

一种基于图像的配电网单相接地故障选线方法

岑俊¹, 覃苏玲², 李琪林³

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学计算机科学与技术学院, 上海 200090;
3. 四川省电力公司计量中心, 四川 成都 610045)

摘要:文中针对中性点经消弧线圈接地引起故障电流微弱, 故障特征不明显, 导致谐振接地系统发生单相接地故障时选线速度慢、选线困难等问题, 提出了一种基于图像的配电网单相接地故障选线方法。该方法获取各馈线故障零序电流, 通过连续小波变换(CWT)得到CWT系数矩阵, 将系数矩阵生成RGB图像; 然后, 通过感知哈希算法计算正常馈线与故障馈线生成RGB图像之间的汉明距离, 以汉明距离判断各RGB图像之间的差异, 进而确定故障馈线; 最后, 对比了基于皮尔逊相关系数选线方法和基于EMD分解零序电流高频分量选线方法, 结果表明所提方法应用于谐振接地系统中选线速度快, 且不受故障电阻、故障位置、故障初始相角等因素的影响。

关键词:谐振接地系统; 故障选线; 零序电流; 连续小波变换; 感知哈希算法

中图分类号: TM 711 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0083-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230116

An Image-based Single-phase Grounding Fault Line Selection Method in Distribution Network

CEN Jun¹, QIN Suling², LI Qilin³

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. College of Computer Science and Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
3. Metering Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610045, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the problems that the fault current is weak caused by the neutral point grounded through arc suppression coil, and the fault characteristics are not obvious, which leads to slow and difficult line selection when a single-phase ground fault occurs in resonant earthed system, an image-based single-phase grounding fault line selection method in distribution network is proposed. This method obtains the zero-sequence current of each feeder fault, through continuous wavelet transform (CWT), the zero-sequence current obtains the CWT coefficient matrix, and then the coefficient matrix is generated into RGB images. Finally, the Hamming distance between RGB images generated by the normal feeder and the faulty feeder is calculated by perceptual hash algorithm, which is used to judge the difference between RGB images, and then the faulty feeder is determined. The line selection methods based on Pearson correlation coefficient and based on EMD decomposition of high frequency components of zero-sequence current are compared. The results show that the proposed method has fast line selection speed and is not affected by factors such as fault resistance, fault location and initial phase angle of the fault when applied to the resonant earthed system.

Key words: resonant earthed system; fault line selection; zero-sequence current; continuous wavelet transform; perceptual hash algorithm

0 引言

随着新能源发电技术发展, 越来越多新能源和

分布式能源接入, 配电网日益复杂化、随机化, 导致故障频繁出现。中国配电网大多采用小电流接地方式, 发生单相接地故障时可带故障运行 1~2 h^[1], 提高了供电可靠性。但非故障相线路对地电压会升高

到原来的 $\sqrt{3}$ 倍^[2],造成绝缘威胁,长时间处于该状态可能会导致大规模停电。目前,配电网也渐渐采用大容量电缆线路,导致电容电流过大,可采用谐振接地系统有效克服故障电弧不容易熄灭问题。但提高供电可靠性同时也带来一定影响,发生单相接地故障时,消弧线圈对流过接地点的容性电流分量有抵消作用,使接地电流减小、故障特征变得微弱,增加故障选线难度。

针对谐振接地系统,故障发生瞬间含有丰富的暂态信息,因此用暂态法研究单相接地故障受到学者青睐。文献[3]用希尔伯特黄变换分析故障暂态零序电流,构建时频能量矩阵,分析矩阵相似性以确定故障线路,方法可行但是计算速度慢。文献[4]用变分模态分解(variation mode decomposition, VMD)获取暂态零序电流的非工频分量,然后用 K-Means 聚类实现故障线路分类;该方法能够抵抗一定外界噪声影响,但信号处理阶段复杂。文献[5]通过分析单相接地故障中性点和各相电压关系,根据电压大小实现故障选线;该方法需要严谨的电路理论公式计算,适合于仿真系统,现场情况下避免不了外界干扰带来数据偏差。

针对上述问题,下面提出两种基于相似度和差异度故障选线方法用于谐振接地系统:1)用皮尔逊相关系数分析各馈线间关系完成故障选线;2)基于图片差异度方法,利用感知哈希算法区分故障线路和正常线路图片完成故障选线。

1 谐振接地系统配电网单相接地故障特征

1.1 稳态特征

图 1 为配电网四出线模型,假设 1 号线路 C 相发生单相接地故障,正常线路 2~4 有:

$$\begin{cases} I_{C_{A2}} = j\ddot{U}_A \omega C_{02} \\ I_{C_{B2}} = j\ddot{U}_B \omega C_{02} \\ I_{C_{C2}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I_{C_{A2}}$ 、 $I_{C_{B2}}$ 、 $I_{C_{C2}}$ 分别为线路 2 的三相对地电容电流; \ddot{U}_A 、 \ddot{U}_B 分别为 A、B 相的对地电压; ω 为角频率; C_{02} 为线路 2 的对地电容(假设三相相等)。

由式(1)可得线路 2 的零序电流为

$$3\dot{I}_{02} = \dot{I}_{C_{A2}} + \dot{I}_{C_{B2}} + \dot{I}_{C_{C2}} = j3\dot{U}_0 \omega C_{02} \quad (2)$$

同理可得 3、4 号线路的零序电流为:

$$3\dot{I}_{03} = j3\dot{U}_0 \omega C_{03} \quad (3)$$

$$3\dot{I}_{04} = j3\dot{U}_0 \omega C_{04} \quad (4)$$

式中: \dot{I}_{02} 、 \dot{I}_{03} 、 \dot{I}_{04} 分别为线路 2~4 的基波电流; \dot{U}_0 为零序电压。

对于故障线路 1(假设中性点不接地)有:

$$\begin{cases} \dot{I}_{C_{A1}} = j\ddot{U}_A \omega C_{01} \\ \dot{I}_{C_{B1}} = j\ddot{U}_B \omega C_{01} \\ \dot{I}_{C_{C1}} = -j3\dot{U}_0 \omega (C_{01} + C_{02} + C_{03}) \end{cases} \quad (5)$$

$$3\dot{I}_{01} = -3(\dot{I}_{02} + \dot{I}_{03}) \quad (6)$$

因谐振接地,此时消弧线圈有补偿作用,则 1 号线路的零序电流为

$$3\dot{I}_{01} = -3(\dot{I}_{02} + \dot{I}_{03}) - \dot{I}_L \quad (7)$$

式中, \dot{I}_L 为消弧线圈的电感电流。

由式(2)一式(4)和式(7)可知,线路 2~4(正常线路)零序电流大小等于各线路三相对地电容电流的向量和,由母线流向馈线;线路 1(故障线路)因消弧线圈补偿不同,故障线路电流方向和幅值都会受到影响。过补偿状态下馈线零序电流方向一致,故不能以电流方向作为选线依据。

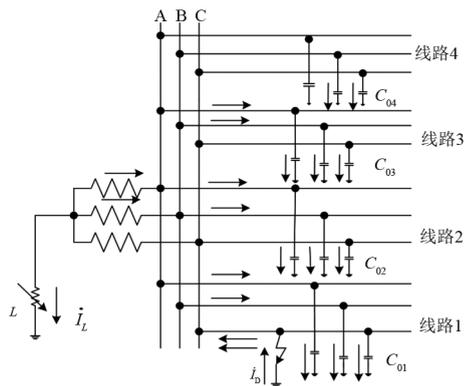


图 1 谐振接地系统单相接地时电流分布

1.2 暂态特征

谐振接地系统发生单相接地故障时稳态数值小,但暂态特征丰富,故提取暂态分量作为故障特征成为当前研究热点。发生故障瞬间,可用图 2 等效电路分析暂态电容电流和暂态电感电流。

1.2.1 暂态电容电流

分析暂态电容电流时, $L \gg L_0$, r_L 、 L 影响较小不

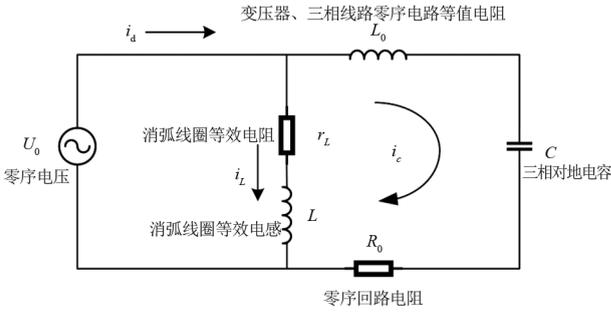


图 2 谐振接地系统

用考虑,即形成了 L_0 、 C 、 R_0 、 U_0 串联回路,可确定电容电流。根据图 1 可得到电路方程为

$$R_0 i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

式中: U_m 为零序电压; i_c 为电容电流。

i_c 主要由自由振荡分量 $i_{c.os}$ 和稳态工频分量 $i_{c.st}$ 组成,初始状态 $i_{c.st} + i_{c.os} = 0$,电容电流幅值 $I_{cm} = U_m \omega C$,可得

$$i_c = i_{c.os} + i_{c.st} = I_{cm} \left[\left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta} + \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (9)$$

式中: ω_f 为角频率; δ 为自由振荡衰减系数, $\delta = 1/\tau_c = R/2L_0$, τ_c 为电容回路时间常数; φ 为相角。

$i_{c.os}$ 分量中含有 $\sin \varphi$ 、 $\cos \varphi$ 变量, δ 为任意值均会产生振荡, $\varphi = 0$ 时最小, $\varphi = \pi/2$ 时最大。

1.2.2 暂态电感电流

谐振接地系统中,消弧线圈产生电感电流由式(10)组成。

$$i_L = I_{Lm} [\cos \varphi e^{\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi)] \quad (10)$$

式中: I_{Lm} 为电感电流幅值, $I_{Lm} = U_m/\omega L$; τ_L 为电感回路时间常数。

从式(10)可知,电感电流幅值与 φ 有关, $\varphi = 0$ 时最大, $\varphi = \pi/2$ 时最小。电感电流产生暂态过程时间长短与接地瞬间电压相角有关^[6]: $\varphi = 0$ 时,大约有一个工频的暂态时间; $\varphi = \pi/2$ 时,有 0.5~1.0 个工频周期。

1.2.3 暂态接地电流

图 2 所示流过故障点的暂态电流 i_d 由系统对地电容电流和消弧线圈暂态电感电流相加而成。

针对上述谐振接地系统单相接地故障分析可得到以下结论:

1) 谐振接地系统发生单相接地故障时,线路 1

(故障线路)零序电流方向与线路 2~4(正常线路)相反;

- 2) 母线故障时,所有馈线电流由母线流向馈线;
- 3) 暂态零序电流幅值大但时间短(0.5~1.0 个工频周期)。

2 相似度故障选线方法

2.1 皮尔逊相关系数选线方法

皮尔逊相关系数是一种分析两个变量之间相关程度的统计学方法^[7],基于故障馈线与非故障馈线之间存在的电流幅值与相位差异,计算馈线之间皮尔逊相关系数,以确定故障线路,如式(11)所示。

$$\rho_{a,b} = \frac{\sum_{i=1}^n [a(i) - \bar{a}] \times [b(i) - \bar{b}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [a(i) - \bar{a}]^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n [b(i) - \bar{b}]^2}} \quad (11)$$

式中: $a(i)$ 、 $b(i)$ 为两馈线零序电流; \bar{a} 、 \bar{b} 为 n 个数据平均值。 $\rho_{a,b}$ 取值范围为 $[-1, 1]$, $|\rho_{a,b}|$ 越接近 1 说明两馈线 a 、 b 线性相关程度越高^[8], $|\rho_{a,b}|$ 接近 -1 说明两馈线负相关程度高。选线过程如下:

- 1) 获取 4 条馈线故障后半周期的零序电流数据;
- 2) 通过式(11)计算两馈线之间皮尔逊相关系数 $\rho_{a,b}$;
- 3) 绘制馈线之间的皮尔逊热力图,分析得到故障线路。

2.2 皮尔逊相关系数选线方法实例

图 3 为配电网单相接地故障时各馈线零序电流波形,取故障后半周期数据计算两馈线间皮尔逊相关系数如图 4 所示。可看出线路 1(故障线路)与其他 3 条馈线(非故障线路)的皮尔逊相关系数相差大,呈负相关;其他非故障馈线之间的皮尔逊相关系数均接近 1,呈正相关;说明线路 1 与其他线路不相关程度低,结合第二章分析,可判定线路 1 为故障线路。

皮尔逊相关系数选线法属于分析原始零序电流数据之间的相关度(或差异度)的选线方法,该方法在实际工程需要计算大量复杂的数据,计算时间长,导致选线速度慢。下面提出基于图像差异度的选线方法,利用信号处理的方法可更好地抓取暂态零序电流数据,感知哈希算法辨识图像之间的差异,减少运算,选线速度快。

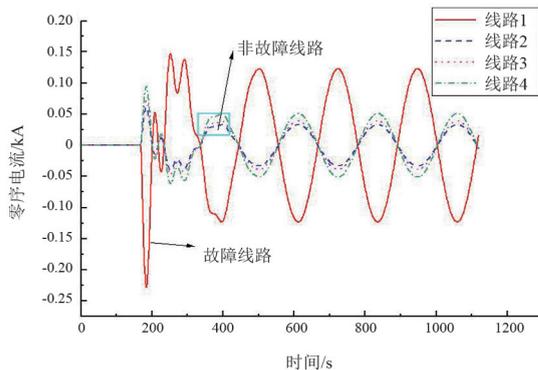


图3 故障零序电流波形

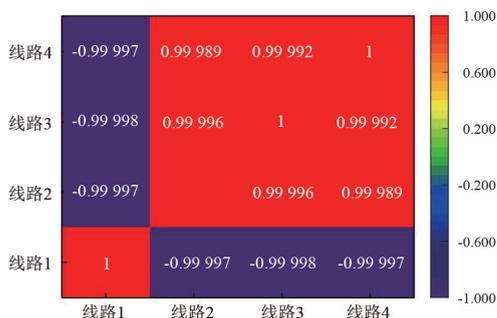


图4 各线路皮尔逊相关系数热力

2.3 图像相似度选线方法

2.3.1 连续小波变换

由于暂态信息的时间十分短暂,大约有 0.5~1.0 个工频周期,且暂态电流属于非平稳信号。瞬时变换信号分析处理时,通常使用傅里叶变换;但傅里叶变换处理非平稳信号的能力较弱,而小波变换对于非平稳信号处理则显示了较好的能力,因此选择了小波变换方法。小波变换包括连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)和离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)。连续小波变换主要对连续时间信号进行分解。而离散小波变换是对信息进行离散化处理,减少连续信号中所含信息冗余,减少计算成本。但对于需要精确信号处理,多选用连续信号,因此选择连续小波变换分析故障零序电流^[9]。

小波变换的基本思想是对母小波函数进行平移伸缩变换,得到一组称为小波函数簇的二维基底,用该基底去表示或逼近某一信号^[10]。假设选取的母小波函数为 $\psi(t)$, 定义伸缩因子和平移因子分别为 a 和 b , 生成小波函数簇 $\Psi_{a,b}(t)$ 如式(12)。

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (12)$$

式中, $a, b \in R, a \neq 0$ 。

采取故障后半周期数据进行连续小波变换得到二维 CWT 系数矩阵。鉴于其他文献用矩阵计算时长,这里提出将二维矩阵变成 RGB 图像。因为每一张图像都是由矩阵得来,即图像中每一个像素点就是矩阵值对应的颜色,得到的连续小波系数矩阵按照 RGB 成像原理,其中值从 0~63 为蓝色,64~127 为紫色,128~191 为黄色,192~255 为黄色,即按照“红”“绿”“蓝”3 种颜色的强度对应。将系数矩阵所有值映射到 3 个颜色即得到 RGB 图像,转换过程如下:

1) CWT 对故障后半周期零序电流信号分析,分解尺度为 112(分解尺度主要是为了设置接下来图片的大小 112×112),小波基函数选取“db5”,得到连续小波变换的系数矩阵;

2) 连续小波系数矩阵按照 RGB 成像原理映射得到 RGB 图像。

2.3.2 图像转换实例

将图 3 中故障数据转换成 RGB 图像如图 5 所示,画圈的地方为单相接地故障暂态信息,线路 1 为故障线路。

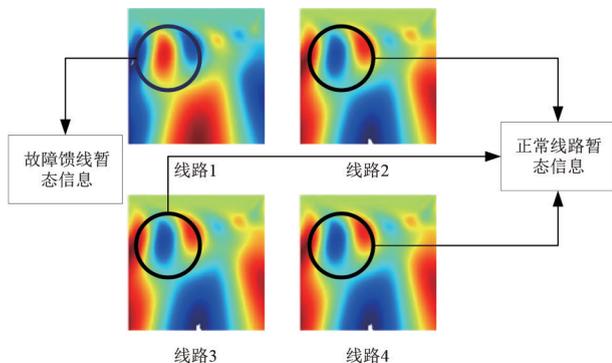


图5 配电网各出线 RGB

2.3.3 感知哈希算法应用于配电网故障选线

感知哈希算法(perceptual hashing, pHash)应用于图像处理^[11],可提取其中的主要信息,将提取信息转化为二值化序列作为图像的指纹,用该指纹唯一确定该图像,即每张图像的二值化序列不同。图像进行相似度辨识时,感知哈希算法提取原始图像主要信息,这里包括高频和低频信息,如图 6 所示。图像缩小很大程度上减少了矩阵运算,减少算法执行时间^[12],运用于配电网单相接地故障可快速完成故障选线。

pHash 算法用于故障选线的步骤:

1) 将通过 CWT 获取的各馈线 RGB 图像缩小为

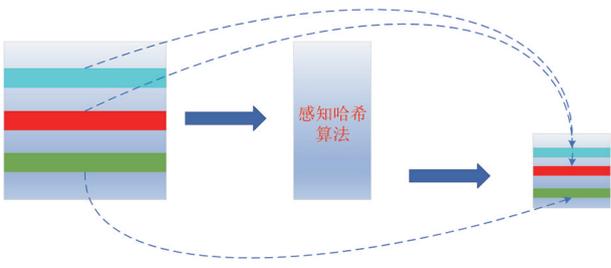


图 6 感知哈希算法图像映射

$m \times m$ 图像。

2) 将各馈线 RGB 图像转换成灰度图, 计算公式为

$$G_{\text{ray}} = R \times 0.299 + G \times 0.587 + B \times 0.114 \quad (13)$$

式中: G_{ray} 为二值化数值; R, G, B 分别为 RGB 图像 3 个通道值, 在 $[0, 255]$ 之间。

3) 灰度图二值化, 像素点取值为 0 或 1。

4) 得到的二值化小图像按顺序连接为等长度的比特序列值, 组成二值矩阵作为图像的哈希值。

5) 用哈希值计算两馈线图片汉明距离。

6) 以汉明距离计算故障线路之间差异, 判断故障线路图片差异度计算公式^[13]为

$$S = \frac{D}{M} \quad (14)$$

式中: S 为差异度; D 为汉明距离; M 为哈希值向量总长度。

上面步骤 3 是哈希算法的关键步骤, 可理解为对图像的特征提取。使用均值哈希计算图像的平均灰度, 计算公式如 (15) 所示。

$$\bar{G}_{\text{ray}} = \frac{\sum_{i,j=1}^m G_{\text{ray}}(i,j)}{N} \quad (15)$$

式中: \bar{G}_{ray} 为平均灰度值; i, j 为步骤 1 中 $m \times m$ 矩阵的行和列; $G_{\text{ray}}(i, j)$ 为 $m \times m$ 矩阵具体位置的灰度值; N 为矩阵中元素个数。

步骤 4 的二值化处理公式为

$$h(i, j) = \begin{cases} 0 & G_{\text{ray}}(i, j) < \bar{G}_{\text{ray}} \\ 1 & G_{\text{ray}}(i, j) \geq \bar{G}_{\text{ray}} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $h(i, j)$ 为 $m \times m$ 二值矩阵具体位置。

步骤 5 中利用“异或”计算汉明距离, 将两馈线图片的二值矩阵进行“异或”计算, 累加结果为“1”的个数确定汉明距离。图片的大小为 112×112 (12 544) 个像素点。图片中故障馈线与正常馈线之

间的汉明距离很大程度取决于哈希算法中对图片的缩放。这里对图片缩放成 20×20 (400 个像素点), 由于实验所取得仿真数据为故障后半周期, 而故障的暂态信息是很短的, 以至于故障数据量也少。通过实验分析, 汉明距离大于 40, 两张图片差异度大于 9% 则可定义为故障图片 (可确定故障馈线), 而正常馈线之间的汉明距离最大不会超过 10, 差异度不超过 5% (最大裕度)。表 1 为感知哈希算法计算的各馈线汉明距离和差异值, 可看出线路 1 图像与其他线路图像有较大的汉明距离且都大于 40, 差异度都大于 5%。其他各线路图像的汉明距离都小, 差异度也低。因此判断线路 1 为故障线路, 符合图 5 中的故障图像展示。

表 1 仿真馈线参数

	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4
线路 1	0, 0	57, 14.25%	56, 14%	56, 14%
线路 2	57, 14.25%	0, 0	3, 0.75%	3, 0.75%
线路 3	56, 14%	3, 0.75%	0, 0	1, 0.25%
线路 4	56, 14%	3, 0.75%	1, 0.25%	0, 0

3 算例分析

3.1 110 kV/10 kV 配电网模型

下面用 Matlab/Simulink 搭建 110 kV/10 kV 配电网谐振接地仿真模型, 如图 7 所示。模型共 4 条出线, 每条馈线包括电缆线、架空线、电缆/架空融合线。图中断路器 S 合上时系统为中性点经消弧线圈接地系统。由于消弧线圈大多数处于过补偿运行, 这里取补偿为 10%, 消弧线圈电感值为 1.550 4 H, 电阻值为 14.611 8 Ω 。共设置 12 个故障点, 模拟不同故障距离对选线影响。模型中变压器和馈线参数如表 2 和表 3 所示。

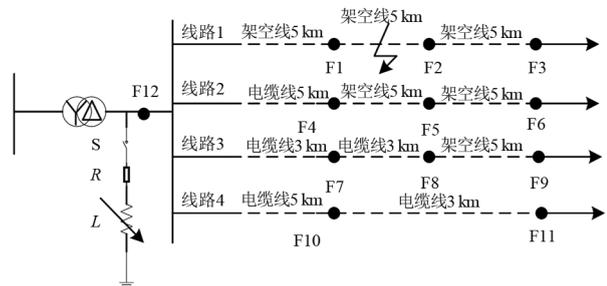


图 7 110 kV/10 kV 配电网单相接地仿真模型

表 2 变压器参数

容量/ MVA	变比/ kV	空载损耗 $\Delta P_0/\text{kW}$	短路损耗 $\Delta P_k/\text{kW}$	空载电 流百分 数 $I_0/\%$	短路电压 百分数 $U_k/\%$
31.5	110/10	25.6	125.8	0.2	10.5

表 3 仿真馈线参数

馈线类型	序分量	$R/$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	$L/$ ($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	$C/$ ($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
电缆线路	正序	0.27	0.255	0.339
	零序	2.70	1.019	0.280
架空线	正序	0.125 0	1.300 0	0.009 6
	零序	0.275 0	4.600 0	0.005 4

3.2 故障仿真

为了验证所提方法在中性点经消弧线圈接地系统中发生单相接地故障时选线的可行性,模拟了不同故障初始相角、馈线类型、故障发生距离、故障接地电阻。

3.2.1 谐振接地系统仿真结果

谐振接地系统的故障电流相较于中性点不接地

系统故障特征微弱。根据故障线路皮尔逊相关系数与非故障线路相关性差别以及故障线路图像与非故障线路差异度最大原则判断出故障线路,结果如表 4、表 5 所示。两种方法应用于谐振接地系统单相故障选线都能达到相应的可行性。基于图像的选线方法在速度上领先,因为:皮尔逊相关系数计算需大量向量计算各种工况下故障选线,平均时间为 1.316 s;基于图像的选线方法无需携带大量零序电流原始数据矩阵运算,只需要图像特征提取进行灰度二值化计算,且感知哈希算法应用于图像快速,各种工况下故障选线平均时间为 0.162 5 s。基于图像故障选线方法相较于基于数据计算皮尔逊相关系数选线方法在选线速度提高了 87.65%。

3.2.2 方法优越性比较

为验证所提算法的提高,仿真实验 F3 处(线路 1)发生单相接地故障,故障接地电阻为 200 Ω 、1000 Ω 、1500 Ω ,分别采用所提方法和文献[14]的

表 4 皮尔逊相关系数选线方法结果

故障馈线	故障初始相角/ $^\circ$	故障位置	故障接地电阻/ Ω	皮尔逊相关系数						选线结果	时间/s
				(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,3)	(2,4)	(3,4)		
线路 1	90	F2	5	-0.999 87	-0.999 88	-0.999 84	0.999 82	0.999 82	0.999 51	正确	1.43
线路 1	45	F3	200	-0.999 90	-0.999 91	-0.999 90	0.999 85	0.999 67	0.999 68	正确	1.52
线路 2	0	F4	400	-0.712 35	0.678 47	0.704 91	-0.990 60	-0.994 80	0.972 33	正确	1.46
线路 2	90	F5	600	-0.714 92	0.687 49	0.705 06	-0.993 14	-0.996 18	0.979 94	正确	1.45
线路 3	45	F7	200	0.822 57	-0.835 10	0.819 76	-0.988 39	0.968 39	-0.994 87	正确	1.47
线路 3	0	F8	400	0.632 01	-0.659 49	0.636 03	-0.985 45	0.961 06	-0.993 52	正确	1.48
线路 4	45	F10	1000	0.979 03	0.976 36	-0.979 00	0.998 67	-0.999 63	-0.999 67	正确	1.50
线路 4	90	F11	600	0.901 62	0.899 56	-0.906 10	0.997 66	-0.999 27	-0.999 41	正确	1.45
线路 0	0	F12	200	0.753 55	0.758 78	0.755 08	0.998 12	0.995 23	0.994 27	正确	1.41
线路 0	90	F12	600	0.823 69	0.827 86	0.824 27	0.998 73	0.996 62	0.995 83	正确	1.42

表 5 基于图像差异度选线方法结果

故障馈线	故障初始相角/ $^\circ$	故障位置	故障接地电阻/ Ω	图像差异度/%						选线结果	时间/s
				(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,3)	(2,4)	(3,4)		
线路 1	90	F2	5	14.25	14.00	14.00	0.75	0.75	0.25	正确	0.152
线路 1	45	F3	200	12.25	13.00	12.25	0.75	1.00	1.25	正确	0.154
线路 2	0	F4	400	9.75	2.25	1.75	10.00	10.00	0.50	正确	0.149
线路 2	90	F5	600	12.00	2.75	3.00	9.25	10.00	0.75	正确	0.150
线路 3	45	F7	200	1.00	12.25	0.25	14.25	1.25	15.50	正确	0.140
线路 3	0	F8	400	0.25	14.25	0.50	12.00	1.25	14.25	正确	0.132
线路 4	45	F10	1000	0.15	2.75	14.25	0.75	1.00	14.25	正确	0.123
线路 4	90	F11	500	0.25	0.25	12.50	0.75	10.00	15.50	正确	0.152
线路 0	0	F12	200	0.25	0.25	0.25	1.00	1.25	0.75	正确	0.132
线路 0	90	F12	600	1.00	1.00	1.75	1.00	1.25	1.25	正确	0.152

注:表 4、表 5 中(1,2)、(1,3)、(1,4)、(2,4)、(3,4)为两线路之间的皮尔逊相关系数和图像差异度;线路 0 代表母线。

基于高频分量相关度分析的故障选线方法进行选线。文献[14]的方法利用 EMD 分解,剔除了零序电流工频分量,基于高频分量来做各馈线的相关性分析,定义若馈线相关系数最大值与最小值差大于 0.3 则为故障馈线。但实验部分故障接地电阻只做到了 500 Ω ,忽略了大电阻接地时零序电流幅值小高频分量不稳定。使用该方法验证大电阻接地的适用性,结果如表 6 所示,故障接地电阻为 500 Ω 时两种方法都能正确选线。接地电阻为 1000 Ω 、1500 Ω 时,由于零序电流幅值变小,文献[14]的方法超过选线能力范围出现选线错误,误认为母线故障,而所提方法在大电阻的影响下仍然能正确选线。

表 6 仿真馈线参数

选线方法	故障接地电阻/ Ω	选线判据	选线结果
文献[14]的方法	500	-0.392, -0.084, -0.226, -0.381	线路 1
	1000	-0.355, -0.152, -0.223, -0.245	线路 0
	1500	-0.301, -0.231, -0.165, -0.224	线路 0
所提选线方法	500	12.2%, 12.3%, 11.3%, 2.1%, 1.5%, 2.4%	线路 1
	1000	11.5%, 12.6%, 10.6%, 2.5%, 1.7%, 2.3%	线路 1
	1500	10.3%, 11.2%, 10.7%, 3.2%, 2.4%, 3.1%	线路 1

注:表中所述图像选线方法选线判据和表 5 一致,描述的是两馈线之间的差异度,且顺序一样。

4 结 论

上面针对谐振接地系统发生单相接地故障时选线速度慢、正确率低等问题,提出基于皮尔逊相关系数选线和基于图像差异度选线方法。通过实验验证了两种方法用于谐振接地系统故障位置、故障初始相角、故障接地电阻等不同工况的可行性和高效性。基于皮尔逊相关系数选线方法平均选线时长为 1.316 s,而基于图像选线方法可达到 0.162 5 s,速度提高了 87.65%。对比了基于 EMD 分解零序电流高频分量馈线之间的相关性,接地电阻过大时该方法出现误判,而所提基于图像的选线方法仍然能够正确选线。实现了从一维数据到二维 RGB 图像的跨越,减少了大量计算储存,有效地结合计算机智能算法应用于电网故障诊断,提出的图像解决方法为下一步电网故障诊断的深度学习算法搭建了思路,为以后配电网单相接地故障选线技术向人工智能化发展提供了一定的理论指导和可行性作用。

参考文献

- [1] 王玲,邓志,马明,等.基于状态估计残差比较的配电网故障区段定位方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):132-139.
- [2] 周自强,张焰,郭强,等.基于概率潮流的 10 kV 配电网合环操作安全性评估[J].电网技术,2019,43(4):1421-1429.
- [3] 田晶京,耿芳,赵峰,等.谐振接地系统的配电路径接地故障选线新方法[J].重庆大学学报,2022,45(1):59-67.
- [4] 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.
- [5] 叶远波,蔡翔,谢民,等.配电网单相接地故障快速选线方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):96-103.
- [6] 庞清乐,孙同景,孙波,等.基于小波包分析的配电网故障选线新方法[J].电力自动化设备,2007(4):19-22.
- [7] KUMAR G P, JENAP. Pearson's correlation coefficient for islanding detection using Micro-PMU measurements[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(4):5078-5089.
- [8] 赵海龙,张丹丹,黄松,等.基于皮尔逊相关系数的海南省地闪密度与雷击故障关系分析[J].高压电器,2019,55(8):186-192.
- [9] 嵇文路,赵晓龙,张明,等.基于小波包全频带分析和 OS-ELM 的小电流单相接地故障选线[J].哈尔滨理工大学学报,2021,26(2):110-117.
- [10] 张伟刚,张保会,胡海松,等.应用小波包分析实现配电网单相接地故障选线[J].电力系统自动化,2009,33(23):60-64.
- [11] 刘帆,王颖,闫国玉,等.基于差分的图像感知哈希算法[J].计算机工程与设计,2021,42(3):782-789.
- [12] 沈麒,赵琰,周晓炜,等.结合结构与梯度的图像哈希算法[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(8):1525-1533.
- [13] 安坤.基于感知哈希算法的商标图像的检索[D].杭州:浙江理工大学,2014.
- [14] 刘谋海,方涛,姜运,等.基于高频分量相关度分析的故障选线方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(2):101-106.

作者简介:

岑俊(1999),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统配电网故障选线与定位;

覃苏玲(1997),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统负荷预测;

李琪林(1973),男,教授级高级工程师,从事营销电能计量和电力信息通讯技术服务与研究作。

(收稿日期:2022-10-26)