

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180930

综合工频与特征频率零序导纳角差的选线方法

李振兴¹, 王新¹, 王鹏飞¹, 李飞², 翁汉琍²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对配网线路中大量电缆线路的使用导致故障线路与健全线路零序电流差异小的问题, 提出一种基于线路自身工频与特征频率上的零序导纳相角差的故障选线新方法。在分析线路特征频率的基础上, 利用 S 变换提取直流与特征频段内整倍工频频率点幅值信息, 通过比较两部分幅值大小判断故障合闸角范围。基于特征频段内频率点幅值最大原则确定故障系统零序电流的特征频率, 并进一步分析线路工频与特征频率下零序导纳向量特性。最后提出利用故障线路、健全线路的工频与特征频率零序导纳角差相差 180° 构建判据。基于 Matlab 的仿真验证本选线方法具有良好的选线效果。

关键词: 故障选线; 特征频率; S 变换; 零序导纳; 角差

Line selection method based on the zero-sequence admittance angle difference of power frequency and characteristic frequency

LI Zhenxing¹, WANG Xin¹, WANG Pengfei¹, LI Fei², WENG Hanli²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, Yichang 443002, China)

Abstract: To solve the problem that the use of a large number of cable lines in the distribution line leads to a small difference between the fault line and the sound line zero-sequence current, this paper proposes a new way of fault line selection based on the phase difference between the power frequency and the characteristic frequency. On the basis of analyzing the characteristic frequency of the line, the S-transform is used to extract the amplitude information of the euploid power frequency point in the DC and characteristic frequency bands, and the range of the fault closing angle is judged by comparing the magnitudes of the two parts. The characteristic frequency of the zero-sequence current of the fault system is determined based on the principle of the maximum frequency point amplitude in the characteristic frequency band, and the characteristics of the zero sequence admittance vector are further analyzed under the power frequency and the characteristic frequency. Finally, it proposes to use that the zero-sequence admittance angle difference between the power frequency and the characteristic frequency between the fault line and the normal line is 180° to construct criterion. Based on the simulation verification of Matlab, this line selection method has a good line selection effect.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607106), Key Projects of the Science and Technology Research Program of the Hubei Provincial Education Department (No. Z2017037), and Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University.

Key words: fault line selection; characteristic frequency; S-transform; zero-sequence admittance; phase angle difference

0 引言

配网系统中性点经消弧线圈接地对系统发生单

相接地时短时安全运行和设备安全至关重要^[1-2]。但由于消弧线圈补偿的作用, 也改变了故障线路与健全线路零序电流幅值与方向的差异性, 这也是现有选线方法面临的难题之一^[3-5]。

目前, 一些学者专家围绕小电流接地选线问题作出了大量的研究^[6-11], 其中利用暂态量信息成为主流方向^[12-14]。文献[12]提出了一种基于故障线路

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607106); 湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目资助(Z2017037); 三峡大学学位论文培优基金项目资助

与非故障线路暂态分量极性相反的特征构建判据,完成配网线路单相接地故障选线的办法,但该方法忽略了线路中低频故障信息,所以对故障后配网电流信息利用效率较低。文献[13]提出了一种基于暂态主频分量相关性的选线方法,利用 Prony 算法提取线路零序电流主频分量,计算各线路主频分量的相关性完成选线。但当故障发生在相电压初相角过零点附近(低故障合闸角)时,基于主频分量能量的选线方法存在不足。文献[14-15]提出了 Hilbert-Huang 方法对零序电流信号进行 EMD 分解,选取能量较为集中的 IMF1 窗口,通过比较窗口信号幅值、极性完成选线。但该方法存在端点效应与虚假分量的问题,选线的可靠性降低。此外,随着大量电缆线路的接入,使得实际配网故障情况更加复杂,暂态信息更丰富,健全电缆线路暂态零序电流幅值与故障线路的差异性较小,两者相关性都较高,易导致选线判据失效。因此,针对混合电缆-架空线路的配电网,研究高可靠的选线方法仍具有理论的必要性和工程的迫切性。

基于此,本文在分析系统导纳特性的基础上,确定系统特征频段,利用 S 变换^[16]求取特征频段内整倍工频频率点幅值信息,基于频率点中幅值最大原则求取特征频率。利用线路零序电流在特征频率及工频上方向不同的特征,结合相应频率零序电压,构建综合特征频率和工频上零序导纳向量相角差的选线判据。在故障合闸角较大时,基于相角差完成选线;在故障合闸角较小时,则对比各线路直流分量幅值完成选线。

1 特征频率分析

1.1 系统特征频段分析

当线路末端开路时,基于分布参数模型^[17]的线路入端阻抗 Z_{oc} 可表示为

$$Z_{oc}(\omega) = Z_c \coth(\gamma l) = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \coth(l\sqrt{j\omega RC - \omega^2 LC}) \quad (1)$$

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

对于故障零序网络的阻抗特性同样采用分布参数模型分析,将式(1)中各参数用零序分量代替,可得故障零序网络入端零序阻抗。分析时忽略较小的线路零序电阻,将 $\omega = 2\pi f$ 代入,则线路 i 的入端零序阻抗可表示为

$$Z_{oci} = \sqrt{\frac{L_{oi}}{C_{oi}}} \coth(l_i \sqrt{-4\pi^2 f^2 L_{oi} C_{oi}}) = -j \sqrt{\frac{L_{oi}}{C_{oi}}} \cot(2\pi f \sqrt{L_i C_i}) \quad (2)$$

式中: l_i 为线路 i 的长度; C_i 、 L_i 分别为线路 i 的零序电容和零序电感, $C_i = C_{oi} l_i$, $L_i = L_{oi} l_i$ 。

$$\text{令 } 2\pi f_i \sqrt{L_i C_i} = \frac{(2k+1)\pi}{2}, \text{ 得 } f_i = \frac{2k+1}{4l \sqrt{L_i C_i}}, \text{ 当}$$

$k=0$ 时,取 $f'_i = \frac{1}{4l \sqrt{L_i C_i}}$ 。对于线路 i 而言,当频率 $f = f'_i$ 时,线路 i 发生首次串联谐振。对于 f'_i 下的任意频率 f_m 都满足 $j2\pi f_m L_i < \frac{1}{j2\pi f_m C_i}$, 线路可等效成电容,即在频段 $0 \leq f < f'_i$ 内,线路 i 的零序阻抗呈电容特性。

对于有 n 条线路的经消弧线圈接地系统,由于各线路的参数不同、组合不同等,导致各线路的最小串联谐振频率不等。若选取各线路首次串联谐振值中最小值 f_b 作为系统最小串联谐振频率,则在频段 $0 < f < f_b$ 内,系统所有线路零序阻抗呈现容性特征。

系统发生单相接地时,故障线路的零序导纳为背侧所有健全线路与消弧线圈并联的综合导纳,其零序导纳 $Y_j(f)$ 可表示为

$$Y_j(f) = j2\pi f \sum_{i=1, i \neq j}^n l_i C_{oi} + \frac{1}{j6\pi f L} \quad (3)$$

式中: C_{oi} 、 l_i 分别为线路 i 的零序分布电容和长度; L 为消弧线圈电感值。当 $Y_j(f) = 0$ 时,系统发生并

联谐振,此谐振频率为 $f_a = 1/(2\pi \sqrt{3L \sum_{i=1, i \neq j}^n l_i C_{oi}})$, f_a

大于工频^[18]。对于故障线路,当 $f < f_a$ 时,故障线路的零序阻抗呈现感性特征;当 $f_a < f < f_b$ 时,故障线路阻抗呈容性特征,此频段称为系统特征频段 (Selected Frequency Band, SFB)^[19]。

1.2 特征频率

配网的故障信息是由多频率故障信号混叠构成,此频段内零序电流也是由多个频率电流叠加。在研究零序导纳的特征问题上,特征频段信息不便于精度分析,需要单一且不失故障特征的高频电流信号来解决问题。针对这一问题,本文选用各线路在 SFB 频段内零序电流幅值最大的频率点参数作为故障选线的基本信息。

在 SFB 频段内,故障信号由大量整数倍工频信号构成,信号的电压、电流信息均约束于相应的线

路参数, 反映线路的故障特征。由文献[20]可知, 电流幅值最大的频率点为线路零序电流频谱主成分, 故障点距离母线较远时, 故障系统下各线路频谱主成分趋于一致; 故障点距离母线较近时, 故障系统下各线路的频谱主成分存在一定差异, 但均在 SFB 频段内, 各频谱主成分频率点的阻抗特性均呈现容性特征。零序电流频谱主成分(幅值最大频率点)集中了暂态零序电流中绝大部分能量, 暂态过程中该频率下零序电流故障特征最明显, 反映了线路整体的故障信息, 且各线路阻抗呈容性特征, 故选取线路 SFB 频段内零序电流幅值最大的频率点参数作为研究对象, 可最大程度利用 SFB 内故障信息。由此, 定义线路零序电流在各频率点下幅值最大所对应的频率为该线路在 SFB 频段内的故障特征频率 f_r 。

1.3 S 变换

S 变换是一种局部时频信号分析方法, 在信号处理领域有着广泛的运用。其数据窗口具有高度、宽度随频率变化的优点, 能够实现暂态信号的快速分解。该变换可以通过调节采样数据窗获取任意整数倍工频点幅值信息, 较好地解决了最大幅值点频率的搜寻与确定问题, 应用在暂态信息不确定高频信号处理方面具有明显的优势。

对线路零序电流信号 $x(t)$ 进行 S 变换, 其表达式为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(\tau-t, f) \exp(-2\pi jft) dt \quad (4)$$

$$w(\tau-t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}\right\} \quad (5)$$

式中: $w(\tau-t, f)$ 为高斯窗口; τ 为高斯窗口时间轴 t 的位置参数。

对式(4)右边先采用傅里叶变换, 再进行傅里叶反变换, 最后通过变量代换得到自变量 f 的 $X(f)$ 的表达式, 即

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(v+f) \exp\left[-\frac{2\pi^2 v^2}{f^2}\right] \exp(-2\pi\tau v) dv \quad (6)$$

式中, f 不等于 0。利用 FFT 对 S 变换实现快速计算, 得到关于 S 变换的离散表示形式为

$$S(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(n+k) e^{-2\pi^2 k^2 / n^2} e^{j2\pi km / N} \quad n \neq 0 \quad (7)$$

$$S(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \quad n = 0 \quad (8)$$

其中:

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{-2\pi kn / N} \quad (9)$$

运用式(7)、式(8)对采样信号 $x(i)(i=0, 1, \dots, N-1)$ 进行 S 变换处理, 变换结果为一个 $n+1$ 行 m 列的幅频矩阵。此矩阵列向量表示任一线路下各频率点幅值信息, 相邻行之间的频率差 Δf 为采样频率与采样点之商。行向量表示单频率点下各线路幅值信息, 第一行 $n=0$ 对应于各信号的直流分量。

2 工频与特征频率零序导纳特性

2.1 工频与特征频率零序电流分析

对于任意健全线路 i , 由于不受消弧线圈的影响, 健全线路在最小串联谐振频段内呈现容性特征, 此频段由 SFB 频段及以下频段构成(包含工频段)。在不忽略电导的情况下, 此频段内任意频率下健全线路上零序电流方向与参考方向一致^[21], 且超前其零序电压近 90° 。

对于故障线路 j , 在特征频率点, 故障线路的等值阻抗呈现容性, 其特征频率零序电流故障特性与不接地系统下同频率点零序电流故障特性相似, 故障线路的零序电流数值上等于所有健全线路零序电流数值之和, 且两个方向相反。在不忽略电导的情况下, 此频率点故障线路零序电流滞后零序电压近 90° 。而健全线路特征频率零序电流超前零序电压近 90° 。对于工频信息, 由于消弧线圈的补偿特性, 故障线路工频零序电流由容性过渡到感性, 其方向与健全线路零序电流方向相同、幅值相近。

2.2 工频与特征频率零序导纳分析

系统发生单相接地故障时, 对于健全线路, 其工频零序导纳与特征频率零序导纳公式描述如下。

$$Y_{0iG} = \frac{1}{Z_{0iG}} = \dot{I}_{0iG} / \dot{U}_{0G} = g_{0iG} + j\omega_{0iG} C_{0iG} \quad (10)$$

$$Y_{0iT} = \frac{1}{Z_{0iT}} = \dot{I}_{0iT} / \dot{U}_{0T} = g_{0iT} + j\omega_{0iT} C_{0iT} \quad (11)$$

式中: Y_{0iG} 、 Y_{0iT} 分别表示健全线路 i 工频和特征频率零序导纳; \dot{I}_{0iG} 、 \dot{I}_{0iT} 分别表示健全线路 i 工频零序电流和特征频率零序电流; \dot{U}_{0G} 、 \dot{U}_{0T} 分别表示系统母线工频零序电压和特征频率零序电压; g_{0iG} 、 g_{0iT} 、 $\omega_{0iG} C_{0iG}$ 、 $\omega_{0iT} C_{0iT}$ 分别表示健全线路 i 工频段和特征频率零序电导、等效电容。

由式(10)、式(11)可知, 由于电导相对较小, 零序导纳角趋于 90° ; 在电容参数不变时, 角频率越高, 对应的零序导纳角更加接近于 90° 。

对于健全线路, 其工频零序导纳与特征频率零序导纳如式(12)、式(13)所示。

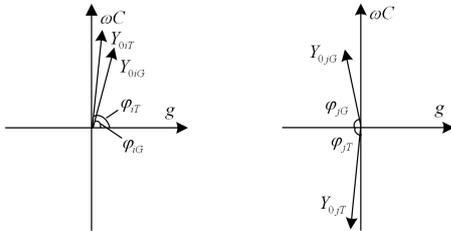
$$Y_{0jG} = \frac{1}{Z_{0jG}} = \dot{I}_{0jG} / \dot{U}_{0G} = - \sum_{i=1, i \neq j}^n g_{0iG} - j \sum_{i=1, i \neq j}^n \omega_{0iG} C_{0iG} + j \frac{1}{\omega_{0G} L} \quad (12)$$

$$Y_{0jT} = \frac{1}{Z_{0jT}} = -\dot{I}_{0jT} / \dot{U}_{0T} = - \sum_{i=1, i \neq j}^n g_{0iT} - j \sum_{i=1, i \neq j}^n \omega_{0iT} C_{0iT} \quad (13)$$

式中: Y_{0jG} 、 \dot{I}_{0jG} 分别表示故障线路 j 工频零序导纳、零序电流; $\sum_{i=1, i \neq j}^n g_{0iG}$ 、 $\sum_{i=1, i \neq j}^n \omega_{0iG} C_{0iG}$ 分别表示故障线路 j 工频零序电导和等效电容; L 表示消弧线圈电感值; Y_{0jT} 、 \dot{I}_{0jT} 分别表示故障线路 j 特征频率零序导纳、零序电流; $\sum_{i=1, i \neq j}^n g_{0iT}$ 、 $\sum_{i=1, i \neq j}^n \omega_{0iT} C_{0iT}$ 分别表示故障线路 j 在特征频率上的零序电导、等效电容。

由式(12)可知, 工频零序导纳受消弧线圈补偿作用, 且电导相对较小, 其导纳角将在导纳平面 90° 附近。对于特征频率零序导纳, 由于故障线路特征频率零序电流与健全线路零序电流方向相反, 并由式(13)可知, 特征频率零序导纳角在导纳平面 -90° 附近。

综上所述可知, 各线路的零序导纳向量位于导纳坐标平面不同位置。对于任一线路, 其工频零序导纳向量和特征频率零序导纳向量均存在一定的夹角。以健全线路 i 与故障线路 j 为例, 两者特征频率零序导纳向量与工频零序导纳向量在坐标平面的位置如图1所示。



(a) 健全线路零序导纳向量 (b) 故障线路零序导纳向量
图1 工频与特征频率零序导纳相位坐标

Fig. 1 Phase coordinates of zero-sequence admittance

为描述任一线路两导纳相位关系, 定义 θ 为任一线路特征频率零序导纳与工频零序导纳角差。以故障线路 j 为例, 角差 θ_j 值计算如式(14)。

$$\theta_j = \varphi_{jT} - \varphi_{jG} \quad (14)$$

式中, φ_{jT} 、 φ_{jG} 分别表示线路 j 在特征频率的零序导纳相角和工频零序导纳相角。

3 选线判据及流程

3.1 选线判据

当单相接地故障发生在故障合闸角较小时, 此时故障线路中直流分量的幅值远大于暂态高频分量, 因此直流分量成为故障线路的主导成分, 健全线路由于仅存在对地电容通道而不存在直流分量。在低故障合闸角下, 若采用特征频率进行选线, 则无法有效利用线路的主故障特征, 且在暂态信息不足的情况下, 可能会导致误选。基于上述分析, 本文提出将直流信息用于低故障合闸角故障选线。

基于 S 变换分解零序电流方法, 能有效提取出线路的直流分量幅值。依据故障线路存在直流分量的特征完成低故障合闸角故障选线。

故障合闸角的判别方法, 如式(15)所示。

$$I_{0idc} > I_{0iSFB} \quad (15)$$

式中: I_{0idc} 为线路 i 直流分量幅值; I_{0iSFB} 为线路 i 在特征频段内所有整倍数频率点交流分量幅值最大值。当存在线路满足式(15)时, 则认为单相故障发生在低故障合闸角; 当任一线路都不满足式(15)时, 认为系统故障发生在高故障合闸角。

进一步, 基于线路直流分量大小构建低故障合闸角下故障线路判据为

$$\text{故障线路} = \max \{I_{01dc}, I_{02dc}, \dots, I_{0ndc}\} \quad (16)$$

式中, I_{0ndc} 为线路 n 直流分量幅值, 选取最大直流分量支路为故障线路。

由式(15)判断单相接地故障发生在故障合闸角较大时, 对于健全线路而言, 特征频率零序导纳向量与工频零序导纳向量均位于零序导纳坐标平面第一象限, 两者均趋于虚轴正半轴, 角差较小, 由于线路零序电流主要由于其对地电容引起, 且零序导纳中电容分量远大于电导分量, 在忽略电导的情况下, 健全线路的角差趋于 0° ; 对于故障线路而言, 其工频和特征频率零序导纳向量分别位于坐标轴二、三象限, 两者分别趋于虚轴正负半轴, 角差较大, 在忽略电导的情况下, 故障线路的角差趋于 180° 。因此角差的大小可以有效反映故障系统下各线路的实际状况。

在实际应用中, 在既定数据窗内, 工频零序导纳相位 φ_{jG} 相对趋于平稳。而对于特征频率零序导纳相角 φ_{jT} 而言, 受高频分量的衰减特性及噪声的影响, 其值波动较大。本文提出利用该数据窗下相角曲线的平均值作为最终相位角值, 有效减少曲线波动带来的误差。但平均值的引入不可能完全避免或消除误差, 为保证故障选线的可靠性, 选线判据要有足够的裕度。考虑到测量误差与计算精度的影

响, 健全线路的角差选取 $0^\circ \pm 45^\circ$ 范围, 故障线路的角差选取 $180^\circ \pm 45^\circ$ 范围。

基于以上分析, 针对高故障合闸角下的故障线路判据为

$$135^\circ < \theta_j < 225^\circ \quad (17)$$

式(17)中, θ_j 为任一线路特征频率零序导纳与工频零序导纳角差。如果存在线路满足上述判据, 则判定该线路为故障线路; 如果所有线路均不满足上述判据, 则认为系统发生母线故障。

3.2 选线流程

根据上述分析, 基于线路零序导纳角差的故障选线流程如图2所示。

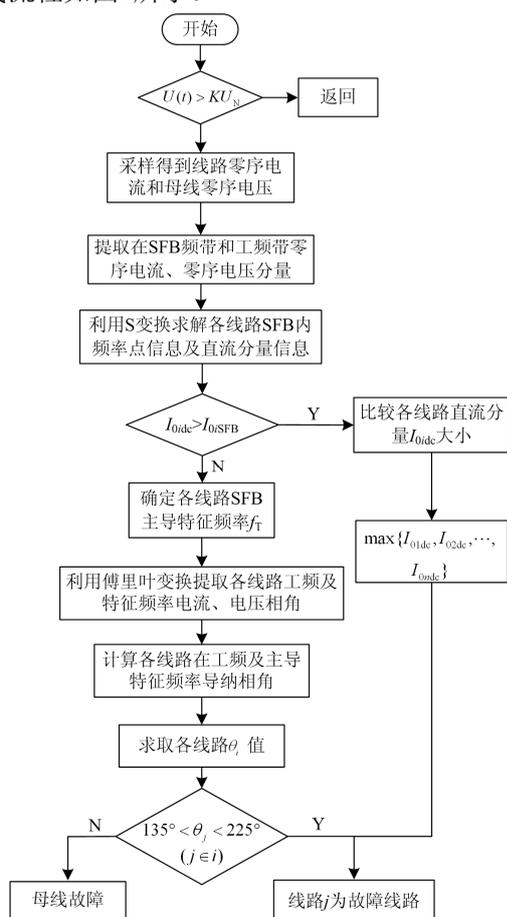


图2 故障选线流程

Fig. 2 Flow chart of fault line selection

1) 当系统监测到母线零序电压瞬时值 $u_0(t)$ 大于 KU_N 时, (其中 U_N 为母线额定电压, K 根据工程实际, 一般取值为0.15)故障选线装置立即启动, 并采样提取故障后首个工频周期各出线零序电流和母线零序电压信息。

2) 分析系统参数, 求取 SFB 频段。利用 S 变换提取线路在 SFB 频段内各频率点中电流幅值信息最大值 $I_{0/SFB}$ 和直流分量幅值信息 I_{0dc} , 比较两者大

小关系。

3) 若存在线路直流分量幅值大于 SFB 频段内任意频率点幅值, 则可判定故障发生在低故障合闸角, 此时通过比较各线路直流分量幅值大小完成故障选线。

4) 若任一线路直流分量小于 SFB 频段内最大频率点电流幅值, 则可认为故障发生在高故障合闸角, 此时基于频率点幅值最大原则确定各线路特征频率 f_T , 进入步骤5)。

5) 分别提取各线路在工频和特征频率零序电流、电压相角曲线, 求取特征频率导纳相角 $\varphi_{iT}(n)$ 曲线和工频零序导纳相角 $\varphi_{iG}(n)$ 曲线。

6) 求出 $\varphi_{iT}(n)$ 在一个工频周期的均值线 $\overline{\varphi_{iT}(n)}$ 。

7) 计算各线路角差 θ_j 值, 通过比较各线路角差 θ_j 值大小完成故障选线, 如果满足判据(17), 则认定线路 $j(j \in i)$ 为故障线路; 如果不满足上述判据, 则认为故障发生在母线上。

4 仿真验证

基于 Matlab 建立 35 kV 配电网多馈出线仿真系统, 其结构拓扑如图3所示。模型包含 5 条馈出线, 变压器中性点通过消弧线圈接地, 变压器采用过补偿方式运行。其中架空线路 $l_1=15$ km, $l_2=20$ km; 电缆线路 $l_3=7$ km, $l_4=9$ km; 线-缆混合线路 $l_5=17$ km, 其中架空线路 11 km, 电缆线路 6 km。架空线、电缆的正序和零序参数如表 1 所示。表中: L_1 、 C_1 分别为每千米线路的正序电感、正序电容; L_0 、 C_0 分别为零序电感、零序电容; 消弧线圈电感值为 0.738 6 H, 其补偿度为 10%。

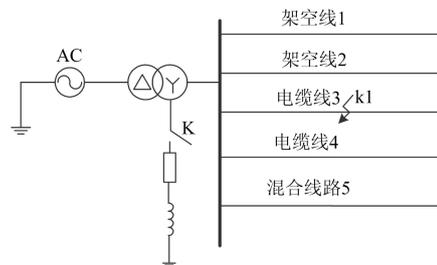


图3 仿真模型拓扑结构

Fig. 3 Arc suppression coil system topology

表1 单位长度线路参数

Table 1 Parameters of feeders per kilometer

参数	电缆线路	架空线路
L_1/mH	0.236 7	1.341
$C_1/\mu\text{F}$	0.328 4	0.010 2
L_0/mH	1.103 3	4.351 1
$C_0/\mu\text{F}$	0.28	0.008

4.1 特征频率求取

系统采样频率为5 kHz, 时间窗口为一个工频周期, 结合模型参数, 求出系统 SFB 频段, 此时 SFB 频段下限为160 Hz, 上限为1 500 Hz。设定系统中电缆线路3发生距离母线3 km 单相接地故障, 过渡电阻20 Ω, 故障合闸角70°。系统各线路在 SFB 频段内各频率点 f_n 的幅值分布如图4所示。其中第1频率点为0 Hz, 第2个频率点为200 Hz, 后续间隔为50 Hz, 以此类推。

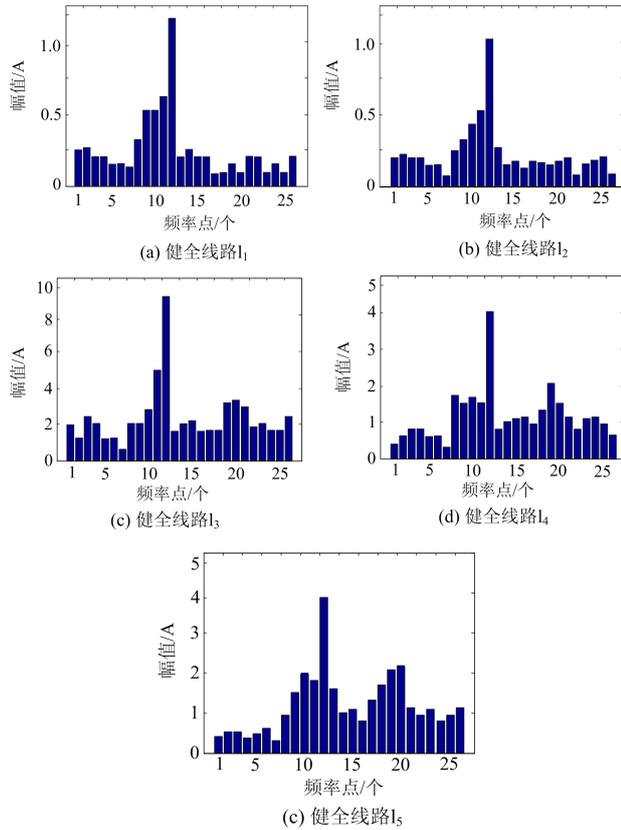


图4 线路各频率点的幅值信息

Fig. 4 Amplitude distribution of each frequency of each line

由图4可知, 单相接地故障发生在高故障合闸角, 此时线路中直流分量幅值较小, 远小于特征频段内频率点电流幅值。故障点位于线路末端, 各线路频谱主成分分布一致, 最大幅值对应的频率点均为700 Hz, 即700 Hz 为该故障条件下各线路的特征频率。

进一步利用傅里叶变换提取该故障条件下各线路工频与特征频率下对应的零序电压、电流相角, 计算相应的零序导纳相角值。图5、图6列举了故障线路 l_3 及健全线路 l_4 的仿真结果。

由图5、图6可知, 无论故障线路 l_3 还是健全线路 l_4 , 工频导纳相角波形近似为一条直线; 特征频

率导纳相角波形都具有一定的波动性, 其均值线位于波动范围内。故障线路的特征频率导纳相角均值与工频导纳相角差值在180°附近, 而健全线路两者差值接近于0°, 利用两频率下的零序导纳相角差值能够正确、直观地区分故障线路与健全线路, 以上特征符合本文的理论分析。

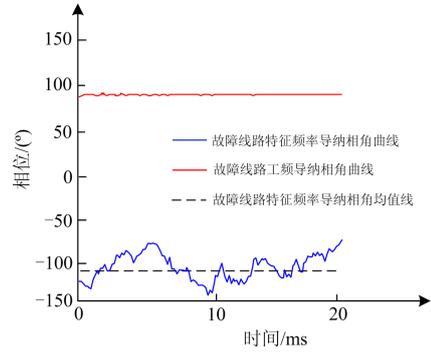


图5 故障线路 l_3 分量相角曲线

Fig. 5 Fault line l_3 component phase angle curve

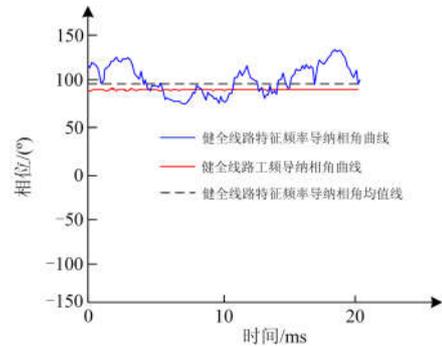


图6 健全线路 l_4 分量相角曲线

Fig. 6 Normal line l_4 component phase angle curve

4.2 不同故障合闸角的仿真

首先设定系统中电缆线路3距离母线5 km 发生单相接地故障, 过渡电阻0 Ω, 故障合闸角分别为10°和45°。故障线路在 SFB 频段内各频率点 f_n 的幅值分布对比如图7所示。针对各线路在此故障时直流分量和特征频率点分量幅值对比如表2所示。

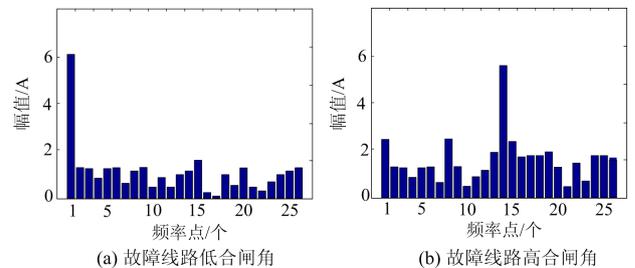


图7 故障线路不同合闸角时各频率点幅值信息

Fig. 7 Amplitude distribution of each frequency of the fault line

表2 故障合闸角判别结果

Table 2 Result of the fault closing angle discrimination

$\theta=10^\circ$	I_{0idc}	I_{0iSFB}	结果	$\theta=45^\circ$	I_{0idc}	I_{0iSFB}	结果
线路1	0.65	0.41	低故障合闸角	线路1	0.23	0.76	高故障合闸角
线路2	0.77	0.36		线路2	0.17	0.65	
线路3	6.39	1.94		线路3	2.67	5.96	
线路4	1.06	0.98		线路4	0.45	1.82	
线路5	1.24	1.07		线路5	0.54	1.66	

由图7可知, 当故障合闸角为 10° 时, 故障线路的直流分量幅值大于 SFB 频段内任一频率点幅值, 即满足 $I_{03ad} > I_{03SFB}$, 符合低故障合闸角的判据要求, 可以判断此故障发生在低故障合闸角。但故障合闸角为 45° 时, 基于直流分量的比较不满足此判据, 故障选线将基于工频分量与特征频率分量的角差比较来完成。表1同样证明了: 基于 $I_{03ad} > I_{03SFB}$ 的合闸角判别式可有效划分故障范围, 为选择合适的选线方法提供了可靠的依据。

进一步设定系统中电缆4在距离母线5 km 发生过渡电阻为 100Ω 、不同故障合闸角的单相接地故障。其故障选线仿真结果如表3、表4所示。

表3 低故障合闸角下的选线结果

Table 3 Fault line selection of the low fault closing angle

θ	I_{01dc}	I_{02dc}	I_{03dc}	I_{04dc}	I_{05dc}	结果
0°	1.07	0.97	1.68	10.21	1.59	正确
10°	0.83	0.76	1.25	7.68	1.37	正确
20°	0.64	0.67	0.88	5.47	0.84	正确
30°	0.44	0.58	0.77	1.62	0.65	正确

表4 高故障合闸角下的选线结果

Table 4 Fault line selection of the high fault closing angle

θ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	结果
30°	28.1°	31.5°	-27.6°	160.3°	-28.2°	正确
45°	20.3°	-18.2°	-15.9°	200.2°	-13.7°	正确
60°	8.7°	8.8°	13.4°	189.3°	12.4°	正确
90°	-6.8°	8.9°	6.7°	182.4°	9.5°	正确

由表3可知, 当故障合闸角较低时, 基于直流特征选线方法能够正确选线, 故障线路直流分量幅值远大于健全线路。数据表明合闸角越低, 两者差距越大, 有效解决了故障合闸角趋于零时选线难的问题。由表4可知, 当故障合闸角较高时, 基于线路工频与特征频率零序导纳角差的选线方法能够正确选线, 故障线路 θ_j 值介于 $135^\circ \sim 225^\circ$, 健全线路 θ_i 值介于 $-45^\circ \sim 45^\circ$, 满足判据要求, 保证了选线的可靠性, 避免误选的发生。

4.3 不同过渡电阻的仿真

表5为混合线路3在距母线3 km 处, 在故障合闸

角为 60° 下发生不同过渡电阻单相接地故障时的仿真结果。

表5 不同过渡电阻下的选线结果

Table 5 Selection results with different transition resistances

R_g/Ω	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	结果
0	10.9°	-8.5°	182.7°	13.9°	12.2°	正确
20	-14.0°	-9.2°	187.5°	-18.7°	17.8°	正确
100	-17.9°	12.9°	169.1°	17.5°	-12.5°	正确
500	24.5°	19.0°	148.7°	-27.2°	-25.7°	正确

由表5可知, 在不高于 500Ω 过渡电阻下, 新的选线方法能够准确、可靠实现选线。在一些特殊情况下, 如 2000Ω 高阻接地故障, 由于电阻过大, 或者故障条件及周边环境的复杂, 其信号提取的精确性已难以保证故障选线的可靠性, 如何提高新方法对于超高阻接地故障的适用性还有待研究。

4.4 不同故障距离的仿真

表6为架空线5在故障合闸角为 45° 时, 距离母线不同距离发生单相接地故障的仿真结果。

表6 不同故障距离下的选线结果

Table 6 Selection results with different fault distances

L/km	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	结果
2	15.2°	11.5°	-19.7°	16.9°	182.2°	正确
5	-7.2°	7.3°	8.4°	-12.3°	171.0°	正确
10	25.2°	13.4°	9.1°	16.7°	198.7°	正确

由表6可知, 各线路的角差值几乎不受故障距离的影响, 而故障线路的角差值与健全线路的角差值差异显著, 故障线路角差值满足判据要求, 选线方法能够正确选出故障线路。

4.5 母线故障的仿真

表7为系统母线发生不同过渡电阻、不同故障合闸角情况时的仿真结果。

表7 母线故障下的选线结果

Table 7 Selection results of bus fault

R_g/Ω	θ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	结果
20	90°	16.1°	-8.2°	6.9°	15.6°	-7.2°	正确
100	45°	-24.5°	11.0°	13.7°	7.7°	13.2°	正确
500	30°	21.1°	17.7°	14.6°	25.2°	13.5°	正确

由表7可知, 在发生母线故障时, 各线路的角差值介于 $-45^\circ \sim 45^\circ$, 满足健全线路的判据范围。数据表明对于任意母线故障, 选线方法都能准确实现故障选线。

5 结论

本文针对配电网经消弧线圈接地时故障选线困难问题, 提出了一种基于线路自身工频与特征频

率上的零序导纳相角差的选线新方法。

(1) 利用 S 变换有效提取系统直流与特征频段内整倍工频频率点幅值信息; 通过比较两部分幅值大小有效判断故障合闸角范围。

(2) 提出特征频率确定原则, 并进一步提出利用故障线路、健全线路工频与特征频率零序导纳相角差构成选线判据。

(3) 利用 Matlab 仿真验证了不同合闸角、不同过渡电阻、不同故障距离以及母线故障时的选线情况, 结果显示具有良好的选线效果。

参考文献

- [1] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
GUO Qingtao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.
- [2] XU Y, LIU J, FU Y. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [3] 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.
- [4] 张钧, 刘洪星, 何正友, 等. 基于瞬时能量函数的故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 1-9.
ZHANG Jun, LIU Hongxing, HE Zhengyou, et al. A novel fault line identification approach based on instantaneous energy function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 1-9.
- [5] 宋金钊, 李永丽, 石峥, 等. 一种新的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 9-15.
SONG Jinzhao, LI Yongli, SHI Zheng, et al. A fault line selection method for resonant earthed system with high accuracy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 9-15.
- [6] 李森, 宋国兵, 康小宁, 等. 基于时域下相关分析法的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 15-20.
LI Sen, SONG Guobing, KANG Xiaoning, et al. Time-domain fault line selection based on correlation analysis in neutral indirect ground system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 15-20.
- [7] 张林利, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 基于区段零序导纳的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 94-98.
ZHANG Linli, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. Fault location method based on zero-sequence admittance of sequence admittance of sequence of sections in non-effectively grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 94-98.
- [8] 王朋, 田翠华, 陈柏超, 等. 基于新型磁控消弧线圈的电磁混合消弧及配合选线新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 173-183.
WANG Peng, TIAN Cuihua, CHEN Baichao, et al. Electromagnetic hybrid arc suppression and a novel method of feeder selection based on the novel magnetic controlled Petersen coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 173-183.
- [9] 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.
- [10] 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]. 电力系统及其自动化, 2014, 38(24): 81-85.
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): 81-85.
- [11] 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.
- [12] 梁睿, 杨学君, 薛雪, 等. 零序分布参数的单相接地故障精确定位研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 472-479.
LIANG Rui, YANG Xuejun, XUE Xue, et al. Study of accurate single-phase grounding fault location based on distributed parameter theory using data of zero sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2015, 30(12): 472-479.
- [13] 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.
- [14] 杜辉, 王清亮, 张璐, 等. 采用希尔伯特黄变换方法实现配电网故障选线[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 60-64.
DU Hui, WANG Qingliang, ZHANG Lu, et al. Fault line selection of distribution network based on Hilbert-Huang transform[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 60-64.
- [15] 张国军, 任荣, 韩静静, 等. 希尔伯特变换在配电网故障选线中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 23-28.
ZHANG Guojun, REN Rong, HAN Jingjing, et al. Application of Hilbert transform in faulty line selection of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 23-28.
- [16] 陈豪威, 王媛媛, 唐夏菲, 等. 基于 S 变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 71-78.
CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, TANG Xiafei, et al. A new fault line selection method for distribution network system based on transient energy and direction of S-transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 71-78.
- [17] 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.
LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
- [18] 汤涛, 黄纯, 江亚群, 等. 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[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 105-111.
TANG Tao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. Fault line method in resonant earthed system based on transient signal correlation analysis under high and low frequencies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 105-111.
- [19] 张仲孝, 苗世洪, 林湘宁, 等. 基于多频带分量重构的小电流接地系统自适应选线新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 210-215.
ZHANG Zhongxiao, MIAO Shihong, LIN Xiangning, et al. A new adaptive faulty line detection approach based on reconstruction of multi-band components for small current neutral grounding system[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 210-215.
- [20] 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.
- [21] 潘本仁, 宋华茂, 张秋风, 等. 小电流接地故障无功功率分析及选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 51-56.
PAN Benren, SONG Huamao, ZHANG Qiufeng, et al. Reactive power analysis and novel faulty selection method in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 51-56.

收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-10-18

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: lzx2007001@163.com

王新(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制。E-mail: 1016358549@qq.com

(编辑 魏小丽)