

文章编号:1671-251X(2014)09-0053-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.09.013

王彦文,卢丹.基于零序电流差动量的矿井低压电网选择性漏电保护新方案[J].工矿自动化,2014,40(9):53-57.

基于零序电流差动量的矿井低压电网 选择性漏电保护新方案

王彦文, 卢丹

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘要:针对现有矿井低压电网选择性漏电保护装置存在可靠性及灵敏度低的问题,提出一种基于零序电流差动量的选择性漏电保护新方案。该方案通过对矿井低压电网发生单相漏电故障时各支路不同采集点的零序电流值做差,根据差动量的幅值及相位在故障支路与非故障支路中的差异性实现漏电保护的横向选择及区段定位。Matlab/Simulink 仿真实验及快速傅里叶变换结果表明,该方案不受电网负载容量、三相电源电压初始相位角的影响,在故障选线及区段定位方面具有较高的可靠性及灵敏度。

关键词:矿井低压电网;漏电保护;故障选线;区段定位;零序电流差动量

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

A new scheme of selective leakage protection of mine low-voltage power network
based on differential variable of zero-sequence current

WANG Yanwen, LU Dan

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of
Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In allusion to low reliability and sensitivity of existing selective leakage protection devices used in mine low-voltage power network, a new scheme of selective leakage protection was proposed which was based on differential variable of zero-sequence current. In the scheme, differential variable of zero-sequence current is gotten at different measured points in each branch when single-phase leakage fault occurred in mine low-voltage power network. Lateral selectivity and fault section location of leakage protection are achieved according to differences of amplitude and phase of the differential variable between fault branch and normal branch. Simulation via Matlab/Simulink and calculation via Fast Fourier caused by Transform show that the scheme avoids influences by load capacity and initial phase angle of voltage of from power network and has high reliability and sensitivity of fault line selection and section location.

Key words: mine low-voltage power network; leakage protection; fault line selection; section location; differential variable of zero-sequence current

收稿日期:2014-02-19;修回日期:2014-03-10;责任编辑:李明。

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B00)。

作者简介:王彦文(1962—),男,河北唐山人,教授,博士,博士研究生导师,研究方向为电力系统及其自动化、消防工业自动化,E-mail:13601292159@139.com。通讯作者:卢丹(1981—),男,河南焦作人,博士研究生,研究方向为煤矿网络型继电保护,E-mail:ludan555@qq.com。

0 引言

单相漏电属于煤矿井下低压电网的多发性故障,不仅对人身安全构成威胁,若不及时切除,还将发展成为更加严重的短路故障,可能引起瓦斯和煤尘爆炸^[1-3]。《煤矿安全规程》第 457 条规定:“井下低压馈电线上,必须装设检漏保护装置或有选择性的漏电保护装置,保证自动切断漏电的馈电线路。”然而,煤矿低压供电系统的寄生参数普遍较小,导致低压选择性漏电保护装置的灵敏度很低,基于稳态及暂态参数的保护原理并不完全可靠,装置拒动、误动时有发生;附加直流电源型保护装置动作无选择性;零序电压型保护装置动作电阻值不稳定,在单相漏电时动作无选择性;零序功率方向型保护装置需要实时采集零序电压量,这在煤矿井下低压电网中难以实现^[4]。研究高可靠性和高灵敏度的选择性漏电保护方法,对确保供电安全和减小漏电故障的危害具有重要意义。

目前,基于零序电流的差动保护原理已在线路保护中得到成功应用^[5]。参考文献[6]通过比较零序电流差动和分相电流差动的相关特征量,指出零序电流差动具有区分线路区内和区外故障的能力,其灵敏度在判断区内故障时比分相差动保护要高。参考文献[7]根据零序电流差动保护原理,通过构建相关特征量来实现单相漏电的横向选择,在考虑各支路间零序电流参考方向的统一性后,可对区内故障进行判断。

本文结合煤矿低压电网变压器中性点不接地的特点,提出一种基于零序电流差动量的选择性漏电保护方案。该方案采集线路上不同点的零序电流并做差,比较各支路差动量在幅值、相位上的不同,以此作为故障选线和区段定位的判据。

1 故障选线和区段定位原理

煤矿井下低压电网采用变压器中性点绝缘方式,由参考文献[8-9]可知,母线处故障支路零序电流方向是由支路流向母线,而非故障支路零序电流方向则由母线流向支路并入地,二者相位基本相反,只有当电网对地电阻无限大时,二者相位才相差 180°;母线处故障支路中流过的电流为干线和各非故障支路零序电流之和,而各非故障支路流过的只是本身的零序电流,因而其值必小于故障支路的零序电流。故障支路与非故障支路在零序电流幅值和相位上的差别即为本文故障选线和区段定位的理论

基础。

以含有 3 条支路的矿井低压供电网络为例分析故障选线和区段定位原理。该网络每条支路 $L_i (i=1,2,3)$ 上装设 2 个零序电流互感器 $LH_{ij} (j=1,2)$,第一个互感器位于支路靠近母线结合处,2 个互感器的间距在各支路中布置相同,如图 1 所示。其中 U_A, U_B, U_C 为三相电压; $\dot{U}_0$ 为变压器中性点 N 对地电压,即零序电压; C_b, C_{ij} 分别为干线、各支路的分布电容; R_b, R_{ij} 分别为干线、各支路的对地绝缘电阻; $\dot{i}_{LH_{ij}}$ 为各零序电流互感器二次侧感应电流; $\dot{i}_{0L_b}$ 为干线入地的零序电流; $\dot{i}_{R_g}$ 为经过渡电阻 R_g 入地的漏电电流。

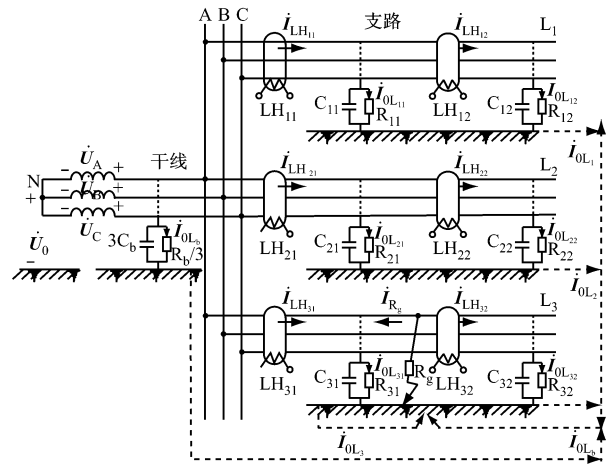


图 1 矿井低压供电网络

图 1 所示的单相漏电故障发生在第 3 条支路零序电流互感器 LH_{31} 和 LH_{32} 之间,若以电流由母线流向支路为正方向,则各支路上零序电流互感器二次侧感应电流 $\dot{i}_{LH_{ij}}$ 的值见表 1。

表 1 各支路零序电流互感器二次侧感应电流

线路	$\dot{i}_{LH_{i1}}$	$\dot{i}_{LH_{i2}}$
L_1	$\dot{i}_{0L_{11}} + \dot{i}_{0L_{12}}$	$\dot{i}_{0L_{12}}$
L_2	$\dot{i}_{0L_{21}} + \dot{i}_{0L_{22}}$	$\dot{i}_{0L_{22}}$
L_3	$-\dot{i}_{0L_b} - \dot{i}_{0L_1} - \dot{i}_{0L_2}$	$\dot{i}_{0L_{32}}$

表 1 中, $\dot{i}_{0L_{i1}}$ 为第 i 条支路上 LH_{i1} 和 LH_{i2} 之间电缆的对地零序电流; $\dot{i}_{0L_{i2}}$ 为第 i 条支路上 LH_{i2} 之后(远离电源方向)电缆的对地零序电流; $\dot{i}_{0L_b}, \dot{i}_{0L_1}, \dot{i}_{0L_2}$ 分别为干线及支路 1,2 的零序电流。

设第 i 条支路的零序电流差动量为 $\Delta \dot{i}_{0L_i}$, 即 $\Delta \dot{i}_{0L_i} = \dot{i}_{LH_{i2}} - \dot{i}_{LH_{i1}}$, 则各支路零序电流差动量见表 2。

表2 各支路零序电流差动量

差动量符号	差动量大小
$\Delta \dot{i}_{0L_1}$	$-\dot{i}_{0L_{11}}$
$\Delta \dot{i}_{0L_2}$	$-\dot{i}_{0L_{21}}$
$\Delta \dot{i}_{0L_3}$	$\dot{i}_{0L_{b_1}} + \dot{i}_{0L_{1_1}} + \dot{i}_{0L_{2_1}} + \dot{i}_{0L_{32}}$

从表2可看出,故障支路的零序电流差动量的幅值明显比非故障支路的大,且两者正负相反,表明差动量方向不同。故障支路与非故障支路零序电流差动量具有明显不同的特征,以此作为判据无需采集零序电压,有利于实现煤矿井下低压电网单相漏电故障的横向选择。

若单相漏电故障点位于 LH_{32} 之后(远离电源方向),则根据基尔霍夫电流定律,可得此时故障支路零序电流 $\Delta \dot{i}'_{0L_3} = -\dot{i}_{0L_{31}}$ 。结合表2中 $\Delta \dot{i}_{0L_1}, \Delta \dot{i}_{0L_2}$ 值可以看出,此时3条支路的差动量都为负值,且由于各支路2个零序电流互感器间距相同,当认为电缆的电气参数分布近似均匀时,各支路的差动量大小也接近相同,选线判据失效。但该结论可证明故障点不在 LH_{31} 和 LH_{32} 之间,因为将 $\Delta \dot{i}'_{0L_3}$ 与故障点位于 LH_{31} 和 LH_{32} 之间的 $\Delta \dot{i}_{0L_3}$ (见表1)相比较,二者大小、方向都有明显差别。该方法可判断故障点在2个零序电流互感器线路之内还是之外,实现故障点的区段定位。这与继电保护中应用的差动保护原理在逻辑上有一定的相似性,都可区分区内和区外故障,笔者将该方法命名为基于零序电流差动量的故障选线和区段定位法。

该方法可推广到井下低压供电网络的 $N(N \geq 2)$ 条支路上。在每条支路上架设 k 个零序电流互感

器(k 取值视各支路电缆的实际长度确定),并使各支路中编号相同的零序电流互感器与相邻零序电流互感器的间距保持一致,这样每条支路就被分成了 k 个区段。首先求取各支路第1个区段,即前2个零序电流互感器之间的差动量,根据基于零序电流差动量的故障选线和区段定位法进行判断,若选线判据不成立,则证明故障点不在该区段,接着对第2个区段进行判断,直到第 $h(1 \leq h \leq k)$ 个区段的差动量满足故障选线和区段定位判据。由于单相漏电故障可能发生在多个区段,从安全性和可靠性考虑,需对 k 个区段都进行判断,但若 k 个区段的差动量都不满足判据要求,则可肯定低压供电网络无单相漏电故障发生。

2 方案仿真与验证

为了确定基于零序电流差动量的选择性漏电保护方案的可行性,采用Matlab/Simulink对其进行仿真。仿真模型如图2所示(以含有3条支路的模型为例)。根据煤矿井下低压供电网络的特点,三相电源接法为Y形不接地,相-相之间电压有效值为660 V,频率为50 Hz,A相电压初始相角 $\theta=0^\circ$ 。单相漏电故障发生在第3条支路的A相上,过渡电阻 $R_g=1\text{ k}\Omega$ 。干线、支路输电线路均采用Three-Phase PI Section Line模型,Line1—Line3均设为10 km,Line4—Line6分别设为20,40,30 km,Line7设为3 km。3条支路负荷Load1—Load3均采用Three-Phase Series RLC Load模型,其有功负荷分别为1,0.4,2 MW。各支路电缆参数:正序电阻为 $0.012\ 73\ \Omega/\text{km}$,正序感抗为 $0.933\ 7\text{ mH}/\text{km}$,正序

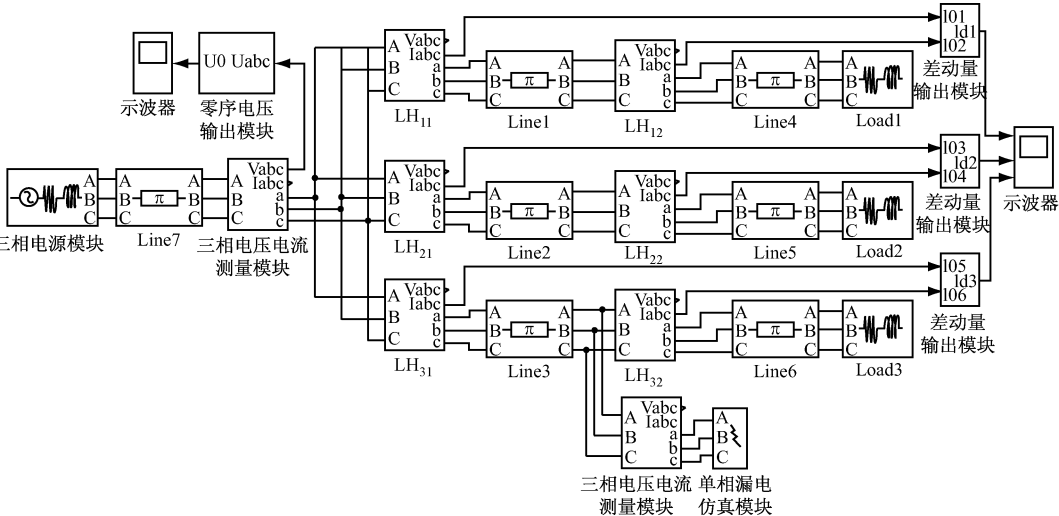


图2 中性点不接地系统单相(A相)漏电故障仿真模型

容抗为 12.74 pF/km;零序电阻为 0.386 4 Ω/km,零序感抗为 4.126 4 mH/km,零序容抗为 7.751 pF/km。各支路均设有 2 个零序电流互感器模块 LH_{ij},测量值用于求取相应点的零序电流信号,仿真时间设为 0.2 s。

(1) 当单相漏电故障点位于第 3 条支路零序电流互感器模块 LH₃₁,LH₃₂之间时,仿真所得 3 条支路的零序电流差动量波形如图 3 所示。设单相漏电故障发生于 $t=0.02$ s,从图 3 可看出,经过一个周波后,各电流波形趋于稳定,故障支路的零序电流差动量 $\Delta \dot{I}_{0L_3}$ 与非故障支路的零序电流差动量 $\Delta \dot{I}_{0L_1}$, $\Delta \dot{I}_{0L_2}$ 方向相反,相位相差接近 180°。对各支路差动量采样后进行快速傅里叶变换可得到各差动量基

波的实部及虚部。当 θ 取不同值时,对应的各支路零序电流差动量见表 3。

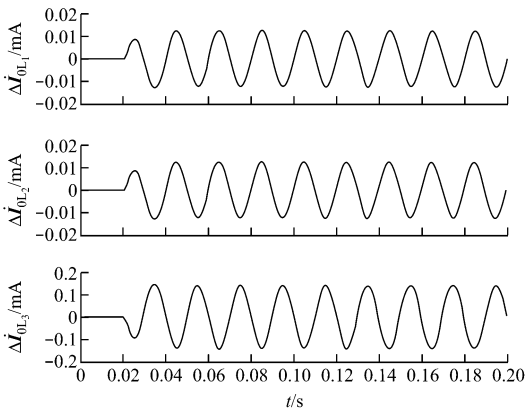


图 3 区内故障时各支路零序电流差动量波形

表 3 区内故障时各支路零序电流差动量

$\theta/(^{\circ})$	$\Delta \dot{I}_{0L_1} / \text{mA}$	$\Delta \dot{I}_{0L_2} / \text{mA}$	$\Delta \dot{I}_{0L_3} / \text{mA}$
0	$8.9 + \text{j}0.4 = 8.9 \angle 2.3^{\circ}$	$8.9 + \text{j}0.4 = 8.9 \angle 2.3^{\circ}$	$-100.3 - \text{j}0.4 = 100.4 \angle 182.5^{\circ}$
120	$-4.7 + \text{j}7.5 = 8.9 \angle 122.2^{\circ}$	$-4.7 + \text{j}7.5 = 8.9 \angle 122.2^{\circ}$	$53.7 - \text{j}84.9 = 100.5 \angle 302.3^{\circ}$
240	$-4.2 - \text{j}7.9 = 8.9 \angle 242.2^{\circ}$	$-4.2 - \text{j}7.9 = 8.9 \angle 242.2^{\circ}$	$46.9 + \text{j}88.9 = 100.5 \angle 62.2^{\circ}$

表 3 中,当单相漏电故障发生在同一位置时,三相电源 A 相电压初相角 θ 不影响各支路零序电流差动量幅值,只影响其相位;故障支路和非故障支路零序电流差动量相位相差接近 180°,且故障支路的零序电流差动量有效值近似为非故障支路的 11 倍,判据差异化更加明显,可靠性和灵敏度得到提高。

(2) 当单相漏电故障点位于第 3 条支路零序电流互感器模块 LH₃₂之后(远离电源方向)时,仿真所得 3 条支路的零序电流差动量波形如图 4 所示,测量结果见表 4。可看出虽然各支路负载容量不同,但由于 Line1,Line2,Line3 各线路参数相同,所有支路的零序电流差动量的幅值和相位也接近相同,导致选线判据失效,但可以肯定故障点不在第3条

支路的 2 个零序电流互感器模块之间,必定在 LH₃₂之后的线路上,证明故障点区段定位判据成立,且结论不受电网负载容量影响。

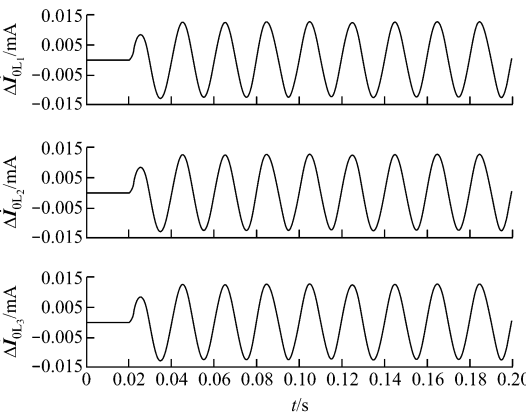


图 4 区外故障时各支路零序电流差动量波形

表 4 区外故障时各支路零序电流差动量

$\theta/(^{\circ})$	$\Delta \dot{I}_{0L_1} / \text{mA}$	$\Delta \dot{I}_{0L_2} / \text{mA}$	$\Delta \dot{I}_{0L_3} / \text{mA}$
0	$8.9 + \text{j}0.4 = 8.9 \angle 2.3^{\circ}$	$8.9 + \text{j}0.4 = 8.9 \angle 2.3^{\circ}$	$8.9 + \text{j}0.4 = 8.9 \angle 2.3^{\circ}$
120	$-4.7 + \text{j}7.5 = 8.9 \angle 122.2^{\circ}$	$-4.7 + \text{j}7.5 = 8.9 \angle 122.2^{\circ}$	$-4.7 + \text{j}7.5 = 8.9 \angle 122.2^{\circ}$
240	$-4.2 - \text{j}7.9 = 8.9 \angle 242.3^{\circ}$	$-4.2 - \text{j}7.9 = 8.9 \angle 242.3^{\circ}$	$-4.2 - \text{j}7.9 = 8.9 \angle 242.3^{\circ}$

3 结语

基于零序电流差动量的矿井低压电网选择性漏电保护方案利用多个零序电流互感器求取各支路零

序电流差动量,根据其幅值、相位间的差异性进行故障选线和区段定位。从仿真结果可看出,该方案理论依据正确,不受电网负载容量、三相电源单相电压初始相位角的影响。与现有漏电保护方案相比,该

方案中差动信号特征信息明显,拾取难度小,包含系统零序电流的全部信息,有利于提高漏电故障支路选取和定位的可靠性及灵敏度,对研发基于该方案的选线装置有一定的指导作用。

该保护方案只适用于发生单相漏电的情况,并且动作值随着电网的对地绝缘电阻和分布电容的变化而变化。实际应用中应考虑各零序电流互感器因接地电流过大而饱和以及数据采集的实时性、同步性问题,可通过选择新型的零序电流互感器装置、架设光纤数字通信网络等方法加以解决。

参考文献:

[1] 高彦,王念彬,王彦文. 基于零序功率方向选择性漏电保护系统的研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(11): 43-48.

[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.

[3] 胡晓东,童军. 采用脉冲展宽实现煤矿选择性漏电保护的新方法[J]. 工矿自动化, 2010, 36(11): 29-32.

[4] 王彦文,刘文军,高彦,等. 基于零序电流群体比幅比相的选择性漏电保护新方案[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 515-519.

[5] 陈德树,尹项根,张哲,等. 故障分量差动保护与故障变化量差动保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 1-4.

[6] 宋小舟,王东,沈辉,等. 零序电流差动应用在母线保护的可行性分析[J]. 继电器, 2002, 30(4): 12-14.

[7] 张国军,苏珂嘉. 基于零序电流特征量的选择性漏电保护选线方法[J]. 工矿自动化, 2012, 38(3): 51-54.

[8] 马永翔. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京:北京大学出版社, 2013: 65-71.

[9] 郭清滔,吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.