

直流系统保护电器级差配合的研究

刘毅¹, 周维维¹, 陈国通²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 广西电网公司梧州供电局, 广西 梧州 543002)

摘要: 针对直流系统中复杂的级差配合问题, 对直流系统保护电器的模型与级差配合算法进行了研究, 设计了直流系统保护电器状态检测与维护决策系统。根据保护电器的安秒特性, 在已有模型的基础上进行了简化与改进。根据某 220 kV 变电站直流系统的接线方式、实测负荷电流情况、馈线的参数与保护电器的安秒特性, 模拟了各种短路故障时的级差配合状况, 找出了可能引起越级现象的原因, 分析了保护电器选型的合理性。应用直流系统保护电器状态检测与维护决策系统对保护电器提出了合理的维护决策。提出的级差配合分析方法具通用性与良好的可操作性, 对直流系统的设计与技改有指导意义。

关键词: 直流系统; 保护电器; 安秒特性; 级差配合

Research on stage difference coordination of protective devices in DC system

LIU Yi¹, ZHOU Luo-wei¹, CHEN Guo-tong²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. Wuzhou Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Company, Wuzhou 543002, China)

Abstract: Aiming at the complex stage difference coordination in DC system, the model of DC system protection device and the algorithm of stage difference coordination are analyzed, and the system of DC protection system state detection and maintenance decision is designed. At first, according to the ampere-second characteristics of protective devices, the model of the protective device is simplified and improved on the original basis. Secondly, according to the wiring diagram, measured load current, parameters of feeders and ampere-second characteristics of protective devices of one 220 kV transformer substation DC system, the stage difference coordination status when different kinds of short circuit occur is simulated, reasons for possible leapfrog are found, and the rationality of selection of protective devices is analyzed. Finally, reasonable maintenance decisions of protective devices are proposed by applying the system of DC system protective devices state detection and maintenance decision. The method proposed in this paper is universal and has a good operability, which can guide the design and technological improvement of DC system.

Key words: DC system; protective device; ampere-second characteristic; stage difference coordination

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0045-05

0 引言

直流系统是保证电网安全稳定运行的重要设备, 为发电厂、变电站提供独立的操作、控制、保护、通信和事故照明等电源, 其可靠性对电网的安全运行起到至关重要的作用^[1-4]。近年来, 直流系统的技术水平都有了大幅度的提高, 但是由直流系统引发或扩大的事故仍然不少, 其中就包括由于级差配合不合理, 在故障情况下下级保护电器拒动或上级保护电器越级跳闸从而不能正确切除故障等原因引

发或扩大的事故^[5-9]。因此, 级差配合问题的合理与否直接关系到发电厂、变电站的安全稳定运行。

随着技术的发展, 直流系统更多地采用了熔断器与断路器的多种组合保护方式, 使得直流系统的级差配合更加灵活, 也更加复杂^[10-13], 导致目前变电站中直流系统的保护电器呈现型号多、性能参数差别大的特点。另外, 由于环境、老化等因素的影响, 部分保护电器的安秒特性已严重偏离原始的安秒特性。这些因素给直流系统的安全运行带来了隐患。

近年来, 对于级差配合的研究主要是采用模拟变电站的实际运行环境进行短路试验研究的方案,

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目
(200611012)

以此来掌握不同型号的熔断器、断路器在多种组合下的级差配合特性^[8]。但这种试验的方案可操作性不强,得到的级差配合方案众多,且多是定性分析,也没有从整个直流系统的高度出发进行级差配合试验。文献[14-15]对直流系统保护电器的模型进行了研究,该方法更具通用性,可操作性也更强。但该模型仅仅是保护电器的模型,只是级差配合中的一个环节,仍然没有从系统的高度来考虑。为了解决直流系统复杂的级差配合问题,本文设计了直流系统保护电器状态检测与维护决策系统,从系统的高度出发对直流系统进行级差配合分析,提供保护电器的维护决策。

1 保护电器的模型与级差配合算法

1.1 保护电器的模型

熔断器和断路器都是在电流超过一定值以后,经过一定的保护延迟时间后断开的。可以根据保护电器安秒特性曲线上的电流-保护延迟时间的对应关系来决定保护电器的通断状态。图1所示为保护电器的安秒特性曲线。

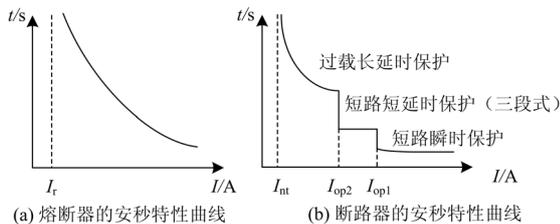


图1 保护电器的安秒特性曲线

Fig.1 Ampere-second characteristic curve of a protective device

当经过一定保护延时后,保护电器断开,此时检测到的电流为0,根据安秒特性曲线,保护延迟时间变为无限大,保护电器又将合闸,不能达到切除故障馈线的目的。而且,当检测到的电流小于保护电器的起始动作电流,即未发生故障时,保护电器状态不会发生变化。只有当保护电器当前状态为闭合并且发生故障时,才改变保护电器的状态。因此,保护电器的模型如图2所示,在文献[14-15]中提出的保护电器模型的基础上进行了改进,简化了判断的逻辑关系,将拟合的运算量大的高阶保护特性函数替代为通过查询数据库、进行线性插值来获得电流-保护延时对应关系的方法。

1.2 级差配合算法

保护电器的模型建立后,应该考虑整个直流系统的工作情况,有必要从系统的高度对直流系统进行级差配合。级差配合算法是在保护电器模型的基础上,根据上下级保护电器的保护延时及下级保护

电器的故障切除时间来判断上级是否发生越级跳闸。如果上级保护电器的保护延时小于下级保护电器的保护延时且大于下级保护电器的故障切除时间,上级保护电器便会发生越级跳闸。以图3所示的三级辐射式直流系统为例,在保护电器DM3-1的馈线发生短路,故只考虑DM3-1、DM2-1、DM1的级差配合,其级差配合判断算法如图4所示。

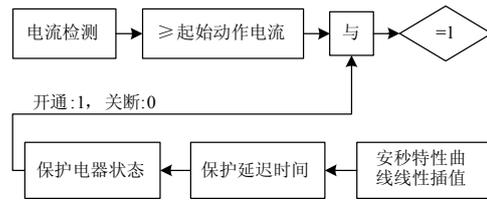


图2 保护电器的模型

Fig.2 Model of a protective devices

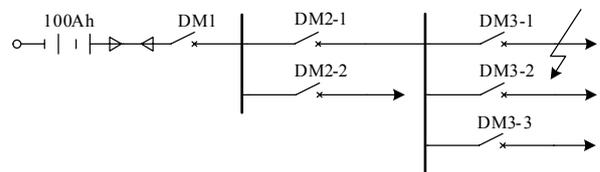


图3 三级辐射式直流系统

Fig.3 Three-stage radial DC system

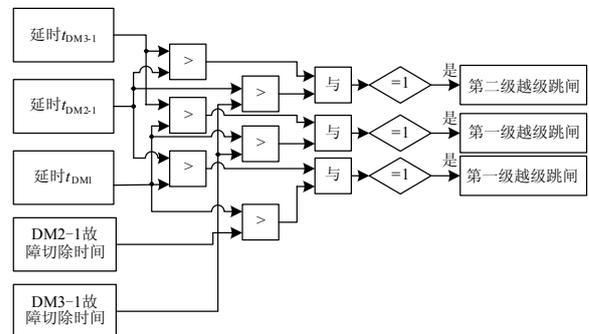


图4 三级辐射式直流系统的级差配合模型

Fig.4 Stage difference coordination model of three-stage radial DC system

2 保护电器状态检测与维护决策系统

在理论分析的基础上,开发了具有通用性的直流系统保护电器状态检测与维修决策系统,该系统能模拟各种实际运行工况,分析各种结构的直流系统级差配合情况并提供保护电器的维修建议。整个系统由状态检测与维护决策软件、工控机和安秒特性测试仪构成,系统的总体结构如图5所示。状态检测与维护决策软件部分主要包括:数据采集模块、数据库管理模块、级差配合分析模块、维护决策模块。

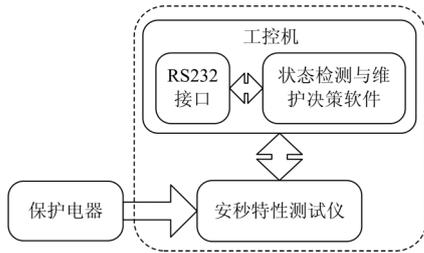


图5 系统总体结构

Fig.5 General structure of system

数据采集模块负责将直流断路器安秒特性测试仪采集到的保护电器的安秒特性数据通过RS232串口传输到工控机上。采集到的保护电器的安秒数据可保存为数据文件,以便在软件进行调用;数据库管理模块能够使操作用户更方便快捷地管理保护电器的安秒特性数据文件与直流系统结构数据文件;级差配合模块基于保护电器的模型与级差配合算法对直流系统的级差配合情况进行判断,详细的判断流程如图6所示;维护决策模块根据保护电器的额定电压、额定电流、短路分断能力、级差配合情况与灵敏度对其进行选型作为替换方案,具体的选型流程如图7所示。

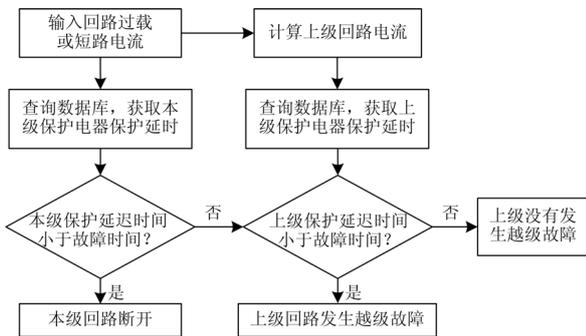


图6 级差配合判断流程

Fig.6 Judgmental process of stage difference coordination

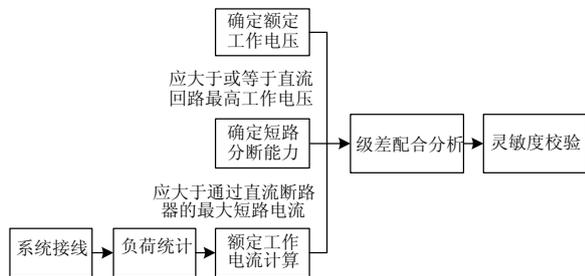


图7 保护电器选型流程

Fig.7 Selection process of protective devices

保护电器除了满足保护选择性要求外,还应满足灵敏度要求。保护电器的灵敏度以灵敏度系数 K_L 为判定依据:

$$K_L = \frac{I_d}{K_g I_n} \quad (1)$$

式中: I_d 为短路电流; I_n 为额定电流; $K_g I_n$ 为瞬时脱扣器整定值,断路器瞬动脱扣器整定为额定电流的10倍,允许有 $\pm 20\%$ 的误差。规定:当 $0.8 \leq K_L \leq 1.25$ 时断路器可能动作;当 $K_L < 0.8$ 时瞬动脱扣器可靠不动作;当 $K_L > 1.25$ 时瞬动脱扣器可靠动作。

3 变电站直流系统实例分析

3.1 直流系统级差配合分析

某220 kV变电站直流系统的蓄电池组容量为300 Ah,每一蓄电池组由103只蓄电池串联组成,单体额定电压2 V,浮充电电压为2.23~2.27 V,均衡充电电压为2.30~2.35 V。每组充电机由4台20 A高频开关电源模块。系统接线方案为双充双蓄单母线分段互连接线,正常运行时,每段母线各带一组充电机、一组蓄电池分列运行,设备检修时,由工作充电机/蓄电池组带两段母线运行,以提高变电站直流供电可靠性。直流系统的接线图如图8所示。每段母线上接的馈线分为两级,由于第二级馈线较多、接线较复杂,因此在图8中省略第二级馈线,只考虑第一级馈线保护电器与上级保护电器的级差配合情况。

直流系统的蓄电池组出口装设熔断器(1FU1~2FU2)RT36-100A(额定电流为100 A),开关储能馈线上(11Z~18Z、21Z~28Z)装设断路器ABS 102b-60A(额定电流为60 A),其他馈线上装设断路器5SX5-25A(额定电流为25 A)。变电站现场实测的数据为:直流I屏各馈线的电流约为0.11~0.16 A,直流I屏的正常负荷电流约为11.5 A;直流II屏各馈线的电流约为0.06~0.16 A,直流II屏的正常负荷电流约为5.6 A。

图9所示为在软件中建立的该直流系统的模型。当1条ABS 102b-60A馈线(正常负荷电流为0.30 A)发生短路故障时。设ABS 102b-60A馈线的短路电流为 I_0 ,则蓄电池短路电流 $I = 11.2 + I_0$ 。以 I_0 为横坐标,保护延时为纵坐标,安秒特性曲线如图10所示。可见, $I_0 = 425$ A左右时安秒特性曲线相交,在 $I_0 < 425$ A时RT36-100A的安秒特性曲线在ABS 102b-60A的上方,不会发生越级跳闸,在 $I_0 \geq 425$ A时RT36-100A的安秒特性曲线在ABS 102b-60A的下方,将会发生越级跳闸。

3.2 保护电器维护决策

① 馈线保护电器重新整定

直流系统馈线包括直流电动机馈线、断路器电

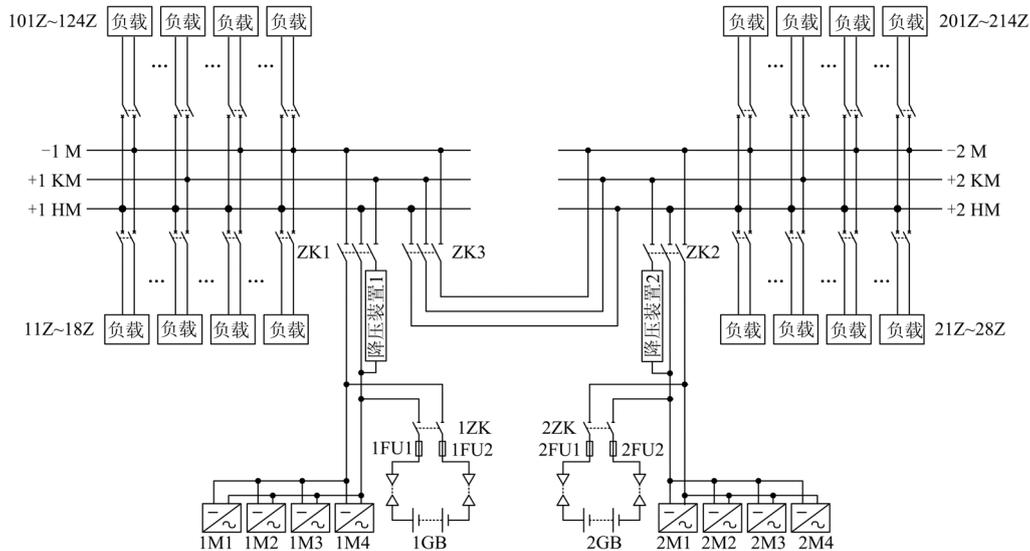


图8 直流系统接线图

Fig.8 Wiring diagram of DC system

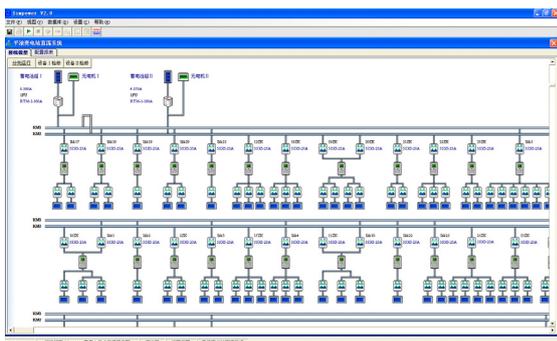


图9 直流系统的软件模型

Fig.9 Model of DC system in the software

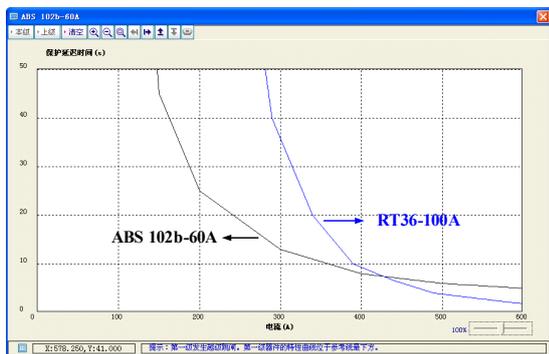


图10 ABS 102b-60A 与 RT36-100A 的安秒特性曲线

Fig.10 Ampere-second characteristic curves of ABS 102b-60A and RT36-100A

磁操动机构合闸馈线、控制、保护、信号馈线、直流分电柜电源馈线，各馈线上的保护电器额定电流的选择按以下的公式计算。

直流电动机馈线：

$$I_n \geq I_{nM} \quad (2)$$

断路器电磁操动机构合闸馈线：

$$I_n \geq K_c I_c \quad (3)$$

控制、保护、信号馈线、直流分电柜电源馈线：

$$I_n \geq K_c (I_{cc} + I_{cp} + I_{cs}) \quad (4)$$

式中： I_{nM} 为电动机额定电流，A； I_c 为断路器电磁操动机构合闸电流，A； K_c 为配合系数，取 0.3； K_c 为同时系数，取 0.8； I_{cc} 为控制负荷计算电流，A； I_{cp} 为保护负荷计算电流，A； I_{cs} 为信号负荷计算电流，A。

根据实测负荷电流计算，馈线的保护电器宜选用较小的额定电流值，如 10 A、15 A。选择电阻值最小的馈线对其保护电器与蓄电池组出口保护电器进行灵敏度校验。馈线短路电流约为 1.06 kA，为保证馈线保护电器能可靠动作，其额定电流不应大于 85 A，选用额定电流较小的保护电器可以满足灵敏度要求。而蓄电池组出口保护电器的额定电流大于 135 A 时，灵敏度系数小于 0.8，保证可靠不动作。

② 蓄电池组出口保护电器重新整定

按蓄电池的 1 h 放电率电流选择，即

$$I_n \geq I_{1h} \quad (5)$$

式中： I_{1h} 为蓄电池 1 h 放电率电流，A。可得蓄电池组出口保护电器额定电流 $I_n \geq 300$ A。

按保护动作选择性条件，即额定电流大于直流馈线保护电器额定电流最大的一台来选择，即

$$I_n > KI_{nm} \quad (6)$$

式中: I_{nm} 为直流馈线中保护电器最大的额定电流, A; K 为配合系数, 一般可取 2.0, 必要时取 3.0。可得蓄电池组出口保护电器额定电流 $I_n > 180$ A。

当蓄电池连接的直流母线上短路时, 计算可得短路电流 I_k 约为 3 kA。为保证瞬动脱扣器可靠动作, K_L 应大于 1.25, 所以可得蓄电池组出口保护电器的额定电流不应大于 240 A。

根据上述分析, 蓄电池出口保护电器应该选择额定电流不小于 180 A, 不大于 240 A、分断能力为 3 kA 以上的保护电器。建议将熔断器保护改为断路器保护, 这样与下级断路器的级差配合更合理、可靠。在数据库中检索, 蓄电池组出口保护电器可以替换的有 GM225-200A、GM225-225A 等, 馈线保护电器可以替换的有 GM32-6A、GM32-10A。

4 结论

本文研究了直流系统保护电器的模型与级差配合算法, 并设计了直流系统保护电器状态检测与维护决策系统。文中以某 220 kV 变电站直流系统作为实例, 根据其结构、参数、负荷情况, 在软件中建立了仿真模型, 模拟了短路情况下的工况, 通过计算满足负荷要求时保护电器的额定值、定量地分析级差配合情况、校验灵敏度几个环节, 提供了保护电器的维护决策, 给直流系统的设计与技改提供了合理的指导与依据, 使运行单位做到心中有数。

参考文献

- [1] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (5): 48-52.
WAN Guo-cheng, REN Zhen, TIAN Xiang. Study on model of reliability-network-equivalent of distribution system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5): 48-52.
- [2] 董明, 魏秉政. 变电站直流系统运行现状及存在问题分析[J]. 继电器, 2006, 34 (3): 82-84.
DONG Ming, WEI Bing-zheng. Analysis of status and questions of DC power source in substation[J]. Relay, 2006, 34 (3): 82-84.
- [3] 刘青杨, 梁俊. 变电站直流系统新型集中辐射式馈电网络的应用[J]. 继电器, 2007, 35 (16): 68-70.
LIU Qing-yang, LIANG Jun. Application of new concentrated radiation-feed network in DC system transformer substation[J]. Relay, 2007, 35 (16): 68-70.
- [4] 赵梦欣, 陈国峰, 余伟成. 直流系统绝缘监测的直流漏电流改进方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (14): 83-88.
ZHAO Meng-xin, CHEN Guo-feng, YU Wei-cheng. Modification of the DC leakage method for DC system

- insulation monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (14): 83-88.
- [5] 彭向阳, 陈献伟, 潘龙. 变电站直流系统常用断路器及熔断器动作特性分析[J]. 继电器, 2006, 34 (23): 58-64.
PENG Xiang-yang, CHEN Xian-wei, PAN Long. Characteristic analysis of DC circuit breakers and fuses used in substation[J]. Relay, 2006, 34 (23): 58-64.
- [6] 刘华. 变电站直流系统总保险熔断问题分析及解决方案[J]. 继电器, 2006, 34 (4): 86-88.
LIU Hua. Main problems and its countermeasures of the head fusing in power substation DC system[J]. Relay, 2006, 34 (4): 86-88.
- [7] 耿建风, 杨珂. 变电站直流系统方案的技术原则分析[J]. 中国电力, 2009, 42 (6): 65-68.
GENG Jian-feng, YANG Ke. Technical principle analysis of DC system schemes in substation[J]. Electric Power, 2009, 42 (6): 65-68.
- [8] 冯爱玲. GM系列直流断路器级差配合的研究与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.
FENG Ai-ling. Time difference cooperation study and analysis of GM series direct current breaker[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.
- [9] Mohibullah, Abdul Wahab N I, et al. The solder wire fuse protection for power electronic devices[C]. //Power and Energy Conference, PEC. 2004: 52-54.
- [10] 耿建风, 徐荣, 刘继安, 等. 直流电源系统中直流控制保护电器的选择[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (20): 124-126.
GENG Jian-feng, XU Ying, LIU Ji-an, et al. Selection of DC control protection component in DC power supply system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (20): 124-126.
- [11] Cuzner R, MacFarlin D, Clinger D, et al. Circuit breaker protection considerations in power converter-fed DC systems[C]. //Electric Ship Technologies Symposium, ESTS. 2009: 360-367.
- [12] Morshita Y, Ishikawa T, Yamaguchi I, et al. Applications of DC breakers and concepts for superconducting fault-current limiter for a DC distribution network[J]. Applied Superconductivity, 2009, 19 (4): 3658-3664.
- [13] Hamiton H, Schulz, Noel N. DC protection on the electric ship[C]. //Electric Ship Technologies Symposium, ESTS. 2007: 294-300.
- [14] 钟渝佳. 直流电源系统断路器的级差配合研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
ZHONG Yu-jia. Study on stage difference coordination of breaker in DC system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

(下转第 54 页 continued on page 54)

signals and emergency response for 500 kV substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (2) : 101-103.

[3] 高翔,张沛超. 电网故障信息系统应用技术[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (4) : 11-15.
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. Application technology of power fault information system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (4) : 11-15.

[4] 朱东升,孙纯军,陈飞. 500 kV变电站远方集中监控系统方案探讨[J]. 电力自动化设, 2009, 29(5): 126-129.
ZHU Dong-sheng, SUN Chun-jun, CHEN Fei. Centralized remote monitoring system of 500 kV substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (5) : 126-129.

[5] 满若岩,付忠广. 基于模糊综合评判的火电厂状态评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (5) : 5-10.
MAN Ruo-yan, FU Zhong-guang. Condition assessment of fossil-fired power plant based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (5) : 5-10.

[6] 梁丁相,陈曦. 基于模糊综合评判理论的电力信息系统安全风险评估模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (5) : 61-64.
LIANG Ding-xiang, CHEN Xi. Safety assessment model of electric power information system based on fuzzing synthetical theory and its application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (5) : 61-64.

[7] 王钦,文福拴,刘敏,等. 基于模糊集理论和层次分析法的电力市场综合评价[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (7) : 32-37.
WANG Qin, WEN Fu-shuan, LIU Min, et al. Combined use of fuzzy set theory and analytic hierarchy process for comprehensive assessment of electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (7) : 32-37.

[8] 廖瑞金,王谦,骆思佳,等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3) : 70-75.
LIAO Rui-jin, WANG Qian, LUO Si-jia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3) : 70-75.

[9] 郭金,郭凤仪,王智勇,等. 三标度层次分析法模糊评判触头材料的抗电弧侵蚀能力[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27 (4) : 548-551.
GUO Jin, GUO Feng-yi, WANG Zhi-yong, et al. Application of three-degree analytical hierarchy process in fuzzy comprehensive judgement system for arc erosive performance of contact aaterial[J]. High Voltage Engineering, 2008, 27 (4) : 548-551.

[10] 黄树帮,叶留金,袁宇波,等. 电网继电保护及故障信息处理主站系统的设计和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (16) : 88-92.
HUANG Shu-bang, YE Liu-jin, YUAN Yu-bo, et al. Design and implementation of protective relaying and fault information processing master system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (16) : 88-92.

[11] 邓国新,赵冬梅,张旭. 对地区电网故障诊断系统中信息纠错的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 50-54.
DENG Guo-xin, ZHAO Dong-mei, ZHANG Xu. Research of informations identification on the fault diagnosis system for regional power grid [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 50-54.

[12] 姚建刚,肖辉耀,章建,等. 电力设备运行安全状态评估系统的方案设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (1) : 52-58.
YAO Jian-gang, XIAO Hui-yao, ZHANG Jian, et al. Design of electric equipment operation security condition assessment system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21 (1) : 52-58.

收稿日期: 2010-01-21; 修回日期: 2010-05-21

作者简介:

明 娇 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化控制; E-mail: mingjiao7088@163.com

刘代勇 (1976-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力系统运行与控制。

(上接第 49 页 continued from page 49)

[15] 周维维,孙鹏菊,钟渝佳. 变电站直流系统级差配合的建模与分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 21 (2): 20-24.
ZHOU Luo-wei, SUN Peng-ju, ZHONG Yu-jia. Modeling and analysis of stage different coordination for substation DC system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 21 (2): 20-24.

作者简介:

刘 毅 (1985-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子技术应用研究; E-mail: cristo2006@163.com

周维维 (1954-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力电子技术, 电路理论研究等;

陈国通 (1964-), 男, 高级工程师, 从事电力系统运行工作。

收稿日期: 2010-01-18; 修回日期: 2010-03-29