

矿井低压电网选择性漏电保护性能的改进方法

宋建成 西安交通大学 (710049)

【摘要】 针对国内矿井低压电网漏电保护所存在的问题,提出了一种新型的选择性漏电保护系统,重点讨论如何提高保护系统性能指标的方法,并给出了其测试结果。现场运行表明该保护系统的各项指标均满足规定的要求。

【关键词】 矿井低压电网 选择性漏电保护 零序电流 零序电压

引言

漏电保护是煤矿井下低压电网的三大保护之一,它是保证煤矿井下安全供电、防止人身触电的重要措施。因而在煤矿井下低压电网中必须装设可自动切断馈电线路的漏电或选择性漏电保护装置^[1]。长期以来,我国煤矿井下使用着多种漏电保护装置,如JY82、JL80、JJKB30、U71、TEL2M等。按其工作原理,它们可分为附加直流检测型、零序电流型和零序电压型,由于这些保护装置均由单一原理构成,所以存在着以下缺点:

由附加直流检测原理构成的漏电保护,动作无选择性,即在电网任意一支路漏电时均会造成全电网停电,扩大了停电范围,且动作速度慢,寻找故障困难。

由检测零序电压大小构成的漏电保护装置,动作电阻值不稳定,电网三相绝缘电阻对称下降时,保护拒动。而且在单相漏电时,无选择性跳闸,动作时间长,增加了人身触电的危险性。

由检测零序电流大小构成的漏电保护,尽管在单相漏电时,可实现选择性跳闸,但动作值仍不稳定。尤其是电网支路数少时,易发生拒动或误动。

由零序电流方向构成的漏电保护,所需的零序电流和零序电压数值较小,动作仅取决于它们的方向,所以,其保护灵敏度高,选择性

好。但也存在动作值不稳定,绝缘电阻下降时保护拒动等缺点。

针对煤矿井下漏电保护长期存在的问题,“七·五”国家攻关项目中将矿井电网选择性漏电保护系统及装置的研究列为重点研究课题。井下低压电网两级选择性漏电保护系统及装置的研究就是其中的一个子项目。任务书要求所研究的系统应具有横向和纵向两级选择性,其动作时间分别为30ms和200ms,动作电阻值稳定,灵敏度高,工作可靠,并具有漏电闭锁和不断电试验功能。BKD₂-400Z/1140(660)(F)矿用隔爆型真空馈电开关^[2]就是其研究成果。本文就其中选择性漏电保护系统中性能参数的提高方法进行讨论。

1 保护系统组成与原理

煤矿井下低压选择性漏电保护系统由基于附加直流电源检测的漏电保护单元GLP和基于零序电流方向判断的漏电保护单元SLP_i($i=1\sim n$)组成,如图1所示。图中HVC为来自中央变电所的高压电缆,HVB为高压隔爆型真空开关,T为变压器,QLVB为干线低压真空断路器,TPR为三相电抗器,C为零序电压取样回路的电容器组,LVB_i、ZCT_i、LVC_i、C_i、r_i分别为第*i*条支线的真空断路器、零序电流变换器、低压电缆、对地分布电容和绝缘电阻。

GLP采用附加直流电源检测的工作原理,当低压电网中任意一点漏电时,它向各分支漏电保护单元SLP_i发出中断请求信号,以使

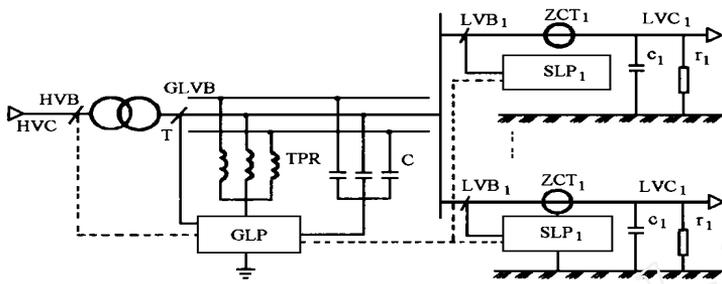


图1 井下低压电网及漏电保护系统
 SLP_i 能对漏电点作出判断。若在 150ms 内漏电点还存在,说明 SLP_i 拒动或漏电点存在于 GLVB 和 LVB_i 之间, GLP 发出 GLVB 跳闸信号,切断所有分支线路。若在 250ms 内漏电点还未消失,则说明总开关拒动, GLP 又会发出 HVB 跳闸信号。由此可见, GLP 可实现低压电网的纵向选择性漏电保护。漏电跳闸后, GLP 会通过显示器记忆故障状态,向维修人员提供判断故障和排除故障的信息。GLP 的另一功能是在线监测电网对地绝缘电阻并向 SLP_i 提供零序电压信号。

SLP_i 采用判断零序电流方向的工作原理,当电网中任意一支路发生漏电时,若忽略电网对地的绝缘电阻,故障支路的零序电流 i_{zs} 滞后零序电压 $U_{zs} 90^\circ$,而非故障支路的 i_{zs} 则超前

$U_{zs} 90^\circ$ 。所以计算机在接收到 GLP 发来的中断信号后,通过判断 i_{zs} 的方向,可辨别出故障支路,并发出跳闸信号,切断故障支路,而保持非故障支路继续供电。漏电跳闸后,故障支路的 SLP 通过显示器记忆故障状态。

2 性能参数改进方法

选择性漏电保护系统最基本的功能是实现漏电时分支馈电开关之间的横向选择性跳闸和总开关与分支开关之间的纵向选择性跳闸。其性能优劣可用动作电阻值的稳定性、动作时间动作可靠性和灵敏度等参数来描述。为了提高系统的保护性能,采取了如下改进措施。

2.1 动作电阻的稳定性

动作电阻既不能受电网长度变化的影响,也不能受电网漏电类型的限制。在该系统中从保护原理、滤波电路、非线性补偿等方面对动作电阻值的稳定性作了改进和提高。

2.1.1 保护原理的选取

在选择性漏电保护系统的 GLP 单元,采用了基于附加直流电源检测的工作原理,如图 2 所示。由图可见,经电源变压器 SPT 和电源变

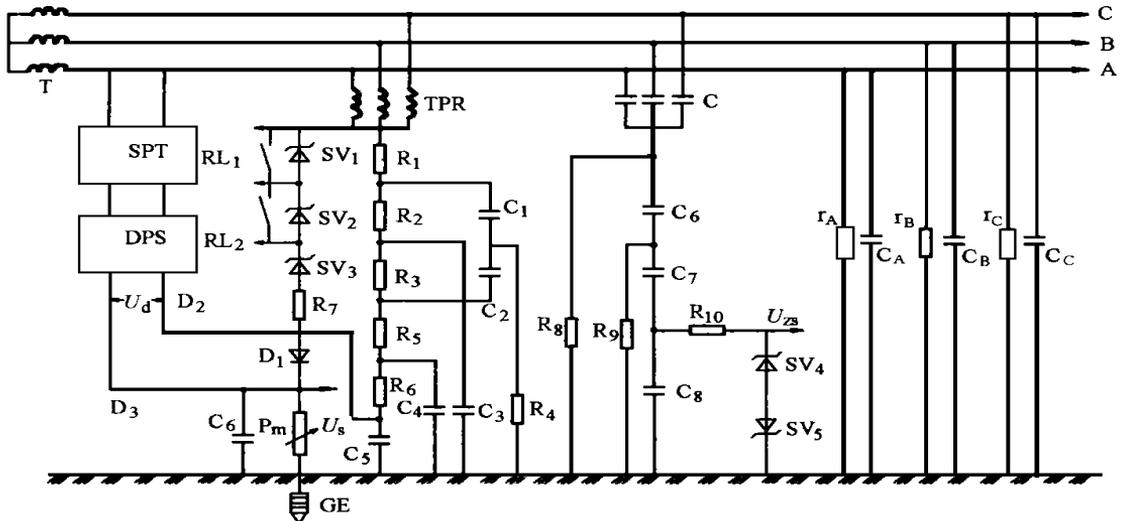


图2 基于附加直流检测的漏电保护原理图

换器 DSP 获得直流检测电压 U_d , U_d 通过电位器 P_m , 接地极 GE, 绝缘电阻 r_A 、 r_B 、 r_C , 三相电抗器 TPR 和滤波、限流电阻 $R_1 \sim R_6$ 形成检测回路, 在 P_m 上的直流电压信号

$$U_s = \frac{U_d \cdot R_{Pm}}{R_P + R} \quad (1)$$

式中, $R_P = 1/r_A + 1/r_B + 1/r_C$, R 为检测回路除绝缘电阻外所有电阻之和, 当系统确定后,

R 即为定值, R_{Pm} 为电位器电阻。可见 U_s 仅随绝缘电阻的大小变化, 而与电网对地的分布电容 C_A 、 C_B 、 C_C 无关。不论电网发生单相漏电还是三相绝缘电阻同时下降, U_s 均能正确反映其变化。

2.1.2 滤波电路设计

在电网对地阻抗不对称或断路器三相触头同期性不良时, 均会在 TPR 的中性点与地之间出现零序电压 \dot{U}_{zs} , \dot{U}_{zs} 迭加于直流检测回路中, 使 U_s 发生变化, 造成系统误动作。因此在直流检测回路中设计了两种模拟滤波器, 即双 T 滤波器和 RC 滤波器。

双 T 滤波器由 $R_2 \sim R_4$ 和 $C_1 \sim C_3$ 组成, 见图 2。其中 $R_2 = R_3 = R$, $R_4 = 0.5R$, $C_1 = C_2 = C$, $C_3 = 2C$, 其幅频特性

$$A = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} + \left(\frac{4}{\omega_0}\right)^2}$$

式中, $\omega = 2\pi f$ 为基波角频率, $\omega_0 = 1/RC$ 为滤波回路的固有角频率。选 $\omega_0 = \omega$ 时, 就能将 U_{zs} 的基波成分全部滤除。

RC 滤波器由 R_5 、 C_4 和 R_6 、 C_5 组成, 它们用于滤除迭加于直流检测回路的交流高次谐波成分。

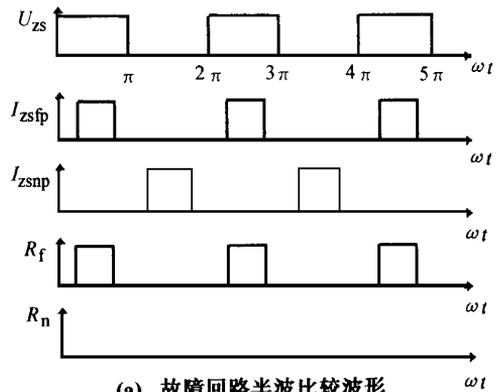
2.1.3 非线性补偿

由于直流检测回路存在着非线性元件, 所以在 P_m 上得到的 U_s 并不随绝缘电阻线性变化, 利用单片机程序设计技术可以实现绝缘电阻检测的非线性补偿, 以保证动作值的稳定性。

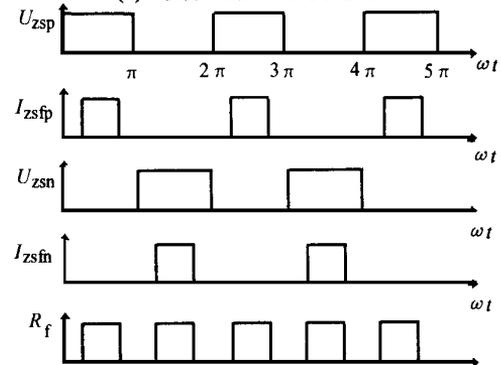
2.2 动作时间

漏电保护的主要任务之一是保证操作人员的人身安全。在发生触电事故时, 要求通过人身

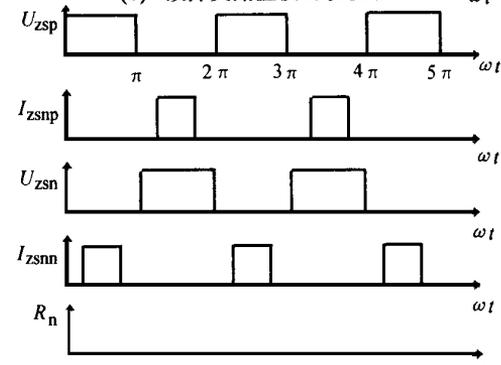
的电流尽可能小, 触电维持时间尽可能短。按人身安全值 $30\text{mA}\cdot\text{s}^{[1]}$ 计算, 通过人体的电流值越大, 则允许触电持续时间越短。随着井下低压电网电压等级的逐步提高, 电网长度不断增加, 人身触电时通过人体电流会越来越来。所以要求漏电保护系统及其执行机构的动作速度越快越好。



(a) 故障回路半波比较波形



(b) 故障支路全波比较波形



(c) 非故障支路全波比较波形

图3 零序电流和零序电压相位比较波形图

2.2.1 零序电流相位比较

在选择性漏电保护系统中, 分支漏电保护单

元 SLP_i 间是通过比较 i_{zs} 与 \dot{U}_{zs} 之间的相位来区分故障支路和非故障支路。比较方法有半波相位和全波相位比较两种,该系统采用全波相位比较。 \dot{U}_{zs} 通过移相、整形、波形变换形成两个宽度为周期为 2 的方波信号, i_{zs} 通过滤波、整形和波形变换形成两个周期为 2 的脉冲序列。若 \dot{U}_{zs} 和 i_{zs} 同相位则为故障支路,否则为非故障支路。显然提高比较频率,可提高了保护单元的动作速度。两种比较方法的波形如图 3 所示。

图中, \dot{U}_{zsp} 、 \dot{U}_{zsn} 分别为故障支路零序电流正、负半波的方波信号, I_{zsp} 、 I_{zsn} 分别为故障支路零序电流正、负半波的脉冲信号, I_{zsp} 、 I_{zsn} 分别为故障支路和非故障支路零序电流正半波脉冲信号, I_{zfn} 、 I_{zsn} 分别为故障支路和非故障支路零序电流负半波脉冲信号, R_f 、 R_n 分别为故障支路和非故障支路的比较结果。由图可知,半波比较法的输出 R_f 是周期为 2 的脉冲序列,而全波比较法的输出 R_f 是周期为 1 的脉冲序列,显然全波比较法较半波比较法的动作速度提高了一倍。

2.2.2 加速电路设计

由于 GLP 中直流检测回路限流电阻及滤波电容的存在,当发生人身触电事故时, U_s 不能突变,直接影响保护系统的动作速度。加速电路就是为克服此缺点而设计的。它由稳压管 $SU_1 \sim SU_4$ 、电阻 R_7 和二极管 D_1 组成,见图 1。在发生单相接地或人身触电事故时,TPS 中性点处的零序电压 \dot{U}_{zs} 会通过加速回路形成直流电压,并迭加于 U_d 上,使 U_s 产生突变,以提高保护系统的动作速度。

漏电保护系统的工作电压范围为 75 ~ 110 % U_N , 电网长度变化范围为 0.05 μF ~ 1 μF 。在短电网、高电压和长电网、低电压情况下,因漏电而产生的 \dot{U}_{zs} 大小差别很大。加速电路稳压管 SU_1 和 SU_2 可通过计算机控制进行切换,以保证在任何情况下发生单相接地或人身触电事故时,该电路均能起加速作用。

2.2.3 软件设计

为了进一步提高保护系统的动作速度,将 SLP_i 中的零序电流方向差别程序置于外部中断

模块中,并设为最高优先级。无论当前 CPU 工作在何处,只要有中断请求信号,它立即停止当前工作而进行漏电中断程序的处理。

SLP_i 的中断请求信号来自 GLP 中的继电器接点,其动作时间直接影响保护系统的动作速度,在该系统中选用了动作时间为 μs 级的干簧管继电器。

2.3 动作可靠性

漏电保护系统的动作可靠性至关重要,它是衡量保护系统性能优劣的主要标志之一。在煤矿井下存在着大量干扰信号,直接威胁着单片机工作的可靠性。在本保护系统中,采取了如下措施以提高其动作可靠性。

2.3.1 后备保护

建立后备保护是提高系统可靠性的根本途径。在该系统中, GLP 单元就是 SLP_i 单元的后备保护。当 SLP_i 单元在漏电拒动时, GLP 能在 200ms 内将故障点切除,若 GLUB 出现问题, GLP 还能发出切断高压回路的跳闸信号。尽管这样扩大了停电范围,但提高了人身触电的安全性。

在 SLP_i 单元中设计了漏电闭锁功能,它能在分支真空馈电开关合闸前对电网的绝缘水平进行预检,若存在漏电事故,它便闭锁合闸回路。在 SLP_i 因漏电跳闸后,它能防止在故障未清除前误送电或强行送电,有效地提高了井下供电的安全性。

2.3.2 零序电压移相

SLP_i 单元是根据 i_{zs} 的方向来判断故障支路的,其比较基准是 \dot{U}_{zs} 。如前所述,只要将 \dot{U}_{zs} 或 i_{zs} 移相 90°,就可保证故障支路的 \dot{U}_{zs} 与 i_{zs} 同相位,非故障支路的 \dot{U}_{zs} 与 i_{zs} 反相位,这便于数字电路进行相位比较。尽管理论上 \dot{U}_{zs} 或 i_{zs} 移相 90° 均可,但实际中电网对地的绝缘电阻并非无穷大,电网长度也在变化,电流互感器还存在角误差。所以故障支路的 i_{zs} 与 \dot{U}_{zs} 之间不再是固定值,而是在一个范围内变化。所以将 i_{zs} 变换成脉冲序列, \dot{U}_{zs} 移相并变换成方波信号,可扩

表1 漏电动作值测定数据

电压 (V)	电 网 参 数					动 作 电 阻		闭 锁 电 阻	
	r (k)	C_0 (G) (μ F)	C_1 (F ₁) (μ F)	C_2 (F ₂) (μ F)	C_3 (F ₃) (μ F)	要求值 (k)	实测值 (k)	要求值 (k)	实测值 (k)
U_N		0.1	0.25	0.15	0.47	11 \pm 2	10.7	22 \pm 4	21.5
		0.1	0.15	0.47	0.25	11 \pm 2	10.8	22 \pm 4	21.5
0.75 U_N		0.1	0.47	0.25	0.15	11 \pm 2	10.7	22 \pm 4	21.8
		0.1	0.25	0.15	0.47	11 \pm 2	10.7	22 \pm 4	21.7
1.1 U_N		0.1	0.15	0.47	0.25	11 \pm 2	10.7	22 \pm 4	21.5
		0.1	0.47	0.25	0.15	11 \pm 2	10.8	22 \pm 4	21.7

表2 漏电动作时间测定数据

漏电阻 $R_L = 1k$ 时	电 网 参 数					动 作 时 间 (ms)			
	r (k)	C_0 (G) (μ F)	C_1 (F ₁) (μ F)	C_2 (F ₂) (μ F)	C_3 (F ₃) (μ F)	要求值	实 测 值		
							U_N	0.75 U_N	1.1 U_N
漏 电 保 护 单 元	SLP _i	0.1	0.25	0.15	0.47	30	10.5	22.0	17.0
		0.1	0.15	0.47	0.25	30	16.2	12.4	14.7
		0.1	0.47	0.25	0.15	30	19.6	18.3	24.0
单 元	GLP	0.1	0.25	0.15	0.47	200	175	166	174
		0.1	0.15	0.47	0.25	200	164	178	168
		0.1	0.47	0.25	0.15	200	167	170	181

大其比较范围,提高动作的可靠性。同时在 GLP 单元中, \dot{U}_{zs} 采用统一移相、SLP_i 共享的原则,可减小 SLP_i 单元 \dot{U}_{zs} 信号的分散性。

2.3.3 软件闭锁

横向选择性漏电保护功能是在中断程序中完成的。在进入中断程序后,经判断若不是本支路漏电,首先调短延时程序,然后关中断实行闭锁,闭锁时间应大于故障支路保护及断路器的动作时间,这样可防止非故障支路误动作。但闭锁时间不能过长,否则闭锁期间本支路漏电时,SLP_i 不会响应,造成拒动。

提高 SLP_i 动作可靠性的另一种措施是提高脉宽比较值。当 R_f 的脉宽大于比较值时,才认为是漏电,否则程序闭锁,禁止中断响应。因为当漏电故障发生时,即使是非故障支路,由于移相和电网参数的变化,其比较结果 R_f 会出现较窄的脉冲,而不是理想的低电平。显然比较值越大,可靠性越高,但灵敏度越低。

3 测试与应用

采用上述各项改进措施后所形成的选择性漏电保护系统,已于1993年通过省科委鉴定,同年该系统应用于潞安矿务局王庄矿51#变电站。下井前对该系统进行了全面测试,试验数

量4台,1台总开关(GLP),3台分开关(SLP_i),系统额定电压 $U_N = 660V$,测试数据如表1、2所示。

表中 SLP_i 动作时间是在某一电网条件下10次测试数据的平均值,而 GLP 的动作时间是人为拒动 SLP_i 情况下10次测试值中的最大值。由表可知,选择性漏电保护系统的动作值和闭锁值与要求值之间的相对误差均小于1%,可见是非常稳定的。SLP_i 的动作时间均小于30ms, GLP 的动作时间均小于200ms,满足“七·五”国家攻关项目的验收细则。在试验过程中没有出现过误动和拒动现象。

由 SLP_i 和 GLP 组成的漏电保护系统投入使用以来,工作正常,运行良好,曾多次因导线碰壳,开关进水而准确动作,确保了煤矿井下供电的安全性。

4 结论

在矿井低压选择性漏电保护系统中采用了一系列改进措施后,使其不仅具有稳定的漏电动作值和漏电闭锁值,而且动作速度大大提高满足了二级漏电保护动作时间30ms和200ms的要求,保证了人身触电时的安全性。经现场运行表明,该系统具有较高的稳定性和可靠性。

参考文献

1 煤矿安全规程. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
 2 宋建成等. 单片机在矿用防爆真空馈电开关中的应用. 煤炭科学技术, 1995. 1.
 3 胡天禄. 矿井电网的漏电保护. 煤炭工业出版社, 1987.

4 IEEE. IEEE Guides and Standards for Protective Relaying Systems. Spring 1991.

宋建成, 1957年生, 副教授。主要从事煤矿井下电网漏电保护、矿用电器智能化、电力设备电气绝缘在线监测技术的研究与开发。

APPROACHES FOR IMPROVING THE PERFORMANCE PARAMETERS OF LEAKAGE PROTECTIVE SYSTEM IN UNDERGROUND LV DISTRIBUTION NETWORKS

Song Jiancheng (Xi'an Jiaotong University, 710049)

Abstract A new selective leakage protective system is developed in this paper in accordance with the deficiencies covered in present leakage protective equipments used in underground LV distribution networks and much more attention is paid to discuss the approaches how to improve the performance parameters of the system. The measuring results are also introduced here. It has been shown that all technical parameters of the system satisfy the demands promoted by academic authority.

Keywords Underground LV distribution network selective leakage protection Zero sequence current Zero sequence voltage

(上接 33 页)

功能,还具有 PT 断线功能,当 PT 断线时,保护延时 10s 发报警信号,待电压恢复正常后保护延时 10s 自动恢复正常。

装置可根据需要配置励磁回路一点接地保护,一点接地保护能实时显示励磁回路对地绝缘电阻,接地点位置。

正常运行时,保护能显示各种电流、电压幅值、相位关系。

11 结论

本文中所述装置包括了异步电动机保护具有的所有功能外,还包括差动保护、失步保护、逆功率保护等功能,尤其适用于同步电动机保

护的需要。该保护装置功能完善、性能价格比合理,推广应用前景良好。

参考文献

1 卢英照. 关于高压电动机保护的几点思考及同步机失步保护. 继电器, 1997. 6.
 2 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 中国电力出版社, 1996.
 3 蒋宗道. 用于同步电动机的新颖 LSB 系列失步保护装置. 电世界, 1987. 2.
 4 祖伟等. 同步电动机失步及其保护的研究. 继电器, 1994. 2.

沈全荣, 男, 33 岁, 硕士, 主要研究方向为电力主设备及同步电动机等的继电保护。

A DIGITAL SYNCHRONOUS MOTOR PROTECTION

Shen Quanrong, Xie Sukun (Nanjing Automation Research Institute, 210003, Nanjing)

Abstract The paper introduces a digital synchronous motor protection with all protection functions for synchronous motor. Power factor protection (out of step) and reverse power protection can run in resynchronism mode. It can be used in any synchronous motor and complies with integrated automation.

Keywords Synchronous motor Digital protection