

文章编号:0253-9993(2012)06-1056-05

相敏保护在负荷控制中心的研究应用

郑丽君¹, 宋建成¹, 高云广², 耿蒲龙¹

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原科技大学 信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:对比了电动机起动与三相短路故障的电气特性, 设计了基于功率因数与电流值合成的相敏型三相短路保护电路, 进行了数据测试, 分析了保护特性, 并将其应用于 KJZ-4000-10(6)/3.3 矿用隔爆兼本质安全型负荷控制中心。运行结果表明, 相敏保护电路可有效区别电动机起动电流与三相短路电流, 动作稳定灵敏, 从未发生误动或拒动现象, 实现了对矿井电网的可靠短路保护。

关键词:相敏保护; 负荷控制; 短路故障; 综采工作面

中图分类号:TD611 **文献标志码:**A

Research and application of phase-sensitive protection in load control center

ZHENG Li-jun¹, SONG Jian-cheng¹, GAO Yun-guang², GENG Pu-long¹

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: According to the field requirements, the electrical characteristics between motor starting and three phase short-circuit were compared, the phase-sensitive protection circuit based on the synthesis of power factor and current amplitude was designed, the protection data was tested and the protection characteristic was analyzed. The phase-sensitive protection circuit was used in KJZ-4000-10(6)/3.3 flameproof and intrinsically safe load control center. The circuit can effectively distinguish motor starting current and three-phase short-circuit current and is stable, sensitive and reliable. It is proved that the short-circuit protection of power in underground is reliably realized.

Key words: phase-sensitive protection; load control; short-circuit fault; mechanized working face

负荷控制中心是对综采工作面负荷集中供电、控制与保护的重要设备, 其保护功能的灵敏度与可靠性直接影响着煤矿井下供电的安全性、可靠性和连续性, 短路保护是负荷控制中心所具备的最重要保护之一^[1-2]。随着采煤效率的不断提高, 井下供电条件越来越复杂, 对短路保护提出了更高要求^[3], 相敏型短路保护原理通过同时采样电流幅值和功率因数, 能够区分系统大电流究竟是大型电机起动电流, 还是短路电流, 是一种较好的短路保护方式^[4]。但传统的功率因数检测方法是电网电压、电流正弦波整形为方波, 通过检测周期性方波来计算功率因数值, 采集的信息落后一个电源周期, 实时性不好, 抗干扰能力不强^[5-6]。本文设计了一种实时合成电流信号幅值和功率因数的相敏保护电路, 信号实时性强, 动作迅速可靠, 满足了矿井恶劣供电条件下对短路保护的要求。

1 电动机起动与三相短路的电气特性对比

1.1 电动机起动电气特性

由电机学^[7]原理可知, 经过归算后的感应电动机电压方程和磁动势方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1(R_1 + jX_{1\sigma}) - \dot{E}_1 \\ \dot{E}'_2 &= \dot{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}'_2 = -\dot{I}_m Z_m \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, \dot{U}_1 为电源电压; \dot{I}_1 为定子电流; R_1 为定子漏电阻; $X_{1\sigma}$ 为定子漏电抗; \dot{E}_1 为定子电动势; \dot{E}'_2 为转子

收稿日期: 2011-06-20 责任编辑: 许书阁

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点资助项目(2007BAB13B01, 2007BAK29B05); 山西省青年自然科学基金项目(2011021015-1)

作者简介: 郑丽君(1981—), 女, 山西太原人, 讲师, 博士研究生。E-mail: bench621@163.com。通讯作者: 宋建成(1957—), 男, 山西临猗人, 教授, 博士。E-mail: sjc6018@163.com

电动势估算值; \dot{I}'_2 为转子电流归算值; R'_2 为转子等效电阻; s 为转差率; \dot{X}'_{2s} 为转子等效电抗; \dot{I}_m 为激磁电流; Z_m 为激磁阻抗。据式(1)可得

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{1s} + \frac{Z_m Z'_2}{Z_m + Z'_2}} \quad (2)$$

由式(2)可知,由于 \dot{U}_1 、定子阻抗 Z_{1s} 和 Z_m 均是定值,所以 \dot{I}_1 随 Z'_2 的变化而变化。由于

$$Z'_2 = R'_2 + \frac{1-s}{s}R'_2 + j\omega X'_{2s} \quad (3)$$

所以, \dot{I}_1 随 s 的变化而变化。当电动机启动时, $s=1$, 此时有

$$Z'_{2s} = R'_2 + j\omega X'_{2s} \quad (4)$$

由式(4)可知,转子启动阻抗 Z'_{2s} 小于电动机运行时的转子阻抗,所以电动机启动时, \dot{I}_1 数值较大。根据以上分析,可得感应电动机相量关系如图1所示。

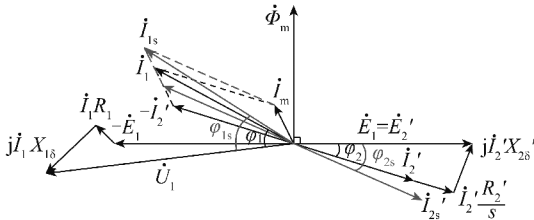


图1 三相异步电动机相量

Fig. 1 Vector diagram of three phase asynchronous motor

由图1可知,定子启动阻抗角 ϕ_{1s} 大于电动机运行时的 ϕ_1 值,所以电动机启动时,定子功率因数较低。

1.2 三相短路故障电气特性

供电系统发生三相对称短路故障时,其等效电路如图2所示。

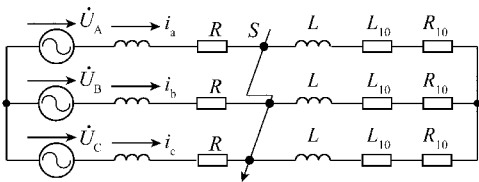


图2 三相短路故障等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of symmetrical short-circuit

图2中, R, L 为线路电阻和电感, R_{10} 和 L_{10} 为负载电阻和电感。由于电路对称,可取一相来分析。在 s 处发生三相短路故障时,负载回路被短接,电流由原来的负载电流增大为短路电流 i_s ,若电源容量为无限大,则

$$L \frac{di_s}{dt} + Ri_s = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

其解为

$$i_s = i_{pe} + i_{ap} = I_{pem} \sin(\omega t + \theta - \varphi_s) + [I_m \sin(\theta - \varphi) - I_{pem} \sin(\theta - \varphi_s)] e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (6)$$

式中, U_m 为电压幅值; θ 为电压初相角; i_{pe} 为短路电流周期分量; i_{ap} 为短路电流非周期分量; I_{pem} 为短路电流周期分量幅值; φ_s 为短路回路的阻抗角; I_m 为电流幅值; φ 为电压电流之间的夹角; T_s 为短路回路时间常数, $T_s = L/R$ 。

由式(6)可以看出,短路电流 i_s 由两部分组成,周期分量 I_{pe} 和非周期分量 I_{ap} 。 I_{ap} 随时间而衰减, I_{pe} 随时间按正弦规律变化,其幅值

$$I_{pem} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (7)$$

因 R, L 值较小,所以 I_{pem} 值非常大,并且回路中,除变压器外,限流阻抗几乎全部是电阻性的,其功率因数接近1^[8]。由以上分析可知,电动机启动和三相短路故障均会产生幅值较大的过电流,但电动机启动时,功率因数较低,在0.3~0.5之间,而三相短路故障发生时,功率因数接近1。因此,只要在检测电流幅值的基础上,配合功率因数值,就可以区分电动机启动和系统三相短路故障,从而可靠地实现三相短路故障保护^[9-10]。

2 相敏保护电路设计

采用基于功率因数检测的相敏保护原理来实现短路保护,令 $I \cos \varphi = C$, 只要选择合适的常数 C 作为短路保护动作参数^[11-14], 就可以取得满意的保护效果。其电路原理如图3所示。

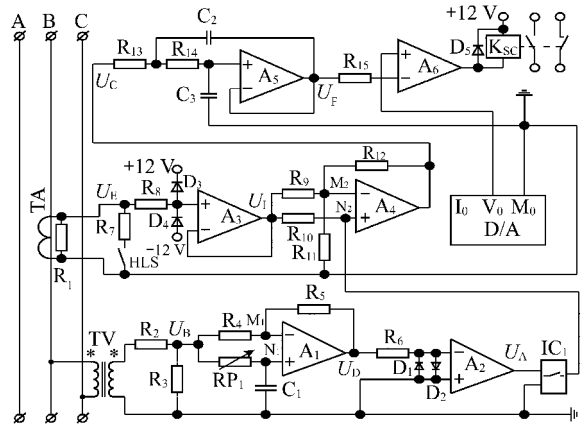


图3 相敏检测电路原理

Fig. 3 Schematic diagram of phase-sensitive measurement

相敏检测电路由控制电压转换电路、电流信号变换电路和驱动电路3部分组成。线电压 \dot{U}_{BC} 经电压

互感器 TV 降压后,送到滞后移相电路,经过反向过零检测器 A_2 ,其输出方波控制电子开关 IC_1 的通断。

B 相电流 \dot{I}_B 经电流互感器 TA 变换成小电流信号,再经 I/V 变换后送到电流比例放大电路。通过 IC_1 来控制放大电路的工作特性,使其输出始终为半波信号。对该信号进行滤波后,就能输出准确反映 $I \cos \varphi$ 数值的直流分量。数学分析如下:

$$U_C = \begin{cases} A\sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \varphi) & (0 \leq \omega t \leq \pi) \\ -A\sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \varphi) & (\pi \leq \omega t \leq 2\pi) \end{cases} \quad (8)$$

式中, A 为比例放大电路的放大倍数; U_1 为二次电流经 I/V 变换后的电压值; U_C 为比例放大电路输出电压; φ 为电压电流之间的夹角。

对 U_C 进行傅氏分解

$$U_C = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad \left(\omega = \frac{2\pi}{t} \right) \quad (9)$$

式中,直流分量

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U_C dt = \frac{A\sqrt{2}U_1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin(\omega t - \varphi) d\omega t - \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\omega t - \varphi) d\omega t \right] = 0.9AU_1 \cos \varphi \quad (10)$$

由式(10)可见,滤波电路的输出 U_F 能完全反映电网电流幅值与功率因数的乘积。将 U_F 与 D/A 输出的短路保护整定电压值相比较,若高于整定值,说明发生了短路故障,短路跳闸继电器 K_{SC} 吸合;若 U_F 低于整定值,说明系统没有发生短路故障, K_{SC} 保持释放状态。

由以上分析可知,相敏检测电路的输出能够反映 $I \cos \varphi$ 的乘积值,从而实现鉴别三相短路故障或电动机起动状态的功能。

2.1 滞后移相电路

相敏检测电路需要采集相电压和相电流间的相位关系,必须保证这两个物理量均取自同一相,若电流信号取自 B 相,则需获取 B 相电压^[15]。煤矿井下供电系统一般采用星形接法,具有线电压超前相电压 30° 的固定相位关系,因此,通过采集 \dot{U}_{BC} ,并将其向滞后方向移动 30° 就可以获得 B 相电压的相位。滞后移相电路由 R_4, R_5, RP_1, C_1 和 A_1 组成,其输入输出波形如图 4(a) 所示。曲线 a 代表移输入点 U_B 波形,曲线 b 代表输出点 U_D 波形。可以看出,曲线 b 相对于曲线 a 仅在相位上有所移动,幅值并没有改变。

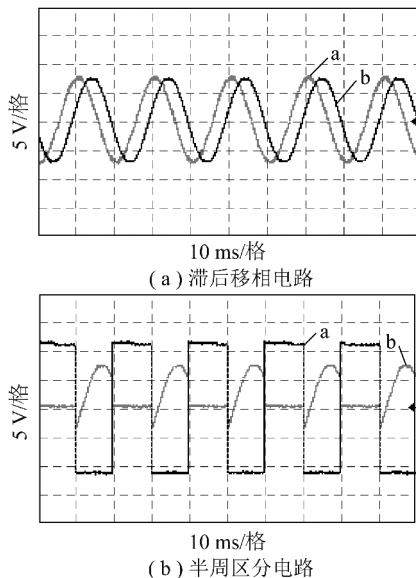


图 4 移相与半周期区分电路输入输出波形

Fig. 4 Waveforms of phase shifting and half cycle detecting

2.2 电压信号正负半周期区分电路

电路由 R_6, D_1, D_2, A_2 和 IC_1 组成,用来区分电压信号的正负半周,从而控制电流比例电路类型,其波形如图 4(b) 所示。曲线 a 代表 U_A 波形,曲线 b 代表 IC_1 输出点 U_{N2} 波形。电压正半周时, IC_1 输出为高阻态, $U_{N2} = U_1$; 负半周时, $U_{N2} = 0$ 。

2.3 电流比例放大电路

电流比例放大电路由 $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$ 和 A_4 组成,对信号 U_1 进行比例放大,是一个正反向比例放大功能相结合的电路,其放大类型的转换靠电压信号过零时实现。负半周时, $U_{N2} = 0$,相当于将 N_2 点接地,此时, $U_{M2} = U_{N2} = 0$, R_{11} 被短路,构成反向比例放大器。由于 $i_{N2} = 0$,所以 U_1 全部加在 R_9 上,放大倍数 $A = -R_{12}/R_9$ 。正半周时, IC_1 输出为高阻态,不影响 N_2 点状态, M_2 点通过 R_{11} 接地,构成同相比例放大器。电路中 R_{10} 是补偿电阻, $R_{10} = R_9 // R_{11} // R_{12}$; $U_{M2} = U_{N2} = U_1$; $i_{N2} = 0$ 。由此可得

$$U_C = \left(1 + \frac{R_{12}}{R_{11}} \right) U_1 \quad (11)$$

电流比例放大电路输入输出波形如图 5 所示。

图 5 中,曲线 a 代表电流比例放大电路输入点 U_1 波形,曲线 b 代表输出点 U_C 波形。可以看出,输出信号由电流幅值和 $\cos \varphi$ 共同决定,改变电流幅值或 $\cos \varphi$ 的大小就可以使输出波形发生变化。

2.4 滤波电路

滤波电路由 $R_{13}, R_{14}, C_2, C_3, A_5$ 组成,用来提取 U_C 中的直流成分。该滤波电路是单位增益压控二阶低通 Besel 型滤波器,其波形如图 6 所示。

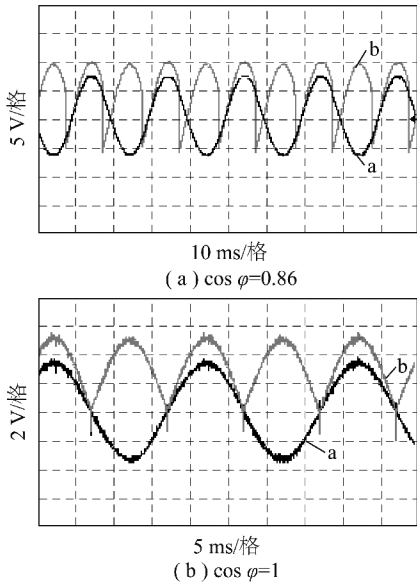


图5 电流比例放大电路波形

Fig.5 Waveforms of proportional amplifier

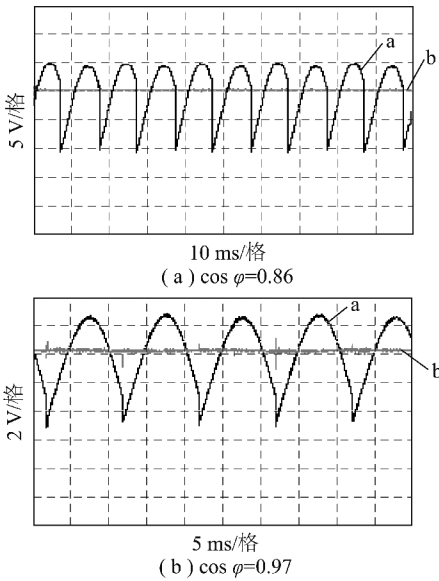


图6 滤波电路波形

Fig.6 Waveforms of filter

图6中,曲线a代表滤波电路输入点 U_C 波形,曲线b代表输出点 U_F 波形。可以看出, U_F 为一条平滑的直流电压信号,且电压电流间夹角的变化和电流幅值和 $\cos \varphi$ 的变化均会影响 U_F 的大小。

3 相敏电路实验数据与分析

利用图3所示的相敏电路进行实验,实验数据见表1。由表1可见, U_F 实测值与理论值误差小于 $\pm 2\%$,且改变电流值 I 与功率因数 $\cos \varphi$ 均可改变 U_F 的大小,说明 U_F 可以反映 $I \cos \varphi$ 的值。

4 相敏保护电路保护特性

假设短路保护整定为2倍额定电流动作,即 $I_{SD} =$

$2I_N$,其保护特性见表2。

表1 相敏保护实验数据

Table 1 Test results of phase-sensitive measurement tests

电压/V	电流/A	$\cos \varphi$	信号/V		误差/%
			理论	实测	
9.91	100	0.90	1.22	1.24	+1.64
9.92	100	0.70	0.95	0.94	-1.05
9.93	100	0.50	0.68	0.69	+1.47
9.88	150	0.80	1.62	1.65	+1.85
9.90	300	0.80	3.24	3.20	-1.23
9.92	400	0.80	4.32	4.36	+0.93

表2 相敏保护动作特性

Table 2 Characteristics of phase-sensitive protection

I/I_N	2	4	6	8	10
$\cos \varphi$	1.00	0.50	0.33	0.25	0.20
$\varphi/(^\circ)$	0.00	60.03	70.77	75.56	78.50

由表2可知,当 $I = 3I_{SD}$,即 $I = 6I_N$ 时, $\cos \varphi > 0.33$ 时,相敏保护动作,该保护特性根本无法满足电动机起动时的要求,必须对动作曲线予以修正。若将相电压人为移相,使其超前对应相电流 θ ,则根据式(8)~(10)的推导过程,可得滤波电路的输出

$$U_F = 0.9AU_I \cos(\varphi + \theta) \quad (12)$$

改变 θ 时,修正后的保护特性见表3。

表3 修正后保护动作特性

Table 3 Correctional characteristics of phase-sensitive protection

I/I_N	2	4	6	8	10	
$\cos(\varphi + \theta)$	0.97	0.48	0.32	0.24	0.19	
$\theta = 15^\circ$	$\cos \varphi$	1	0.69	0.56	0.48	0.44
	$\varphi/(^\circ)$	0	46.1	56.2	61.1	63.9
$\theta = 20^\circ$	$\cos(\varphi + \theta)$	0.94	0.47	0.31	0.24	0.19
	$\cos \varphi$	1	0.74	0.62	0.55	0.51
	$\varphi/(^\circ)$	0	42.0	51.8	56.5	59.2
$\theta = 25^\circ$	$\cos(\varphi + \theta)$	0.91	0.45	0.30	0.23	0.18
	$\cos \varphi$	1	0.79	0.68	0.62	0.58
	$\varphi/(^\circ)$	0	38.1	47.5	51.9	54.6
$\theta = 30^\circ$	$\cos(\varphi + \theta)$	0.87	0.43	0.29	0.22	0.17
	$\cos \varphi$	1	0.83	0.73	0.68	0.64
	$\varphi/(^\circ)$	0	34.4	43.3	47.5	50.1

由表3可知,改变 θ ,可以影响 $\cos \varphi$ 的动作值,例如,仍然是 $I = 3I_{SD}$,即 $I = 6I_N$ 时,若 $\theta = 15^\circ$,则 $\cos \varphi > 0.56$ 时才动作,根据表3,可得修正后的保护特性曲线对比如图7所示。

由图7可见, θ 越大,相敏保护曲线越向上移,即当短路倍数一定时,增大 θ 可以提高 $\cos \varphi$ 动作值,

所以,只要选择合适的 θ 值就可以实现相敏保护。本文选 $\theta=20^\circ$,当 $I=6I_N$ 时, $\cos\varphi>0.62$ 时,相敏保护才动作,修正了保护特性,保证了电动机起动时,保护不误动作。

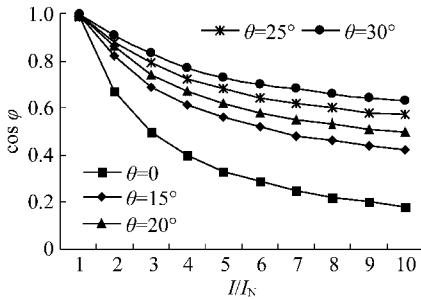


图7 相敏保护动作特性曲线对比

Fig. 7 Tripping characteristics of phase-sensitive measurement

5 结 论

(1)采用硬件成功率因数与电流幅值乘积的相敏保护电路,其输出能快速准确反映 $I\cos\varphi$ 的值,信号实时性好,满足三相短路故障时,保护应速断的要求。使用时,必须保证电压电流信号取自同一相,且将相电压向超前方向移动 θ 以修正保护特性,当整定电流为2倍额定电流时,可取 $\theta=20^\circ$,则当 $I=6I_N$, $\cos\varphi>0.62$ 时,相敏保护动作。当整定电流改变时,可依据文中提供的方法分析计算合适的 θ 值。

(2)该电路已成功应用于KJZ-4000-10(6)/3.3矿用隔爆兼本质安全型负荷控制中心,运行结果表明,其在电动机起动时不误动,系统短路故障时不拒动,可靠地实现了三相对称短路保护,具有重要的应用价值。

参考文献:

[1] 郑丽君. 3.3 kV 矿用智能型负荷控制中心的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.

[2] 陶学仪, 尚药世. 现代化矿井安全高效综采工作面供电技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1930-1934.

Tao Xueyi, Shang Yaoshi. Power supply technology of safety and high efficiency fully-mechanized coal mining technology working face of modernized mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1930-1934.

[3] 何将三, 魏树伟, 廖平, 等. 矿井风机多电机综合保护器的研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 216-220.

He Jiangan, Wei Shuwei, Liao Ping, et al. Study on multi-motors synthetical protector of fan in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 216-220.

[4] 王宾, 祝龙记. 基于单片机的矿用电动机相敏保护的实现[J]. 工矿自动化, 2006(1): 27-29.

Wang Bin, Zhu Longji. Implementation of phase-sensitive protection of mine-used motor based on single-chip microcomputer[J]. Industry

and Mine Automation, 2006(1): 27-29.

[5] 孙全才, 王清灵. 高速数字信号处理器在井下移动变电站相敏保护中的应用[J]. 煤矿机电, 2008(5): 97-98.

Sun Quancai, Wang Qingling. Application of phase-sensitive protection to transformer substation underground[J]. Colliery Mechanical and Electrical Technology, 2008(5): 97-98.

[6] 冯建勤, 宋寅卯. 基于电流采样值的相敏过电流保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(3): 77-80.

Feng Jianqin, Song Yinmao. New type of phase-sensitive overcurrent protection based on sampled value of current[J]. Proceedings of the Electric Power System and Automation, 2006, 18(3): 77-80.

[7] 汤蕴缪, 史乃. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[8] 郝忠梅, 张慧萍, 赵法起, 等. 智能型相敏保护在煤矿中的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2004, 35(1): 105-108.

Xi Zhongmei, Zhang Huiping, Zhao Faqi, et al. Application of intelligent phase-sensitive protection in coal mine[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science), 2004, 35(1): 105-108.

[9] 高俊岭, 王清灵, 朱咏梅. 矿用低压馈电开关中相敏短路保护的研究[J]. 工矿自动化, 2006(6): 54-56.

Gao Junling, Wang Qingling, Zhu Yongmei. The research of phase-sensitive short-circuit protection in mine-used low-voltage feeder switch[J]. Industry and Mine Automation, 2006(6): 54-56.

[10] 张晓明, 公茂法, 郝忠梅, 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.

[11] 牟龙华. 电动机相敏保护的原理与实现[J]. 电工技术杂志, 1996(3): 24-25.

Mou Longhua. The principle and realization of motor phase-sensitive protection[J]. Electrotechnical Journal, 1996(3): 24-25.

[12] 宋建成, 谢恒堃, 王雁欣, 等. 基于功率因数检测的矿井低压电网相敏保护的研究[J]. 电网技术, 1999, 23(2): 38-41.

Song Jiancheng, Xie Hengkun, Wang Yanxin, et al. Study on phase sensitive short circuit protection in underground LV distribution networks based on detecting power factor[J]. Power System Technology, 1999, 23(2): 38-41.

[13] 屈保中, 许兴广. 低压电动机的相敏保护及单片机实现[J]. 平顶山工学院学报, 2007, 16(4): 36-38.

Qu Baozhong, Xu Xingguang. Phase-sensitive protection for low-voltage motor and realized by single-chip microcomputer[J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2007, 16(4): 36-38.

[14] 宋建成, 石宗义, 杨毅, 等. 矿井电网过电流特征分析及其保护系统的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 81-86.

Song Jiancheng, Shi Zongyi, Yang Yi, et al. Study on the overcurrent character analysis and its protective system of underground LV distribution networks[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 81-86.

[15] 杨焱麟, 公茂法, 张晓明, 等. 基于FPGA的煤矿井下相敏过流保护器的研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(3): 165-167.

Yang Yanlin, Gong Maofa, Zhang Xiaoming, et al. Research of phase-sensitive overcurrent protective device in underground coal based on FPGA[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(3): 165-167.