

DOI: 10.7667/PSPC170582

电网不对称条件下基于频数分布理论的谐振 接地系统故障相辨识

于群, 陈志慧

(山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 不对称电网发生单相接地故障后, 其故障相与非故障相电压数据分布的统计特征存在显著差异, 据此提出了基于频数分布理论的故障选相方法。首先取故障后各相电压首个 1/2 工频周期的数据, 采用扩展 Prony 算法提取各相电压的工频分量, 确定组距范围。再应用频数分布理论对各相电压的采样数据进行处理, 利用贝塞尔公式求取各相电压的频数分布值。最后, 通过比较三相电压间频数分布值的大小选出故障相。Matlab 仿真验证与适应性分析表明, 所提出的选相方法准确率高, 适应性强。

关键词: 不对称电网; 单相接地故障; 频数分布理论; 故障选相; 扩展 Prony 算法

Grounding phase determination in resonant grounding systems based on frequency distribution theory in case of unsymmetrical voltage

YU Qun, CHEN Zhihui

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: After single phase-to-ground fault occurs in asymmetrical power network, statistical characteristics of the voltage data distribution between the fault phase and the non-fault phase are significantly different. So a novel method for fault phase selection based on frequency distribution theory is proposed. Firstly, it selects per phase voltage data in the first 1/2 power frequency cycle after the fault occurred, and the extended prony algorithm is used to extract the power frequency components of each phase voltage to get the range of class interval. Then, these sampling data are split up into several groups by means of the frequency distribution theory, and frequency distribution values of per phase voltage are obtained by Bessel formula. Finally, the fault phase can be detected directly by comparing the magnitude of it. Matlab simulation results and adaptability analysis verify that the proposed method has high accuracy and strong adaptability.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EEM13).

Key words: asymmetrical power network; single phase-to-ground fault; frequency distribution theory; fault phase selection; extended Prony algorithm

0 引言

实际中, 电网不对称是普遍存在的, 而且单相接地故障发生后的故障状况复杂多变。因此, 故障相的准确判别比较困难。谐振接地配电网的选相判据通常是各相电压的幅值或相位进行故障选相, 在过补偿与欠补偿的工作方式下, 需要不同的判据来判定故障相^[1-3], 加大了选相难度。文献[4]证实了不对称电网发生高阻接地时, 仅凭幅值或相

位的传统选相判据选相比较困难。所以, 对于故障选相问题还有必要进一步进行研究。

为解决上述问题, 文中给出了一种直接综合利用故障发生后各相电压波形数据的频数分布选相方法。该方法不再单独提取各相电压的幅值或相位进行故障相的判定, 而是综合利用接地故障发生后的各相电压波形信息, 根据扩展 Prony 算法提取的工频分量值确定组距范围, 对各相电压的采样数据进行频数分布处理, 从而选出故障相。提出的选相方法适用于不对称谐振接地系统发生高阻接地的情况, 也适用于不同补偿度下的工作方式, 并通过仿

真验证了方法的有效性。

1 单相接地故障时各相电压分析

图1是不对称电网经过渡电阻接地简化图^[5-9]。

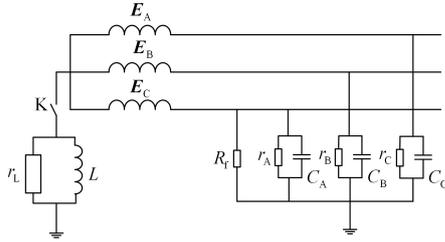


图1 配电网单相接地故障简化图

Fig. 1 Schematic of single phase-to-ground fault distribution network

图中： r_A 、 r_B 、 r_C 分别为电网的三相对地绝缘电阻； C_A 、 C_B 、 C_C 分别为三相对地电容； L 为消弧线圈的电感； r_L 为消弧线圈的等值损耗电阻； R_f 为故障点接地电阻值。

选取A相相电压 E_A 作为参考相位，三相对地导纳分别为 Y_A 、 Y_B 、 Y_C ，三相对地电压 U_A 、 U_B 、 U_C 分别为

$$U_A = E_A + U_{N0} \quad (1)$$

$$U_B = E_B + U_{N0} \quad (2)$$

$$U_C = E_C + U_{N0} \quad (3)$$

式中： E_A 、 E_B 、 E_C 为相电压； U_{N0} 为中性点对地电压。

根据基尔霍夫定律，可得

$$(E_A + U_{N0})Y_A + (E_B + U_{N0})Y_B + (E_C + U_{N0})Y_C = 0 \quad (4)$$

在电网正常运行情况下，可以认为三相对地的绝缘电阻相等，即 $r_A = r_B = r_C = r_0$ 。所以，中性点对地电压 U_{N0} 可表示为

$$U_{N0} = -\frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = -\frac{j\omega(C_A + a^2 C_B + a C_C) + 1/R_f}{j\omega(C_A + C_B + C_C) - j(1/\omega L) + 1/R_f + 1/R} E_A = \frac{K - jd_f}{v - j(d_f + d)} E_A \quad (5)$$

式中： $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ， $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 为单位相量；

$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_L} + \frac{3}{r_0}$ ； $K = \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_A + C_B + C_C}$ 为电网不对称

度； $d_f = \frac{1}{R_f \omega (C_A + C_B + C_C)}$ 表示由过渡电阻引起的

阻尼率； $d = \frac{1}{R\omega(C_A + C_B + C_C)}$ 表示电网的固有阻

尼率； $v = \frac{\omega(C_A + C_B + C_C) - (1/\omega L)}{\omega(C_A + C_B + C_C)}$ 为失谐度； ω 为

电网角频率。

所以，将式(5)代入式(1)、式(2)、式(3)，分别表示出三相对地电压为

$$U_A = \frac{v - j(2d_f + d) + K}{v - j(d_f + d)} E_A \quad (6)$$

$$U_B = \frac{a^2 v - j(a^2 d - ad_f) + K}{v - j(d_f + d)} E_A \quad (7)$$

$$U_C = \frac{av - j(ad - a^2 d_f) + K}{v - j(d_f + d)} E_A \quad (8)$$

上述分析表明，三相对地电压主要由电网不对称度及过渡电阻对应的阻尼率决定。电网的实际运行中，单相接地故障发生后各相电压是各种故障因素及电网本身的特性共同作用的结果，其中就包括电网不对称及过渡电阻，也说明各相电压的原始故障波形能全面地反映出故障发生状况。文献[4]的分析表明，仅依靠幅值或者相位判定故障相会出现误判的情况。鉴于此，本文不再单独地提取故障后各相电压的幅值或相位来判断故障相，而是直接综合利用各相电压的波形信息进行选相，这是应用频数分布理论进行故障选相的基础。

2 频数分布选相理论

2.1 基本概念

频数分布是用于统计数据的分布特性，对采样数据按照一定的组距进行分组，然后按组归类整理，形成总体数据在各分组之间的分布特征的一种统计方法。频数分布一般用直方图进行直观表示，但为了更清晰地表现频数分布直方图的趋势特征，将直方图中各个表示频数的长方形的中点依次连接起来，形成频数分布折线图。

频数分布折线图虽然可以直观地表示数据的整体分布趋势，但是需要一个量来衡量数据分布的趋势特征。在数据统计时，采用频数分布值(样本标准差)来表征此趋势特征。频数分布值通过贝塞尔公式计算得到^[10]，符号为 S ，计算公式如式(9)。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (9)$$

式中： n 为样本量； X_i 为第 i 个样本分量； \bar{X} 为样

本均值, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 。

2.2 频数分布选相判据

根据文献[11]的数据, 搭建三条缆线混合的谐振接地系统, 为了实现电网的不对称, 在各线路其中的一相串入单相线路等效模块。单相接地故障发生后, 各相电压的变化具有一定的规律。各相电压是由一个个的数据点组成, 故障相与非故障相电压表现出的规律也能通过数据体现出来。所以, 引入频数分布理论统计各相电压的数据, 找出各相电压数据分布的统计特征差异, 实现故障选相。

首先, 对各相电压的波形进行直方图分解, 如图 2 所示。图 2 是电阻为 2 kΩ 时的电压波形。在组距 M 下, 图中平行于横坐标轴的直线(红色)将故障相电压的波形分割成不同的区间, 统计各个区间上的电压数据个数, 得到电压波形的频数分布直方图, 非故障相电压也进行相同的直方图分解。最后, 得到各相电压的频数分布直方图。

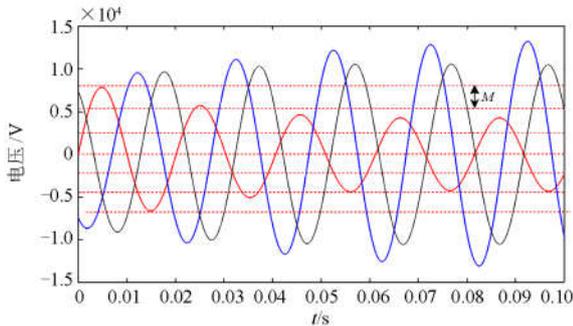


图 2 各相电压波形分解图

Fig. 2 Decomposition graph of per phase voltage waveform

对各相电压的波形进行采样, 采样频率设为 10 kHz, 选取 1/2 工频周期的电压波形数据。在对采样的数据进行频数分布之前, 先确定组距。根据各相电压的工频幅值确定组距, 组距必须小于三相电压工频幅值的最小值。对于工频分量的选取, 采用扩展 Prony 算法提取各相电压的工频分量, 详细步骤如第 2.3 节所示。所以, 组距范围为 $0 < M < 4\ 234\ \text{V}$, M 取 100 V。对采样的 100 点数据进行频数分布处理, N 表示各个组距内电压波形数据的个数, 各相电压的频数分布直方图如图 3 所示。

由图 3 可得, 通过频数分布直方图不能直接看出故障相与非故障相的频数分布差异。因此, 为更清晰地表现频数分布直方图的趋势特征, 将直方图中各个表示频数的长方形的中点依次连接起来, 如图 4 所示。

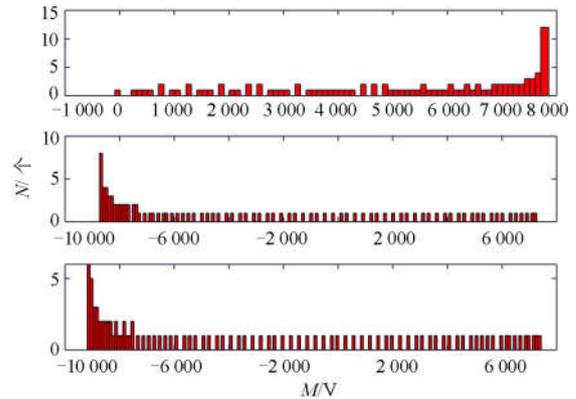


图 3 各相电压的频数分布直方图

Fig. 3 Frequency distribution histogram of per phase voltage

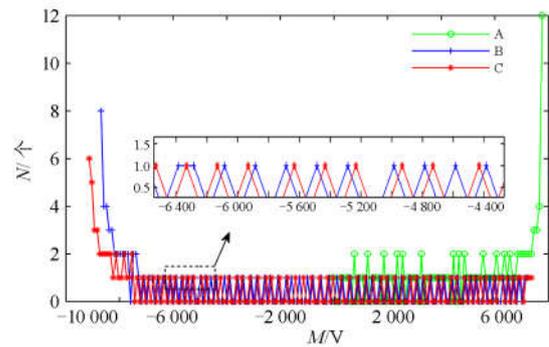
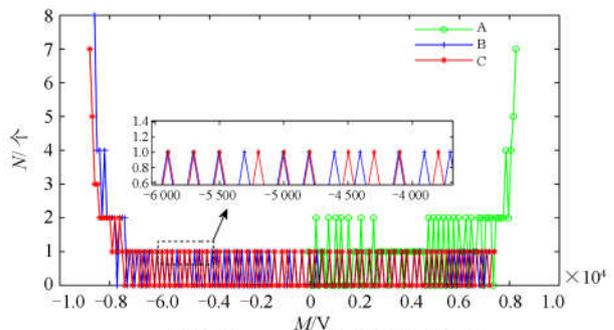


图 4 各相电压的频数分布折线图

Fig. 4 Frequency distribution line chart of per phase voltage

由图 4 可得, 非故障相 B、C 的频数分布趋势明显比故障相 A 平缓, 表明 B、C 相数据分布的离散程度比故障相 A 低, 为更确切地表征各相电压整体数据分布的差异性, 利用贝塞尔公式计算出频数分布值: $S_A=1.465$, $S_B=0.957$, $S_C=0.845$ 。可得故障相 A 的频数分布值最大, 符合图 4 中各相电压的频数分布趋势。另选接地电阻值 5 kΩ、10 kΩ 进行分析, 组距为 100 V, 可得频数分布折线图, 如图 5 所示。



(a) 接地电阻 5 kΩ 时的频数分布折线图

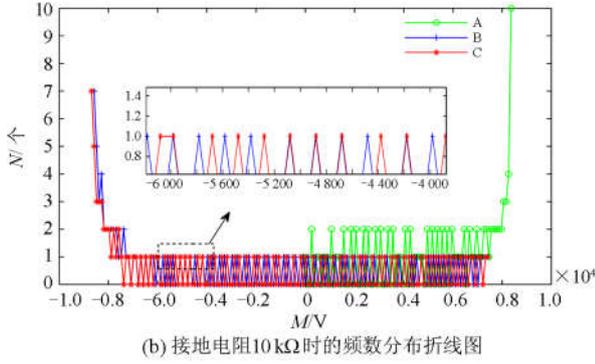


图 5 不同接地电阻下的各相电压频数分布折线图

Fig. 5 Frequency distribution line chart of per phase voltage under different fault resistances

由图 5 可知, B、C 相的频数分布趋势明显比 A 相平缓, 且分布均匀。通过贝塞尔公式计算出接地电阻为 5 kΩ、10 kΩ 时的频数分布值: 1.197, 0.958, 0.884; 1.356, 0.911, 0.893。A 相的频数分布值最大, 与频数分布折线图中各相电压的趋势特征一致。这不是巧合, 是由故障相与非故障相电压本身的变化特性决定。接地故障发生后非故障相对地电压的变化具有相似性, 而故障相因过渡电阻等故障因素的共同作用, 其对地电压发生骤然变化, 导致数据分布的离散程度明显高于非故障相。因此, 可根据最大频数分布值选出故障相, 上述故障选相原理表示为

$$S_m > (S_{n1}, S_{n2}) \quad (10)$$

式中: S_m 为故障相的频数分布值; (S_{n1}, S_{n2}) 为非故障相的频数分布值。

因此, 利用判据公式(10)进行不对称谐振接地系统单相接地故障选相, 后续的仿真可以进一步验证上述结论。

2.3 扩展 Prony 算法确定组距

实际的故障信号除含有基波分量, 还包括衰减的非周期分量和各种谐波分量, 因此传统的信号分析方法无法准确提取工频分量。扩展 Prony 算法是用一系列具有任意幅值、相位、频率和衰减因子的指数函数的线性组合来拟合等间隔的采样数据, 适用于分析具有衰减过渡特征的故障信号^[12-15]。假定用 $\hat{x}(n)$ 拟合样本数据 $x(n)$, 其离散时间的函数形式为

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

更一般地, 假定 b_i 、 z_i 是复数, 则有

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p A_i e^{j\theta_i} e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)n\Delta t} \quad (12)$$

式中: A_i 为振幅; θ_i 为相位; $\alpha_i < 0$, 为衰减因子; f_i 为频率; p 为模型阶数; Δt 为采样间隔。

该方法的详细步骤如下。

1) 定义样本函数

$$r(i, j) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-j)x^*(n-i) \quad (13)$$

利用式(13)构造矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \cdots & r(1,p_e) \\ r(2,0) & r(2,1) & \cdots & r(2,p_e) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(p_e,0) & r(p_e,1) & \cdots & r(p_e,p_e) \end{pmatrix} \quad (p_e \gg p)$$

2) 用 SVD-TLS 方法确定 \mathbf{R} 的有效秩 p 以及自回归(AR)参数 $\alpha_1, \dots, \alpha_p$ 的值。

3) 求多项式的根 $z_i (i=1, \dots, p)$

$$1 + \alpha_1 z^{-1} + \cdots + \alpha_p z^{-p} = 0 \quad (14)$$

4) 由式(15)计算出 $\hat{x}(n)$, 其中 $n=1, 2, \dots, N-1$ 。

$$\hat{x}(n) = - \sum_{m=1}^p \alpha_m \hat{x}(n-m) \quad (15)$$

5) 利用 $b = (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H \hat{x}(n)$, 计算参数 b 。

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}(1) \\ \hat{x}(2) \\ \vdots \\ \hat{x}(p) \end{pmatrix} \quad (16)$$

6) 利用式(17)计算幅值、相位、频率和衰减因子。

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan[\text{Im}(b_i)/\text{Re}(b_i)] \\ f_i = \arctan[\text{Im}(b_i)/\text{Re}(b_i)]/2\pi\Delta t \\ \alpha_i = \ln|z_i|\Delta t \end{cases} \quad (17)$$

谐振接地系统发生单相接地故障后, 按照上述步骤拟合各相电压的采样数据, 然后提取各相电压的工频分量, 比较各相电压的工频分量值, 选出工频分量的最小值, 从而确定组距范围。最后, 在组距范围内选取组距值, 对采样的数据进行频数分布处理, 实现故障选相。

2.4 频数分布选相算法

应用频数分布理论, 遵循如下流程, 实现谐振接地配电网的单相接地故障选相, 图 6 为基于频数分布理论的单相接地故障选相算法流程。实时采集配电网的运行信息, 接地故障发生后, 启动选相装置, 记录故障后首个 1/2 工频周期各相电压的波形

数据。然后,利用 Prony 算法拟合各相电压的采样数据,整定模型阶数,直到满足拟合精度的要求,从而提取出各相电压的工频分量。比较各相间的工频分量值,选出最小值,确定组距范围。在组距范围内,选定组距值,然后将采样得到的各相电压数据进行频数分布处理,得到频数分布的组数以及各组对应的频数。由于组数及各组对应的频数已经求出,根据贝塞尔公式计算出各相电压的频数分布值 S_m 、 S_{n1} 、 S_{n2} 。最后,根据判据公式(10)选出频数分布值的最大值,此频数分布值对应的相即为故障相。

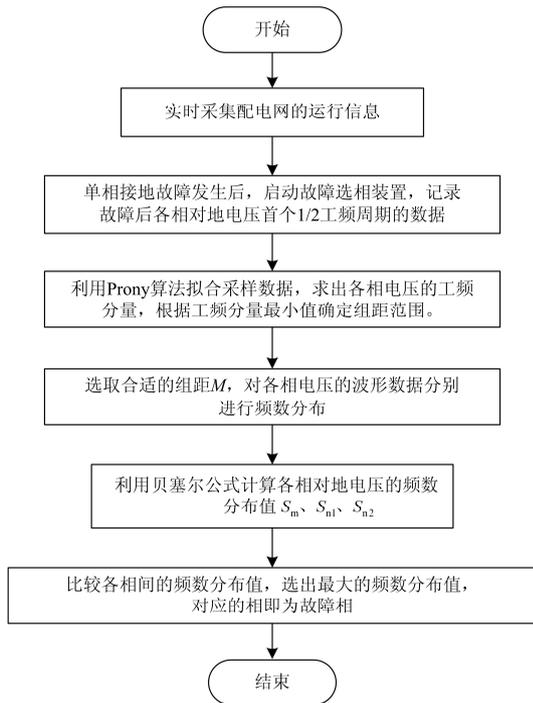


图 6 故障选相算法的流程图

Fig. 6 Flow chart of fault phase detection method

3 仿真分析

利用 Matlab 建立不对称谐振接地系统单相接地故障仿真模型^[16-20],该配电网的母线电压为 10.5 kV,引出 5 条线缆混合线路,如图 7 所示。

图中 D_L 为线缆线路长度, J_L 为架空线路长度。架空线路参数如下:正序电阻为 $0.17 \Omega/\text{km}$,零序电阻为 $0.23 \Omega/\text{km}$;正序电感为 $1.21 \text{ mH}/\text{km}$,零序电感为 $5.478 \text{ mH}/\text{km}$;正序电容为 $0.0097 \mu\text{F}/\text{km}$,零序电容为 $0.008 \mu\text{F}/\text{km}$ 。线缆线路参数如下:正序电阻为 $0.27 \Omega/\text{km}$,零序电阻为 $2.7 \Omega/\text{km}$;正序电感为 $0.255 \text{ mH}/\text{km}$,零序电感为 $1.019 \text{ mH}/\text{km}$;正序电容为 $0.339 \mu\text{F}/\text{km}$,零序电容为 $0.28 \mu\text{F}/\text{km}$ 。采样频率设为 10 kHz ,消弧线圈的过补偿度为 5% ,仿真时间为 0.2 s 。

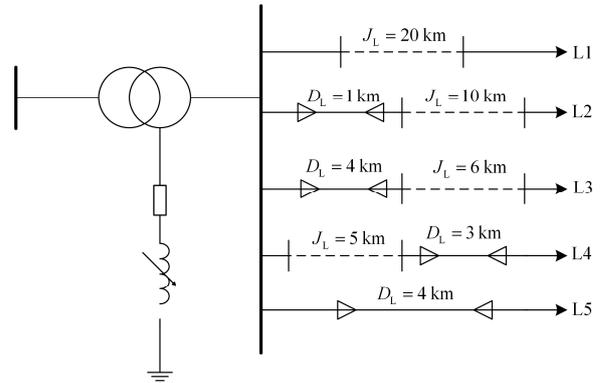


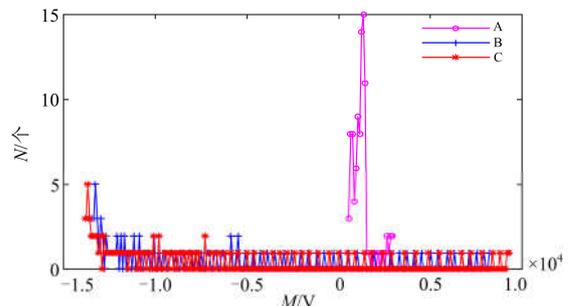
图 7 谐振接地系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of resonant grounding system

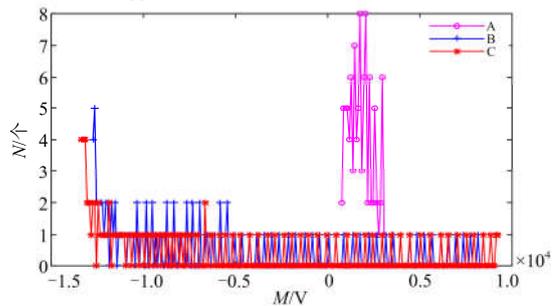
为验证电网不对称度对频数分布选相的影响,分别在线路 L1 出线的 A 相,线路 L2 出线的 B 相和线路 L5 出线的 C 相串入单相 PI 型线路等效模块,模拟线路分布参数的不平衡,长度分别为 0.6 km 、 1 km 、 2 km ,进行如下算例仿真。

3.1 算例 1(低接地电阻值)

设线路 L1 的 A 相发生接地故障,故障点距离母线 5 km ,故障初相角为 5° 。限于篇幅,选取两组低接地电阻值 45Ω 、 80Ω 进行仿真分析。在不同接地电阻下,利用扩展 Prony 算法提取各相电压的工频分量,通过比较各相间的工频分量值,确定出接地电阻值 45Ω 、 80Ω 的最小工频分量值为 850 V 、 1228 V ,从而将组距值选定为 100 V ,频数分布折线图如图 8。



(a) 接地电阻 45Ω 时的频数分布折线图



(b) 接地电阻 80Ω 时的频数分布折线图

图 8 低故障电阻下的频数分布折线图

Fig. 8 Frequency distribution line chart with low fault resistance

由图 8 可得, A 相的频数分布趋势起伏比较大, 而 B、C 两相的频数分布趋势比较平缓, 凭靠这点很容易选出故障相, 这与前文提出的选相原理完全一致。为更确切地表征故障相与非故障相的频数分布区别, 求出相应的频数分布值。故障电阻为 $45\ \Omega$ 时的频数分布值: 4.546, 0.738, 0.680; 故障电阻为 $80\ \Omega$ 时的频数分布值: 2.140, 0.756, 0.685。由此可得, 在两组不同的故障条件下, 通过比较频数分布值均能准确选出故障相。

3.2 算例 2(高接地电阻值)

设线路 L1 的 A 相发生接地故障, 选取两组高阻接地的故障条件进行仿真。第一组, 故障点位置距离母线 5 km, 故障初相角为 5° , 接地电阻值为 $2\ \text{k}\Omega$; 第二组, 故障点位置距离母线 5 km, 故障初相角为 15° , 接地电阻值为 $5\ \text{k}\Omega$ 。通过扩展 Prony 算法拟合接地电阻值为 $2\ \text{k}\Omega$ 、 $5\ \text{k}\Omega$ 时的各相电压波形, 比较得出对应的最小工频分量为 $3\ 708\ \text{V}$ 、 $3\ 920\ \text{V}$ 。所以, 组距值分别选为 $300\ \text{V}$ 、 $800\ \text{V}$, 频数分布折线图如图 9。

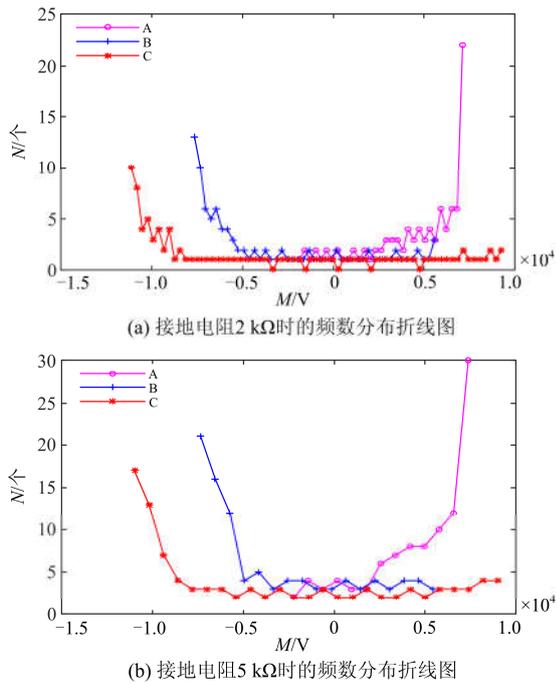


图 9 高故障电阻下的频数分布折线图

Fig. 9 Frequency distribution line chart with high fault resistance

在该故障条件下, 故障初相角很小, 故障点接地电阻值很大, 此种故障工况十分恶劣。但是, 由频数分布折线图可以看出, 相比于非故障相, 故障相的频数分布趋势起伏比较大, 依据此特征很容易判定故障相。通过贝塞尔公式计算出各组的频数分布值, 第一组: 3.792, 2.430, 1.595; 第二组: 7.364,

5.266, 3.495。结果表明, 根据最大频数分布值能确定出故障相。

4 选相方法适应性分析

上述仿真算例表明, 所提出的选相方法是可行的, 为了进一步验证选相方法的适应性, 对不同故障工况, 即故障点位置 X_f 、故障点接地电阻值 R_f 和故障初相角 θ , 进行选相方法的适应性分析, 还要考虑噪声、采样频率、数据窗长度、补偿度和组距对故障选相的影响。

在不同故障条件下, 利用扩展 Prony 算法进行拟合提取, 求出各相电压的最小工频值, 通过比较不同故障工况下的最小工频分量, 将组距统一选定为 $100\ \text{V}$ 。

4.1 不同故障工况对选相的影响

分别设定线路 L1 的 A 相、B 相、C 相发生接地故障, 对不同故障点位置、故障点接地电阻和故障初相角进行大量仿真。限于篇幅, 只列出部分故障工况下各相电压的频数分布值, 结果见表 1。由表 1 可得, 在接地电阻值为 $5\ \text{k}\Omega$ 、 $30\ \text{k}\Omega$ 的恶劣故障工况下, 能准确判定出故障相, 在其他故障工况下也能依据最大频数分布值选出故障相。说明此选相方法适用于高阻接地的情况, 同样也适用于低接地电阻值的情况。

表 1 不同故障工况下的故障选相结果

Table 1 Fault phase selection results in different fault conditions

故障相	$\theta/^\circ$	R_f/Ω	X_f/km	A	B	C	结果
A	5	50	1	7.09	0.71	0.67	A
	15	1 000	3	1.28	0.98	0.81	A
	45	2 500	5	1.02	0.74	0.84	A
	60	3 500	7	0.86	0.82	0.81	A
B	5	500	5	0.91	1.13	0.65	B
	45	1 500	9	0.88	1.00	0.96	B
	100	2 500	12	0.85	1.18	0.86	B
	120	5 000	16	0.95	1.39	0.79	B
C	10	2 000	2	3.49	3.48	4.18	C
	30	5 000	4	1.69	1.34	1.78	C
	60	8 000	6	1.41	1.42	1.85	C
	80	10 000	8	0.91	1.65	1.92	C
	100	30 000	10	1.65	1.79	2.02	C

4.2 噪声的影响

线路 L2 的 A 相在不同故障状态下, 加入 $20\ \text{dB}$ 的高斯白噪声, 直接对各相电压的采样数据进行频数分布处理, 计算结果见表 2。结果表明, 此选相方法在有噪声干扰的情况下, 根据原始故障数据的

最大频数分布值能准确选出故障相, 表明选相方法有较强的抗干扰能力。

表 2 加入高斯白噪声后的故障选相结果

Table 2 Fault phase selection results with Gaussian white noise

X_f/km	R_f/Ω	$\theta/(\circ)$	A	B	C	结果
2	20	0	1.45	0.67	0.69	A
5	50	45	1.16	0.55	0.72	A
7	350	90	0.87	0.65	0.63	A
9	800	120	0.93	0.89	0.66	A
12	3 500	180	1.01	0.85	0.70	A

4.3 数据窗长度的影响

线路 L5 的 A 相距母线 5 km 处在故障合闸角为 25° 时, 发生接地电阻为 850 Ω 的单相接地故障。选取不同的数据窗长度进行仿真, 其中 T 为 1 个工频周期, 结果见表 3。表 3 的结果表明, 随着数据窗长度的增加, 根据最大频数分布值能准确判定出故障相。为了保证选相的快速性, 并且考虑数据窗长度增加时带来的数据存储问题, 本文选取长度为 1/2 工频周期的数据窗。

表 3 不同数据窗下的故障选相结果

Table 3 Fault phase selection results of different data windows

数据窗	A	B	C	结果
$T/2$	1.38	0.91	0.78	A
T	1.65	1.11	0.91	A
$2T$	2.58	1.39	1.63	A
$3T$	4.07	1.67	2.06	A
$4T$	5.73	1.82	2.57	A
$5T$	7.38	2.13	3.03	A

4.4 采样频率的影响

不同采样频率产生不同的数据序列, 因此, 需要验证采样频率对选相结果有无影响。线路 L1 的 A 相在距母线 5 km 处发生接地电阻为 500 Ω 的单相接地故障, 故障合闸角为 25°, 选取不同的采样频率进行仿真, 结果见表 4。结果表明, 所提出的选相方法不受采样频率的影响, 说明了此选相方法对采样频率的要求比较低。

表 4 不同采样频率下的故障选相结果

Table 4 Fault phase selection results under different sampling rates

采样频率/MHz	A	B	C	结果
0.005	1.18	0.67	0.64	A
0.01	1.25	0.82	0.80	A
0.1	9.18	3.30	0.68	A

4.5 补偿度的影响

传统的故障选相在过补偿与欠补偿下有着不同

的判据, 为验证本文提出的选相方法是否具有普遍适用性, 在不同的补偿度下进行仿真。线路 L2 的 A 相距母线 5 km 处在故障合闸角为 45° 时, 发生接地电阻为 500 Ω 的单相接地故障, 选取不同的补偿度进行仿真, 结果见表 5。结果表明, 不同的补偿度下能准确选出故障相, 说明了所提出的选相方法适用于不同的补偿度。

表 5 不同补偿度下的故障选相结果

Table 5 Fault phase selection results under different compensation

补偿度	A	B	C	结果
过补偿 10%	1.00	0.89	0.73	A
过补偿 5%	0.91	0.82	0.79	A
全补偿	3.49	0.65	0.91	A
欠补偿 6%	0.92	0.82	0.65	A
欠补偿 8%	1.36	0.69	0.77	A

4.6 组距的影响

设线路 L5 距母线 5 km 处在故障合闸角为 15° 时, 发生接地电阻为 450 Ω 的单相接地故障, 在组距范围内, 选取不同的组距值进行仿真分析, 结果见表 6。结果表明, 在不同组距下, 均能准确选出故障相, 说明了组距值对选相没有影响。

表 6 不同组距下的故障选相结果

Table 6 Fault phase selection results under different class intervals

M/V	A	B	C	结果
10	0.38	0.23	0.22	A
50	0.88	0.54	0.51	A
100	1.33	0.87	0.73	A
130	1.65	1.00	0.89	A
350	4.89	2.16	1.74	A

4.7 方法对比

上述仿真和适应性分析验证了本文选相方法的可靠性, 但目前的选相方法较多, 电压幅值法是常用方法之一。因此, 为进一步地验证选相方法的优劣, 选取电压幅值法进行对比分析。当发生金属性接地故障时, 故障相电压为零, 其他两相电压升高为线电压, 显然“三相电压中的最小相为接地相”。但实际中的接地故障多为经过渡电阻接地, 并且存在噪声干扰, 此时情况变得比较复杂, 电压幅值法可能不再可靠。

基于此, 线路 L2 距离母线 3 km 发生单相接地故障, 故障相为 A, 选取不同的故障初相角、过渡电阻进行仿真分析, 进一步说明所提选相方法的可靠性。限于篇幅, 仅将部分选相对比结果列于表 7。

表7 选相方法的对比结果

Table 7 Comparison results of phase selection methods

$\theta/(^\circ)$	R_f/Ω	选相方法	A	B	C	结果
0	50	电压幅值法	2 273 V	7 313 V	9 815 V	A
		频数分布法	23.12	2.23	2.19	A
	1 500	电压幅值法	7 167 V	5 416 V	9 815 V	B
		频数分布法	5.43	3.61	2.35	A
	2 000	电压幅值法	7 386 V	5 273 V	9 815 V	B
		频数分布法	4.42	3.74	2.36	A
45	50	电压幅值法	7 082 V	14 075 V	3 656 V	C
		频数分布法	14.61	1.23	2.36	A
	1 500	电压幅值法	7 569 V	8 892 V	5 852 V	C
		频数分布法	3.85	2.43	2.51	A
	2 000	电压幅值法	7 692 V	8 509 V	3 656 V	C
		频数分布法	4.42	3.74	2.36	A
90	50	电压幅值法	7 895 V	14 185 V	11 575 V	A
		频数分布法	15.35	2.21	1.52	A
	2 000	电压幅值法	7 898 V	8 061 V	5 743 V	C
		频数分布法	5.94	4.17	2.58	A

从表7可以看出,当过渡电阻较小时,利用电压幅值法均能准确判定故障相,但对于1.5 k Ω 、2 k Ω 的高过渡电阻而言,电压幅值的最小相不再是故障相,此时依靠电压幅值法不能有效判定故障相,说明电压幅值法的适用范围有限。而利用频数分布选相方法,对于低过渡电阻、高过渡电阻的情况都能给出准确可靠的判定结果,表明此选相方法不受过渡电阻值的影响,适用范围更广。

5 结论

本文利用单相接地故障发生后各相电压本身的变化导致数据分布的不同,给出了基于频数分布理论的不对称谐振接地配电网单相接地故障选相方法。该方法综合利用故障发生后各相电压的波形数据,只需定位故障发生的时刻以及1/2工频周期的数据即可判定出故障相,适用于低阻接地与高阻接地的故障状况,适用于过补偿与欠补偿的工作方式。文中在多种故障工况下通过仿真验证了方法的可行性,为电网发生单相接地时快速可靠地进行故障选相提供了新的方法。下一步研究重点将是开发基于此选相算法的硬件装置,对算法进行工业现场验证。

参考文献

[1] 刘宝稳,马宏忠. 零序电压产生机理及过渡电阻测量和选相方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1444-1449.
LIU Baowen, MA Hongzhong. Transition resistance measurement and fault phase selection under single-phase

ground fault based on producing mechanism of zero-sequence voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1444-1449.

[2] 李如琦,黄欢,张振兴,等. 小电流系统单相不完全接地故障分析[J]. 广西大学学报, 2007, 32(4): 367-370.
LI Ruqi, HUANG Huan, ZHANG Zhenxing, et al. Analyzing of single-phase and indirectly grounding fault in small current system[J]. Journal of Guangxi University, 2007, 32(4): 367-370.

[3] 陈亚,李梦诗. 基于瞬时能量比的输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 56-64.
CHEN Ya, LI Mengshi. A faulted phase selection scheme for transmission lines based on instantaneous energy ratio[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 56-64.

[4] 徐波,张建文,蔡旭,等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.
XU Bo, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.

[5] 余水忠. 小电流接地系统经过渡电阻接地的分析[J]. 继电器, 2001, 29(4): 21-23.
YU Shuizhong. Analysis of neutral grounded via a transition resistor[J]. Relay, 2001, 29(4): 21-23.

[6] 汤放奇,李景禄,曾祥君,等. 补偿电网中性点位移电压异常的原因及对策[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 12-13.
TANG Fangqi, LI Jinglu, ZENG Xiangjun, et al. Analysis of abnormal displacement voltage of neutral points in compensated electric network and its control measure[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 12-13.

[7] 薛永端,李娟,徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.

[8] 刘琦,邵能灵,范春菊,等. 基于单端电气量的不对称参数同塔四回线选相方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 178-186.
LIU Qi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault phase selection scheme for quadruple-circuit transmission lines with asymmetrical parameter based on single-ended

- electrical quantities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 178-186.
- [9] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [10] 王调霞. 科技论文中统计学术语“标准差”及其符号的规范化[J]. 编辑学报, 2010, 22(增刊 1): 56-59.
WANG Tiaoxia. Normalization of a statistics term—“standard deviation” and its symbol in sci-tech papers[J]. Acta Editologica, 2010, 22(S1): 56-59.
- [11] 郭谋发, 刘世丹, 杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 30(19): 183-190.
GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A new approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 30(19): 183-190.
- [12] 王松岭, 刘锦廉, 许小刚. 基于小波包变换和奇异值分解的风机故障诊断研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 101-106.
WANG Songling, LIU Jinlian, XU Xiaogang. Wavelet packet transform and singular value decomposition based fault diagnosis of fans[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 101-106.
- [13] 杨明玉, 杨玉坤. 基于后向预测Prony算法的超高压输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 94-99.
YANG Mingyu, YANG Yukun. EHV transmission line faulty phase selection scheme based on backward Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 94-99.
- [14] 任子晖, 刘昊岳, 徐进霞. 基于小波变换和改进 Prony方法的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 122-128.
REN Zihui, LIU Haoyue, XU Jinxia. Power quality disturbance analysis based on wavelet transform and improved Prony method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 122-128.
- [15] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025x.
- [17] 李晓波, 刘宝稳, 王崇林. 谐振接地系统零序电压轨迹及精确控制方法[J]. 电网技术, 2013, 31(9): 2669-2674.
LI Xiaobo, LIU Baowen, WANG Chonglin. Zero-sequence voltage locus of resonant grounded system and its accurate control[J]. Power System Technology, 2013, 31(9): 2669-2674.
- [18] 汤涛, 黄纯, 江亚群, 等. 基于馈线零序阻抗特性的谐振接地故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 192-201.
TANG Tao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A method of fault line selection in resonant earthed system based on zero sequence impedance characteristic of lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 192-201.
- [19] 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.
LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.
- [20] 于群, 曹娜. Matlab/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

收稿日期: 2017-04-21; 修回日期: 2017-07-10

于群(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统安全分析、电力系统继电保护; E-mail: yuqun_70@163.com

陈志慧(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: chenzhihuina@163.com

(编辑 魏小丽)