

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181495

一种谐振接地系统的配电线路接地故障选线新方法

龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 曾晶

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为解决小电流接地系统中发生故障时选线准确率低的问题, 提出一种谐振接地系统单相接地故障选线新方法。通过分析不同线路的零序电流与零序阻抗特征, 发现健全线路的零序阻抗始终呈容性, 零序电流为纯容性电流; 而故障线路零序电流在低频段含有消弧线圈的感性分量, 且幅值大于高频段。先使用低通滤波器提取母线零序电压和各馈线零序电流在低频段的信号分量, 并对母线零序电压求导; 然后比较任意两条线路的零序电流与纯容性电流交叉相乘后乘积的差值, 差值最大的为故障线路。分别对不同工况下的单相接地故障进行了仿真验证, 结果表明, 该方法选线准确, 适应性强。

关键词: 谐振接地系统; 故障选线; 馈线; 单相接地故障; 配电网

Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems

LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, ZENG Jing

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To solve the problem of low accuracy of line selection when grounding fault occurs in a small current grounding system, a new method for single-phase grounding fault line selection in resonant grounding system is proposed. By analyzing the characteristics of zero-sequence current and zero-sequence impedance of different lines, it is found that the zero-sequence impedance of the healthy line is always capacitive, and the zero-sequence current is the pure capacitive current. But the zero-sequence current of the faulty line contains the inductive component of the arc-suppression coil in the low frequency band, and the amplitude is greater than that in the high frequency band. Firstly, the low-pass filter is used to extract the signal component of the bus zero-sequence voltage and the zero-sequence current of each feeder in the low frequency band, and the bus zero-sequence voltage is derived. Then it compares the difference between the product of the zero-sequence current and the pure capacitive current of any two lines. The one which has largest difference is the fault line. Simulations of single-phase ground fault under different working conditions have been done. The results show that the method is accurate and adaptive.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677060).

Key words: resonant grounding system; faulty line selection; feeder; single-phase grounding fault; distribution network

0 引言

我国中压配电网多采用小电流接地系统, 主要有中性点不接地、中性点经消弧线圈接地两种接地方式。其中谐振接地系统发生单相接地故障后, 消弧线圈的补偿作用使得故障电流微弱、零序电流方向不定。此外, 受线路的结构参数、互感器饱和现象、电弧不稳定性等因素的影响, 信号的检测和选线很困难。

近年来, 国内外学者在配电网小电流故障选线

方面做了大量的研究, 提出了能量法^[1-5]、零序导纳法^[6]、行波法^[7]、S注入法^[8]、相关性分析法^[9-12]等选线方法。文献[2]利用故障后健全线路与故障线路暂态能量相反的特征进行选线, 文献[3]利用故障线路与健全线路暂态能量的差值大小来选线。由于消弧线圈的补偿作用, 故障线路零序电流在某一时刻可能出现倒向, 使得文献[2-3]基于暂态能量方向的选线方法发生误判。文献[4]利用暂态小波能量进行故障选线, 受故障状态、系统结构的影响很大。文献[6]通过基波零序电压与零序电流计算出馈线零序导纳, 利用健全线路与故障线路间零序导纳的大小和方向差异完成选线, 而故障线路零序导纳的值

与电源接地方式直接相关，且接地点过渡电阻也会影响零序电压和零序电流的大小，使得零序导纳法的灵敏度不高。文献[7]利用行波对配电网故障线路进行定位，该方法依赖于故障中产生的高频暂态信号与阻抗反射波，在中压配电网中应用效果不理想。文献[8]利用 S 注入信号实现选线，但需加装注入设备，投资大，定位时间长。

文献[9-12]通过线路之间和故障点上下游的零序电流幅值和极性的相似性来进行选线和定位。其中文献[9]通过比较线路之间零序电流相关系数的大小来确定故障线路。而相关系数的大小受到零序电流幅值及相位的影响。在实际缆线混合系统中线路参数的差异较大，且故障线路由于受消弧线圈影响，零序电流在某一时刻将会发生倒相，使得健全线路与故障线路间幅值和相位关系无法确定，相关分析法将失效。

文献[13]利用母线零序电压导数与零序电流比值在高频段和低频段的差值构造选线判据，但是当消弧线圈过补偿度较小或者欠补偿程度大时，故障馈线在低频段受消弧线圈影响小，使得故障线路与健全线路的选线特征量相差不大，可能会造成误判。

本文针对文献[9]所提方法的不足，在文献[13]的基础上分析了馈线在特征频段内的阻抗性质，并进一步分析了零序电流在不同频段内的幅值与极性关系，提出一种谐振接地系统故障选线的新方法。由于故障后健全线路零序电流与母线零序电压在最小串联谐振频段内为本线路对地电容的容性约束关系，其零序电流为本线路对地电容的容性电流，而故障线路零序电流中包含有消弧线圈的电感电流，使得故障线路零序电流在高频段和低频段的特性不同。利用这种差异提出一种新的选线判据，仿真结果证明了该方法不受过渡电阻、故障合闸角、故障距离等因素的影响，对高阻接地故障也同样适用。

1 零序电流分布特性分析

配电网谐振接地系统发生单相接地故障时，其零序等效网络如图 1 所示^[14]， L_{k0}, R_{k0}, C_{k0} ($k = 1, 2, \dots, n$) 分别为馈线 k 单位长度的零序电感、零序电阻与零序分布电容； L 和 R 分别为消弧线圈零序等效电感(3 倍消弧线圈电感)和串联电阻(3 倍消弧线圈串联电阻)； U_0 为母线零序电压； R_{f0} 为接地点过渡电阻； U_{f0} 为故障点虚拟零序电压源； i_{0k} 为流过馈线 k 的零序电流； i_{0L} 为流过消弧线圈的零序电流； n 为总的馈线数。

对于任一健全线路 k ，馈线零模阻抗 $Z_{0ck}(\omega)$ 为

$$Z_{0ck}(\omega) = Z_C \text{th}(\gamma l_k) \quad (1)$$

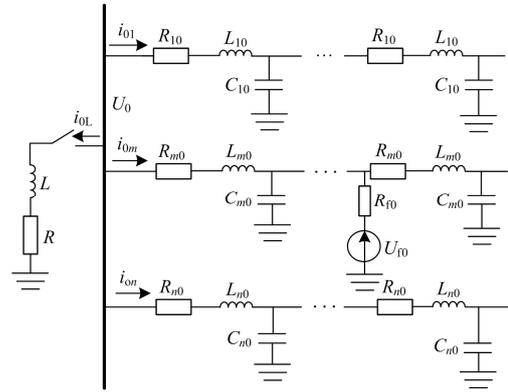


图 1 零序等效网络

Fig. 1 Zero sequence equivalent network

式中： $Z_C = \sqrt{R_{k0} + j\omega L_{k0} / j\omega C_{k0}}$ 为线路零模波阻抗； $\gamma = j\omega R_{k0} C_{k0} - \omega^2 L_{k0} C_{k0}$ 为线路传播参数； l_k 为馈线 k 的线路长度。

对于任一健全线路 k ，末端为开路状态时，线路电感与电容之间多次发生串联谐振与并联谐振，其阻抗随频率交替呈感性和容性，在最低谐振频段 $0 \sim f_{0k}$ ($f_{0k} = 1 / 4\sqrt{L_{k0} C_{k0}}$ 为第 k 条馈线的首串联谐振频率)内呈容性。当 $0 < f_{0k} < f_{0\min}$ ($f_{0\min}$ 为各健全馈线首次发生串联谐振频率的最小值)时，所有健全馈线可等效为一集中参数电容，母线零序电压与本线路零序电流之间为对地电容的容性约束关系。一般情况下，消弧线圈的电阻 R 的值较小，可忽略不计。将各健全线路用一对地分布电容代替，故障线路用集中参数简化，则单相接地简化零模网络如图 2 所示。其中， $C_{0k} = C_{k0} l_k$ 为馈线 k 的等值零序电容， $R_{0m} = R_{m0} l_m$ 和 $L_{0m} = L_{m0} l_m$ 分别是馈线 m 的等值电阻和电感。

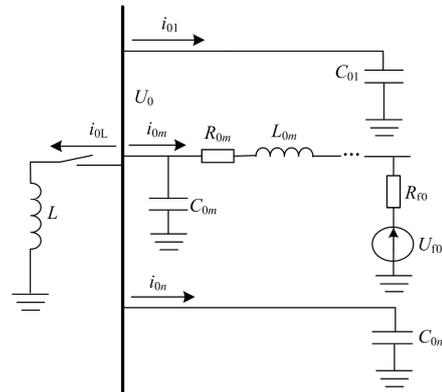


图 2 简化零模网络

Fig. 2 Simplified zero sequence network

由上述分析可知，当频率 f 在频段 $0 \sim f_{0\min}$ 范围内，健全线路的等值零序阻抗可表示为

$$Z_{0k} = -j \frac{1}{2\pi f C_{0k}} \quad (2)$$

设在频率 f_0 下消弧线圈完全补偿系统对地电容电流, 则

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \quad (3)$$

式中, C_0 为全系统对地电容之和, 具体表达式为

$$C_0 = \sum_{k=1}^n C_{0k} \quad (4)$$

假设馈线 m 为发生故障的线路, 其余馈线为健全线路, 令

$$C_{0h} = C_0 - C_{0m} \quad (5)$$

则故障线路的零序电流为

$$\begin{aligned} I_{0m} = & - \sum_{k=1, k \neq m}^n I_{0k} - I_{0L} = \\ & -(C_{0h}/C_0 - f_0^2/f^2) \times I_{C_0} = \\ & - \left(\sum_{k=1, k \neq m}^n C_{0k} / \sum_{k=1}^n C_{0k} - f_0^2/f^2 \right) \times I_{C_0} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $I_{0L} = U_0/\omega L$ 为消弧线圈在频率 f 下的零序电流; $I_{C_0} = U_0\omega C_0$ 为全系统零序电容在频率 f 下的零序电流。

对于故障线路 m , 在频段 $0 < f < f_{0\min}$ 范围内, 其等值零序阻抗可视为所有健全线路与消弧线圈的并联阻抗, 由式(2)与式(6), 得到故障线路的零序导纳为

$$Y_{0m} = \frac{I_{0m}}{U_0} = - \frac{\sum_{k=1, k \neq m}^n I_{0k} + I_{0L}}{U_0} = -j2\pi f C_{0h} + j \frac{1}{2\pi f L} \quad (7)$$

因此, 在频段 $0 \sim f_i (f_i = f_0/\sqrt{C_{0h}/C_0})$ 范围内故障线路具有感性阻抗, 零序电流与健全线路同极性。一般情况下, 工频下的零序电感阻抗等于所有线路的零序电容阻抗, 故 f_i 略大于工频, 而馈线的串联谐振频率 f_{0k} 为几千到上万 Hz, f_i 远小于 f_{0k} 。在频段 $f_i \sim f_{0k}$ 范围内, 故障线路具有容性阻抗, 其零序电流与健全线路极性相反。

为了便于描述, 本文称 $0 \sim f_i$ 频率范围为低频段, $f_i \sim f_{0k}$ 频段为高频段。

在低频段, 故障线路与健全线路之间零序电流满足式(8)。

$$I_{0m} = \sum_{k=1, k \neq m}^n I_{0k} + I_{0L} \quad (8)$$

当 $f > 3f_0$ 时, 有 $9I_{0L} < I_{C_0}$, 即随着频率增加, 消弧线圈对故障线路零序电流的影响越小。

在高频段, 消弧线圈的影响可忽略, 故障线路与健全线路零序电流之间满足

$$I_{0m} = - \sum_{k=1, k \neq m}^n I_{0k} \quad (9)$$

综上所述, 在频段 $0 \sim f_{0\min}$ 内, 健全线路的阻抗可以等效为一个零序电容, 其零序电流为对地电容的容性电流。在低频段, 故障线路零序电流为经消弧线圈补偿后的系统对地电容电流, 其幅值与消弧线圈补偿度有关, 极性与健全线路零序电流相同; 在高频段, 故障线路零序电流为所有健全线路零序电流之和, 其幅值最大, 极性与健全线路零序电流相反。

2 选线方法

2.1 特征频带的确定

根据上述分析, 得到健全线路与故障线路零序电流在高频段和低频段的差异, 为幅值和极性选线方法提供了更有效的依据。由式(8)和式(9)可知, 消弧线圈对零序电流的影响在低频段更加明显, 故障电流在低频段的幅值大于高频段。为了增大本文中健全线路与故障线路间选线判据的差距, 选择低频段 $0 \sim f_i$ 作为特征频段。

为了更有效地提取暂态信号在所关注频段内的信号分量, 选用切比雪夫低通数字滤波器对各条线路零序电流及母线零序电压进行滤波, 滤波器截止频率的选择至关重要。由上可知, f_i 略大于工频, 故将 f_i 选作 2 倍工频, 即 100 Hz。

2.2 选线原理

谐振接地系统零序等值电路中, 在馈线最小串联谐振频段内, 所有健全线路均可看作是故障点到母线间线路的容性负载, 将其简化为对地分布电容后, 健全线路零序电流与母线零序电压间存在等式 $i = C du/dt$; 而对于故障线路, 由于受到消弧线圈和接地点过渡电阻的影响, 在低频段故障线路零序电流中还增加了感性的电流分量, 它的零序电流与母线零序电压间不满足 $i = C du/dt$ 。基于故障线路与健全线路零序电流特征的这种不同, 形成故障选线判据。

对于任意健全线路 $i, j (i, j \neq m)$, 其零序电流与母线零序电压导数满足式(10)和式(11)。

$$i_{0i} = C_{0i} \frac{du_0}{dt} \quad (10)$$

$$i_{0j} = C_{0j} \frac{du_0}{dt} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)两式交叉相乘得

$$i_{0i}C_{0j} \frac{du_0}{dt} = i_{0j}C_{0i} \frac{du_0}{dt} \quad (12)$$

由式(12)可得

$$i_{0i}C_{0j} \frac{du_0}{dt} - i_{0j}C_{0i} \frac{du_0}{dt} = 0 \quad (13)$$

发生单相接地故障时,健全线路 k 始端零序电流有效值为 $I_{0k} = U_0 \omega C_{0k}$, 即健全线路零序电流有效值与它的零序电容的比值成正比, 定义 p_{ij} 为

$$p_{ij} = i_{0i}I_{0j} \frac{du_0}{dt} - i_{0j}I_{0i} \frac{du_0}{dt} \quad (14)$$

由式(12)得健全线路之间满足式(15)。

$$p_{ij} = 0 \quad (15)$$

对于故障线路, 其零序电流为所有健全线路对地电容电流与消弧线圈电感电流之和, 其表达式为

$$i_{0m} = i_{0L} + \sum_{k=1, k \neq m}^n C_{0k} \frac{du_0}{dt} = \frac{1}{L} \int u_0 dt + \sum_{k=1, k \neq m}^n C_{0k} \frac{du_0}{dt} \quad (16)$$

根据健全线路和故障线路的零序电流与母线零序电压之间的这种关系可得

$$i_{0i} \frac{1}{L} \int u_0 dt + i_{0i} \sum_{k=1, k \neq m}^n C_{0k} \frac{du_0}{dt} = i_{0m} C_{0i} \frac{du_0}{dt} \quad (17)$$

由式(17)得到

$$i_{0m} C_{0i} \frac{du_0}{dt} - i_{0i} C_{0m} \frac{du_0}{dt} = i_{0i} \times \frac{1}{L} \int u_0 dt + i_{0i} \times \frac{du_0}{dt} \times \left(\sum_{k=1, k \neq m}^n C_{0k} - C_{0m} \right) \quad (18)$$

式(18)为时间函数, 显然不为 0, 即故障线路与健全线路之间:

$$p_{mi} \neq 0 \quad (19)$$

综上所述, 健全线路与健全线路之间 $p_{ij} = 0$;

故障线路与健全线路之间 $p_{mi} \neq 0$ 。

通过对馈线之间两两比较求 p_{ij} , 可得到 p_{ij} 的均方根 P_{ij} , 其系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & P_{m3} & \cdots & P_{mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

显然, 此矩阵的主对角线元素为 0 且为反对称矩阵。在给定数据窗内, 健全线路之间 p_{ij} 的所有数值都为 0, 故其均方根 P_{ij} 也为 0。由于测量误差、噪声干扰、电压三相不平衡等因素的影响, 实际均方根为 0 附近的较小值; 故障线路与健全线路之间

p_{mi} 大多数都远大于 0, p_{mi} 的均方根 P_{mi} 也远大于 0。由于电缆线路与架空线路之间单位长度的零序电容差值很大, 电缆线路的零序电流也比架空线路的零序电流大很多倍, 会使电缆线路与架空线路之间的 P_{ij} 值较大, 为避免发生误判, 采用每条馈线与其余线路两两比较得到的 P_{ij} 去除最大值后的和作为故障选线判断量。很明显, 故障线路与健全线路差异很大, 由此构成选线判据, 可靠性高。

3 故障选线步骤

根据以上分析, 本文选线步骤如图 3 所示。

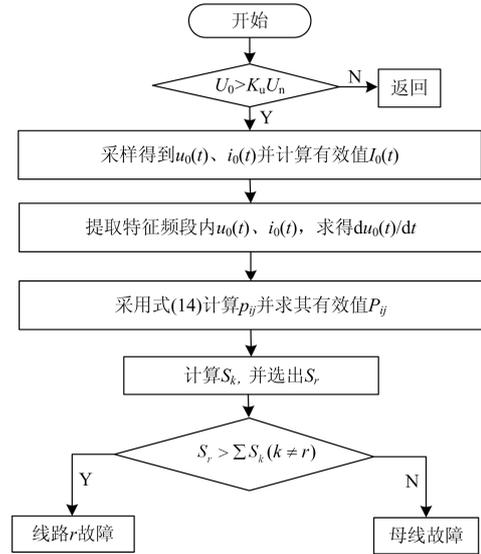


图 3 故障选线流程

Fig. 3 Flow chart of fault line selection

1) 当母线零序电压 $u_0(t)$ 大于设定阈值 $K_u U_n$ 时, 立即启动故障选线程序, 并通过采样记录故障后 10 个工频周期的母线零序电压 $u_0(t)$ 和各馈线的零序电流 $i_{0k}(t) (k=1, 2, \dots, N)$; N 为 10 个工频周期总采样个数。

2) 根据数据窗内采样点大小计算零序电流的均方根 I_{0k} , 其计算式为

$$I_{0k} = \sqrt{\sum_{t=1}^N \frac{i_{0k}^2(t)}{N}} \quad (20)$$

3) 使用低通滤波器对母线零序电压 $u_0(t)$ 和各馈线零序电流 $i_{0k}(t)$ 进行滤波, 提取特征频段内的信号分量。

4) 利用差分法得到零序电压导数 $du_0(t)/dt$ 。

5) 采用式(14)计算各馈线与其余线路两两比较的结果 p_{ij} 。

6) 计算 p_{ij} 在 10 个工频周期内的均方根 P_{ij} , 形

成矩阵 A , 计算式为

$$P_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N P_{ij}^2(t)}{N}} \quad (21)$$

7) 根据矩阵 A 计算每条馈线相对于其他馈线的综合比较结果 S_k 。 S_k 为矩阵 A 中第 k 行元素除去最大值后剩余元素之和。

8) 计算各馈线的 S_k , 选出其中的最大值 S_r , 若 S_r 大于其余线路的 S_k 之和, 判定第 r 条馈线为故障线路; 否则, 判定为母线故障。

4 仿真验证

针对图 4 所示配电系统, 利用 Matlab 软件进行谐振接地系统故障选线的仿真验证。该 10 kV 中压配电系统包含 4 条架空线路(出线 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4), 2 条电缆线路(出线 L_5 、 L_6), 线路参数如表 1。开关 S 闭合, 消弧线圈过补偿 10%, 负荷有功功率统一为 1 MW, 功率因数为 0.89, 系统采样频率设为 10 kHz, 故障发生后, 通过采样记录母线零序电压及各馈线零序电流。

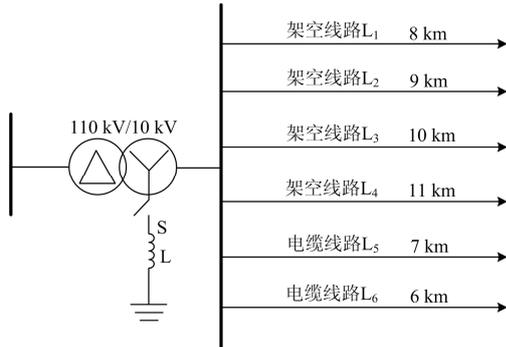


图 4 谐振接地系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of resonant earthed system

表 1 仿真模型线路参数

Table 1 Line parameters of the model

线路类型	电阻/(Ω /km)		电感/(mH/km)		对地电容/(μ F/km)	
	正序	零序	正序	零序	正序	零序
架空线	0.178	0.25	1.21	0.54	0.01	0.006
电缆	0.27	2.7	0.255	1.02	0.339	0.28

4.1 零序电流分布特性的验证

采用低通滤波器和带通滤波器分别提取零序电流在低频段和高频段的信号分量, 带通滤波器的截止频率为系统最小串联谐振频率 f_{0min} , 为避免低频分量和更高频分量对高频分量的影响, 带通滤波器的截止频率应向中间靠拢, 针对本文仿真系统, 高频段的频率范围为 300~1 800 Hz。

设置馈线 4 在距离母线 7 km 处发生单相接地故障, 过渡电阻为 300 Ω , 故障合闸角为 0° , 为便于观察, 仿真结果中选取了两条健全电缆线路 L_5 和 L_6 的零序电流波形与故障线路进行比较。图 5 和图 6 分别是 3 条线路在低频段和高频段的零序电流波形, 由图可见, 在低频段, 故障线路的零序电流在某一时刻发生了倒向, 与健全线路方向相同, 且由于消弧线圈的过补偿作用, 故障馈线 i_{04} 的零序电流小于健全电缆线路的值; 在高频段, 故障线路零序电流的方向始终与健全线路零序电流相反, 且其幅值最大。仿真结果与理论分析相符。

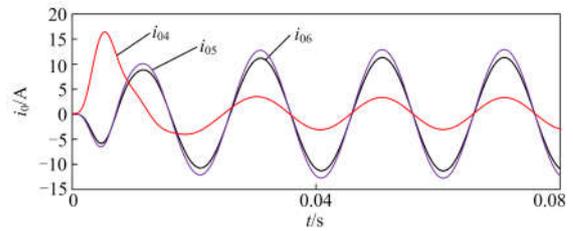


图 5 零序电流的低频分量

Fig. 5 Low-frequency component of zero-sequence current

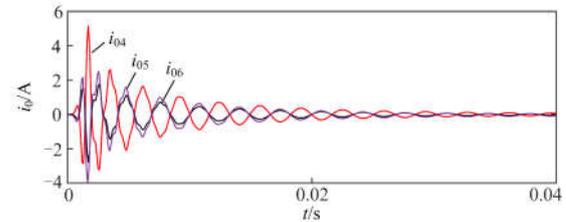


图 6 零序电流的高频分量

Fig. 6 High-frequency component of zero-sequence current

4.2 选线方法的验证

考虑不同的接地电阻 R_f 、故障点与母线之间的距离 X_f 以及故障合闸角 θ , 表 2 的仿真结果表明此方法在不同馈线发生不同故障时都能可靠地给出选线结果。

表 2 不同故障状态的选线结果

Table 2 Selection results of different failure modes

L_k	X_f /km	R_f / Ω	θ / $^\circ$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	选线结果
L_1	5	200	30	5.696	4.800	5.400	5.900	76.90	71.10	L_1
L_2	1	50	0	15.00	1.803	19.00	21.00	233.0	213.0	L_2
L_3	3	500	15	0.900	1.000	1.840	1.300	13.80	12.90	L_3
L_4	7	1 500	30	0.234	0.264	0.294	467.0	2.241	2.061	L_4
L_5	2	2 000	45	0.064	0.072	0.080	0.088	30.93	0.303	L_5
L_6	2	2 500	60	0.068	0.077	0.085	0.094	0.324	20.57	L_6
母线	3	300	90	0.693	0.782	0.875	0.972	4.312	3.314	母线

由表 2 可得,健全电缆线路 S_k 的值总是大于健全架空线路的 S_k 的值。这是由于电缆线路的耦合电容比架空线路的耦合电容大很多倍,电缆线路的零序电流也将远大于架空线路的零序电流,由式(14)可知,当电缆线路与其余线路两两比较求得的 p_{ij} 的值会比架空线路与其余线路比较得到的 p_{ij} 大很多,故无论是发生何种类型的单相接地故障,健全电缆线路的 S_k 值都会大于健全架空线路的 S_k

的值。

5 适用性分析

5.1 不同因素的影响

故障合闸角、过渡电阻和故障距离三种因素影响下的仿真结果如表 3 所示,结果表明该方法能适用于各种故障情况的选线。

表 3 不同因素影响下的选线结果

Table 3 Results with the influence of different factors

L_k	X_f/km	R_f/Ω	$\theta/(\circ)$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	选线结果
L ₁	5	20	0	42 331	46.07	51.00	56.00	404.0	363.0	L ₁
L ₁	7	20	0	39 711	38.21	43.00	46.31	336.0	301.0	L ₁
L ₁	1	20	0	43 874	51.00	56.00	62.00	512.0	463.0	L ₁
L ₄	5	200	0	2.210	2.400	2.700	3 926	38.40	35.80	L ₄
L ₄	5	200	30	4.302	4.900	5.400	5 620	75.90	70.71	L ₄
L ₄	5	200	60	5.670	5.700	6.401	6 102	91.40	86.0	L ₄
L ₅	5	20	30	59.00	66.00	73.00	80.04	1 108	277.0	L ₅
L ₅	5	200	30	4.298	4.827	5.353	5.866	657.4	20.33	L ₅
L ₅	5	1 000	30	0.266	0.299	0.332	0.364	85.77	1.262	L ₅
母线	0	20	0	13.02	14.78	16.58	18.41	100.2	62.68	母线
母线	0	200	0	0.645	0.730	0.808	0.897	5.710	3.068	母线
母线	0	1 000	0	0.163	0.183	0.204	0.224	1.024	0.773	母线

5.2 噪声的影响

设置架空线路 L₄ 和电缆线路 L₅ 发生不同类型的单相接地故障,故障信号中不加白噪声与加入白噪声(信噪比为 SNR=30 dB)时仿真结果见表 4,结果表明此方法抗干扰能力强。

表 4 高斯白噪声影响下的选线结果

Table 4 Selection results with the influence of Gaussian white noise

L_k	X_f/km	R_f/Ω	$\theta/(\circ)$	SNR/dB	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	选线结果
L ₄	1	500	30	0	1	1.10	1.3	1 985	17.2	16.2	L ₄
L ₄	1	500	30	30	34.8	35.5	36.4	1 987	84.1	76.2	L ₄
L ₅	2	600	60	0	0.46	0.52	0.579	0.637	169	2.20	L ₅
L ₅	2	600	60	30	16.4	16.7	16.56	16.89	190	48.2	L ₅

5.3 高阻接地故障

配电网中的单相接地故障有 10% 为高阻接地故障,此类故障由于接地过渡电阻大,故障电流小,故障点不稳定,相比于低阻接地故障,它的检测更加困难。目前,针对高阻故障的检测方法^[15-22]有很多种,主要分为时域分析法^[16-18],频域分析法^[19-20],时频域分析法^[21]三类。为了验证本文方法对高阻故障的适用性,采用图 7 所示的高阻故障模型^[22]。模型的参数设置为 $R_p=550 \Omega$, $R_n=500 \Omega$, $V_p=3 500 \text{ V}$, $V_n=3 000 \text{ V}$ 。

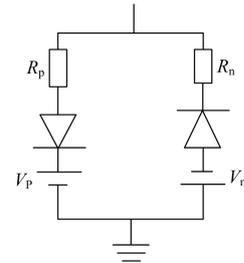


图 7 高阻故障模型

Fig. 7 Model of high impedance fault

设置 0.04 s 时距离线路 4 首端 5 km 处发生单相高阻接地故障,故障线路零序电流波形如图 8 所示。

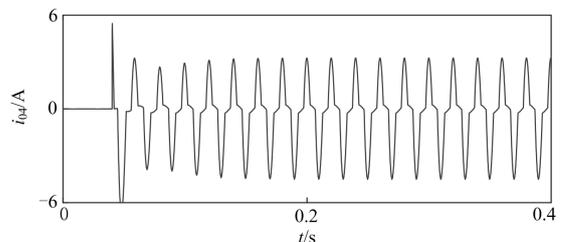


图 8 馈线 4 的零序电流

Fig. 8 Zero sequence of the feeder line 4

由图 8 可见,该电流波形正负峰值大小分别为 3.1 A 和 -4.2 A,且在过零点处趋于平缓,表明故障电流具有不对称性、非线性、间歇性和随机性。仿

真结果较好地体现了高阻故障的特征。

在这种故障情况下, 得到的各条馈线的 S_k 如图 9 所示, 分别为 $S_1=0.2506$, $S_2=0.2809$, $S_3=0.3249$, $S_4=598.9216$, $S_5=4.0927$, $S_6=4.0230$ 。很明显, 馈线 4 的 S_4 的值远大于其他几条线路的 S_k 的值, 可以准确选出故障馈线即为第 4 条线路。

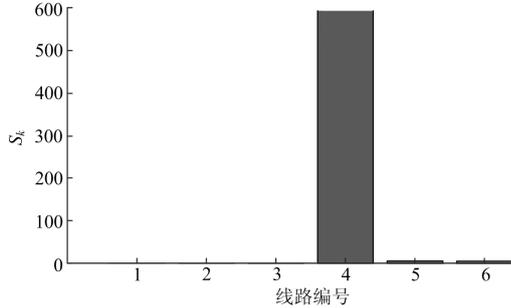


图 9 各馈线 S_k

Fig. 9 S_k of each feeder

设置电缆线路 L_5 在 0.04 s 时距离线路前端 2 km 处发生高阻接地故障, 过渡电阻为 $R_p=1500\ \Omega$, $R_n=1000\ \Omega$, 得到的故障零序电流波形如图 10 所示, 可见, 当电缆线路发生高阻故障时, 过零点的畸变特点不明显, 基于时域的选线方法此时将失效。在这种情况下, 得到各馈线的 S_k 如图 11, 其值分别为 $S_1=0.0502$, $S_2=0.0564$, $S_3=0.0625$, $S_4=0.0687$, $S_5=31.3683$, $S_6=0.2377$, 可以看出, 馈线 5 为故障线路。因此, 本文方法在架空线和电缆线发生高阻故障的情况下都能正确选线。

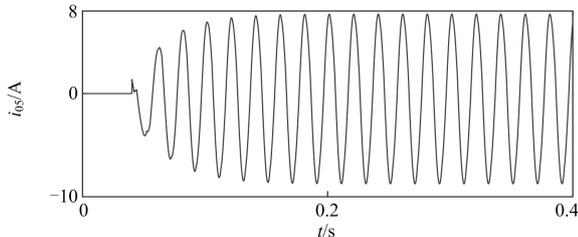


图 10 馈线 5 的零序电流

Fig. 10 Zero sequence of the feeder line 5

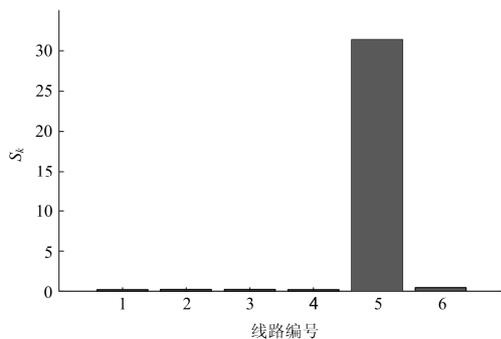


图 11 各馈线 S_k

Fig. 11 S_k of each feeder

6 现场录波数据的验证

采用现场录波数据对本文方法的现场适用性进行验证。图 12 为淄博市某变电站的接线图, 选取的罗道线有罗道支线、罗南支线、北岔支线三条分支线路。北岔支线 L_2 发生单相接地故障时, 录波得到三条线路的零序电流波形如图 13 所示, 零序电压波形如图 14 所示。图中, i_{01} 、 i_{02} 、 i_{03} 分别表示罗道支线、北岔支线、罗南支线的零序电流。

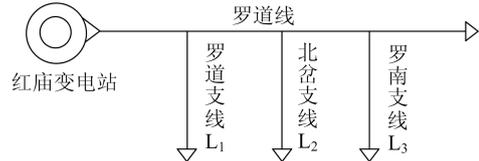


图 12 变电站接线图

Fig. 12 Wiring diagram of substation

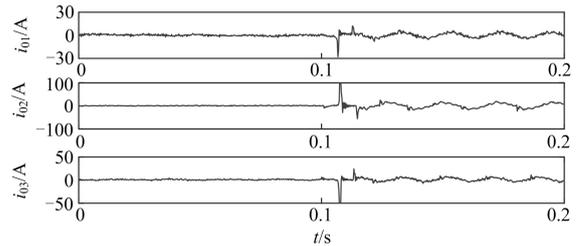


图 13 零序电流波形图

Fig. 13 Waveform of zero sequence current

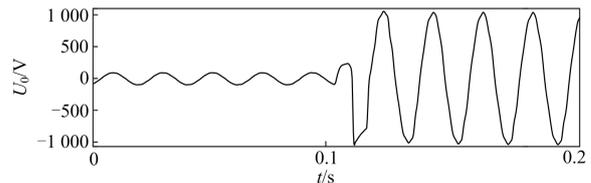


图 14 零序电压波形图

Fig. 14 Waveform of zero sequence voltage

在这种情况下, 使用本文方法得到的各条线路的 S_k 如图 15 所示, 分别为 $S_1=243.6$, $S_2=1295.1$, $S_3=243.6$, 可选出第二条线路北岔支线为故障线路, 与实际结果相符合, 因此所提方法也适用于分支线路的选线。

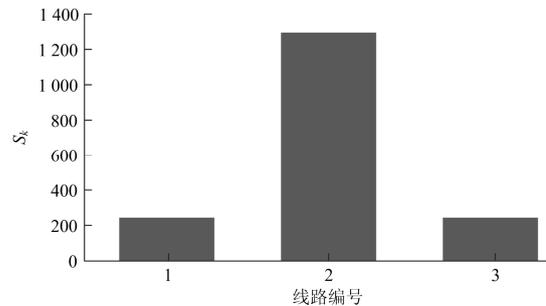


图 15 各分支线 S_k 值

Fig. 15 S_k of each branch feeder

7 结论

谐振接地系统发生单相接地故障时, 流过健全线路与故障线路的零序电流具有不同的性质。在最小串联谐振频率以下, 健全线路可等效为一零序电容, 其零序电流为对地电容的容性电流; 故障线路零序电流中包含感性分量, 在低频段其阻抗呈感性, 零序电流与健全线路同相, 在高频段其阻抗呈容性, 零序电流与健全线路反相。选取低频段作为特征频段, 形成一种新的谐振接地系统故障选线方法。理论分析和仿真结果表明:

1) 该方法充分利用了单相接地故障后馈线阻抗与零序电流的特征, 不受线路类型及线路长度的影响, 抗干扰能力强。

2) 该方法用故障后 10 个周期的数据构造选线判据, 充分利用了故障暂态过程的特征; 采用低通滤波器提取故障暂态信息, 滤除了其他频段的干扰信息, 同时, 排除了高频量对阻抗性质的影响。

3) 该方法对电弧故障具有较强的适应性, 在各种故障情况下均能准确选线, 仿真结果与现场数据证明了该方法的可靠性。

参考文献

- [1] 束洪春, 彭仕欣. 基于短窗数据 S 变换能量的缆-线混合配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 153-159.
SHU Hongchun, PENG Shixin. A fault line detection algorithm for distribution network of overhead line and underground cable mixed lines using S-Transform Energy from short window data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 153-159.
- [2] 束洪春, 彭仕欣. 配网缆-线混合线路故障选线相对能量法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 1-5.
SHU Hongchun, PENG Shixin. Faulty line detection by relative energy method for hybrid transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 1-5.
- [3] 朱丹, 贾雅君, 蔡旭. 暂态能量法原理选线[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 75-78.
ZHU Dan, JIA Yajun, CAI Xu. Transient energy to detect single-phase earthing fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 75-78.
- [4] 束洪春, 刘娟, 王超, 等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 72-76.
SHU Hongchun, LIU Juan, WANG Chao, et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 72-76.
- [5] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.
WU Yuepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [6] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 5-11.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-11.
- [7] 严凤, 杨奇逊, 齐郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 38-43.
YAN Feng, YANG Qixun, QI Zheng, et al. Study on fault location scheme for distribution network based on travelling wave theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 38-43.
- [8] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64-66.
ZHANG Huifen, PAN Zhencun, SANG Zaizhong. Injecting current based method for fault location in neutral isolated power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 64-66.
- [9] 毛鹏, 段玉倩, 姜娜. 基于相关分析的故障选线方法[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 36-39.
MAO Peng, DUAN Yuqian, JIANG Na. A correlation analysis method to detect faulty line under single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 36-39.
- [10] 刘柱揆, 曹敏, 董涛. 基于波形相似度的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 89-95.
LIU Zhukui, CAO Min, DONG Tao. Fault line selection of neutral indirectly grounding system based on waveform similarity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 89-95.
- [11] 庞清乐, 刘昱超, 李希午, 等. 基于电流极性比较的主

- 动配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 101-108.
- PANG Qingle, LIU Yuchao, LI Xiwu, et al. Current polarity comparison based fault location for active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 101-108.
- [12] 张乃刚, 张加胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 120-125.
- ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 120-125.
- [13] 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.
- [14] 戴栩生, 黄纯, 叶倩, 等. 基于暂态相关性分析的小电流接地故障选线方法[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 81-86.
- DAI Xusheng, HUANG Chun, YE Qian, et al. Fault line selection algorithm based on correlation analysis of transient information of fault signal in neutral un-effectual grounded system[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 81-86.
- [15] 潘本仁, 管廷龙, 桂小智, 等. 不接地系统高阻接地故障特征及选线适用性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(10): 52-59.
- PAN Benren, GUAN Tinglong, GUI Xiaozhi, et al. Characteristics of high-resistance grounding fault in isolated neutral systems and the adaptability analysis of fault line selection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(10): 52-59.
- [16] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 配电网高阻接地故障伏安特性分析及检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3815-3823.
- WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high impedance faults in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3815-3823.
- [17] 耿建昭, 王宾, 董新洲. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.
- GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.
- [18] 李子龙, 刘涛, 黄胜强, 等. 基于泄放能量函数的配电网线路故障定位方法研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(7): 106-111.
- LI Zilong, LIU Tao, HUANG Shengqiang, et al. Study on fault location method based on leakage energy function[J]. Smart Grid, 2017, 45(7): 106-111.
- [19] LIEN K Y, CHEN S L. Energy variance criterion and threshold tuning scheme for high impedance fault detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 810-817.
- [20] KWON W H, LEE G W, PARK Y M. High impedance fault detection utilizing incremental variance of normalized even order harmonic power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 2(6): 557-564.
- [21] CHEN J, PHUNG T, BLACKBURN T, et al. Detection of high impedance faults using current transformers for sensing and identification based on features extracted using wavelet transform[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 2990-2998.
- [22] 李震球, 王时胜, 吴丽娜. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障选线新方法及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 44-49.
- LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina. A new method and simulation for arcing high-impedance-grounding fault line selection in resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 44-49.

收稿日期: 2018-12-01; 修回日期: 2019-03-07

作者简介:

龙茹悦(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护、信号处理; E-mail: Ruyuelong2020@foxmail.com

黄纯(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为继电保护、电能质量分析与控制、信号处理等。E-mail: yellowpure@hotmail.com

(编辑 周金梅)