

基于无差拍电流控制的 MMC-HVDC 系统控制策略研究

邓雪松¹, 欧开健², 陈鹏¹, 崔小岳¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 随着电平数的增加, 基于 dq0 旋转坐标系 MMC-HVDC 的控制器运算量会非常大。为了提高运算速度, 根据 MMC 换流器的等效电路设计了基于三相静止坐标系下的 MMC-HVDC 系统控制器。该控制器将无差拍电流控制与最近电平调制算法相结合, 并对电流参考值的采样选取方法进行了改进, 提高了控制器精度。该控制器不仅动态响应快, 精度高, 实现了解耦控制, 而且减少了坐标转换与 PI 调节环节, 降低了控制系统的运算量。通过在 PSCAD/EMTDC 下建立 MMC-HVDC 的仿真模型, 仿真结果验证了控制器的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器 (MMC); 无差拍; 最近电平; 高压直流输电

Study of control strategy for MMC-HVDC system based on deadbeat current control

DENG Xue-song¹, OU Kai-jian², CHEN Peng¹, CUI Xiao-yue¹

(1. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: With the increment of level, there is a large amount of the computation for the controller of MMC-HVDC system. To speed up, according to the equivalent circuit of MMC converter, this paper designs the controller of MMC-HVDC system based on the three-phase static coordinate system. The controller combines deadbeat current control with nearest level modulation (NLM), and improves the sampling selection method of current reference value for the precision. The proposed controller realizes decoupling control with fast dynamic response and high precision, decreases the amount of system computation with less PI regulator and coordinate transformation. The MMC-HVDC simulation model is established in PSCAD/EMTDC environment and the simulation results verify the validity of proposed controller.

Key words: MMC; deadbeat; NLM; HVDC

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0034-06

0 引言

基于电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 的柔性直流输电由于采用了如 IGBT 等的全控器件及 PWM 技术, 能独立调节有功功率和无功功率, 实现功率四象限运行被广泛应用于新能源并网接入、孤岛供电等领域。传统的 VSC-HVDC 大多采用两电平或三电平结构, 随着换流器对容量及电压要求的不断提高, 其谐波大、开关器件损耗高, 动态均压难等缺点会使实际工程中成本大增^[1-4]。为此, 德国学者于 2001 年提出了模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC)。由于 MMC 采用串联子模块构成换流阀, 可以通过子模块电压的叠加得到较高的输出电压, 随着电平数的增加, 输出电压的谐波也较低, 大大减少了实际工程中对

滤波器的需求。同时具有公共直流母线可以实现背靠背连接, 因此十分适用于高电压、大功率的柔性直流输电系统中^[5-7]。

目前 MMC 的控制主要采用 dq0 旋转坐标系下的解耦控制策略^[8], 由于 MMC 拓扑中每个子模块都含有一个悬浮电容, 因此在控制系统设计中还要考虑电容的均压问题。采用的方法为最近电平调制法 (Nearest Level Modulation, NLM) 和载波移相法^[9-10]。这两种算法都需要实时采集电容电压等参数进行运算。在实际工程中, 为了达到更高的电压, 往往需要数十电平甚至上百电平, 控制系统的运算量会大大增加。因此, 对 MMC 控制策略进行优化改进, 降低控制系统的计算量有十分重要的意义。

文献[11]提出了在 dq0 旋转坐标系下采用无差拍进行两电平 VSC-HVDC 控制算法。文献[12]则在

abc 坐标系下利用无差拍算法实现了两电平 VSC-HVDC 的解耦控制, 大大降低了计算量, 却没有对多电平的情况进行分析。

本文在 abc 坐标系下, 推导出 MMC-HVDC 的数学模型, 结合 abc 坐标系下的无差拍算法与 NLM 调制策略, 实现有功无功的独立调节以及子模块电容的均压控制。最后利用仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行了仿真验证, 仿真结果验证了控制策略的有效性。

1 MMC的基本原理及建模

1.1 MMC 拓扑结构

图 1 为 MMC 拓扑结构示意图。MMC 有 6 个桥臂, 每个桥臂由 N 个子模块 (Sub-module, SM) 和一个桥臂电抗器 L_m 串联构成。子模块的结构如图 2 所示, 由一个 IGBT 半桥和一个电容并联而成。正常运行时, 每个子模块有两种工作状态: ①T1 导通, T2 关断, $u_{sm}=u_c$, 处于投入状态; ②T1 关断, T2 导通, $u_{sm}=0$, 处于旁路状态。每相投入的子模块数都相等, 从而保证直流侧电压的稳定。通过控制投入子模块在上下桥臂中的分配, 可以输出期望的交流电压。

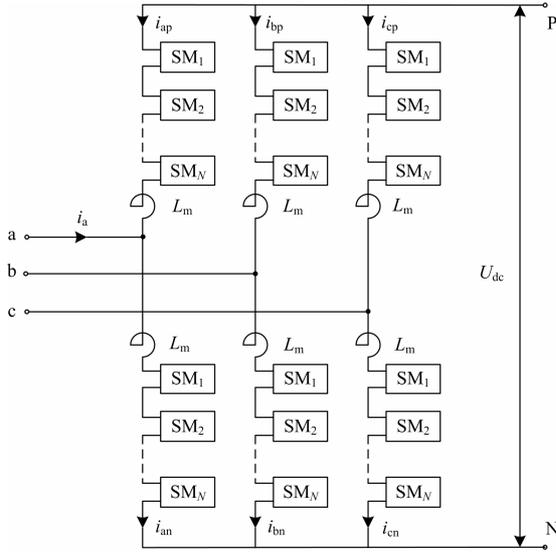


图 1 三相 MMC 换流器结构

Fig. 1 Structure of three-phase MMC

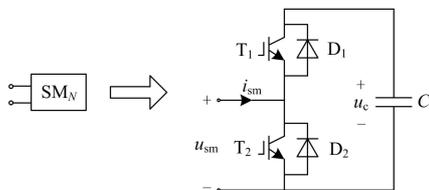


图 2 子模块结构

Fig. 2 Structure of a submodule

1.2 MMC 数学模型

MMC 每个桥臂上的子模块在投入和旁路两种状态下切换, 因此子模块电压可以用一个受控电压源代替, 由于每相上下桥臂是等位点, 则桥臂电抗相当于并联, 因此可以得到 MMC-HVDC 一侧系统的等效电路如图 3 所示。图 3 中: u_{sj} 、 $i_{sj}(j=a,b,c)$ 为交流系统三相电压和三相电流, R 、 L_s 分别为交流线路上的等效电阻和等效电抗, L_m 为 MMC 的桥臂电抗; $u_{cj}(j=a,b,c)$ 为 MMC 的输出电压; $u_{jk}(j=a,b,c; k=p,n)$ 为等效受控电压源。

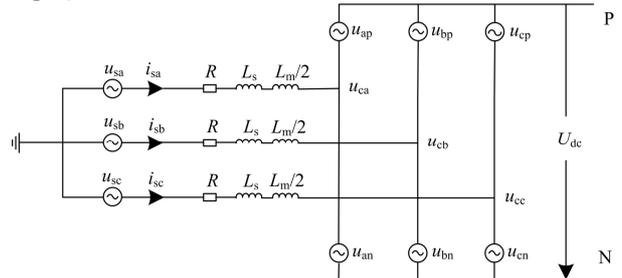


图 3 MMC-HVDC 一端等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of MMC-HVDC

由图 3, 根据 KVL 可以推导出 MMC-HVDC 系统在三相坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_{sa} - L \frac{di_{sa}}{dt} - Ri_{sa} = u_{ca} \\ u_{sb} - L \frac{di_{sb}}{dt} - Ri_{sb} = u_{cb} \\ u_{sc} - L \frac{di_{sc}}{dt} - Ri_{sc} = u_{cc} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $L=L_s+L_m/2$ 。由式(1)可以进行 MMC 换流器的控制系统设计。

2 子模块电容均压

MMC-HVDC 系统正常运行的一个重要标志就是子模块电容能保持平衡, 采用文献[9]提出的 NLM 调制算法, 可以有效实现均压控制。其原理框图如图 4 所示。

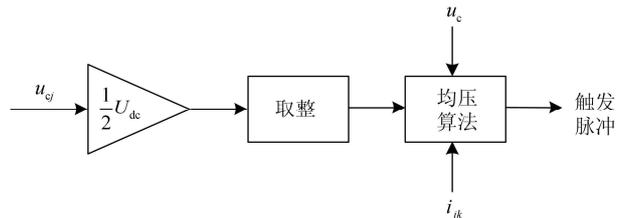


图 4 电容电压平衡控制算法框图

Fig. 4 Block diagram of capacitor voltage balancing control algorithm

图 4 中, u_{cj} 为 j 相换流器输出电压, u_c 为子模块电容电压, i_{jk} 为 j 相桥臂电流。实时监测各子模块电容电压 u_c , 并对其进行排序, 通过取整函数得到上下桥臂应投入的子模块个数 $m(m \leq N)$, 结合桥臂电流方向, 若为正, 则对 m 个电压最低的子模块进行充电, 若为负, 则对 m 个电压最高的子模块进行放电。从而实现子模块的均压控制。

3 无差拍控制器设计

目前对于 MMC 换流器通常采用直接电流控制, 此种控制方式分为外环电压控制和内环电流控制两部分。由于 MMC 不同于两电平结构, 随着电平数的增多, 子模块电容均压控制需要实时采集大量的电容电压等参数参与运算, 同时, 直接电流控制需要进行多次坐标变换, 这大大增加了控制单元的计算量, PI 控制器对系统的依赖性很强, 选择合适的参数需要大量的调试, 严重影响了系统控制器设计。

无差拍控制算法原理简单, 控制参数确定, 具有一拍即达的特性, 可以实现快速跟踪, 非常适用于 MMC-HVDC 系统控制器设计。本文采用 abc 静止坐标系下的无差拍解耦控制, 结合 NLM 电容均压算法进行了控制器设计。

根据瞬时功率理论, 在 abc 三相静止坐标系下, 换流器输出的有功 P 和无功 Q 可以表示为

$$\begin{cases} P = u_{sa}i_{sa} + u_{sb}i_{sb} + u_{sc}i_{sc} \\ Q = \frac{1}{\sqrt{3}}[(u_{sa} - u_{sb})i_{sc} + (u_{sb} - u_{sc})i_{sa} + (u_{sc} - u_{sa})i_{sb}] \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)施加 dq 坐标变换, 令 d 轴与系统电压 U_s 方向重合, 可以得到

$$\begin{cases} P = 1.5u_{sd}i_{sd} \\ Q = -1.5u_{sd}i_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $u_{sd}=U_m(U_m$ 为电网电压适量的模值), 在稳态下为一定值。因此有功 P 和无功 Q 可以通过调节 i_{sd} 和 i_{sq} 实现解耦控制。

对式(1)进行离散化, 可以得到

$$u_{cj}(n) = u_{sj}(n) - \frac{T_s}{L_s} [i_{sj}(n+1) - i_{sj}(n) - Ri_{sj}(n)] \quad (4)$$

式(4)中, $T_s=1/f_k$, f_k 为采样频率。令 $i_{sj}(n+1) = i_{sjref}^*(n+1)$, 可得

$$u_{cj}(n) = u_{sj}(n) - \frac{T_s}{L_s} [i_{sjref}^*(n+1) - i_{sj}(n) - Ri_{sj}(n)] \quad (5)$$

式(5)构成了无差拍控制器的电流内环。文献[12]

令 $i_{sj}(n) = i_{sjref}^*(n+1)$, 但数字控制器往往存在延迟, 指令电流参考值 $i_{sjref}^*(n+1)$ 为下一时刻的值, 由于采样周期 T 很小, 在稳态情况下, 电流不会发生突变, 因此指令电流可以通过式(6)得到。

$$i_{sjref}^*(n+1) = 2i_{sjref}(n) - i_{sjref}(n-1) \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可知, 三相电流经过一个采样周期就可以快速跟踪指令电流。指令电流 i_{sjref}^* 可以通过功率外环得到。

对于定有功和定无功的情况, 可由式(3)得到电流参考值 i_{sd} 和 i_{sq} , 再经过 dq0/abc 坐标变换, 得到在 abc 静止坐标系下的电流参考值 $i_{sjref}(n)$ 。

对于定直流电压和定交流电压的情况, 可通过式(7)、式(8)得到电流参考值 i_{sd} 和 i_{sq} 。其中, u_{sjref} 为交流电压参考值。

$$i_{sd} = K_P (U_{dcref} - U_{dc}) + K_I \int (U_{dcref} - U_{dc}) dt \quad (7)$$

$$i_{sq} = K_P (u_{sjref} - u_{sj}) + K_I \int (u_{sjref} - u_{sj}) dt \quad (8)$$

因此, MMC-HVDC 的整个控制框图如图 5 所示。

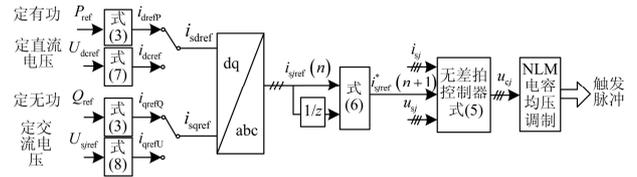


图 5 MMC-HVDC 控制框图

Fig. 5 Block diagram of MMC-HVDC control system

由图 5 可以看出, 所设计的控制系统仅用到一次坐标变换。仅在定直流电压和定交流电压控制中用到一次 PI 控制, 相对于传统的直接电流双环控制, 大大简化了控制系统的复杂程度, 为电容均压调制节约了大量运算空间。

4 仿真实验

为了验证所设计的无差拍控制器的正确性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 6 所示的双端 21 电平的 MMC-HVDC 系统。换流器每个桥臂由 20 个子模块构成, 系统容量为 60 MVA, 交流侧线电压额定值为 35 kV, 等效阻抗为 1 mH, 等效阻抗为 0.01 Ω , 桥臂电感为 10 mH, 子模块电容为 4 000 μ F。直流侧额定电压为 60 kV。采样频率 f_k 为 2 500 Hz。控制系统采用图 5 所示结构设计, 整流侧采用定直流电压和定无功控制, 逆变侧采用定有功和定无功控制, 仿真结果如图 7、图 8 所示。

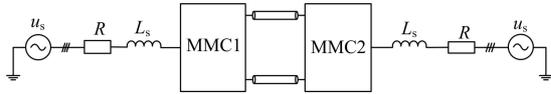


图 6 MMC-HVDC 双端连接系统

Fig. 6 Two-terminal MMC-HVDC system

(1) 功率阶跃响应。如图 7 所示, 直流电压恒定, 有功功率参考值 P_{ref} 在 $t=1$ s 时由 0.8 pu 阶跃到 -0.5 pu, 无功功率参考值 Q_{ref} 在 $t=2$ s 时由 0.2 pu 阶跃到 -0.3 pu。

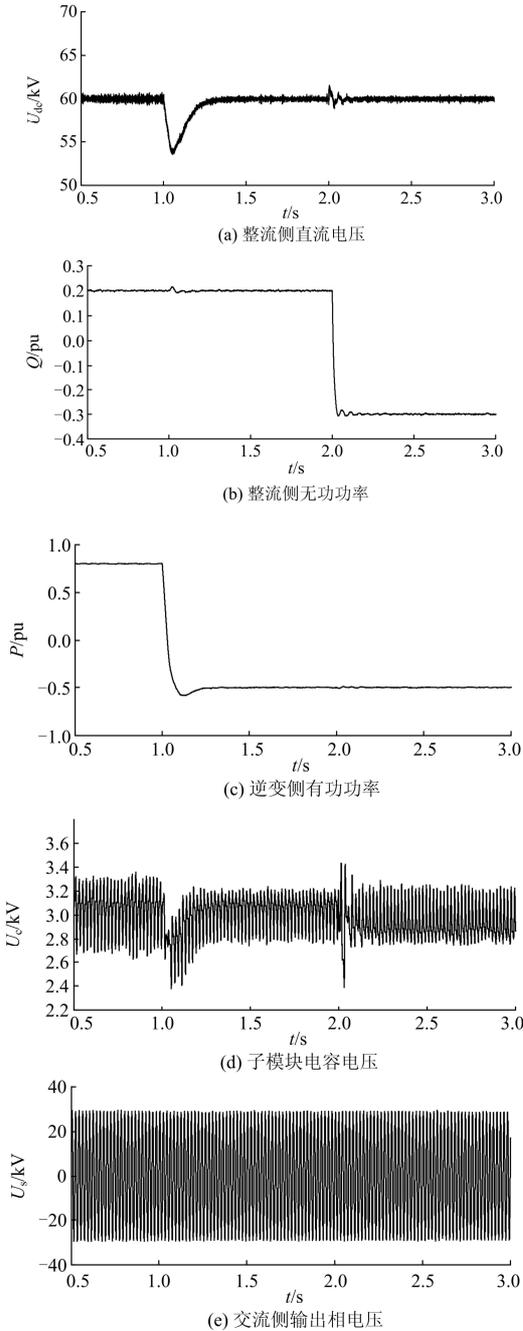
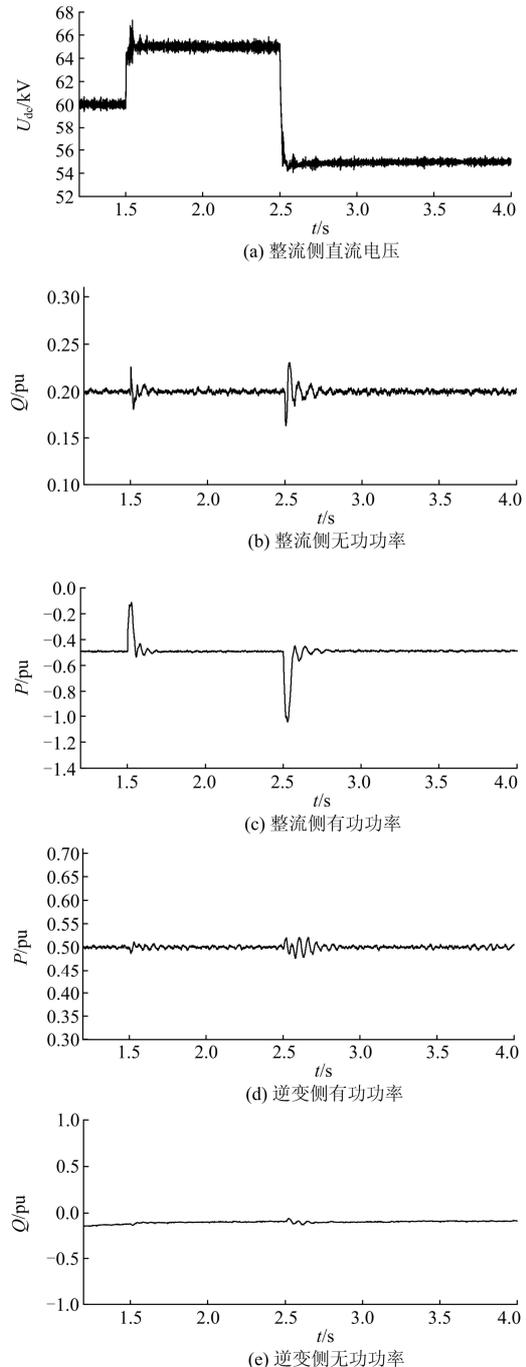


图 7 功率阶跃仿真结果

Fig. 7 Simulation results when power changes

由图 7(a)可以看出, 直流侧电压保持恒定, 在功率反转时也仅有些许跌落, 随后迅速恢复稳定。图 7(b)、图 7(c)中, 功率阶跃响应实现了独立解耦控制, 且动态响应十分迅速。由图 7(d)看出, 子模块电容电压保持在 3 kV, 波动范围不超过 10%。图 7(e)中, 输出电压保持恒定。

(2) 直流电压动态响应。如图 8 所示, 设定整流侧直流电压在 $t=1.5$ s 时由 60 kV 抬升到 65 kV, 在 $t=2.5$ s 时由 65 kV 降至 55 kV。有功功率 $P_{ref}=0.5$ pu, 无功功率 $Q_{ref}=0.2$ pu 保持不变。



(e) 逆变侧无功功率

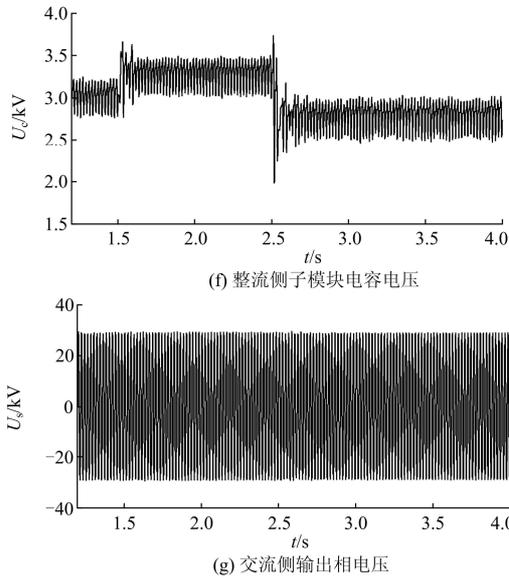


图 8 直流电压动态响应

Fig. 8 Simulation results when DC-bus voltage changes

由图 8(a)可以看出, 当整流侧直流电压参考指令发生变化时, 控制器能很快跟踪其变化, 由图 8(b)~图 8(e)可以看出, 整流侧有功功率及无功功率由于直流电压变化导致电容充放电而在变化时刻较逆变侧有较大波动外, 之后迅速恢复稳定。由图 8(f)可以看出, 子模块能快速跟踪变化, 稳态时保持均压, 且波动范围小于 10%。

综上所述, 所设计无差拍控制系统能在各种工况下快速跟踪指令变化, 具有良好的动态响应速度, 并实现有功功率、无功功率的解耦控制。

5 结论

本文针对 MMC-HVDC 系统, 推导出其等效电路, 考虑到实际应用中电平数很多, 电容均压控制会导致控制系统计算量增大的特点, 将三相静止坐标系下的无差拍控制算法进行了改进, 通过前一时刻以及当前时刻采样值推出下一时刻采样参考值, 提高了控制器精度, 结合最近电平调制策略设计出 MMC-HVDC 的控制器。该控制器大大减少了坐标变换及 PI 调节环节, 减轻了控制系统的运算量, 同时能实现有功无功的解耦控制, 并具有快速的动态响应能力, 稳态和动态情况下很好地保持了电容电压的平衡。在 PSCAD/EMTDC 下进行仿真验证, 仿真结果验证了控制器的有效性, 非常适用于高电平的 MMC-HVDC 系统中。

参考文献

[1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES

G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.

[2] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-76.

YAO Wei-zheng, DENG Xiang-chun, YI Ying-ping, et al. Research on modeling and simulation of VSC-HVDC based on dq0 synchronous coordinate[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 71-76.

[3] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.

XU Zheng, CHEN Hai-rong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.

[4] 刘建涛, 王治华, 王珂. 不同结构电压源换流器损耗对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 105-110.

LIU Jian-tao, WANG Zhi-hua, WANG Ke. Comparative analysis of losses of voltage source converters with different structures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 105-110.

[5] HUANG H. Multilevel voltage-sourced converters for HVDC and FACTS applications[C] // Cigré, SC B4 2009 Bergen Colloquium. Bergen, Norway, 2009: 1-8.

[6] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulse width-modulated modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.

[7] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.

GUAN Min-yuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.

[8] 赵岩, 胡学浩, 汤广福, 等. 模块化多电平变流器 HVDC 输电系统控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 35-42.

ZHAO Yan, HU Xue-hao, TANG Guang-fu, et al. Control strategy of modular multilevel converters based HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 35-42.

[9] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直

- 流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52.
- GUAN Min-yuan, XU Zheng, TU Qing-rui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [10] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.
- TU Qing-rui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.
- [11] 杨浩, 张楠, 叶明佳. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 离散模型及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 37-41.
- YANG Hao, ZHANG Nan, YE Ming-jia. Study of VSC-HVDC connected to passive network discrete model and its control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 37-41.
- [12] 傅晓帆, 周克亮, 程明, 等. 风电场并网用 VSC-HVDC 的无差拍解耦控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 157-164.
- FU Xiao-fan, ZHOU Ke-liang, CHENG Ming, et al. Deadbeat decoupling control of VSC-HVDC systems for grid connection of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 157-164.

收稿日期: 2013-07-08; 修回日期: 2013-08-13

作者简介:

邓雪松(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: dengxuesong0117@gmail.com

欧开健(1974-), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 研究方向为柔性直流输电实时仿真、交直流电力系统仿真分析;

陈鹏(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子系统控制。