

链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制策略

姚钢^{1,2}, 方瑞丰¹, 李东东¹, 周荔丹²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 直流侧电容电压平衡是链式静止同步补偿器安全稳定运行的前提。针对直流电容电压不平衡现象做出分析, 提出了一种叠加有功电压矢量的直流电容电压平衡控制策略。通过上下层分层控制和叠加有功电压矢量调整控制信号, 使得有功功率能按需分配以弥补各级联模块间损耗的差异。上层控制通过解耦实现总体有功、无功功率控制, 下层控制通过叠加有功电压矢量实现电容电压平衡控制。该策略物理意义明确、算法简洁、与其他控制量无耦合。通过基于 Matlab 的时域仿真和实验证明了该策略的正确性、有效性和可行性。

关键词: 静止同步补偿器; 直流电容电压平衡; 有功电压矢量叠加; 分层控制; 级联多电平

DC capacitor voltage balancing control of cascaded static synchronous compensator

YAO Gang^{1,2}, FANG Ruifeng¹, LI Dongdong¹, ZHOU Lidan²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: DC capacitor voltage balance is the prerequisite for the safe and stable operation of static synchronous compensator (STATCOM). After analyzing the phenomenon of imbalance of DC capacitor voltage of cascaded static synchronous compensator, a method based on active power vector addition is presented to solve this problem. Through adding active power voltage vector and hierarchical control (the upper and the lower control), control signals can be adjusted and active power can be distributed on demands to supply the loss difference among the cascaded modules. The upper control realizes the whole active and reactive power control by decoupling, the lower control realizes voltage balancing control by adding active power voltage vector. The tactic is clear of physics meaning, simple of algorithm and few coupling among control signals. Simulation results based on Matlab/Simulink and experimental results verify that the presented tactic is correct, effective and workable.

Key words: static synchronous compensator; DC capacitor voltage balancing control; active power voltage vector addition; hierarchical control; cascaded multilevel

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)18-0023-08

0 引言

链式静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)是一种能够发出或吸收无功的并接在电网上的无功补偿装置, 相对于传统的变压器多重化结构的 STATCOM, 由于具有无需变压器接入、占地面积小、可控性高、能冗余运行等优点而得到日益广泛的研究与应用^[1-3]。

链式 STATCOM 直流侧电容彼此相互独立, 每个模块间的串并联损耗、开关损耗、触发延时等又

存在差异, 致使链式 STATCOM 直流侧电容电压不平衡的问题, 进而导致 STATCOM 输出电压畸变率变高。电压不平衡严重时还会威胁装置的安全运行, 因此直流侧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。

目前已有的直流电容电压控制策略可归为两类: 一类是通过外部的平衡控制电路或称硬件策略来实现, 另一类是通过自身的平衡控制算法或称软件策略来实现。硬件策略方面, 文献[1]提出了基于交流母线能量交换的电容电压平衡方法; 文献[2]提

出了基于直流母线能量交换的电压平衡方法。外部平衡控制电路方法会增加额外的装置成本，电路的设计也更为复杂，系统的可靠性会降低，对控制的要求也更高。软件策略方面，文献[3]提出的平衡控制算法控制器参数多，设计复杂，实现起来比较困难；文献[4]采用脉冲轮换控制各个逆变单元的输出电压相角的方法控制直流电压平衡；文献[5]提出了一种叠加有功电压矢量的电容电压平衡控制策略，但存在算法复杂的不足；文献[6]对常见的平衡控制策略做出了系统的总结归纳及评价。

本文在文献[5]基础上提出另一种非常简明的叠加有功电压矢量的电容电压平衡控制策略。该策略的物理意义明确，算法简洁，不需增加外部平衡控制电路，与其他控制量无耦合，系统稳定性高。最后通过 8 级联 STATCOM 的时域仿真和搭建 3 级联的实验平台验证了该平衡控制算法的正确性。

1 STATCOM 的结构和无功补偿原理

STATCOM 的基本原理就是将自换相桥式电路通过电抗器或者直接并联在电网上，适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值，或者直接控制其交流侧电流，就可以使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流，实现动态无功补偿的目的。当仅考虑基波频率时，STATCOM 可以等效地视为幅值和相位均可以控制的一个与电网同频率的交流电压源^[2,7-8]，图 1 为单相 STATCOM 的等效电路图。

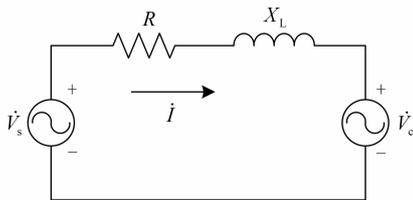


图 1 单相 STATCOM 等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of single-phase STATCOM

图 1 中， V_s 为电网电压， V_c 为 STATCOM 输出电压， I 为系统注入 STATCOM 的电流；STATCOM 装置等效损耗用 R 表示， X_L 为 STATCOM 等效电抗，且 $X_L=j\omega L$ ， ω 为系统角频率， L 为等效电感，由图 1 可得

$$\dot{V}_s = R\dot{I} + X_L\dot{I} + \dot{V}_c \quad (1)$$

图 2 表示了 STATCOM 的两种不同工作状态：

(a) 当 $|V_s| > |V_c|$ 时，变换器从电网吸收感性(滞后)电流，相当于向电网提供感性无功功率；

(b) 当 $|V_s| < |V_c|$ 时，变换器从电网吸收容性(超前)电流，相当于向电网提供容性无功功率^[9]。本文为

统一起见，假设所有的讨论都是基于 STATCOM 工作在容性工况下。

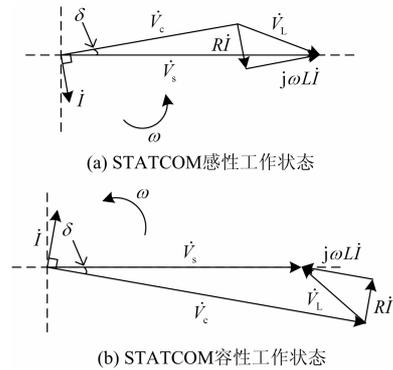


图 2 STATCOM 的工作状态

Fig. 2 Operative mode of STATCOM

图 3 为链式 STATCOM 的系统结构图，采用星型连接方式并入电网，图中电阻和电感为等效装置损耗和连接电抗，电流的参考方向如图所示。

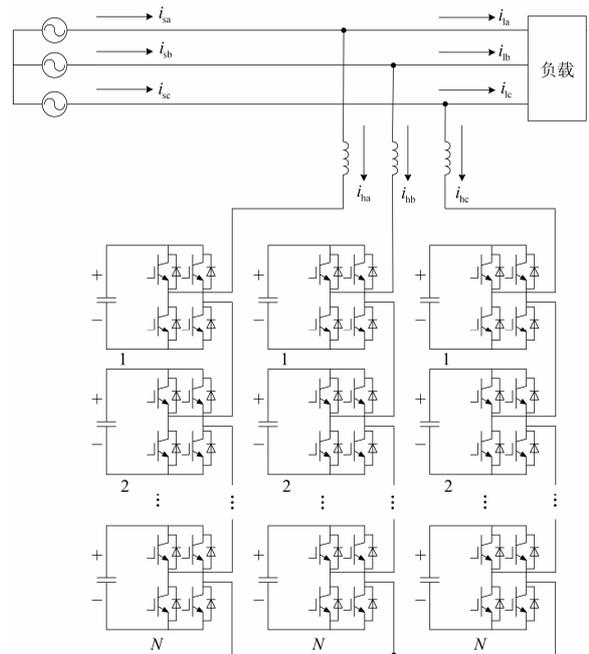


图 3 链式 STATCOM 系统结构

Fig. 3 System structure of chained STATCOM

采用直接电流控制的 STATCOM 装置反馈解耦控制策略的控制框图^[8]如图 4 所示。

文献[6]总结了从控制变量角度分类，对直流电容电压控制的策略；文献[8]指出为不影响 STATCOM 的快速响应性，应保持直流侧电容电压为常数，改变调制比 M 和相位角 α 使 STATCOM 输出的无功功率连续可调。本文采用上、下层分层控制实现直流电容电压平衡控制。将通过反馈解耦控制计算出调制

比 M 和相位角 α 的控制策略称为上层控制, 将通过平衡控制算法计算出调制比 M_i 和相位角 α_i 的控制策略称为下层控制。若无平衡控制算法, 则所有级联模块直接使用 M 、 α ; 添加了平衡控制算法后的各个模块使用各自相应的 M_i 、 α_i 。

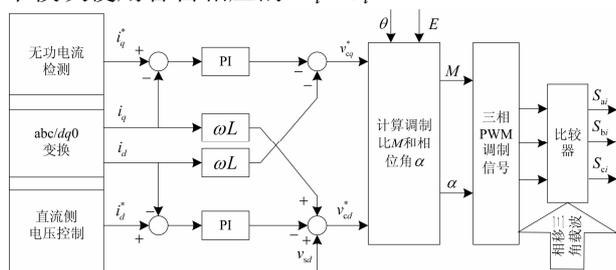


图 4 STATCOM 反馈解耦控制

Fig. 4 Feedback decoupling control of STATCOM

图 4 中, 检测负载无功电流作为无功电流的指令值 i_q^* , 检测直流侧电容电压偏差作为有功电流指令值 i_d^* , 检测 STATCOM 输出电流并作 abc/dq0 变换作为有功、无功电流反馈值。 S_{xi} 为链式模块触发脉冲($x=a,b,c; i=1,2,3,\dots$)。

2 直流侧电容电压平衡控制

2.1 有功电压矢量叠加的平衡控制原理

直流侧电容电压平衡控制的本质是实现链节间的有功合理分配, 必须满足: 1) 平衡算法自身是稳定的; 2) 平衡算法不影响上层控制, 与上层控制无耦合关系。基于有功电压矢量叠加的平衡控制的基本思想是: 对于 N 级联的逆变器, 首先分别检测前 $N-1$ 个电容电压并做逻辑判断, 若电压大于给定值, 则叠加一个与电流反相的有功电压矢量, 让电压过高的电容发出一定的有功功率使之电压下降; 同理, 若电压小于给定值, 则叠加一个与电流同相的有功电压矢量, 让电压偏低的电容吸收一定的有功功率使之电压回升^[10-11]。

图 5 为 STATCOM 容性工况下的相量图, STATCOM 输出电压在电容电压平衡的条件下, 根据上层控制策略计算出来的调制比 M 和相位角 α , 有

$$V_c = N \cdot ME \quad (2)$$

式中: N 为级联数; M 为调制比; E 为直流电容电压。在不加电容电压平衡控制策略的情况下, 所有模块的调制比 M 和相位角 α 相同, 即每一个模块的输出电压与 STATCOM 输出电压同相。

由于直流侧损耗存在差异, 如不采取有效的直流侧电容电压平衡策略, 则电容电压的不平衡度、差异会逐步增大, 一则输出的电压波形畸变率变高, 二则电压偏低得会越来越低, 电压偏高得会越来越, 不平衡度严重时还会进一步威胁装置的稳定性。

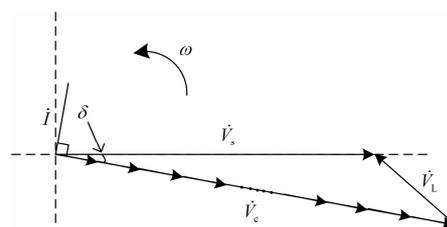


图 5 STATCOM 容性工况相量图

Fig. 5 Vector diagram of STATCOM

由于视为系统提供 STATCOM 装置的损耗, 则认为 STATCOM 与系统之间只有无功功率的交换, 并从系统吸收少量的有功补充其装置损耗^[12-13]。而基于有功电压矢量叠加的电容电压平衡控制策略可具体解释为: 检测各个模块电容电压, 当某一模块电压偏高时, 则在该电压上叠加一与电流反相的电压相量, 即可视为该模块发出一定有功功率, 从而使电容电压下降; 同理, 当某一模块电压偏低时, 则在该电压上叠加一与电流同相的电压相量, 即可视为该模块吸收一定的有功功率, 从而使电容电压回升; 为了达到前文提及的 STATCOM 装置仅从系统侧吸收部分有功功率补充装置损耗而不是像无功功率那样周期性交换的要求, 在算法上做如下设置: 第 N 个模块叠加的电压矢量为前 $N-1$ 个模块的矢量和取反, 则可实现有功功率在各模块之间平均分配而与系统侧无周期性有功功率交换, 即下层电容电压平衡控制策略与上层控制策略无耦合, 不会影响上层控制策略^[14-15]。经过这样的平衡控制算法, 则每个模块使用不同的调制比 M_i 和相位角 α_i , 此时每个模块输出的电压和 STATCOM 的输出电压不同相, 之间有一定的相角差, 如图 6 所示。

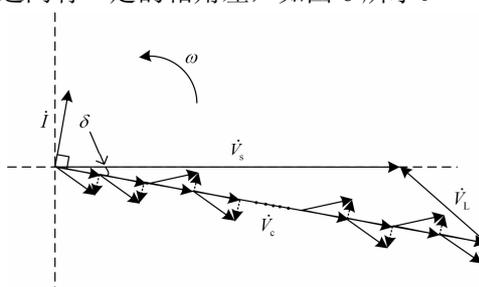


图 6 叠加以有功电压矢量的模块输出电压

Fig. 6 Output voltage of each module after active voltage addition

当电容电压有偏差, 每个模块叠加了一电压有功矢量后, 从相量图上看, 电流与每个模块输出电压之间不再是 90° 的相角差, 而是大于或小于该角度。从能量的交换角度来看, 各个模块将会与系统

是趋于上层控制计算出来的调制比和相位角, 即 $M_i \rightarrow M$, $\alpha_i \rightarrow \alpha$, 这说明了基于有功电压矢量的控制方法是可靠的、稳定的。

3 实验、仿真及分析

3.1 基于 Matlab/Simulink 的时域仿真

系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the system	
参数	数值
系统电压	10 kV
系统频率	50 Hz
连接电抗	2.6 mH
参考电压	1 200 V
电容大小	5 000 μF
级联数	8

在未加电容电压平衡控制时得到的 A 相 8 个模块电容电压的瞬时值如图 9 所示。

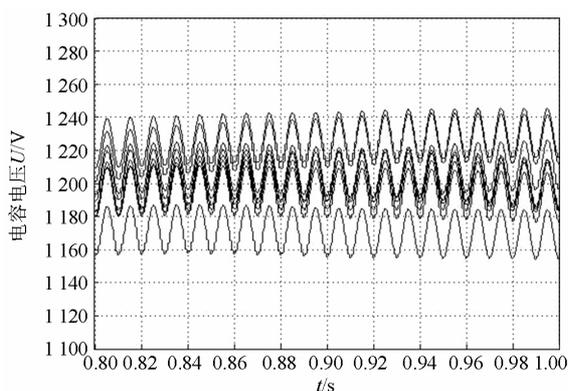


图 9 未加平衡控制的电容电压瞬时值

Fig. 9 Instantaneous value of capacitor voltage without voltage balancing control

可见, A 相 8 个模块电容电压最高的模块达到 1 230 V, 而最低模块的电压只有 1 170 V, 最高与最低电压的电压差达到 60 V, 不平衡度非常明显。

添加了有功电压矢量平衡控制算法后的各个模块的电容电压瞬时值如图 10 所示。

可见, 经电容电压平衡控制后, 所有模块电容电压波形的瞬时值都非常紧密地集中在一起, 且电压最高的有下降并趋于参考电压的趋势, 电压最低的有升高并趋于参考电压的趋势。显而易见, 此时电压的不平衡度非常小, 可忽略不计。

图 11 所示的是各个模块输出电压与 STATCOM 装置输出电压之间的相角差 β_i , 这里选取了 A 相模块一、三、五的相角差作分析。

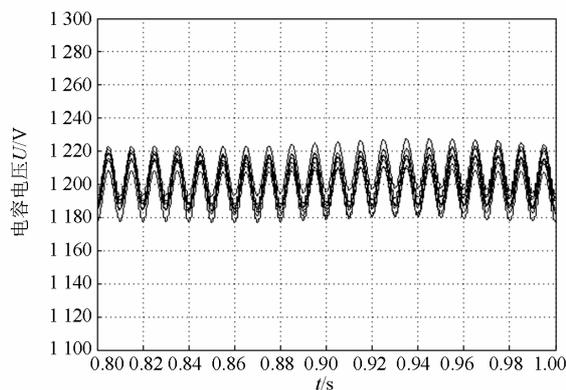


图 10 平衡控制下的电容电压瞬时值

Fig. 10 Instantaneous value of capacitor voltage with voltage balancing control

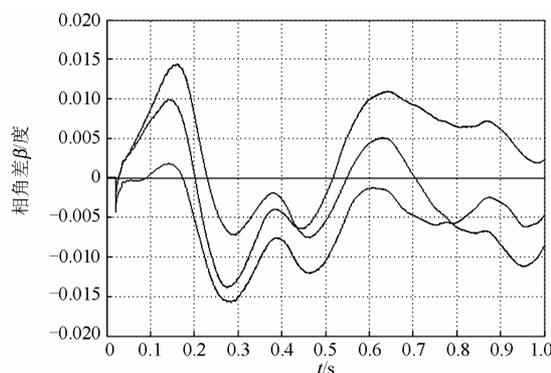


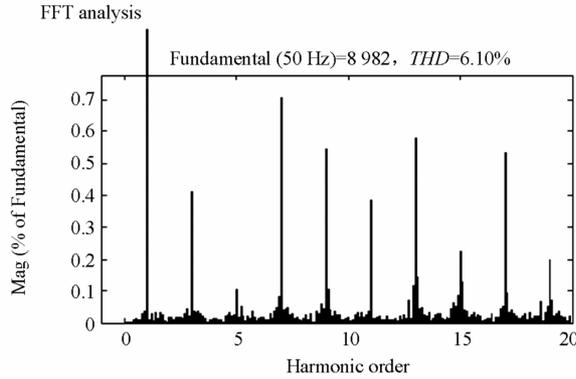
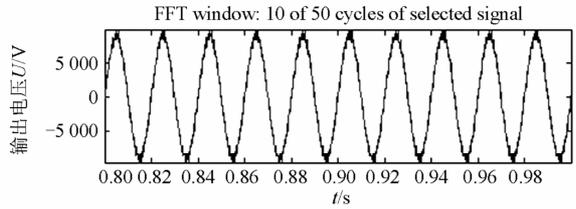
图 11 模块输出电压与 STATCOM 输出电压相角差

Fig. 11 Phase angle difference of output voltage between modules and STATCOM

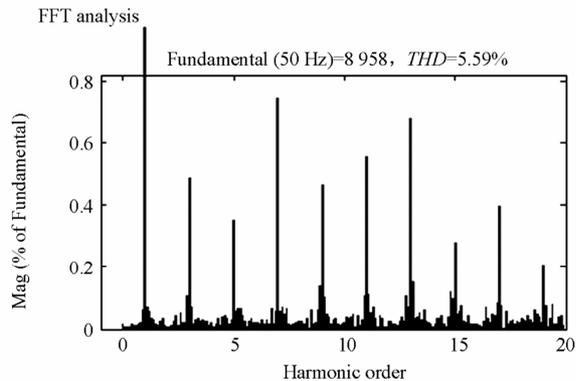
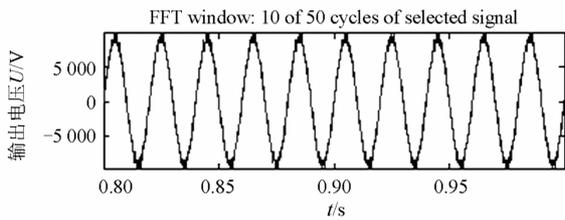
在实际运行中, 系统电压与 STATCOM 输出电压之间的夹角, 称为功角 δ , 一般 $\delta \in (0.1^\circ, 1^\circ)$, 图 11 中所示的曲线为 A 相模块一、三、五的输出电压与 STATCOM 输出电压之间的相角差 β , 可见 $\beta \in (-0.02^\circ, 0.02^\circ)$ 且小于功角 δ , 这意味着 β 角只是在电压偏离参考值时对功角的修正, 一旦电压出现偏差, 则平衡控制策略马上能跟踪到并做出调整, 给出 β 的控制信号, 所以 β 能维持在很小的范围内且可以看作是对功角 δ 的微调。这里同样证明了本文提出的有功电压矢量控制算法是可靠的、稳定的。

图 12(a)和图 12(b)分别是无电容电压平衡控制和有电容电压平衡控制算法下 A 相电压输出 PWM 波的傅里叶分析, 可以看到, 没有平衡控制算法下电压的畸变率达到了 6.10%, 而有平衡控制算法下电压的畸变率下降到了 5.59%。

有无电压平衡控制算法对电容电压和输出电压的影响如表 2 所示。



(a) 无平衡控制的A相输出电压PWM波



(b) 平衡控制下的A相输出电压PWM波

图 12 A 相输出电压 FFT 分析

Fig. 12 FFT analysis of phase A output voltage

表 2 直流电容电压对比

Table 2 Comparison of DC capacitor voltage

	输出电压 THD	最高电压/V	最低电压/V
无平衡控制	6.10%	1 230	1 170
有平衡控制	5.59%	1 202	1 200

3.2 实验结果

在此基础上, 受实验条件限制, 研制了级联数为 3 的链式 STATCOM, 实验系统结构如图 3 所示,

实验参数如表 3 所示。

表 3 实验参数

Table 3 Parameters of the system

参数	数值
系统电压	220 V
系统频率	50 Hz
连接电抗	0.05 mH
无功指令电流	30 A
参考电压	180 V
电容大小	5 600 μ F
级联数	3

图 13 所示为无平衡控制策略下的直流侧电容电压, 图 14 所示为平衡控制策略下直流侧电容电压及 STATCOM 输出电压、电流。

为了观察到电容电压的具体变化, 在仿真中将电容大小设定为相对电压等级较小的值, 为 5 000 μ F; 为了提高直流侧稳定性, 在实验中将电容大小

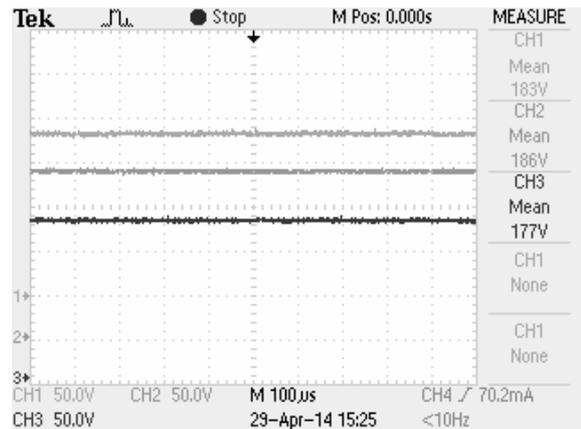
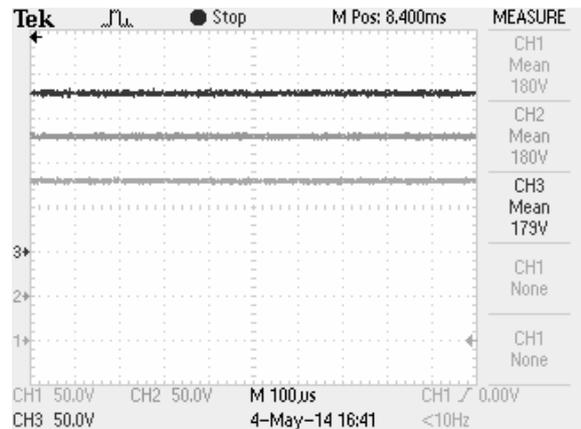
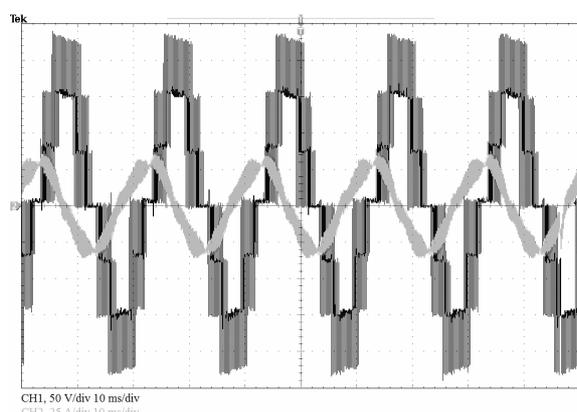


图 13 无平衡控制下的直流电容电压

Fig. 13 Capacitor voltage without balancing control



(a) 直流侧电容电压



(b) STATCOM 输出电压、电流

图 14 平衡控制下电容电压及 STATCOM 输出电压、电流

Fig. 14 Capacitor voltage, output voltage and current of STATCOM with balancing control

设定为相对电压等级较大的值, 为 $5\ 600\ \mu\text{F}$ 。由于电容电压脉动的幅值与电容大小成反比且仿真和实验中的电压等级分别为 $10\ \text{kV}$ 和 $220\ \text{V}$, 所以在仿真中电容电压有明显的 2 倍频脉动而实验波形中几乎观测不出电压的脉动。

可见, 在没有平衡控制的情况下, 最高电压高达 $186\ \text{V}$ 且最低电压跌落至 $177\ \text{V}$, 相对来说, $9\ \text{V}$ 的电压差是不可接受的; 经过平衡控制, 电容电压都保持在给定值附近且最高电压 ($180\ \text{V}$) 与最低电压 ($179\ \text{V}$) 间的电压差仅 $1\ \text{V}$, 其影响可忽略不计。实验的结果亦证明了本文提出的算法的有效性和可行性。

4 结论

通过对叠加有功电压矢量进行电容电压平衡控制算法的证明, 推导出了各模块独立使用的调制比和相位角 M_i 、 α_i , 并通过仿真证明了该算法的有效性, 对仿真结果的分析证明了该算法的可靠性和稳定性。本文提出的直流电容电压平衡控制策略简单有效易于实行, 具有一定的参考价值 and 实际应用价值。同时, 本文提出的算法亦有不足之处: 每增加一个级联模块需要单独计算该模块使用的调制比和相位角, 三相的总和就是新增 6 个计算量, 并且需计算较多的中间变量。这些计算量的引入在实验中对 DSP 控制器的计算速度和精度都有一定的要求。如何简化计算、减少计算量也是本文后续工作中所需要提高的地方。

参考文献

[1] JON A B, LUIS M. Individual voltage balancing strategy for PWM cascaded H-Bridge converter-based

STATCOM[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 21-29.

[2] 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 cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 145-150.

[3] 李圣清, 徐文祥, 栗伟周, 等. 风电场中级联 STATCOM 直流侧电压控制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 248-253.

LI Shengqing, XU Wenxiang, LI Weizhou, et al. DC capacitor voltage balancing control for cascade STATCOM in wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 248-253.

[4] 杜少通, 杨擎, 汪山林, 等. 五电平 H 桥级联型 STATCOM 脉冲轮换控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 43(21): 17-22.

DU Shaotong, YANG Qing, WANG Shanlin, et al. Novel control method for DC voltage balancing in cascaded-SVG[J]. Power System Protection and Control, 2014, 43(21): 17-22.

[5] 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.

[6] 臧春艳, 裴振江, 何俊佳, 等. 链式 STATCOM 直流侧电容电压控制策略研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 17-21.

ZANG Chunyan, PEI Zhenjiang, HE Junjia, et al. Research on DC-link capacitor voltage control strategies of the cascaded STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 17-21.

[7] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.

YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.

[8] 许湘莲. 基于级联多电平逆变器的 STATCOM 及其控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

- XU Xianglian. Research on cascaded multilevel inverter based STATCOM and its control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006.
- [9] 任明炜, 孙玉坤, 饶翔. 十一电平链式 STATCOM 直流电容电压平衡控制研究[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 10-15.
- REN Mingwei, SUN Yukun, RAO Xiang. Voltage balance control of DC capacitors of 11-level cascade STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 10-15.
- [10] 张国澎. 级联 H 桥整流及其直流侧电容电压平衡控制的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- ZHANG Guopeng. Research on cascaded H-Bridge rectifier stage and balance control for DC-link capacitor voltages[D]. Xuzhou: China University of Mining Technology, 2012.
- [11] 周圆. 链式 STATCOM 直流侧电压控制方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- ZHOU Yuan. A study on DC capacitor voltage control strategy of cascade STATCOM[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [12] 毛彦辉, 夏明超, 李晓亮, 等. 负载不平衡下 D-STATCOM 控制策略的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 132-139.
- MAO Yanhui, XIA Mingchao, LI Xiaoliang, et al. Simulation study of the control strategy of D-STATCOM in compensating unbalance load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 132-139.
- [13] 刘正富, 徐政, 刘为群. 基于改进载波相移 SPWM 的链式 STATCOM 电容电压平衡控制策略[J]. 高压电器, 2012, 48(12): 54-58.
- LIU Zhengfu, XU Zheng, LIU Weiqun. Novel strategy of capacitor voltage balancing control for cascaded STATCOM based on advanced carrier phase shifting SPWM[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 54-58.
- [14] 李一丹, 卢文生, 彭秀艳, 等. 级联型静止同步补偿器的直流电压检测及控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 14-19.
- LI Yidan, LU Wensheng, PENG Xiuyan, et al. DC voltage measurement and control for cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 14-19.
- [15] 于飞, 李梅航, 陈朋, 等. 基于 MMC 的 STATCOM 直流侧电压均衡控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 43(11): 130-135.
- YU Fei, LI Meihang, CHEN Peng, et al. Balancing control method of DC voltage of cascaded H-bridge STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 43(11): 130-135.

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-04-01

作者简介:

姚 钢(1977-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

方瑞丰(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大功率电力电子变换技术在电力系统中的应用;

李东东(1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能用电、风力发电与电力系统稳定控制。

(编辑 魏小丽)