

# 载波调换调制技术在级联多电平 SAPF 中的应用

汪玉凤<sup>1</sup>, 张立<sup>1</sup>, 褚占军<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 国网辽宁省电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 电容电压不平衡是影响级联 H 桥多电平并联有源电力滤波器(SAPF)安全可靠运行的关键问题。通过分析载波相移调制技术(CPS-SPWM)对直流侧电容电压的影响, 提出了一种基于控制直流侧电容电压平衡的载波调换调制技术, 确立了双电压环与电流环结合的三闭环 SAPF 控制策略。这种调制方式算法简单、易实现, 能在较小开关频率下实现较好的补偿效果的同时, 有效地解决级联 H 桥多电平 SAPF 直流侧电压平衡问题。仿真和实验证明, 该载波调换调制技术是有效、实用的, 能对直流侧电容电压平衡起到良好的控制效果。

**关键词:** 级联多电平; 并联有源电力滤波器(SAPF); 电容电压控制; 载波调换调制

## Application of carrier exchange modulation technique in multi-level cascaded SAPF

WANG Yufeng<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, CHU Zhanjun<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;  
2. Fuxin Power Supply Company of Liaoning Power Co., Ltd., Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Capacitor voltage imbalance is the key issue for the safe and reliable operation of cascaded H-bridge multi-level shunt active power filter (SAPF). This paper proposes a carrier exchange modulation technique based on DC capacitor voltage balance control by analyzing the impact of carrier phase shift modulation technique (CPS-SPWM) on DC side capacitor voltage, and establishes a combination of three closed-loop SAPF control strategy which includes a dual voltage loop and a current loop. This modulation algorithm is simple and easy to implement, and can achieve better compensation effect at lower switching frequency and effectively solve the DC side voltage balance problems for cascaded H-bridge multi-level SAPF at the same time. The simulation and experimental results show that the carrier exchange modulation technique is effective and practical, which could play a good control effect for DC capacitor voltage balance.

**Key words:** cascade multilevel; SAPF; capacitor voltage; carrier exchange modulation

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0014-05

## 0 引言

H 桥级联式多电平变流器在中高压、大功率领域广泛应用。在 H 桥级联型变流器中, 每个 H 桥单元都是一个非线性、多变量、强耦合系统, 且在有源电力滤波器(APF)中, H 桥直流侧电容是独立的。系统器件及 H 桥的控制差异会导致各 H 桥单元直流侧电容电压不平衡, 从而导致系统器件承受电压不同, 影响系统补偿的效果。文献[1]指出逆变桥并联损耗、开关损耗以及开关器件触发脉冲的微小差异是造成稳态电容电压不平衡的主要原因。

目前, 已有一些文献针对 H 桥级联多电平变流器直流侧电压平衡提出相应的控制方法<sup>[2-11]</sup>。文

献[2]提出改变级联拓扑, 等效为电压源与电流源相串联, 只有两个电容, 相对于多个电容更易于控制, 但是应用方向小, 且高压电容成本高, 有违级联拓扑的目的。文献[3]提出一种改进型的级联拓扑, 本质是将几种多电平拓扑结构结合, 结构太过复杂, 更不利于对电容电压的控制。文献[4-6]各自提出对电容的控制方法, 虽然各有优点, 但是这些平衡控制方法十分复杂, 要实现直流母线电容电压的动态均衡非常困难。文献[7]提出一种改变载波幅值, 以抑制电容电压不平衡造成的畸变, 虽然有效, 但不能从根本上解决电容电压不平衡的问题。文献[8]提出在调制波过零点进行载波轮换, 其本质并不会对电容电压产生影响, 且在 SAPF 中应用时, 调

制波过零点切换频率较高, 不易实现。

本文对载波相移调制技术在控制电容电压平衡方面进行了分析, 针对其不足之处提出了一种载波调换调制技术。这种调制方式不同于文献[8]所提出的载波固定不变切换调制, 而是根据电容电压的高低选择载波的调换顺序, 并且更为简单、易实现, 能在较小开关频率下实现较好的补偿效果, 同时能有效地对级联 H 桥多电平 SAPF 直流侧电压平衡进行控制。

## 1 载波调换调制技术

### 1.1 载波相移调制技术

CPS-SPWM 技术的本质是自然采样 SPWM 技术和多重化技术的组合, 该技术可以在较低的器件开关频率下取得与较高开关频率等效的结果, 不但使 SPWM 技术应用于特大功率场合成为可能, 而且在提高装置容量的同时, 有效地减小了输出谐波, 提高了整个装置的信号传输带宽。

以图 1 级联桥五电平逆变器为例, 图 2 给出其 CPS-SPWM 的调制原理。

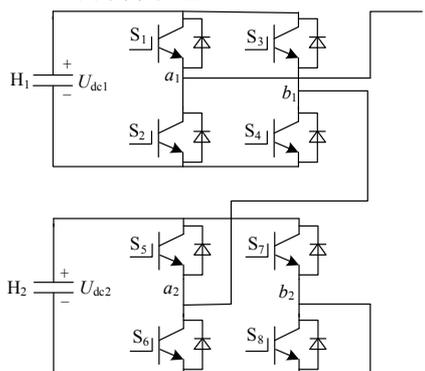


图 1 级联五电平逆变器电路

Fig. 1 Cascade five level inverter circuit

如图 2 所示为典型五电平级联型逆变器输出波形,  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$  分别为两 H 桥的左、右桥臂的中点电压,  $V_1$ 、 $V_2$  为两 H 桥的逆变输出,  $V_0$  为级联逆变器输出。单个 H 桥逆变输出与级联输出关于  $\pi/2$  轴对称。因为输出电流  $i_c$  滞后输出电压  $90^\circ$ , 对于  $H_1$  桥的输出电压与逆变器输出电流关系如图 3 所示。

以桥  $H_1$  为例, 在半个周期内的能量变化为

$$Q_1 = \int_{\pi}^0 V_1 \times \sqrt{2} I \cos \theta d\theta = 0 \quad (1)$$

由式(1)可以得出, 采用载波相移调制方法, 并不影响电容电压, 由于电容电压存在损耗等问题, 所以 CPS-SPWM 不足以维持电容电压的平衡。

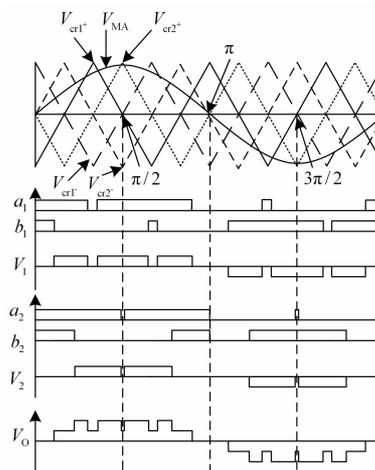


图 2 CPS-SPWM 调制原理

Fig. 2 Modulation principle of CPS-SPWM

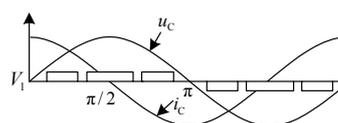


图 3 CPS-SPWM 输出单相电压与逆变器输出电流

Fig. 3 CPS-SPWM single-phase output voltage and inverter output current

### 1.2 载波调换调制技术

载波调换技术的重点是在不影响级联多电平输出效果的前提下, 有效地对电容进行充放电, 以实现控制电容电压动态平衡。基本原理是: 依据直流侧电容电压的高低, 将两桥载波在标准正弦 50 Hz 四分之一周期处进行载波调换, 改变驱动脉冲波形, 以改变不同 H 桥的输出, 使电压高的电容处在放电状态, 电压低的电容工作在充电状态。

以图 1 的五电平逆变器的第一周期前半周期为例, 在  $0$  至  $\pi/2$ , 载波分别与调制波  $V_{cr1+}$ 、 $V_{cr2+}$  与调制波  $V_{MA}$  比较产生开关器件  $S_1$ 、 $S_5$  的门极信号, 其余两个载波  $V_{cr1-}$ 、 $V_{cr2-}$  与调制波  $V_{MA}$  比较产生开关器件  $S_3$ 、 $S_7$  的门极信号; 在  $\pi/2$  处对载波进行调换; 在  $\pi/2$  至  $\pi$ , 载波  $V_{cr2+}$ 、 $V_{cr1+}$  分别与调制波  $V_{MA}$  比较产生  $S_1$ 、 $S_5$  的门极信号, 其余两个载波  $V_{cr2-}$ 、 $V_{cr1-}$  与调制波  $V_{MA}$  比较产生  $S_3$ 、 $S_7$  的门极信号。在每  $k\pi/2$  再次进行载波调换, 于是可得到如图 4 的调制波形。

由图 4 可以看出, 载波调换调制技术只是在  $\pi/2$  后使  $V_1$  与  $V_2$  的输出进行调换, 而输出的总电压波形不变。在此种调制方式下得到上 H 桥输出电压波形与级联逆变器输出电流关系如图 5 所示。

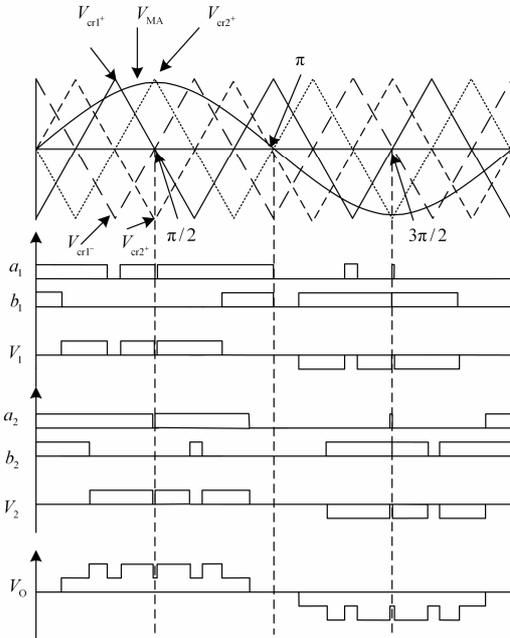


图 4 载波调换调制原理

Fig. 4 Principle of carrier exchange modulation

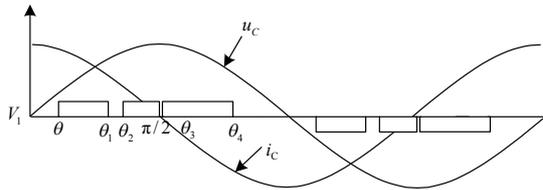


图 5 载波调换调制单相输出电压与逆变器输出电流

Fig. 5 Carrier exchange modulation single-phase output voltage and inverter output current

由图 5 可知, 在这种载波调换调制技术下单个 H 桥输出  $V_1$  与  $V_2$  的波形不再对称, 则其能量变化不再为 0, 仍以  $H_1$  桥为例, 半个周期内的能量变化为

$$Q_1' = \int_{\pi}^0 V_1 \times \sqrt{2}I \cos \theta d\theta = \sqrt{2}V_1 \int_{\theta_1}^{\theta} I \cos \theta d\theta + \sqrt{2}V_1 \int_{\pi/2}^{\theta_2} I \cos \theta d\theta + \sqrt{2}V_1 \int_{\theta_3}^{\theta_4} I \cos \theta d\theta = \sqrt{2}V_1 I \times X \quad (2)$$

其中

$$X = (\sin \theta_1 - \sin \theta + 1 - \sin \theta_2 - \sin \theta_4 + \sin \theta_3) > 0$$

此时对  $H_1$  桥电容进行充电, 电容电压升高, 由对称性原理, 此时  $H_2$  桥电容放电, 电容电压降低, 此时称作工作状态一。若将  $H_1$  桥与  $H_2$  桥动作顺序互换, 则是对  $H_1$  桥电容进行放电, 电容电压降低, 此时  $H_2$  桥电容充电, 电容电压升高, 称此时为工作状态二。两个 H 桥不停地进行充电、放电过程, 使电压维持在动态平衡状态。

此方法推广至  $N$  个 H 桥级联时, 则会产生  $N$  个工作状态, 其基本原理与两 H 桥级联相同, 在多种工作状态下根据电容的电压高低不同选择合适的动作方式, 在一定条件下可以进行单独的充电、放电, 更有利于维持电容电压的稳定。

## 2 SAPF 控制策略

在应用载波调换调制技术时, 在每个  $k\pi/2$  前, 必须对所有电容电压进行排序, 对电压从低到高依次采用充电、平衡、放电的动作顺序, 进而确定载波的调换顺序。于是在原有 SAPF 控制策略基础上可以得出双电压环加电流环的三闭环控制策略。其基本控制原理如图 6 所示。

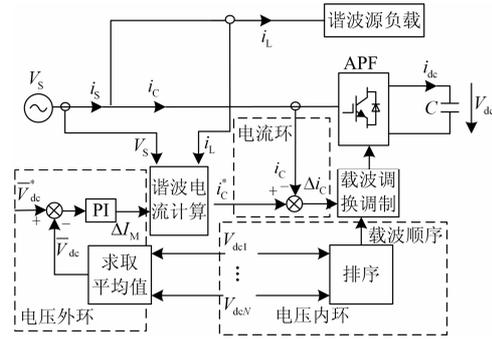


图 6 级联多电平 SAPF 控制原理

Fig. 6 Control principle of cascade multilevel SAPF

SAPF 直流侧电容端电压  $V_{dc}$  采用闭环控制, 其设定值为  $V_{dc}^*$ ; 电容电压平均值与设定值做差, 经 PI 调节器输出  $\Delta I_M$  代表 SAPF 谐波电流调节量, 此为电压外环调节, 目的是为了得到所需输出谐波的有功功率的总补偿量, 实现对电网的谐波补偿。 $\Delta I_M$  经谐波电流检测单元运算的负载谐波分量作为 SAPF 电流参考指令值  $i_c^*$ ; SAPF 电流  $i_c$  由电流控制器控制载波调换调制开关信号, 使  $i_c$  得到跟踪, 此环节为电流内环调节。电压内环主要是通过对电容电压排序后, 通过载波调换调制技术实现电容的充、放电, 以实现电容电压平衡。在上一节已作详细说明, 在此不再赘述。

## 3 仿真和实验验证

为验证载波调换调制技术的正确性, 本文对所述载波调换调制技术进行了仿真研究。分别采用载波调换调制技术与载波相移调制技术的级联七电平 SAPF 的 A 相电容电压进行仿真; 采用载波调换调制技术对 A 相的负载电流、电网电流与补偿电流进行了仿真。其仿真结果如图 7、图 8 所示。由图 7、图 8 可见, 与采用传统载波相调制技术相比较,

采用载波调制技术的级联 SAPF 可以得到较为稳定的直流侧电容电压,且在充电过程中十分稳定,不会出现较大波动;在充电完成后 0.2 s 时刻将级联 SAPF 投入后,网侧谐波电流得到了较好的抑制。

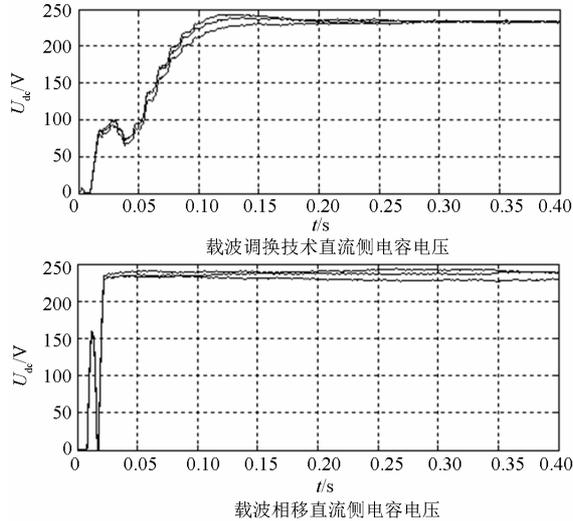


图 7 A 相电容电压仿真波形

Fig. 7 Simulated waveforms of A phase DC side capacitor voltage

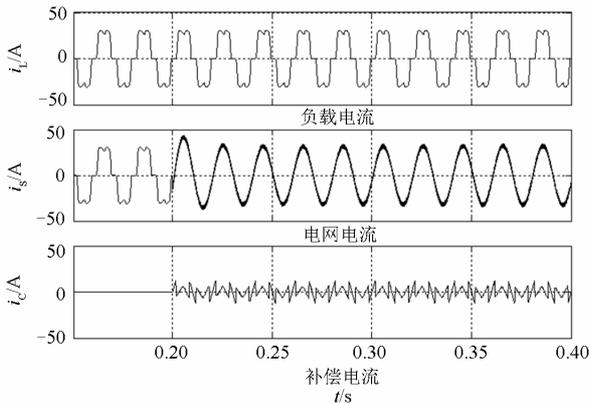


图 8 负载电流、电网电流和补偿电流仿真波形图

Fig. 8 Simulated waveforms of load, grid and compensation current

为进一步验证载波调制技术的正确性,搭建了级联七电平 SAPF 实验样机,样机参数如下:电网电压 380 V, 50 Hz;经三相整流接阻感负载 10  $\Omega$ , 5 mH, 1 000 W;IGBT 参数为 1 700 V, 100 A;选用落木源 IGBT 集成驱动模块;直流侧电容为 450 V, 2 200  $\mu$ F;APF 输出端滤波电抗器为 1 mH;直流侧单电容电压为 235 V;样机采用控制器为 TMS320LF2812 型 DSP 和 EP4CE15F17C8 型 FPGA。系统采样频率为 9.6 kHz。IGBT 的开关频率为 9.6 kHz。实验波形见图 9~图 12。

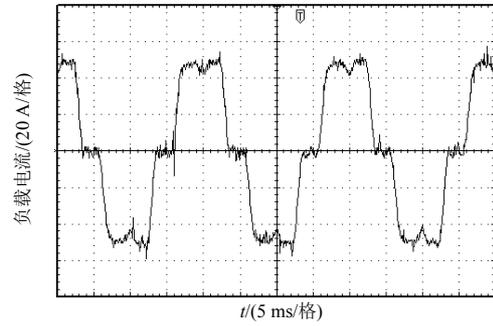


图 9 负载电流波形图

Fig. 9 Waveforms of load current

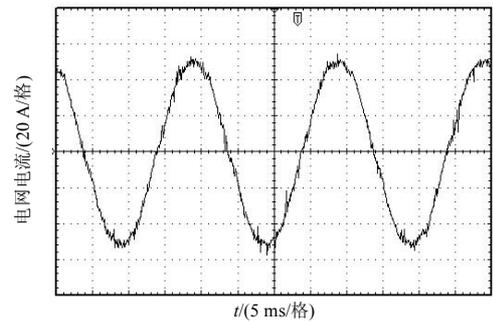


图 10 补偿后的电网电流波形图

Fig. 10 Waveforms of grid current after compensation

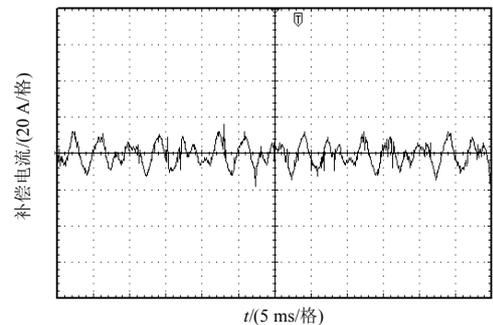


图 11 补偿电流波形图

Fig. 11 Waveforms of compensation current

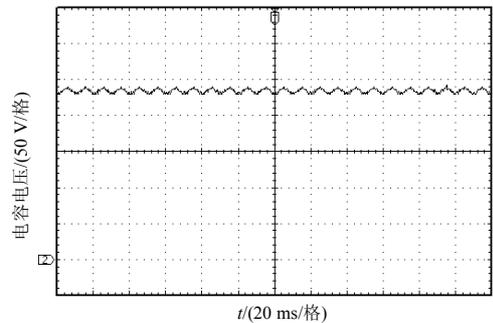


图 12 直流侧单电容电压波形

Fig. 12 Waveforms of DC side signal capacitor voltage

从图中可以看出,经补偿后网侧电流比较接近正弦,与仿真波形基本相同;实验证明用本文所提出的载波调制调制技术应用于级联七电平 SAPF

中, 直流侧电容电压能取得良好的平衡效果, 并且并不影响对网侧谐波的补偿。

### 4 结论

本文对级联多电平 SAPF 控制策略进行了研究, 分析了 CPS-SPWM 在 SAPF 中对直流侧电容的影响。在原有 CPS-SPWM 调制技术的基础上, 提出了一种载波调换调制技术, 确立了双电压环与电流内环的三闭环 SAPF 控制策略, 其中, 电压内环以载波调换调制技术为基础以解决各相电压均衡和相内各功率单元直流侧电容电压均衡问题; 电压外环采用传统 PI 调节, 以解决系统总电压稳定问题; 电流内环控制 SAPF 的补偿电流输出。仿真和样机实验证明, 所提出的载波调换调制技术具有原有 CPS-SPWM 在较低的器件开关频率下实现较好补偿效果的优点, 并且对直流侧电压平衡控制策略也具有良好的控制效果。

### 参考文献

[1] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 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 capacitors of cascade STATCOM part two: mathematical model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 35-39.

[2] 高东辉, 杜少武, 张长征. 改进型混合级联多电平有源电力滤波器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 40-46.  
GAO Donghui, DU Shaowu, ZHANG Changzheng. Research on an improved hybrid cascade multilevel active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 40-46.

[3] 许赞, 邹云屏, 丁凯. 一种改进型级联多电平拓扑及其频谱分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 78-85.  
XU Yun, ZOU Yunping, DING Kai. Topology and spectral analysis of an improved hybrid cascade multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 78-85.

[4] 宫力, 康勇, 陈晶晶. 链式 STATCOM 直流电容电压分布式控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 217-223.  
GONG Li, KANG Yong, CHEN Jingjing. DC capacitor voltage distributed control system for cascaded multilevel STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 217-223.

[5] 陈明明, 姚钢, 周荔丹. 链式 SVG 的基频优化 PAM 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 129-135.  
CHEN Mingming, YAO Gang, ZHOU Lidan. Fundamental frequency optimization chain PAM method of SVG[J]. Power System Protection and Control, 2013,

41(7): 129-135.

[6] 常伟, 史丽萍, 王思捷, 等. 空间矢量调制技术在 6 kV 级联静止同步补偿器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 28(12): 95-99, 140.  
CHANG Wei, SHI Liping, WANG Sijie, et al. Application of space vector modulation in 6 kV cascade STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2012, 28(12): 95-99, 140.

[7] 王立乔, 杨博生, 邬伟扬. 载波幅值可调 PWM 技术及其在级联型多电平变流器中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 122-128.  
WANG Liqiao, YANG Bosheng, WU Weiyang. PWM with amplitude-adjustable carrier and its application in cascade multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 122-128.

[8] 戴珂, 徐晨, 丁玉峰, 等. 载波轮换调制在级联 H 桥型 STATCOM 中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 99-106.  
DAI Ke, XU Chen, DING Yufeng, et al. The applications of carrier rotation modulation on cascaded H-bridges STATCOMs[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 99-106.

[9] 杨波, 曾光, 钟彦儒, 等. 阶梯波调制法链式 STATCOM 直流电容电压平衡控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 280-287.  
YANG Bo, ZENG Guang, ZHONG Yanru, et al. DC capacitor voltage balance control strategy of cascade STATCOM based on step wave modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 280-287.

[10] 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): 57-61, 73.  
ZHENG Jian, CHEN Jincuo. Study of STEITCOM based on hybrid cascaded multilevel inverter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 57-61, 73.

[11] 孙运全, 尹强, 盛吉, 等. 载波带频率变 PWM (VFCEPWM)在级联有源电力滤波器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 39-42, 113.  
SUN Yunquan, YIN Qiang, SHENG Ji, et al. Variable-frequency carrier bands PWM (VFCEPWM) and its applications in shunt APF[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 39-42, 113.

收稿日期: 2014-06-18; 修回日期: 2014-07-29

### 作者简介:

汪玉凤(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统及其自动化, 节能型电力传动技术与应用;

张立(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 366090808@qq.com

褚占军(1976-), 男, 工程师, 从事工业电气自动化方面的研究。

(编辑 魏小丽)