

基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究

姚为正¹, 邓祥纯¹, 易映萍¹, 梁燕², 张建²

(1. 上海理工大学计算机与电气工程学院, 上海 200093; 2. 许继集团, 河南 许昌 461000)

摘要: 基于电压源型变流器的柔性直流输电技术 (VSC-HVDC) 作为一种新型高压直流输电技术, 具有很多技术优点和广阔的应用前景。目前, 国内对该技术的研究处于起步阶段, 诸多基础理论问题尚待深入研究。介绍了柔性直流输电系统的拓扑结构和工作原理, 建立了基于 dq0 旋转坐标系的 VSC-HVDC 系统的数学模型, 并在此基础上设计了基于稳态逆模型结构的有功控制器, 定无功控制器和定直流电压控制器, 并对其异步电网互联的运行情况进行了仿真研究。仿真结果表明, 应用基于 dq0 旋转坐标系的直接电流控制方法可以很好地实现异步电网互联的功率传输, 具有抗扰性好、稳态精度高、响应速度快等优点。

关键词: 电压源型变流器; 高压直流输电; 建模; dq0 坐标; 直接电流控制; 仿真

Research on modeling and simulation of VSC-HVDC based on dq0 synchronous coordinate

YAO Wei-zheng¹, DENG Xiang-chun¹, YI Ying-ping¹, LIANG Yan², ZHANG Jian²

(1. Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Flexible Direct Current transmission technology (VSC-HVDC) is a new High Voltage Direct Current transmission technology based on voltage source converters. It has many technical advantages and broad prospects. As the domestic technology is in its infancy, it is important to study on fundamental theoretical issues such as modeling and simulation. This paper describes the converter station topology and the fundamental principle of Flexible DC transmission technology. The mathematical model of VSC-HVDC based on dq0 rotating coordinate system is established, and then active power controller based on steady-state model, direct voltage controller and reactive power controller are proposed. With the help of MATLAB2006/Simulink, VSC-HVDC asynchronous interconnection running and control mode are analyzed and the simulation results verify that the control strategy has high anti interference ability, strong stability and fast response.

This work is supported by Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (No.08YZ101).

Key words: VSC; HVDC; modeling; dq0-axis; direct current control; simulation

中图分类号: TM721.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0071-06

0 引言

基于电压源型换流器的高压直流输电技术 (VSC-HVDC) 称为柔性直流输电技术, 又叫轻型直流输电技术 (HVDC Light)。它具有可以工作在无源逆变方式下, 实现了有功和无功的独立控制及功率的四象限运行, 能够起到 STATCOM 的作用等优点, 并被广泛应用于可再生能源并网、分布式并网发电、孤岛供电、城市电网供电、异步交流电网互联等多个领域^[1-4]。目前, 国际上关于柔性直流输电技术的研究, 在工程使用化以及基础理论方面的研究都已比较深入; 国内研究尚处于起步阶段, 研究主要集中于该技术的建模仿真、控制及保护策略等。

基于柔性直流输电技术的优势, 研究、发展该技术成为当今趋势。对于柔性直流输电的控制策略, 已有较多的相关文献进行了报道^[5-13]。总结起来主要分为两类: 一类是基于“电压幅值和相位控制”的间接电流控制策略; 另一种是基于同步旋转坐标系下的直接电流控制策略。与间接电流控制方法相比, 应用直接电流控制方法可以获得更快速且高品质的电流响应^[14]。文献[15]对以上两种控制策略的优缺点进行了比较分析, 指出应用基于同步旋转坐标系下的直接电流控制策略可以更好地实现有功、无功的解耦控制。

本文介绍了柔性直流输电系统的结构和工作原理, 建立了基于 dq0 坐标系的柔性直流输电系统的数学模型, 在此基础上设计了基于稳态逆模型结构的匀加速有功控制器以及无功、直流侧电压控制器。

基金资助项目: 上海市教委科研创新项目 (08YZ101)

运用 Matlab2006/Simulink 软件建立了异步电网互联的仿真系统并对系统的稳态运行以及三相短路故障

情况进行了仿真分析。为深入研究该输电技术奠定了基础。

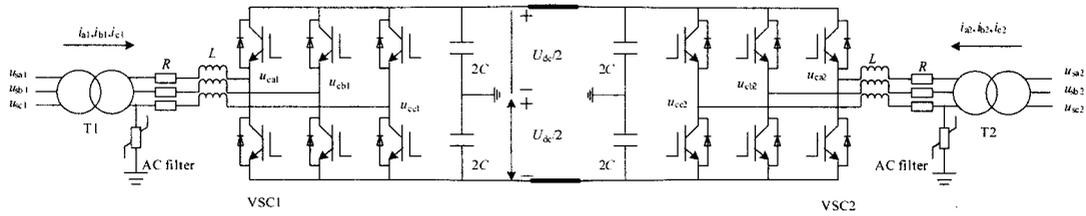


图1 柔性直流输电系统结构
Fig.1 System structure of VSC-HVDC

1 系统结构与工作原理

如图1为以两电平VSC为例的柔性直流输电系统结构图。该系统以可关断电力电子器件和电压源型变换器（VSC）为基础，运用PWM调制方式，以背靠背或地下电缆及海底电缆为传输媒介实现电能传输。换流变压器及电抗器是VSC与交流系统之间功率传输的纽带，并起到抑制换流器输出电压、电流中开关频率谐波的作用。交流滤波器滤除交流侧的高次谐波。直流侧电容为受端提供电压支撑，并具有减小直流侧电压谐波的作用。

逆变状态。见图2(b)，当 U_s 幅值大于 U_c 幅值时，变流装置消耗无功；当 U_s 幅值小于 U_c 幅值时，变流装置释放无功。因此，通过控制 U_c 的角度与幅值就可实现系统有功无功的四象限运行，如图2(c)示。

柔性直流输电技术有定直流电压控制、定有功功率控制、定无功功率控制以及定交流电压控制模式。在两端输电系统中，一端必须采用定直流电压控制模式，系统控制模式的选定依应用场合的不同而有差异。

2 系统建模

在图3中，假定换流器采用PWM调制方式，则交流侧三动态微分方程写成向量形式为：

$$u_{cabc} = u_{sabc} - R_X i_{abc} - L_X \frac{di_{abc}}{dt} \quad (1)$$

$$\text{设 } u_{sabc} = U_s \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{pmatrix}, U_s \text{ 为 } u_{sabc} \text{ 的幅值。}$$

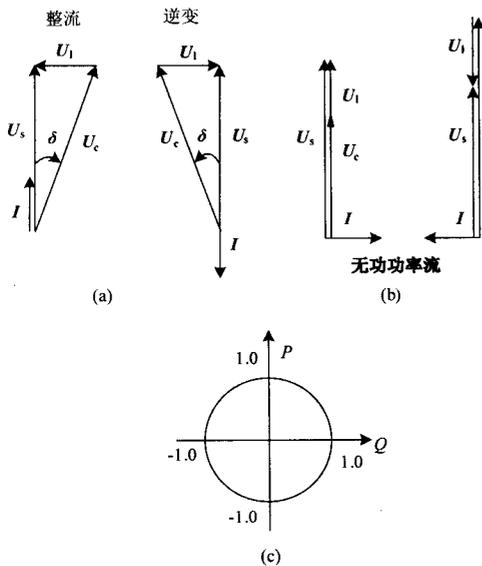


图2 VSC功率矢量图
Fig.2 Power vector diagram of VSC

见图1， U_s 为电网侧相电压， U_c 为VSC换流器交流侧相电压， I 为流经电抗器的相电流， δ 为 U_s 和 U_c 的夹角。如图2(a)示， δ 为正时，有功功率从交流端流向换流器，装置运行于整流状态； δ 为负时，有功功率从换流器流向交流端，装置运行于

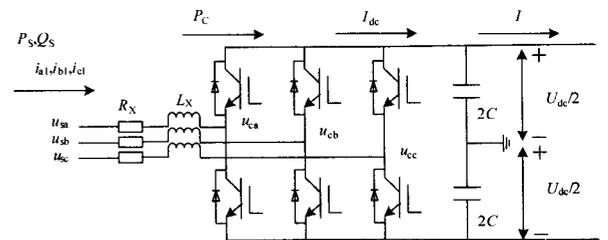


图3 VSC换流器电路结构
Fig.3 Structure of VSC converter

图中： R_X, L_X 为交流侧变压器等效阻抗与换流器系统等效阻抗和； u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 分别为交流系统三相相电压瞬时值； u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 分别为换流器交流输出端相电压瞬时值； i_a, i_b, i_c 分别为交流侧三相线电

流瞬时值 (设定从交流电网流向换流器的方向为电流正方向); I_{dc} 为直流侧从换流器流出的电流; I_1 为从换流器注入到直流输电线路的电流。

$$u_{cabc} = \frac{MU_{dc}}{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \delta) \\ \sin(\omega t + \delta - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + \delta + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

其中: M 为调制度, δ 为 PWM 调制初始相位角。整理式 (1), 并对其两端同乘 PARK 矢量变换矩阵 $P^{[14]}$ 得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{L_X} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{s0} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_X} \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \\ u_{c0} \end{bmatrix} - \frac{R_X}{L_X} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

直流侧的动态方程为:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = I_{dc} - I_1 \quad (3)$$

如图 3, 定义 P_s 、 Q_s 为从交流系统注入到 VSC 的有功功率和无功功率, P_c 为换流器从交流侧吸收的并传送到直流线路的有功功率。其中:

$$P_s = P_c + P_1 = \frac{3}{2} (u_{sd} i_d + u_{sq} i_q) \quad (4)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (u_{sq} i_d - u_{sd} i_q) \quad (5)$$

$$P_c = \frac{3}{2} (u_{cd} i_d + u_{cq} i_q) \quad (6)$$

式 (4) 中: P_1 为功率传输过程中交流侧变压器、电抗器以及换流器上消耗的有功功率。实际应用中, 我们最关心的是 P_c 和 Q_s , 需要控制这两个变量。运行中由于 P_1 占的比率很小, 可以忽略, 此时 P_c 近似等于 P_s 。令交流侧 a 相相电压初始相位角为 0° , 则可以得到: $u_{sd} = |u_s|$, $u_{sq} = 0$ 。式 (5)、(6) 可以写成:

$$P_c \approx P_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_d \quad (7)$$

$$Q_s = -\frac{2}{3} u_{sd} i_q \quad (8)$$

由此可见, 可以通过分别控制 i_d , i_q 实现有功及无功的解耦控制。

3 控制器设计

在系统数学模型分析的基础上, 根据异步电网互联运行的工作原理, 本文设计了不同的控制器, 实现对系统功率传输的控制。

柔性直流输电系统的控制结构分为电流内环以及有功、无功或者直流电压外环控制, 如图 4 示。在三相对称系统中, 没有零序分量, 因而由式 (2) 可得:

$$u_{cd} = u_{sd} - (L_X \frac{di_d}{dt} + R_X i_d) + \omega L_X i_q \quad (9)$$

$$u_{cq} = u_{sq} - (L_X \frac{di_q}{dt} + R_X i_q) - \omega L_X i_d \quad (10)$$

式 (9)、(10) 基于前馈控制算法, 由此可实现 VSC 电流内环 (i_d , i_q) 的解耦控制。图 4 中, PLL 锁相环用于锁定电网侧电压相位, 然后对电网侧电流 i_{abc} 进行 PARK 矢量变换得到 i_{dq} , i_{dqref} 与 i_{dq} 作差通过 PI 调节及解耦运算得到 u_{cdqref} , 而后对 u_{cdqref} 进行 PARK 矢量逆变换得到的调制波 u_{cabref} 最终传至 PWM 调制器产生相应的调制脉冲。

直流电压控制中, 直流电压 U_{dc} 与直流电压参考值 U_{dcref} 的偏差经过 PI 调节器, 通过限幅环节, 转换为 i_d 的参考值 i_{dref} 。

有功外环控制结构中采用稳态逆模型控制。如图 4 有功功率指令值经过速度调节器调节得到有功功率参考值 P_{ref} , 一方面 P_{ref} 经过换算作为 i_{dref} 稳态部分, 另一方面, 有功功率 P 与 P_{ref} 的偏差经过 PI 调节器作为 Δi_{dref} 部分, 最终 i_{dref} 稳态部分与 Δi_{dref} 部分叠加成为 i_d 的参考值 i_{dref} 。

据式 (7) 可得: $i_d = \frac{2P}{3u_{sd}}$, 则比例因子

$$K = \frac{2}{3u_{sd}}$$

稳态逆模型结构大大提高了功率 P 对 P_{ref} 的跟踪速度, 因而可以通过设计功率指令的速度调节器, 实现控制有功功率以一定模式变化。

由于无功功率相应速度要求较低, 因此不采用稳态逆模型结构设置。由无功控制外环得到 i_{qref} 输入至电流内环调节器中。

4 仿真分析^[16]

基于上述柔性直流输电系统模型和控制方法, 本文采用 Matlab 仿真软件对柔性直流输电系统实现异步交流网络互联运行方式进行了仿真研究。仿真结构如图 5 所示。

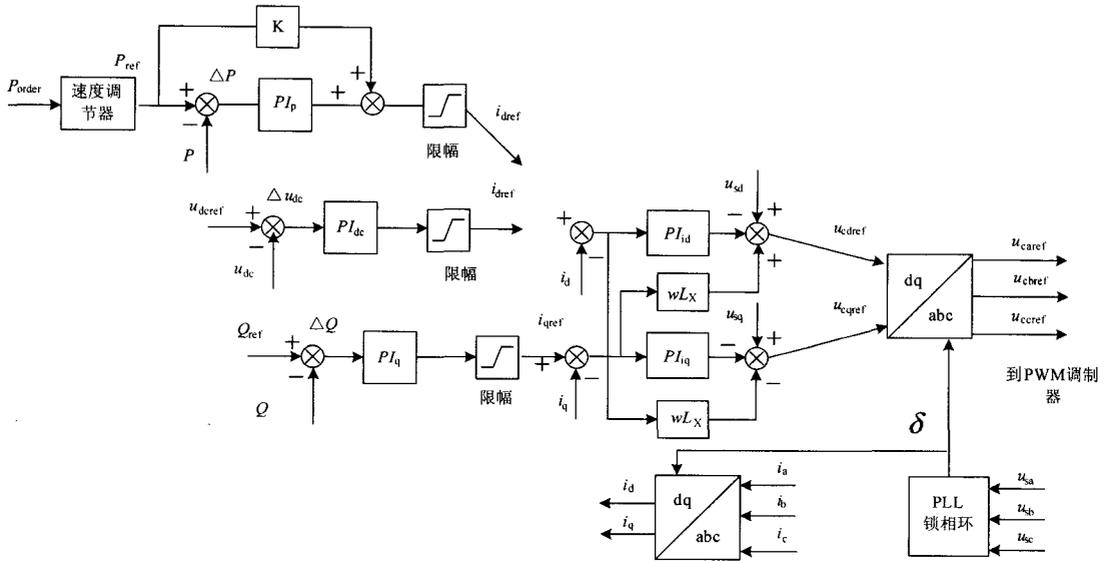


图 4 VSC 基于同步旋转坐标系的柔性直流输电系统控制结构图

Fig.4 VSC-HVDC controllers based on dq0-axis

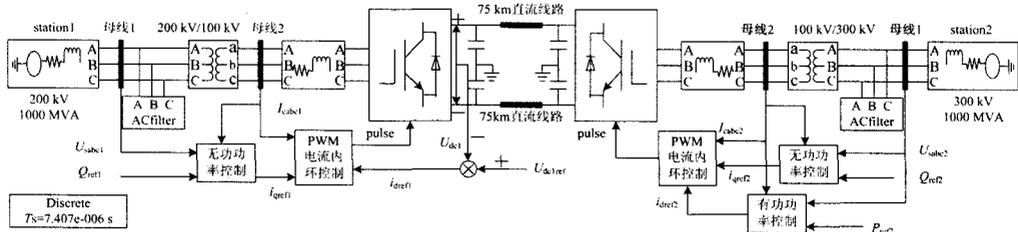


图 5 异步电网互联控制系统

Fig.5 VSC-HVDC control system used for asynchronous interconnection

如图 5, station1 电网参数为 200 kV/1000 MVA/50 Hz, 变压器变比 200 kV/100 kV, Y/d11 接线, 额定容量 100 MVA; station2 电网参数为 300 kV/1000 MVA/50 Hz, 变压器变比 300 kV/100 kV, Y/d11 接线, 额定容量 100 MVA; 两侧电抗器及等效电阻参数为 $0.15 \Omega + 3/2 \times \pi \times 50 \text{ H}$; 采用正弦脉宽调制 (SPWM) 方式, 开关频率为 1350 Hz; 直流侧运行电压为 200 kV; 直流电容 $2C=100 \mu\text{F}$; 直流线路长 75 km, 线路电阻 $0.15 \Omega/\text{km}$, 电感 $0.792 \text{ mH}/\text{km}$, 电容功率调节过程中两端功率调节也互不影响, 系统实现了两端功率 $14.4 \times 10^{-3} \mu\text{F}/\text{km}$ 。station2 电网电压相位超前 station1 180° 。station1 采用直流电压控制与无功功率控制模式, station2 采用有功功率控制与无功功率控制模式。控制系统中有功功率速度调节器设置为上升率为 $\pm 200 \text{ MW}/\text{s}$ 的匀加速调节器。

仿真结果及分析如下:

(1) 功率抬升试验

电网电压均处于额定状态; 0.5 s station2 出无功 -20 Mvar, 0.7 s 达到平衡, station1 出无功 -40 Mvar, 0.9 s 达到平衡; 0.75 s station2 控制以 200 MW/s 的速度出有功至 -100 MW, 1.25 s 达到平衡。仿真波形如图 6 所示。

图 6(a)中, 当 0.5 s、0.75 s、1.5 s 系统两端有功无功发生变化时, 直流电压波动很小, 小于 0.5 pu。如图 6, 0.5 s 系统两端无功调节均没有超调; 0.75 s 时, station2 调节过程中, 有功可以迅速跟踪指令值实现有功功率的匀加速控制; 图 6(b)中, station2 侧有功无功调节过程互不影响, 系统实现了有功无功的解耦控制; 功率调节过程中两端功率调节也互不影响, 系统实现了两端功率独立控制见图 6。

(2) 三相短路故障试验

电网电压均处于额定状态; 有功功率由 station2 流向 station1, station2 吸收无功功率 20 Mvar,

station1 发出无功功率 40 Mvar, 1.5 s station2 侧变压器与电网之间发生三相短路故障, 1.6 s 故障消失, 2.2 s 系统完全恢复。1.5 s 短路故障发生时直流

电压有 15% 跌落, 0.05 s 以后直流电压恢复额定值。波形如图 7 示。

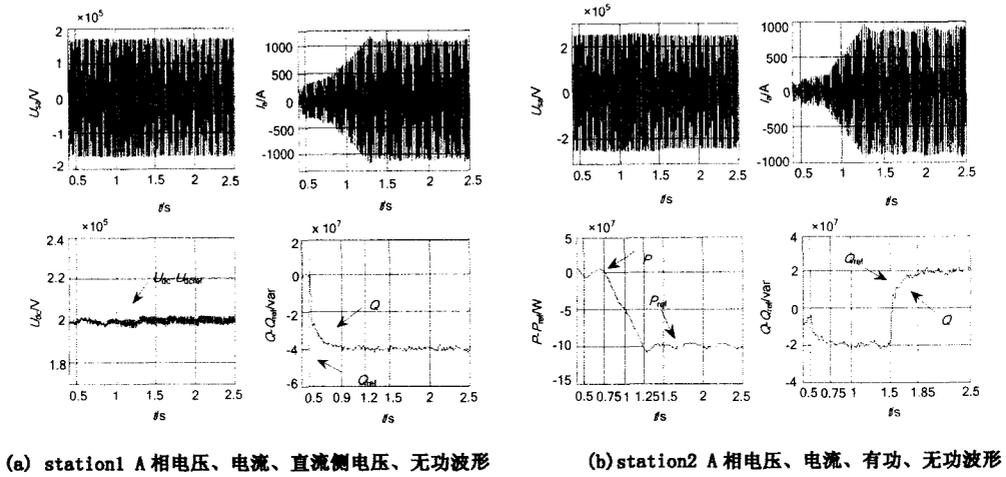


图 6 功率抬升试验仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of converter when power stepping up

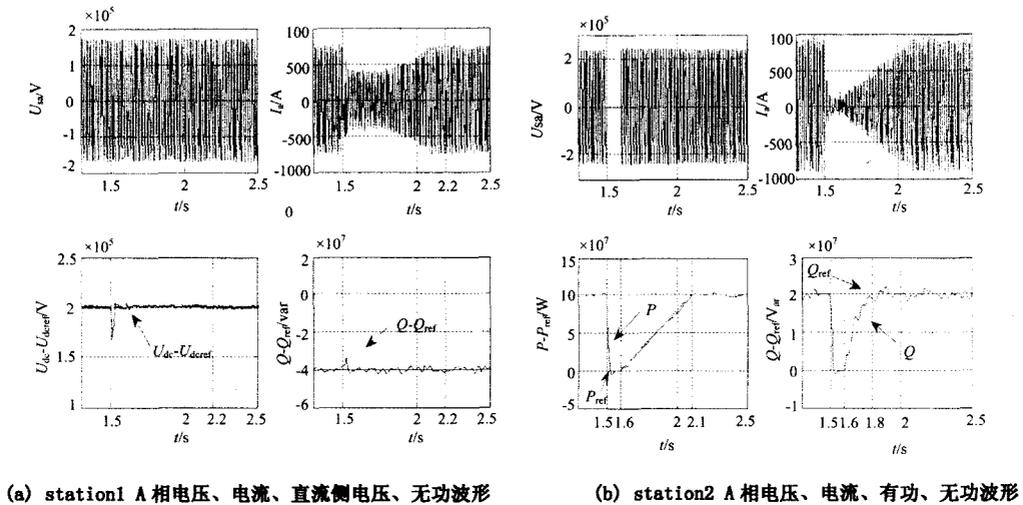


图 7 短路试验仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms of converter for short-circuit test

如图 7(a), 在 1.5 s 发生三相短路故障时, 直流侧电压有 15% 的跌落, 0.051 s 后电压恢复至故障前的额定值。station2 侧发生短路故障时, station2 网侧电压、有功、无功均降至 0, 而 station1 侧仍以设定的无功功率正常运行而不受故障影响。

如图 6、7 示, 该系统功率调节实现了四象限运行。

5 结论

本文建立了柔性直流输电系统基于 dq0 旋转坐标的数学模型及其控制方法, 并且模拟了异步电网

互联的运行情况。仿真结果表明, 该方案控制效果良好, 所设计的控制器具有较好的抗扰性、稳态精度及较高的响应速度; 采用基于 dq0 旋转坐标的直接电流控制策略, 可以很好地实现有功、无功解耦控制, 进而实现换流站间功率的独立控制及功率流的四象限运行; 采用稳态逆模型的控制结构大大提高了有功功率的响应速度, 实现对有功功率的匀加速控制。

参考文献

- [1] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技

术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-80.

LI Geng-yin, Lü Peng-fei, LI Guang-kai, et al. Development and Prospects for HVDC Light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-80.

[2] 张桂斌, 徐政. 直流输电技术的新发展[J]. 中国电力, 2000, 33(3): 32-35.

ZHANG Gui-bin, XU Zheng. The New Development of HVDC Technology[J]. Electric Power, 2000, 33(3): 32-35.

[3] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明, 等. 一种新型的直流输电技术-HVDC Light[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 12-16.

HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. New High Voltage Direct Current Transmission Technology HVDC Light[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 12-16.

[4] Agelidis V G, Demetriades G D, Flourentzou N. Recent Advances in High-Voltage Direct-Current Power Transmission Systems[A].in:IEEE International Conference on Industrial Technology[C]. 2006. 206-213.

[5] Adel Farag, Martyn Durrant, Herbert Werner, et al. Robust Control of a VSC HVDC Terminal Attached to a Weak AC System[A]. in:Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications[C].2003.173-177.

[6] YIN Ming, LI Geng-yin, LI Guang-kai, et al. Modeling of VSC-HVDC and its Active Power Control Scheme[A]. in: 2004 International Conference on Power System Technology[C]. 2004.1351-1355.

[7] Padiyar K R, Prabhu N. Modelling, Control Design and Analysis of VSC based HVDC Transmission Systems[A]. in: 2004 International Conference on Power System Technology[C].2004. 774-779.

[8] Singh B, Panigrahi B K, Mohan D M. Voltage Regulation and Power Flow Control of VSC based HVDC System[A].in:International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems[C].2006. 1-6.

[9] Jovicic D, Lamont L A, Xu L. VSC Transmission Model for Analytical Studies[A].in: Power Engineering Society General Meeting,IEEE[C].2003.1737-1742.

[10] 郑超, 盛灿辉, 魏强, 等. VSC-HVDC 输电系统的电磁暂态建模与仿真[J]. 高电压技术. 2003,33(11): 94-99.

ZHENG Chao, SHENG Can-hui, WEI Qiang, et al. Electromagnetic Transient Modeling and Simulation for VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2003,33(11): 94-99.

[11] CHEN Hai-rong, XU Zheng, ZHANG Fan. Nonlinear Control for VSC based HVDC System[A]. in: Power Engineering Society General Meeting,IEEE[C].2006.1-5.

[12] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.

ZHANG Gui-bin, XU Zheng, WANG Guang-zhu. Steady-state Model and its Nonlinear Control of VSC-HVDC System[J]. Proceedings of the CSEE, 22(1): 17-22.

[13] ZHANG Gui-bin, XU Zheng, CAI Ye. An Equivalent Model for Simulating VSC based HVDC[A].in: Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/PES[C].2001.20-24.

[14] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[15] Qahraman Behzad, Rahimi Ebrahim, Gole A M. An Electromagnetic Transient Simulation Model for Voltage Sourced Converter based HVDC transmission[A].in: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C].2004.1063-1066.

[16] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2008-12-23; 修回日期: 2009-01-07

作者简介:

姚为正(1967-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力电子技术;

邓祥纯(1981-), 男, 研究生, 主要研究方向为电力电子技术;

易映萍(1967-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力电子技术. E-mail: yyp@usst.edu.cn

(上接第 70 页 continued from page 70)

[4] 张艳丽, 王新, 刘梁亮, 等. 基于区域分布的中压配电网无功规划[J]. 陕西电力, 2007, 35(8): 35-37.

ZHANG Yan-li, WANG Xin, LIU Liang-liang, et al. Planning of Reactive Power in Medium-voltage Distribution Network Based on Local Distribution[J]. Shanxi Electric Power, 2007, 35(8): 35-37.

收稿日期: 2008-11-26; 修回日期: 2009-02-09

作者简介:

王超(1981-), 男, 工程师, 硕士, 现从事地区电网调度运行工作; E-mail: zjueewc@163.com

张永东(1964-), 男, 专科, 现从事调度管理工作;
滕杰(1980-), 男, 高工, 现从事地区电网生产和技术管理工作。