基于高低频段暂态信号相关分析的谐振接地故障选线方法

汤 涛,黄 纯,江亚群,罗勋华,谢 兴,刘鹏辉 (湖南大学电气与信息工程学院,湖南省长沙市 410082)

摘要:针对谐振接地系统在相电压过零点附近发生单相接地故障时选线灵敏度不足的问题,提出 一种基于高低频段馈线零序电流与母线零序电压导数的相关分析故障选线法。系统故障后健全线 路的阻抗在高低频段均呈电容特性,而故障线路的阻抗在高频段呈电容特性,在低频段呈电感特 性。由此可知,健全线路零序电流与母线零序电压导数的相关系数在高频段和低频段相等,其差为 零;故障线路在低频段含有衰减直流分量,该频段内零序电流与母线零序电压导数的相关系数很 小,而高频段的相关系数数值较大,两者差值较大。根据这一特点构成故障选线判据。该方法物理 意义明确,能提高相电压过零点附近的选线灵敏度,在其他故障状态下也能准确选线。大量仿真结 果验证了该方法的有效性。

关键词:配电网;谐振接地;相关分析;单相接地;故障选线;零序电流

0 引言

谐振接地系统与中性点不接地系统相比,单相 接地故障电流更小,不利于故障选线,而在相电压过 零点附近发生接地故障时,暂态故障电流更小,使得 选线灵敏度不足、可靠性不高^[1-3]。

近年来,已提出多种谐振接地故障选线方法,如 零序导纳法^[4]、小波能量法^[5-6]、电流行波法^[7]、零序 无功功率法[8]、相关分析法[9]等,但由于故障特征不 明显,实际效果并不理想,特别是故障发生在相电压 过零点的情况,选线基本失效。融合多种算法的综 合选线法虽在一定程度上提高了选线准确率[10-11], 但在相电压过零点附近的选线可靠性仍有待提高。 针对该问题,文献「12]提出了基于电流高频能量与 低频能量比较的选线法,该方法选择较大能量的频 段进行选线,损失了另一频段的故障信息。文 献「13-14〕利用故障线路零序电流含有幅值较大的 暂态衰减直流分量来解决相电压过零点附近的选线 问题,但忽略了丰富的高频故障信息。此外,在相电 压最大值附近发生故障时,两种选线方法均失效,需 切换到其他暂态算法。文献[15]综合工频稳态分量 和高频暂态信息设计故障选线,忽略了故障电流中

收稿日期:2015-11-25;修回日期:2016-03-27。

上网日期:2016-06-20。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目 (2012AA050215)。 占有一定比例的衰减直流分量。

本文在分析故障线路暂态零序电流特性的基础 上,结合不同频段的线路阻抗特性,提出一种基于高 低频段暂态信号的相关分析选线法。该方法充分利 用馈线暂态零序电流的衰减直流分量、工频分量和 高频分量,能较好地解决相电压过零点附近故障选 线不准确的问题,在其他故障情况下也能准确选线。 大量仿真结果验证了该方法的正确性。

1 零序网络故障暂态特性分析

1.1 零序网络故障暂态电流特性

谐振接地系统发生单相接地故障时,其零序网 络如图1所示。



Fig.1 Zero sequence network with single-phase ground fault

图 1 中: U_{f0} 为故障点虚拟电源; L_{0k} , R_{0k} , C_{0k} 分 别为第 k 条馈线单位长度零序电感、电阻和分布电 容, $k = 1, 2, \cdots, m, m$ 为馈线出线数; L_{arc} 和 R_{arc} 分别 为消弧线圈电感和串联电阻; R_f 为过渡电阻; i_L 为 流经消弧线圈的电流; i_{0k} 为第 k 条馈线的零序电 流; u_0 为母线零序电压。

当系统发生单相接地故障时,由图 1 建立微分 方程,结合初始条件求得故障线路的暂态零序电流 *i*_d 由暂态电感电流 *i*_L 和暂态电容电流 *i*_C 叠加而 成:

$$i_{d} = i_{c} + i_{L} = (I_{c} - I_{L})\cos(\omega t + \theta) + I_{c} \left(\frac{\omega_{f}}{\omega}\sin\theta\sin(\omega_{f}t) - \cos\theta\cos(\omega_{f}t)\right) e^{-\frac{t}{\tau_{c}}} + I_{L} e^{-\frac{t}{\tau_{L}}}\cos\theta$$
(1)

式中: I_{L} 和 I_{c} 分别为电感电流和电容电流的幅值; τ_{L} 和 τ_{c} 分别为电感时间常数和电容时间常数; ω 为角频率; ω_{f} 为暂态自由振荡分量的角频率; θ 为故 障合闸角。

由式(1)可知,故障线路零序电流由稳态分量、 电容电流的暂态自由振荡分量和暂态电感衰减直流 分量组成。当故障发生在相电压过零点,即故障合 闸角为 0°时,其衰减直流分量最大,数值一般为稳 态分量的几倍甚至几十倍。当故障发生在相电压最 大值处,即故障合闸角为 90°时,故障线路衰减直流 分量几乎为 0。显然,较大的衰减直流分量使得故 障线路与健全线路的零序电流波形差异显著。

振荡频率ω₁一般为几百到几千赫兹,由式(1) 可知,相电压过零点时暂态分量的幅值最小,传统暂 态法选线灵敏度不足^[8]。

1.2 零序网络线路阻抗特性

正常情况下,当线路末端开路时,可推出均匀线路入端阻抗 Z_{oc}为:

$$Z_{\rm oc}(\omega) = Z_{\rm c} \coth(\gamma l) \tag{2}$$

式 中:
$$Z_{c} = \sqrt{(R+j\omega L)/(j\omega C)}$$
, $\gamma = \sqrt{j\omega RC - \omega^2 LC}$,分别为线路特征阻抗及线路传播
系数; R , L , C 分别为线路单位长度电阻、电感和分
布电容; l 为线路长度。

忽略线路电阻,将 $\omega = 2\pi f$ 代人式(2)并化简, 图 1 中馈线 k 的入端零序阻抗 Z_{oct} 表示为:

$$Z_{\text{ock}}(f) = -j \sqrt{\frac{L_{0k}}{C_{0k}}} \cot(2\pi f l_k \sqrt{L_{0k}C_{0k}}) \quad (3)$$

式中:f 为频率;l_k为馈线k的线路长度。

当 $2\pi f_k l_k \sqrt{L_{0k}C_{0k}} = \pi/2$ 时,入端零序阻抗为 零,即当 $f = f_k = 1/(4l_k \sqrt{L_{0k}C_{0k}})$ 时,线路 k 首次 发生串联谐振。在频段 0
 $f < f_k$ 内,线路 k 的阻 抗呈电容特性。当频率为 $f > f_k$ 时,随着频率的增加,其零序阻抗将交替呈感性和容性,且交替的临界频率不易确定,故高于 f_k 的频段不适用于故障选线^[7]。

若选取最小串联谐振频率 f_h 为各馈线首次发 生串联谐振频率 $f_k(k=1,2,\dots,m)$ 的最小值,则所 有线路的阻抗在频段 $0 \leq f < f_h$ 内均呈电容特性。

故障后,在频段 0≤f<f_h内,健全线路的阻抗 可等效为与自身线路参数相关的一集中参数电容, 而故障线路检测的阻抗为背后所有健全线路和消弧 线圈的阻抗,即故障线路等效为并联的多个电容和 一个电感。

为了便于展示,根据上述分析写出故障线路的 等效导纳 $Y_k(f)$ 为:

$$Y_{k}(f) = -\frac{1}{j2\pi f L_{\rm arc}} - j2\pi f \sum_{i=1,i\neq k}^{m} (l_{i}C_{0i}) \quad (4)$$

式中:l_iC_{0i}为馈线 i 的零序分布电容。

由式(4)可知,当频率 f 从 0 逐渐增大时,故障 线路的导纳/阻抗从感性逐渐过渡到容性。当 $Y_k(f)=0$ 时,系统发生并联谐振。设此谐振频率 为 f_1 ,谐振接地系统消弧线圈一般采用 5%~10% 的过补偿,工频下的电感阻抗约等于所有线路的零 序容抗,故 f_1 约大于工频。根据一般线路参数, f_h 大于振荡频率 ω_i ,故 f_1 远小于 f_h 。当频率为 0< $f < f_1$ 时,故障线路阻抗呈电感特性,当频率为 $f_1 < f < f_h$ 时,故障线路阻抗呈电容特性。

为便于分析,本文定义频段 $0 \leq f < f_1$ 为低频 段,频段 $f_1 < f < f_h$ 为高频段。则健全线路的阻抗 特性在高频段和低频段均呈容性;故障线路的阻抗 特性在高频段呈容性,在低频段呈感性。

容性电路中,任何频率的电压、电流信号均有 *i*=C(du/dt),即容性电路电流与电压导数波形相 似。根据零序网络阻抗特性及衰减直流分量的分布 特点,可利用馈线零序电流与母线零序电压导数在 高低频段的相关系数实现故障选线。

2 高低频段暂态信号相关分析选线原理

2.1 健全线路高低频段的相关系数

若线路 k 为健全线路,则线路 k 在高低频段均 为容性电路,馈线零序电流波形与母线零序电压导 数波形在高低频段均相似。设线路 k 的零序电流 与母线零序电压导数在低频段的相关系数为ρ_{k1},高 频段的相关系数为ρ_{kb},则有

$$\rho_{k1} = \rho_{kh} = 1 \tag{5}$$

$$\rho_{i1} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{\mathrm{d}u_{01}(n)}{\mathrm{d}t} i_{0k1}(n)}{(6)}$$

$$\rho_{kh} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{\mathrm{d}u_{0h}(n)}{\mathrm{d}t} i_{0kh}(n)}{\left[\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\mathrm{d}u_{0h}(n)}{\mathrm{d}t}\right)^{2} \sum_{i=1}^{N} i_{0kh}(n)^{2}\right]^{\frac{1}{2}}}$$
(7)

式中:n=1,2,...,N,其中 N 为采样点数; u_{0h} 和 u_{0l} 分别为母线在高频段和低频段的零序电压; i_{0kh} 和 i_{0kl} 分别为馈线 k 在高频段和低频段的零序电流; ρ_{kl} 和 ρ_{kh} 的取值范围为[-1,1],其绝对值越大,则两信 号越相似,若取值为±1,表明两信号完全相似,正数 表明正相关,负数表明负相关,若取值为 0,则两信 号零相关。

2.2 故障线路高低频段的相关系数

若馈线 k 为故障线路,其阻抗在高频段呈容 性。根据基尔霍夫定律,在高频段内,故障线路零序 电流等于所有健全线路零序电流之和的相反数(高 频段消弧线圈的影响可忽略),电流由线路流向母 线,与健全线路电流方向相反。因此,故障线路零序 电流与母线零序电压导数在高频段负相关,具体表 示为:

$$\rho_{kh} = -1 \tag{8}$$

故障线路的阻抗在低频段呈感性,此时电流方向反向,与健全线路的电流方向一致。但由于低频段在暂态过程中有电感衰减直流分量,故障线路零序电流与母线零序电压导数在低频段的相关系数有待分析。

不考虑过渡电阻的影响,且数据窗长度一定,取 2个工频周期,定量分析故障线路零序电流与母线 零序电压导数在低频段的相关系数。

1)当故障合闸角为 0°时,故障线路零序电流主要为工频分量和衰减直流分量,其波形如图 2 中红 色实线所示,蓝线为母线零序电压导数,T 表示一 个工频周期。因低频段的截止频率较低,故提取的 低频信号有明显延迟。





由图 2 可知,导致两者波形差异的因素为:①两 波形首个半波极性相反(符合首半波原理^[12]);②零 序电流波形中含有电感衰减直流分量。除首个半波 极性相反外,其他大多数时刻两者波形极性相同,首 半波的影响较小,故两者的相关系数为正,由于此时 零序电流有最大衰减直流分量,且衰减持续数个工 频周期,而低频段的数据窗长度仅取 2 个工频周期, 因此,故障线路零序电流与母线零序电压导数在低 频段的相关性很小,实际相关系数 ρ_{kl}为接近于 0 的 正值。

2)当故障合闸角为 90°时,故障线路零序电流 和母线零序电压导数的波形如图 3 所示。由图可 知,电感衰减直流分量几乎为 0,仅因素①影响两者 波形差异,两者仍符合首半波原理,即故障后约半个 工频周期的时间内,故障线路零序电流的极性与健 全线路(母线零序电压导数)的极性相反,此后约 1.5T的时间内故障线路零序电流与母线零序电压 导数的极性相同,且无衰减直流分量扩大两者波形 的差异,因此,两者波形相似程度较大。此时低频段 的相关系数 ρ_{kl}最大,约为 0.5 到 1 之间的数值。



图 3 90°合闸角下的低频段暂态信号 Fig.3 Low frequency transient signals when initial fault voltage angle is 90°

3)当故障合闸角为 0°< θ <90°时,故障线路零 序电流和母线零序电压导数在低频段的相关系数 ρ_{kl} 介于两者之间。

综上,低频段的相关系数为:

$$\begin{cases} 0 < \rho_{k1} < 0.5 & \theta = 0^{\circ} \\ 0 < \rho_{k1} < 1 & 0^{\circ} < \theta < 90^{\circ} \\ 0.5 < \rho_{k1} < 1 & \theta = 90^{\circ} \end{cases}$$
(9)

实际上,考虑过渡电阻时,故障线路低频段相关 系数 ρ_{kl} 的数值仍介于 0 到 1 之间。

2.3 选线判据

定义倒差相关系数 P_k 为:

$$P_{k} = \frac{1}{\rho_{kl}} - \frac{1}{\rho_{kh}}$$
(10)

对于健全线路, ρ_{k1} 和 ρ_{kh} 的数值为1,其倒差相 关系数 P_k 为0;对于故障线路,根据式(8)至 式(10),其倒差相关系数 P_k 为一个大于2的数值。 由健全线路与故障线路的 P_k 的差异可构成选 线判据。根据理论分析和大量仿真结果,设置阈值 $P_{set}=1$,比较各馈线倒差相关系数与整定阈值的大 小即可选出故障线路,即 $P_k > P_{set}$ 时,判定第k条 馈线为故障线; $P_k \leq P_{set}$ 时,判定第k条馈线为健全 线。

显然,在故障合闸角为0°时,故障线路的 P_k 最大,选线灵敏度最高,能较好地解决故障发生在相电 压过零点附近时选线不准确的问题,其他情况下也 能正确选线。

3 选线特性分析

3.1 故障合闸角对倒差相关系数的影响

由于各种测量误差、噪声干扰等的影响,健全馈 线 k 在高低频段的相关系数 ρ_{kh} 和 ρ_{kl} 接近于 1,而高 频段信号稳定性差,易受扰动影响,故 ρ_{kh} 略小于 ρ_{kl} ,倒差相关系数 P_k 不受故障合闸角的影响,实际 数值为接近于 0 的负值。若馈线 k 为故障线路,由 2.2 节分析可知,零序电流与母线零序电压导数在 低频段的相关系数 ρ_{kl} 始终为正值,首半波极性及衰 减直流分量均使 ρ_{kl} 有减小的趋势,而首半波极性关 系始终存在,衰减直流分量随故障合闸角(0° $\leq \theta \leq$ 90°)的增大而减小,则相关系数 ρ_{kl} 随故障合闸角的 增大而增加, P_k 随故障合闸角的增大而减小。当故 障合闸角增大至 90°时,相关系数 ρ_{kl} 仍小于 1, P_k 仍大于 2,仍能准确实现选线,无需切换到其他暂态 选线算法。

3.2 过渡电阻对倒差相关系数的影响

由文献[16]可知,当过渡电阻 R_i从 0 逐渐增大 至上千欧时,系统开始处于欠阻尼状态,再逐渐到过 阻尼状态,最终过渡到另一种形式的欠阻尼状态。 在过渡电阻较小的欠阻尼状态下,随着过渡电阻的 增加,衰减时间变短,即暂态衰减直流分量迅速减 小,且最大衰减直流分量的数值也有所减小,故障线 路零序电流与母线零序电压导数在低频段的相关性 增加,即故障线路的 ρ_{k1}增大,其 P_k 减小。在过渡电 阻较大的欠阻尼状态下,随着过渡电阻的增加,衰减 时间变长,则两者在低频段的相关性降低,故障线路 的 P_k 增大。即随着过渡电阻的逐渐增大,故障线 路的 P_k 先减小后增加,其数值始终大于 2。高阻接 地故障时,选线灵敏度提高,但高阻故障电流小,不 便检测,且易受扰动影响,现场选线效果有待验证。

3.3 数据窗对倒差相关系数的影响

若数据窗过短,即采样点数 N 过少,捕捉暂态 特征较少,不足以反映零序电流与母线零序电压导 数的相关性,会降低选线灵敏度,甚至发生误判;若 数据窗过长,采样点数过多,由图 2、图 3 可知,故障 线路低频段衰减分量的影响被大大削弱,相关系数 ρ_{kl} 会增大而接近于 1,故障线路的 P_k 会减小,但仍 大于 2,即数据窗长度增加时,选线灵敏度降低。而 健全线路不含衰减直流分量,其 P_k 不受影响。综 合考虑,高频段信号的数据窗为 1 个工频周期,低频 段信号的数据窗以 2 个工频周期为宜。

3.4 其他特性

该选线方法不受现场电压/电流互感器(TV/ TA)接线极性反接的影响。若TV反接,健全线路 k的 ρ_{kl} 和 ρ_{kh} 均变为互感器正确接线时的相反数,其 P_k 仍约为0,实际为一接近于0的正值;若馈线k为故障线路,同样其倒差相关系数变为互感器正确 接线时的相反数,将 P_k 取绝对值作判据即可实现 故障选线。

4 仿真验证

谐振接地系统模型如图 4 所示。该系统为一个 有 6 条出线的 110 kV/10 kV 变电所,其中线路 1 和 2 为电缆线,其余为架空线,具体线路长度标示于 图中。线路参数来自文献[10],消弧线圈电感 $L_{\rm arc}$ 为0.738 6 H,过补偿度为 10%。



图 4 谐振接地系统仿真模型 Fig.4 Simulation model of resonant earthed system

本文通过低通、带通数字滤波器提取暂态信号 的低频分量与高频分量。该系统的采样频率为 4 kHz,低频段的截止频率为60 Hz,高频段的截止 频率为[200,1 000]Hz。故障发生后,若母线零序 电压高于设定值时,立即启动故障选线,记录故障后 2 个周期的馈线零序电流和母线零序电压,具体故 障选线仿真结果分以下几种情况。

1)不同故障合闸角

架空线路 l_3 距母线 4 km 处经 2 Ω 过渡电阻在 不同合闸角下发生的接地故障仿真结果如表 1 所 示。由表可知,线路 l_3 在不同合闸角下故障时,健 全线路的倒差相关系数 $P_k(k \neq 3)$ 几乎不变,故障 线路的 P₃ 随故障合闸角的增加而逐渐减小,在合 闸角为 0°时选线灵敏度最高,可有效解决相电压过 零点附近选线不准确的问题,在其他故障合闸角下 灵敏度有所降低,但仍能正确、可靠选线,无需切换 到其他选线算法。

voltage angles							
Table 1	S	election	results	under	different	initial	fault
	表	1 不同	合闸角	情况「	下的选线纠	告果	

Ν	$\theta/(^{\circ})$	倒差相关系数 P ₁ ,P ₂ ,P ₃ ,P ₄ ,P ₅ ,P ₆	选线 结果
160	0	$\begin{array}{c} -0.049 \ 7, -0.038 \ 9, 12.844 \ 0, \\ -0.051 \ 6, -0.051 \ 8, -0.052 \ 1 \end{array}$	正确
	15	-0.050 8, -0.039 7, 8.543 0, -0.052 7, -0.052 9, -0.053 3	正确
	30	-0.051 9, -0.040 6, 7.346 3, -0.053 9, -0.054 1, -0.054 6	正确
	45	-0.052 1, -0.040 8, 5.498 3, -0.054 1, -0.054 4, -0.054 9	正确
	60	-0.052 2, -0.040 9, 4.441 3, -0.054 2, -0.054 5, -0.055 0	正确
	75	-0.052 3, -0.040 9, 5.498 3, -0.054 2, -0.054 5, -0.055 0	正确
	90	-0.0524, -0.0410, 3.0128, -0.0544, -0.0546, -0.0551	正确

当故障合闸角为 60°时,健全线路 5 在高低频段 的暂态信号如图 5 所示。由图可知,零序电流与零 序电压导数波形几乎完全相似,即健全线路在高低 频段的相关系数均接近 1。



Fig.5 Transient signals of sound line 5 on the high and low frequencies

故障线路 3 在高低频段的暂态信号如图 6 所示。由图 6 可知,零序电流与母线零序电压导数在低频段波形差异较大,相关系数 ρ_{kl} 较小,在高频段两者波形相反,相关系数 ρ_{kh} 约为一1。



图 5、图 6 中提取的信号均有延迟,由于延迟时间段两信号重合,则基本不会影响选线结果。为了 更直观地展现选线结果,附录 A 图 A1 给出了故障 线路 *l*₃ 和健全线路 *l*₂ 在不同合闸角下倒差相关系 数 *P*₂ 和 *P*₃ 的变化曲线图。

2)不同过渡电阻

架空线路 l_4 距母线 7 km 处在故障合闸角为 0° 时发生不同过渡电阻的 A 相接地故障,仿真结果如 表 2 所示。由表可知,当过渡电阻逐渐增大时,健全 线路的 $P_k(k \neq 4)$ 基本不变,而 P_4 先减小后增大, P_4 的最小值明显大于 P_{set} ,故该方法在不同过渡电 阻下能可靠选线,且在高阻接地故障时选线更灵敏。 附录 A 图 A2 直观反映了 P_4 和 P_6 随过渡电阻的 变化情况。

表 2 不同过渡电阻下的选线结果 Table 2 Selection results under different transition resistances

Ν	$R_{ m f}/\Omega$	倒差相关系数 P ₁ ,P ₂ ,P ₃ ,P ₄ ,P ₅ ,P ₆	选线 结果
160	1	$\begin{array}{c} -0.038\ 0, -0.029\ 7, -0.039\ 4, \\ 12.558\ 0, -0.039\ 2, -0.039\ 5\end{array}$	正确
	10	-0.0420, -0.0332, -0.0435, 7.9861, $-0.0438, -0.0442$	正确
	100	-0.0604, -0.0493, -0.0628, 3.4000, -0.0641, -0.0665	正确
	200	$\begin{array}{c} -0.065 \ 9, -0.054 \ 3, -0.068 \ 4, \\ 3.236 \ 6, -0.070 \ 3, -0.073 \ 6 \end{array}$	正确
	300	-0.067 9, -0.056 2, -0.070 6, 3.335 5, -0.072 7, -0.076 3	正确
	1 000	$-0.070\ 6, -0.058\ 8, -0.073\ 4, \\ 4.212\ 4, -0.075\ 8, -0.080\ 0$	正确

3)不同数据窗

架空线路 *l*₅ 距母线 9 km 处在故障合闸角为 0° 时发生单相接地故障,在不同数据窗下的仿真结果 如表 3 所示。

由表 3 可知,当数据窗为 T 时,选线灵敏度很低,当数据窗为 2T 时,选线灵敏度显著增加,当数据窗从 2T 逐渐增加时,健全线路的 P_k ($k \neq 5$)几 乎不变,而 P_5 逐渐变小。附录 A 图 A3 更详细地 展示了 P_3 和 P_5 与数据窗长度的关系。

4)噪声干扰

不加噪声与加入 30 dB 高斯白噪声的仿真结果 如表 4 所示,其中, X_{f} 为故障距离, R_{f} 为过渡电阻, θ 为故障合闸角。对比可知,加入白噪声后,该方法 仍能准确选线,但高阻接地故障下选线灵敏度降低。

5)互感器接线极性反接

附录 B 表 B1 为 TV 接线极性反接时的单相接 地故障仿真结果。对比表 4 可知, TV 接线极性反 接时,各馈线的 P_k 均为原数值的相反数,通过对 P_k 取绝对值即能实现故障选线。

表 3 不同数据窗的选线结果 Table 3 Selection results under different data windows

数据窗	Ν	倒差相关系数 P1,P2,P3,P4,P5,P6	选线 结果
Т	80	$\begin{array}{c} -0.038\ 5, -0.030\ 1, -0.039\ 9, \\ -0.039\ 9, 0.440\ 5, -0.040\ 1 \end{array}$	正确
2T	160	$\begin{array}{c} -0.038\ 7, -0.030\ 3, -0.040\ 1, \\ -0.040\ 1, 12.996\ 0, -0.040\ 3 \end{array}$	正确
4T	320	$\begin{array}{c} -0.038\ 7, -0.030\ 3, -0.040\ 1, \\ -0.040\ 2, 4.992\ 0, -0.040\ 3 \end{array}$	正确
6T	480	$\begin{array}{c} -0.038\ 7, -0.030\ 3, -0.040\ 1, \\ -0.040\ 2, 4.119\ 7, -0.040\ 3 \end{array}$	正确
8 <i>T</i>	640	$\begin{array}{c} -0.038\ 7, -0.030\ 3, -0.040\ 1, \\ -0.040\ 2, 3.695\ 4, -0.040\ 3 \end{array}$	正确
10T	800	$\begin{array}{c} -0.038\ 5, -0.030\ 1, -0.039\ 9, \\ -0.039\ 9, 3.432\ 6, -0.040\ 1 \end{array}$	正确

表 4 加入高斯白噪声后的选线结果 Table 4 Selection results with Gaussian white noise

故障	故障	白噪	倒差相关系数	选线
线路	状态	声/dB	P_{1} , P_{2} , P_{3} , P_{4} , P_{5} , P_{6}	结果
l 2	$X_{\rm f} = 5 \text{ km},$ $R_{\rm f} = 100 \ \Omega,$ $\theta = 0^{\circ}$	0	$\begin{array}{c} -0.068 \ 9, 2.386 \ 3, -0.071 \ 6, \\ -0.072 \ 1, -0.073 \ 6, -0.077 \ 0 \end{array}$	l ₂
		30	-0.0694, 2.3882, -0.2297, -0.2438, -0.1606, -0.1205	<i>l</i> ₂
l 4	$X_{f} = 6 \text{ km},$ $R_{f} = 50 \Omega,$ $\theta = 75^{\circ}$	0	-0.062 9, -0.050 7, -0.065 4, 3.061 6, -0.066 4, -0.068 5	l_4
		$R_{\rm f} = 50 \ \Omega,$ $\theta = 75^{\circ}$	30	$\begin{array}{c} -0.063 \ 9, -0.050 \ 4, -0.070 \ 7, \\ 3.060 \ 6, -0.064 \ 7, -0.072 \ 2 \end{array}$
l ₆	$X_{\rm f} = 9 \text{ km},$ $R_{\rm f} = 1 000 \Omega,$ $\theta = 60^{\circ}$	0	-0.092 1, -0.076 4, -0.096 3, -0.096 8, -0.099 7, 3.736 8	l 6
		30	$\begin{array}{c} -0.090\ 5, -0.077\ 4, -0.537\ 5, \\ -0.697\ 6, -0.421\ 2, 3.732\ 6 \end{array}$	l 6

6)不同补偿度

架空线路 *l*₅ 距母线 5 km 处分别发生过补偿为 5%、完全补偿、欠补偿度为 5% 的单相接地故障。 仿真结果见附录 B 表 B2,由表可知,不同补偿度下 该算法仍能准确、灵敏地实现选线,适应性强。

5 结语

根据谐振接地配电网暂态零序电流特性和线路 阻抗特性,利用馈线零序电流与母线零序电压导数 在高低频段的相关系数实现选线。该方法充分利用 了故障暂态信息,选线准确率高。理论分析和大量 数字仿真表明,所述方法在相电压过零点附近故障 时选线灵敏度最高,其他情况下也能准确选线;在高 阻接地时选线灵敏度有所提高;适用于噪声干扰和 互感器接线极性反接的情况;在不同补偿度下能可 靠选线;同时,利用线路自身的倒差相关系数即能实 现故障选线,适用于分布式配电自动化系统。

由于高阻故障电流微弱,易受扰动影响,且暂态 高频分量幅值较小,选线可能失效,为进一步提高方 法的适用性,下一步将研究高阻接地故障下暂态分 量的表征方法,并完善相关选线原理及仿真验证。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

- [1] 東洪春,高利,段锐敏,等.利用零序电流全量 Hough 变换的配电 网故障选线方法[J].电力系统自动化,2013,37(9):110-116. SHU Hongchun, GAO Li, DUAN Ruimin, et al. A novel Hough transform approach of fault line selection in distribution networks using total zero-sequence current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 110-116.
- [2] 王清亮,付周兴.基于能谱熵测度的自适应单相接地故障选线方法[J].电力系统自动化,2012,36(5):17-20.
 WANG Qingliang, FU Zhouxing. An adaptive method for single-phase-to-ground fault line selection based on energy entropy measure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 17-20.
- [3] 薛永端,郭丽伟,张林利,等.有源配电网中性点接地方式的选择问题[J].电力系统自动化,2015,39(13):129-136.DOI:10.7500/AEPS20140717003.
 XUE Yongduan, GUO Liwei, ZHANG Linli, et al. Selection problems of neutral grounding mode in active distribution

problems of neutral grounding mode in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 129-136. DOI: 10.7500/AEPS20140717003.

- [4] 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):5-10.
 ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeders grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 5-10.
- [5] 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.
 ZHANG Weigang, ZHANG Baohui, HU Haisong, et al. Application of wavelet packet analysis in phase-to-ground fault detection of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 60-64.
- [6] 张艳霞,陈超英,赵杰辉,等.配电网单相接地故障选线的一种新 方法[J].电网技术,2002,26(10);21-24. ZHANG Yanxia, CHEN Chaoying, ZHAO Jiehui, et al. A new method of locating fault line under single phase to ground fault in distribution network[J]. Power System Technology, 2002, 26(10); 21-24.
- [7] 毕见广,董新洲,周双喜.基于两相电流行波的接地选线方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(3):17-20.
 BI Jianguang, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi, et al. Fault line selection based on two-phase current travelling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 17-20.
 [8] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等.小电流接地故障暂态方向保护原理
- 研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):51-56. XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients non-solid earthed network [J]. Proceedings of the

CSEE, 2003, 23(7): 51-56.

[9] 束洪春,徐亮,彭仕欣,等.谐振接地电网故障选线相关分析法 [J].电力自动化设备,2008,28(9):27-32.

SHU Hongchun, XU Liang, PENG Shixin, et al. Correlation analysis for faulty feeder detection in resonant earthed system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 27-32.

[10] 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.

LIU Yugen, WANG Jiannan, MA Jinpei, et al. Comprehensive fault line selection method for resonant grounded system combining wavelet packet transform with fifth harmonic method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1519-1525.

- [11] 郭谋发,杨耿杰,黄世远,等.谐振接地系统暂态特征自适应故 障选线方法[J].电力自动化设备,2012,32(10);35-41.
 GUO Moufa, YANG Gengjie, HUANG Shiyuan, et al. Adaptive faulty line selection based on transient characteristics for resonant earthling system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10); 35-41.
- [12] 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 Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solidearthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [13] 束洪春,刘娟,司大军,等.自适应消弧线圈接地系统故障选线 实用新方法[J].电力系统自动化,2005,29(13):64-68.
 SHU Hongchun, LIU Juan, SI Dajun, et al. New adaptive method for fault line selection in non-solidly grounded system
 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13):

64-68.

[14] 戴剑锋,张艳霞,侯喆.小波重构算法在配电网接地选线中的应用[J].电网技术,2004,28(3):43-47.
 DAI Jianfeng, ZHANG Yanxia, HOU Zhe. Application of wavelet reconstruction algorithm in phase-to-ground fault detection of distribution networks [J]. Power System

Technology, 2004, 28(3): 43-47. [15] 薛永端,张秋凤,颜廷纯,等.综合暂态与工频信息的谐振接地 系统小电流接地故障选线[J].电力系统自动化,2014,38(24): 80-85.DOI:10.7500/AEPS20131210015. XUE Yongduan, ZHANG Qiufeng, YAN Tingchun, et al. Faulty feeder identification based on combined transient and power-frequency components in resonant grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (24): 80-85. DOI: 10.7500/AEPS20131210015.

[16] 张海申,何正友,张钧.谐振接地系统单相接地故障频谱特征分析[J].电力系统自动化,2012,36(6):79-84.
ZHANG Haishen, HE Zhengyou, ZHANG Jun. Frequency spectrum characteristic analysis of single phase grounding fault in resonant grounded systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 79-84.

汤 涛(1989—),男,博士研究生,主要研究方向:电力 系统继电保护。E-mail: ttqzh0102@163.com

黄 纯(1966—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统继电保护、数字信号处理。E-mail: yellowpure @21cn.com

江亚群(1971—),女,博士,副教授,主要研究方向:电力 系统继电保护、电工理论与新技术。

(编辑 章黎)

Fault Line Selection Method in Resonant Earthed System Based on Transient Signal Correlation Analysis Under High and Low Frequencies

TANG Tao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, LUO Xunhua, XIE Xing, LIU Penghui

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

Abstract: In order to overcome the inaccurate selection of faulty line of single-phase grounding fault when the phase voltage passes zero in resonant earthed system, a method of correlation analysis is proposed based on zero sequence current of lines and zero sequence voltage of bus both in high and low frequency bands. After the single-phase ground fault appeared in the system, the impedance of the sound line shows capacitance characteristics in the high frequency and the low frequency band. With respect to the impedance of the faulty line, it shows capacitance characteristics in the high frequency band and inductance characteristics in the low frequency band. So, the correlation coefficient of the zero sequence current of the sound lines and the derivative of the bus zero sequence voltage are equal both in the high and the low frequency band, and the difference is zero. Because of the existence of decaying DC component in the faulty line, the correlation coefficient of the zero sequence vand, while the correlation coefficient in the high frequency band, while the correlation coefficient in the high frequency band is large as is the difference. So, the fault line selection criterion can be formed by the characteristics. The method has clear physical meaning, the sensitivity of fault line selection can be improved near the zero-crossing point of the phase voltage, and the fault line selection in other fault conditions also can be achieved accurately. A large number of simulation results show the feasibility of the method.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050215).

Key words: distribution network; resonant earthed system; correlation analysis; single-phase grounding; fault line selection; zero sequence current