

浅谈矿井电网选择性绝缘在线监测技术研究

孟新元

摘要：通过研究单相漏电时零序电压的变化规律，研究了矿井电缆绝缘下降检测方法及动力电缆附加低频信号取样技术，结合常规漏电保护技术，开发了动力电缆绝缘参数在线监测系统及配套软件，实现了对矿井低压供电系统每一分支电缆的绝缘在线监测，达到选择性漏电保护的目的。

关键词：矿井电网；绝缘下降；电缆监测；漏电保护；低频信号

0引言

漏电故障是由于带电导体对地绝缘下降到一定程度，漏电流增大到一定程度的漏电现象。漏电故障会使电网三相电压对地不对称，且中性点也会产生位移，并产生零序电压和零序电流。井下电网漏电分为分散性漏电和集中性漏电。分散性漏电是由于整条供电线路绝缘水平下降到一定程度造成的漏电；集中性漏电是由于电网三相电中的一相对地绝缘失效造成的漏电，这种漏电流很大，对人危害也比较大。

矿井供电系统产生漏电故障的原因主要有检查不到位、操作不当、电缆绝缘层被破坏、电缆绝缘老化、电缆受潮、电气设备或电缆选择不当过载运行、电缆或开关设备过电压运行、电缆过长或开关过多造成的电网总绝缘水平下降、接头不牢、喇叭口封堵不严等。漏电故障需要停电维护处理，对生产造成严重影响，如果维修不及时也极易发生触电事故。如果造成通风机停机，将有可能造成瓦斯积聚而引起安全事故。

目前，煤矿井下应用的开关漏电保护装置应用不是十分可靠，偶尔会出现误动作的情况。由于电容电流补偿装置使电网保护装置不能正确选择出故障线路，并使非故障线路跳闸，影响煤矿供电安全，影响煤矿生产作业。本文设计了绝缘在线监测系统，不仅能监测整个电网的绝缘状态，而且能准确判断出故障线路，避免误动作的发生，可以取代预防性检修，提高了煤矿电网的安全性，研究意义重大。

1单相漏电时零序电压的变化规律

矿井电网各相对地绝缘与电网形成的节点网络，用节点电压法分析比较合理和方便。单相漏电示意图如图1所示，当图1中电路A相发生漏电时，其等效电路如图2所示。假设R为漏电电阻，其并联到了Z₀上，破坏了电网对称性，产生零序电压U₀。

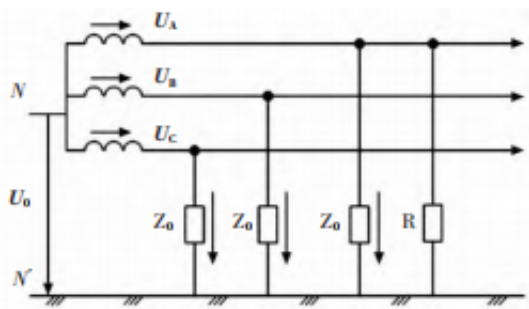


图 1 单相漏电示意图

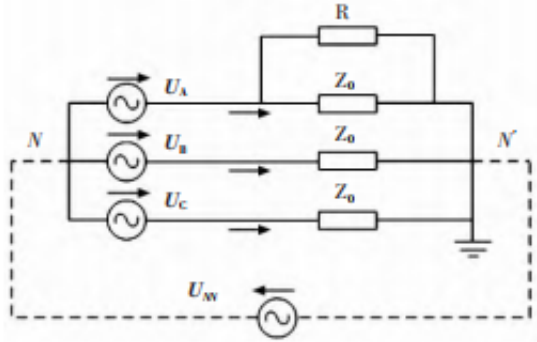


图2 单相漏电等效电路图

对于三相对称电压 U_A, U_B, U_C , 满足

$$U_A + U_B + U_C = U_A + a^2 U_A + a U_A = 0 \quad (1)$$

相量算子

$$a = e^{j120^\circ} = -1/2 + j\sqrt{3}/2 \quad (2)$$

$$a^2 = e^{-j120^\circ} = -1/2 - j\sqrt{3}/2 \quad (3)$$

设 $Z_0' = R // Z_0$, 根据式(1)可得零序电压(位移电压)

$$U_0 = U_{NN'} = -U_{N'N} = -(U_A/Z_0' + a^2 U_A/Z_0 + a U_A/Z_0) / (1/Z_0' + 1/Z_0 + 1/Z_0) \quad (4)$$

整理可得

$$U_0 = -\frac{Z_0}{3R + Z_0} U_A \quad (5)$$

将 Z_0 代入式(5)得

$$U_0 = \frac{-x_c^2 r (3R + r) + j3R x_c r^2}{(3Rr)^2 + (3R x_c + r x_c)^2} U_A \quad (6)$$

U_0 超前 U_A 角度 $180^\circ - \theta$, 其中

$$\theta = \arctan \frac{3Rr}{(3R + r)x_c} \quad (7)$$

则

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{3Rr}{(3R + r)x_c} \right]^2}} \quad (8)$$

$$\sin \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{(3R+r)x_c}{3Rr} \right]^2}} \quad (9)$$

U_0 的模

$$U_0 = \frac{U_\Lambda}{\sqrt{\left(\frac{3R}{x_c} \right)^2 + \left(\frac{3R}{r} + 1 \right)^2}} \quad (10)$$

则 U_0 随参数 r 、 x_c 和 R 变化的规律：当系统对地绝缘电阻不变，即 r 和 R 为定值时

$$U_0 = \frac{rU_\Lambda}{3R+r} \frac{U_\Lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{3Rr}{(3R+r)x_c} \right)^2}} = \frac{rU_\Lambda}{3R+r} \cos \theta \quad (11)$$

这是一个极坐标方程，直径为 $rU_\Lambda/(3R+r)$ ，圆的直径随着不同的 r 和 R 而变化，但都通过相量 U_0 ，圆柱内切于圆点。

2 矿井电缆绝缘下降检测方法

目前绝缘下降检测方法主要有直流叠加法、直流分量法、直流成分法、电缆绝缘介损法、接地线电流、电缆绝缘在线检测、波电流方向原理法、低频重叠法等，根据分析对比，附加信号的方法比较适合煤矿井下电缆绝缘下降检测。附加直流信号方式工频供电造成的直流分量对附加信号有影响，使检测信号不易被检出。附加交流信号有高频信号和低频信号2种。

矿井电网为中性点不接地的小电流接地系统，漏电流阻抗为容性，容性阻抗对于频率高的交流信号呈现阻抗减小的特性。因此，附加高频交流信号，漏电会区分不出附加的信号与检测信号。如果采用低频信号，容抗随附加信号频率的降低影响越发明显，而检测信号产生的漏电流不会受到影响。考虑容性电流的影响，本文采用线路上叠加36V、10Hz低频信号的测量方法。由于容性电流受频率降低的影响，但阻性电流变化不大，能够从测量的信号中区分出来，实现电流绝缘参数的在线监测。附加低频信号法的原理是在电网中附加一个低频信号源，其工作原理如图3所示

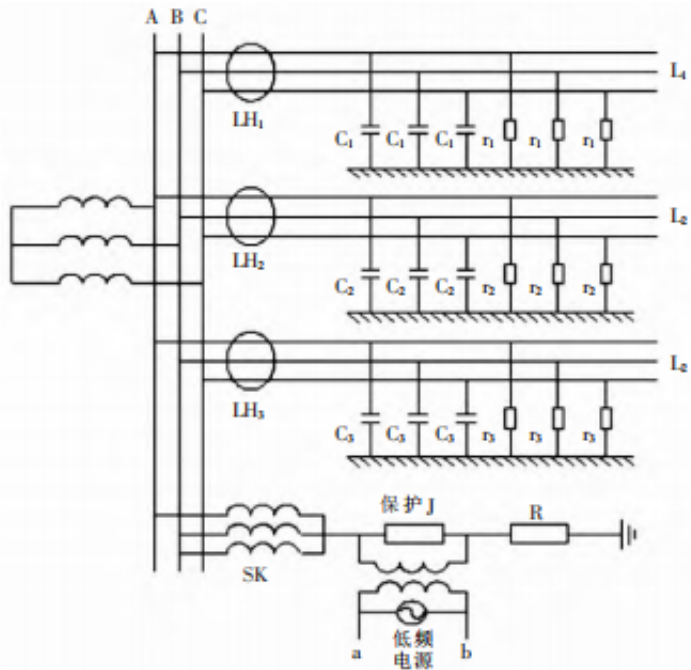


图3 附加低频电源监测方法的原理

LH_1, LH_2, LH_3 电流互感器 SK. 三相电抗器 L_1, L_2, L_3 电网的3个支路 C_1, C_2, C_3 3个支路对地的分布电容 r_1, r_2, r_3 3个支路对地的绝缘电阻

低频电源产生的低频信号通过隔离变压器传递给三相电抗器SK, 由SK进入电网, 再通过对地电容C和绝缘电阻r流入大地, 再与取样电阻R和保护电阻J形成回路。电流互感器LH1、LH2、LH3获取相应的电流信号, 通过计算处理, 即可求得各个支路的电缆绝缘情况, 从而进行故障选线操作。其等效电路如图4所示。

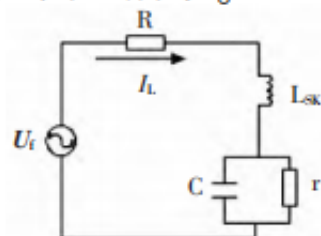


图4 附加低频电源法等效电路图

U_f . 附加低频电源电压 I_i . 互感器感应电流 R. 取样电阻 L_{sk} . 三相电抗器电感 r. 电缆绝缘电阻

$$U_f = I_L \left(R + j\omega L_{SK} + \frac{1}{\frac{1}{r} + j\omega C} \right) \quad (12)$$

对式(12)进行化简,得到

$$U_f = I_L \left[\left(R + \frac{r}{1+r^2\omega^2C^2} \right) + j \left(\omega L_{SK} - \frac{r^2\omega C}{1+r^2\omega^2C^2} \right) \right] \quad (13)$$

将式(13)两端取模,得到

$$U_f = I_L \sqrt{\left(R + \frac{r}{1+r^2\omega^2C^2} \right)^2 + \left(\omega L_{SK} - \frac{r^2\omega C}{1+r^2\omega^2C^2} \right)^2} \quad (14)$$

由式(14)计算获得绝缘电阻值,当r比设置的阈值小时,就可以判断该支路发生了绝缘下降故障,可以进行故障断电操作。

通过研究分析,该故障检测方法具有如下优点:当电网某支路发生绝缘下降故障时,该支路电流互感器能够采集到低频电流信号,绝缘正常的支路则不能采集到该信号,因此可以准确地判断出故障支路。动作阈值只与低频信号和接地电阻有关,只要选择合适的电流信号,就能保证监测系统可靠动作。

3 绝缘在线监测系统设计

绝缘在线监测系统核心板采用SEED-DPS2812;CPU主频150MHz;片外SRAM:256K×16位;片外Flash:256K×16位;最大32K×8位SPI串行接口EEPROM;实时时钟RTC+56字节NvRAM;18位、580KSPS转换率的片A/D;20路带光电隔离开关量输入(12~24V直流);18路带光电隔离开关量输出(5~40V直流);隔离型RS232/RS485各1路(隔离电压2500V);1路标准RJ45链接器;1路eCAN收发驱动,符合CAN2.0协议;外接3×3键盘;底板自主设计:DIDO全部光电隔离;包含模拟量采集输入信号调理电路。低频电源设计采用51系列单片机外扩D/A输出电路,产生交流低频信号;采用50Hz双T型陷波器,功率放大等构成电源输出信号调理板。液晶用DWIN64480010_WN。系统拓扑结构图如图5所示。

自主研发信号调理模块,将漏电流变送器的输出信号放大、滤波,原理如图6所示。设计采用超微晶电流互感器,电压形成回路、带阻滤波、放大电路、带通滤波组成模拟量采集信号调理板。自主研发信号处理单元,外部使用16位A/D进行采样,能够对电流的微小变化进行处理。监测设备工作电压:AC660V(三相);输入视在功率:250V·A;端口数量:1路(KT83-Z信号转换器传输);传输方式:多主式、CAN;传输速率:5kb/s;传输距离:4km(使用MHYVR电缆或MHYVP电缆,导线截面不小于1.5mm²);通信信号的电压峰-峰值:1.5~5V。分站通过CAN总线连接至KT83-Z矿用本安型信号转换器可实现低压电网实时诊断功能,并具备本地液晶显示功能。当被监测的低压电网支路绝缘电阻下降时,分站显示“绝缘下降报警”,进入报警状态,并将故障支路告知监控系统,实现故障区域判断,同时发出故障区域闭锁信息。当被监测的低压电网支路绝缘电阻恢复正常时,分站显示“绝缘良好”。

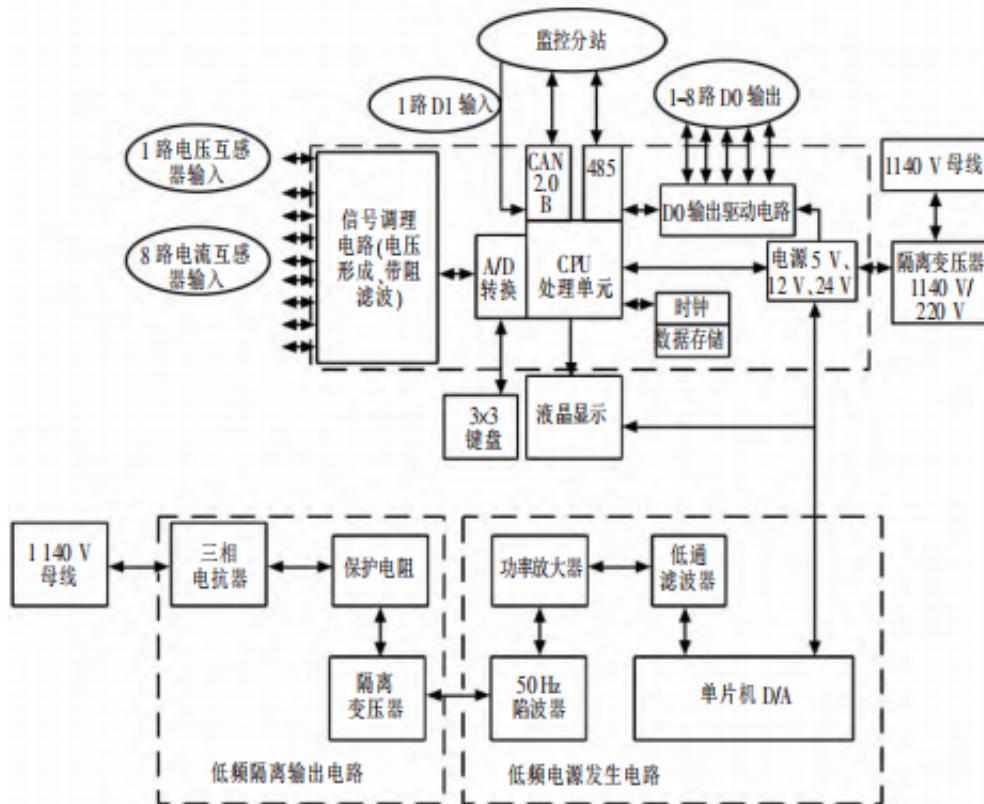


图5 系统拓扑结构图

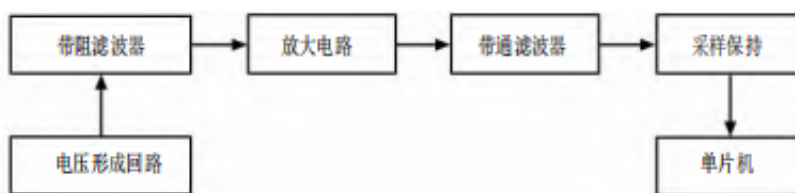


图6 信号调理模块原理图

矿井电网线路保护监控平台软件旨在为用户提供动力电缆绝缘参数来进行在线监测，以及实现电网线路保护功能的各种界面。具有基本在线监测功能，包括多支路电压、电流、有功功率、无功功率以及功率因数等参数采集与显示。用户可以通过软件提供的界面设置任意保护整定参数，系统按照用户设置的整定值完成监测过程，并可按用户要求自动按间隔记录一次电网参数或者记录用户感兴趣的当前值。在发生漏电故障(采集值大于设置整定值)时，软件具有报警及实时记录故障数值的功能。具备手动设置功能和绝缘在线监测警戒阈值、选择性漏电保护整定值、短路保护整定值的设置功能。具备漏电保护选线功能，可显示故障支路号。具备对地绝缘电阻显示功能，提供外配设备接入支持。此外，还具备完善的数据管理、组态显示和打印功能。

4试验测试

用MATLAB/Simulink的电力系统模块库(PowerSystemBlockset)中的模块，进行RLC电路、电力电子电路、电机控制系统和电力系统仿真模型搭建。搭建的仿真模型主要包括电源模块(Three-Phase Source)、变压器模块(Three-Phase Transformer)、负载模块(Three-Phase Series RLC Load)、电流表模块(Current Measurement)、滤波器(Butterworth Filter)和示波器模块(Scope)等。在动力电缆上模拟套接的高灵敏度电流互感器检测电源信号的波形，区分故障支路与非故障支路，从而达到有选择性地切断故障支路的目的。更换所选模块的参数，模拟零序电流互感器检测的工频电流与非故障支路检测到的电流。设置不同煤矿动力电缆仿真参数，模拟仿真动力

电缆绝缘参数在线监测系统。建立煤矿井下低压电网仿真模型，如图7所示。

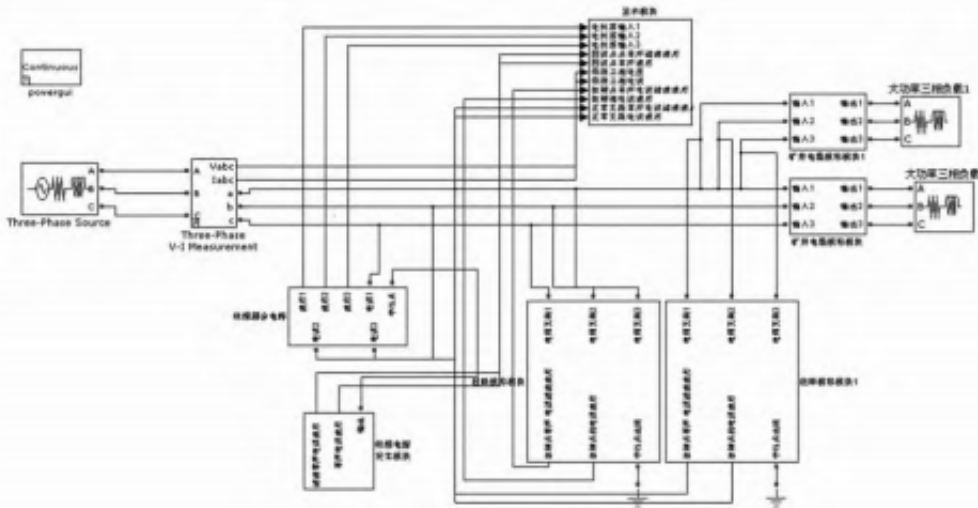


图7 煤矿井下低压电网绝缘参数监测仿真模型

采用高精度动力电缆故障测试系统、大电流发生器、动力电缆绝缘漏电检测装置、矿用屏蔽通信电缆等组建矿井电缆对地绝缘值测试系统。总馈电漏电保护通过直流电源对地检测来完成，当对地绝缘电阻小到一定值时开关漏电闭锁，开关正常工作后，负载侧线路当对地漏电电阻小到一定值时，开关将快速动作，动作时间在200ms范围内，此动作时间会大于分馈电工作状态时的50ms，使得总、分馈电纵向漏电保护的时间错开，在分开关负载侧漏电时，总馈电不至于误动作。

总馈电的负载侧1K漏电试验时，首先按下总馈电试验柜表盘上的按钮选择0.22 μF或者0.47 μF或者1.0 μF对地电容，选择对地电容大说明线路长，当按下1K漏电试验按钮后，可以观测到对地漏电电流和开关动作时间，电流和时间的乘积由于被试开关的三相电抗器具有对电容电流的补偿功能而不应大于30mA·s，从试验当中可以看出开关的负载线路不宜过长，线路过长会引起漏电流增大，增大人身触电的危险性。总馈电的负载侧漏电不能引起其负载侧的任何一路分馈电的动作。

试验结果表明，无论对于单条支路绝缘下降、漏电故障，还是分散性绝缘下降、漏电故障，如果单纯地采用传统的、利用母线电流故障特征量作判据的选择性漏电保护都有一些局限性。采用基于低频叠加法的零序功率方向型的差动选择性漏电保护技术，能够准确识别故障特征，正确反映故障类型，达到在线获取电缆绝缘参数并将漏电故障及时排除于萌芽阶段的目的。

5 绝缘监测及绝缘故障定位产品

5.1 绝缘监测及绝缘故障定位产品

AIM-T系列工业用绝缘监测仪



AIM-T300



AIM-T500



AIM-T500L

AIM-T系列绝缘监测仪主要应用在工业场所IT配电系统中，主要包括AIM-T300、AIM-T500和AIMT500L三款产品，均适用于纯交流、纯直流以及交直流混合的系统。

其中AIM-T300适用于450V以下的交流、直流以及交直流混合系统，AIM-T500适用于800V以下的交流、直流以及交直流混合系。AIM-T500L相比AIM-T500增加了绝缘故障定位功能。

5.2绝缘故障定位产品



ASG200



AIL200-12



AKH-0.66 L-45

工业用绝缘故障定位产品配合AIM-T500L绝缘监测仪使用，主要包括ASG200测试信号发生器，AIL200-12绝缘故障定位仪，AKH-0.66L系列电流互感器，适用于出线回路较多的IT配电系统。

5.3绝缘监测耦合仪



ACPD100



ACPD200

绝缘监测耦合仪配合AIM-T500绝缘监测仪使用，主要包括ACPD100，ACPD200，适用于交流电压高于690V，直流电压高于800V的IT配电系统。

6技术参数

6.1绝缘监测仪技术参数

	型号	AIM-T300	AIM-T500	AIM-T500L
	技术指标			
辅助电源	电压	AC 85~265V;DC100~300	AC 85~265V;DC100~300	
	功耗	< 8W	< 8W	

被监测IT系统	电压	480V以下的交流、直流以及交直流混合系统	690V以下的交流及交直流混合系统、800V以下直流系统
	频率	40~60Hz	40~60Hz
绝缘监测	测量范围	1k ~5M	1k ~10M
	报警值范围	10k ~5M	10k ~10M

	相对误差	1~10k: 10k ; 10k~5M: ± 10%	1~10k: 10k ; 10k~10M: ± 10%	
	允许系统泄露电容	<150 μ F	<500 μ F	
	响应时间	<6s	<5s	
通讯		RS485 , Modbus-RTU	RS485 , Modbus-RTU	RS485 , Modbus-RTU ;

内部参数	测量电流	<170 μ A	<270 μ A	
	绝缘故障定位	无	无	有
	电磁兼容/电磁辐射	IEC61326-2-4	IEC61326-2-4	
	额定冲击电压	8kV/	8kV/	
	污染等级			
	内部直流电阻	120k	180k	

输出	继电器输出	预警、报警	出错、预警、报警
环境	工作温度	-20~+60	-15~+55
	存储温度	-20~+70	-20~+70
	相对湿度	5%~95%，不 结露	5%~90%，不结露
	海拔高度	2500m	—2500m

6.2测试信号发生器技术参数

辅助电源	电压	AC 85~265V DC100~300V
------	----	-----------------------

	功耗	<7W
IT系统	额定电压	单相交流AC 220V
		三相交流 AC 0~690V
		直流DC 0~800V
绝缘故障定位	响应时间	<5s

	定位电压	20V/5Hz
	定位电流	0~10mA
环境	电磁兼容/电磁辐射	IEC61326-2-4
	工作温度	-15~+55

6.3绝缘故障定位仪技术参数

辅助电源	电压	AC 85-265V DC100~300V
	功耗	<5W
绝缘故障定位	响应时间	<12s

	定位电压	无
	定位电流	无
	响应灵敏度	>0.5mA
输出	继电器输出	报警Alarm
环境	电磁兼容/电磁辐射	IEC61326-2-4
	工作温度	-15-+55

6.4 AKH-0.66L系列电流互感器技术参数

型号	额定电流	变比	等级	过载倍数

L-45	16-100A	5A : 5mA	1	10
L-80	100-250A			
L-100	250-400A			
L-150	400-800A			
L-200	800-1500A			

6.5绝缘监测耦合仪技术参数

产品型号	ACPD100	ACPD200
适用系统	单相交流、直流不接地系统	三相交流、直流不接地系统

电压等级	交流0~1150V，直流0~1760V	交流0~1650V，带直流元件0~1300V
直流阻抗	160k	AK1 225k
工作温度	-10~+55	
存储温度	-20~+70	
防护等级	IP30	

7结语

通过分析供电系统发生接地故障后的各种故障信息及其特征规律，对常用的各种算法进行比较评价，在此基础上研究动力电缆绝缘参数在线监测的方法，提出用附加低频信号电源的方法进行动力电缆绝缘参数在线监测的方案，建立动力电缆分布参数数据库，利用零序功率方向原理实现供电系统接地保护。绝缘在线监测系统能在电网处于工作状态下对电缆绝缘状况进行在线监测，不仅能够监测整个系统的绝缘水平，而且可以监测每一分支电缆的绝缘状况，大大提高电网安全运行水平，取代预防性检修，将由绝缘薄弱引发的故障现象消灭在萌芽状态，具有重大意义。

参考文献：

- 李忠奎.煤矿井下低压电网谐波检测分析装置研制[J].电子设计工程,2017, 25
- 李忠奎.煤矿井下静止无功补偿装置的应用研究[J].煤炭技术, 2017, 36(2):236-23
- 安科瑞企业微电网设计与应用手册.2020.6版；
- 安科瑞IT系统绝缘监测故障定位装置及监控系统（中英文）2020.01版

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/news/198278.html>