

五电平 H 桥级联型 STATCOM 脉冲轮换控制策略研究

杜少通, 杨擎, 汪山林, 周娟

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为改善采用载波同相层叠调制策略时五电平 H 桥级联型静止同步补偿器 (Static synchronous compensator, STATCOM) 输出电流的波形质量, 提出一种直流侧电压平衡控制策略。基于 STATCOM 的控制原理阐述载波层叠调制策略下脉冲周期轮换的方法, 分析脉冲轮换时序对各单元直流侧电压的影响, 推导占空比变化量与各单元吸收功率的关系。以此为基础改进了脉冲轮换控制策略, 该策略在脉冲周期轮换的基础上通过调整脉冲轮换时序的占空比来维持各单元直流侧电压平衡。通过对改进前后脉冲轮换控制策略仿真分析, 结果表明改进的脉冲轮换控制策略能够有效地平衡直流侧电容电压。

关键词: H 桥级联; 静止同步补偿器; 直流侧电压平衡; 载波层叠; 五电平

Research on pulse rotation control strategy for 5-level cascaded H-bridge STATCOM

DU Shao-tong, YANG Qing, WANG Shan-lin, ZHOU Juan

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to improve current quality of the 5-level cascaded H-bridge static synchronous compensator (STATCOM) based on carrier phase disposition pulse width modulation (PD-PWM), a control strategy aiming to balance the DC voltage is proposed. The STATCOM control system and the method of pulse cycle rotation based on PD-PWM are described. The influence that the pulse rotation time sequence exerts on DC side voltage of each H-bridge module is analyzed. Relation between duty ratio of the pulse rotation time sequence and positive power absorbed by the H-bridge module is deduced. Based on this, an improved pulse rotation control strategy which can adjust the duty ratio of pulse rotation time sequence to balance the DC side voltage of each H-bridge module is put forward. The simulations of the pulse cycle rotation and the improved strategy are analyzed based on STATCOM system. The simulation results verify the validity of the improved strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51037004 and No. 51407184).

Key words: H-bridge cascade; static synchronous compensator; DC voltage balance; carrier disposition; 5-level

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0017-06

0 引言

1976 年美国学者 L. Gyugyi 提出用电力半导体器件进行无功补偿以来, 静止同步补偿器 (Static synchronous compensator, STATCOM) 在最近的 30 年得到快速发展, 从带耦合变压器的多重化逆变器到无耦合变压器的多电平逆变器, H 桥级联型逆变器以其无可比拟的优点成为当前无功补偿领域的研究热点^[1-5]。工业生产中配电网电压等级较多, 如我国煤矿生产配电网中存在 1140 V 和 3300 V 电压等级, 依据目前电力电子器件的发展水平, 五电平 STATCOM

在工业配电网中具有一定的应用范围。

脉宽调制 (Pulse width modulation, PWM) 技术是 H 桥级联型 STATCOM 的核心技术, 它关系到 STATCOM 输出电压的谐波特性、直流侧电容电压的平衡及功率器件开关次数的均衡^[6-7]。基于载波的正弦 PWM (Sinusoidal PWM, SPWM) 控制实现方法简单, 响应速度快, 在 H 桥级联型变流器中有广泛的应用。根据载波的空间位置不同, SPWM 调制可分为载波相移 (Carrier phase-shift SPWM, CPS-SPWM) 与载波层叠 (Carrier disposition SPWM, CD-SPWM)。CPS-SPWM 能够在较低的开关频率下获得较好的输出电压谐波特性, 自然实现功率器件开关次数的均衡分配, 但三角载波相位的差异会造

基金项目: 国家自然科学基金 (51037004, 51407184)

成各单元吸收有功功率不等,影响直流侧电压的均衡^[8];载波同相层叠调制(Phase disposition PWM, PD-PWM)具有优秀的线电压消谐特性^[9],但该方法存在H桥单元间功率器件开关状态不均衡的固有缺陷,同样会导致直流侧电压不均衡。

针对此问题,文献[10-11]通过外部电路来实现直流侧电容电压平衡,该方法可以简化平衡控制算法,但大大增加了系统的成本,也增加了系统的负担。文献[12]提出通过交换冗余开关状态的直流侧电压平衡控制策略,该方法能够在不影响上层控制的前提下完成对直流侧电容电压的控制。文献[9]提出通过脉冲循环实现H桥级联型变流器各单元负载均衡,但如果考虑到STATCOM实际元件参数、逆变桥损耗等并联损耗差异,文献[9]所提出方法不能有效的控制直流侧电压平衡。

本文以PD-PWM为基础,介绍H桥级联型STATCOM的控制原理,阐述脉冲周期轮换的实现方法和平衡直流侧电压的局限性;分析脉冲轮换时序改变对直流侧电压的影响,推导轮换时序占空比变化量所能控制功率流动的范围并给出相对应的控制方法;通过搭建仿真模型对该平衡策略进行仿真验证。

1 H桥级联型STATCOM控制系统

H桥级联型STATCOM控制框图如图1所示。图1中 U_{dc} 为单元直流侧电容电压给定值, \bar{u}_{dc} 为三相直流侧电容电压的平均值, i_d 为STATCOM电流的有功分量, i_q 为无功分量, u_a 、 u_b 、 u_c 为电流环控制输出。H桥单元直流侧电容电压均衡控制的目的是在不影响电流内环控制的基础上实现装置各单元有功功率的按需分配,以均衡各单元直流侧电容电压。

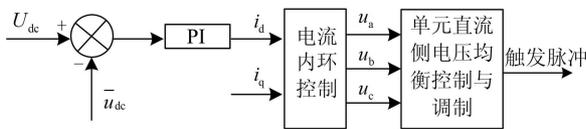
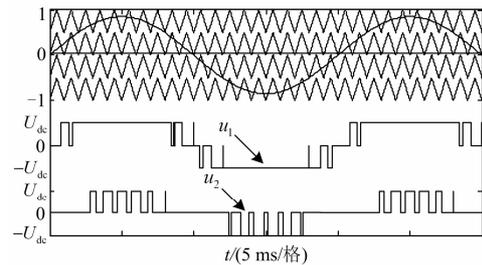


图1 H桥级联型STATCOM控制框图
Fig. 1 Control diagram of cascaded H-bridge STATCOM

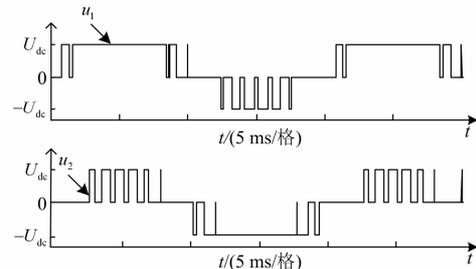
2 载波层叠调制与脉冲周期轮换

五电平载波同相层叠调制原理如图2(a)所示。为了便于理论分析,假设为理想情况,各单元直流侧电容电压近似为给定值,图2(a)中 u_1 、 u_2 分别为单元1和单元2输出电压。H桥级联型变流器通过四列载波纵向叠加后与调制波比较来获得各H桥单元的输出电平状态。由图2(a)可知各单元功率器件

开关状态不均衡,这是载波层叠的固有缺陷。针对H桥级联型多电平逆变器,可采用脉冲周期轮换的方法使得各单元在若干周期内达到平衡^[9]。现将图2(a)中两个单元的脉冲每间隔1/2调制波周期进行一次交换,各H桥单元理想电平状态如图2(b)所示。由图2(b)可知每个调制波周期内两个单元的开关状态可达到均衡。



(a) 载波层叠调制原理图



(b) 理想电平状态周期性轮换波形

图2 载波同相层叠调制原理图及脉冲周期轮换波形

Fig. 2 Principle diagram of the PD-PWM and waveforms of pulse cycle rotation

该调制策略应用于H桥级联型STATCOM时,输出脉冲的周期轮换只能实现有功功率的平均分配,当各单元由参数差异及并联损耗、混合损耗^[13-14]造成有功功率需求不均时,该方法则难以实现对各单元有功功率的按需分配,进而影响装置的性能及运行。

3 改进的脉冲轮换控制策略

3.1 脉冲轮换时序对单元直流侧电容电压的影响分析

以静止同步补偿器向电网输出超前无功电流为例,调制波电压和STATCOM输出电流如图3所示,图3中 u 为调制波电压, i 为STATCOM输出电流,电流 i 超前 u 的弧度为 φ 且 $\theta+\varphi=\pi/2$ 。选取基准轮换周期为调制波周期的1/2,则输出电平状态与图2(b)相对应,两单元直流侧电容电压的充放电区域如图3所示,图2(b)中 u_1 和 u_2 在半个周期内输出PWM波不同,故图3中用不同图例表示其充放电区域。图3中, $flag_1$ 、 $flag_2$ 分别为单元1和单元2电容充放电示意图, g_1 、 g_2 分别为单元1和单元2电平状态轮换时序,该时序与调制波同步。结合图3以 g_1 为例说明电平状态轮换时序的占空比对各单

元直流侧电容电压的影响: 当 g_1 基准占空比 $D_{on}^0 = 50\%$ 时, 两单元在一个调制波周期内充放电相等; 如果下降沿 x_1 右移, 即一个周期内 g_1 占空比 D_{on} 增大, 单元 1 在一个调制波周期内充电时间增长, x_1 右移范围为 $\theta + \pi/2$; 如果上升沿 x_2 右移, 即 D_{on} 减小, 单元 1 充电时间缩短, x_2 右移范围为 $\theta + \pi/2$ 。现统一采用右移方式调整各单元直流侧电容充放电时间, 则在一定范围内, 增大 D_{on} 使单元 1 直流侧电容电压升高, 减小 D_{on} 会使单元 1 直流侧电容电压降低。若 STATCOM 向电网输出滞后无功电流, 则变换规则相反。由此可知, 合理调整占空比可控制各单元直流侧电压达到平衡。

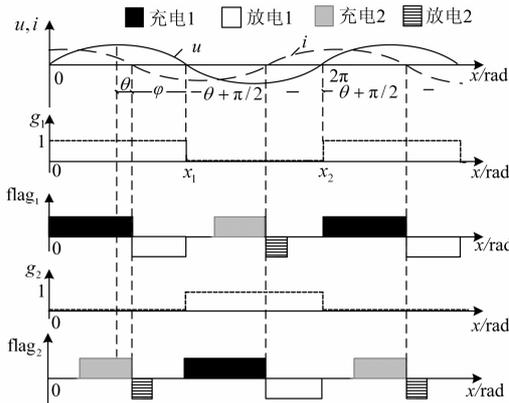


图 3 各单元直流侧电容充放电区域示意图

Fig. 3 Charging and discharging regions of each module DC side capacitor

3.2 脉冲轮换时序占空比与各单元功率关系分析

假设调制波电压与变流器输出电流分别为

$$u(t) = 2MU_{dc} \sin \omega t \quad (1)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中: M 为调制比; I_m 为变流器输出电流峰值; φ 同图 3 为电流与调制波电压相角。

由 3.1 节分析并结合图 3, 可得占空比变化量 ΔD_{on} 与脉冲轮换时序 g_1 关系如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta D_{on} \geq 0 & g_1 \text{ 下降沿右移} \\ \Delta D_{on} < 0 & g_1 \text{ 上升沿右移} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta D_{on} \in \left(-\frac{1}{4} - \frac{\theta}{2\pi}, \frac{1}{4} + \frac{\theta}{2\pi}\right)$$

以开关频率周期求平均值模型, 单元 1 输出电压近似等效为其调制波电压^[15]。在一个调制波周期内, g_1 占空比为 $D_{on}^0 = 50\%$ 时, 单元 1 调制波波形示意图如图 4 所示。图 4 中 $u_{m1}(t)$ 为基准单元 1 输出调制波, $t_1 = \arcsin[1/(2M)]/\omega$, 选取的基准轮换周期与 3.1 节一致。

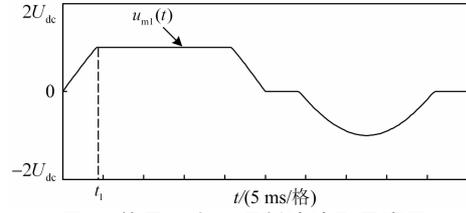


图 4 单元 1 电压调制波波形示意图

Fig. 4 Schematic diagram of voltage modulation waveform for the module 1

单元 1 在一个调制波周期内实际吸收功率为

$$\langle P_1 \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T u_{m1}(t) \cdot i(t) dt \quad (4)$$

式中: T 为调制波周期。将 $u_{m1}(t)$ 与 $i(t)$ 代入式(4), 得到单元 1 实际吸收功率与 ΔD_{on} 的关系为

当 $0 < \Delta D_{on} < \frac{t_1}{T}$ 时:

$$\langle P_1 \rangle_T = -\frac{MU_{dc} I_m}{T} \left\{ \frac{1}{2\omega} [\sin(2\pi \cdot \Delta D_{on} + \varphi) - \sin \varphi] - T \cos \varphi \cdot \Delta D_{on} \right\} + \frac{MU_{dc} I_m}{2} \cos \varphi \quad (5)$$

当 $\frac{t_1}{T} < \Delta D_{on} < \frac{1}{4} + \frac{\theta}{2\pi}$ 时:

$$\langle P_1 \rangle_T = \left\{ \frac{MU_{dc} I_m}{T} \left[\frac{1}{2\omega} \cdot \sin(4\pi \cdot \Delta D_{on} + \varphi) - T \cos \varphi \cdot \Delta D_{on} \right] - \frac{2U_{dc} I_m}{\omega} \cdot \cos(2\pi \cdot \Delta D_{on} + \varphi) + c \right\} + \frac{MU_{dc} I_m}{2} \cos \varphi \quad (6)$$

其中

$$c = \frac{MU_{dc} I_m}{T} \left[2 \cos \varphi \cdot t_1 - \frac{1}{\omega} \cdot \sin(2\omega t_1 + \varphi) + \frac{1}{2\omega} \sin \varphi \right] + \frac{2U_{dc} I_m}{\omega T} \cos(\omega t_1 + \varphi)$$

由式(5)与式(6)可以看出: 等式第一部分为加入 ΔD_{on} 单元 1 功率的调整量, 定义第一部分为 ΔP_1 ; 第二部分为未加入 ΔD_{on} 各单元吸收功率的平均值 \bar{P} , 则 \bar{P} 为

$$\bar{P} = \frac{MU_{dc} I_m}{2} \cos \varphi \quad (7)$$

单元 1 实际吸收功率与占空比变化量 ΔD_{on} 的关系可简化为

$$\langle P_1 \rangle_T = \Delta P_1 + \bar{P} \quad (8)$$

同理, 当 $\Delta D_{on} < 0$ 时:

$$\langle P_1 \rangle_T = -\Delta P_1 + \bar{P} \quad (9)$$

为确保 STATCOM 有较好的调制效果, 实际运

行中调制比不宜过低；考虑到 STATCOM 主要补偿系统无功，其吸收有功功率仅用来补偿装置的损耗，故输出电流超前电压的相角 φ 接近 90° 。现取 $M = 0.8$ ， $\varphi = 88^\circ$ ，定义功率调节比 $K = \langle P_1 \rangle_T / \bar{P}$ ，则功率调节比 K 与占空比变化量 ΔD_{on} 在 $(0, \frac{1}{4} + \frac{\theta}{2\pi})$ 范围内关系如图 5 所示。在 $(-\frac{1}{4} - \frac{\theta}{2\pi}, 0)$ 范围内曲线与 $(0, \frac{1}{4} + \frac{\theta}{2\pi})$ 关于坐标原点对称。

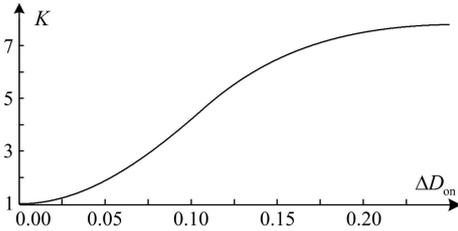


图 5 功率调节比与占空比变化量关系图

Fig. 5 Relationship between power regulation ratio and the duty ratio variable

由图 5 可知：在占空比变化的有效范围内， K 单调递增，可见改变 ΔD_{on} 可有效控制有功功率在各单元的分配。注意到图 5 中 $\langle P_1 \rangle_T$ 可为 \bar{P} 的数倍，事实上，当 $\bar{P} = 2\langle P_1 \rangle_T$ 时，该调制波周期内从网侧吸收的全部有功功率均转移给单元 1，而当 $\bar{P} > 2\langle P_1 \rangle_T$ 时，单元 1 将不仅获得从网侧吸收的全部有功功率而且会吸收单元 2 释放出的有功功率，这表明该方法不但能控制网侧流入有功功率的分配，还能实现单元间功率的流动，具有较强的功率调节能力。

3.3 改进的脉冲轮换控制策略

图 5 分析基于 STATCOM 输出超前电流，当 STATCOM 输出滞后电流时，其控制作用相反。改进的脉冲轮换控制策略通过各单元直流侧电压来决定脉冲轮换时序的占空比。

基于 g_1 的占空比变化规则，五电平 H 桥级联型 STATCOM 脉冲轮换控制原理框图如图 6 所示。图 6 中， \bar{u}_{dc} 为两个单元直流侧电容电压的平均值， u_{dc1} 为单元 1 的直流侧电容电压， Δu 为直流侧电压波动量， sign 为符号函数，当装置向电网输出超前无功电流时， $\text{sign} = 1$ ；当输出滞后无功电流时， $\text{sign} = -1$ 。单元 2 脉冲轮换时序方波占空比与单元 1 互补。基于该策略即可实现各单元直流侧电容电压的均衡控制。

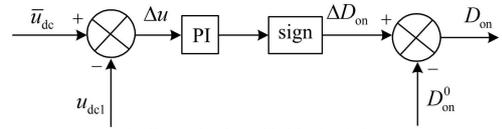


图 6 改进的脉冲轮换策略控制原理图

Fig. 6 Control diagram of improved pulse rotation strategy

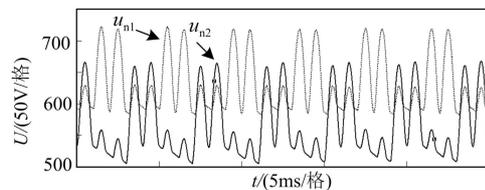
4 仿真分析

为验证本文所提出的改进脉冲轮换控制策略的有效性，基于 Matlab 进行仿真研究。建立五电平 STATCOM 仿真模型，各单元直流侧电容分别并联不同阻值的电阻以等效实际工况中电容损耗，其仿真关键参数如表 1 所示。

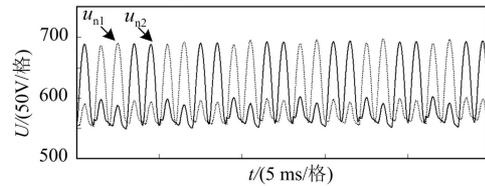
表 1 仿真关键参数
Table 1 Key parameters of simulation

参数	数值
电网线电压有效值 U_s/V	1140
级联数 N	2
直流侧并联电阻 R/Ω	80, 110
接口电感 L/mH	5
直流侧电压给定值 U^*/V	600
载波频率 f_c/kHz	4

为凸显改进的脉冲轮换策略(策略 2)相比于脉冲周期轮换策略(策略 1)对各单元直流侧电压平衡控制的优越性，本文对策略 1 和策略 2 进行仿真对比分析。图 7(a)、图 7(b)为策略 1 与策略 2 直流侧电容电压波形，图中 u_{n1} 与 u_{n2} 分别为单元 1 与单元 2 直流侧电容电压波形。



(a) 策略1直流侧电容电压波形



(b) 策略2直流侧电容电压波形

图 7 直流侧电容电压波形图

Fig. 7 Voltage waveforms of DC side capacitor

由图 7 可以看出，当实际工况中存在因电容损耗引发的直流侧电容电压不平衡时，脉冲周期轮换便不能维持直流侧电容电压平衡，电容电压差值在 100 V 左右。采用本文提出的平衡策略后，直流侧

电容电压平均值稳定在 600 V 左右, 控制效果良好。

图 8 为采用两种平衡策略变流器输出电压电流波形。图 8(a)与图 8(b)为采用策略 1 输出波形, 图 8(c)与图 8(d)为采用策略 2 输出波形。对两种策略输出电压进行总谐波畸变分析 (Total Harmonic Distortion THD), 策略 1 与策略 2 总谐波畸变率分别为 14.86%与 14.60%, 两种平衡策略下装置输出电压 THD 差别不大。然而由于损耗差异, 采用策略 1 直流侧电容电压不平衡, 装置输出电流也受到了影响, 采用策略 2 后装置输出电流波形明显优于策略 1 输出电流波形, 电流总谐波畸变率由 3.21% 降为 1.12%。

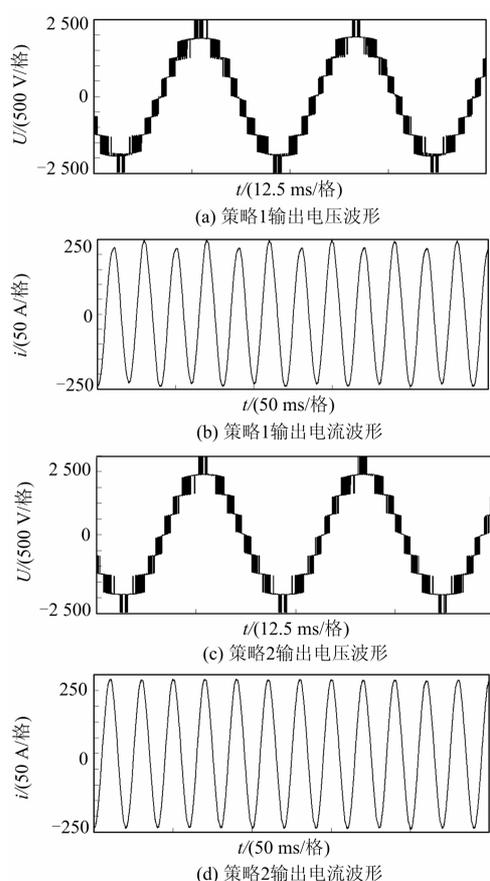


图 8 STATCOM 输出电压电流波形

Fig. 8 Output voltage and current waveforms of STATCOM

5 结论

本文结合 STATCOM 控制原理和载波层叠调制特点, 研究了一种适用于五电平 H 桥级联型 STATCOM 的脉冲轮换直流侧电压平衡策略, 分析和推导了脉冲轮换时序的改变对各单元功率流动的影响, 给出了该策略的控制方法并进行了仿真研究, 结果表明改进的脉冲轮换控制策略可在不影响装置上层控制和几乎不额外增加开关器件动作次数的前

提下较好地实现直流侧电压的均衡控制。该策略具有较宽的功率调整范围, 同样适用于 H 桥级联结构的整流器。

本文所提方法仅针对五电平 H 桥级联结构, 将该方法应用于更多电平数的 STATCOM 将在下一步研究工作中进行完善。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonics suppression and reactive power compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [2] 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.
- [3] HATANO N, ISE T. Control scheme of cascaded H-Bridge STATCOM using zero-sequence voltage and negative-sequence current[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(2): 543-550.
- [4] 丁理杰, 杜新伟, 周惟婧. SVC 与 STATCOM 在大容量输电通道上的应用比较[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 77-81.
DING Li-jie, DU Xin-wei, ZHOU Wei-jing. Comparison of application of SVC and STATCOM to large capacity transmission path of power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 77-81.
- [5] 薛畅, 王建曠, 纪延超, 等. 结合蓄电池储能系统的 STATCOM 的电流解耦控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 43-48.
XUE Chang, WANG Jian-ze, JI Yan-chao, et al. Current decoupling control of STATCOM combined with battery energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 43-48.
- [6] 熊桥坡, 罗安, 帅智康, 等. 级联型 SVG 单载波调制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 74-81.
XIONG Qiao-po, LUO An, SHUAI Zhi-kang, et al. Research of single-carrier modulation strategy for cascade SVG[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 74-81.
- [7] 陈明明, 姚钢, 周荔丹, 等. 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 Ming-ming, YAO Gang, ZHOU Li-dan, et al. Fundamental frequency optimization PAM method of

- chain SVG[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 129-135.
- [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 Yu-feng, et al. The applications of carrier rotation modulation on cascade H-bridges STATCOMs[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 99-106.
- [9] 王学华, 张欣, 阮新波. 级联多电平逆变器最优 SPWM 控制策略及其功率均衡方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 92-99.
WANG Xue-hua, ZHANG Xin, RUAN Xin-bo. Optimal SPWM control strategy and its power balance scheme for cascade multilevel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 92-99.
- [10] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 基于链式逆变器的 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): 149-154.
LIU Wen-hua, SONG Qiang, TENG Le-tian, et al. Balancing control of DC voltages of 50 MVA STATCOM based on cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 149-154.
- [11] WOODHOUSE M L, DONOGHUE M W, OSBORNE M M. Type testing of the GTO valves for a novel STATCOM convertor[C] // IEE Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, London, November 28-30, 2001: 84-90.
- [12] 胡应宏, 任佳佳, 申科, 等. 基于电压冗余状态的链式 STATCOM 直流侧电容电压平衡控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 33-37.
HU Ying-hong, REN Jia-jia, SHEN Ke, et al. Chain STATCOM DC capacitor voltages control strategy based on voltage redundancy state[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 33-37.
- [13] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 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): 53-57.
GENG Jun-cheng, LIU Wen-hua, YUAN Zhi-chang. Research of capacitor voltage unbalance phenomenon for chain STATCOM(1)-simulation and experiment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 53-57.
- [14] 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 Jun-cheng, LIU Wen-hua, YUAN Zhi-chang. Research of capacitor voltage unbalance phenomenon for chain STATCOM(2)-mathematical model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 35-39.
- [15] 王轩, 熊超英, 傅坚, 等. 链式静止同步补偿器动态模型建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 1-6.
WANG Xuan, XIONG Chao-ying, FU Jian, et al. Dynamic modeling of chain circuit STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 1-6.

收稿日期: 2014-01-23; 修回日期: 2014-03-10

作者简介:

杜少通 (1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量控制技术; E-mail: gdj4321@163.com

杨擎 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为无功补偿与谐波治理; E-mail: yang880422@gmail.com

周娟 (1976-), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 从事电能质量控制、电力电子技术与应用的研究和教学工作。E-mail: zhjcumt@126.com