

基于站域保护的煤矿井下电网防越级技术研究*

王玉梅 王乐乐 冯红坤 任保轩

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 煤矿井下供电系统的防越级主要解决的问题是使离故障点最近的配电点出线跳闸,而各配电点采用单母线接线,使防越级系统成为二级通信网络,结构复杂,难以满足实时性要求。根据站域保护思想,提出了一种站域保护的井下防越级方案,该方案由站域保护装置和监控主机通过实时以太网构成的单级通信网络实现。站域保护装置的功能是采集井下供电系统配电点的电气信息,确定故障出线并上传故障信息;监控主机利用故障矩阵法确定故障线路所在的配电点,并向站域保护装置下发跳闸指令,使离故障点最近的断路器跳闸,而高性能实时以太网的应用,保证了防越级跳闸系统的实时性。实验结果表明,该方案可以使离故障点最近的断路器跳闸,且满足煤矿井下防越级的实时性要求,为解决煤矿井下越级跳闸问题提供了新的方法。

关键词: 站域保护;故障矩阵;实时以太网;防越级跳闸

中图分类号: TD611 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 440.65

Study on anti grade trip prevention for underground coal mine power grid based on substation-area protection

Wang Yumei Wang Lele Feng Hongkun Ren Baoxuan

(School of Electrical Engineering and automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The major function of anti grade trip of underground coal mine power supply system is making the distributing point nearest from the fault point trip. However, single-bus connection is employed among every distributing points which makes the anti grade trip a complicated two-stage communication network and will hardly meet the real-time requirement. The underground anti grade trip program is proposed based on the idea of substation-area protection, this program is implemented by a single-stage communication network which is composed of a RT-Ethernet constituted by substation-area protection device and monitoring host. The main function of substation-area protection device includes collecting electric information of distributing points from underground power supply system and confirming malfunction and upload malfunction information. The monitoring host locates the distributing point where the malfunctioning circuit lies by fault matrix method then sends a tripping order to the substation-area protection device to impel the breaker nearest from the fault point to trip. Meanwhile the real-time property of the anti grade trip system is guaranteed by the application of high performance RT-Ethernet. Experimental results show that this program can make the breaker nearest from the fault point trip, and in the mean time meets the real time requirements of the underground anti grade trip, thus providing a new solution to the coal mine grade tripping.

Keywords: substation-area protection; fault matrix algorithm; RT-Ethernet; anti grade trip

1 引言

煤矿井下电网多采用单侧电源多级干线式供电系统,由于供电线路短,各级供电线路的短路电流相差不大,当下级供电线路发生短路故障时,短路电流通常会大于上级速断保护动作值,难以满足速断保护的纵向选择性,从而造成

速断保护越级跳闸,危及人员和设备的安全^[1-4]。由于井下供电系统的各配电点多采用单母线分段接线,如何简化各级配电点进线保护装置与多个出线保护装置的通信是优化井下防越级通讯网络、提高其实时性的关键技术所在。煤矿井下电网智能化的发展以及地面变电所站域保护的推广应用^[5-7],为井下供电系统防越级跳闸提供新思路,本文以

此提出了站域保护的煤矿井下防越级跳闸方案。

2 站域保护技术

2.1 站域保护

站域保护是国家电网公司在 2010 年 6 月发布的《智能电网关键设备研制规划》中首次提出的^[8]。站域保护是通过一套保护装置收集全站内所有间隔的电压、电流及断路器状态等实时信息,对故障进行快速准确的定位,实现故障的快速切除^[9-10]。煤矿井下站域保护是装设在各配电站,通过采集配电站进出线回路的电压电流以及断路器状态等信息,确定故障线路,并将故障线路信息上传到监控主机。

2.2 站域保护装置

站域保护装置是整个站域保护防越级方案的关键部分,主要包括数据采集、故障判断、实时以太网通信以及跳闸决策 4 个部分,如图 1 所示。

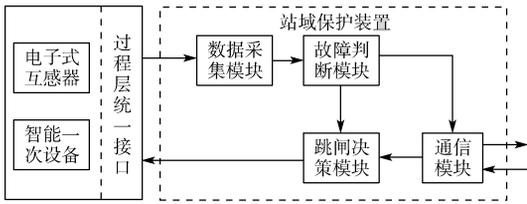


图 1 站域保护装置结构

各个模块的功能简单描述如下。

- 1) 数据采集模块:负责采集各条线路上电子式互感器采集的电压、电流电气量,以及各线路智能一次设备的状态信息。
- 2) 故障判别模块:将数据接采集模块送来信息与预先设定的阈值进行比较,并确定故障线路,并将信息发送至跳闸模块和通信模块。
- 3) 通信模块:一方面将故障判断模块送来的故障信息上送至监控主机,另一方面接收监控主机下发的跳闸信号。
- 4) 跳闸决策模块:若同时收到故障判别模块的故障信息和通信模块的跳闸信息,驱动相应断路器跳闸;若收到故障信息并且延时一段时间仍未接收到跳闸信息时,则认定通信线路发生故障,直接驱动相应断路器跳闸,切除短路故障。

3 站域保护防越级方案

针对煤矿典型的 3 级供电系统,采用实时以太网通信的站域保护的井下防越级方案如图 2 所示。

在煤矿井下各级配电站装设站域保护装置,负责收集配电站各条线路中电子式互感器和智能一次设备采集到的电气量与开关量并在故障时确定各配电站故障线路,将故障信息通过实时以太网快速的上送至装设在地面变电所的监控主机。监控主机根据收到的故障信息,根据故障矩阵

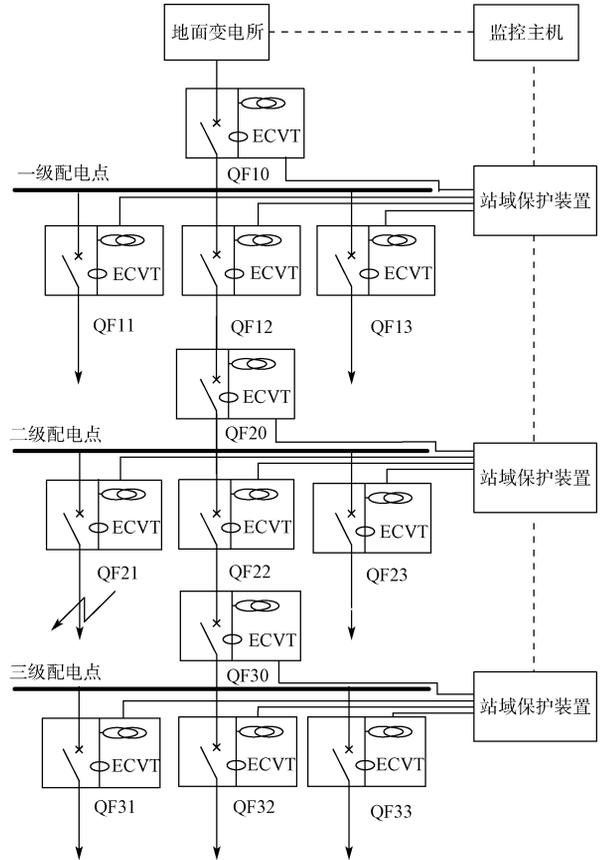


图 2 站域保护方案原理

确定故障线路所在的配电站,并向相应的站域保护装置下发跳闸信号。收到跳闸信号的站域保护装置驱动发生故障线路上的断路器进行跳闸操作以切除故障。

3.1 实时以太网

实时以太网(RT-Ethernet)是建立在 IEEE 802.3 标准的基础上^[8-9],由德国倍福公司提出基于 TwinCAT 软件的能够与标准以太网实现无缝对接的工业以太网。实时以太网省去了中间的网络层、传输层、会话层、表示层,即节约了 Windows 栈所需的 TCP/IP 周期时间,使得应用层可以直接与数据链路层进行通讯,数据传输过程如图 3 所示,由此实现了高速传输,1 s 可传输 20 000 数据帧,即循环周期为 50 μ s。

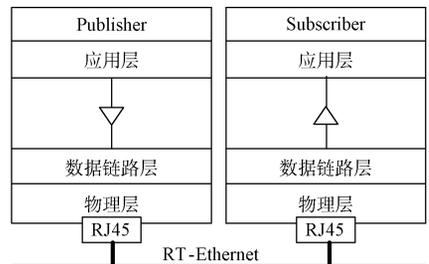


图 3 RT-Ethernet 数据传输图

RT-Ethernet 采用“发送/订阅”机制取代了原有现场总线的通讯原则^[11-12],过程控制级上的控制器之间不再具有固定的分层结构,各控制器之间通过建立 AMS Net ID 关联模式进行数据通讯,所有控制器既可作为数据发送方 Publisher,又可作为数据接收方 Subscriber。数据传送方式有单点传送、多点传送以及广播方式。根据数据传送方式的不同,在不同的应用领域可建立星型、环型、总线型、树型等多种拓扑结构。整个通信十分灵活,运行时不会因为用户数量的变化而受到影响,尤其是星型连接方式,下层 CPU 可以跳过物理连接的“中间”CPU,而直接与上层 CPU 进行数据通信,从而节约了时间,如图 4 所示。

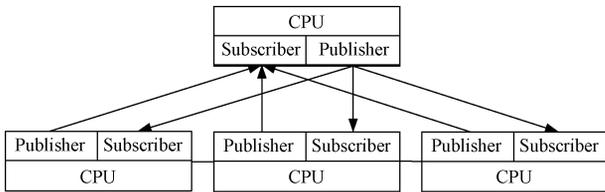


图 4 RT-Ethernet 网络传输图

3.2 故障矩阵算法

本文利用故障矩阵算法确定故障所在的配电点及所在的间隔^[13-15]。

井下电网为单电源供电网络,电网潮流呈现单向流动特性,把井下各配电点的线路作为独立节点编号。以电源端流向负载端的功率方向作为正方向,根据各配电点之间的有向连接关系构造网络描述矩阵 D 。若系统中共计 n 个节点,则网络描述矩阵 D 为 n 阶方阵,即 $D = [d_{ij}]_{n \times n}$,假设节点 i 与 j 之间存在映射关系,且正方向为节点 i 指向节点 j ,则 $d_{ij} = 1$,否则 $d_{ij} = 0$ 。

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 存在映射关系} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

线路某处发生短路故障时,采集到的电流超过设定的阈值,整条沿线均会流过故障电流,则线路开关处安装的站域保护装置会检测到故障电流,并上传故障信号,上位机根据保收到的故障信息形成故障信息矩阵 $F = [f_1, f_2, \dots, f_n]$ 。

$$f_n = \begin{cases} 1, & \text{存在故障信息} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

为避免因某个站域保护装置故障或者误判,导致故障信息不能准确上传,需要对故障信息矩阵 F 进行修正,即当 $f_n = 1$ 时,流过故障电流的节点 f_i 均置 1。上位机将网络关联描述矩阵 D 中的对角元素替换为修正后的故障信息矩阵 F 对应的元素,如果故障信息 $f_n = 1$,则网络关联描述矩阵 D 中的第 n 列不变;如果故障信息 $f_n = 0$,则网络关联描述矩阵 D 中的第 n 列置 0,得到故障判断矩阵 P 。

根据故障判定矩阵 P 的元素进行故障区域的判定,故障点判据为如果 P 中某一行不止一个元素为 1,则故障点在下一级;如果只有一个元素为 1,则故障点就在相应的线

路上,即故障点位置。

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \quad (3)$$

4 仿真与分析

为了验证站域保护的可靠性与实时性,搭建了如图 2 所示的煤矿井下三级供电系统实验平台,其中站域保护装置选用德国倍福公司的 CX1030 系列的 PLC 控制器,输入模块由倍福公司的 EL3104 模拟量输入模块和 EL1008 开关量输入模块组成,分别用于采集系统中的电气量和状态量。输出模块选用倍福公司的 EL2008 开关量输出模块,用于驱动断路器的分合闸操作,而断路器采用 JQX-13F 继电器充当。整个系统的监控主机选用装有 TwinCAT 软件的倍福公司的 C5102-0030 工业控制机。整个实验仿真系统中的 PLC 控制器与工控机之间采用实时以太网通信。

4.1 实时以太网通信配置

整个实验仿真系统需要在每个 PLC 控制器以及工控机中建立实时以太网通信协议,从而可以使得每个 PLC 控制器能将数据直接传输到工控机中。整个的以太网通信配置过程基本相同,以工控机为例进行简要说明。

如图 5 所示,在 TwinCAT 软件中的 I/O 配置中建立实时以太网通信端口,建立 1stSubscriber、2ndSubscriber 以及 3rdSubscriber 3 个实时以太网输入端口,在端口中添加下级 PLC 控制器中的 Network Variables 并与 PLC 程序中的输入变量进行关联。由于实时以太网可以实现点对点传输,所以下级 PLC 控制器的故障信息能够跳过中间过程直接将故障信息发送到工控机中。再建立相应的 1stPublisher、2ndPublisher 以及 3rdPublisher 3 个实时以太网输出端口,在端口中添加 network variables,并与 PLC 程序中的输出变量进行关联。由此完成工控机的实时以太网通信配置,PLC 控制器的通信配置与之相类似,不再一一赘述。

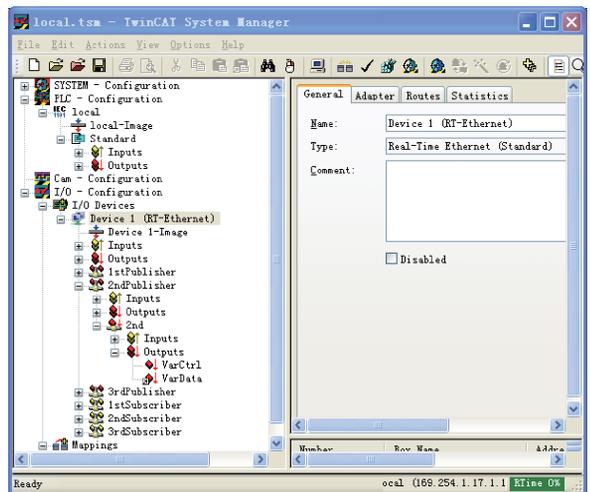


图 5 实时以太网通信配置

4.2 故障模拟

当第二级配电点的第二条出线发生短路时,第二级配电点的 PLC 控制器根据采集到的电流信息,构建故障判别矩阵,计算出矩阵的第 3 行的元素之和 ACTMotors[3]的值为 1,即 ACT22 的值为 1,则判定本配电点的故障线路为第二条出线,如图 6 所示。

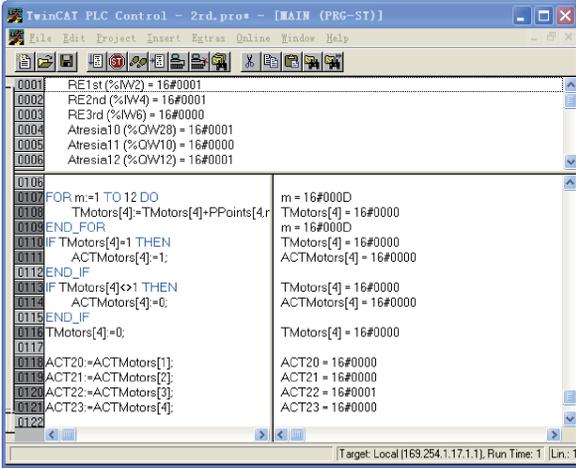


图 6 PLC 故障判断过程

工控机将收集到的各 PLC 控制器的故障信息导入到预先编写好的故障矩阵程序中进行判断,确定发生故障的配电点为第二级配电点并向相应的 PLC 控制器下发允许跳闸的命令。如图 7 所示,RE2nd 表示接受到的工控机下发的跳闸指令,其值为 1 表示允许本级 PLC 控制器发出跳闸指令。ACT2 为 PLC 控制器发出的跳闸指令,此时为 TRUE 表示 PLC 控制器驱动相应的继电器进行跳闸操作以切除短路故障。SE2nd 表示 PLC 控制器向工控机发送的故障信息,此时值为 0 表示线路中的故障电流已经被切除。

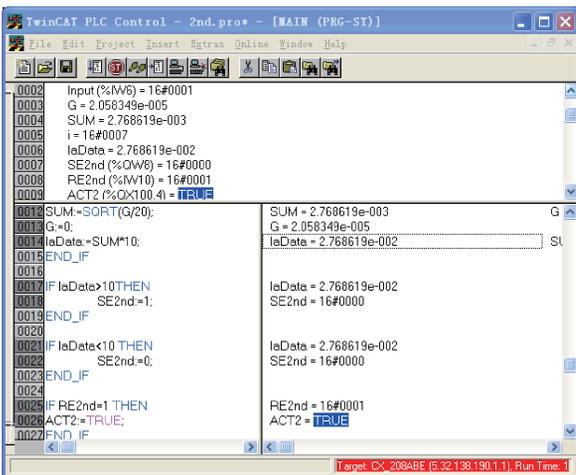


图 7 PLC 跳闸程序

4.3 实时性分析

本文利用 TwinCAT PLC Control 中的 Sampling Trace 功能对第二级配电点的第二条出线发生短路故障时的数据进行实时采集,由上至下依次选用线路电流有效值, PLC 控制器上送的故障信息值,监控主机下发的允许跳闸指令以及断路器动作指令为研究对象,在 Sampling Trace 中对其进行分析,发生故障的第二级配电点的 PLC 控制器中的信号传输时序图如图 8 所示。

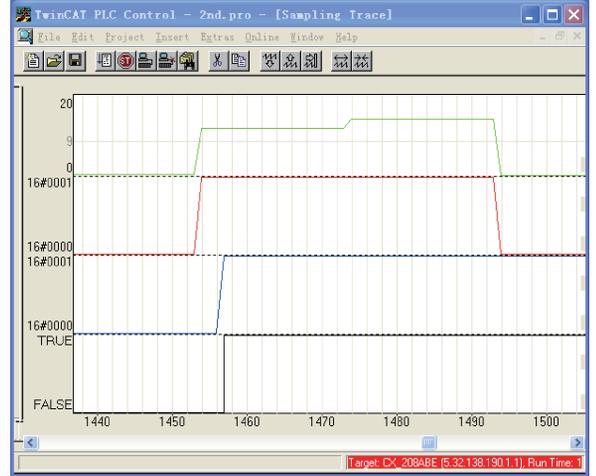


图 8 第二级 PLC 信号传输时序

由图 8 可知,在 $t=1453$ ms 时,线路中出现短路电流,与此同时,PLC 控制器上送的故障信息由 0 变为 1,表示本级线路出现过流信息。在 $t=1456$ ms 时,收到工控机下发的允许跳闸指令, $t=1457$ ms 时,PLC 控制器发出断路器跳闸的命令。 $t=1496$ ms,线路中短路电流消失,表明故障已经被切除。

第一级配电点的 PLC 控制器信号传输时序图如图 9 所示,从图中可以看出,在 $t=1558$ ms 时检测到线路中出现短路电流,于此同时第一级 PLC 控制器向工控机上送的

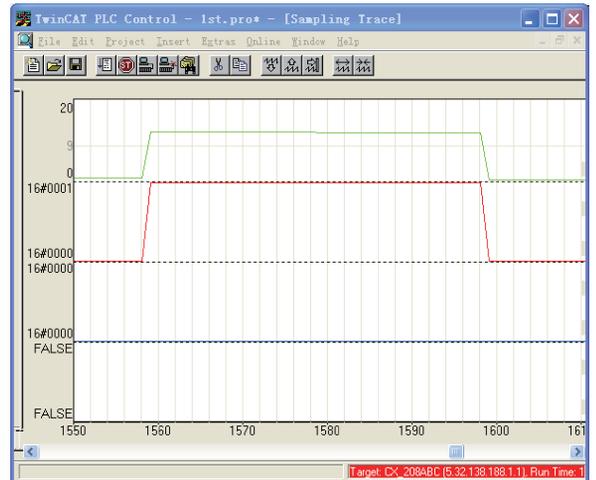


图 9 第一级 PLC 信号传输时序

故障信息由 0 变为 1, 表示第一级配电点出线过流信息。在 $t=1\ 599\ \text{ms}$ 时, 线路中短路电流消失, 故障信息变为 0, 从而实现了防越级跳闸。

分析图 8 和 9 可知, 当发生井下供电系统发生短路故障时, 系统由一种运行状态转变为另外一种稳定状态消耗时间共计约 20 ms, 程序处理所需的信号采样周期 10 ms, 即故障前后两种状态信号的跃变所花费时间为 20 ms, 也就是说, 在信号采样的过程中已完成了继电器的分合闸动作, 由检测到故障电流到故障完全切除共计消耗时间 15 ms, 此处选用的继电器固有动作时间约为 12 ms, 信号传输时延小于 2 ms, 程序处理时间小于 1 ms。井下供电系统采用断路器固有动作时间约为 60 ms, 而信号的传输与数据处理时间相比断路器固有动作时间小很多, 基本可以忽略, 通过试验数据分析可知该系统的实时性可以满足井下电网的要求, 同时可以实现防越级跳闸的功能。

5 结 论

通过分析目前煤矿井下采用的防越级通讯网络结构所存在的问题, 本文提出了站域保护的煤矿井下防越级方案。该方案利用站域保护技术将整个配电点作为保护对象, 通过对整个配电点故障信息的综合, 运用故障矩阵算法确定故障出线, 并上送故障信息。监控主机根据所有站域保护装置上送的故障信息确定发生故障的配电点, 使离故障点最近的断路器跳闸, 从而保证了保护的选择性。该方案采用高性能实时以太网通信技术进行数据交换以保证信号传输的实时性。实验结果表明, 在井下供电系统发生短路故障时, 该系统能够准确判断故障出线, 实现防越级跳闸功能且满足井下电网对通讯实时性的要求, 有效的解决了煤矿井下越级跳闸问题, 对煤矿井下电网智能化发展具有重大的现实意义。

参 考 文 献

- [1] 李文俊, 程志伟, 薛忠新, 等. 基于光纤通信的防越级跳闸方案设计和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 131-135.
- [2] 王福忠, 杨茜惠, 王新良. 井下高压电网保护定值仿真校验系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(12): 6-11.
- [3] LI R, SONG S Y, MA Z G, et al. Design of setting management system of relay protection to anti-grade trip in coal mine based on serial communication[C]. Applied Mechanics and Materials, 2013(415): 109-112.
- [4] 王福忠, 董鹏飞, 董秋生, 等. 煤矿 6 kV 动力电缆绝缘在线监测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1398-1405.

- [5] 刘建华, 李建冬, 黄国清, 等. 基于三层两网的煤矿智能供电系统接地保护方案研究[J]. 煤炭技术, 2015(1): 309-311.
- [6] 王彦文, 卢丹, 高彦. 基于广域同步测量技术的煤矿高压电网故障区段定位算法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 285-291.
- [7] 刘扬, 谭国俊. 基于智能变电站的煤矿高压电网选择性接地保护研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2259-2264.
- [8] 刘益青. 智能变电站站域后备保护原理及实现技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2012: 25.
- [9] 姚成, 黄国方, 仲雅霓, 等. 基于站控层 GOOSE 的站域控制实现方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 159-160, 170.
- [10] 蔡小玲, 王礼伟, 林传伟, 等. 基于智能变电站的站域保护原理和实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 128-133.
- [11] VITTURI S, PERETTI L, SENO L, et al. Real-time ethernet networks for motion control [J]. Computer Standards & Interfaces, 2011, 33(5): 465-476.
- [12] CARVAJAL G, WU C W, FISCHMEISTER S. Evaluation of communication architectures for switched real-time Ethernet[J]. IEEE Transactions on Computers, 2014, 63(1): 218-229.
- [13] 刘达, 彭敏放, 万勋, 等. 基于行波分析的变压器绕组匝间短路故障定位[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2091-2096.
- [14] 刘建华, 刘鹏, 元航, 等. 煤矿智能供电系统故障识别与隔离技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015(7): 138-142.
- [15] 孔令号. 基于故障度及灰色关联度的模糊聚类站域保护原理研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.

作 者 简 介

王玉梅, 教授, 主要研究方向为供电技术和电力系统保护与控制。

E-mail: wangym@hpu.edu.cn

王乐乐, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护。

E-mail: 376264600@qq.com

冯红坤, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

E-mail: fhk1991@126.com

任保轩, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。

E-mail: 865221574@qq.com