

# 连接海上风电场的基于直接功率控制的三电平 VSC-HVDC

解大<sup>1</sup>, 解蕾<sup>1</sup>, 张延迟<sup>2,3</sup>, 艾芊<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 华东理工大学自动化系, 上海 200237;  
3. 上海电机学院电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 研究了连接海上风电场的基于电压源换流器的 VSC-HVDC 系统。多电平逆变器应用于 VSC-HVDC 系统提高系统传输容量并改善电能质量问题。利用基于功率控制的方法对 VSC-HVDC 系统进行了仿真, 实现了双侧的独立控制, 风电场侧由风机带换流器组成, 采用基于滞环比较的功率控制, 而系统侧三电平换流器采用基于直接功率控制, 三个滞环控制器分别控制有功功率、无功功率和中点电压。仿真结果证实了基于此算法的 VSC-HVDC 系统连接大型海上风电场, 可以正常稳定地运行。系统侧三电平换流器降低谐波含量并提高功率因数。

**关键词:** VSC-HVDC; 直接功率控制; 多电平; 滞环; 谐波

## Three-level VSC-HVDC based on direct power control connecting offshore wind farm

XIE Da<sup>1</sup>, XIE Lei<sup>1</sup>, ZHANG Yan-chi<sup>2,3</sup>, AI Qian<sup>1</sup>

(1. Electrical Engineering Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
2. Automation Department, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;  
3. Electrical Engineering Department, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** VSC-HVDC system based on voltage source converter connecting large-scale offshore wind farm is illustrated. To improve the transmission capacity and solve power quality problem, multilevel inverter is used in VSC-HVDC system. The simulation system is built on the basis of power control algorithm, implementing the independent control on bi-lateral sides. On wind turbine side, there are wind generators with respective converter, adopting the power control method based on hysteresis comparison and the three-level converter on system side adopting multi-level direct power control, achieved by three hysteresis control devices for active power, reactive power and midpoint voltage. The results on the simulation prove that under large transmission capacity, VSC-HVDC system connecting large-scale offshore wind farm and power system can operate under a normal and stable situation. Owing to the three-level inverter on system side, the power quality is better such as low harmonics and high power factor.

**Key words:** VSC-HVDC; direct power control; multi-level inverter; hysteresis; harmonics

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0098-06

## 0 引言

近年来, 环境保护和可持续发展被越来越多地强调, 清洁能源比如风力发电以及相关风力发电技术得到更多的关注。海上风电场技术发展迅猛, 由于海上风能资源比陆地上丰富, 风速比陆地上大 20%, 发电量相应地大 70%, 而且由于不受噪音标准的限制, 海上风机的风轮转速比陆地上大 10%, 因而风机利用效率提高 5%~6%左右<sup>[1-3]</sup>。

由于海上风电场和电网间的连接距离较远, 相对于传统的交流输电, 选择高压直流输电体现了其优越性。VSC-HVDC 系统能够分别灵活控制有功和

无功功率以保持电压和频率的稳定, 在远距离大容量输电、海底电缆供电、两个交流系统之间的非同步联络、在互连电力系统中控制潮流等方面得到了广泛的应用<sup>[4-6]</sup>。

多电平逆变器<sup>[7-11]</sup>被应用在 VSC-HVDC 系统能够提高传输容量且解决电能质量问题。文献[12]提出了一种新型的用于多电平变流器的多电平最优空间矢量 PWM 控制方案 (MOSV PWM), 并采用异步电动机调速系统对其进行验证。文献[13]提出了基于参考电压分解的多电平直接 PWM 算法, 分析并提出了一种适用于混合七电平逆变器的改进的死区效应补偿方法, 并研制样机验证了此方法的有

效性和正确性。文献[14]提出了一种多电平基于扩展直接功率控制的算法, 应用于二极管嵌位三电平逆变器, 并对中点电压进行控制, 提高系统的动态响应速度, 并在试验台数据中得到验证。

本文将基于直接功率控制的三电平逆变器应用于 VSC-HVDC 系统, 其算法较空间矢量算法来说相对简单, 通过三个滞环控制器来控制有功功率、无功功率和中点电压。本文采用带分散风机控制同时直流输电并网, 建立了基于功率控制的 VSC-HVDC 系统的仿真模型, 风机侧换流器采用了基于滞环比较的功率控制算法, 而系统侧换流器采用了三电平基于直接功率控制算法, 分别进行独立控制, 仿真结果证明基于功率控制算法的 VSC-HVDC 系统能够在不同的转速下动态地保持直流电压稳定, 中点电压通过滞环控制, 有效抑制了波动。三电平换流器的应用增大传输容量并且改善电能质量问题, 谐波分量减少。

## 1 海上大型风电场联网方式

海上大型风电场联网方式一般采用两种方法, 多台风机并联后连接到一个换流器再并网, 如图 1 (a) 所示或者采用带分散风机控制直接并网, 如图 1 (b)。

图 1 (b) 采用带分散风机控制同时直流输电并网的方式, 每一个风力发电机有自己的换流器, 通过并联多个风电机组, 提高传输容量, 并且可以分别控制单个风机工作在其理想的状态, 与图 1 (a) 所示的方法相比, 其可靠性大大提高, 并不会因

为单一换流器故障导致全部风机不能输送电能到电网<sup>[15]</sup>。

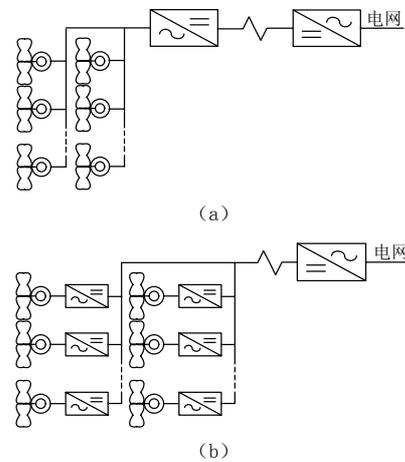


图 1 海上大型风电场联网方式

Fig. 1 Connecting network methods of large-scale offshore wind farm

## 2 基于功率控制算法

本文对基于功率控制的 VSC-HVDC 系统进行研究, 以单台风机控制为例, 图 2 为基于功率控制的 VSC-HVDC 系统图。图中风机侧换流器整流后连接到直流输电线, 然后通过系统侧换流器并入交流系统。本设计中, 两侧换流器采用不同的控制原理, 风机换流器采用了基于滞环比较的功率控制算法, 而系统侧换流器采用了三电平基于直接功率控制算法<sup>[16]</sup>, 且只需获得本侧的数据即可完成双侧的协调控制。

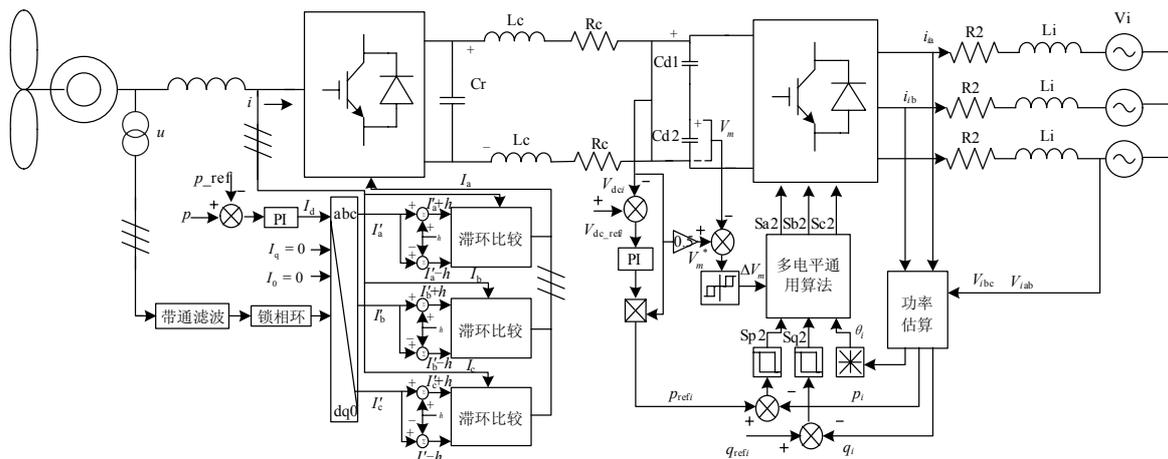


图 2 基于功率控制的 VSC-HVDC 系统图

Fig. 2 Control scheme of VSC-HVDC based on power control

### 2.1 基于滞环比较的功率控制算法

由于风速是随机而不可预测的, 在系统设计时

就必须考虑风速的不确定性; 此外, 要稳定直流电压并将功率稳定地输出到系统侧电网, 就必须对

电机的输出功率加以控制。功率的物理表现形式为风机的转速。

取有功功率瞬时值  $p$  和参考值  $p_{ref}$  的差值经过 PI 环节得到  $I_d'$  作为反馈调节量, 将其经过坐标转换即可得到滞环的比较值, 即

$$\begin{bmatrix} I_a' \\ I_b' \\ I_c' \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} I_d' \\ I_q' \\ I_0' \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中坐标变换矩阵

$$P = \begin{pmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r & 1 \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & -\sin(\theta_r - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & -\sin(\theta_r + 120^\circ) & 1 \end{pmatrix}$$

$$I_q = 0 \quad I_0 = 0$$

相角  $\theta_r$  的值为三相电压采样值通过滤波、锁相环后得到。

滞环比较控制的开关频率非常关键, 最后输出控制 IGBT 的通断, 如果开关频率过大, 将影响 IGBT 的正常工作; 但开关频率越小, 滞环量跟踪偏差就越大, 从而要选择适合的开关频率的大小。输入单独就一相而言类似于单桥臂 VSR 滞环。输入值即为有功功率的静差, 将功率量作为滞环的输入, 即可维持有功功率的稳定。

滞环控制器设置了滞环偏量  $h$ , 利用比较器控制 IGBT 的输出。输入的等效电流  $I_a'$  经过滞环偏量后得到了  $I_a' + h$  和  $I_a' - h$ , 即为滞环的环宽。当输入的  $I_a'$  满足  $I_a' - h \leq I_a' < I_a' + h$  时, 不发出脉冲, 但当  $I_a'$  持续变大或者变小, 并超出范围后, 发出脉冲用以触发 IGBT。

### 2.2 多电平基于直接功率控制算法

直接功率控制是基于电动机的直接转矩控制概念和瞬时功率理论, 一般通过采用逻辑开关表, 同时对瞬时有功和无功进行调节, 现已经广泛应用于二电平逆变器中。

基于直接功率控制的三电平逆变器控制算法主要的目标是找到那些满足控制要求 (即满足三个滞环控制器的输出, 分别是有功功率、无功功率和中点电压) 的逆变器电压向量, 并用一个判定算法选择其中最适用的, 为达到这个目的, 需要计算出电网电压向量  $V_i$  在  $\alpha$ - $\beta$  上的投影, 并且检查它是否在每个逆变器电压矢量对应的增长功率或减少功率区域; 一旦每个逆变器电压矢量都按照功率的增加和减少以及中点电压升高或降低被分类, 判定算法

从那些满足控制要求的逆变器电压矢量中选出一个适用的矢量。需要关注的是如何界定每个逆变器电压矢量的有功功率不变和无功功率不变, 即  $dp=0$ ,  $dq=0$  的轨迹, 从而只要通过判断电网电压向量  $V_i$  属于哪个范围即可。

#### (1) 有功功率不变化轨迹

假定电网电压向量  $V_i$  在  $q$  轴的分量为 0, 即只存在  $d$  轴上的分量  $v_d$ , 则有功功率和无功功率可以定义为:

$$p_i = v_d i_d \quad q_i = -v_d i_q \quad (2)$$

则  $\Delta p_i = \Delta i_d$ 、 $\Delta q_i = -\Delta i_q$

对于整个系统来说,  $dp=0$  的条件是逆变器电压矢量在  $d$  轴上的投影等于电网电压向量  $V_i$ , 换句话说就是  $\Delta V$  和  $d$  轴是垂直的。如图 3 (a) 所示, 选择逆变器电压向量为  $V_1$  时, 而且  $V_1$  在  $d$  轴上的投影和电网电压向量  $V_i$  重合, 则对于此电网电压向量  $V_i$  来说, 选择逆变器电压矢量  $V_1$ , 其有功功率输出还是保持不变, 而以  $V_1$  的模为直径的圆是系统有功功率不变化的轨迹图。

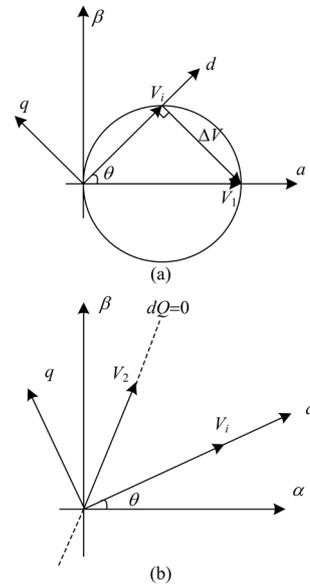


图 3 功率无变化轨迹

Fig.3 Geometric construction of the no power change locus

轨迹把  $\alpha$ - $\beta$  分成两个部分, 一部分是使有功功率增长的区域, 一部分是使有功功率减少的区域。所以如果电网电压向量  $V_i$  在给定的逆变器电压向量形成的圆中, 那么作用这个逆变器电压向量后将会使有功功率增长; 反之, 有功功率就会减少。



会影响  $V_m$  的变化。但是即使在一个电压向量大小地标么值差不多为 1 的稳定状态下，事实上  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  依然会频繁的改变意味着  $V_m$  可以很频繁的被满足，使用这种方法控制直流回路中性点电压成为可能。

### 3 带分散风机控制的VSC-HVDC系统仿真

根据图 2 的算法原理，建立如图 1 (b) 的基于功率控制的带分散风机的 VSC-HVDC 仿真系统，其中风电场设有风机 1 台，其额定功率  $P_N=6$  MW。风机换流器采用了基于滞环比较的功率控制算法，而系统侧换流器采用了三电平基于直接功率控制算法，分别对风机侧及系统侧的交流电压、电流波形，直流电压波形和传输功率进行研究分析。

图 6 为风机侧三相交流电流波形以及系统侧三相交流电流波形。

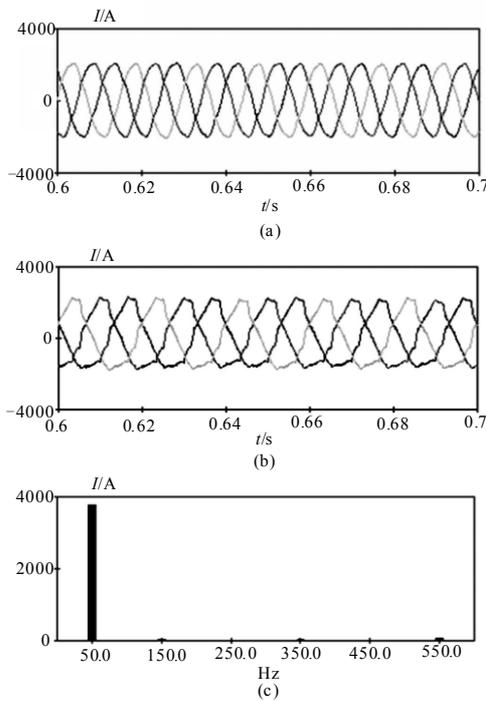


图 6 风机侧和系统侧三相交流电流波形

Fig.6 Three-phase AC current on wind turbine side and system side

图6 (a) 是风机侧三相交流电流波形，电流值为2 014 A；图6 (b) 是系统侧三相交流电流波形，电流值为2 008 A；图6 (c) 是系统侧A相电流的谐波分析，由于系统侧三电平换流器，谐波分量很小，畸变因数THD是1.88%。从图6可以看出，三相交流电流波形为正弦波，三相平衡，波形情况良好。

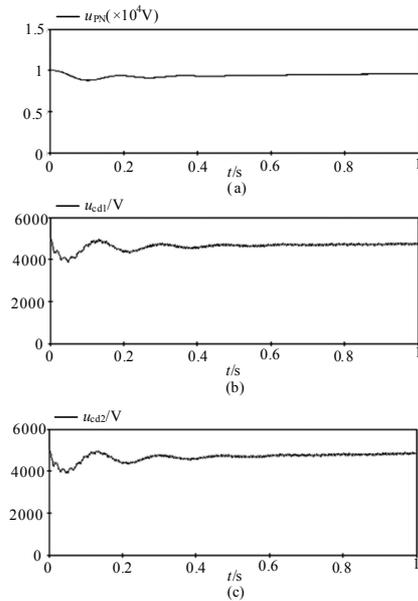


图 7 系统侧直流电压波形图

Fig.7 DC voltage on system side

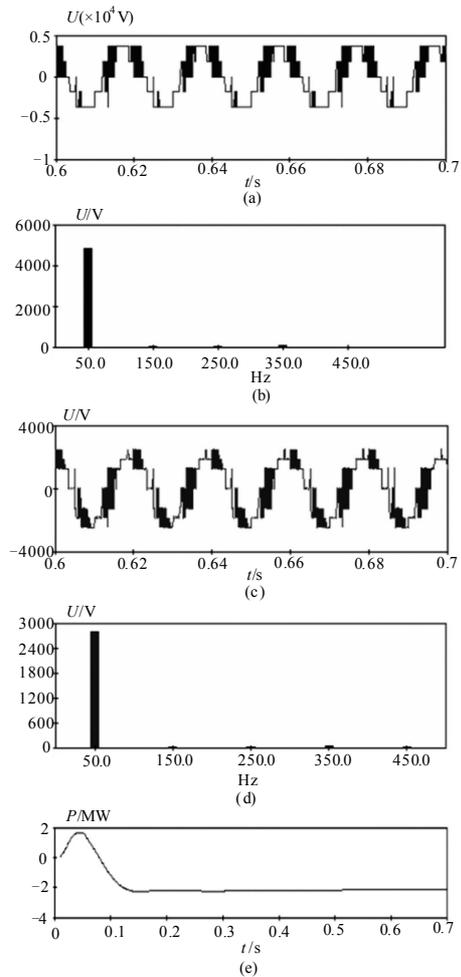


图 8 三电平换流器输出电压及传输功率波形图

Fig.8 Output voltage and transmission power of three-level inverter

图7为直流电压波形,其中,图7(a)为系统侧直流电压波形。图7(b)和图7(c)分别为系统侧电容Cd1和Cd2两端电压波形,中点电压滞环控制使中点电压输出稳定,抑制了其波动。

图8(a)为三电平逆变器AB相输出电压,从图中看出,近似正弦,波形情况良好;图8(b)为其相应的谐波分析,可以看出,各次谐波和基波相比都较小,THD在2.32%左右;图8(c)为三电平逆变器A相线电压;图8(d)为其相应的谐波分析,THD在2.44%左右。和两电平相比,畸变因数减少了一半。

#### 4 结论

本文研究了带分散风机控制和直流输电的海上风电场并网控制,利用基于滞环比较的功率控制和三电平直接功率控制,建立了VSC-HVDC系统仿真模型:

(1) 基于上述算法的VSC-HVDC系统实现了风机侧和系统侧换流器分别独立控制。风机侧协调控制有功功率和无功功率,可以稳定运行实现能量传输的功能,其直流电压稳定于10 kV DC。

(2) 系统侧通过三个滞环控制器分别控制有功功率、无功功率和中点电压。由于三电平直接功率控制算法的应用,电能质量得到了改善,谐波分量和畸变因数减少。

#### 参考文献

[1] Per-Erik Bjorklund, Kailash Srivastava, et al. HVDC light modeling for dynamic performance analysis[C]//Power Systems Conference and Exposition. 2006: 871-876.

[2] Kjell Eriksson. Operational experience of HVDC light[C]//AC-DC Power Transmission. 2001: 205-210.

[3] Axelsson U & Holm A, Liljegren C, et al. The gotland HVDC light project experiences from trial and commercial operation[C]//CIRED. 2001.

[4] Liu Y H, Arrillega J, Watson N R. Cascaded H-bridge voltage reinjection-part II: application to HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008: 1-7.

[5] 胡兆庆, 毛承雄, 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, et al. New high voltage direct current transmission technology-HVDC light[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 12-16.

[6] Corsi S, Danelli A, et al. Emergency-stability controls through HVDC links[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. 2002: 774-779.

[7] 薛俊伟, 王庆贤. 一种多电平逆变器的分析方法和仿真[J]. 兰州交通大学学报, 2006, 25(3): 100-106. XUE Jun-wei, WANG Qing-xian. A control strategy and simulation of multilevel inverters[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2006, 25(3): 100-106.

[8] Jose Rodriguez, Setfen Bernet, Wu Bin, et al. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 2930-2945.

[9] 桂红云, 姚文熙, 吕征宇. 多电平变换器的拓扑结构和控制策略[J]. 电源技术应用, 2004, 7(8): 493-497. GUI Hong-yun, YAO Wen-xi, Lü Zheng-yu. Topologies and control strategies of multilevel inverters[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2004, 7(8): 493-497.

[10] Zhou George, Wu Bin, Xu Donglai. Direct power control of a multilevel inverter based active power filter[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. 2004: 498-503.

[11] ZHANG Yu, WU Feng-jiang, SUN Li, et al. Simulation study on four-quadrant cascade multilevel inverter based on AC voltage sensorless simple cell[C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2007: 3457-3462.

[12] 薄保中, 苏彦民, 马学亮. 多电平最优空间矢量PWM控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 89-92. BO Bao-zhong, SU Yan-min, MA Xue-liang. Investigation on multilevel optimal space vector PWM control technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 89-92.

[13] 刘文华, 陈远华, 张新成, 等. 混合七电平逆变器的变频调速PWM控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 58-63. LIU Wen-hua, CHEN Yuan-hua, ZHANG Xin-cheng, et al. Variable frequency drive PWM control strategy for hybrid 7-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 58-63.

[14] Eloy-Garcia J, Arnaltes S, Rodriguez-Amenedo J L. Extended direct power control for multilevel inverters including DC link middle point voltage control[J]. IET Electr Power Appl, 2007, 1(4): 571-580.

[15] 解蕾, 解大, 张延迟, 等. 带分散风机控制和直流输电的海上风电场并网控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 58-62. XIE Lei, XIE Da, ZHANG Yan-chi, et al. HVDC grid-connection control of off-shore wind farm with dispersed with turbine control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 58-62.

(下转第152页 continued on page 152)

2006(5): 50.

[4] 冯迎春, 谢翠菊. 农村配电设备防盗预警系统——中压载波技术在实时在线监测方面的新尝试[J]. 电力设备, 2003, 4 (6): 56-59.  
FENG Ying-chun, XIE Cui-ju. Early warning system for rural distribution equipments——new development of the MV carrier technology applied to real time online monitoring[J]. Electric Equipment, 2003, 4 (6): 56-59.

[5] 关永峰, 陆珉. 输电线路防窃报警系统[J]. 电子技术, 2006(9): 54-56.  
GUAN Yong-feng, LU Min. Guard against theft and alarm system for transmission line[J]. Electronic Technology, 2006(9): 54-56.

[6] 田轶华. 10 kV系统单相接地故障的判断与处理[J]. 内蒙古科技与经济, 2006(7): 133-134.  
TIAN Yi-hua. Judgment and disposal of single-phase grounding fault for 10 kV system[J]. Inner Mongolia Science Technology and Economy, 2006(7): 133-134.

[7] 黄芸. 10 kV系统单相接地故障分析及处理[J]. 中国科技信息, 2005, 2 (23): 122.  
HUANG Yun. Analysis and disposal of single-phase grounding fault for 10 kV system[J]. China Science and Technology Information, 2005, 2 (23): 122.

[8] 曾文慧. 10 kV中压电网中性点谐振接地方式[J]. 四川电力技术, 2002, 25 (5): 38-40.  
ZENG Wen-hui. Resonant neutral grounded mode of 10 kV medium-voltage network[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2002, 25 (5): 38-40.

[9] 周原, 赵立进, 康鹏, 等. 贵州省10 kV城市配电网中性点接地方式[J]. 电网技术, 2006, 30 (20): 62-65.  
ZHOU Yuan, ZHAO Li-jin, KANG Peng, et al. Neutral grounding mode of urban distribution networks in Guizhou province[J]. Power System Technology, 2006, 30 (20): 62-65.

[10] 陈刚, 尹小飞. 防止10 kV中性点不接地系统中铁磁谐振和弧光接地时对电压互感器的影响[J]. 西北电力技  
术, 2006, 34 (1): 70-71.  
CHEN Gang, YIN Xiao-fei. Prevent the effect of ferro-resonance & arc light earthing upon potential transformer in 10 kV neutral point unearthed system[J]. Northwest China Electric Power, 2006, 34 (1): 70-71.

[11] 孙鸣, 吴珏. 基于TC45模块的GPRS无线抄表系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2005(6): 44-45.  
SUN Ming, WU Jue. GPRS wireless meter reading system based on TC45[J]. Automation & Instrumentation, 2005(6): 44-45.

[12] 黄承安, 张跃, 云怀中. 基于GPRS 的远程仪表监控系统[J]. 电测与仪表, 2003, 40 (8): 42-45.  
HUANG Cheng-an, ZHANG Yue, YUN Huai-zhong. Monitor system of remote meter based on GPRS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, 40(8): 42-45.

[13] 李学海. PIC单片机实用教程(提高篇)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

[14] 窦振中. PIC单片机原理和程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版, 1998.

[15] 郝玉东, 何保荣, 陈根永. 10 kV电网设备防盗、防损坏系统报警阈值的分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (1): 117-120.  
HAO Yu-dong, HE Bao-rong, CHEN Gen-yong. Analysis of the alert threshold for guard against theft and shatter system of 10 kV electric power equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28 (1): 117-120.

收稿日期: 2009-11-02; 修回日期: 2010-02-03

作者简介:

郝玉东 (1962-), 男, 副教授, 主要从事电力系统载波、电力设备防盗以及计算机工业控制等方面的研究工作; E-mail: hyd\_5876@yahoo.com.cn

陈根永 (1964-), 男, 副教授, 主要从事电力系统分析与规划的研究。

(上接第 103 页 continued from page 103)

[16] 解蕾, 解大, 张延迟, 等. VSC\_HVDC 的虚拟磁链直接功率控制算法[J]. 电力科学与工程, 2009, 25 (1): 14-18.  
XIE Lei, XIE Da, ZHANG Yan-chi, et al. VSC-HVDC System based on VF-DPC[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(1):14-18.

作者简介:

解大 (1969-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真; E-mail: xieda@sjtu.edu.cn

解蕾 (1983-), 女, 研究生, 从事电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真;

张延迟 (1967-), 男, 硕士, 副教授, 在读博士, 从事并网型风力发电机和电力系统仿真。

收稿日期: 2009-08-20; 修回日期: 2009-10-13