

模糊和神经网络控制方法在高压直流输电系统阻尼调制研究中的应用与发展

陈小龙, 毛晓明, 叶锋, 储灵施

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 分析传统PI控制的优缺点, 指出其存在的问题。对模糊控制和神经网络在高压直流输电系统阻尼调制中的研究现状进行全面的综述, 重点分析这些研究所采取的技术路线和实现方式, 指出存在的问题。对存在的问题, 对进一步的研究动向进行展望。

关键词: 高压直流; 阻尼调制; 模糊控制; 人工神经网络; 在线自学习

Application and development of fuzzy logic and neural network control in HVDC damping modulation

CHEN Xiao-long, MAO Xiao-ming, YE Feng, CHU Ling-shi

(Guangdong University of Technology, Automation Department, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of traditional PI control are analyzed firstly. Then this paper mainly summarizes the recent research developments of high voltage direct current damping control using fuzzy logic and neural network control. The design and implementation of these control strategies are emphasized and the problems lying ahead are pointed out.

Key words: HVDC; damping modulation; fuzzy logic; ANN; on-line self-learning

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)05-0098-05

0 引言

高压直流输电系统通过电力电子装置完成交-直-交变换, 实现对电能的传输。由于不受同步运行的稳定性限制, 具有传输容量大、输电距离远、功率调节迅速灵活等特点, 在远距离大容量输电和大区电网互联方面具有独特优势, 近年来在我国电力系统得到了长足的发展。

截至2007年10月, 中国直流输电线路总长度达7 085 km, 输送容量达1 856万千瓦, 线路总长度和输送容量均居世界第一位。这些直流工程主要集中在我国的南方电网和华东电网, 分别是: 南方电网1 800 MW、±500 kV天生桥-广州直流输电工程, 3 000 MW、±500 kV贵州-广东I回直流输电工程和3 000 MW、±500 kV贵州-广东II回直流输电工程; 华东电网1 200 MW、±500 kV葛洲坝-上海直流输电工程, 3 000 MW、±500 kV三峡-常州直流输电工程, 3 000 MW、±500 kV三峡-上海直流输电工程; 此外

还有华中电网与南方电网异步联网的3 000 MW、±500 kV三峡-广东直流输电工程, 西北电网与华北电网之间的360 MW灵宝背靠背直流工程。计划2009年投运的云南-广东5 000 MW、±800 kV直流输电工程将是全世界第一个特高压直流工程。从第八届国际高压直流输电用户会议上获悉, 到2020年, 中国共将建成15个±800 kV的特高压直流输电工程, 成为世界上直流输电工程数目最多的国家。

目前, 我国控制大容量、多落点直流输电系统的经验尚显不足。如何充分利用直流控制的独特优势改善交直流电力系统的稳定性, 正成为电力界和控制界广泛关注的新问题, 一大批理论研究成果相继报道。本文对这些研究成果进行了评述, 并对进一步的研究动向进行了展望。

1 直流阻尼调制的基本原理

阻尼控制, 即抑制发电机转子在暂态过程中的转速变化。对图1所示含交、直流并联联络线的两区域电力系统, 我们把附加在直流系统功率定值上的与发电机转子间转速差 $\Delta\omega$ 成比例的附加转矩 $\Delta T_D = K_D \cdot \Delta\omega$ 称为“阻尼转矩”。根据双机系统与

基金项目: 广东省教育厅专项重点实验室基金项目 (IDSYS200701)

单机-无穷大系统的对应关系, 扰动后等值机组在从 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow g$ 的功角摇摆过程中, 处于加速状态, 即: $\Delta\omega > 0$ 。此时, 若在直流系统中附加功率分量 $K_D \cdot \Delta\omega$, 可同时减小加速面积和增大减速面积。而在机组回摆过程中, $\Delta\omega < 0$, 此时直流阻尼调制减小直流传输功率, 仍将同时减小加速面积和增大减速面积, 从而有效增强阻尼、平息振荡。常用的直流调制信号包括两侧换流站频率差 Δf 、相角差 $\Delta\theta$ 和平行交流联络线潮流 $P_{ac}^{[3]}$ 。

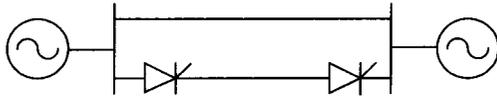


图1 含交、直流并联联络线的两区域电力系统
Fig.1 Two-area power system with AC/DC interties in parallel

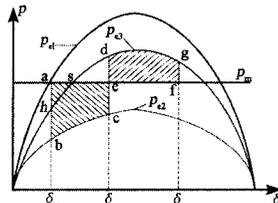


图2 发电机转子相对运动图
Fig.2 Relative motion of generator rotors

2 智能控制方法在直流阻尼调制中的运用

固定参数 PID 控制是电力系统传统的控制方法, 设计过程基于系统线性化的数学模型, 具有简单、易行的优点。交、直流电力系统是一个典型的强非线性、时变系统, 因此, 传统的 PID 控制方法很难保证所有运行方式下、特别是大扰动后控制的鲁棒性和适应性。人工智能控制方法不需要被控对象精确的数学模型, 根据事例进行训练, 具有良好的自适应能力, 在直流控制研究中受到了广泛重视^[4~21], 主要体现在以下几个方面。

2.1 模糊 PID 控制器的研究

为达到最佳的控制效果, PI 控制器需要根据运行工况的改变不断调整控制参数。模糊 PID 控制器能根据系统运行条件的改变产生恰当的控制输出, 具有适应性强、控制鲁棒性好等优点, 在直流调制研究中得到了发展^[4~10]。文献[4]基于 EMTF 仿真环境为高压直流输电系统设计了模糊 PI 控制器, 电流误差及其导数分别作为该控制器比例环节和积分环节的输入信号, 通过模糊规则对它们进行独立地调节, 可较好地阻尼系统的区间振荡。文献[5]将模糊控制原理应用于直流调制研究中, 设计出基于规则的模糊逻辑控制器。模糊理论主要应用于两处: 一是以等值发电机间转子滑差及其导数为输入量, 基于模糊推理, 设计了附加功率调制量; 二是

以电流偏差绝对值及其变化率为输入项, 对电流控制器的比例系数 K_P 和积分系数 K_I 进行模糊设计。仿真结果表明模糊逻辑控制器能根据系统运行条件的改变得到恰当的调制量和控制参数, 与固定参数的传统 PI 控制器相比, 能更好地改善系统阻尼, 抑制交直流系统区间振荡。文献[8]运用 MATLAB/SIMULINK 仿真模块的模糊逻辑工具箱设计了模糊逻辑自适应电流控制器, 根据交直流系统运行方式的变化自动调节控制器参数, 以增强系统抑制区间振荡的能力。文献[9]则设计了自适应模糊 PI 控制器, 首先采用遗传算法获得模糊 PI 控制器的优化控制参数, 然后建立模糊推理系统, 在线调节模糊 PI 控制器的增益, 从而达到较好的控制效果。文献[10]设计了 HVDC 参数自适应模糊 PID 紧急功率支援控制器。控制器输入量取直流两端换流母线处测得的频率偏移量之差, 控制器输出附加于 HVDC 功率整定值上。该方法首先将控制输入及其变化率模糊化, 一方面基于专家经验形成模糊规则, 并进一步发展为 PID 控制策略; 另一方面基于模糊规则, 对控制模糊控制器的控制参数进行在线调整, 从而可在一侧交流系统故障时由另一侧交流系统通过直流线路提供紧急功率支援, 起到稳定系统频率、提高交直流电力系统稳定性的作用。

2.2 模糊协调控制器的研究

针对传统基于本地信号的电力系统控制器在运行时存在的“各自为政”现象, 不少文献提出了协调控制理论^[10~12], 在设计各个控制元件的控制规律时作全盘考虑、综合设计, 使得各局部控制器不仅对其控制对象或局部系统的控制效果为最优, 而且能够协调一致地工作, 使全系统的性能在某种指标下达到最优。文献[11]同时设计了直流阻尼控制器和发电机励磁附加阻尼控制器, 两者的输入信号分别为并联交流联络线有功功率 P_L 和发电机转速偏差 $\Delta\omega$, 其输出作为各自调制信号, 并基于遗传算法对两控制器参数进行协调优化, 以达到整体性能最优。文献[12]针对多馈入交直流系统设计了智能模糊分散协调控制器。该控制器首先人为给定一组状态变量权系数, 然后根据状态变量的模糊识别结果, 基于模糊推理和判断, 调整权矩阵中各状态变量的权值, 从而获得最佳的状态权矩阵, 使控制效果满足工程上多目标的需要, 实现系统的“二次协调”; 接着采取部分输出量反馈最优分散协调控制方法, 求得最优反馈增益矩阵, 完成系统的“一次协调”, 使整个系统的性能达到最优。

2.3 基于暂态能量函数法的模糊控制研究

在高压直流附加控制器的研究中, 基于暂态能量函数发展控制策略也受到了关注。文献[13]、[14]

均以区域间暂态能量下降为目标,通过削减系统的振荡能量以提高交直流互联电力系统的动态稳定性水平。该设计方法无需对大规模电力系统进行特征分析,避免了大电网特征求解的困难。

文献[13]采用与直流线路并联的交流联络线两侧母线测得的相角差 $\Delta\delta$ 及其导数 $\Delta\omega$ 为输入信号,通过坐标变换求得振荡过程中系统状态在 $\Delta\delta-\Delta\omega$ 极坐标系中的幅值和幅角。利用幅角识别振荡状态,基于模糊规则产生功率调制量;利用幅值识别振荡幅度,对功率调制量进行在线调节。两方面结合,从而平滑地调整直流输出功率,有效地增加系统阻尼。文献[14]借鉴文献[13]的设计思想,基于模糊推理进一步实现了HVDC附加控制和励磁控制的协调。控制器的输入信号采用便于测量的并联交流联络线潮流和直流系统的电流。利用交流联络线潮流得到振荡过程中系统状态在 $\Delta\delta-\Delta\omega$ 极坐标系中的幅值和幅角,基于幅角识别振荡状态并产生功率调制量。但当直流电流超过阀的发热限制或触发角达到限值时,改由励磁系统进行功率调制。在有效改善系统阻尼特性的同时,兼顾了直流系统的稳定运行。

2.4 模糊神经网络的研究

随着智能控制理论的发展,神经网络在HVDC的运用研究得到了越来越多学者的关注^[15-21]。文献[15]用神经网络控制器取代HVDC系统传统电流PID控制器,采用结构为N2, 2, 1的三层神经网络,并采用BP算法训练神经网络。神经网络的输入信号是给定的电流值和测得的实际电流值,产生的输出信号为触发角的变化 Δa ,用神经网络来映射输入和输出之间的解析关系,从而可在系统运行工况改变时对 a 进行适当调整,发挥直流系统快速可调的作用,达到较好的控制效果。文献[16]综合PID控制器调节迅速和神经网络控制器自适应能力强的优点,将神经网络与常规PID控制思想相结合,设计出单神经元自适应PID控制器。其控制过程为:将电流参考值 I_{ref} 与直流线路上电流 I_d 之差输入到状态变换器,得到当前 k 时刻 I_{ref} 与 I_d 之差及其一阶、二阶导数。这3个量作为神经元的输入,通过Hebb算法在线训练网络,同时在线修正神经元比例系数 k_n ,训练完毕的输出值 Δa 作为整流器触发角的调整量输入到直流系统。与常规控制器相比,单神经元自适应PID控制器调整参数少,控制参数得以在线调整,具有较强的自适应性;与神经网络控制器相比,由于神经元只有一个,计算量小,训练时间短,响应速度要快许多。

模糊控制能有效处理复杂和不确定性问题,神经网络具有逼近任意非线性映射关系的能力和良好的适应性,因此把模糊控制和人工神经网络相结合,形成模糊神经网络控制理论,是HVDC研究的又一热点^[13-16]。文献[17]提出一种高压直流输电系统在线模糊神经网络直流控制器。该控制器分为2部分,模糊控制部分和在线神经网络自学习部分。模糊控制器以电流误差及其变化率为输入,经模糊推理,产生恰当的直流电流调整要求,作为在线神经网络控制器的输入,神经网络控制器映射输入和触发角变化量之间的解析关系,输出整流器触发角的修正值,实现了定直流电流的控制目标。文献[18]也提出一种HVDC在线模糊神经直流控制器。该控制器分为3部分:模糊控制部分、神经网络控制部分和参数优化部分,模糊控制部分以整流侧交流母线电压相角误差及其变化率为输入,经模糊推理产生直流电流参考值的修正量,作为神经网络的输入,神经网络用于映射输入与触发角变化量之间的解析关系,其输出用于修正整流器的触发角,实现电流控制的目的。为了进一步改善控制效果,该文还基于NETOMAC软件的优化功能,对模糊规则中的三个权系数进行了优化。文献[19]在HVDC系统的逆变侧设计了模糊神经网络控制器,模糊神经逆变控制器分为三部分:模糊逻辑控制部分、神经网络控制部分以及故障与非故障判断部分。提取直流线路逆变侧电压误差 ΔV_{di} 及其变化率 $\Delta \dot{V}_{di}$ 作为模糊控制器的输入,其输出 ΔV 作为神经网络的输入,为了使用较少的神经元和隐含层达到所需精度要求,神经网络控制器分别设计为电压非故障和故障控制器,控制器的启动判断条件是逆变侧直流线路上的电压误差以及变化率的绝对值。结合具有阻尼项的权值调整算法以及变步长BP算法训练神经网络,神经网络的输出用来修正逆变器的触发延迟角 a_i ,达到控制的目的。

由于模糊神经网络控制性能优于传统的PI控制,文献[20]将其分别应用于HVDC系统的整流侧电流控制器和逆变侧电压控制器,并分别选取直流电流误差 ΔI_{dr} 及其变化率 $\frac{d\Delta I_{dr}}{dt}$ 和直流电压误差 ΔU_{di} 及其变化率 $\frac{d\Delta U_{di}}{dt}$ 为模糊逻辑控制器的输入,经模糊规则产生的直流电流和直流电压定值修正量进一步作为神经网络控制器的输入,结合具有阻尼项的权值调整算法以及变步长BP算法训练神经网络,最后由神经网络的输出来修正整流器的触发延

迟角 α_r 和逆变器的触发延迟角 α_i , 从而在整流和逆变站主控制器中均实现了先进智能控制。仿真结果表明, 在两侧换流站同时采用智能控制方法, 可以进一步改善直流系统的动态响应。

3 研究现状所存在的问题及进一步研究动向

以上分析可见, 模糊和神经网络控制方法已在 HVDC 控制研究中受到了广泛的关注和重视, 大量文献对此进行了卓有成效的探究^[4-24], 并取得了丰硕的成果, 但仍存在以下问题:

1) 智能控制缺乏系统化和一致性好的设计方法。控制器的设计往往依赖于设计者的经验, 取决于设计者训练样本的整理和特征输入的选择。

2) 控制器对扰动和运行方式变化的鲁棒性, 控制性能对系统参数不确定性的适应性, 尚缺乏有效的评估方法。

3) 智能控制器的在线训练和自我完善策略, 还有待更深入的探讨。智能控制与其它控制原理有效结合, 以发展相对完善的自我检测和自我完善机制是智能控制技术应用于电网控制这类可靠性要求高的工业控制领域所必须攻克的难题, 是值得进一步深入研究的方向。

4 结语

本文在指出传统 PI 控制存在的问题的基础上, 综合评述了模糊和神经网络控制方法在高压直流输电系统阻尼调制研究中的应用状况, 重点阐述了这些研究所采取的技术路线和实现方式, 指出所存在的问题并对进一步的研究动向进行了探讨, 对今后更深层次的研究具有参考价值和指导意义。

参考文献

- [1] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] 赵晓君, 谢国恩, 等. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO Wan-jun, XIE Guo-en, et al. Engineering Technology of HVDC[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] 毛晓明, 张尧. 直流阻尼调制在大规模交直流电网中的作用[J]. 中国电力, 2007, 40 (4): 25-29.
MAO Xiao-ming, ZHANG Yao. Function of HVDC Damping Modulation in Large Scale AC/DC Power Systems [J]. Electric Power, 2007, 40 (4): 25-29.
- [4] Qi J, Sood V K, Ramachandran V. Incremental Fuzzy PI Control of a HVDC Plant[A]. In: 2005 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) (IEEE Cat No.05CH37713)[C]. 2005.1305-1310.
- [5] 陈汉雄, 刘天琪. 改善交直流混合系统阻尼特性的 HVDC 模糊控制[J]. 中国电力, 2003, 36 (8): 36-39.
CHEN Han-xiong, LIU Tian-qi. Fuzzy Logic Control at HVDC Rectifier for Improving the Damping Performance of AC/DC System[J]. Electric Power, 2003, 36 (8): 36-39.
- [6] Routray A, Dash P K, Panda S K. A Fuzzy Self-Tuning PI Controller for HVDC Links[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996,11(5):669-679.
- [7] Chung T S, FANG Da-zhong. Fuzzy Logic Controller for Enhancing Oscillatory Stability of AC/DC Interconnected Power System[J]. Electric Power Systems Research, 2002,61: 221-226.
- [8] Meah K, Ula S. Investigation on Fuzzy Logic-based Self-tuning Current Controller Applications in HVDC Links[A]. In: 2007 IEEE Region 5 Technical Conference[C]. 2007.266-272.
- [9] WANG Zhong-xian, Ahn T. Design of the Optimal self-tuning Fuzzy-PI Controller for Rectifier Current Control in HVDC System[A]. In: 2006 Chinese Control Conference (IEEE Cat. No. 06EX1357), 2006.
- [10] 邵霞霞, 李兴源. HVDC 紧急功率支援自适应模糊控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2002,26(10): 1-5.
SHAO Zhen-xia, LI Xing-yuan. HVDC Emergency Power Support Control Based on a Adaptive Fuzzy Controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 1-5.
- [11] 朱浩骏, 蔡泽祥, 刘皓明, 等. 多馈入交直流输电系统的模糊控制器协调优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (13): 7-13.
ZHU Hao-jun, CAI Ze-xiang, LIU Hao-ming, et al. Coordinate Optimization Algorithm of Fuzzy Controller in Multi-infeed AC/DC Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26 (13): 7-13.
- [12] 陈汉雄, 刘天琪, 刘群英. 多馈入交直流混合系统的智能模糊分散协调控制[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 9-13.
CHEN Han-xiong, LIU Tian-qi, LIU Qun-ying. Intelligent Fuzzy Control and Decentralized Coordinated Control for Multi-infeed AC/DC System[J]. Power System Technology, 2004, 28 (5): 9-13.
- [13] 房大中, 杨晓东, 宋文南. 提高交直流电力系统稳定性的 HVDC 模糊逻辑控制器 [J]. 电力系统自动化, 2002,26(6):23-27.
FANG Da-zhong, YANG Xiao-dong, SONG Wen-nan. A Fuzzy Logic Controller for the HVDC System to Enhance Stability of AC/DC Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 23-27.
- [14] 徐光虎, 孙衢, 陈陈. HVDC 模糊协调阻尼控制器的设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (12): 18-23.
XU Guang-hu, SUN Qu, CHEN Chen. Design of Fuzzy Coordinated Damping Controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 18-23.
- [15] 刘小磊, 于飞, 刘喜梅. 神经网络在高压直流输电控制系统中的应用[J]. 青岛科技大学学报, 2005, 26 (6): 526-529.

LIU Xiao-lei, YU Fei, LIU Xi-mei. Application of a Neural Network to HVDC Control System[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2005, 26(6): 526-529.

[16] 许秀芳, 李兴源. 高压直流输电单神经元自适应 PID 控制器的研究[J]. 电力设备, 2007, 8 (1): 38-40.
XU Xiu-fang, LI Xing-yuan. Research on Adaptive PID Controller of Single Neuron for HVDC Power Transmission[J]. Electrical Equipment, 2007, 8 (1): 38-40.

[17] 庄侃沁, 李兴源. 高压直流输电系统在线模糊神经控制器的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (24): 3-6.
ZHUANG Kan-qin, LI Xing-yuan. Study of an On-line HVDC Controller Based on Fuzzy Logic and ANN[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 3-6.

[18] 许秀芳, 李兴源, 颜泉, 等. 改善系统暂态稳定性的 HVDC 模糊神经控制器[J]. 继电器, 2004, 32(11): 16-19.
XU Xiu-fang, LI Xing-yuan, YAN Quan, et al. HVDC Fuzzy Neural Controller for Improving the Transient Stability of System[J]. Relay, 2004, 32 (11): 16-19.

[19] 孔慧超, 都洪基, 何洪波, 等. 基于 Matlab 的高压直流输电系统逆变器的模糊神经网络控制研究[J]. 继电器, 2005, 33 (23): 25-30.
KONG Hui-chao, DU Hong-ji, HE Hong-bo, et al. Study of HVDC Fuzzy Neural Converter Controller Based on Matlab[J]. Relay, 2005, 33 (23): 25-30.

[20] 都洪基, 孔慧超, 李启亮, 等. 基于 MATLAB 的模糊神经网络高压直流输电换流控制器的研究[J]. 广东电力, 2006, 19 (4): 5-11.
DU Hong-ji, KONG Hui-chao, LI Qi-liang, et al. Study of HVDC Fuzzy Neural Inverter Controller Based on Matlab[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19 (4):

5-11.

[21] Dash P K, Routray A, Mishra S. A Neural Network Based Feedback Linearising Controller for HVDC Links[J]. Electric Power Systems Research, 1999, 50: 125-132.

[22] 管霖, 程时杰, 陈德树. 神经网络电力系统稳定器的设计与实现[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16 (6): 384-387.
GUAN Lin, CHENG Shi-jie, CHEN De-shu. Design and Implementation of a Neural Network Based Power System Stabilizer[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16 (6): 384-387.

[23] 谭振宇, 程时杰, 魏璇. 基于神经网络的自适应电力系统稳定器[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (15): 1-6.
TAN Zhen-yu, CHENG Shi-jie, WEI Xuan. A Neural Network Based Adaptive Power System Stabilizer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(15): 1-6.

[24] 赵成勇, 张一工, 贾秀芳, 等. 直流输电控制系统参数优化[J]. 中国电力, 1999, 32(1): 32-34.
ZHAO Cheng-yong, ZHANG Yi-gong, JIA Xiu-fang, et al. Parameter Optimization for DC Transmission Control System[J]. Electric Power, 1999, 32(1): 32-34.

收稿日期: 2008-04-30; 修回日期: 2008-06-10

作者简介:

陈小龙 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电及交、直流电力系统稳定性分析与控制研究; Email: riendy@163.com

毛晓明 (1971-), 女, 博士, 副教授, 从事高压直流输电及交、直流电力系统稳定性分析与控制研究。

(上接第 83 页 continued from page 83)

参考文献

[1] 任祖怡, 窦乘国, 许华乔. 新型智能备用电源自投装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (9): 86-87.
REN Zu-yi, DOU Cheng-guo, XU Hua-qiao. A New Intelligent Equipment for Automation Bus Transfer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (9): 86-87.

[2] DL/T 526-2002 静态备用电源自动投入装置技术条件[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
DL/T 526-2002 General Specification for Automatic Bus Transfer Equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[3] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
State Electric Power Dispatching Center of China. Compilation of Power System Relay Protection Regulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

[4] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 (第二版)

[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

WANG Wei-jian. Protection Relay Theory of Electrical Main Equipment and Its Application (Second Edition) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

[5] 古卫婷, 刘晓波, 古卫涛. 变电站备自投装置存在的问题及改进措施[J]. 继电器, 2007, 35 (10): 70-71.
GU Wei-ting, LIU Xiao-bo, GU Wei-tao. Problems Existing in Bus-bar Automatic Transfer Switch and Measures for Improvement[J]. Relay, 2007, 35 (10): 70-71.

收稿日期: 2008-05-03; 修回日期: 2008-09-02

作者简介:

吕浩 (1982-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护工作; E-mail: lv922@163.com

何胜利 (1975-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护工作;

龚志辉 (1965-), 男, 大专, 从事电力系统继电保护工作。