序的算法, 文献[8]提出了基于交流母线能量交换的直流电压平衡控制方法, 让能量在各个逆变单元之间交换; 文献[1]在此基础上又提出了基于直流母线能量交换的方法; 上述方法均需要额外的硬件电路和控制系 统, 增加了系统的成本和复杂性, 降低了系统的可靠性。利用自身的平衡控制算法实现直流电容电压平衡则不存在上述问题, 其基本思想是采用分层控制的方法^[4], 上层控制采用解耦控制^[14-15]、非线性控制^[16-18]、瞬时电流跟踪^[19-20]等实现系统中总的有功和无功控制, 下层通过平衡控制实现链节间有功的合理分配, 保证直流电容电压平衡。文献[4,11-12]通过调节各单元逆变器的移相角来实现电压平衡,

但对于大容量逆变器,该移相角很小,改变移相角不当会造成系统的不稳定;文献[13]提出一种独立电压平衡策略(individual voltage balancing strategy, IVBS),需要除以电流相位的正弦值,但由于正弦值存在过零的情况,过零时所除的值过小,系统对扰动变得敏感。文献[6]的平衡控制算法实现起来相当复杂,控制器参数较多,难以设计。

本文提出了基于叠加有功电压矢量的链式静止同步补偿器直流电容电压平衡控制策略。首先给出该平衡控制方法的原理和实现方法;然后对平衡控制进行矢量分析,得到其稳定范围,并从理论上分析了所提控制方法的物理意义和作用范围;最后在一台采用三角形连接、每相12个链节的三相链式STATCOM实验样机上验证了所提出的直流电容电压平衡控制方法。

1 基于有功电压矢量的直流电压控制原理

1.1 链式STATCOM的分层控制原理

图1为采用三角形连接的链式STATCOM电路结构图, u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为三相公共耦合点(point of common coupling, PCC)相电压, u_{sab} 、 u_{sbc} 、 u_{sca} 为PCC点线电压; u_{rab} 、 u_{rbc} 、 u_{rca} 为STATCOM输出线电压; i_{sab} 、 i_{sbc} 、 i_{sca} 为输入相电流,以图示电流方向为正方向; u_{c1} 、 u_{c2} 、 \dots 、 u_{cN} 为任一相链接直流侧电容电压; L 为连接电感; N 为链节单元数。

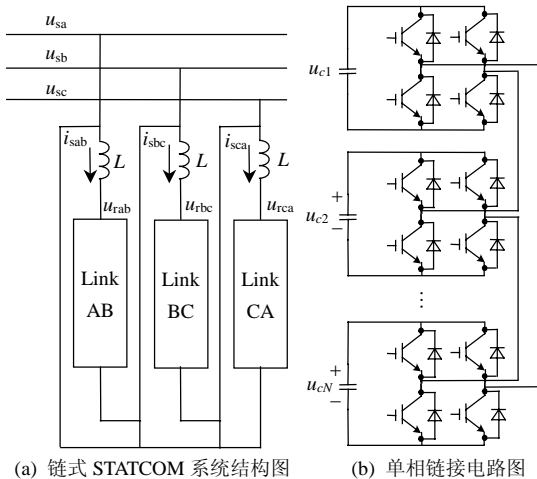


图1 链式STATCOM系统结构图

Fig. 1 System of cascade multilevel STATCOM

忽略系统的串联损耗,链式STATCOM的线性数学模型可表示为

$$\begin{cases} u_{sab} - u_{rab} = L(di_{sab}/dt) \\ u_{sbc} - u_{rbc} = L(di_{sbc}/dt) \\ u_{sca} - u_{rca} = L(di_{sca}/dt) \end{cases} \quad (1)$$

STATCOM可以工作在容性模式、感性模式以及无负荷模式。以感性模式为例,矢量图如图2所示,其中 \dot{u}_s 为系统电压, \dot{u}_r 为STATCOM的输出电压, i_s 为相电流。

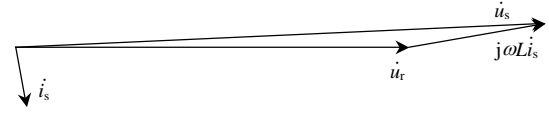


图2 链式STATCOM单相矢量图
Fig. 2 Single-phase vector diagram for cascade multilevel STATCOM

链式STATCOM系统控制框图如图3所示,上层控制采用解耦控制,然后通过平衡控制算法实现直流电容电压平衡。其中, M 为调制比, δ 为移相角, u_{dc}^* 为单个链节额定直流电压,结合矢量图2,有

$$u_r = MNu_{dc}^* \quad (2)$$

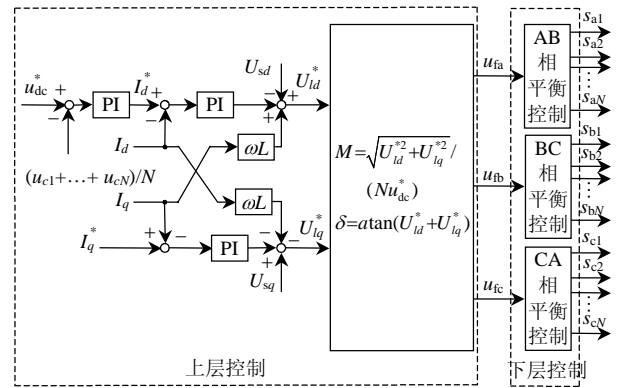


图3 系统分层控制框图

Fig. 3 Hierarchical controller for system

1.2 基于有功电压矢量叠加的平衡控制原理

直流电容电压平衡控制的本质是实现链节间的有功的合理分配,必须遵循2个原则:1)直流电容电压平衡控制自身是稳定的;2)直流电容电压平衡控制不影响上层控制。根据这2个原则,为了只调控各链节单元吸收的有功而不改变其无功,本文提出一种基于有功电压矢量叠加的直流电容电压平衡控制策略,其基本思想是在上层控制的基础上叠加一个与电流方向平行的矢量,即一个纯有功电压矢量,当链节的电压偏低时叠加一个与电流方向相同的矢量,当链节电压偏高时叠加一个与电流方向相反的矢量,其控制框图如图4所示。由图可知,以链接中电压的平均值作参考值,以各链节的实际电压作为反馈值,经过比例控制器后乘上相电流的瞬时值就得到需要叠加的有功电压矢量,其中前 $N-1$ 个链节的有功控制通过闭环控制来实现,最后一个链节有功调控量为前 $N-1$ 个链节之和的取反。

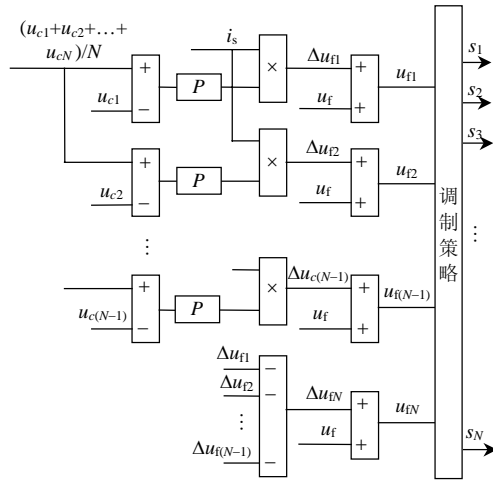


图 4 平衡策略控制框图

Fig. 4 Block diagram of balance strategy

由图 4 可得：

$$\sum_{n=1}^N \Delta u_{fn} = 0 \quad (3)$$

可见，本文提出的基于有功电压矢量叠加的平衡控制方法，可有效保证下层平衡控制仅是对链节间有功进行合理分配，不会影响到上层控制。

2 基于有功电压矢量的平衡控制特性分析

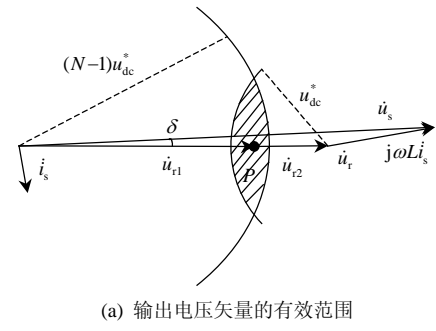
2.1 矢量分析

以任一相链接为研究对象，取其中一个链节单元作矢量分析，其余 $N-1$ 个链节单元作为一个整体，可以等效成 2 个逆变器串联工作，当直流电容电压达到平衡时，其直流侧电压分别为 u_{dc}^* 和 $(N-1)u_{dc}^*$ 。图 5(a)中 2 个圆分别表示逆变桥能输出电压矢量的范围，阴影部分为重叠区域，表示只有工作在该区域内才能输出合成矢量 \dot{u}_r ，点 P 为由上层控制产生的工作点，其中：

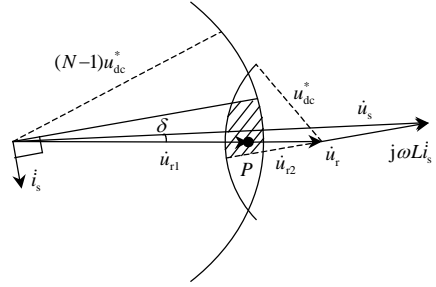
$$\begin{cases} u_{r1} = M(N-1)u_{dc}^* \\ u_{r2} = Mu_{dc}^* \end{cases} \quad (4)$$

链式 STATCOM 直流侧电容电压靠从系统中吸收有功来维持，任意链节吸收的有功都需大于零，所以只有在图 5(b)所示的区域内链式 STATCOM 才能稳定运行。

当上层控制使链节单元输出电压 \dot{u}_{r2} 吸收的有功不能稳定其直流侧电压 u_{dc}^* 时，如假设其吸收的有功偏低，对 \dot{u}_{r2} 进行有功电压矢量调节。如图 6 所示， \dot{u}_{r2} 叠加有功电压矢量 $\Delta\dot{u}_{f2}$ 变为 \dot{u}_{f2} ，通过调节 $\Delta\dot{u}_{f2}$ 的大小就能改变链节单元吸收的有功，进而维持其直流电压；与此同时， \dot{u}_{r1} 叠加有功电压矢量 $-\Delta\dot{u}_{f1}$ 变为 \dot{u}_{f1} ，保证了平衡控制不影响到上层控制。



(a) 输出电压矢量的有效范围



(b) 平衡控制稳定运行区域

图 5 平衡控制矢量分析

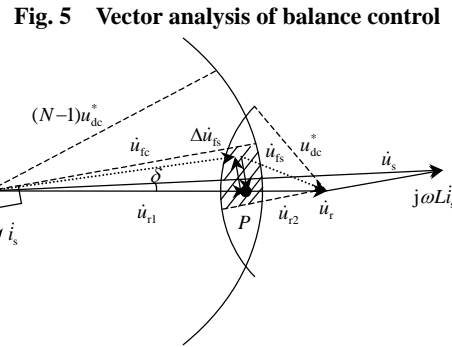


图 6 基于有功电压矢量叠加的平衡控制矢量分析
Fig. 6 Vector analysis of balance control based on active power voltage vector superposition

依此类推，其单相链接平衡控制矢量图如图 7 所示，图中叠加的有功电压矢量满足式(3)。

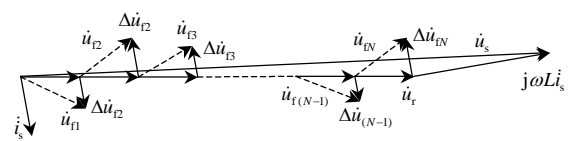


图 7 单相平衡控制矢量分析

Fig. 7 Vector analysis of balance control for single phase

2.2 调控范围分析

结合图 5(b)的平衡控制稳定范围，可得到所提平衡控制策略的作用范围，如图 8 所示。由图可知，平衡控制的调控范围随实际工况的变化而改变，但可以推导出其可能作用的最大范围，如图 8(a)所示。其中， \dot{u}_{pmax} 为正有功电压矢量的最大值， \dot{u}_{nmax} 为负有功电压矢量的最大值。

由上层解耦控制得到的调制比 M 和移相角 δ ,

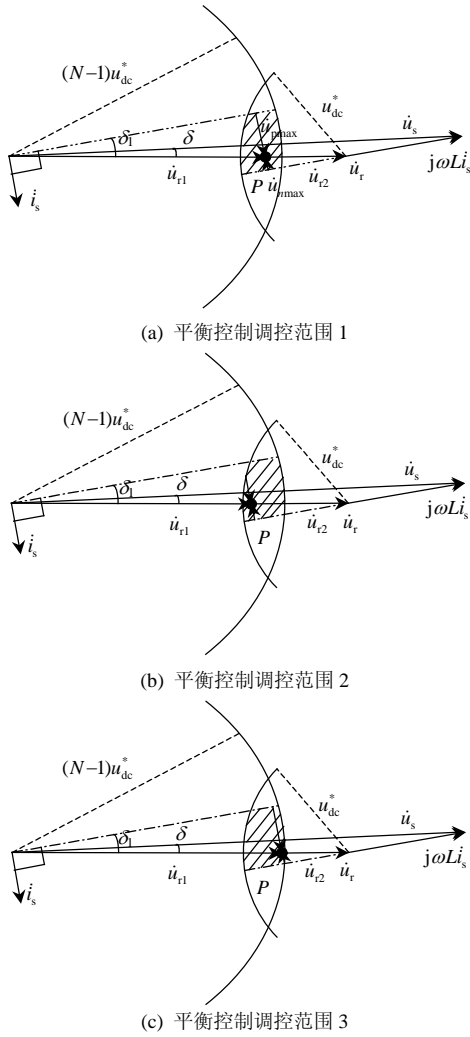


图8 基于有功电压矢量叠加的平衡控制调控范围

Fig. 8 Effective range of balance control based on active power voltage vector superposition

进而可以求得夹角 δ_1 。

$$\delta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{u_s \sin \delta}{NMu_{dc}^* - u_s \cos \delta} \right) \quad (5)$$

则

$$u_{p\max} = M(N-1)u_{dc}^* \sin \delta_1 \quad (6)$$

$$u_{n\max} = Mu_{dc}^* \sin \delta_1 \quad (7)$$

即当链节的损耗差异在 $[-P_1, P_2]$ 之间时可通过叠加有功电压矢量的方法控制到平衡, 其中:

$$P_1 = u_{p\max} i_s = (N-1)Mu_{dc}^* \sin \delta_1 I_s \quad (8)$$

$$P_2 = u_{n\max} i_s = Mu_{dc}^* \sin \delta_1 I_s \quad (9)$$

式(8)和(9)可指导装置中主电路元件的参数设计和选择。

3 实验结果

3.1 实验系统参数

为验证所提平衡控制策略的有效性, 在研制的

链式 STATCOM 系统上进行了实验, 实验系统结构如图 1 所示, 主电路采用三角形连接, 每相 12 个链节。表 1 为链式 STATCOM 系统的电路结构参数。

表 1 链式 STATCOM 系统电路结构参数

Tab. 1 Main parameters of cascade STATCOM system

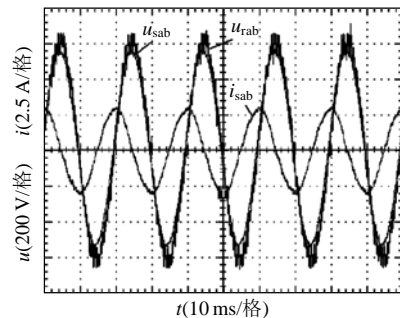
参数	数值
三相系统线电压 u_s/V	380
电网频率 f_s/Hz	50
输出电感 L_s/mH	5
直流侧电容 $C_{dc}/\mu F$	940
直流侧电容电压 u_{dc}/V	50
给定无功电流 i_{ref}/A	2.5
载波移相单极倍频 f_c/Hz	250
链节数 N	12

实验中, 改变 AB 相中一个链节的直流侧并联电阻使其并联损耗不同, 其他链节直流侧并联电阻都为 $100 \text{ k}\Omega$, 而该链节为 $50 \text{ k}\Omega$, 然后对比加平衡控制和不加平衡控制时 AB 相链节中直流电容电压大小分布。

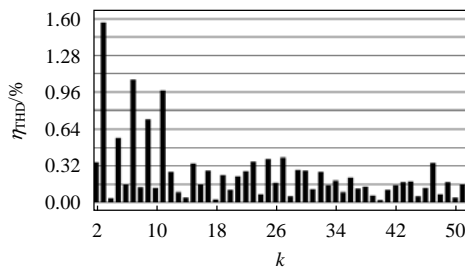
若平衡控制器采用纯比例控制, 在系统电流较小时, 链节之间的损耗差异主要由并联损耗和脉冲延时等造成的, 和开关损耗关系不大, 这部分损耗基本上是固定的; 当系统电流较大时, 损耗差异主要为开关损耗, 其损耗差异随着电流的变化而变化; 所以实际中采用变比例的控制方法, 控制器参数通过实验和仿真相结合的方法获得。

3.2 平衡控制实验验证

图 9(a)为不加平衡控制时 AB 相的系统电压 u_{sab} 、链接输出电压 u_{rab} 及相电流 i_{sab} 波形, 图 9(b)为输出电压的总谐波含量(total harmonic distortion, THD), 其中 k 为谐波次数, $\eta_{\text{THD}}=2.613\%$ 。图 10(a)为加平衡控制时 AB 相的系统电压、链接输出电压及相电流波形, 图 10(b)为输出电压的 THD, $\eta_{\text{THD}}=2.496\%$ 。表 2 为通过上位机得到的 2 种情况下电容电压的分布, 可以看出: 不加平衡控制时, 各链节直流电容电压不一致, 最高电压为 65 V , 最低电压为 34 V , 最大差异为 31 V , 输出电压 THD 为 2.613% ;

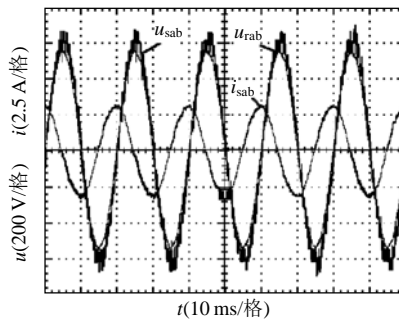


(a) 系统电压、输出电压及电流

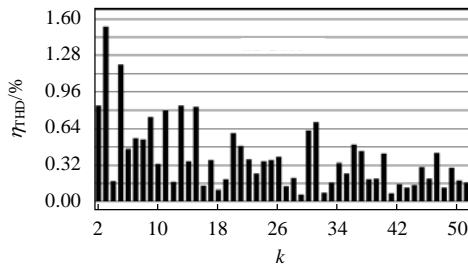


(b) STATCOM 输出电压 THD 分析

图 9 不加平衡控制时 AB 相实验波形
Fig. 9 Experiment result of phase-AB without balance control



(a) 系统电压、输出电压及电流



(b) STATCOM 输出电压 THD 分析

图 10 加平衡控制时 AB 相实验波形
Fig. 10 Experiment result of phase-AB with balance control

表 2 直流电容电压对比

Tab. 2 Contrast of DC capacitor voltage

链节编号	未加平衡控制电容电压/V	加平衡控制电容电压/V
1	65	53
2	53	52
3	52	53
4	60	53
5	43	53
6	57	54
7	62	53
8	52	53
9	59	53
10	51	52
11	62	53
12	34	54

加平衡控制后，链节直流电容电压趋于一致，最高电压为 54 V，最低电压为 52 V，最大仅为 2 V，输出电压 THD 降低为 2.496%。实验证明了所提平衡算

法的有效性和可行性。

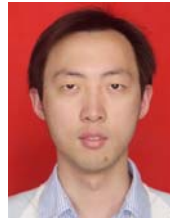
4 结论

本文详细分析了链式静止同步补偿器中直流电容电压平衡控制问题，提出了基于有功电压矢量叠加的平衡控制方法，与已有的方法相比具有以下优点：1) 与上层控制解耦，控制特性好，参数设计简单；2) 只改变链节单元的有功而不影响其无功，直流电容电压一致性好，输出波形质量高。本文分析了所提出的平衡控制方法的原理、稳定运行区域和调控范围，并在一台链式 STATCOM 物理样机上进行了实验研究。理论分析和实验均表明：基于有功电压矢量叠加的平衡控制策略能有效地解决链式 STATCOM 中直流电容电压的平衡问题，其实现方法简便，控制效果好，具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 基于链式逆变器的 50 MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 145-150.
Liu Wenhua, Song Qiang, Teng Letian, et al. Balancing control of DC voltage of 50 MVA STATCOM based on cascade multilevel inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 145-150(in Chinese).
- [2] 耿俊成, 刘文华, 俞旭峰, 等. 链式 STATCOM 的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 66-70.
Geng Juncheng, Liu Wenhua, Yu Xufeng, et al. Modeling of cascade STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 66-70(in Chinese).
- [3] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 基于集成门极换向晶闸管与链式逆变器的±50 Mvar静止同步补偿器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 55-60.
Liu Wenhua, Song Qiang, Teng Letian, et al. ±50 Mvar STATCOM based on chain circuit converter employing IGCT's[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 55-60(in Chinese).
- [4] Peng F Z, Lai J S, McKeever J W, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(5): 1130-1138.
- [5] Peng F Z, McKeever J W, Adams D J. A power line conditioner using cascade multilevel inverters for distribution systems[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1998, 34(6): 1293-1298.
- [6] Akagi H, Inoue S, Yoshii T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2007, 43(4): 1041-1049.
- [7] An T, Powell M T, Thanawala H L, et al. Assessment of two different STATCOM configurations for FACTS application in power systems [C]. International Conference on Power System Technology, Beijing, China, 1998.
- [8] Woodhouse M L, Donoghue M W, Osborne M M. Type testing of the GTO valves for a novel STATCOM converter[C]. Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, London, United Kingdom, 2001.
- [9] Baker M H, Gemmill B D, Horwill C, et al. STATCOM helps to

- guarantee a stable system[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, USA, 2001.
- [10] Hanson D J, Woodhouse M L, Horwill C, et al. STATCOM: a new era of reactive compensation[J]. Power Engineering Journal, 2002, 16(3): 151-160.
- [11] Liang Yiqiao, Nwankpa C O. A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1999, 35(5): 1118-1123.
- [12] Li Yidan, Wu Bin. A novel DC voltage detection technique in the CHB inverter-based STATCOM[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2008, 23(3): 1613-1619.
- [13] Barrena J A, Marroyo L, Vidal M A R, et al. Individual voltage balancing strategy for PWM cascaded H-Bridge converter based STATCOM[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 2008, 55(1): 1512-1521.
- [14] Han Chong, Yang Zhaoning, Chen Bin, et al. Evaluation of cascade-multilevel-converter-based STATCOM for arc furnace flicker mitigation[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2007, 43(2): 378-385.
- [15] Cheng Ying, Qian Chang, Mariesa L C, et al. A comparison of diode-clamped and cascaded multilevel converter for a STATCOM with energy storage[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 2006, 53(5): 1512-1521.
- [16] 魏文辉, 宋强, 滕乐天, 等. 基于反故障控制的链式 STATCOM 动态控制策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 19-24. Wei Wenhui, Song Qiang, Teng Letian, et al. Research on anti-fault dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 19-24(in Chinese).
- [17] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功-无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 23-28.
- Wei Wenhui, Liu Wenhua, Song Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 23-28(in Chinese).
- [18] Soto D, Pena R. Nonlinear control strategies for cascaded multilevel STATCOMs[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(4): 1919-1927.
- [19] 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): 137-143. Xu Shukai, Song Qiang, Zhu Yongqiang, et al. Research on the transformer-isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 137-143(in Chinese).
- [20] Peng F Z, Wang Jin. A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter[C]. Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.



刘钊

收稿日期: 2009-06-30。

作者简介:

刘钊(1983—), 男, 博士, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用, hustcee@gmail.com;

刘邦银(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为光伏发电系统的变换拓扑与控制技术, lby@smail.hust.edu.cn;

段善旭(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源发电及电能质量控制。

(责任编辑 张玉荣)