

级联 STATCOM 直流侧电压平衡控制方法

胡应宏, 任佳佳, 王建赟, 纪延超

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对级联静止同步补偿器直流侧电容电压不平衡的问题, 提出一种基于相移载波调制的直流侧电压平衡方法。该方法根据各个直流侧电压变化趋势来进行有选择的交换脉冲, 将直流电压高于平均值且变高的模块的驱动信号与直流电压低于平均值且变低的模块的驱动信号交换, 以载波相位差造成的直流侧不平衡来补偿开关损耗等造成的不平衡。该方法将直流侧平衡和静止同步补偿系统控制分开, 算法简单, 省略了直流侧辅助直流电源, 使 H 桥模块更加简单, 节省了成本。通过仿真分析和实验结果证实了该方法的正确性、有效性和实用性。

关键词: 相移载波; 级联多电平; STATCOM; 直流侧平衡

中图分类号: TM 464

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2010)11-0031-06

Balancing control method of DC voltage of cascaded H-bridge STATCOM

HU Ying-hong, REN Jia-jia, WANG Jian-ze, JI Yan-chao

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper presents a control strategy to balance the DC capacitor voltage for cascaded H-Bridge multilevel static synchronic compensator (STATCOM) based on phase-shifted carrier pulse width modulation. Choosing pulse transposition is adopted according to the trend of each DC voltage. Exchanging the driving signals of the module whose DC voltage is increasing and higher than the average with the driving signals of the module whose DC voltage is decreasing and lower than the average. The unbalance of the DC side caused by the switching loss and other losses could compensate the unbalance caused by the carrier phase shifted PWM. Control algorithm is simple since the balancing method separated the DC capacitor voltages balancing control from STATCOM control system. This new control method has the advantages of non-auxiliary DC power, simplifying H bridge module and lower cost. Simulation analysis and results prove its validity and utility.

Key words: phase-shifted carrier pulse width modulation; cascaded multilevel inverter; static synchronic compensator; voltage balancing control

0 引言

静止同步补偿器(static synchronic compensator,

STATCOM)作为新型的静止无功补偿器,具有静止无功补偿器(static var compensator, SVC)无法比拟的优点,受到了广泛的关注,其应用研究也向高压大

收稿日期: 2010-03-08

基金项目: 黑龙江省青年基金(QC06C034)

作者简介: 胡应宏(1981—),男,博士研究生,研究方向为柔性交流输电系统;

任佳佳(1985—),女,博士研究生,研究方向为 FACTS 技术、风力发电技术;

王建赟(1972—),男,博士,副教授,研究方向为电能质量分析及控制;

纪延超(1962—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为 FACTS、无功功率补偿、电力电子技术电力系统中的应用。

容量方向发展^[1-2]。高压大容量 STATCOM 一般采用变压器多重化和多电平这两种结构^[3-5],多电平结构具有低电磁干扰和低开关频率的优点,成为高压大容量的首要选择,被广泛应用于高压电力电子设备中^[6-7]。级联多电平结构,除了具有输出电压谐波小、损耗低、成本低等优点外,还具有结构简单、所需器件少、易于扩展和模块化的特点,是大容量多电平的最佳选择,也是近年来研究的热点^[8]。

级联 STATCOM 直流侧电容互相独立,在理想情况下直流侧不消耗有功功率,能很好地维持各直流电压平衡。由于各个开关器件的开关特性、并联损耗,每个直流电容的充、放电时间不同等差异,造成各个模块直流电压不平衡,从而导致输出电压的畸变,影响输出电压和电流的质量,使各个开关器件电压应力不均,以致烧毁开关器件危害装置的安全运行,因此在级联 STATCOM 中必须对直流侧不平衡进行控制。文献[8-9]分析了在级联结构中造成直流侧电压不平衡的原因,谐波和串联型损耗的差异不会造成电容电压不平衡;电容器容量差异会影响动态过程中电容电压的分配,但不会造成稳态时电容电压不平衡;稳态时电容电压不平衡是由于混合型损耗、并联型损耗差异以及脉冲延时不同造成的。

目前,已有一些控制直流侧电压平衡的方法应用到级联 STATCOM 中,并取得了较好的效果,实际上直流侧电压平衡也一直是研究的热点和重点。在最近的一些控制方法中,文献[10]采用调节各个单元逆变器的输出电压的相位的方法来维持直流侧电压平衡,但是调节的相位范围小,控制能力较弱;另外,角度的调节通常需要在控制中加入直流平衡 PI 环,每个模块的直流电容电压需要一个控制环,PI 参数的调节非常复杂,随着级联个数的增加,算法的复杂程度急剧增加。文献[11]采用外部交换功率的方法来实现直流侧电压平衡,其缺点是在直流侧有辅助的高频耦合母排,带有 AC/DC 转换电路,导致模块结构复杂、布局困难以及成本的增加。循环交换触发脉冲也能处理电容电压不平衡,通过触发脉冲的轮转,使同一桥臂内各个模块的导通时间基本相同,消除由调制方式造成的直流侧电压不平衡^[12]。理想情况下循环交换能够平衡各个直流电压,实际各个开关并不能等效为理想开关,因此并不能解决直流侧电压不平衡问题。

本文提出一种基于相移载波 PWM 调制的级联 STATCOM 直流侧电压平衡控制策略。该方法将直流侧电压平衡控制与 STATCOM 系统控制独立出

来,算法简单,随着级联个数的增加,算法也只有少量的增加,适合于任意 H 桥模块 STATCOM。

1 相移载波的原理分析

多电平结构要求器件开关频率低、动态性能好,相移载波调制 (phase-shifted carrier pulse width modulation, PSCPWM) 通过比较参考波和载波,输出 PWM 波形,具有控制简单,实时性好等特点,最适用于级联多电平结构。单相 2H 桥级联结构如图 1 所示。

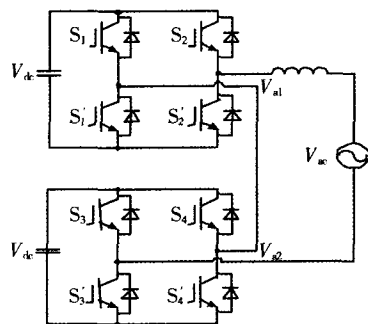


图1 级联 H 桥主电路

Fig. 1 Cascaded H-bridge main circuit

对于 K 个模块的级联结构,每相均采用 K 个具有相同频率 f_c 、幅值 A_c 的三角载波 (K 个三角载波之间依次相差 π/K 相位) 与一个频率 f_r 、幅值 A_r 的正弦调制波相比较,调制波的幅值大于三角波则开通相应的开关器件,反之则关断相应的开关器件。2H 桥级联多电平相移载波调制的原理和输出波形如图 2 所示。

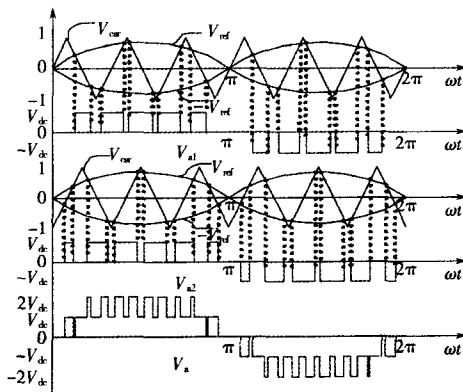


图2 相移载波 PWM 的原理

Fig. 2 Principal of phase-shifted carrier PWM

2 数学模型和分析

由于载波和调制波都具有周期性,通常采用双重傅里叶级数来对输出电压波形进行分析,双重傅

里叶分析式为

$$F(x, y) = \frac{1}{2}A_{00} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_{0n}\cos(ny) + B_{0n}\sin(ny)] + \sum_{m=1}^{\infty} [A_{m0}\cos(mx) + B_{m0}\sin(mx)] + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} [A_{mn}\cos(mx + ny) + B_{mn}\sin(mx + ny)], \quad (1)$$

$$\text{式中: } A_{mn} + jB_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(x, y) e^{j(mx+ny)} dx dy,$$

$x = \omega_c t, y = \omega_r t$, ω_c 和 ω_r 分别为载波和参考波的角频率。

参考波的表达式为 $V_{\text{ref}} = M\sin\omega_r t$, 其中 M 为调制比。

三角载波表达式为

$$V_{\text{car}} = \begin{cases} \omega_c t \frac{2}{\pi} - 2K\pi - \frac{i-1}{K}\pi, & -\frac{\pi}{2} + 2K\pi < \omega_c t - \frac{i-1}{K}\pi < \frac{\pi}{2} + 2K\pi, \\ -\left(\omega_c t \frac{2}{\pi} - \frac{i-1}{K}\pi\right) + 2K\pi + 2, & \frac{\pi}{2} + 2K\pi < \omega_c t - \frac{i-1}{K}\pi < \frac{3\pi}{2} + 2K\pi. \end{cases} \quad (2)$$

式中: i 为第 i 个模块; $(i-1)\pi/K$ 为第 i 个模块与第一个载波的相位差, $i=1, 2, \dots, K$ 。

当 K 个 H 桥串联时, 单个 H 桥输出电压表达式为

$$V_{\text{ai}}(t) = V_{\text{aio}}(t) - V_{\text{ail}}(t) = V_{\text{dc}} \left\{ M\sin(\omega_r t) + \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{1}{m} \cos([m+n+1])\pi J_{2n-1}(mM\pi) \sin\left(2m\left[\omega_c t - \frac{i-1}{K}\pi\right] + (2n-1)[\omega_r t]\right) \right\}, \quad (3)$$

式中 $i=1, 2, \dots, K$ 。

整体输出电压表达式为

$$V_p(t) = \sum_{i=1}^K V_{\text{ai}}(t) = V_{\text{dc}} \left\{ KM\sin(\omega_r t) + \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{1}{m} \left\{ \cos([m+n+1])\pi J_{2n-1}(mM\pi) \sum_{i=1}^K \sin\left(2m\left[\omega_c t - \frac{i-1}{K}\pi\right] + (2n-1)[\omega_r t]\right) \right\} \right\}, \quad (4)$$

式中 $J_{2n-1}(mM\pi)$ 为 $2n-1$ 阶 Bessel 函数。

经过相移载波调制后, 在不提高单个开关频率(单个开关频率 $f_c = \omega_c/2\pi$) 的前提下, 每相等效的

开关频率为 $2Kf_c$, 相当于把开关频率提高了 K 倍, 大大提高了整相输出电压谐波性能, 特别适合于级联多电平变流器。

根据式 4, 当 $2m\omega_c t + (2n-1)\omega_r t = \pm\omega_r t$ 时, 即 $2mN + (2n-1) = \pm 1$ 为其对基波的影响(其中载波频率与调制波频率比 $N = \omega_c/\omega_r$)。在高压大容量中, 载波比 N 比较小(一般小于 10), 满足条件的 m 也就比较小, 低阶 Bessel 函数的影响不可忽略, 这将造成基波载波相位、幅值的差异。表 1 列出了载波频率 200 Hz 在不同调制比情况下, 各桥输出的基波相位和幅值差异。这种差异只与载波的相位有关, 与开关损耗、并联损耗等外部原因无关, 是相移载波调制方式所造成的。不同载波相位角所引起的直流侧电压变化趋势不同, 当相位滞后时, 对应直流侧电压上升; 反之所对应直流侧电压则下降。

在 STATCOM 中, 直流侧电容取值有限, 造成电流对直流电容冲放电, 形成直流侧电压二次波动, 造成实际输出基波幅值和计算值有一定差异, 该差异由直流电容容值、连接电抗和工作电流共同决定, 但是同样存在各模块输出基波幅值和相位的差异。这种差异使得在理想无损情况下, 级联结构各个直流电压也会有很大的不平衡, 必须加以消除。

表 1 载波频率 200 Hz、4 桥输出电压的基波幅值和相位
Table 1 Fundamental amplitude and phase of 4 H-bridge output voltage (carrier frequency at 200 Hz)

载波相位 ϕ_c/rad	调制比 M	归一化基波幅值 A_r	基波相位 ϕ/rad
0	0.800 0	0.800 8	0
0	0.850 0	0.851 2	0
0	0.900 0	0.901 7	0
0	0.950 0	0.952 5	0
$\pi/4$	0.800 0	0.800 0	-0.001 0
$\pi/4$	0.850 0	0.850 0	-0.001 4
$\pi/4$	0.900 0	0.900 0	-0.001 9
$\pi/4$	0.950 0	0.950 0	-0.002 6
$\pi/2$	0.800 0	0.799 2	0
$\pi/2$	0.850 0	0.848 8	0
$\pi/2$	0.900 0	0.898 3	0
$\pi/2$	0.950 0	0.947 5	0
$3\pi/4$	0.800 0	0.800 0	0.001 0
$3\pi/4$	0.850 0	0.850 0	0.001 4
$3\pi/4$	0.900 0	0.900 0	0.001 9
$3\pi/4$	0.950 0	0.950 0	0.002 6

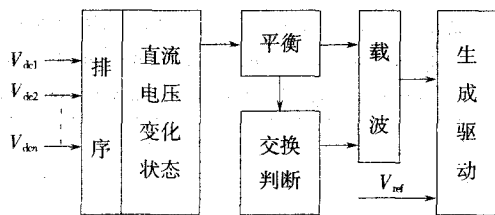
3 直流侧电压平衡控制策略

本文提出一种根据直流侧电压变化的趋势, 利

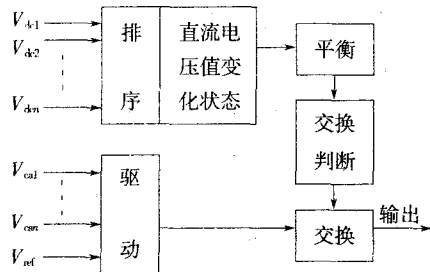
用调制波相位差异造成的直流侧电压不平衡来补偿其他原因(比如开关损耗、并联损耗、脉冲延时)造成的直流侧电压不平衡的方法。

所提出的方法是在相移载波调制中,当直流侧电压在平衡的范围内时,保持各个桥的载波相位差不变;当不平衡出现时,将直流电压变高且高于平均值的模块的驱动信号和直流电压变低且低于平均值的模块的驱动信号交换,或者将电压变高的模块所对应的移相角度和电压变低的模块的移相角度交换,次高的和次低的模块相交换,从而利用相移载波相位差造成的直流侧电压高低,去弥补其他原因造成的直流侧电压不平衡,使直流侧电压维持在一定的平衡范围内。

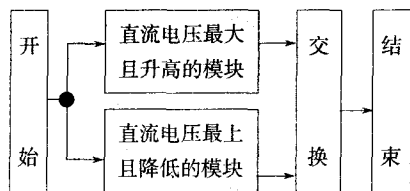
具体实现原理是将输入直流电压排序,求出最大值以及各直流电压的变化趋势,然后根据直流电压偏离平均值的情况,判断是否需要交换,再交换载波相位或者驱动信号。系统实现的原理框图如图3所示,图3(a)为交换载波相位,图3(b)为交换驱动信号,图3(c)为交换判断模块。交换载波相位和交换驱动信号,两者在输出波形上一致,只是在硬件实现时有一定的差异。



(a) 交换载波相位示意图



(b) 交换脉冲整体框图



(c) 交换判断

图3 直流侧电压平衡控制方法

Fig. 3 Bacanleving control method of DC voltage

在4个H桥级联结构中,交换判断如图4所示。在 t_1 时刻, V_{dc2} 最高且增大, V_{dc3} 最低且减小,所以对这两个模块的相位或者驱动进行交换,使其向直流平均值变化;在 t_2 时刻, V_{dc2} 最高,但其在减小, V_{dc1} 为电压高且增大的模块, V_{dc4} 最低且减小,所以对这两个模块的相位或者驱动进行交换,使其向直流平均值变化;同理在 t_3 时刻,对 V_{dc3} 和 V_{dc1} 进行交换,通过交换使直流侧电压保持在一定的范围内波动,使各个直流侧电压基本上保持平衡。

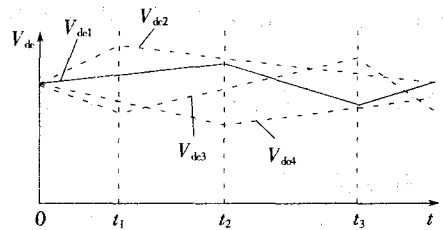
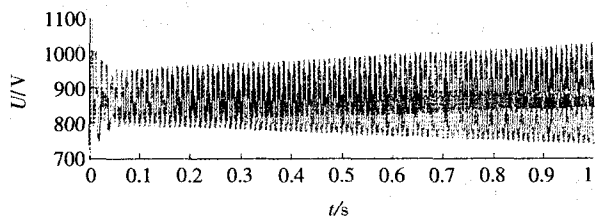


图4 提出的交换示意图

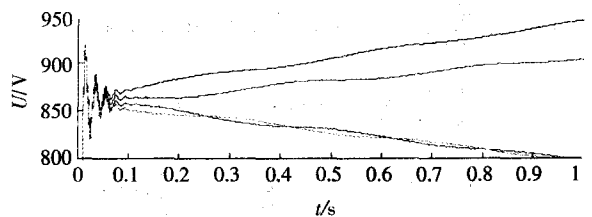
Fig. 4 Transposition schematic diagram

4 仿真结果分析

本文对4H桥级联结构STATCOM进行了仿真研究,仿真系统电压为2200V,直流侧电容为4000μF,采用载波移相调制,各开关器件开关频率为200Hz,调制比为0.9,滞后系统电压0.01rad。理想情况下不采取平衡控制策略的仿真波形如图5所示,在理想无损情况下4个直流电压出现了明显的不平衡,随着时间的增长不平衡度逐渐加大,验证了载波相位不同对直流侧电压的影响,与理论分析一致。



(a) 直流侧电压瞬时值波形



(b) 直流侧电压平均值

图5 不循环交换

Fig. 5 Non-cycle transposition

采用循环交换策略,克服了因载波相位差造成的影响,在理想情况下是平衡的,其仿真波形如图6

所示,但是直流侧惯性较大,平衡所需时间较长,效果不理想。

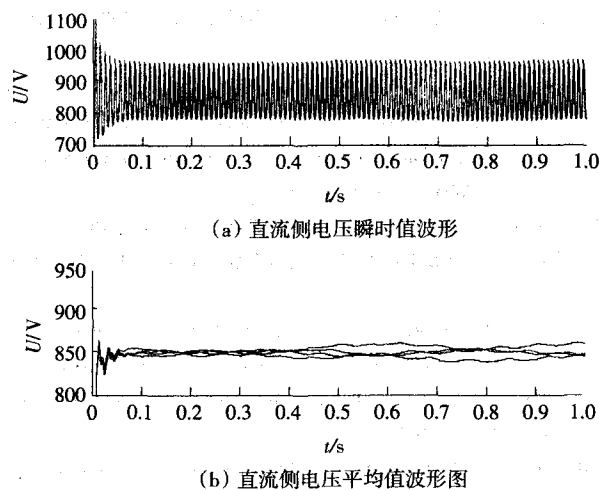


图 6 理想无损循环交换
Fig. 6 Ideal lossless cycle transposition

计及各个开关器件个体差异,开关损耗、并联损耗、开关延时不可能完全一致,循环交换只能消除调制所带来的电压不平衡,不能解决器件个体差异造成的电压不平衡。仿真研究中 3 个 H 桥设置为理想的无损状态,第 4 个 H 桥为损耗较大的状态,直流侧并联等效的并联损耗电阻,开关器件的开关延时设置为 3×10^{-6} s,开关损耗等效为并联的电流控制电流源,其仿真结构如图 7 所示。当计及损耗等实际情况时,直流侧电压的波形如图 8 所示。

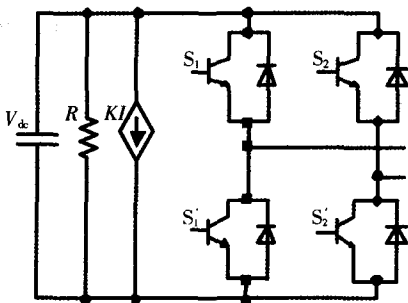


图 7 损耗等效电路
Fig. 7 Loss equivalent circuit

加入损耗后,循环交换依然存在直流侧电压不平衡问题,采用所提出的交换载波相位的直流侧电压平衡控制方法,得到的结果如图 9 所示。由图 9 可见,直流侧电压维持在平均值附近上下波动,利用载波相位差造成的基波相位和幅值的差异,来调节直流侧电压,该方法综合了通过调节幅度和相位的方法来平衡直流侧电压,使得直流侧电压平衡简单有效。

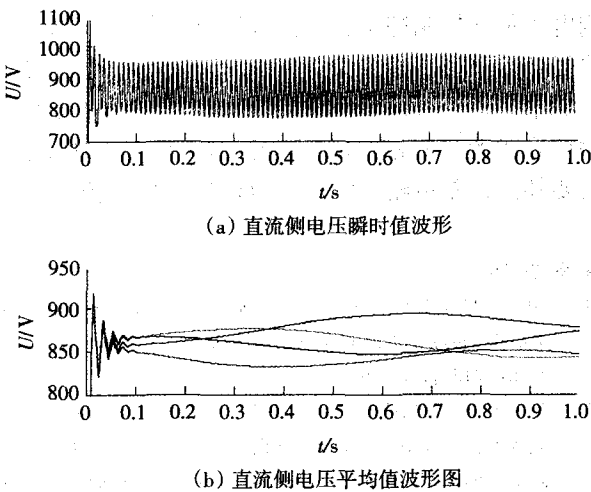


图 8 有损循环交换
Fig. 8 Lossy cycle transposition

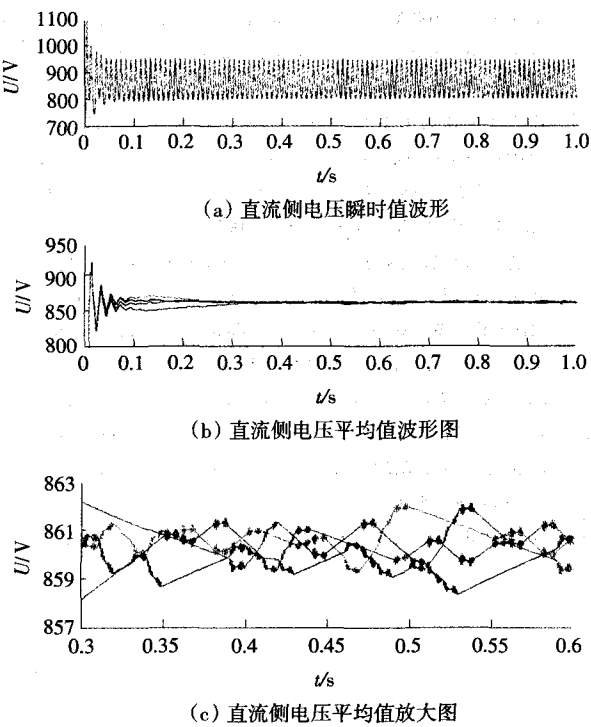


图 9 交换方法下的直流侧电压波形
Fig. 9 DC side voltage waveforms using exchange method

5 结 语

本文分析了相移载波调制与直流侧电压不平衡之间的关系,以此为理论依据,提出直流侧电容电压平衡控制策略,并对平衡控制策略进行了详细的理论分析和仿真研究,并给出了仿真结果。结果表明,利用级联 STATCOM 载波频率比较低,载波相位对输出电压基波和相位的影响,可以平衡其他原因造成的直流侧电压不平衡。该控制方法简单、有效,利用基于两电平 STATCOM 的控制方法,附加上直流

侧电压平衡控制即可,该方法随着电平数的增加,算法复杂度只有少量增加。一般情况下,各模块的差异非常小,当出现模块极端不匹配时,仅通过交换驱动信号或者载波相位角,不能达到直流侧电压平衡,需要外部控制策略才能实现直流侧电压平衡。

参考文献:

- [1] HINGORANI N G, GYUGYI L. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems* [M]. New York: IEEE press, 1999.
- [2] 纪延超,刘庆国,骆济寿,等. 新型无功补偿电源(ASVG)的仿真和实验[J]. 中国电机工程学报,1993,13(2):37-42.
JI Yanchao, LIU Qingguo, LUO Jishou, et al. Simulation and experimental of a novel reactive power compensating source[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1993, 13(2):37-42.
- [3] SCHAUDER C, GERNHARDT M, STACEY E, et al. Development of a ± 100 MVar static condenser for voltage control of transmission systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(3): 1486-1496.
- [4] HANSON D J, HORWILL C, GEMMELL B D, et al. A STATCOM-based relocatable SVC project in the UK for national grid [C]// *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, January 27-31, 2002, New York, USA. 2002;532-537.
- [5] 沈斐,王娅岚,刘文华,等. 大容量 STATCOM 主电路结构的分析和比较[J]. 电力系统自动化,2003,27(7): 59-65.
SHEN Fei, WANG Yalan, LIU Wenhua, et al. Analysis and comparison of large capacity STATCOM circuit configuration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(7): 59-65.
- [6] LAI J S, PENG F Z. Multilevel converters-a new breed of power converters[J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1996, 32(3):509-517.
- [7] RODRIGUEZ J, LAI J S, PENG F Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2002, 49(4):724-738.
- [8] 耿俊成,刘文华,袁志昌. 级联 STATCOM 电容电压不平衡现象研究(一)仿真和试验[J]. 电力系统自动化,2003,27(16): 53-58.
GENG Juncheng, LIU Wenhua, YUAN Zhichang. Research on the voltage unbalance of DC capacitor of cascaded STATCOM-part one: simulation and experiments[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(16):53-58.
- [9] 耿俊成,刘文华,袁志昌. 级联 STATCOM 电容电压不平衡现象研究(二)数学模型[J]. 电力系统自动化,2003,27(17):35-39.
GENG Juncheng, LIU Wenhua, YUAN Zhichang. Research on the voltage unbalance of DC capacitor of cascaded STATCOM-part two: mathematical model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(17): 35-39.
- [10] PENG F Z, LAI J S. A multilevel voltage source inverter with separate DC sources for static var generation[J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1996, 32(5): 1130-1138.
- [11] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于级联逆变器的50MVA 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 voltages of 50MVA STATCOM based on cascaded multilevel inverters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(4): 145-150.
- [12] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于集成门极换向晶闸管与级联逆变器的 ± 50 Mvar 静止同步补偿器[J]. 中国电机工程学报,2008,28(5): 55-60.
LIU Wenhua, SONG Qiang, TENG Letian, et al. ± 50 Mvar STATCOM based on chain circuit converter employing IGCTs [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(5):55-60.

(编辑:于双)