

基于暂态信号分析的矿井电网单相漏电故障选线^{*}

李小敏

(河南城建学院电气与控制工程学院 平顶山 467036)

摘要:为解决矿井电网系统漏电故障选线这一安全供电技术难题,提出了一种基于暂态信号特征监测与辨识技术的单相接地故障选线方法。利用变分模态分解算法对线路测量的暂态零序电流信号进行解析,制定了以特征模态分量模最大值极性和线路模态能量权重因子差异性相结合比较的故障选线判据。通过设定故障触发条件对矿井电网系统选线模型进行仿真环境测试,结果表明该选线方法不受故障合闸角、接地电阻和消弧线圈补偿度的影响,均可实现故障线路的识别,具有较强的工程适应性。

关键词:矿井电网;漏电保护;故障选线;变分模态分解

中图分类号: TD611 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.65

Single-phase leakage fault selection method based on transient signal analysis for mine distribution network

Li Xiaomin

(College of Electrical and Control Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: For the purpose of solving the safety power supply problem that is leakage fault selection in the mine distribution network system, we proposed a single-phase ground fault selection method based on transient signal features identification technology. In this paper, the line transient zero-sequence current signal is analyzed with the variational modal decomposition algorithm, which develops a fault selection criterion combining the mode maximum polarity of the feature modal component and the line modal energy weight factor discrepancy. With different fault triggering conditions, the simulation of mine distribution network system is conducted. The results demonstrated that the selection method is not affected by the fault closing angle, ground resistance, and arc suppression coil compensation, which can be realized in fault line identification and provides excellent engineering adaptability.

Keywords: mine distribution network; leakage protection; fault line selection; variational mode decomposition

0 引言

煤矿井下供电系统是支撑采煤掘进工作稳定运行的中枢神经,其出线位于井下复杂干扰环境,容易受到由外力的碰撞挤压致使电缆线路的绝缘失效,从而引发接地短路漏电故障^[1-2]。加之井下环境中含有易燃易爆性混合气体,伴随着故障的加剧甚至会引发瓦斯、火灾、煤尘爆炸等安全事故,将严重影响煤矿安全生产^[3-4]。因此,针对矿井电网漏电故障,能够及时排查找到故障线路并予以切除,解决这一技术问题对于构建完善的矿井安全智能供电系统尤为关键。

为此,国内外的矿井供电系统沿线多以装设现场监测设备馈线终端单元获取线路数据信息,实现故障的研判^[5-6]。而矿井供电系统多以电缆线路构成,其中性点需要利用经消弧线圈接地的方式补偿系统发生单相接地故障时流过的对地电容电流,以减弱漏电位置电流。此种供电系统的运行模式使得传统基于稳态信息量的故障选线判据失效^[7]。而基于暂态信息量的故障选线方法可以克服稳态信息灵敏度低、受消弧线圈影响大的困扰,得益于矿井智能化传感监测技术的发展,通过提取暂态特征信息建立了相关故障选线判据^[8-10]。其中,小波变换法^[11-13]通过选取合适的小波基函数,获取线路暂态零序电流的幅值

收稿日期:2022-11-12

^{*} 基金项目:国家青年科学基金(61803145)项目资助

和相位,依据参量的差异用于故障选线。但小波基函数及分解层数依赖于先验设定,使得结果为固定频带信号,很难适应复杂故障工况。通过经验模态分解法^[14-15]识别各线路之间特征分量的差异性可用于故障选线,但由于其分解过程易受噪声影响发生模态混叠,分解效果不直观,难以确保故障信号的提取效果影响选线结果。

近年来,变分模态分解^[16]的提出有效避免了因模态混叠造成的重构信息不准确问题,其分量可以直观稳定地刻画出信号的局部特征。目前根据特征分量的相关系数实现初步故障选线^[17-18],但上述方法对暂态信号利用不够充分,且判定函数容易累积干扰数据从而加剧固定误差,影响选线精度。进一步地通过对比零序电流与零序电压导数的曲线斜率解决故障选线问题^[19],然而纳入零序电压数据提升了实际对暂态数据量的获取和处理难度,仍待优化与完善。

为了充分提取并利用各条线路的故障信息,本文提出了基于变分模态分解的暂态信号特征测量辨识技术用于矿井电网系统单线接地漏电故障选线。通过变分模态分解算法将各线路的暂态零序电流信号分解为多个模态分量,并利用特征模态分量模最大值极性和线路模态能量权重因子差异性比较的双重判据用于故障选线。最后,以矿井电网 10 kV 谐振接地系统模型为平台,开展了多种故障触发条件下的仿真测试,实验结果验证了该选线方法的适用性。

1 单相漏电故障暂态分析

矿井电网谐振接地系统发生单相漏电故障时,各线路出现零序电流,其中流经故障线路的暂态零序电流包含容性和感性电流,暂态分析时其等效电路如图 1 所示^[20]。

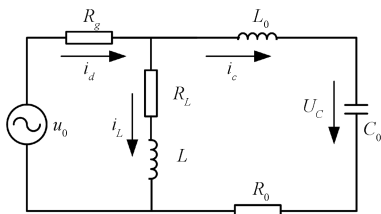


图1 暂态分析等效电路

其中, L_0 、 R_0 分别代表回路中对地零序电感和电阻; C_0 为系统对地总的零序电容; L 和 R_L 为消弧线圈的电感和热损耗电阻; R_g 为短路位置的过度电阻。根据图 1 的等效电路可得^[21-22]:

$$R_0 i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_c dt = u_0 \quad (1)$$

式中: u_0 为接地点零序电源, $u_0(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, ω 为角频率, φ 为故障初始相角。通过对式(1)求解,可得到暂态电容电流 i_c :

$$i_c = I_{cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \phi \sin \omega_f t - \cos \phi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} +$$

$$I_{cm} \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

式中: I_{cm} 为线缆的电容电流幅值; ω_f 为暂态自由振荡角频率; τ_c 为电容电流时间常数。

由纳入消弧线圈的回路方程可得到流经消弧线圈的暂态电感电流 i_L :

$$i_L = I_{Lm} \cos \phi e^{-\frac{t}{\tau_L}} - I_{Lm} \cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

式中: I_{Lm} 为消弧线圈的电感电流幅值; τ_L 为消弧线圈电感电流的时间常数。

由此,流经故障线路的暂态接地故障电流 i_d :

$$i_d = i_c + i_L = (I_{cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \phi) + I_{Lm} \cos \phi e^{-\frac{t}{\tau_L}} + I_{cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \phi \sin \omega_f t - \cos \phi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (4)$$

由式(4)可知,暂态接地故障电流主要由稳态工频分量、暂态直流分量和暂态自由振动分量 3 部分组成。若系统中心点经消弧线圈接地时,稳态工频分量受到消弧线圈的补偿作用不满足故障选线的要求。而暂态电容电流与电感电流的频率不同,故不能相互补偿,则是由两部分的叠加。考虑到暂态分量不受消弧线圈补偿作用的影响,各线路暂态电容电流遵循故障线路暂态零序电流与非故障线路方向相反,同时暂态分量的状态特征较稳态信号更为明显,通过提取各线路的暂态分量信号有利于实现对矿井电网单相漏电故障的判别。

2 故障选线方法

2.1 变分模态分解

变分模态分解是由 Dragomiretskiy 等^[16]提出的一种自适应信号分解新方法,通过在变分框架内完成对测量信号的分解思想使得该信号分析方法在处理非线性及非稳态数据上优势明显^[23-24]。其解析原理是将输入信号分解为 K 个中心频率的模态函数,并自适应地更新中心频率和带宽获得最小估计带宽的总和,以实现原始测量信号在各模态下的分解。

$$\begin{aligned} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} & \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t [\delta(t) + j\pi t] \cdot u_k(t) e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } & \sum_{k=1}^K u_k = f \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ∂_t 为随时间变化的偏导数; $\delta(t)$ 为单位脉冲函数; f 为原始输入信号; $\{u_k\}$ 和 $\{\omega_k\}$ 分别表示 K 个模态的集合及其中心频率。

其次,对变分模型求解,通过引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日算子 $\lambda(t)$ 后得到非约束条件下的增广拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) &= \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t [\delta(t) + j\pi t] \cdot u_k(t) e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \rangle \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^K u_k(t) \rangle \quad (6)$$

通过交替二乘法不断更新迭代 $u_k^{n+1}(t)$ 、 $\omega_k^{n+1}(t)$ 、 $\lambda^{n+1}(t)$ 以求取最小值, 其 $u_k^{n+1}(t)$ 更新式表示为:

$$u_k^{n+1} = \underset{u_k \in X}{\operatorname{argmin}} \left\{ \alpha \left\| \partial_t [(\delta(t) + j/\pi t) \cdot u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{i=1}^K u_i(t) + \lambda(t)/2 \right\|_2^2 \right\} \quad (7)$$

最后, 频域转化得到模态的二次优化问题解:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i=1}^K \hat{u}_i(\omega) + \hat{\lambda}(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (8)$$

其中, 心频率更新式表示为:

$$\hat{\omega}_k^{n+1} = \underset{\omega_k}{\operatorname{argmin}} \left\{ \int_0^\infty (\omega - \omega_k)^2 |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega \right\} \quad (9)$$

相应二次优化问题解:

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega / \int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega \quad (10)$$

通过更新 u_k 和 ω_k , 并根据收敛精度 e 判定收敛条件, 若满足式(11)则停止迭代, 否则继续更新。

$$\frac{\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} < e \quad (11)$$

因此, 可得到 K 个本征模函数(IMF)分量。通过利用变分模态分解算法对矿井电网各线路的暂态零序电流信号进行分解, 提高故障特征提取的辨识度, 在此基础上构造双重判别方法用于对故障线路的判别。

2.2 故障选线判据

1) 模最大值极性

根据对单相漏电故障暂态分析可知, 故障瞬时的故障线路和非故障线路的零序电流极性相反, 为了更加清晰的量化各线路的故障电流暂态突变特征, 这里利用变分模态分解对各线路暂态零模电流进行信号分解, 选取故障特征最明显的模态分量作为特征信号, 通过比较各线路特征信号的模最大值的极性用于故障判别。

2) 能量权重

由于故障线路的频带能量高于非故障线路的能量, 将各线路的模态能量提取出来, 通过权重因子的差异性比较可以辅助用于判别故障线路。

线路暂态零序电流信号 $f(t)$ 在第 k 层模态分量下的能量计算式为:

$$E_k = \sum_{s=1}^T c_k^2(s) \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

式中: T 为时间序列长度; s 为采样点; c 为信号分量的幅值; K 为模态分解的层数; E_k 为 k 层模态分量的能量。

信号 $f(t)$ 的能量计算式为:

$$E_i = \sum_{k=1}^K E_k \quad (13)$$

各线路信号 $f_1(t)$, $f_2(t)$, \dots , $f_n(t)$ 的总能量计算式为:

$$E = \sum_{n=1}^N E_i \quad (14)$$

最后, 计各线路信号能量权重因子为:

$$P_i = E_i/E \quad (15)$$

2.3 故障选线算法流程

对矿井电网发生单相接地故障分析与故障判别方案分析后, 通过利用变分模态分解对各线路暂态零序电流分解做初步处理, 进一步提取特征模态分量的模最大值极性和模态总能量的权重因子以确保实现准确故障选线, 选线步骤如下。

步骤 1) 矿井电网发生单相接地故障后, 系统出现零序电压, 当监测到母线侧零序电压值大于整定值 (20% 额定电压) 后, 启动故障选线判别算法。

步骤 2) 获取各条馈线 $L_1 \sim L_N$ 的零序电流, 并选取在故障发生时刻的前后 1/4 周期暂态零序故障电流波形数据, 并将其导入变分模态分解算法求取 K 层变分模态分量。

步骤 3) 选取特征最明显的模态分量 IMF $_k$ 作为线路故障识别特征信号。求取特征信号的模最大值极性 $M_1 \sim M_N$, 若识别到某条线路 M_i 的模最大值极性与其他线路相反, 判定线路 L_i 故障, 否则, 进行下一步选线判据。

步骤 4) 计算各线路的模态能量 $E_1 \sim E_N$ 并求取能量权重因子 $P_1 \sim P_N$, 判定权重因子最大值 P_i 所对应的线路为故障线路。

步骤 5) 若步骤 3) 和 4) 得出的故障选线结果不同, 但各线路模最大值极性均相同, 则判定为母线初发生故障。

具体选线算法流程如图 2 所示。

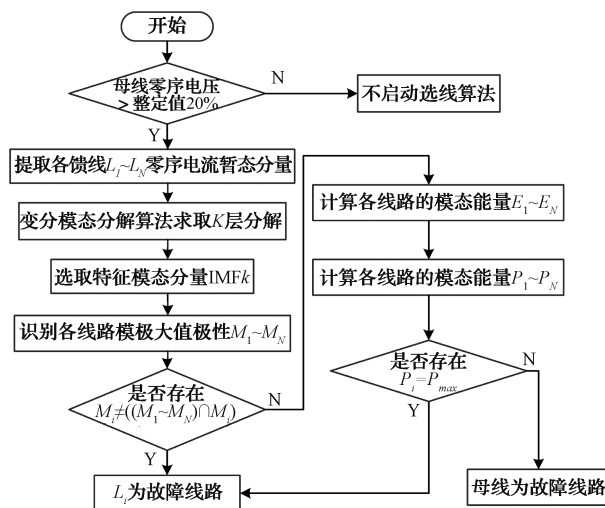


图2 选线算法流程

3 故障选线仿真与分析

3.1 仿真模型

以矿井实际电网系统为算法测试对象设计了4条电缆馈线的谐振接地系统模型,其简化图如图3所示。通过MATLAB/Simulink软件搭建的矿井10 kV线路故障仿真平台如图4所示,电缆线路 $L_1 \sim L_4$ 的电气参数设定如表1所示^[5]。各线路距离母线出口处设置电流测量模块用于获取线路的故障信号数据。中性点引入的消弧线圈采用过补偿方式,设定补偿度为10%,即等效接入的电感为 $L = 1/3\omega^2 C_{0Z}(1+0.1) = 0.76 \text{ H}$ 。有功损耗设定为感性损耗的3%,即等效电阻为 $R_L = 0.03\omega L = 7.14 \text{ } \Omega$ 。仿真采样频率设置为20 kHz。

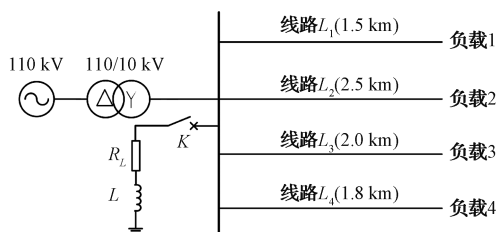


图3 矿井电网谐振接地系统简化图

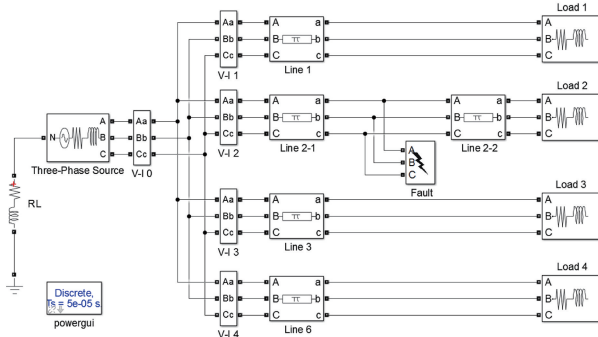


图4 线路故障仿真平台

表1 电缆线路参数设定值

相序	电阻/(Ω/km)	电感/(mH/km)	电容/($\mu\text{F}/\text{km}$)
正序	0.195	0.191	1.63
零序	0.743	0.872	0.52

3.2 仿真结果

以线路 L_2 距首端1 km处发生A相漏电故障为例,设定故障合闸角设为 90° ,故障接地电阻设为 $5 \text{ } \Omega$,故障触发时间为0.01 s,仿真结束时间为0.05 s。运行仿真得到线路 $L_1 \sim L_4$ 出线处的故障零序电流波形如图5所示。

分别对4条线路的零序电流波形数据选择故障触发时刻前后1/4周期的暂态零序电流波形并导入变分模态分解算法进行信号处理。设定算法初始参数^[25]:二次惩罚因子 $\alpha = 2\ 000$,初始中心频率 $\omega = 0$,收敛判别精度 $e =$

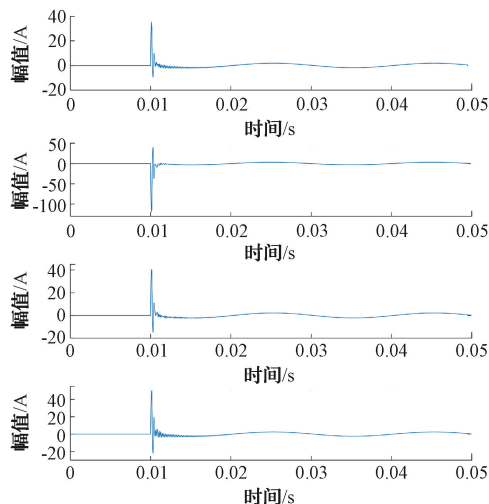
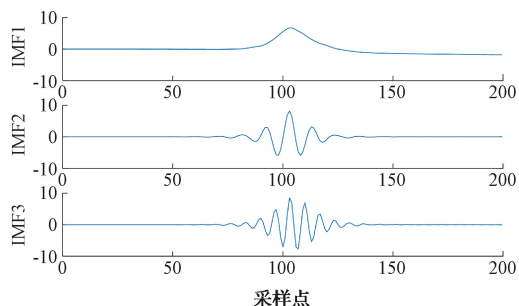
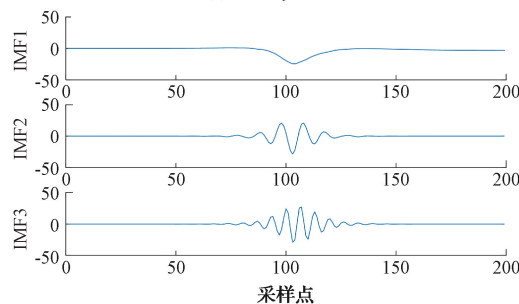


图5 线路 $L_1 \sim L_4$ 零序电流

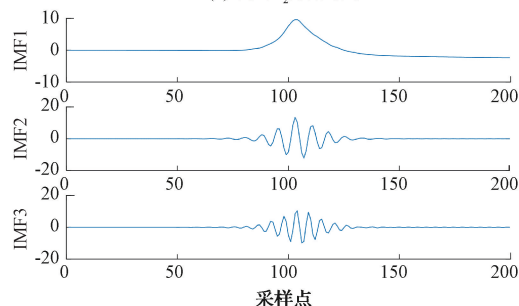
10^{-7} ,预设模态分解层数 K 决定分解结果的完整性,经测试选取 $K = 3$ 。根据上述参数得到信号分解结果如图6(a)~(d)所示。



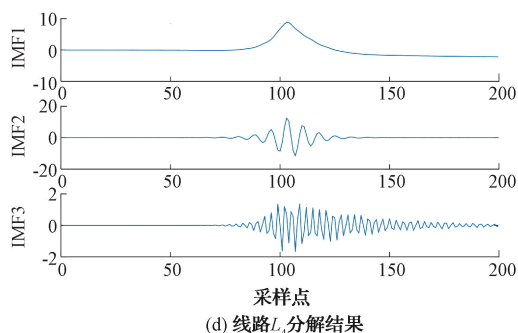
(a) 线路 L_1 分解结果



(b) 线路 L_2 分解结果



(c) 线路 L_3 分解结果

图6 线路 $L_1 \sim L_4$ 暂态零序电流分解结果

可以看出,当线路 L_2 故障后,其特征IMF 1分量的模最大值极性与非故障线路 L_{1-3-4} 的IMF 1分量模最大值极性相反,通过判据1可以正确辨识故障线路为 L_2 。同时,表2根据式(11)~(13)求取了图6中各线路模态的能量值,其线路对应的权重因子统计结果如图7所示。

表2 线路各模态能量值

模态	L_1	L_2	L_3	L_4
IMF 1	894.18	7 748.13	1 600.32	1 299.47
IMF 2	427.07	5 203.56	1 239.23	981.81
IMF 3	577.61	7 027.75	1 254.16	33.06

可以看出,线路 L_2 的权重因子为最大值且明显高于

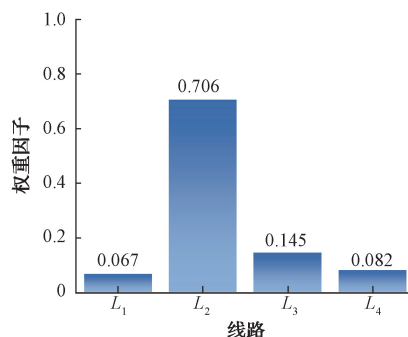


图7 线路能量权重因子分布

其他线路,易于判别出故障发生在线路 L_2 处,该判据可以作为辅助方法用于实际复杂故障情况下的故障选线。

3.3 方法适应性

针对复杂条件下的矿井电网系统,其存在不同触发条件的故障行为。因此,本文以不同的故障合闸角、故障接地电阻和消弧线圈补偿度为故障触发条件,分别对提出的暂态量故障选线算法进行仿真验证。

1)故障合闸角

设定线路 L_2 发生单相接地故障,漏电阻为 $5\ \Omega$,以故障合闸角分别在 0° 、 30° 、 60° 和 90° 触发位置开展测试,各线路特征模态分量模最大值极性与线路能量权重因子统计数据及选线结果如表3所示。

表3 不同故障合闸角条件下的选线数据

故障线路	接地电阻	合闸角/ $^\circ$	L_1	L_2	L_3	L_4	选线结果
L_2	$5\ \Omega$	0	+	—	+	+	L_2
			0.019	0.918	0.035	0.028	故障
		30	+	—	+	+	L_2
			0.032	0.836	0.079	0.053	故障
		60	+	—	+	+	L_2
			0.051	0.779	0.108	0.062	故障
		90	+	—	+	+	L_2
			0.067	0.706	0.145	0.082	故障

由表3结果可以看出,对于不同故障合闸角下的触发条件,故障线路的特征模态分量模最大值极性与非故障线路极性相反、故障线路能量权重因子明显大于非故障线路两个特征辨识条件。随着触发故障合闸角的增大,故障线路与非故障线路能量权重因子差异性变小,此现象是因为随着触发角度变大,消弧线圈输出的感性直流分量减小,从而降低了故障线路模态能量致使权重因子占比变小,但数据的差异明显仍然可以用于有效的故障选线。

2)故障接地电阻

设定线路 L_3 发生单相接地故障,故障合闸角为 90° ,以漏电接地电阻分别在 10 、 100 和 $1\ 000\ \Omega$ 触发条件开展测试,各线路特征模态分量模最大值极性与线路能量权重因子统计结果如表4所示。

由表4结果可知,针对漏电故障接地电阻的不同,该辨识方法仍可以准确辨别出故障线路。但是,随着故障电阻的增大,高接地电阻条件降低了故障电流的高频振荡分量,暂态故障电流幅值微弱,仅通过单一的信号极性判别容易受到扰动影响。

3)消弧线圈补偿度

设定线路 L_3 发生单相接地故障,故障合闸角为 90° ,漏电故障电阻为 $5\ \Omega$,以消弧线圈发生过补偿度为触发条件,分别在过补偿度为 5% 、 7% 和 10% 参数下测试各线路特征模态分量模最大值极性与线路能量权重因子,其统计结果如表5所示。

消弧线圈过补偿度的不同会影响故障电流大小,但该算法仍可以准确、灵敏地实现选线。因此,通过结合两种

表4 不同故障接地电阻条件下的选线数据

故障线路	合闸角	接地电阻/ Ω	L_1	L_2	L_3	L_4	选线结果
L_3	90°	10	+	+	—	+	L_3
			0.071	0.090	0.682	0.157	故障
		100	+	+	—	+	L_3
			0.097	0.111	0.617	0.175	故障
		1 000	+	+	—	+	L_3
			0.105	0.154	0.551	0.190	故障

表5 不同消弧线圈补偿度条件下的选线数据

故障线路	消弧线圈 过补偿度/%	L_1	L_2	L_3	L_4	选线结果
L_3	5	+	+	—	+	L_3
		0.029	0.091	0.811	0.069	故障
	7	+	+	—	+	L_3
		0.026	0.104	0.789	0.081	故障
	10	+	+	—	+	L_3
		0.031	0.120	0.755	0.094	故障

判据能够确保在复杂矿井电网环境下的准确故障选线,助力矿井供电系统的可靠、高效运维。

4 结 论

本文充分利用变分模态分解算法对单相漏电接地故障的暂态电流信号进行解析,选取各线路特征模态 IMF 1 分量的模最大值极性与线路模态能量权重因子共同作为故障线路的识别依据。通过构建矿井 10 kV 电网系统仿真模型,测试了不同故障合闸角,接地电阻和消弧线圈补偿度条件下的选线问题,测试数据验证了选线算法可以有效辨识故障线路。该方法依据更加丰富的故障电气信息量作为研判依据,提升了矿井电网系统故障选线的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 赵建文,侯媛彬,尹项根. 矿井电网单相漏电瞬时序网络模型[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 119-123.
- [2] 王福忠,董鹏飞,董秋生,等. 煤矿 6 kV 动力电缆绝缘在线监测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1398-1405.
- [3] 徐建军,刘建宇,闫丽梅. 基于原子稀疏分解的矿井电网故障选线方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(2): 90-94.
- [4] 李科,随晓娜,张俊,等. 矿井电网故障选线方法研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(5): 70-75.
- [5] 吴君. 矿井高压安全供电智能保障技术研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2020.
- [6] 袁川来,廖庸邑,孔玲爽,等. 时间约束的改进分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 126-134.
- [7] 唐金锐,尹项根,张哲,等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 7-13.
- [8] 薛永端,徐丙垠,李天友,等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 27-32.
- [9] 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.
- [10] 侯思祖,郭威. 基于改进 EEMD 与混沌振子的配电网故障选线[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 77-87.
- [11] LIMA F, LOTUFO A, MINUSSI C. Wavelet-artificial immune system algorithm applied to voltage disturbance diagnosis in electrical distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 9(11): 1104-1111.
- [12] 束洪春,段锐敏,朱梦梦,等. 基于零序电流小波变换系数均方根值的故障选线 ANN 方法[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1): 17-24.
- [13] 刘渝根,王建南,马晋佩,等. 结合小波包变换和 5 次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1519-1525.
- [14] 查丛梅,王长江,魏云冰,等. 一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 100-104.
- [15] 张理,葛成,俞斌,等. 基于 DTU 与 FPI 的小电流接地故障定位及信息建模[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 130-136.
- [16] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Two-dimensional variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):

- 531-544.
- [17] 魏科文,张靖,何宇,等.基于VMD和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J].电力系统保护与控制,2021,49(22):105-113.
- [18] 陈再航,刘晓波,聂远航,等.基于自适应VMD的含DG配电网谐振接地故障选线方法[J].国外电子测量技术,2022,41(1):146-152.
- [19] 徐耀,田书,杨淇翔.综合高低频段分量的谐振接地系统故障选线[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(10):1-9.
- [20] 赖平,周想凌,邱丹.小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(4):51-57.
- [21] 刘谋海,方涛,姜运,等.基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(2):74-79.
- [22] 罗超,耿蒲龙,曲兵妮,等.基于小波包的矿井供电系统单相接地故障选线方法[J].工矿自动化,2018,44(2):68-74.
- [23] 卫永琴,鞠凯,王潇龙,等.变分模态分解在小电流接地系统故障选线中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(11):31-38.
- [24] 朱哈娜,刘慧明.基于改进VMD与GS_SVM的轴承故障诊断[J].电子测量技术,2020,43(21):71-76.
- [25] 郭建帅,崔双喜,郭建斌,等.基于VMD-SSA-HKELM的超短期负荷预测[J].国外电子测量技术,2022,41(6):105-111.

作者简介

李小敏,硕士,讲师,主要研究方向为智能控制、智能化技术及应用。
E-mail:576033042@qq.com