

文章编号:1671-251X(2024)S1-0200-05

煤矿井下智能电力监控及故障诊断系统应用研究

申迎松¹, 戴万波^{2,3}

(1. 山西天地王坡煤业有限公司, 山西 晋城 048000; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;
3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要:随着煤矿开采的逐步深入,高功率用电设备的投入增多,煤矿供电结构越来越复杂,供电安全问题越来越突出。为实现电网故障早期的诊断预测,缩短故障处理时间,减少供电事故的发生,在煤矿井下安装智能电力监控及故障诊断系统。该系统可实现基于相敏保护特性的短路故障诊断和故障选线,可实现基于GOOSE快速报文通信机制的防越级跳闸功能。对系统故障诊断原理(防越级跳闸原理和短路故障诊断原理)进行了分析,并设计了系统安装方案,监测范围包括风井10 kV变电所、工业场地、压风机房、中央变电所、201运输巷、201回风巷和一采区运输上山。对系统的电力参数监测功能、分合闸控制功能、防越级跳闸功能、短路故障诊断功能和单相接地故障诊断功能进行了实际试验测试,测试结果表明系统各项功能正常。系统应用解决了矿上越级跳闸等供电安全隐患问题,提高了电网管理的自动化水平,提高了井下电网的供电安全性和可靠性,为智能矿山建设提供了助力。

关键词:电力监控;故障诊断;越级跳闸;故障选线;相敏保护

中图分类号:TD76

文献标志码:A

Research on the application of intelligent power monitoring and fault diagnosis system in underground coal mines

SHEN Yingsong¹, DAI Wanbo^{2,3}

(1. Shanxi Tiandi Wangpo Coal Industry Co., Ltd., Jincheng 048000, China; 2. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Beijing Engineering and Research Center of Mine Safe, Beijing 100013, China)

0 引言

目前,由于高功率用电设备的投入,在用电高峰阶段,井下非线性大功率负荷的投入使用,造成功率因素下降、电压波动、谐波产生等问题,还造成大量的无功功率在电网用电设备间切换,严重影响了电网的供电安全。现有煤矿企业采用人工查找问题并维修的方式,大大影响了煤矿的安全生产,易造成重大安全事故的发生。随着开采的逐步深入,煤矿井下电网结构越来越复杂,由于煤矿井下电网的独特结构,层级之间距离较短,每层的分支较多,当发生短路故障时如何快速确定故障位置并及时切断故障线路,避免故障扩大化是保障煤矿供电安全的重点也是难点^[1-2]。

为实现电网故障早期的诊断预测,缩短故障处理时间,减少供电事故的发生^[3-4],安装了煤矿井下

智能电力监控及故障诊断系统,对系统的电力参数监测功能、分合闸控制功能、防越级跳闸功能、短路故障诊断功能和单相接地故障诊断功能进行了实际试验测试。

1 系统概述

煤矿井下智能电力监控及故障诊断系统对煤矿井下供电网络及供电设备进行实时在线监测,能实现远程分合闸控制,实现用电设备的集中管理,对监测各分支电网数据和故障录波数据进行实时分析,对电网存在的故障隐患及时发现,并发出预警且提出处理建议。系统能够通过智能控制技术,对短路、漏电等故障及时进行诊断并实现精准选线,然后采取自动跳闸措施实现故障支路切断,并通过防越级跳闸机制避免越级跳闸造成大面积停电事故发生,从而可避免火灾爆炸等安全事故发生。系统还具有

收稿日期:2024-01-25;编辑:郑海霞。

作者简介:申迎松(1988—),男,河北衡水人,高级工程师,硕士,研究方向为矿业工程,E-mail:761013618@qq.com。

用电量计算分析、定值计算、故障录波、漏电选线等功能^[5]。

煤矿井下智能电力监控及故障诊断系统由电力监控分站、综合保护器、隔离器、摄像头和监测传感器等设备组成。系统通过交换机构建井下以太光纤环网,交换机采用基于 IP 广播组的 VLAN 组网技术设计,其他设备通过网线或光纤接入交换机形成煤矿井下智能电网通信网络。软件平台基于 Windows 操作系统,硬件以工控机或高档 PC 机为主,软件设计中采用 MH-SCADA 组态系统开发平台编写,为用户提供可靠、安全、易于操作的监控系统平台^[6]。电力监控分站实现电网的故障智能识别和选线,并将数据通过环网上传给电网监控软件平台,实现电网故障的监控与预警。综合保护器安装在高爆开关等电力设备内,用于测量电压、电流、有功、无功、谐波等电能参数,可测量电网故障特征参数,并将参数发送给电力监控分站。综合保护器之间采用 GOOSE 通信技术,实现防越级跳闸功能。摄像头实现高爆开关等设备状态的可视化在线监测。绝缘监测传感器采用消噪处理算法提取电缆中的特征信号,实现电缆的绝缘在线监测。温度监测终端可实时监测三相电缆各出线头和进线头的温度、监测高压触点温度、监测变压器绕组温度等。甲烷、烟雾等传感器实现变电所环境监测。

2 系统故障诊断原理

1) 防越级跳闸原理。系统采用 GOOSE 命令实现防越级跳闸功能,GOOSE 是一种快速报文通信方法,在开关检测正常时,保护器以 T_0 时间长度发送握手信息,当发生短路跳闸故障时,保护器以 T_1 时间长度发送 2 次闭锁信息,然后再以 T_2 时间长度发送 2 次闭锁信息,保护器再恢复 T_0 时间长度发送握手信息^[7]。GOOSE 命令信息发送时序如图 1 所示。

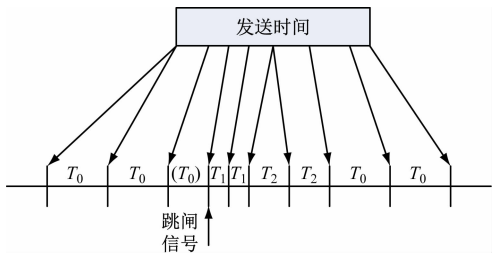


图 1 GOOSE 命令信息发送时序

防越级跳闸原理如图 2 所示,工作面配电点某开关检测到线路发生短路故障,当故障电流达到该开关保护器定值时,保护器启动跳闸保护动作,同时向上级的采区变电所、中央变电所和地面变电所的保护器发送 GOOSE 闭锁命令,各级保护器再收到

闭锁命令后,实现跳闸功能闭锁,闭锁有一定的时间限制,当达到闭锁时间后,即解除闭锁状态恢复正常保护功能。

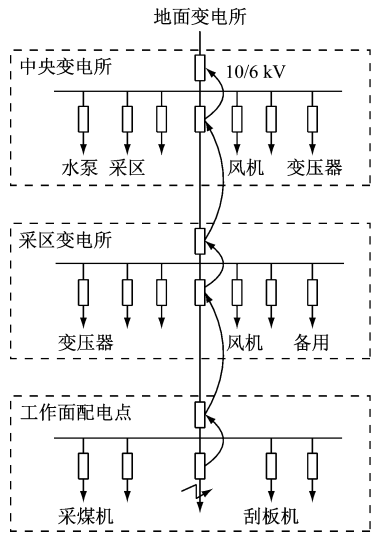


图 2 防越级跳闸原理

2) 短路故障诊断原理。对于电网短路故障,开关一般要设置速断保护功能,当故障电流达到设置的定值时即启动跳闸操作。这种保护方式对于整条线路的保护定值一般设置比较小,对于大型感性负载启动时的启动电流有时会超过设置的保护定值,从而导致保护开关的误动作,为了避免误动作的发生,就需要把保护定值设置的比较大,这就增加了保护的迟滞性^[8-9]。

经过实验测试发现:当井下感性负载设备启动时,相位角 φ 一般在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 之间,功率因数 $\cos \varphi$ 一般在 $0.50 \sim 0.25$ 之间,当发生短路故障时,功率因数 $\cos \varphi$ 达 0.9 以上^[10]。在检测电流大小的同时,采用相敏保护对相位角 φ 进行判断,来区分是短路故障电流还是设备启动电流。

$$I \cos \varphi = C \tag{1}$$

式中: I 为电流; C 为常数,通过确定合理的数值,可达到很好的相敏保护效果。

电动机相敏保护特性曲线如图 3 所示,常规鉴幅特性保护曲线是平行于 x 轴的一条直线,相位角不参与保护判断,只要达到定值就实施跳闸保护,这样电动机启动时发生误保护的可能性很大^[11]。规程一般要求保护定值的设置要比电动机启动电流大,且大于线路上最小短路电流的 50% ,但在煤矿电网条件这个要求很难达到。从图 3 可看出,相敏保护特性曲线具有近似的线性特性,有相位角的参与判断,短路电流在比较小的情况下,仍能作出准确的判断,因此相敏保护特性对短路故障具有很好的诊断效果。

但当短路故障发生在变压器的出线端,变压器

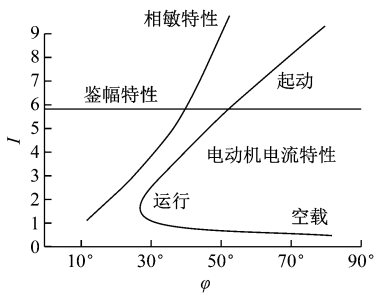


图 3 相敏保护特性曲线

主要表现为感性阻抗^[12-13]。此时功率因数 $\cos \varphi$ 小于 0.2,相敏保护也失去了效果。在这种情况下,需设置附加条件,既当故障电流比设置的定值大 3 倍时,不再进行相位角的判断,立即采取跳闸保护动作。

$$X_T \gg R_T \tag{2}$$

式中: X_T 为变压器电感; R_T 为变压器内阻。

因此,相敏保护为

$$\begin{cases} I_d > kI_{dz} \\ I_d \cos \varphi > I_{dz} \end{cases} \tag{3}$$

式中: I_d 为短路故障电流; k 为系数; I_{dz} 为整定值。

3 系统安装方案

井下负荷情况:设备装机总容量为 7 483.20 kW,工作电动机总容量为 5 543.20 kW,有功功率为 3 431.53 kW,无功功率为 3 320.74 kvar,视功率为 4 775.22 kVA,自然功率因数为 0.72,井下电耗为 17.18 kW·h/t。井下最大涌水时用电情况:有功功率为 4 147.38 kW,无功功率为 3 726.44 kvar,视功率为 5 575.58 kVA。

矿井设置变电所包括地面风井 10 kV 变电所、工业场地西北区 10 kV 变电所、压风机房 10 kV 变电所、10 kV 中央变电所、1E4-201 运输巷掘进面变电所、1E4-201 回风巷掘进面变电所和一采区运输上山变电所。变电所开关情况见表 1。

井下中央变电所用来自地面 35 kV 变电所,下井电缆引自变电所 10 kV 母线的 I,II 2 段,并沿着副井井筒布置到井下中央变电所。I,II 2 段母线实现井下中央变电所的双回路供电,当一个回路出现故障时,自动切换到另一回路供电,从而保障井下供电的正常运行^[14-15]。

在地面安装电力监控系统软件,建立电力调度后台,双机热备自动切换。在变电所(配电点)内安装电力监控分站,与变电所(配电点)内的高低电压开关、移动变电站的智能保护器通信,实现变电所(配电点)的就地监控和远程数据上传。系统安装如图 4 所示。

表 1 变电所开关情况

位置	变电所名称	开关类型	开关数量/个
地面	风井 10 kV 变电所	高压开关柜	7
	工业场地	高压开关柜	7
	压风机房	高压开关柜	7
井下	中央变电所	高压隔爆开关	18
		真空馈电开关	16
	201 运输巷	移动变电站	2
		真空馈电开关	9
	201 回风巷	移动变电站	2
		真空馈电开关	9
	一采区运输上山	移动变电站	2
		真空馈电开关	5

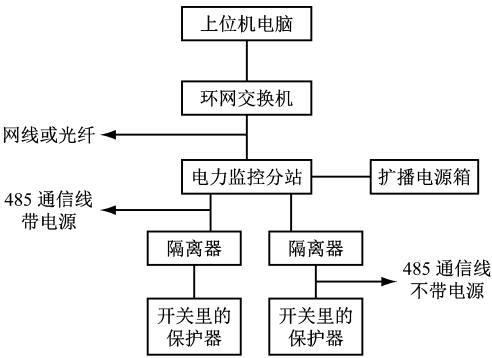


图 4 系统安装

4 试验测试

1) 防越级跳闸功能试验。采用风井 10 kV 变电所 10204 号开关柜、中央变电所 10220 号高压开关和 1E4-201 运输巷掘进面 10202 号开关组成的一条供电线路作为试验线路。经过验算,该线路最小两相短路电流为 2 758.38 A。在 1E4-201 运输巷掘进面 10202 号开关备用开关负荷侧增加 1 个短路接线盒,当备用开关启用时,短路接线盒发生作用使线路发生短路故障,从而达到防越级跳闸功能试验的目的^[16-17]。

首先对风井 10 kV 变电所 10204 号开关柜、中央变电所 10220 号高压开关和 1E4-201 运输巷掘进面 10202 号开关的工作状态进行测试,测试 3 个开关是否工作正常。测试内容包括:开关实时数据能否正常上传,能否进行定值设置操作,能否进行远程分合闸操作。现场测试情况见表 2。

然后对 3 个开关的定值和参数进行设置,设置具体数据见表 3。

将 1E4-201 运输巷掘进面 10202 号开关防越投入终端状态,其他开关设置为馈线状态,设置完成后即可开始试验工作。调度室安排专门人员进行

表 2 开关工作情况测试数据						
变电所	开关 编号	实时 数据	定值 操作	遥控 合闸	遥控 分闸	结论
风井 10 kV 变电所	10204	正确	正常	正常	正常	正常
中央变电所	10220	正确	正常	正常	正常	正常
201 运输巷掘进面	10202	正确	正常	正常	正常	正常

表 3 开关定值及参数设置			
	201 运输 巷掘进面	中央变电所	风井 10 kV 变电所
柜号	10202	10220	10204
变比	PT	100	100
	CT	40	80
速断定值/A	1 000	1 380	2 300
速断控制字	—	投跳闸	—
防越跳闸判断	终端	馈线	—
后备保护延/s	0	0.12	—

表 4 防越级跳闸试验数据记录						
变电所	开关编号	速断定值/A	开关状态	时刻	动作事件	最大电流/A
201 运输巷掘进面	10202	1 000	分闸	14:07:07	速断 1 549.8	2 476.3
中央变电所	10220	1 380	合闸	14:07:07	过流 II 越限启动 1 495.5	2 560.7
风井 10 kV 变电所	10204	2 300	合闸	14:07:07	过流 II 越限启动 2 430.5	2 439.8

方法仍采用加接短路接线盒的方式^[18-19]。当调度值班人员远程操作开关线路发生短路接地故障时，I 段母线的电压瞬降，最后降到 0 左右，其零序电流发生瞬间升高现象，母线各分支线路的三相电流和零序电流数据见表 5。

表 5 I 段母线分支线路电流数据 A				
线路编号	I_A	I_B	I_C	I_O
225	0.79	0.56	0.25	0.49
221	179.58	183.42	185.01	4.10
219	14.78	19.49	17.87	3.20
217	0.26	0.66	1.14	0.82
203	0.52	0.48	0.46	0.18
205	144.69	134.58	152.55	8.30
207	117.59	105.37	106.44	18.20
211	0.37	0.35	0.41	0.04
213	24.91	24.23	23.76	0.84
215	30.57	29.63	28.42	2.70

由表 5 可看出，207 线路的零序电流数值最大，暂态零序电流幅值最大，且极性相反，其线路故障特征非常明显。根据此作为判断依据，系统判断 207 线路发生了单相接地故障，并发出故障预警。调度

远程控制 10202 号备用开关实现合闸启用，在短路接线盒的作用下，10202 号备用开关检测到短路电路并超过了设置的定值，备用开关启动速断跳闸操作，由于设置了防越级跳闸功能，其他开关不会发生跳闸操作。各个开关按照上述说明进行动作既表示防越级跳闸功能正常。上位机监控平台及时读取各开关电力参数，读取 10202 号备用开关的电流峰值和故障状况实时录波波形数据。完成试验后，及时拆除短路接线盒，并恢复正常供电，对开关及线路的工作状态进行检查核实，确认一切正常后，方可安排正常生产作业。

此次试验数据记录情况见表 4，可看出 10202 号备用开关在 14:07:07 时发生速断动作事件，其他 2 个开关发生过流 II 越限启动事件，但并没发生跳闸事件，线路最大电流为 2 560.7 A。试验验证了系统防越级跳闸功能正常。

2) 单相接地故障诊断试验。在中央变电所 I 段母线选择 207 线路进行单相接地故障试验，试验

室值班人员现场查看上位机监控系统故障提示信息，确定系统能准确诊断故障发生，并明确故障发生在 207 线路。

3) 两相瞬时短路诊断试验。采用加接短路接线盒的方式^[20-21]在中央变电所 I 段母线选择 221 线路进行 A、C 两相瞬时短路故障试验。当调度值班人员远程操作开关线路发生两相短路故障时，I 段母线的 A、C 两相电压瞬间降低，221 线路电流瞬间升高，母线各分支线路电流数据见表 6。

表 6 故障时 I 段母线各分支线路电流数据 A			
线路编号	I_A	I_B	I_C
225	0.63	0.45	0.29
221	990.56	61.42	1 012.61
219	6.61	5.44	6.11
217	0.58	0.57	0.57
203	0.50	0.48	0.47
205	94.92	95.05	95.42
207	40.72	40.35	40.22
211	0.46	0.46	0.47
213	25.14	24.72	24.40
215	77.28	76.23	75.79

从表 6 可看出,221 线路 A、C 两相的电流增大很多,从正常的 60 A 增大到 1 000 A 左右,达到了设置的保护定值门限,保护器控制开关实现跳闸操作,并完成自动故障录波。电流下降时由于保护器和断路器的延时效应,下降曲线出现一个坡度,并不是断崖式下降情况。从监测数据和故障录波图形分析上可明确该线路发生了短路故障。调度室值班人员现场查看上位机监控系统故障提示信息,确定系统能准确诊断故障发生,并明确故障发生在 221 线路。

5 结语

煤矿井下供电系统发生短路故障时如何快速确定故障位置并及时切断故障线路,避免故障扩大化是保障煤矿供电安全的重点也是难点。煤矿井下智能电力监控及故障诊断系统可实现基于相敏保护特性的短路故障诊断和故障选线,可实现基于 GOOSE 快速报文通信机制的防越级跳闸功能。对系统的电力参数监测功能、分合闸控制功能、防越级跳闸功能、短路故障诊断功能和单相接地故障诊断功能进行了实际试验测试,测试结果表明系统各项功能正常。系统应用解决了矿上越级跳闸等供电安全隐患问题,提高了电网管理的自动化水平,提高了井下电网的供电安全性和可靠性,为智能矿山建设提供了助力。

参考文献:

[1] 张太浩. 煤矿电力监控系统的研究与分析[J]. 河北能源职业技术学院学报,2023,23(2):65-68.

[2] 倪少军,李双良,匡欣欣,等. 面向煤矿供电的智能分布式防越级保护系统[J]. 工矿自动化,2021,47(增刊 1):78-80,87.

[3] 刘杰,唐术成,邹劲松. 煤矿电力监控系统研究与应用[J]. 科技创新与应用,2023,13(16):193-196.

[4] 梁智清. 煤矿电力监控系统的设计与应用[J]. 自动化应用,2023,64(8):58-60.

[5] 王乐军. 基于 μ COS 的煤矿电力监控分站研制[J]. 煤

矿机械,2023,44(3):198-201.

[6] 李忠奎. 基于粗糙集理论的煤矿井下电网故障识别技术研究[J]. 煤矿机械,2017,38(2):152-154.

[7] 冯亮,田德良,冯飞. 探究煤矿供电越级跳闸问题[J]. 设备管理与维修,2021(18):23-25.

[8] 周一恒,严家明,吴新忠,等. 矿山电力变压器与普通电力变压器绝缘纸老化特性对比分析[J]. 工矿自动化,2020,46(11):34-40.

[9] 李忠奎,叶锦娇. 煤矿井下动力电缆绝缘在线监测技术研究[J]. 煤矿机械,2016,37(12):20-22.

[10] 杜强. 矿井供电智能监控系统设计[J]. 能源与节能,2021(5):115-116,166.

[11] 王天君. 基于云计算的矿山机电设备智能监控系统[J]. 矿业装备,2022(3):228-229.

[12] 邵军. 计算机智能监控系统在现代煤矿生产中的应用[J]. 煤矿机械,2010,31(8):3. DOI:10. 3969/j. issn. 1003-0794. 2010. 08. 110.

[13] 杨锦绣,李春贺. 基于人工智能的企业安全智能监控系统研究——以煤炭企业为例[J]. 黑河学院学报,2021,12(7):49-51,73.

[14] 成泽军. 基于工业以太网的煤矿电力监控系统设计[J]. 机械工程与自动化,2022(3):176-178.

[15] 屈振兵. 响沙湾煤矿 110 kV 变电站智能化改造[J]. 工矿自动化,2021,47(增刊 2):126-129.

[16] 聂立功,张海军. 基于 GIS 的煤矿井下电力监控管理系统[J]. 工矿自动化,2013,39(11):93-95.

[17] 李大锋,赵帅,吴峰. 基于工业以太网的煤矿电力监控系统的应用[J]. 工矿自动化,2011,37(1):84-86.

[18] 彭渝,王安义. 基于 TD-SCDMA 的煤矿智能电力故障检测与分析系统[J]. 工矿自动化,2014,40(6):110-113.

[19] 罗超,耿蒲龙,曲兵妮,等. 矿井供电系统单相接地故障零模特征仿真研究[J]. 工矿自动化,2018,44(6):57-63.

[20] 王清亮,秦洁,刘新茹. 煤矿电网不对称故障辨识与定位方法[J]. 工矿自动化,2018,44(12):71-77.

[21] 韩国国,史小军,王晖,等. 基于 RCMDE 和 KFCM 的煤矿电网故障选线方法[J]. 工矿自动化,2022,48(8):92-99.