

向无源网络供电的 VSC-HVDC 控制性能实验研究

杨用春, 赵成勇

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 无论是正常时采用 VSC-HVDC 向孤立负荷供电, 还是在电力系统发生大停电事故后的初期阶段利用 VSC-HVDC 使系统负荷快速恢复, 其物理模型都可以看作是通过 VSC-HVDC 向无源网络供电。在给出两相同步旋转坐标系下的整流侧数学模型及控制策略和逆变侧数学模型及控制策略的基础上, 建立了一套开放的具有上层控制和底层控制的向无源网络供电的 VSC-HVDC 物理实验系统。结合黑启动过程中过电压的抑制和需要保持电压频率的稳定两个方面, 在实验系统上进行了一系列的实验, 结果表明该 VSC-HVDC 实验系统具有良好的控制性能。

关键词: VSC-HVDC; 无源网络; 控制策略; 黑启动; 实验研究

Experimental study on control performance of VSC-HVDC connected to passive network

YANG Yong-chun, ZHAO Cheng-yong

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Whether supplying power to passive network via VSC-HVDC normally, or quickly restoring power load by using VSC-HVDC at the first stage when the power system is black out, in fact the physical model of the system is the VSC-HVDC connected to passive network. First the mathematic model and control strategy of rectifier and inverter in two phase synchronous rotating coordinate is given, then an open physical experimental device of VSC-HVDC connected to passive network that has upper and lower controller is set up. To suppress overvoltage and maintain the stabilization of voltage and frequency in black start progress, a lot of experiments are carried out. The results show that the experimental device of VSC-HVDC has good performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50577018), Grand Project Pre-research of North China Electric Power University(No.200713001), and the Young Teacher's Research Foundation of North China Electric Power University(No.200811001).

Key words: VSC-HVDC; passive network; control strategy; black start; experimental study

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0031-05

0 引言

基于电压源型换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)技术采用脉宽调制技术 PWM (Pulse Width Modulation), 以全控型的功率器件如 IGBT 等作为开关器件, 能够对 VSC-HVDC 传输的有功、无功功率实现四象限独立控制; 另外由于 VSC 电流能够自关断, 可以工作在无源逆变方式, 所以不需要外加的换相电压, 受端系统可以是无源网络, 克

服了 HVDC 受端必须是有源网络的根本缺陷, 因此利用 VSC-HVDC 为远距离的孤立负荷送电成为其一个重要的应用领域^[1-4]。

同时, 在电力系统发生大停电事故后的恢复过程中, 充电空载长线路时的工频过电压与合闸空载长线路时的操作过电压是在制定启动方案时考虑的重要因素^[6-10]。考虑到 VSC-HVDC 具有灵活的电压控制能力, 将其作为黑启动的手段时将比传统的交流系统调节方法解决空载长线路的过电压问题更加容易。在 2003 年美加“8.14”大停电后的纽约州长岛恢复供电过程中, 即验证了 VSC-HVDC 具备的优越性。

另外, 在电力系统黑启动过程中, 保持系统电

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50577018); 华北电力大学重大项目预研基金(200713001); 华北电力大学青年教师科研基金(200811001)

压和频率稳定至关重要，每一操作都需要监视系统重要节点的频率和电压水平。而在系统的恢复过程中，负荷大幅度变化将会造成电压和频率的较大波动。如果采用 VSC-HVDC 作为系统黑启动电源时，由于 VSC-HVDC 具有灵活的电压调节能力和稳定的频率控制能力，可以使黑启动过程更加平稳。

无论是正常时 VSC-HVDC 向孤立负荷供电，还是在电力系统发生大停电事故后利用 VSC-HVDC 这一重要手段在最短的时间内使系统恢复带负荷的能力，都是基于 VSC-HVDC 具有快速灵活的电压、频率等控制能力，而它们的物理模型都可以看作是通过 VSC-HVDC 向无源网络供电。

由于数字仿真必须依赖于所建立的数学表达式，系统各元件的数学模型准确与否直接影响仿真结果的真实性和可靠性，但是像 VSC-HVDC 这些 FACTS 系统的数学模型是很难精确描述的，物理实验则可以避免这个问题而更加真实地反映出系统的动态过程。正是考虑到物理实验的重要性，本文首先给出了两相旋转坐标系下 VSC-HVDC 的整流侧和逆变侧的数学模型，并在此基础上得到了整流侧定直流电压和定交流侧无功功率的控制策略，能实现交流侧的有功和无功功率解耦控制，同时得到了逆变侧定交流电压的矢量控制策略，能使逆变侧无源网络的频率不随负荷的变化而变化并灵活控制交流侧电压，然后建立了开放的具有上层控制和底层控制的向无源网络供电的 VSC-HVDC 物理实验系统，最后从过电压时柔性控制和负荷大幅度改变时的控制两个角度分别考察了该 VSC-HVDC 实验系统的控制性能。

1 整流侧数学模型及控制策略

由于 VSC 通常采用 PWM 控制，VSC-HVDC 整流侧实际上是一个 PWM 整流器，原理图如图 1 所示。

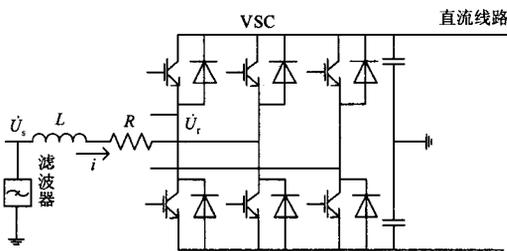


图 1 VSC-HVDC 整流侧原理图

Fig.1 Rectifier principle diagram of VSC-HVDC

图 1 中交流侧三相动态微分方程为

$$R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于在两相同步旋转坐标系 (dq) 上的模型控制起来更加方便，有

$$\begin{cases} Lp i_d - \omega L i_q + R i_d = u_{sd} - u_{rd} \\ Lp i_q - \omega L i_d + R i_q = u_{sq} - u_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{sd}, u_{sq} 为电网电压的 dq 分量; u_{rd}, u_{rq} 为三相交流侧电压的 dq 分量; i_d, i_q 为输入端电流的 dq 分量; ω 为电网角频率。

将同步旋转坐标系的 d 轴定向于电网电压空间矢量 U_s 的方向上，有

$$\begin{cases} u_{sd} = U_{sm} \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{sm} 为电网电压矢量的幅值。采用恒功率坐标变换，电网侧功率可表示为

$$\begin{cases} P_s = u_d i_d + u_q i_q = U_{sm} i_d \\ Q_s = u_q i_d - u_d i_q = -U_{sm} i_q \end{cases} \quad (4)$$

由式 (4) 可知，电网侧有功功率、无功功率分别正比于 i_d 和 i_q 。进一步分析可知， i_d 指令值来自直流母线电压误差的调节输出；而 i_q 指令值则决定了电网侧的功率因数。

PWM 整流器目前得到广泛应用的是双闭环矢量控制技术，可以实现有功和无功控制的解耦。

令 $u_{d1} = L_s p i_d + R_s i_d$ ， $u_{q1} = L_s p i_q + R_s i_q$ ，可推导出有功、无功解耦的矢量控制策略为：

$$\begin{cases} u_{rd} = -u_{d1} + (\omega L_s i_q + u_{sd}) \\ u_{rq} = -u_{q1} - (\omega L_s i_d) \end{cases} \quad (5)$$

基于 u_{d1} 、 u_{q1} 的表达形式，可方便采用 PI 调节器获得，这就形成了内环电流控制。

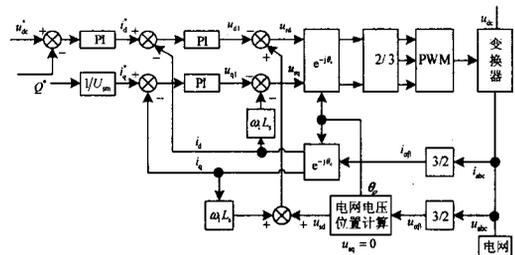


图 2 整流侧矢量控制框图

Fig.2 Vectorial control block of rectifier

对于向无源网络供电的 VSC-HVDC 来说, 整流侧的控制首要目标是维持输出直流电压恒定, 这是其他一些控制的基础, 其次才是在此基础上的控制向交流系统发出和吸收的无功功率。基于以上思想可以得到电网侧变换器矢量控制框图如图 2 所示。

2 逆变侧数学模型及控制策略

图 3 为向无源网络供电 VSC-HVDC 的逆变侧, 它是无源系统, 相较于连接有源交流系统的整流侧来说控制可以更加简单。

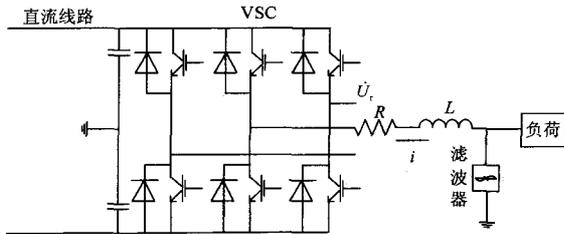


图 3 VSC-HVDC 逆变侧原理图

Fig.3 Inverter principle diagram of VSC-HVDC

在本文中逆变侧 VSC 控制的基本思想是将输出的三相交流电压变换到 dq 坐标系下的一个电压矢量, 通过控制该电压矢量来控制三相交流电压, 从而实现对交流电压幅值和频率的控制。

由于逆变侧是无源的, 所以需要有一个电压位置生成器来生成电压的角度, 角度的变化快慢将决定 VSC 输出的频率; 将逆变侧 VSC 输出电压经滤波器滤波, 然后通过 dq 变换后再反馈进入 PI 调节器进行调节, 随指令 u_d^* 、 u_q^* 输出的 u_{rd} 、 u_{rq} 将决定 VSC 输出的电压。逆变侧矢量控制框图如图 4 所示。

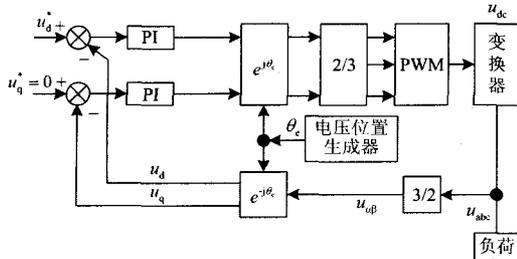


图 4 逆变侧矢量控制框图

Fig.4 Vectorial control block of inverter

3 实验系统的结构和参数

3.1 整体结构

建立的实验系统是一个开放的物理系统, 主要包括主电路和控制两部分, 其中控制部分又分为上

层控制和底层控制, 两者通过 RS232 通信, 整体结构如图 5 所示。其中上位机对应上层控制, 由 PC 机构成, 具有对系统各电量的监测和丰富的高级控制功能以及完成控制命令的下发; 下位机对应底层控制, 由数字信号处理器 DSP 构成, 实现前面所叙述的相应控制策略和具有过压过流等保护功能, 是实验系统的基本的控制保护系统。

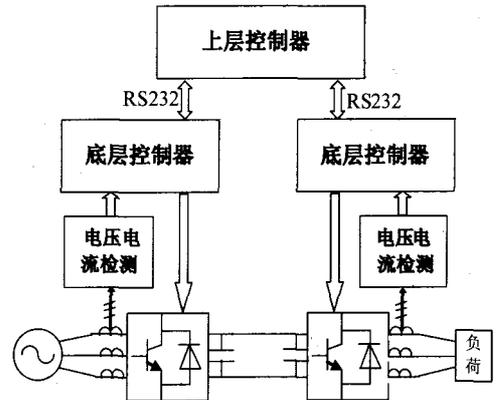


图 5 实验系统控制框图

Fig.5 Control block of the experiment system

3.2 硬件构成

实验系统的主电路采用的是通用换流器平台, 它包括 12 个 H 桥, 开关元件为 IGBT, 通过这 12 个 H 桥中的 4 个, 即可构成一个完整的 VSC-HVDC 硬件一次系统。表 1 为实验系统的主要参数。

表 1 实验系统参数

Tab.1 Parameters of the experiment system

系统参数	参数
三相交流电源线电压有效值	380/220 V
三相变压器变比	2:1
交流滤波电感	5 mH
单侧直流电容	9 400 μ F
直流侧电压	300 V
开关管	SKM200GB128D
驱动模块	CONCEPT 2SD315
主控芯片	TMS320LF2407 A
电压霍尔传感器	LEM LV100
电流霍尔传感器	LEM LT208

VSC-HVDC 一次系统由三相交流电源、变压器、VSC、直流线路、电抗器等组成。VSC-HVDC 实验系统整流侧由市电 380 V 经变压器变换成线电压为 190 V 的电压, 然后依次接入空气开关, 然后通过三相电感接入三相 IGBT 桥, IGBT 桥的直流侧接有直流电容, 逆变侧主电路与整流侧完全一样, 两者通过直流母线联接在一起。

控制电路又包括主控板、光纤转换板和驱动电路三部分。主控板(即下位机)是以 TI 公司的 DSP(TMS320LF2407A)为核心的扩展而成的,其上的 AD 采样模块对调理板得到的信号进行采样,然后按照相应的控制策略进行计算,最终得到由 DSP 送出的 6 路 PWM 脉冲,这些脉冲经过光电转换板将电信号转换成光信号后送入驱动电路后接到 IGBT 触发端子上进行触发。

4 实验结果及分析

在建立的实验系统上进行了一系列验证其控制能力的实验,实验数据采用 TEK 数字示波器 TDS2024 和 LEM 电能质量分析仪 TOPAS2000 记录。

4.1 过电压时柔性控制实验

黑启动时充电空载长线路时的工频过电压是由于线路上的无功功率过剩引起的,是一个稳态现象。由于 VSC 本身是一个逆变器,可以灵活控制其逆变出的交流电压,所以可以使接在 VSC-HVDC 的空载长线路首端的电压水平控制得低一些,具体数值与不同长度的线路有关,这里着重从实验角度研究 VSC-HVDC 输出电压具有灵活可控的特性。在图 4 的控制框图中可以看出,通过上位机发出的命令可以灵活修改 u_d^* 定值,从而可以实现空载线路首端的电压灵活可控。

合闸空载线路时线路末端的操作过电压决定于其工频过电压,并且操作过电压在合闸后的 3~5 个工频周期后过渡过程即可完毕,达到稳定状态。因此,在合闸后的 3~5 个工频周期内降低空载线路末端的工频过电压是抑制其操作过电压的一种有效措施,使末端躲过操作引起的过电压,在这个时间段之后,按照不引起工频过电压给定 VSC-HVDC 的输出电压指令。

上述两个方面过电压抑制的控制本质是一样的,就是基于 VSC 的灵活的电压控制性能,改变 VSC-HVDC 的输出电压。具体到实验装置上,就是上位机通过串口 RS232 发送 u_d^* 指令到基于 DSP 的下位机就可实现 VSC-HVDC 输出电压的灵活改变。

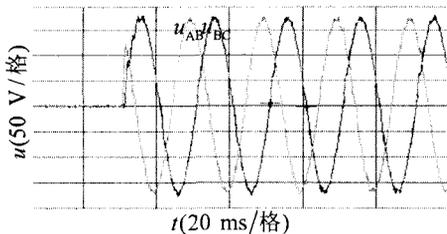


图 6 直接启动时的电压
Fig.6 Voltage of direct start

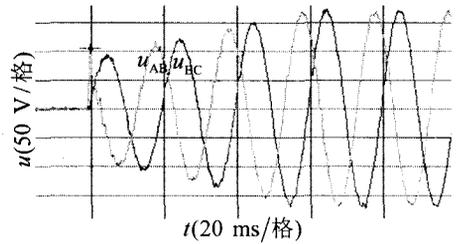


图 7 柔性控制启动的电压
Fig.7 Voltage of soft control start

从图 6、7 可以看出,通过电压的柔性控制,即在初始时刻有一定的值,但是比较小,然后经过 4 个工频周期上升到最后稳定的控制值,这样就能够使空载长线路末端躲过操作过电压阶段,保证了电气设备安全运行。同时从上面的实验也可以得出 VSC-HVDC 的输出电压是可以灵活改变的结论。

4.2 负荷大幅度改变时控制实验

系统黑启动过程中,保持电压和频率的稳定是很重要的,但是系统的恢复过程必然有负荷的大幅波动,势必造成电压和频率的较大波动,这是一对必然的矛盾,这样传统的黑启动下系统负荷的恢复速度是不够迅速的,如果系统具有很强的控制能力,就可以将电压和频率的波动控制在一定范围内而不影响系统的运行。由于在理论上向无源网络供电的 VSC-HVDC 具有频率不变特性和电压灵活可控特性,如果将 VSC-HVDC 作为系统恢复的手段,那么被恢复的无源系统的频率将由 VSC-HVDC 逆变侧输出电压的频率决定,而此频率在 VSC 的控制中很容易使其恒定不变,这就解决了频率的稳定问题;负荷的大幅改变必然造成电压的波动,由于 VSC-HVDC 相当于一台无惯量的发电机,它可以快速响应,而且由于中间的直流电容环节,可以作为一个无功电源使被接于它的被恢复系统的节点电压波动在一定范围内,从而保持电压的稳定。因此采用 VSC-HVDC 作为系统黑启动手段时将大大加快系统的恢复过程。

实验以电炉作为无源负载,通过空气开关的开合投切电炉来模拟负荷的大幅度改变。

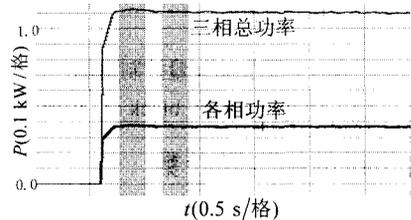


图 8 由空载到满载的功率波形图
Fig.8 Power from no-load to full-load

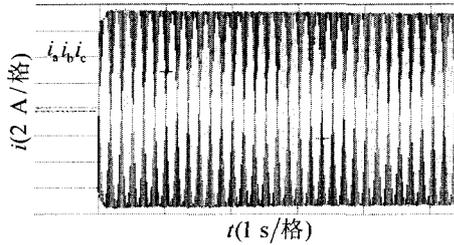


图 9 由空载到满载的三相电流波形图
Fig. 9 Current from no-load to full-load

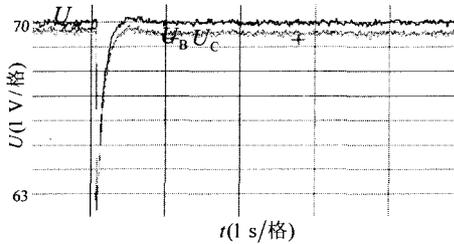


图 10 空载到满载时输出电压

Fig.10 Voltage from no-load to full-Load

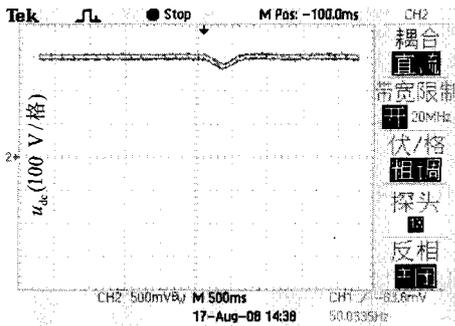


图 11 输出电压和直流电压

Fig.11 Output voltage and DC voltage

图 8 和图 9 分别为负荷大幅度改变时的功率波形和电流波形；从图 10 可以看出，VSC-HVDC 的输出电压能够在一定范围内波动，并且能够很快的恢复到输出的指令值，当然由于采用空气开关手动投切，负荷投入的时间较长，以致电压恢复时间比较明显；图 11 为 VSC-HVDC 输出的交流电压和直流环节的电压，可以发现当负荷大幅度改变的情况下，交流电压变化很小，同时直流电压有小的向下波动，这也反映了负荷的投入过程，同时还验证了整流侧能较好地控制直流电压。

5 结论

采用 VSC-HVDC 来进行电力系统黑启动时，工频过电压和操作过电压的抑制都是基于 VSC-HVDC 输出电压具有灵活可控的特点，在建立的实验系统中，通过上位机发出电压调节指令，下

位机自动调节控制使 VSC-HVDC 输出电压的灵活改变，实验结果表明该系统具有良好的电压控制性能。

在电力系统黑启动过程中，保持系统电压和频率稳定非常重要。在建立的实验系统中，通过模拟负荷在大幅度改变情况下，能使被恢复系统频率保持不变，电压在可控的范围内波动，表明该实验系统具有良好的控制性能。

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): 77-81. 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): 77-81.
- [2] Noroozian M, Edris A A, Kidd D, et al. The Potential Use of Voltage-sourced Converter-based Back-to-back Tie in Load Restorations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003,(18):1416-1421.
- [3] WANG Xiao, Ooi Boon-Tech. High Voltage Direct Current Transmission System Based on Voltage Source Converters[A]. in: PESC'90 Record[C]. 325-332.
- [4] 武娟, 任震, 黄雯莹, 等. 轻型直流输电的运行机理和特性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001,29(8): 41-44. WU Juan, REN Zhen, HUANG Wen-ying, et al. Operational Mechanism and Characteristic Analysis of HVDC Light[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2001,29(8):41-44.
- [5] 马燕峰, 赵书强, 顾雪平, 等. 黑启动过程中操作过电压的仿真计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 123-126. MA Yan-feng, ZHAO Shu-qiang, GU Xue-ping, et al. Simulation of Switching Overvoltage in Black-start[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 123-126.
- [6] 刘艳, 顾雪平, 张丹. 基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5):32-37, 94. LIU Yan, GU Xue-ping, ZHANG Dan. Data Envelopment Analysis Based Relative Effectiveness Assessment of Power System Black-start Plans[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5):32-37, 94.
- [7] Larsson T, Petersson A, Edris A, et al. Eagle Pass Back-to-back Tie: A Dual Purpose Application of Voltage Source Converter Technology[A]. in: Proc 2001 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conf[C]. 2001.1686-1691.
- [8] 熊惠敏, 房鑫炎, 郁惟镛, 等. 电力系统全网停电后的恢复——黑启动综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 12-17.

(下转第 66 页 continued on page 66)

System[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1998.

[3] 靳建峰, 李洪涛, 沈黎明, 等. 集合式并联电容器故障、不正常运行分析及防范措施[J]. 电力电容器, 2006, (2): 40-42.
JIN Jian-feng, LI Hong-tao, SHEN Li-ming, et al. Analysis and Measure of Parallel Assembling Capacitor with Malfunction and Abnormal Operation[J]. Power Capacitor, 2006, (2): 40-42.

[4] Fernandez L M, Saenz J R, and F. Jurado. Dynamic Models of Wind Farms with Fixed Speed Wind Turbines[J]. Renewable Energy, 31:1203-1230.

[5] Akhmatov V, Knudsen H. An Aggregate Model of a Grid-connected, Large-scale, Offshore Wind Farms for Power Stability Investigations—importance of Windmill Mechanical System[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24:709-717.

[6] Ledesma P, Usaola J, Rodriguez L. Transient Stability of a Fixed Speed wind Farm[J]. Renewable Energy, 2003, 28:1341-1355.

[7] Akhmatov V. Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power System with Large Amount of Wind Power, Doctoral Dissertation[D]. Technical University of Denmark, 2003.

[8] Salman S K, Teo A L J. Windmill Modeling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-connected Wind Power-based Embedded

Generator[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2):763-802.

[9] 孙建锋. 风电场建模和仿真研究(硕士学位论文)[D]. 清华大学, 2004.

[10] Akhmatov V, Sobrinsk K. A Static var Compensator Model for Improved Ride-through Capability of Wind Farms[J]. Wind Engineering, 2004, 28(6): 715-728.

[11] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[12] Akhmatov V, Knudsen H. An Aggregate Model of a Grid-connected, Large-scale, Offshore Wind Farm for Power Stability Investigations—Importance of Windmill Mechanical System[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, (24): 709-717.

[13] Pöller M, Achilles S. Aggregated Wind Park models for Analyzing Power System Dynamics[EB/OL]. <http://www.digsilent.de/consulting/publications,2006-09-30>.

收稿日期: 2008-11-19

作者简介:

李环平(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: 349378040@qq.com

杨金明(1962-), 男, 副教授, 主要研究方向为控制理论及其电气传动在新能源中的应用。

(上接第 35 页 continued from page 35)

XIONG Hui-min, FANG Xin-yan, YU Wei-yong, et al. The Summary of Black-Start-Restoration of Electrical Power System after Blackout[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(3): 12-17.

[9] 高远望, 顾雪平, 刘艳, 等. 电力系统黑启动方案的自动生成与评估[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 50-54.
GAO Yuan-wang, GU Xue-ping, LIU Yan, et al. Automatic Derivation and Assessment of Power System Black-Start Schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 50-54.

[10] 卢向东, 赵成勇. 基于 VSC-HVDC 的空载长线路过电压的抑制策略研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 462-466.
LU Xiang-dong, ZHAO Cheng-yong. Study of Control Strategies of Suppressing Overvoltage on Overhead Lines by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 462-467.

[11] 殷自力, 梁海峰, 李庚银, 等. 基于模糊自适应 PI 控制的柔性直流输电系统实验研究[J]. 电力自动化设备,

2008, 28(7): 49-53.

YIN Zi-li, LIANG Hai-feng, LI Geng-yin, et al. Experimental Study of VSC-HVDC Under Fuzzy Adaptive PI Control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 49-53.

[12] 刘淳, 张兴, 谢震. 柔性直流输电的系统实验[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(9): 1347-1350.
LIU Chun, ZHANG Xing, XIE Zhen. Experimental Research on the Flexible HVDC System[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2008, 31(9): 1347-1350.

收稿日期: 2009-05-13;

修回日期: 2009-06-15

作者简介:

杨用春(1982-), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向为电压源型直流输电及柔性交流输电; E-mail: yongchunyang@126.com

赵成勇(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高压直流输电与 FACTS 技术、电能质量分析与控制、电力系统 RTDS 建模等。