

基于电压补偿原理的高压直流输电 系统故障控制策略

张明光 袁斌华

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州 730050)

A Fault Control Strategy of HVDC Transmission System Based on Voltage Compensation Principle

ZHANG Mingguang, YUAN Binhua

(School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

ABSTRACT : When an asymmetric fault occurs to the AC system side of the HVDC transmission system, the AC system will produce negative sequence voltage and negative sequence current, causing active power fluctuation between the converter station and the AC system, and DC voltage fluctuations in the DC system. The fluctuant active power and DC voltage will transmit to the other two sides of the system through the DC line and affect the stability of the AC system in the two sides. The method of voltage compensation control adopted in this paper can effectively inhibit the negative sequence current. A simulation model of modular multilevel converter (MMC) based on MTDC in PSCAD/EMTDC is established to verify the correctness and validity of the proposed control method.

KEY WORDS high voltage direct current transmission(HVDC); MMC based multi-terminal DC transmission system; voltage compensation principle; fault control

摘要 :当高压直流输电系统交流侧发生不对称故障时,交流系统会产生负序电压和负序电流,从而引起换流站与交流系统之间的有功功率产生波动,使得直流系统的直流电压产生波动。这种波动的有功功率和直流电压会通过直流线路传输到系统的另两侧,影响其他两侧交流系统运行的稳定性。采用电压补偿控制的方法有效地抑制了负序电流,在PSCAD/EMTDC环境中建立基于MMC的多电平换流器的3端直流系统仿真模型,仿真结果验证了所提出的控制方法的有效性和

正确性,提高系统的稳定性。

关键词 :高压直流输电(HVDC);多端直流输电系统(MMC-HVDC);电压补偿控制;故障控制

MMC-HVDC系统在运行过程中,当交流系统发生不对称故障时,基于系统稳态运行时设计的控制器的控制性能将严重恶化,控制器将不能对系统进行准确的控制,从而会对MMC-HVDC系统的稳定运行产生很大的影响^[1-3]。交流系统发生不对称故障时,MMC-HVDC换流站交流侧会产生很大的负序电流,致使三相电流不对称,会引起系统故障,使得保护动作,较大的故障电流还会对换流器的安全运行产生影响^[4-7]。MMC-HVDC系统一侧交流系统发生不对称故障时,产生的负序电压和负序电流会引起换流器与交流系统之间交换的有功功率产生波动,而有功功率的波动又会导致直流电压的波动。这种波动的有功功率和直流电压会通过直流线路传输到系统的另一侧,影响另一侧换流器与交流系统的稳定运行。由于拓扑结构的差异,MMC-HVDC与两电平VSC会存在很大的不同,MMC的电容分散分布于各相的子模块中,每相可独立运行,不会与其他各相产生影响。因而MMC在运行时,不会像两电平VSC存在各相之间的耦合问题,因而在交流系统电压不平衡的情况下,MMC-HVDC系统能够带故障长时间运行^[8-10]。尤其对于受端系统为无源网络或弱交流系统时,MMC-HVDC更能保证故障后系统有功功率的

基金项目 国家自然科学基金(71203082)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(71203082).

传输,从而避免了受端系统频率的波动,减少受端系统甩负荷情况的发生^[11-14]。

1 MMC-HVDC系统模型

1.1 MMC系统结构

三相MMC由6个桥臂组成,其中每个桥臂由若干个相互级连且结构相同的子模块(sub-module, SM)与1个电抗器串联组成^[13]。图1(a)为MMC的主电路,图1(b)为SM的拓扑结构图。每个SM可视为1个二端口网络,由1个作为开关单元的绝缘栅双极型晶体管半桥(包括 T_1 和 T_2 2个IGBT以及 D_1 和 D_2 2个反并联二极管)和1个直流储能电容构成。

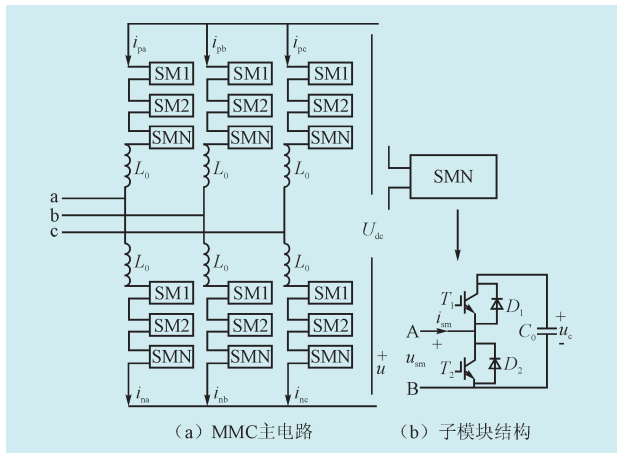


图1 MMC拓扑结构

Fig. 1 The topology of the MMC

图1(b)SM子模块的输出电压由 T_1 和 T_2 的导通和关断决定。桥臂电压为桥臂上所有串联的子模块输出电压之和,而直流电压 U_{dc} 为同一相上、下桥臂电压之和。

由于MMC的桥臂电压是由桥臂上子模块开通子模块个数决定,因此可以将MMC的桥臂电压等效为可控电压源,则单端MMC-HVDC的等效主电路拓扑如图2所示。

图2 MMC-HVDC等效电路图省略了换流变压器。图2中 $u_s(i=a, b, c)$ 为三相交流系统的电压值; R 为表示线路和变压器损耗的等效电阻; L_T 为换流变压器的漏抗; u_i 为MMC三相的出口电压值; i_i 为交流系统的三相交流电流值; u_{ip} 和 i_{ip} 为MMC三相上桥臂电压和电流; u_{in} 和 i_{in} 为MMC三相下桥臂电压和电流; i_{dc} 为直流电流; U_{dc} 为直流电压; N 点为交流系统中性点, O 点为直流侧的等效零电位点,两者必有

一点接地; A 点与 A' 点为等电位点,三相等位点电压为 u_{ei} 。

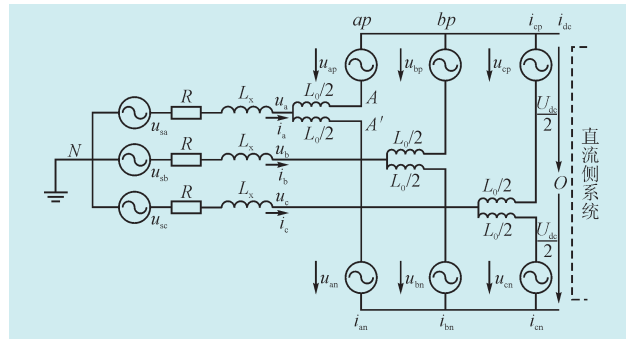


图2 MMC-HVDC等效电路图

Fig. 2 MMC-HVDC equivalent circuit diagram

1.2 交流系统发生不对称故障时MMC-HVDC系统的数学模型

当3端MMC-HVDC系统MMC 2侧交流系统发生不对称故障时,对其运行状态进行分析,如图3所示。

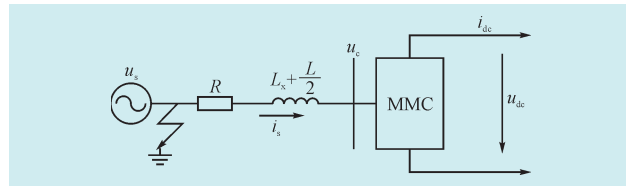


图3 MMC系统故障时的等效模型

Fig. 3 The equivalent model of the MMC system failure

根据三不对称分量的瞬时对称分量法,建立交流系统故障时MMC相应的数学模型。由图3可得交流系统发生不对称故障时,MMC-HVDC系统电压、电流间的关系如式(1)所示。

$$\left(L_x + \frac{L}{2}\right) \frac{di_s}{dt} + i_s R = u_s - u_c \quad (1)$$

式中 i_s 、 u_s 、 u_c 包含正序分量和负序分量,即

$$\begin{cases} i_s = i_{sp} + i_{sn} \\ u_s = u_{sp} + u_{sn} \\ u_c = u_{cp} + u_{cn} \end{cases} \quad (2)$$

式中,下标 p 表示相应的正序分量;下标 n 表示相应的负序分量。

对式(2)进行 $\alpha\beta$ 坐标变换,可得 i_s 、 u_s 、 u_c 在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的关系如式(3)所示。

$$\begin{cases} i_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta} = (i_{sp} + i_{sn}) + j(i_{sp} + i_{sn}) \\ u_s = u_{s\alpha} + ju_{s\beta} = (u_{sp} + u_{sn}) + j(u_{sp} + u_{sn}) \\ u_c = u_{c\alpha} + ju_{c\beta} = (u_{cp} + u_{cn}) + j(u_{cp} + u_{cn}) \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)并整理可得交流系统发生不对称故障时,MMC-HVDC系统在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的数学模型如式(4)、式(5)所示

$$\left\{ \begin{aligned} \left(L_x + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{s\alpha\beta}}{dt} + i_{s\alpha\beta} R &= u_{s\alpha\beta} - u_{c\alpha\beta} \\ \left(L_x + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{s\beta\alpha}}{dt} + i_{s\beta\alpha} R &= u_{s\beta\alpha} - u_{c\beta\alpha} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left(L_x + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{s\alpha n}}{dt} + i_{s\alpha n} R &= u_{s\alpha n} - u_{c\alpha n} \\ \left(L_x + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{s\beta n}}{dt} + i_{s\beta n} R &= u_{s\beta n} - u_{c\beta n} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

在进行交流系统故障时 MMC-HVDC 的控制器设计时，一般是基于 dq 旋转坐标系下的数学模型。将式(4)、式(5)转换到 dq 坐标系，可得

$$\left\{ \begin{aligned} \left(L_x + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{dq}}{dt} &= u_{sdq} - v_{dq} - i_{dq} R + \omega \left(L_x + \frac{L}{2} \right) i_{qp} \\ \left(L_x + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{qp}}{dt} &= u_{sqp} - v_{qp} - i_{qp} R + \omega \left(L_x + \frac{L}{2} \right) i_{dq} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left(L_x + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{dn}}{dt} &= u_{sdn} - v_{dn} - i_{dn} R - \omega \left(L_x + \frac{L}{2} \right) i_{qn} \\ \left(L_x + \frac{L}{2} \right) \frac{di_{qn}}{dt} &= u_{sqn} - v_{qn} - i_{qn} R + \omega \left(L_x + \frac{L}{2} \right) i_{dn} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$\alpha\beta$ 静止坐标系与 dq 旋转坐标系之间的转换关系如下

$$\begin{bmatrix} f_{dp} \\ f_{qp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{\alpha p} \\ f_{\beta p} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} f_{dn} \\ f_{qn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{\alpha n} \\ f_{\beta n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(6)、式(7)即为交流系统发生不对称故障时 MMC-HVDC 系统在 dq 旋转坐标系下的数学模型。由此可得出，交流系统故障时，MMC-HVDC 系统的数学模型由正序系统模型和负序系统模型组成，此正序系统模型与负序系统模型相互独立，相互间不产生影响。

2 基于电压补偿原理的 MMC-MTDC 系统的不平衡控制

2.1 电压补偿的基本原理

在高压直流输电系统中，三相交流系统一般采用的是星型不接地的接线方式^[13]，所以系统中没有零序电流。图3所示 MMC 换流站系统的等效电路可以用图4来表示，图中 V 为 MMC 交流输出侧电压； P_{ac} 为交流系统向 MMC 输送的有功功率； P_{dc} 为 MMC 向另一侧系统输送的有功功率

当 MMC 换流站控制器采用交流系统电压前馈

的直接电流控制策略时，其控制原理可以用图5来表示。

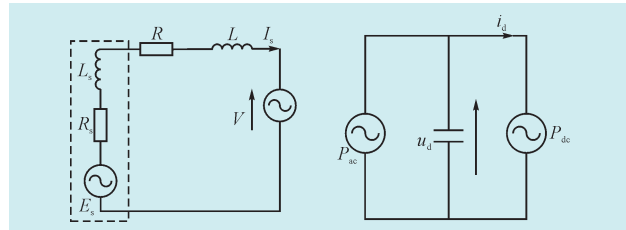


图4 MMC换流站系统的单线等效电路

Fig. 4 MMC converter station single equivalent circuit

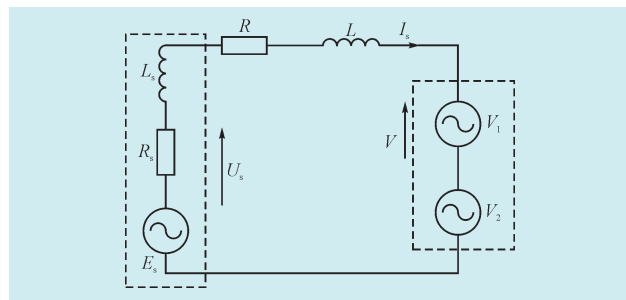


图5 采用交流系统电压前馈的直接电流控制原理图

Fig. 5 The direct current control principle of using ac system voltage feedforward

在图5中，换流母线处的电压用 U_s 来等值，而换流器交流输出侧电压 V 假设由 V_1 和 V_2 两部分构成。令 $U_s = V_1$ ，则根据电路定律， V_2 与换流电抗器之间的关系可用下式表示：

$$V_2 = RI_s + L \frac{dI_s}{dt}$$

显然，通过同步锁相和电压测量环节很容易求得 V_1 的值，而求取 V_2 的方法很多。在只考虑基波情况时，换流器交流侧期望的输出电压即是用于开关调制的电压波形，也就是说，开关调制波可以通过求取 VSC 期望的交流输出电压来获得，而 MMC 期望的交流输出电压就是 U_s 的检测值和电流控制器的输出值的代数和。

2.2 基于电压补偿原理的负序电压补偿控制器的设计

为了使 MMC 换流站交流侧的输出电压含有系统故障所引起的等量的负序电压时，系统的负序电流就能得到抑制。为了实现这一目的，根据上述电压补偿控制原理，可以采用下面的方法来实现，即通过实时检测负序电压，将其与实时测得的正序电压和电流控制器输出的电压分量三者求和，共同构成用于开关调制的 MMC 换流站期望输出的交流电压。现定义电压相量 V 为如下所示的表达式 $V = V_1 + V_2 + V_1$ 。

其中, 设 $V_1^+ = \hat{U}_s^+$, $V_1^- = \hat{U}_s^-$, 上标“ \wedge ”表示测量值, 即 \hat{U}_s^+ 和 \hat{U}_s^- 是通过电压对称分量的实时检测环节获得, 而 V_2 则可以通过电流控制器求得。所以, 当系统的负序电压得到补偿后, MMC 数学模型在两相 $\alpha\beta$ 静止坐标系下可以表示为

$$\begin{cases} Ldi_{s\alpha}/dt + Ri_{s\alpha} = u_{s\alpha}^+ + u_{s\alpha}^- - v_{\alpha}^+ - v_{\alpha}^- \\ Ldi_{s\beta}/dt + Ri_{s\beta} = u_{s\beta}^+ + u_{s\beta}^- - v_{\beta}^+ - v_{\beta}^- \end{cases} \quad (10)$$

根据瞬时对称分量理论, 显然, 上式又可以用下面2个等式表示, 即

$$\begin{cases} Ldi_{s\alpha}/dt + Ri_{s\alpha} = u_{s\alpha}^+ - v_{\alpha}^+ \\ Ldi_{s\beta}/dt + Ri_{s\beta} = u_{s\beta}^+ - v_{\beta}^+ \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} u_{s\alpha}^- - v_{\alpha}^- = 0 \\ u_{s\beta}^- - v_{\beta}^- = 0 \end{cases} \quad (12)$$

根据式(11)可得交流系统负序电压获得补偿后的MMC等效低频动态模型, 如图6所示。

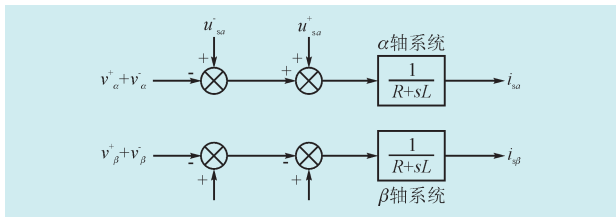


图6 MMC等效低频动态模型

Fig. 6 MMC equivalent low-frequency dynamic model

根据广义同步dq旋转坐标系的定义, 将式(11)

变换成下面2个等式, 即

$$\begin{cases} v_d^+ = u_{sd}^+ - Ldi_{sd}^+/dt - Ri_{sd}^+ + \omega Li_{sq}^+ \\ v_q^+ = u_{sq}^+ - Ldi_{sq}^+/dt - Ri_{sq}^+ - \omega Li_{sd}^+ \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} v_d^- = u_{sd}^- \\ v_q^- = u_{sq}^- \end{cases} \quad (14)$$

由式(10-14)可以得出抑制负序电流的控制器结构框图如图7所示。

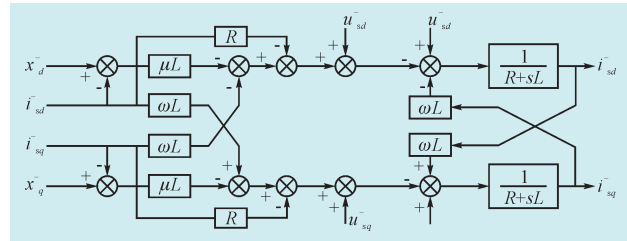


图7 电压补偿原理的控制器框图

Fig. 7 The controller block diagram of the voltage compensation principle

3 仿真研究

为了验证上述提出的交流系统故障时MMC-MTDC系统的数学模型的正确性和以抑制负序电流为目标的控制策略的有效性, 在仿真软件PSCAD/EMTDC平台上搭建21模块MMC-HVDC三端系统, 见图8, 系统参数与稳态时保持一致。

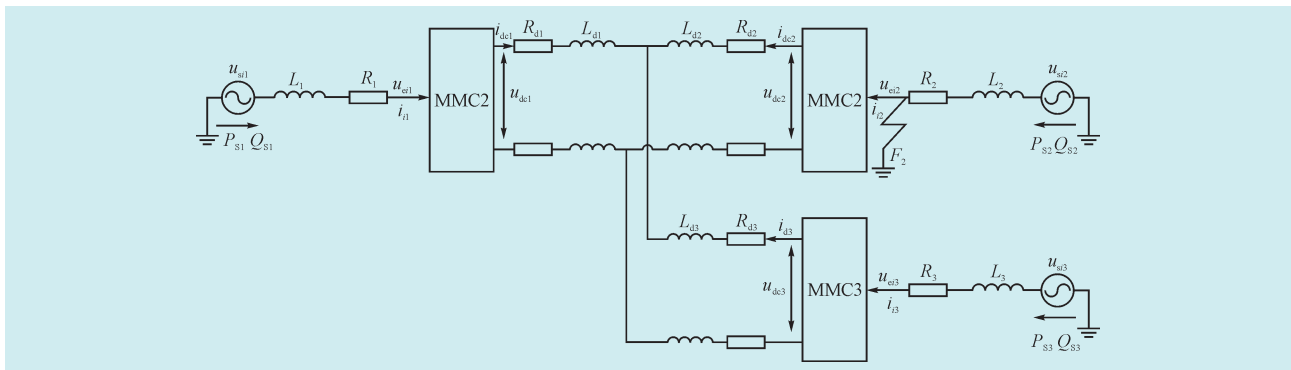


图8 三端MMC系统结构示意图

Fig. 8 Three-terminal MMC system structure diagram

MMC1侧采用定直流电压控制和定无功功率控制, 直流电流设定值为400 kV, 无功功率设定为0 MV·A; MMC2, MMC3侧采用定有功功率控制和定无功功率控制, 有功功率设定值为-400 MW, 无功功率设定值为0 MV·A, 基波频率取60 Hz, 子模块电容取5000 μF。

当MMC2侧发生单相接地短路故障时的仿真结果与分析系统运行1 s后, MMC2侧换流母线F₂处发

生单相接地故障, 接地电阻为0.001 Ω, 2 s时故障消除, 其故障后的控制效果及故障消除后的恢复特性如图9所示。

4 结论

当定有功功率侧发生单相接地故障时, 在所设

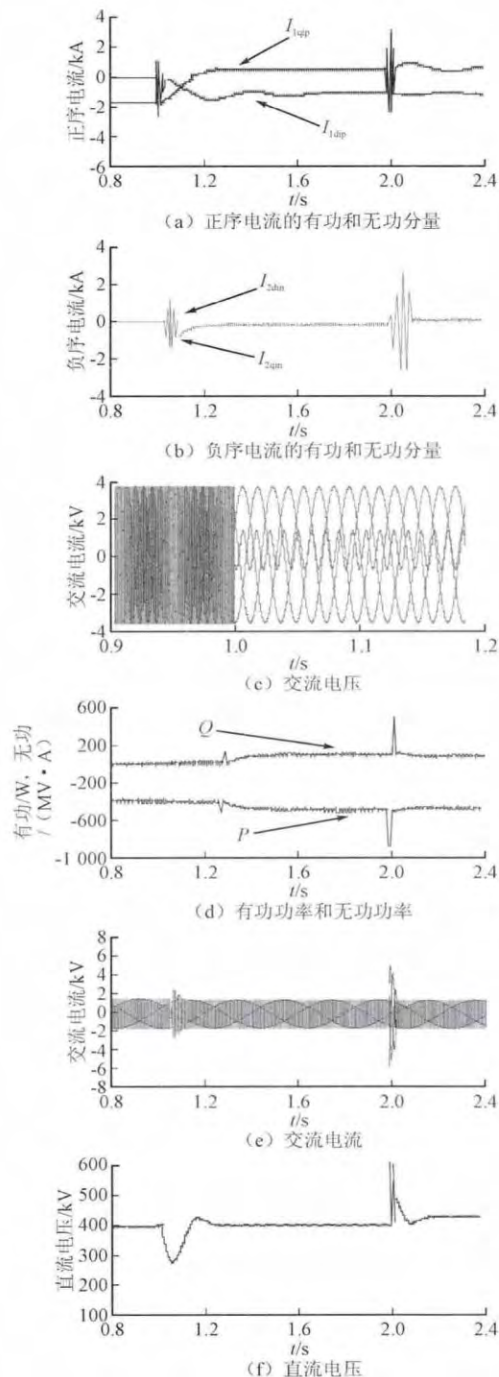


图9 F2处单相接地短路时抑制负序电流的仿真波形

Fig. 9 The imitation of negative sequence current waveforms of a single-phase grounding fault at F2

设计的正序、负序电流解耦控制器的控制作用下,系统的正、负序电流的有功和无功分量都能快速恢复到设定值,如图9所示。故障期间,负序电流的有功和无功分量都为零,表明三相电流不存在负序分量,而图9(e)也表明,负序电流得到了有效抑制,由于故障期间设定换流器发出的无功功率为零,因而

正序电流的无功分量为零,从而保证了直流输电系统在交流系统发生故障时系统中的负序电流得到了抑制,使得系统故障时,直流系统的电压能维持恒定,提高了系统的稳定性。本文只做了换流站2的仿真,换流站1、换流站3发生故障时情况类似。

参考文献

- [1] 丁冠军,汤广福,丁明,等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-8.
DING Guanjun, TANG Guangfu, DING Ming, et al. Topology mechanism and modulation scheme of a new multilevel voltage source converter modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 1-8 (in Chinese).
- [2] 张文亮,汤涌,曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZEN Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6 (in Chinese).
- [3] 陈海荣,徐政. 交流系统故障时VSC-HVDC系统的控制与保护策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [4] 殷自力,李庚银,李广凯,等. 柔性直流输电系统运行机理分析及主回路相关参数设计[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 16-21.
YIN Zili, LI Gengyin, LI Guangkai, et al. Analysis on operational mechanism of VSC-HVDC and relevant parameter design of its main circuit[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 16-21 (in Chinese).
- [5] SONG Hong-seok, NAM Kwanghee. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [6] YAZDANI A, IRAVANI R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1620-1629.
- [7] 陈海荣,徐政. 适用于VSC-MTDC系统的直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 28-33.
CHEN Hairong, XU Zheng. A novel DC voltage control strategy for VSC based multi-terminal HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 28-33 (in Chinese).
- [8] 戴国安,周君文,王亚非. 特高压直流无功控制策略研究[J]. 电力系统保护与控, 2008, 36(14): 48-51.
DAI Guoan, ZHOU Junwen, WANG Yafei. Strategy of

(下转第17页)

式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.

CAO Nan, LI Gang, WANG Dongqing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 63-68 (in Chinese).

- [16] 杨佳俊, 徐建政. 改进量子遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013(4): 15-20.

YANG Jiajun, XUN Jianzheng. Application of improve quantum genetic algorithm on reactive power optimization[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013(4): 15-20 (in Chinese).

收稿日期 2014-12-03。

作者简介:

马倩(1973—),女,高级工程师,研究方向为电力系统自动化;
王博(1993—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统规划;
胡蔚(1970—),男,高级工程师,研究方向为电力系统自动化;
程亮(1972—),男,高级工程师,研究方向为电力系统自动化;
季时宇(1990—),女,硕士研究生,研究方向为城市电网可靠性评估等方面。

(编辑 冯露)

(上接第5页)

reactive power control on UHVDC[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 48-51 (in Chinese).

- [10] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel Back-to-Back HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.

- [11] NAKAJIMA T, IROKAWA S. A control system for HVDC transmission by voltage sourced converters[C]// IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 18-22, 1999, Edmonton Canada: 1113-1119.

- [12] LIVERMORE L, LIANG Jun, EKANAYAKE J B. MTDC VSC technology and its applications for windpower[C]// The 45th International Universities Power Engineering Conference, Cardiff, UK. August 31-September 3, 2010 :6.

- [13] 岳伟, 易容. 基于MMC的风电场柔性直流输电启动控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11).

YUE Wei, YI Rong. Starting-up and control strategy for

flexible direct current transmission of wind farm based on MMC[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11) (in Chinese).

- [14] 罗进, 杨月同. 供配电系统滤波器优化配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11).

LUO Jin, YANG Yuetong. Study on optimal allocation of filters in power supply system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11) (in Chinese).

收稿日期 2014-12-18。

作者简介:

张明光(1971—),男,硕士,教授,研究方向为电力系统自动化、变电站综合自动化、智能电网、调度自动化及计算机信息处理、配电自动化及配电管理系统、人工智能控制及其应用研究等;

袁斌华(1986—),男,硕士研究生,研究方向为高压直流输电控制策略研究。

(编辑 冯露)

(上接第10页)

- [20] 李永明, 李稳, 张淮清. 特高压直流输电线路档距内离子流场的三维计算[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 17-20.

LI Yongming, LI Wen, ZHANG Huaiqing. 3-D simulation of ion flow fields across the span of UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 17-20 (in Chinese).

- [21] 刘朴, 刘平, 黄实, 等. 特高压断路器容性电流开合合成试验方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 87-90.

LIU Pu, LIU Ping, HUANG Shi, et al. Research of synthetic test method of capacitive current switching test for Ultra-high voltage circuit breaker[J]. High voltage Apparatus, 2014, 50(5): 87-90 (in Chinese).

- [22] 崔博源, 李志兵, 王承玉, 等. 提高特高压串补用旁路

隔离开关转换电流开合能力的方法[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 26-29.

CUI Boyuan, LI Zhibing, WANG Chengyu, et al. Method to improve transfer current switching capacity for bypass disconnectors used in UHV series compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 26-29 (in Chinese).

收稿日期 2014-11-18。

作者简介:

马成廉(1983—),男,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统安全运行与控制,电网安全运行与灾害防治、电力系统规划等,主要从事高压直流输电接地极相关问题的研究等方面的分析、研究工作。

(编辑 冯露)