

# 级联型静止同步补偿器的直流电压检测及控制方法研究

李一丹<sup>1</sup>, 卢文生<sup>1</sup>, 彭秀艳<sup>2</sup>, 郭明良<sup>1</sup>

- (1. 黑龙江科技学院电气工程与信息学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150027;  
2. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150090)

## DC Voltage Measurement and Control for Cascaded STATCOM

LI Yidan<sup>1</sup>, LU Wensheng<sup>1</sup>, PENG Xiuyan<sup>2</sup>, GUO Mingliang<sup>1</sup>

- (1. College of Electrical Engineering and Information, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150027, Heilongjiang Province, China; 2. College of Automation Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150090, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** A practical method of measuring DC capacitor voltages for individual inverter units was proposed based on the principle of phase-shifted carrier modulation method. This method can reduce substantially the number of voltage transformers required in the conventional voltage measuring method, simplify the system structure, and enhance the system stability. Furthermore, this paper presented a control method of balancing the DC voltages. The simulation was performed on a Simulink model of  $\pm 50$  Mvar static synchronous compensator (STATCOM) and a DSP-based  $\pm 1.5$  kvar STATCOM prototype was built. The simulation and experimental results verify the correctness and the feasibility of the proposed DC voltage measurement and control method.

**KEY WORDS:** static synchronous compensator (STATCOM); cascaded multilevel inverter; DC voltage measurement; voltage control method; Simulink; digital signal processor (DSP)

**摘要:** 基于移相式载波脉宽调制原理, 提出一种实用的检测各逆变单元直流电容电压的方法。该方法可大大减少传统电压检测方法中所需传感器的数量、简化系统结构、提高系统稳定性。在此基础上, 提出直流电容电压平衡控制的方法。在基于 Simulink 的  $\pm 50$  Mvar STATCOM 仿真模型上进行仿真研究, 搭建基于 DSP 的  $\pm 1.5$  kvar STATCOM 物理模拟装置。仿真和实验结果验证了所提出的电压检测及控制策略的正确性和可行性。

**关键词:** 静止同步补偿器; 级联型多电平逆变器; 直流电压

检测; 电压控制策略; Simulink; 数字信号处理器

## 0 引言

静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)是一种能够产生或吸收无功功率的并接于电网的无功补偿装置, 其重要组成部分是多电平电压源型逆变器。在几种比较成熟的拓扑结构中, 级联型多电平逆变器因其模块化结构和无需功率器件串联即可输出足够高的电压而得到日益广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。然而, 级联型多电平逆变器中各逆变单元的直流侧电容完全独立, 如没有采取任何措施, 这些直流电容电压不能保持相等, 进而导致各功率器件上承受的电压不同, 逆变器输出电压的总畸变率(total harmonic distortion, THD)增加, 因而逆变单元直流电容电压的平衡控制是 STATCOM 装置安全可靠运行的关键技术之一。近年来, 国内外学者针对级联型 STATCOM 的直流电容电压平衡问题进行了深入的研究。文献[4]采用通过外部交换功率的方法来实现电容电压的平衡控制, 文献[5]提出了一种基于直流母线能量交换的直流电压平衡控制方法, 文献[6-8]采用控制各个逆变单元的输出电压相角的方法控制直流电压的平衡。在上述方法中, 为了实施直流电容电压的平衡控制, 所有的直流电容电压都需单独测量和控制, 这需要很多大功率的电压传感器及相应的信号处理电路(例如七电平级联型逆变器有 9 个直流电容, 则需要 9 只传感器), 造成 STATCOM 系统成本增加、结构复杂以

基金项目: 黑龙江省教育厅自然科学基金项目(11541308)。

Natural Science Foundation Program of the Heilongjiang Education Dept. (11541308).

及系统可靠性下降。

本文研究一种实用的直流电容电压检测方法 (capacitor voltage measurement, CVM), 在此基础上, 提出一种能够有效控制级联型逆变器中各逆变单元的直流电容电压的方法, 并对提出的方法进行仿真和实验研究。

### 1 级联型 STATCOM 的系统构成

基于级联型逆变器的 STATCOM 系统构成如图 1 所示, 包括 3 个部分: 级联型逆变器、耦合电感、STATCOM 控制器。图中  $u_{sabc}$  和  $u_{cabc}$  分别为电网电压和级联型逆变器的输出电压。

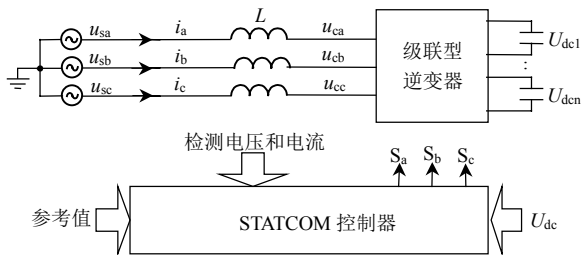
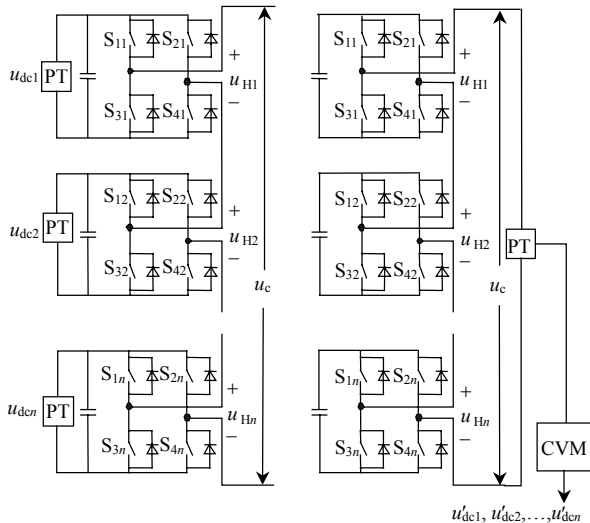


图 1 级联型 STATCOM 系统构成

Fig. 1 System diagram of the cascaded STATCOM

级联型逆变器的基本单元是一个单相 H 桥逆变器, 其直流侧是直流储能电容, 每相由  $n$  个 H 桥单元串联而成, 如图 2(a)所示。级联型逆变器根据直流电容电压合成得到所需要的输出电压, 三相级联型逆变器为星型连接。耦合电感将 STATCOM 连接到电网上。STATCOM 与电网间的功率交换可通过改变级联型逆变器输出电压的大小和相位来实现。将测得的电压和电流信号送入 STATCOM 控制



(a) 常规直流电压测量方法 (b) CVM 方法

图 2 级联型 STATCOM 单相结构图

Fig. 2 Per-phase diagram of a cascaded STATCOM

器与参考值进行比较, 控制器则根据本文提出的控制方法, 为逆变器的开关器件输出触发控制信号  $S_a$ 、 $S_b$  和  $S_c$ 。

### 2 直流电压检测方法

#### 2.1 常规直流电容电压测量与直流电压检测方法

为了对各逆变单元直流侧的电容电压进行控制, 在以往的常规方法中, 需要测量所有的直流电容电压。本文研究了一种新颖实用的直流电压检测方法。图 2 分别给出了应用两种直流电压检测方法的级联型 STATCOM 的单相结构图。每相有  $n=(m-1)/2$  个串接的 H 桥单元, 其中  $m$  为级联型逆变器产生的输出电平等级数。PT 为电压传感器,  $u_{dcj}(j=1,2,\dots,n)$  为各 H 桥单元直流侧电容电压,  $u_c$  为级联型逆变器的输出电压。

在图 2(a)的常规方法中, 直流电压  $u_{dcj}$  由  $n$  个电压传感器直接测得。在图 2(b)的 CVM 方法中, 每相只需一个电压传感器测量级联型逆变器的输出电压, 所有的直流电压  $u'_{dc1}, u'_{dc2}, \dots, u'_{dcn}$  均由 CVM 获得, 用带有上标的变量表示其与实际值有所区别。由此所需的电压传感器大大减少。

#### 2.2 CVM 直流电压检测原理

本文以 7 电平级联型逆变器 ( $n=3$ ) 为例介绍 CVM 直流电压检测原理。级联型逆变器输出电压  $u_c$  为每个 H 桥单元输出电压之和, 即

$$u_c = u_{H1} + u_{H2} + u_{H3} \tag{1}$$

第  $j$  个 H 桥 (用  $H_j$  表示) 的输出电压为

$$u_{Hj} = S_{Wj} u_{dcj} \tag{2}$$

式中:  $u_{dcj}$  为  $H_j$  的直流电容电压;  $S_{Wj}$  为  $H_j$  的开关函数, 其关系如表 1 所示。

表 1 H 桥单元的开关状态、开关函数及输出电压  
Tab. 1 Switching state, function, and output voltage of an H bridge unit

参数	取值			
$S_{1j}$	0	0	1	1
$S_{2j}$	0	1	0	1
$S_{3j}$	0	-1	1	0
$u_{Hj}$	0	$-u_{dcj}$	$u_{dcj}$	0

如果只有第  $j$  个 H 桥单元输出不为零, 而其它单元的输出均为零, 则  $u_c = u_{Hj} = S_{Wj} u_{dcj}$ 。这种情况是 CVM 工作的条件, 此时的逆变器输出电压  $u_c$  称为单电平电压。一旦满足该条件, 第  $j$  个 H 桥单元的直流电压即可由级联型逆变器的输出电压  $u_c$  获得, 即

$$u_{dcj} = \frac{u_c}{S_{Wj}} = |u_c| \quad (3)$$

2.3 CVM 工作过程

下面对 CVM 的工作原理做进一步说明，如图 3 所示。

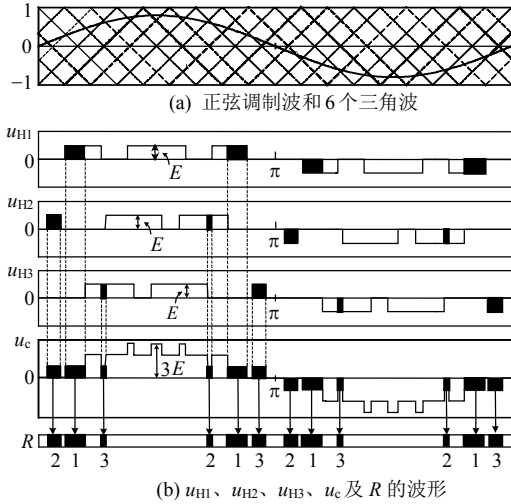


图 3 CVM 的工作原理

Fig. 3 Principle of the CVM method

图 3(a)为用于正弦脉宽调制(sine pulse width modulation, SPWM)的正弦调制波和 6 个三角载波，图 3(b)中的  $u_{H1}$ 、 $u_{H2}$ 、 $u_{H3}$ 、和  $u_c$  分别为 3 个 H 桥单元和级联型逆变器的输出电压。假设由于直流电压的平衡控制，每一级电平电压都相同，设为  $E$ 。表 2 定义了一个变量  $R$ ， $R$  的值如图 3 所示。例如，图 3 中  $u_c$  的第一个黑色区域为单电平电压  $u_{H2}$ ，即， $u_c = u_{H2}$ 。因此，这段时间内变量  $R=2$ ，则第 2 个 H 桥单元的直流电压  $u'_{dc2}$  等于  $|u_c|$ 。同理， $u_c$  波形中接下来的两个黑色单电平电压区域分别对应为  $u_{H1}$  和  $u_{H3}$ ，所以在这两段时间内  $R$  分别为 1 和 3。如果 CVM 条件不满足，即  $u_c$  不是单电平电压，则  $R$  为零，用空白电压段表示，如图 3 所示。 $R$  的值由开关状态决定，其判断原则如表 2 所示。

表 2 变量  $R$  的确定规则

Tab. 2 Determination rule of  $R$

H 桥单元开关状态			检测的直流电压	$R$
$H_1$	$H_2$	$H_3$		
$S_{11}=1, S_{21}=0$ 或	$S_{12}=0, S_{22}=0$ 或	$S_{13}=0, S_{23}=0$ 或	$u'_{dc1} =  u_c $	1
$S_{11}=0, S_{21}=1$	$S_{12}=1, S_{22}=1$	$S_{13}=1, S_{23}=1$	$u'_{dc2}$ & $u'_{dc3}$ 不变	
$S_{11}=0, S_{21}=0$ 或	$S_{12}=1, S_{22}=0$ 或	$S_{13}=0, S_{23}=0$ 或	$u'_{dc2} =  u_c $	2
$S_{11}=1, S_{21}=1$	$S_{12}=0, S_{22}=1$	$S_{13}=1, S_{23}=1$	$u'_{dc1}$ & $u'_{dc3}$ 不变	
$S_{11}=0, S_{21}=0$ 或	$S_{12}=0, S_{22}=0$ 或	$S_{13}=1, S_{23}=0$ 或	$u'_{dc3} =  u_c $	3
$S_{11}=1, S_{21}=1$	$S_{12}=1, S_{22}=1$	$S_{13}=0, S_{23}=1$	$u'_{dc1}$ & $u'_{dc2}$ 不变	
其它	其它	其它	$u'_{dc1}$ , $u'_{dc2}$ , 和 $u'_{dc3}$ 保持不变	0

CVM 的工作流程如图 4 所示。首先根据开关状态确定参数  $R$  的值，然后判断是否满足 CVM 条件。如果满足条件，例如  $R=j(j=1,2,3)$ ，只有第  $j$  个 H 桥单元有输出，级联型逆变器输出电压为单电平， $u_{dcj}$  等于逆变器输出电压  $u_c$ ，则 CVM 输出  $|u_c|$  做为相应单元的检测的直流电容电压  $u'_{dcj}$ 。如果不满足条件， $R=0$ ，此时 CVM 不输出  $|u_c|$ ，而是保持前一状态输出值。该方法在实际应用中是可行的，因为当系统电压出现快速闪变时，电容电压不能瞬变。

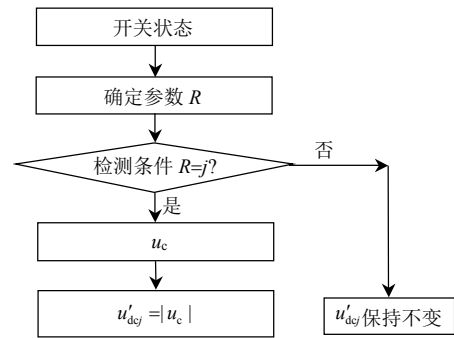


图 4 CVM 的工作流程

Fig. 4 Flowchart of the CVM

应该注意到，逆变器的输出电压等于某单元直流侧电压这种情况均发生在  $u_c$  过零点附近，因此，本文提出的 CVM 方法使得直流电压控制具有响应速度快的优点。

3 直流电容电压平衡控制

本文采用由电力系统提供少量有功功率来补偿功率损耗的方法，以稳定直流电容电压。具体的方法是使电网电压  $u_s$  与 STATCOM 输出电压  $u_c$  之间存在一个较小的相位差  $\delta$ ，相位差  $\delta$  的大小可通过调节 SPWM 中正弦调制波的相角来控制。

为了控制直流电容电压，H 桥逆变单元电容电压的数学表达式为

$$u_{dc}(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_{dc}(t) dt \quad (4)$$

式中： $C$  为电容值； $i_{dc}$  为电容的充放电电流。由式(4)可知，电容电压的变化与电容值和充放电电流有关。一旦电容确定，电容的充放电主要取决于充放电电流  $i_{dc}$ ，而  $i_{dc}$  与 H 桥单元的开关函数  $S_W$  和逆变器交流输出电流  $i$  有关，即

$$i_{dc} = S_W i \quad (5)$$

图 5 为 H 桥逆变单元直流侧电容的充放电原理图。由于逆变器为级联式 H 桥结构，耦合电感有滤波的作用，因此逆变器电流  $i$  近似为正弦波。在

图 5 中，逆变器电流  $i$  超前输出电压  $u_H \pi/2$  时 (STATCOM 工作于容性状态)， $u_{H1}$  为  $u_H$  的基波。  $S_w$  为开关函数，为简单起见，图 5 中使用了基频开关调制方法来说明如何得到电容充放电电流，而本文采用的调制策略为相移式 SPWM，采用两种调制方法时电容的充放电原理是相同的。  $i_{dc}$  为 H 桥直流侧电流，其面积  $A$  与  $B$  大小相等，极性相反，这说明直流电容每半个周波内平均充、放电是对称的，总和为零，这样直流电容电压会保持平衡。但如果正的面积  $A$  与负的面积  $B$  不相等，半个周波内电容的充、放电也不相等，直流电容电压就会增加或降低。因而，电容平均电压可通过移动电流  $i_{dc}$  来控制。而  $i_{dc}$  的移动可通过稍微改变 SPWM 中正弦调制信号的相位来实现。

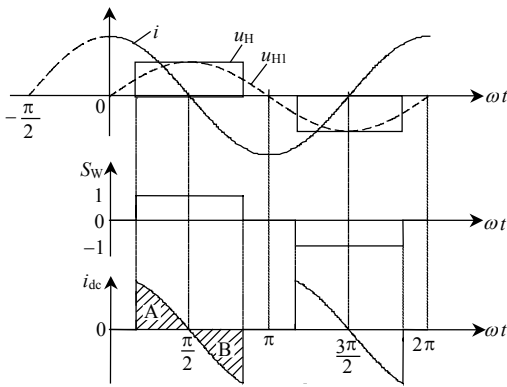


图 5 逆变单元电容的充放电  
Fig. 5 Charging of capacitor in an H-bridge inverter

图 6 为基于七电平级联型 STATCOM 的电容电压平衡控制原理图。图 6 中  $u'_{dc1}$ 、 $u'_{dc2}$ 、 $u'_{dc3}$  分别为经 CVM 获得的直流电容电压， $U_{dc\_ref}$  为直流电压参考值。  $\Delta\delta(j=1,2,3)$  是 SPWM 正弦调制波中为控制电容电压变化所需要的相移，相移的方向 (即  $\Delta\delta$  的正负) 取决于 STATCOM 的运行状态。若 STATCOM 工作在容性状态下，当  $\Delta\delta < 0$ 、 $\Delta\delta > 0$  或  $\Delta\delta = 0$  时，电容电压会增加、减小或不变；若 STATCOM 工作在感性状态下，当  $\Delta\delta > 0$ 、 $\Delta\delta < 0$  或  $\Delta\delta = 0$  时，电容电压会增加、减小或不变。相移的方向由变量  $D$  表示，当 STATCOM 工作在容性、感性或浮动状态时， $D$  分别等于  $-1$ 、 $1$  或  $0$ 。

相移  $\Delta\delta_j$  分别与  $\theta$  (由 PLL 电路得到) 和相角  $\delta$  相加， $\delta$  对所有的直流电压平衡控制回路都是相同的。相角  $\delta$  调节 STATCOM 和电网之间有功率率的交换，以稳定总的直流电压。相移  $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$  和  $\Delta\delta_3$  用来增加或减小  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  单元中电容电流的流

通区间，进而对各直流电压进行平衡控制。3 个正弦调制波的最终相位角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  与逆变器输出电压幅值参考值  $U_c^*$  一起被送入 SPWM 开关调制器，产生开关器件的触发信号。关于功率解耦控制的数学模型和  $U_c^*$  与  $\delta$  的数学表达式参见文献[9]。

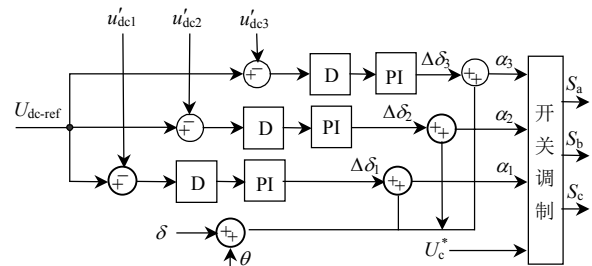


图 6 逆变单元直流电压平衡控制框图  
Fig. 6 Control diagram of individual dc voltages

## 4 仿真与实验

### 4.1 仿真研究

在 Simlink 环境下对  $\pm 50$  Mvar 的 7 电平 STATCOM 系统进行了计算机仿真，给出了系统在  $+50$  Mvar、 $0$ 、 $-50$  Mvar 工况下稳态运行和动态响应的情况。所有仿真波形单位均为标么值 (pu)。

图 7 为 50 Mvar 工况下逆变器输出电压  $u_{ca}$ 、逆变器电流  $i_a$  和直流电压  $u_{dcj}(j=1,2,3)$  的稳态波形。在图 7(a) 中，逆变器电流  $i_a$  超前于电网电压  $u_{sa} \pi/2$ ，则 STATCOM 向电网提供 50 Mvar 的容性无功，图 7(b) 中，各直流电压是平衡的，纹波为 0.05 pu。

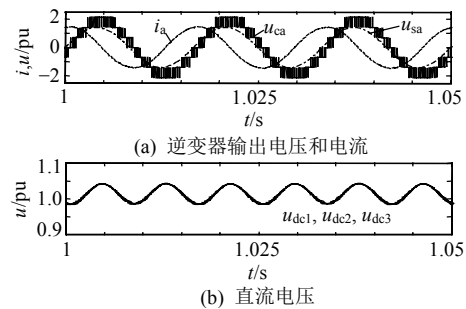


图 7 7 电平 STATCOM 在  $+50$  Mvar 工况下的稳态运行  
Fig. 7 Steady operation of the seven-level STATCOM in the  $+50$  Mvar mode

图 8 给出了 STATCOM 在 0.5 s 时从  $+50$  Mvar 工况到  $-50$  Mvar 工况变化时的动态响应过程，可以看出，逆变器电流  $i_a$  由超前于电网电压  $u_{sa} \pi/2$  到滞后  $\pi/2$  的过程在 1 个周波内完成，结果表明系统具有快速响应能力。同时，在变化过程中各直流电压保持平衡。

由于电网电压不平衡而导致直流电压发生变化的平衡控制如图 9 所示。0.5 s 时，三相电网电压

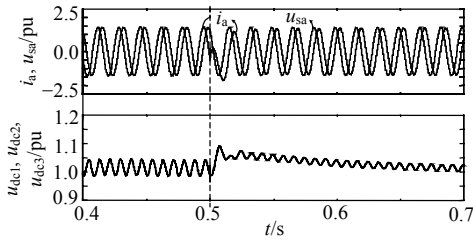


图 8 0.5 s 时由 50 Mvar 到 -50 Mvar 工况变化的动态响应  
Fig. 8 Dynamic response from +50 Mvar mode to -50 Mvar mode at 0.5 s

分别为  $U_{sa}=1.5$  pu、 $U_{sb}=1.87$  pu 和  $U_{sc}=0.4$  pu。图中的直流电压以相为一组，结果表明每相的各逆变单元直流电压均能保持一致，且最终达到三相平衡。

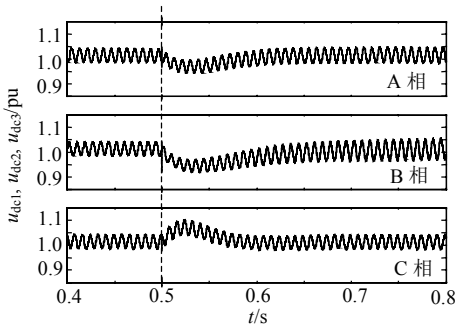


图 9 电网电压不平衡时直流电容电压的平衡控制  
Fig. 9 DC capacitor voltage balance control when the system voltages are unbalanced

4.2 实验结果

图 10 为五电平级联型 STATCOM 物理实验装置的结构框图。级联型逆变器每相采用 2 个 H 桥单元串联，为了保证无功功率的控制精度，每相耦合连接电抗值为 0.18 pu。系统额定电压为 122 V，额定电流为 7 A，补偿容量为  $\pm 1.5$  kvar。控制系统为基于 DSP 的 STATCOM 控制器，完成系统的控制算法、脉冲信号的产生、数据及状态的采集等功能，通过光纤将开关触发信号送到每个逆变单元。

为了验证所提出的直流电压检测方法的准确性和有效性，本文对采用常规方法测得的直流电容

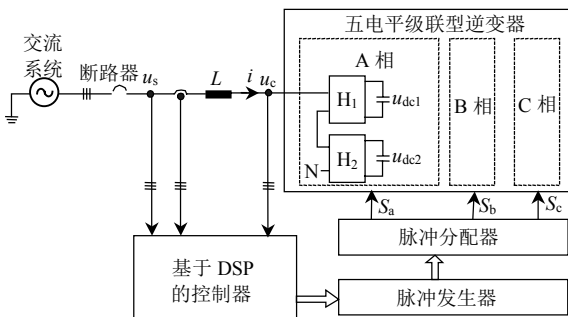


图 10 级联型 STATCOM 实验装置结构框图  
Fig. 10 Experiment setup of cascaded STATCOM

电压与采用 CVM 检测方法得到的直流电压进行了对比实验，由于篇幅有限，仅给出了 A 相第一个单元的对比结果，如图 11 所示。

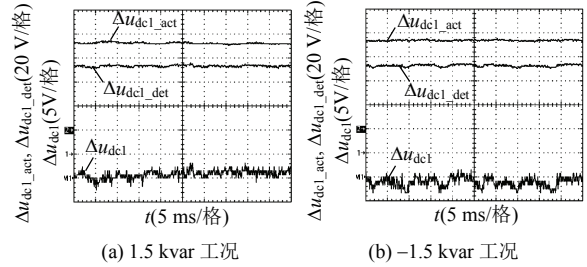


图 11 检测电压和实际电压的对比  
Fig. 11 Comparison of detected and actual dc voltages

在图 11 中，STATCOM 分别工作在 +1.5 kvar 和 -1.5 kvar 工况， $u_{dc1\_act}$  为利用常规传感器测得的直流电压， $u_{dc1\_det}$  为由 CVM 检测出的直流电压，两者的误差为  $\Delta u_{dc1} = u_{dc1\_det} - u_{dc1\_act}$ 。两种方法对比得到的平均误差如表 3 所示，表中 H 桥单元直流电压参考值  $U_{dc\_ref}$  为 75 V。实验结果表明，在整个补偿范围内，由 CVM 方法得到的直流电压平均误差率在 -1.5 kvar 工况下最大，为 2.4%，在工程上是允许的。

表 3 直流电容电压误差分析  
Tab. 3 DC voltages error analysis

工况	+1.5 kvar	-1.5 kvar
平均误差 $ \Delta u_{dc1} /V$	1.2	1.8
平均误差率 $ \Delta u_{dc1} /U_{dc-ref}/\%$	1.6	2.4

为了验证直流电压的平衡控制方法，图 12 给出了在 1.5 kvar 工况下一相各直流电容电压的波形，结果表明，所有 H 桥单元的直流电容电压都保持平衡。

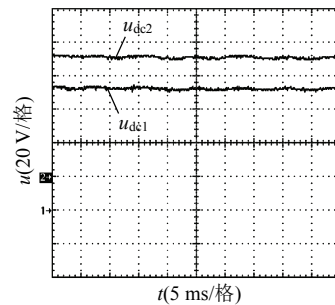


图 12 1.5 kvar 工况下以相为单位的直流电容电压  
Fig. 12 DC voltages of one phase in 1.5 kvar mode

5 结论

本文开发了一种新颖的用于级联型 STATCOM 的直流电压检测方法，只需 3 个传感器测量逆变器的输出电压，即可得到所有 H 桥单元的直流电容电

压, 与常规电压测量方法相比, 大大减少了电压传感器的数量, 具有成本合理、结构简单、系统可靠性高的优势。从工程实现角度考虑, 该方法对级联型逆变器每相的 H 桥单元数量没有限制, 适用于具有更多电平的级联型 STATCOM 系统。本文还提出了直流电压的平衡控制策略, 该方法结合了相移和正弦波脉宽调制技术, 结构简单易于实现。文中所提出方法的正确性和可行性通过计算机仿真和实验得到了验证。

## 参考文献

- [1] Rodriguez J, Lai J S, Peng Fangzheng, Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [2] 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.
- [3] Ying Cheng, Chang Qian, Crow M L, et al. A comparison of diode-clamped and cascaded multilevel converters for a STATCOM with energy storage[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1512-1521.
- [4] 伏祥运, 王建斌, 张小聪, 等. 三相电压源型逆变器级联的静止同步补偿器[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 72-76.  
Fu Xiangyun, Wang Jianze, Zhang Xiaocong, et al. A static synchronous compensator based on three-phase cascaded voltage source inverter[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 72-76(in Chinese).
- [5] 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 voltages of 50 MVA STATCOM based on cascaded multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 145-150(in Chinese).
- [6] Clark H, Robert H. STATCOM controls for operations with unbalanced voltages[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(2): 538-544.
- [7] Peng F Z, Lai J S, McKeever J W, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC source for static var generation[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1996, 32(5): 1130-1138.
- [8] Peng F Z, Lai J S. Dynamic performance and control of a static var generator using cascaded multilevel inverter[J]. IEEE Trans. on Industry Application. 1997, 32(2): 748-754.
- [9] 张晓滨, 钟彦儒. 静止同步补偿器直流侧电压的最优动态分级控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 60-67.  
Zhang Xiaobin, Zhong Yanru. Optimal dynamic hierarchical control of the STATCOM DC side voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 60-67(in Chinese).
- [10] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 7-12.  
Liu Zhao, Liu Bangyin, Duan Shanxu, et al. DC capacitor voltage balancing control for cascade multilevel STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 7-12(in Chinese).
- [11] 张彦魁, 张焰, 卢国良. 基于 PWM 控制及相角控制的静止同步补偿器潮流模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 42-47.  
Zhang Yankui, Zhang Yan, Lu Guoliang. Advanced model of STATCOM based on PWM and phase angle control for load flow and voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 42-47 (in Chinese).
- [12] Liu Yu, Huang A Q. Song Wenchao, et al. Small-signal model-based control strategy for balancing individual dc capacitor voltages in cascade multilevel inverter-based STATCOM[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2259-2269.
- [13] Yang Xingwu, Jiang Jianguo, Liu Shichao. A novel design approach of dc voltage balancing controller for cascaded H-bridge converter-based STATCOM[C]//IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. IEEE, 2009: 2359-2364.
- [14] 陈兴华, 朱长胜, 王海龙, 等. H 桥级联 STATCOM 的控制策略及仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 119-122.  
Chen Xinghua, Zhu Changsheng, Wang Hailong, et al. Control method and simulation of STATCOM based on cascaded H-bridge [J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 119-122(in Chinese).
- [15] 武晓梅, 严干贵. 基于级联式电压源逆变器的静止同步补偿器直流电压控制策略[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 49-53.  
Wu Xiaomei, Yan Guigan. Control strategy of DC capacitor voltage of static synchronous compensator based on cascaded multilevel voltage source inverter[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 49-53(in Chinese).



李一丹

收稿日期: 2010-11-04。

作者简介:

李一丹(1964), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子与柔性交流输电, yidan2cn@yahoo.com;

卢文生(1967), 男, 学士, 教授, 研究方向为电力电子与电气传动;

彭秀艳(1962), 女, 博士, 教授, 研究方向为控制系统建模与控制方法研究;

郭明良(1975), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统。

(责任编辑 吕鲜艳)