

煤矿智能供电系统故障识别与隔离技术

刘建华, 刘鹏, 元航, 张少冉

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为解决煤矿电网 6/10 kV 供电系统易发生越级跳闸、故障穿越、扩大停电面积的问题, 针对工矿企业常见的多级串供供电网络, 以智能变电站为基础, 构造煤矿区域集控式智能供电系统。系统间通过 GOOSE 网络实现信息共享, 在此基础上, 构造故障识别与隔离系统, 对站内信息集中处理、判断, 实现多种穿越故障及不正常运行状态的识别与可视化。构造故障矩阵算法实现故障区段的识别, 并进一步优化决策算法, 探讨 GOOSE 网络传输关键技术。为智能变电站应用到工矿企业提供了理论分析基础, 具有较大的实用价值。

关键词: 智能变电站; 智能供电系统; 故障识别与隔离; 区域集控; GOOSE

Research on fault visual identification and isolation technology of smart power supply system in coal mine

LIU Jianhua, LIU Peng, YUAN Hang, ZHANG Shaoran

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the problems of overriding trip, fault crossing and expanding blackout area in 6/10 kV power supply system, in view of the common multistage series power supply in some industrial and mining enterprises, the coal smart power supply system is constructed based on the smart substation. The coal smart power supply systems share information by the GOOSE, and on this basis, fault identification and isolation system is constructed to comprehensively process and estimate and achieve the state identification and visualization of a variety of through-fault and abnormal operating state. Fault matrix algorithm is built to realize the identification of fault section and decision algorithm is further optimized. The relevant GOOSE key technology is discussed. It can provide theoretical basis analysis for the advanced applications of smart substation in industrial and mining enterprises, which has great practical value.

Key words: smart substation; smart power supply system; fault identification and isolation; regional centralized control; GOOSE

中图分类号: TD61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0138-05

0 引言

煤矿电网 6/10kV 电压等级往往穿越多级变电所, 由于线路短, 过流保护时限小, 系统运行方式差异大, 常存在过流速断保护整定困难、短路越级跳闸等问题^[1-3]。目前, 广泛采用的分布独立式传统继保装置, 不能解决越级跳闸难题, 且无法自动识别输电线路的故障类型, 难以快速隔离故障, 常导致扩大故障范围的严重后果。有统计表明, 大部分三相短路故障是因两相短路未及时切除造成的。而采用电流纵联差动保护或通信级联闭锁的方式对传统继保装置进行改造, 无法从根本上实现故障的快速识别与隔离。随着煤矿自动化的发展, 光纤数字

通信网络在煤矿井下的应用, 基于数字化集成的保护方案被提出, 该方案具备完善的保护功能, 保护的可靠性、快速性都有所提高, 但该方案不符合国网智能变电站建设规范, 且对数据的同步采样要求严格, 对通信的可靠性要求较高, 投资较大^[4-5]。本文利用智能变电站区域集控技术构造了故障识别与隔离系统对站内信息集中处理、判断, 实现多种穿越故障及不正常运行状态的识别与可视化标识, 尤其是彻底解决了煤矿多发的越级跳闸及漏电无选择性难题。

1 区域集控式智能供电系统

煤矿电网多级串供系统, 负荷集中, 多个变电

所之间距离较短, 为构筑区域集控式智能供电系统提供了可能。国家电网公司技术标准 Q/GDW_441-2010 《智能变电站继电保护技术规范》要求 66kV、35kV 及以下间隔保护、测控、智能终端、合并单元功能宜按间隔合并实现^[6], 因此煤矿配电网建设的智能变电站大多采用两层一网结构, 不构建 SMV 过程层网络。在此背景下, 煤矿区域集控式智能供电系统以多智能变电站为基础, 统一建设智能集控中心作为各分站的公共站控层。系统的体系结构如图 1 所示。

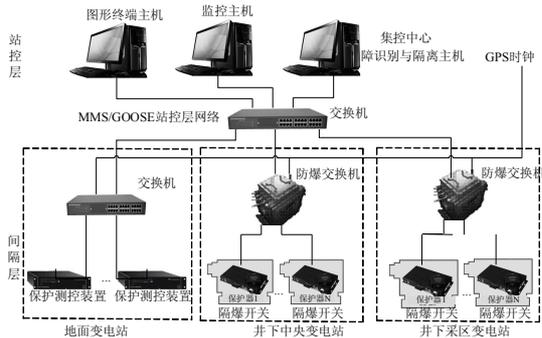


图 1 故障识别与隔离系统结构

Fig. 1 Structure of fault identification and isolation system

各智能站采用 GOOSE 网络与区域集控中心通信, 实现信息共享, 故障识别与隔离系统设在站控层, 包括集控中心主机和显示器, 集控主机收集各保护测控装置上传的故障信息实现故障的识别与隔离, 将分析结果在后台界面显示进行拓扑着色显示故障区段及故障类型并能发出故障报警等。各智能变电站在系统中承担区域集中控制功能, 除本站外, 还实现区域智能控制防误闭锁。

2 区域集控式故障识别与隔离系统

为保证系统的可靠性灵敏性, 区域集控式故障识别与隔离系统满足以下原则: 地面及井下各智能变电站独立完成故障的识别, 通过 GOOSE 上传至区域集控中心; 集控中心完成系统范围内故障区段的判断, 下发隔离及闭锁命令; 集控中心不影响各站独立的故障判断与继电保护功能, 故障判断识别的速度应快于各站间隔层保护装置保护动作的速度, 不影响各站保护的動作特性。

2.1 故障区段识别算法

传统故障区段识别算法复杂、耗时较长, 不能满足特殊供电场合快速隔离故障的需求。本文在构造煤矿网络树状拓扑结构的基础上, 基于保护测控装置检测结果, 进一步判断故障区段, 运算简单, 快速实用。区域集控中心依据各分智能变电站上传

的故障信息, 构造故障判别矩阵, 构造方法为:

(1) 依据煤矿电网拓扑结构生成网络描述矩阵 D , 规则为以煤矿电网中每个开关作为一个节点, 并进行编号, 若共有 n 个节点, 则 D 为 n 阶方阵, 若节点 i 有子节点 j , 则 $D_{ij}=1$, 否则 $D_{ij}=0$ 。

(2) 依据各开关保护测控装置上报的故障信息定义故障信息矩阵 F , F 矩阵初始为 $1 \times n$ 的 0 矩阵, 规则为若第 i 个节点上报故障信息, 则 $F_i=1$, 否则 F_i 值不变。

(3) 定义故障区段矩阵 L , 初始化为 $1 \times n$ 的 0 矩阵, 查找 F , 当 $F_i=1$ 时, 查找 D 矩阵, 若矩阵 D 所有满足 $D_{ij}=1$ 时的 $F_j=0$, 即满足

$$sum = \sum_{j=1}^n f_j / (d_{ij} = 1) (i \neq j) = 0$$

可判断则故障发生在 i 节点后, 若所有满足 $F_i=1$ 条件的 D_{ij} 均为 0, 则 i 节点为末节点, 应立即下发跳闸命令, $L_i=1$, 得到故障区间矩阵。

以图 2 所示为例, 说明故障区段识别矩阵的构造原理。

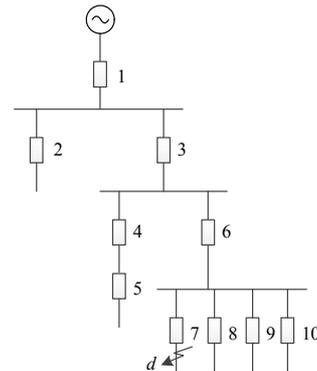


图 2 故障区段识别算例

Fig. 2 Example of fault section identification

依据式(1)中原则, 构造拓扑矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

d 点发生短路故障后, 1、3、6、7 号节点处于同一支路上, 应均能检测到故障。据此故障判定矩

阵 P 为

$$P = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

由右至左扫描 P 矩阵, $P_7=1$, 由下至上扫描 D

矩阵, $\sum_{j=1}^{10} D_{7j} = 0$, 可得故障区间矩阵 L 为

$$L = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

由此判断故障区段为 7 号断路器之后, 且 7 号断路器距离故障点最近, 因此, 应当跳开 7 号断路器。

2.2 区域智能控制防误闭锁

区域集控中心根据故障区段识别算法的分析结果, 采用 GOOSE 报文下发保护允许/闭锁指令。短暂的临时性故障, 在故障消失后, 或者就地保护装置误启动恢复后, “就地信号”由“1”变为“0”。此时保护不会动作, 间隔层保护测控装置对故障的判断不受集控中心保护主机下发信号的影响, 即使保护测控装置收到“允许”信号, 但是“就地信号”变为“0”, 说明间隔层保护的启动是由于干扰造成的, 并非是故障造成的, 此时, 保护逻辑输出“0”, 不会跳开开关, 可见主机的“允许”或“闭锁”信号只是辅助各间隔层保护测控装置完成全矿多智能变电站的故障区段定位, 保证保护的选择性, 不会影响间隔层保护测控装置对故障的判断结果。

2.3 故障识别与隔离流程

各分智能变电站保护测控装置实时运算, 运算结果实时更新就地信号, 同时以 GOOSE 报文上传至区域集控中心。矩阵从收集到第一个故障 GOOSE 报文开始计时到时间 t , 若在 t 时间内收到故障 GOOSE 报文, 则对 GOOSE 报文解码并将 t 清零, 重新开始计时, 延时时间 t 到即认为故障信息收集完毕开始矩阵运算, t 大于矩阵运算花费时间。当备选区段数大于 1 时即发生信息漏传或信息畸变情况, 进行矩阵容错处理。区域集控中心故障识别与隔离流程如图 3 所示。

2.4 优化决策算法

保护测控装置发出跳闸命令后, 开关可能会有拒动的情况, 按照时差配合的方式, 紧邻的上级开关会跳开, 但有时整定时间过长满足不了保护的快速性。因此, 本文提出 $N-1$ 优化决策法, 及时发现开关拒动情况, 并跳开上级开关。 $N-1$ 优化决策法如图 4 所示, 集控中心保护主机进行故障区段定位判断并下发“允许”信号后, 保护主机开始计时, 在一段时间内若一直收到故障信息, 则判定开关拒动, 矩阵会将这个开关信息去除并重新计算一遍, 让紧邻它的上一级开关跳开。假设延时时间为 t_1 , 矩阵重新计算时间为 t_2 , 则 $t_1+t_2 < T$ 。此优化策略可加快

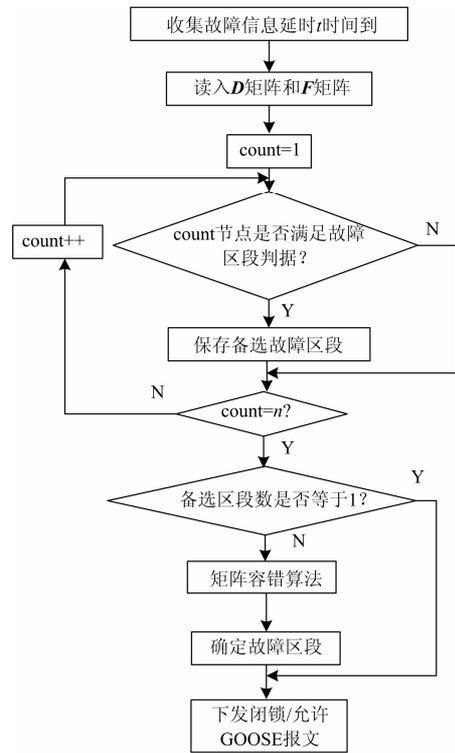


图 3 区域集控逻辑

Fig. 3 Logic of regional centralized control

后备保护快速性, 当这套系统整个失效时才用逐级的时差配合作为后备保护。

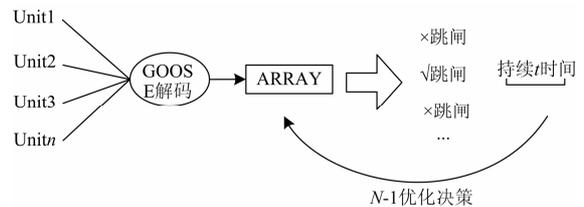


图 4 $N-1$ 优化决策算法

Fig. 4 $N-1$ optimal decision algorithm

3 网络传输关键技术

GOOSE 报文直接映射到数据链路层, 省去了中间各层的打包环节^[7], 主要用来传输跳闸、闭锁等开关量信息。在 GOOSE 与 MMS 共网情况下, 实际工程中通过改写网卡驱动, 将 GOOSE 和 MMS 报文映射到不同的协议层, 这样两者互不影响, 保证了数据传输的快速性和实时性。

间隔层终端实时运算, 有故障或异常时以 GOOSE 报文上送故障信息, 进行故障识别与隔离相关计算。此外, 各保护终端间通过 GOOSE 互传开关量及模拟量信息, 即终端间信息共享, 也可实现小电流接地选线, 差动保护等保护功能, 通过终端间配合, 可实现快速故障隔离与恢复供电等功能。

GOOSE 的传输机制决定了其对开关量传输具有较好的实时性, 只能传输少量非实时的模拟量。对于配电网而言, 构造保护时需要共享的信息不多, 因此基于 GOOSE 网络, 实现站间及站内信息共享完全能够满足变电站保护控制要求, 目前国内已有一些厂家研发了相关产品。

GOOSE 报文传递的信息包括故障状态、故障类型及故障模拟量信息等, 其中故障类型我们约定用整型表示, 比如 1 表示短路故障, 2 表示单相接地故障, 3 表示过负荷等。具体编码见表 1。

表 1 GOOSE 报文编码格式

Table 1 Coding format of GOOSE message

GOOSE 数据总个数, INT32U		类型=8aH
		长度≤4
		总个数
GOOSE 数据的报头		类型=abH
		长度
GOOSE 数据 1	GOOSE 数据 1 类型	a2
	GOOSE 数据 1 长度	长度
	FaultState	类型=83H
		长度=1
		BOOLEAN
	FaultStyle	类型=85H
长度=1		
INTEGER		
GOOSE 数据 2	Fault Analog Information	类型=87H
		长度=1
		FLOATING
.....

智能变电站要求 GOOSE 等报文具有很高的实时性, 各种突发性、非实时信息易对 GOOSE、MMS 等信息的实时传输产生影响, 此外网络的瞬时过载, 广播风暴等会导致网络性能急剧下降, 正常的数据通信无法进行^[8]。基于漏桶模型的信息流量控制方法, 是一种基于输入速率的流量控制机制, 其基本思想是通过发放标权来控制不同数据流的平均速度和峰值速度^[9-10], 每个队列中的信息需要从相应的漏桶中获取标权才允许进入网络漏桶模型的基本原理如图 5 所示。

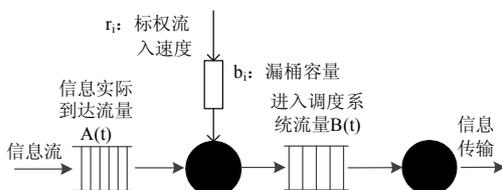


图 5 漏桶模型控制网络流量基本原理图

Fig. 5 Basic principle diagram of leaky bucket controlling network traffic model

为避免排队获取标权影响重要报文的实时性, 可根据不同报文的优先级级别设置不同的标权流入速度。交换机将接收到的信息按照优先级进行分类, 并放至不同的队列中。每个队列均设置漏桶模型进行流量控制, 信息获取标权进入发送缓冲区队列后, 按信息优先级对其传输顺序进行调度, 保证网络上的各种流量以基本恒定和有序的方式占用网络资源。

在设计装置通信时, 要考虑最大传输量情况下的传输延时, 尤其是接收延时, 防止在固定时间内由于最大接收报文量引起的网口溢出而丢失报文或延时过长。此外, 还可以采用合理的交换机虚拟局域网(VLAN)技术和多播地址过滤或保护装置网卡媒体访问控制(MAC) 地址过滤等方式, 避免其他报文对网口的冲击^[11-12]。

4 系统应用情况

某矿应用本文研发的煤矿智能供电系统区域集控式故障识别与隔离技术进行供电系统智能化改造, 故障类型判别与故障点定位均实现了智能化, 彻底改变了常规人工实验判定方法。故障影响面, 事故发生时序均可可视化后台显示, 受到现场工程技术人员一致好评。故障判定与隔离时间由原来的 1~2 h 有效缩短到秒级。经统计, 智能化改造前, 年发生越级和漏电故障引起的故障扩大事故 16 次, 影响生产有效累计时间达 25 h, 智能供电系统投运一年后, 无越级和漏电引起的故障区域扩大事故, 没有供电故障造成影响生产情况发生。

5 结论

本文研发基于智能变电站的区域集控技术, 综合全站信息作出判断, 能够识别各种穿越性故障和正常运行状态, 具有很好的速动性和可靠性。经核算, 对于速动性要求很高的短路故障, 本系统采用突变量启动技术, 最快 1/4 周波连续启动可以识别出短路故障, GOOSE 报文上传下发耗时考虑网络拥塞情况下不超过 5 ms, 所以考虑各种极端情况短路故障可在 15 ms 内完成识别与隔离。基于 IEC61850 标准, 开创性的给出了故障识别与隔离技术的信息模型, 促进了智能变电站高级应用功能的实现, 有力的推动了 IEC61850 标准在配电领域的应用。

参考文献

[1] 马星河, 李林蔚, 李自强, 等. 煤矿井下高压电网过流保护整定计算方法的改进研究[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2014, 42(10): 90-95.
- MA Xinghe, LI Linwei, LI Ziqiang, et al. Improvement and research on the setting calculation method of overcurrent protection of the underground high-voltage distribution network of coal mine[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 90-95.
- [2] 张晓明, 公茂法, 郗忠梅, 等. 基于 FPGA 的矿井电网电流保护系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 200-205.
- ZHANG Xiaoming, GONG Maofa, XI Zhongmei, et al. Study on current protection system of mining power network based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 200-205.
- [3] 张鑫, 牟龙华. 基于信息融合的矿山电网复合保护[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1947-1952.
- ZHANG Xin, MU Longhua. Research on compound protection for mine power network based on information fusion[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1947-1952.
- [4] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18.
- WANG Zengping, JIANG Xianguo, ZHANG Zhichao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.
- [5] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 智能配电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 2-9.
- XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection and control applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 2-9.
- [6] Q / GDW 441-2010 智能变电站继电保护技术规范[S].
- Q / GDW 441-2010 technical specifications of protection for smart substation[S].
- [7] IEC61850-8-1 communication networks and systems in substations: part 8-i specific communication service mapping (SCSM)-mappings to MMS(ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO / IEC 8802—3[S]. 2004.
- [8] 刘明慧, 赵晓东, 司梦, 等. 智能变电站过程层网络流量管理方式研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 87-92.
- LIU Minghui, ZHAO Xiaodong, SI Meng, et al. Research and application of process level network flow management in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 87-92.
- [9] 辛建波, 上官帖. 基于漏桶和服务分类机制的数字化变电站信息传输方法[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 85-90.
- XIN Jianbo, SHANGGUAN Tie. A digital substation information transmission method based on leaky bucket model and class of service mechanism[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 85-90.
- [10] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 98-104.
- DOU Xiaobo, HU Minqiang, WU Zaijun, et al. Simulation analysis on performance of communication networks in digital substations[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 98-104.
- [11] 方晓洁, 季夏轶, 卢志刚. 基于 OPNET 的数字化变电站继电保护通信网络仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 137-140.
- FANG Xiaojie, JI Xiayi, LU Zhigang. Study on relaying protection communication network in digital substation using OPNET simulation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 137-140.
- [12] 宋国果, 舒勤, 贺含峰. 数字化变电站过程层通信网络实时性仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 71-76.
- SONG Yuanguo, SHU Qin, HE Hanfeng. Communication network real-time performance simulation analysis based on process layer of digital substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 71-76.

收稿日期: 2014-07-01; 修回日期: 2014-07-30

作者简介:

刘建华(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能变电站、电力系统继电保护、煤矿电网安全供电;

刘鹏(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站、电力系统继电保护; Email: lpcumt@163.com

元航(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站、电力系统继电保护。

(编辑 张爱琴)