

基于故障特征频带及形态谱的单相接地故障选线

束洪春¹, 龚振¹, 田鑫萃¹, 董俊², 李胜男³

- (1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南省 昆明市 650051;
2. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江省 哈尔滨市 150001;
3. 云南电网公司 电力科学研究院, 云南省 昆明市 650217)

Single Line-to-ground Fault Line Selection Based on Fault Characteristic Frequency Band and Morphological Spectrum

SHU Hongchun¹, GONG Zhen¹, TIAN Xincui¹, DONG Jun², LI Shengnan³

- (1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650051, Yunnan Province, China;
2. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;
3. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan Province, China)

ABSTRACT: For the problem of low reliability of faulty line selection when small inception angle fault or high impedance fault occurs, by utilizing characteristic band formed by maximum zero mode current energy principle of each line, the amplitude and phase differences of zero mode currents of faulty line and healthy line in the characteristic frequency band are analyzed to avoid inability to unify the characteristic frequency band of each line when frequency distribution of transient currents at each line is not always the same. In this paper, a novel algorithm for faulty line selection method is proposed, combining fusion criteria of the characteristic frequency band and mathematical morphological spectrum. The algorithm uses zero mode currents to extract the characteristic frequency band, and the currents in the characteristic band are utilized for morphological spectrum operation, using morphological spectrum to characterize phase and amplitude differences of the currents in the characteristic band. A large number of data show that, on one hand, characteristic band of zero mode currents can effectively eliminate signal interference, so as to reflect differences of transient currents between faulty line and healthy line; on the other hand, because the analysis of signal morphology is performed under multi scale, morphological spectrum based line selection method has stronger anti-interference ability and higher reliability.

KEY WORDS: fault line selection; high impedance grounding fault; small inception angle fault; characteristic band; mathematical morphological spectrum

摘要: 针对谐振接地系统中发生小故障角故障和高阻接地故障

的故障选线可靠性不高的问题,利用各线路零模电流暂态分量能量和最大原理构成的特征频带,详细讨论了故障线路和健全线路在不同故障情况下的零模电流在特征频带内的相位幅值差异,避免了传统提取特征频带时无法统一各线路特征频带的不足。基于此提出了综合利用特征频带和数学形态谱的融合判据实现故障选线,利用故障零模电流进行特征频带求取,提取特征频带内电流进行形态谱运算,用形态谱表征特征频带特征。PSCAD/EMTDC 及综合实验平台仿真和实测数据表明:一方面零模电流的特征频带能有效滤除信号干扰,使故障线路与健全线路零模电流的幅值和相位差异更显著;另一方面由于形态谱在多尺度下对信号形态进行分析,基于形态谱的选线方法具有较强的抗干扰能力,可靠性更高。

关键词: 故障选线; 高阻抗接地故障; 小故障角故障; 特征频带; 数学形态谱

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0931

0 引言

为避免消弧线圈和高阻故障对选线的影响,目前广泛采用暂态量选线。已经有较多的文献对此方法做出论述,但依旧没有解决高阻接地和故障合闸角较小以及间歇性故障的故障选线问题。文献[1]分析了各馈线零序电压沿线分布特征进行故障选线,但仅依赖零序电压的幅值量进行选线的方法并没有结合实际工程说明其可靠性。文献[2]计算各线路的故障相的重心频率与相间相关系数来作为选线判据,但最终给出的结果对母线故障与接地电阻较小时故障的区分依旧不明显。文献[3]针对现阶段

基金项目: 国家自然科学基金项目(51667010)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51667010).

故障选线算法在高阻故障和小故障角故障条件下选线准确率不高的情况, 引入 2 阶累加生成相关性的配电网故障选线算法。算法凸显了各线路暂态零序电流蕴含的数据形态, 但是并没有结合工程实际更为合理地设定相关系数阈值以选取更为合适的奇异值。文献[4]提出了一种中性点经多电平变流器接地的配电网故障消弧与选线新方法, 但该方法有待实验样机的开发与实际验证其可行性。文献[5]利用 S 变换选线, 除了考虑某频带的暂态分量极性或者幅值信息, 没考虑其他特征量。文献[6]提取暂态行波分量进行选线, 但行波波头容易丢失, 准确选线容易失败。

针对以上分析的不同文献存在的缺陷, 本文的贡献在于: 提出的算法可解决不同补偿度下谐振接地系统发生小故障角单相接地故障和高阻单相接地故障的选线问题, 且具有较高可靠性, 判据清晰直观。且针对单相金属性故障等各类故障具有很好的适用性。

文章拟提出一种基于特征频带和数学形态谱的选线判据。故障特征频带内的波形涵盖零模电流暂态分量的绝大部分信息, 且故障电流波形往往幅值最大、流向和极性与健全线路反向。特征频带以外的波形没有一致规律, 容易形成干扰需滤除出去^[7-9], 而形态谱可简化复杂波形为直观的柱状图, 减小了图形辨识难度^[10-13]。同时采用这两个方法作为融合判据, 可以实现基于形态谱和基于特征频带选线的优势互补, 用形态谱表征特征频带内的波形特征可以最大限度识别波形间的差异且不受谐波和噪声干扰。特征频带采用各条线路在各个频带能量和最大的原则, 可最大程度避免各条线路频带不同的影响, 实现可靠选线。采用 PSCAD 仿真 35 kV 含有 Z 字型变压器的消弧线圈接地配网系统, 同时采用实测数据检验, 皆可验证此算法的有效性。

1 故障电流特点及特征频带

1.1 不同故障角下的电流特点

单相接地故障发生时, 暂态零模电流包含感性分量和容性分量, 其等效电路图如图 1 所示。图中: U_0 是零模电压; C 是杂散电容; L_0 为传输系统电感; R_L 与 L 为消弧线圈的电阻、电感; R_0 是包括过渡电阻在内的传输系统电阻。

单相接地发生时, 其瞬时时刻对应的零模电压 u_0 以及零模电流暂态分量 i_d 分别为

$$u_0 = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

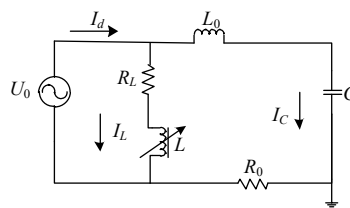


图 1 单相接地故障等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram when single phase to ground fault occurred

$$i_d = i_c + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-t/\tau_c} + I_{Lm} \cos \varphi e^{-t/\tau_L} \quad (2)$$

其中: U_m 为零模电压幅值, $I_{Cm} = U_m \omega C$, $I_{Lm} = U_m / \omega L$, ω_f 是电流自振角频率; ω 为工频角频率; φ 为零模电压初相位; τ_c 、 τ_L 为电容和电感回路的时间常数。

式(2)中第一部分为稳态容性电流与感性电流的幅值之差, 称为对地电流的稳态部分, 另外两部分为电容电流和电感电流直流分量。当 φ 较小时, 零模电流含有大部分电感直流分量, 持续 2~3 个工频周期, 含有很少的容性分量, 当 φ 较大时, 故障电流中电容电流暂态量较多, 但是持续时间才约为 0.5~1.0 倍工频周期。

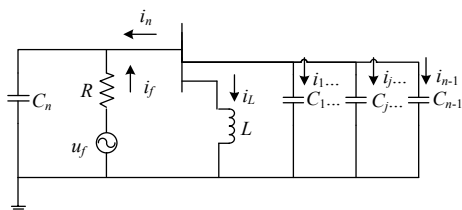
当 φ 较小时, 各线路中的电容电流高频分量都很少, 但流过故障点和消弧线圈的电流中电感分量和其直流部分所占比重很大, 频率范围为 0~50 Hz, 所以故障电流的大部分能量在频率较低的频段。

当 φ 较大时, 故障电流的高频电容电流暂态分量占主要成分, 故障点暂态零模电流容性分量的频率和幅值很大。因此容性电流中, 故障零模电流的能量主要集中在频率较高的频带。

利用小波包分解零模电流暂态分量, 对于谐振接地系统, 采用能量和第二大的频带为特征频带。因为小故障角下电流的能量主要集中于低频段, 而大故障角情况下能量主要集中在高频段, 利用多分辨分析形成的能量和最大原理形成的特征频带可实现不同故障角情况下的可靠识别问题。

1.2 高阻故障下的电流特点

图 2 中有 n 条出线, u_f 是故障点等效电压源, L 为 3 倍电感的消弧线圈, R 为故障点 3 倍阻值高阻, i_L 与 i_f 分别为流经 L 与故障点的零模电流。在故障线路右半部分, $C_j (j=1, 2, \dots, j, \dots, n-1)$ 为各健全线路零模对地分布等效电容, i_j 为各健全线路零模电流, i_n 为故障线路零模电流^[14]。

图2 经消弧线圈系统高阻故障等效电路图(n 条出线)Fig. 2 Equivalent HIF circuit in a resonant grounding system with n lines

针对图2建立二阶微分方程:

$$R(CL \frac{d^2 i_L}{dt^2} + i_L) + L \frac{di_L}{dt} = U_m \sin(\omega_0 t + \theta) \quad (3)$$

其中 C 为各线路包括故障线路的总分布电容

$C = \sum_{j=1}^{n-1} C_j + C_n$, 当 R 处于以下范围时:

$$R > \frac{1}{2} \sqrt{L/C} \quad (4)$$

流过高阻 R 的电流为

$$i_f = -\frac{L_p(A_2 \omega_f - \delta A_1)}{R} e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - \frac{L(-A_1 \omega_f - \delta A_2)}{R} e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (5)$$

其中

$$A_1 = -B \sin \varphi; \quad A_2 = \frac{-\delta B \sin \varphi - \omega_0 B \cos \varphi}{\omega_f} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{1}{2RC}; \quad \omega_f = \sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{1}{2RC})^2} \quad (7)$$

流过健全线路的零模电流如式(8)所示。

$$i_j = LC_j(\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f) e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) + LC_j(\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 - 2\delta A_1 \omega_f) e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (8)$$

流过故障线路的零模电流如式(9)所示。

$$i_n = -[A_1 + L(C - C_n)(\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f)] e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - [A_2 + L(C - C_n)(\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 + 2\delta A_1 \omega_f)] e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (9)$$

对比流过健全线路零模电流与故障线路零模电流可知,二者极性相反,且不同的故障电阻导致衰减系数 δ 与自振频率 ω_f 不同。

1.3 特征频带的确定方法

为了防止振荡的发生,一般中性点经消弧线圈接地系统都是过补偿,即采用非周期性振荡回路,见图1, $R_0 \geq 2\sqrt{L_0/C}$ 。那么它的暂态电容电流为

$$i_{C.os} = \frac{u_0}{L_0 \omega_0} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t \quad (10)$$

式中, ω_0 为回路的自振荡角频率。所以接地电流的

暂态分量为

$$i_{d.os} = i_{C.os} + i_{L.os} = \frac{u_0}{L_0 \omega_0} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t + I_{Lm} \cos \varphi e^{-t/\tau_L} \quad (11)$$

一般情况下, ω_0 / ω 比较大,而且 $i_{C.os}$ 和 $i_{L.os}$ 的频率相差比较大,所以在发生接地故障的初始阶段,暂态接地电流的主要特征由暂态电容电流确定。

因为暂态过程非常短暂,以致电源电压的变化对故障点暂态电容电流的影响可以忽略不计。当

$R_0 \approx 2\sqrt{L_0/C}$ 时,自由振荡分量

$$i_{C.os} \approx \frac{u_0}{L_0} t e^{-\delta t} \quad (12)$$

自由振荡分量达到最大值的时间 $t = 1/\delta = 2L_0/R_0$, 所以由此可以得到其最大值为

$$i_{C.osmax} \approx 2u_0 e^{-1}/R_0 \quad (13)$$

基于上述分析可知,暂态接地电容电流的频率很高,幅值很大。因此,暂态接地电容电流中能量较大的频带包含了暂态电容电流的主要特征。采用小波包对暂态信号作多分辨分析,可以根据能量和最大的原则选择特征频带来获取暂态电容电流的主要特征。

在谐振接地系统中,发生单相接地故障前,故障线路和健全线路的零模电流不为零,含有幅值很小的不对称分量,故障线路与健全线路零模电流中的不对称分量大小和相位均相近;由于电感电流的补偿作用,故障线路与健全线路零模电流中的稳态工频分量大小和相位也可能相近。因此,零模电流特征频带的暂态信息能更显著地反映故障线路与健全线路暂态电流的幅度和相位差异;母线故障时,各线路特征频段的暂态电流都具有极强的相似性,且极性均相同。由此可知,特征频带内含有故障零模电流的主要信息,对特征频带内的暂态信息进行分析能实现完善的选线,同时有必要滤除工频所在的频带,所以选取能量和次最大的频带为特征频带。尽管各条线路的暂态电流能量集中的频率可能不一致,即各条出线的特征频率虽然不一致,但由于故障馈线的暂态能量起着主导作用,所以各馈线在各个频率点处能量和最大值对应的频率与故障馈线能量最集中的频率一致,这一频率的零序电流故障能量特征最明显。

对从零序电流互感器获得的故障电流暂态部分代入小波包分解,代入式(14)计算暂态零模电流在各频带上的能量。

$$\varepsilon = \sum_n [\omega_k^{(j)}(n)]^2 \quad (14)$$

式中 $\omega_k^{(j)}(n)$ 为小波包分解第 (j, k) 子频带下的系数, 各子频带下共有 n 个系数。

小波函数需有较好的频域特性以减小频谱的泄露和混叠^[15]。dbN 以其广泛的适用性满足此要求, N 变大则时域支集变长, 时间局部性变差。研究表明当 N 的值增大到 10 以后, 分频能力与 db10 很相似, 最后证实使用 db10 小波可以可靠选线^[7]。同时, 应该合理考虑分解层数, 层数太多则使得带宽变小, 采样点就少, 进而使得算法灵敏度下降; 反之则带宽太大, 信息量过多, 可能会混入干扰因素, 导致可靠性变低。所以选用 5 到 6 层分解比较合适。

具体方法为: 采用 db10 小波包对零模电流进行 5 层分解, 能量次最大的频率范围含有故障零模电流的主要信息。按式(14)计算各线路零模电流在 5 个频带上的能量和, 选出能量和第二大的频带为特征频带。

2 零模电流数学形态谱检测

在配电网发生单相接地故障时, 各馈出线路零模电流会突然增大, 而故障线路与健全线路的零模电流突变方向相反。此后半个周期时间内一般不会发生“倒相”, 即故障发生后半周期时间内故障线路零模电流与健全线路零模电流初始行波波头方向相反, 且故障线路零模电流的包络线面积比健全线路零模电流的包络线面积大。通过对各条线路的特征频带内的零模电流进行多刻度形态谱运算, 能够很好地将此特征表现出来。形态谱是定量描述图形特征的有力工具, 执行数学形态开闭运算后对形态面积求导得出。形态学开运算是一种对信号的非扩张性运算, 使得目标信号轮廓光滑; 闭运算是一种扩张性运算, 可填平沟谷、裂缝, 可滤除信号中的低谷噪声。序列 $f(x)$ 关于 $g(x)$ 的开运算和闭运算分别定义为:

$$\begin{cases} f \circ g & \oplus g \\ f \bullet g = f \oplus g \ominus g \end{cases} \quad (15)$$

式中: \circ 表示开运算; \bullet 表示闭运算; \oplus 表示膨胀运算; \ominus 表示腐蚀运算。 $f(x)$ 是采样得到的一维多值待处理信号, 为一非负函数, $x \in \mathbf{R}^m$, $m=1, 2, \dots$; $g(x)$ 为一凸的结构函数。 $f(x)$ 的形态谱的定义为

$$P_{S_f}(+r, g) = -\frac{dA(f \circ g)}{dr}, \quad r \geq 0 \quad (16)$$

$$P_{S_f}(-r, g) = \frac{dA(f \bullet g)}{dr}, \quad r > 0 \quad (17)$$

式中: $A(f) = \int_{\mathbf{R}^m} f(x)$ 表示在定义域内的 $U(f(x))$ 面积; $U(f(x))$ 称为函数 f 的本影, 定义为 $U(f(x)) =$

$$\{(x, t) | x \in \mathbf{R}^m, t \in \mathbf{R}, t \leq f(x), x \in \text{supp}(f)\}$$

显然, 变换后的图像具有性质:

$$U(f(x)) = U(f \circ g) \quad (18)$$

$$U(f(x)) = U((f \bullet g)_0) \subseteq U((f \bullet g)_1) \subseteq U((f \bullet g)_2) \subseteq \dots \quad (19)$$

在结构函数 $g(x)$ 的设计与选择上, 目前尚没有系统方法。一般来说, 结构函数尺寸和形状的设计取决于变换后要保持的信号形状, 只有与结构元素的尺寸和形状相匹配的信号才能被保持。通过大量试验分析比较, 结合电力系统电压波形的特点, 本文以正弦波的正半周期为结构函数, 该结构函数支持域的中点在原点处, 关于纵轴对称, 表示为

$$g(t) = G_m \sin(\pi(t+1)/2), \quad t \in [-1, 1] \quad (20)$$

式中 G_m 为幅值。

对特征频带下的零模电流进行数学形态谱检测, 这里待处理信号 $f(x)$ 则为特征频带下的各线路零模电流 $i(t)$, 将其与 $g(x)$ 代入式(16) (17)可求得正负刻度下的形态谱值。 $\{f \circ g\}$ 和 $\{(f \bullet g)_{i-1} - (f \bullet g)_i\}$ 形成了 f 的分割, 这体现了形态谱在不同刻度下的变化情况。与直接通过检测行波首波头极性作为选线判据的故障选线方法相比, 形态谱由于在多刻度下对信号形态进行分析, 则基于特征频带和形态谱的故障选线方法具有较强的抗干扰能力, 可靠性更高, 它对采样频率要求不高, 一般为 10 kHz 可满足要求。

3 选线判据

首先用采样率 10 kHz 录取半个工频周期的零模电流 I_{0j} , 对其 5 层小波分解, 利用 db10 小波进行分解, 依据分解得到的系数能量和最大原则选择特征频带。对特征频带内电流进行形态谱运算, 通过对各线路零模电流形态谱的正、负刻度谱值分别求和之后再求取其比值 ρ_i ($i=1, 2, \dots, n$, n 为馈出线路总数), 选出 3 个比值最大的依次设为 ρ_j, ρ_k, ρ_m , 若满足 $\rho_j > \rho_k + \rho_m$, 则第 j 条出线故障, 否则母线发生故障。根据故障线路正刻度谱值明显大于其负刻度谱值, 且最大谱值位于正刻度来判断故障线路。具体实现方式如下:

1) 用采样率 10 kHz 采集各条线路半周期内的零模电流 I_{0j} , $j=1, 2, \dots, n$, n 为配网馈出线路数。

2) 对采集到的电流进行 db10 小波 5 层分解,

采用式(14)求取各频带信号能量第二大值,对应的频带为特征频带。

3) 用形态滤波器对特征频带内电流进行滤波,按式(16)(17)求取负正各 5 个尺度的形态谱^[13],并按式(21)进行归一化处理:

$$N_{PS}(r,g)=\frac{P_s(r,g)}{\max |P_s(r,g)|} \tag{21}$$

4) 通过对各线路零模电流形态谱的正、负刻度谱值分别求和之后再求取其比值 ρ_i , $i=1,2,\dots,n$, n 为馈出线路总数。

5) 选出 3 个比值最大的依次设为 ρ_j, ρ_k, ρ_m , 若满足 $\rho_j > \rho_k + \rho_m$, 则第 j 条出线故障, 否则母线发生故障。

算法流程如图 3 所示。

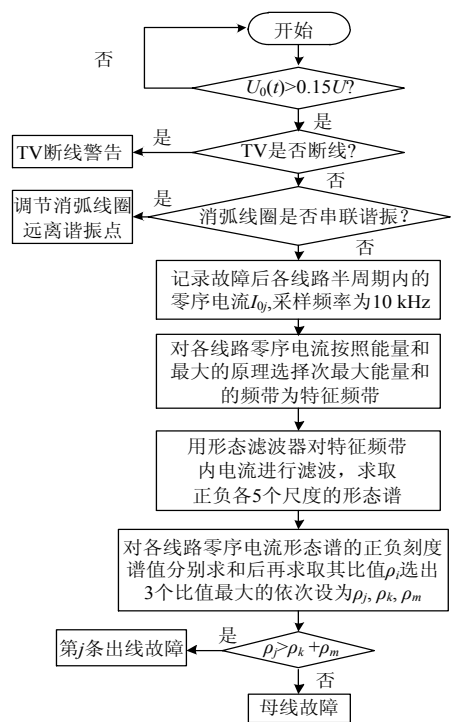


图 3 故障线路选线流程
Fig. 3 Flow chart of fault line selection

4 仿真分析及验证

仿真算例如图 4 所示。系统为一个 110 kV/35 kV 变电所, 含有 6 条线路, 利用 Z 型变压器经消弧线圈接地, 其补偿系数为过补偿 15%, 电流互感器为 LSJC-35 型。6 条线路包括架空线路、电缆线路、线缆混合线路。架空线为 JS1 杆型, LGJ-70 型导线, 档距 80 m。电缆为 YJLW03 型。线路具体参数如表 1 所示^[16]。

消弧线圈补偿度为 10%。当单相金属性故障发生在架空线路 L₁ 时, 故障距离设置为 5 km, 故障角度设置 30°, 接地电阻 20 Ω, 各条线路故障后半

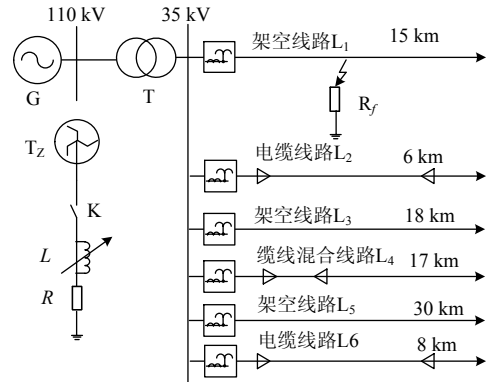


图 4 辐射状谐振接地系统结构
Fig. 4 Structure of radiated neutral point through arc suppression coil grounding system

表 1 线路结构 Tab. 1 Line structure					
线路	杆型	档距/ m	弧垂	导线 型号	线路 长度/km
L ₁	JC ₁ 架空线	120	1.032	LGJ-70/10	15
L ₂	YJV23-35/95 电缆	—	—	—	6
L ₃	JM ₁ 架空线	150	1.518	LGJ-120/20	18
L ₄	YJV23-35/95 电缆 JS ₁ 架空线	— 140	— 1.271	— LGJ-95/15	5 12
L ₅	JS ₁ 架空线路	140	1.271	LGJ-95/15	30
L ₆	YJV23-35/95 电缆	—	—	—	8

个周期内的零模电流如附图 A1 所示。

按照第 3 节所提算法确定各线路特征频带。选用 db10 小波函数对 6 条线路暂态零模电流进行 5 层分解, 所得结果如附图 A2 所示。其中横坐标为分解的层数, 纵坐标为零模电流能量值。

由附图 A2 所示, 能量和最大和次最大的频带为第 4 和第 5 层分解, 选用第 5 层分解的频带为特征频带, 在该频带上的各线路零模电流波形如附图 A3 所示。

由附图 A3 可见, 故障线路与其余健全线路在特征频带内的电流波形幅值差异很大, 且极性相反。用形态滤波器对特征频带内零模电流进行滤波, 求取形态谱, 所得各线路零模电流形态谱如附图 A4 所示。由各线路零模电流的形态谱可以看出, 故障线路正刻度谱值明显大于其负刻度谱值, 且最大谱值位于正刻度。

附表 A1 为不同补偿度下, L₁ 发生单相接地故障时的形态谱选线结果; 附表 A2 为 L₂ 电缆线路距母线 3km 处发生金属性单相接地故障时的形态谱选线结果; 附表 A3 为不同故障合闸角下线路 L₁ 发生单相接地故障时的形态谱选线结果; 附表 A4 为不同过渡电阻下, 线路 L₄ 发生单相接地故障时的形态谱选线结果。结果表明, 本文方法对于 1000 Ω 及以内的高阻接地故障能可靠选线。当接地电阻为

2000 Ω 时, 故障线路 ρ 值小于健全线路, 所以该方法试用于接地电阻为 1000 Ω 及以内的高阻接地故障选线。由附表 A1—A4 可见, 在不同故障情况下, 过渡电阻处于 1000 Ω 及以内时, 故障线路 ρ 值最大, 且大于其余线路中最大的两个 ρ 值之和, 该方法可有效选出故障线路。针对母线故障, 按照故障发生率最高的单相接地故障进行仿真, 所得结果如附表 A5 所示。由附表 A5 可知, 并没有哪条线路的 ρ 值大于其余线路中最大的两个 ρ 值之和, 所以判定为母线故障, 所以该方法可有效鉴别母线故障。

5 实测数据分析及验证

5.1 单相金属性接地故障

对于有 6 条出线的池店变电站, 中性点采用经消弧线圈接地方式, 出线共有 6 回架空线路, 全长 18.572 km, 主干线采用 1×LGJ-185/30 钢芯铝绞线。选取 2008 年 8 月 9 日发生单相金属性接地故障的实测零模波形如图 5 所示。

按能量最大原则对所测各线路电流求取特征频带, 各线路在各频带上的能量和如图 6 所示。由图 6 所示, 能量和最大和次最大的频带为第 3 和第 4 层分解, 选用第 4 层分解的频带为特征频带,

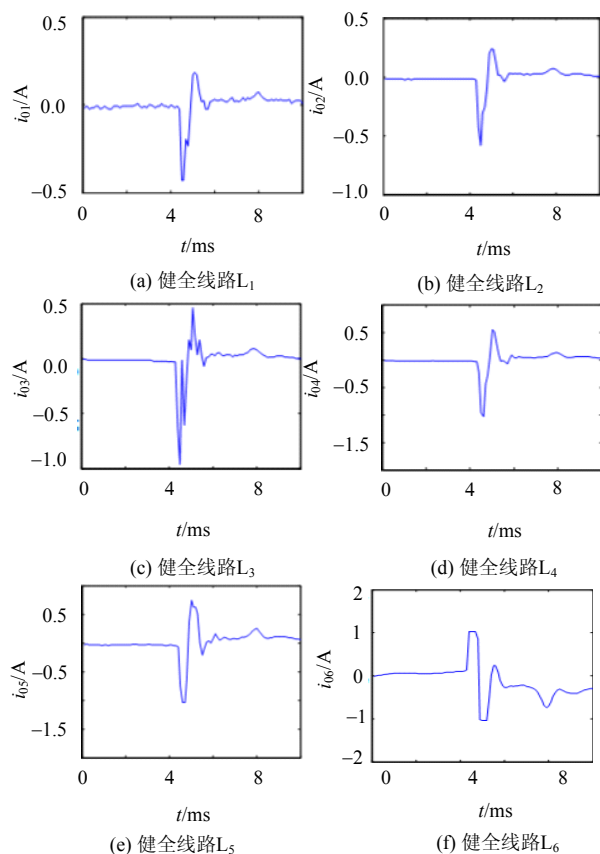


图 5 池店变线路 L_6 发生单相接地时各线路零模电流
Fig. 5 Zero mode current of each line in single phase grounding fault occurs at line L_6 in Chidian substation

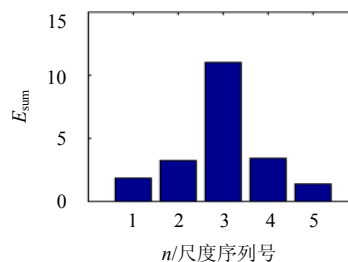


图 6 池店变线路 L_6 发生单相接地各线路零模电流能量和
Fig. 6 Zero mode current summing energy of each line when single phase grounding fault occurs at line L_6 in Chidian substation

在该频带上的各线路零模电流波形如图 7 所示。对特征频带内电流求得形态谱如图 8 所示, 由各线路零模电流的形态谱发现, 故障线路正刻度谱值明显大于其负刻度谱值, 各线路正负刻度谱值的商如附录表 B1 所示。

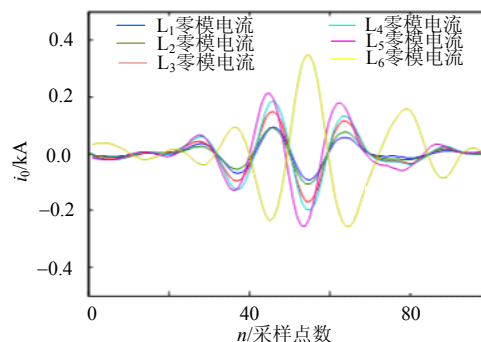


图 7 线路 L_6 发生单相金属性接地时各线路在特征频带内的电流

Fig. 7 Current of each line in the characteristic frequency band when single phase grounding fault occurs at line L_6

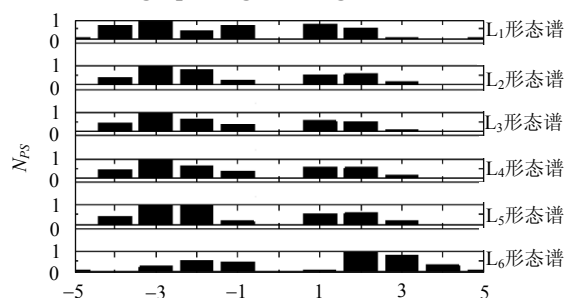


图 8 线路 L_6 发生单相金属性接地时各线路零模电流形态谱

Fig. 8 Form spectrum of zero mode current of each line when single phase grounding fault occurs at line L_6

5.2 单相高阻接地故障

对于有 6 条出线的池店变电站, 选取 2009 年 6 月 13 日发生单相高阻接地故障的实测零模波形如附录图 B1 所示。按能量最大原则对所测各线路电流求取特征频带, 各线路在各频带上的能量和如附录图 B2 所示。

由附图 B2 所示, 能量和最大和次最大的频带为第 4 和第 5 层分解, 选用第 5 层分解的频带为特

征频带,在该频带上的各线路零模电流波形如附图B3所示。求得形态谱见附图B4,由各线路零模电流的形态谱发现,故障线路正刻度谱值明显大于其负刻度谱值,各线路正负刻度谱值的商如附表B2所示,结果确能实现可靠选线问题。

6 算法验证

XBL-2010 配电网单相故障选线装置为本团队自主研发完成,已于多处变电站安装运行,选线效果良好。本节采用 RTDS 与 XBL-2010 配电网单相故障选线装置的模拟实验台对所提算法进行验证。图9为本实验平台。

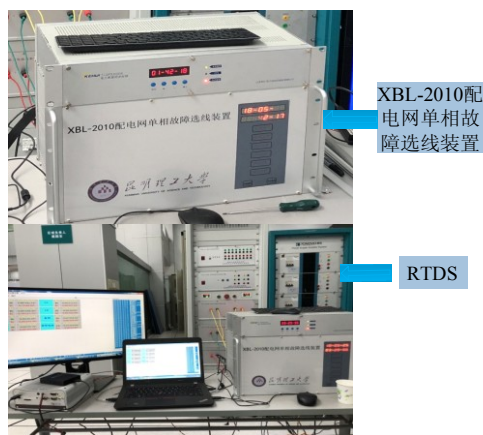


图9 模拟实验平台

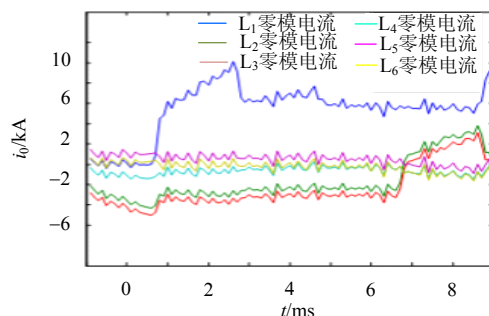
Fig. 9 Simulation experiment platform

按照图4所示的辐射状谐振接地系统在RTDS中建模,仿真当单相高阻故障发生在架空线路 L_1 时,故障距离设置为5 km,故障角度设置 30° ,接地电阻 $1000\ \Omega$,各条线路故障后半周期内的零模电流如图10(a)所示。

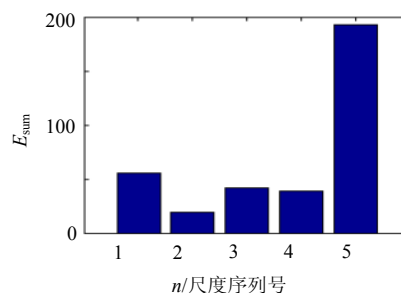
由图10(b)可得,选用第1层分解的频带为特征频带,在该频带上的各线路零模电流波形如图11所示。求得形态谱如图12所示,由各线路零模电流的形态谱发现,故障线路正刻度谱值明显大于其负刻度谱值,各线路正负刻度谱值的商如附表B3所示,结果确能实现可靠选线。经过模拟实验平台研究发现,针对 $10\sim 300\ \Omega$ 单相稳定性接地故障该算法故障选线正确率到达100%; $10\sim 300\ \Omega$ 单相间隙性接地故障, $1000\ \Omega$ 单相稳定性接地故障综合选线正确率达90%以上。限于篇幅此处不详细描述。

7 结论

1) 不同类型的故障导致的故障暂态零模电流在频域内无统一分布规律,可能导致形态谱选线失败。采用特制频带内的故障波形可以滤除暂态信号的干扰,使得得出的波形更光滑且区别度较高。



(a) 各线路半周期内零模电流



(b) 各线路零模电流能量和

图10 各条线路故障后半周期内的零模电流及各线路在5个特征频带上的能量和

Fig. 10 Zero mode current of each line and their summing energy in 5 frequency band of each line

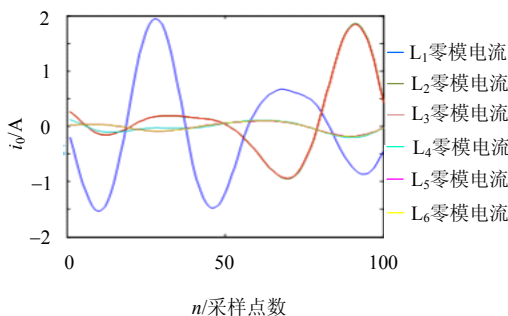


图11 线路 L_1 发生高阻接地时6条线路在特征频带内的电流

Fig. 11 Currents of six lines in the characteristic frequency band when high impedance grounding fault occurs at line L_1

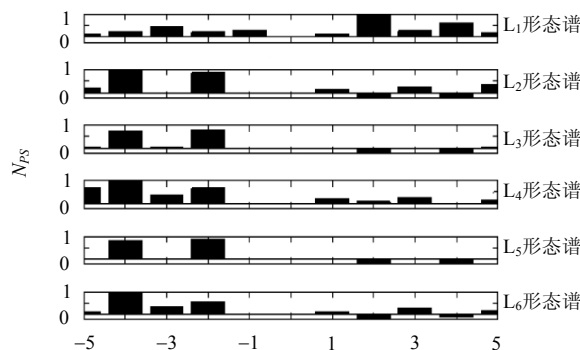


图12 线路 L_1 发生高阻接地时各线路零模电流形态谱
Fig. 12 Form spectrum of zero mode current of each line when high impedance grounding fault occurs at line L_1

2) 利用形态谱的多刻度运算可以表征故障相电流的特征,可以用于对故障线路选线问题。

3) 通过结合特征频带和形态谱的融合判据可

以有效实现故障线路和健全线路的电流区别。仿真结果表明此法有效可行。实测数据和实验平台仿真均证明该方法具有较高的现场应用价值。

4) 对于高阻故障, 零模电流提取的时窗的选择和金属性故障有差异, 都是提取故障首波头部分进行选线, 时窗选取不同特征频带内波形的差异性不同, 可能导致选线失败。比如当发生 2000Ω 接地电阻故障。如何面对不同故障类型进行时窗的确定是今后需要深入研究的问题。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 梁睿, 杨学君, 彭楠, 等. 基于广域零序分布电压特征的小电流接地选线方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3236-3242.
Liang Rui, Yang Xuejun, Peng Nan, et al. A method for single-line-to-ground fault feeder selection based on the characteristic of wide area zero sequence voltage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3236-3242(in Chinese).
- [2] 刘谋海, 王媛媛, 曾祥君, 等. 基于暂态相电流特征分析的故障选线新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 30-36.
Liu Mouhai, Wang Yuanyuan, Zeng Xiangjun, et al. Novel method of fault line selection based on characteristic analysis of transient phase-current[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(1): 30-36(in Chinese).
- [3] 魏向向, 温渤婴. 基于 2 阶累加生成相关性的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1674-1682.
Wei Xiangxiang, Wen Boying. A novel fault line detection method based on 2-order accumulated generating operation correlation analysis for resonant earthed system[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1674-1682(in Chinese).
- [4] 郭谋发, 陈静洁, 张伟骏, 等. 基于单相级联 H 桥变流器的配电网故障消弧与选线新方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2677-2684.
Guo Moufa, Chen Jingjie, Zhang Weijun, et al. A novel approach for fault arc extinguishing and feeder selection in distribution networks based on single phase cascade H-bridge converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2677-2684(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 姜博, 董新洲, 施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
Jiang Bo, Dong Xinzhou, Shi Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current travelling wave for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227 (in Chinese).
- [7] 束洪春. 配电网络故障选线[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 122-123.
- [8] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 144-154.
- [9] 徐佩霞, 孙功宪. 小波分析与应用实例[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996: 10-20.
- [10] 黄南天, 张卫辉, 蔡国伟, 等. 采用改进多分辨率快速 S 变换的电能质量扰动识别[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1412-1418.
Huang Nantian, Zhang Weihui, Cai guowei, et al. Power quality disturbances classification with improved multiresolution fast s-transform[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1412-1418(in Chinese).
- [11] 欧阳森, 黄润鸿. 基于形态边缘检测的电能质量暂态扰动定位方法[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 63-67.
Ou Yangsen, Huang Runhong. A method of locating transient disturbance of power quality based on morphological edge detection [J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 63-67(in Chinese).
- [12] 李天云, 祝磊, 王飞, 等. 基于数学形态谱的配电网接地选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 35-38.
Li Tianyun, Zhu Lei, Wang Fei, et al. A new method of distribution network grounding line selection based on mathematical morphology spectrum[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 35-38(in Chinese).
- [13] 陈仕龙, 曹蕊蕊, 毕贵红, 等. 基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 67-72.
Chen Shilong, Cao Ruirui, Bi Guihong, et al. Single side current transient protection of UHVDC transmission line based on mathematical morphology spectrum [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 67-72(in Chinese).
- [14] 陈筱菁, 薛永端, 王超, 等. 基于同步量测的谐振接地系统高阻接地故障区段暂态定位[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 93-99.
Chen Xiaolei, Xue Yongduan, Wang Chao, et al. Synchronous measurement based transient high resistance earth fault location in resonant grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 93-99 (in Chinese).
- [15] 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-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75(in Chinese).
- [16] 束洪春, 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(in Chinese).



束洪春

收稿日期: 2018-05-02.

作者简介:

束洪春(1961), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 副校长, 国家自然科学基金项目评审专家, 全国优秀教师, 主要研究方向为新型继电保护与故障测距、数字信号处理及其应用、电力系统 CTI 技术等, E-mail: hongchunshu@163.com;

龚振(1993), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压防雷、配网选线保护与故障定位;

田鑫萃(1985), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为新型继电保护与故障测距, E-mail: 1105479731@qq.com.

(责任编辑 李兰欣)

附录 A

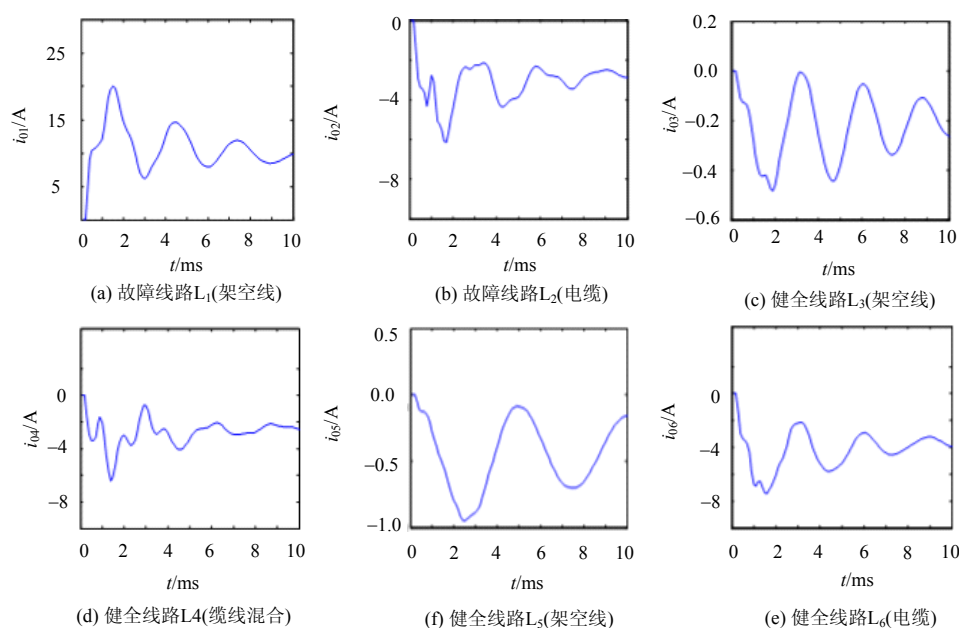


图 A1 线路 L₁ 发生单相接地时各线路半周期内的零模电流

Fig. A1 Zero mode current in half cycle of each line in single phase grounding fault occurs at line L₁

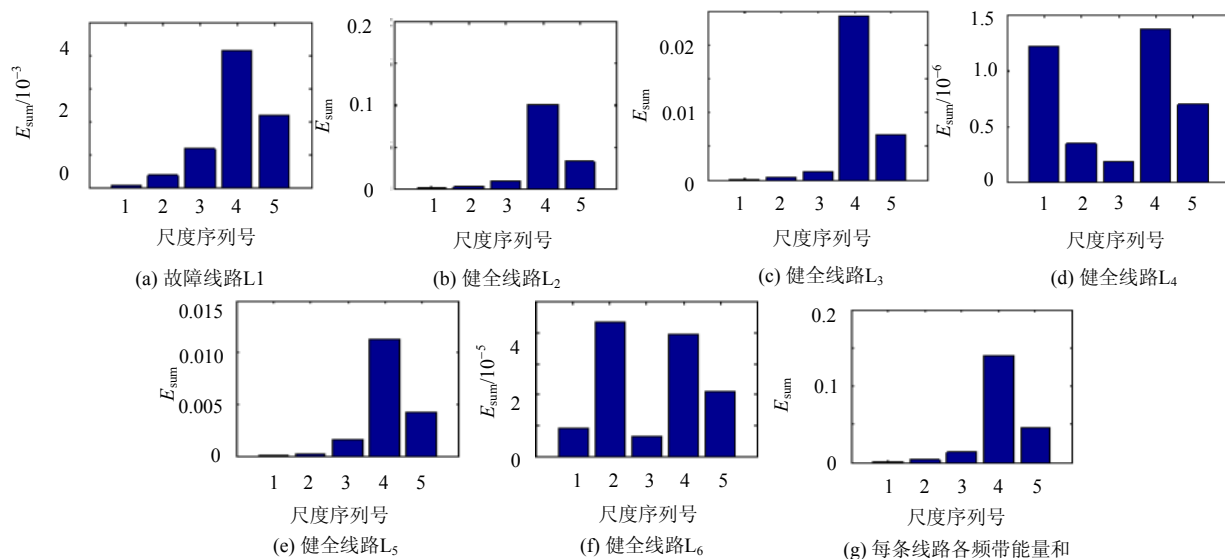


图 A2 线路 L₁ 发生单相接地时各线路零模电流能量谱

Fig. A2 Zero mode current energy of each line when single phase grounding fault occurs at line L₁

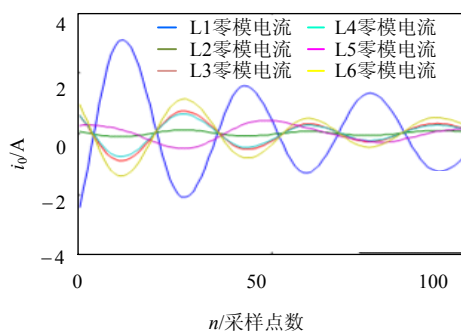


图 A3 线路 L₁ 发生单相接地时各线路在特征频带内的电流

Fig. A3 Current of each line in the characteristic frequency band when single phase grounding fault occurs at line L₁

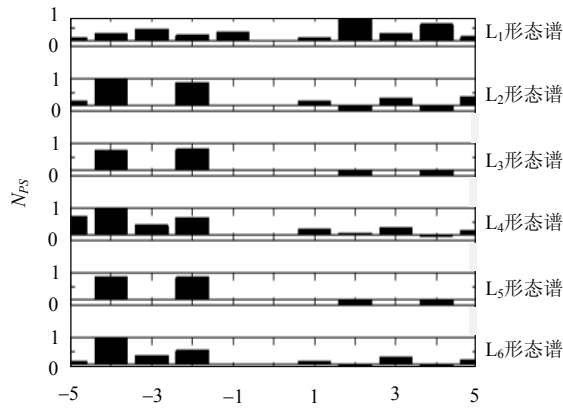


图 A4 线路 L_1 发生单相接地时各线路零模电流形态谱

Fig.A4 Form spectrum of zero mode current of each line when single phase grounding fault occurs in line L_1

表 A1 不同补偿度下的选线结果
Tab. A1 Results under different compensation degree of line selection

补偿度	L ₁ 谱值和		L ₂ 谱值和		L ₃ 谱值和		L ₄ 谱值和		L ₅ 谱值和		L ₆ 谱值和	
	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度
8%	2.80	0.64	0.92	2.61	1.21	2.64	0.89	2.67	0.83	2.54	1.11	2.98
	$\rho=4.375$		$\rho=0.352$		$\rho=0.458$		$\rho=0.333$		$\rho=0.327$		$\rho=0.372$	
10%	2.91	0.93	0.80	2.84	1.00	2.76	0.94	2.64	0.73	2.32	0.80	2.53
	$\rho=3.129$		$\rho=0.282$		$\rho=0.362$		$\rho=0.356$		$\rho=0.315$		$\rho=0.316$	
15%	2.93	0.85	0.85	2.78	0.96	2.88	1.03	2.70	0.98	2.15	0.95	2.78
	$\rho=3.447$		$\rho=0.306$		$\rho=0.333$		$\rho=0.381$		$\rho=0.456$		$\rho=0.342$	
选线结果	故障线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路	

注：负刻度在求和后去绝对值与正刻度和进行比较。

表 A2 电缆线路发生单相接地故障时的选线结果
Tab. A2 Fault line selection results when SLG fault occurs at cable lines

L ₁ 谱值和		L ₂ 谱值和		L ₃ 谱值和		L ₄ 谱值和		L ₅ 谱值和	
正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度
1.29	2.51	2.32	1.54	1.31	2.90	1.82	2.71	1.45	2.49
$\rho=0.514$		$\rho=1.506$		$\rho=0.452$		$\rho=0.672$		$\rho=0.582$	
健全线路		故障线路		健全线路		健全线路		健全线路	

注：负刻度在求和后去绝对值与正刻度和进行比较。

表 A3 不同故障合闸角下的选线结果
Tab. A3 Results under different fault switching Angle of line selection

合闸角	L ₁ 谱值和		L ₂ 谱值和		L ₃ 谱值和		L ₄ 谱值和		L ₅ 谱值和		L ₆ 谱值和	
	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度
0°	2.69	0.80	0.98	2.31	0.97	2.67	0.72	3.10	0.94	2.95	0.79	2.81
	$\rho=3.363$		$\rho=0.424$		$\rho=0.363$		$\rho=0.232$		$\rho=0.319$		$\rho=0.281$	
45°	2.53	0.95	0.83	2.44	0.94	3.45	0.91	3.00	0.48	3.10	0.88	2.57
	$\rho=2.663$		$\rho=0.340$		$\rho=0.272$		$\rho=0.303$		$\rho=0.155$		$\rho=0.342$	
90 度	2.88	1.22	0.84	2.25	0.87	2.87	1.03	2.75	0.72	3.31	0.95	3.22
	$\rho=2.361$		$\rho=0.373$		$\rho=0.303$		$\rho=0.375$		$\rho=0.218$		$\rho=0.295$	
选线结果	故障线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路	

注：负刻度在求和后去绝对值与正刻度和进行比较。

表 A4 不同过渡电阻下的选线结果												
Tab. A4 Results under the different transition resistance of line selection												
过渡电阻	L ₁ 谱值和		L ₂ 谱值和		L ₃ 谱值和		L ₄ 谱值和		L ₅ 谱值和		L ₆ 谱值和	
	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度
20Ω	2.33	1.32	0.81	2.01	1.15	2.21	1.16	2.98	0.65	2.69	1.21	2.57
	ρ=1.765		ρ=0.403		ρ=0.520		ρ=0.389		ρ=0.242		ρ=0.471	
500Ω	2.88	1.22	0.84	2.25	0.75	2.87	1.03	2.75	0.86	2.67	0.90	2.64
	ρ=2.361		ρ=0.373		ρ=0.261		ρ=0.375		ρ=0.322		ρ=0.341	
1000Ω	1.34	0.82	1.06	1.44	0.94	1.56	1.07	1.53	1.29	2.11	1.03	1.45
	ρ=1.63		ρ=0.74		ρ=0.60		ρ=0.69		ρ=0.61		ρ=0.71	
2000Ω	2.84	2.79	2.97	2.75	2.67	3.95	3.11	2.78	0.39	2.62	2.78	3.12
	1.02		1.08		0.68		1.12		0.15		0.89	
选线结果	故障线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路	
注：负刻度在求和后去绝对值与正刻度和进行比较。												
表 A5 母线故障时的选线结果												
Tab. A5 Fault line selection results when fault occurs at bus												
L ₁ 谱值和		L ₂ 谱值和		L ₃ 谱值和		L ₄ 谱值和		L ₅ 谱值和		L ₆ 谱值和		
正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	
1.60	1.60	0.95	1.41	1.52	1.80	1.96	1.92	0.3	1.83	1.19	2.93	
ρ=1		ρ=0.67		ρ=0.84		ρ=1.02		ρ=0.16		ρ=0.41		
健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		

附录 B

表 B1 L ₆ 线路发生单相接地故障时的选线结果											
Tab. B1 Fault line selection results when SLG fault occurs at L ₆											
L ₁ 谱值和		L ₂ 谱值和		L ₃ 谱值和		L ₄ 谱值和		L ₅ 谱值和		L ₆ 谱值和	
正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度
1.33	2.79	1.28	2.44	1.17	2.38	1.18	2.39	1.29	2.45	2.1	1.17
$\rho=0.48$		$\rho=0.52$		$\rho=0.49$		$\rho=0.49$		$\rho=0.53$		$\rho=1.79$	
健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		故障线路	
注：负刻度在求和后去绝对值与正刻度和进行比较。											

表 B2 L ₆ 线路发生高阻接地故障时的选线结果											
Tab. B2 Fault line selection results when high impedance fault occurs at L ₆											
L ₁ 谱值和		L ₂ 谱值和		L ₃ 谱值和		L ₄ 谱值和		L ₅ 谱值和		L ₆ 谱值和	
正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度
0.14	2.19	0.20	1.92	0.14	4.28	0.13	3.7	0.3	3.41	4.48	0.02
$\rho=0.06$		$\rho=0.10$		$\rho=0.03$		$\rho=0.04$		$\rho=0.09$		$\rho=224$	
健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		故障线路	
注：负刻度在求和后去绝对值与正刻度和进行比较。											

表 B3 L ₁ 线路发生高阻接地故障时的选线结果											
Tab. B3 Fault line selection results when high impedance fault occurs at L ₁											
L ₁ 谱值和		L ₂ 谱值和		L ₃ 谱值和		L ₄ 谱值和		L ₅ 谱值和		L ₆ 谱值和	
正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度	正刻度	负刻度
2.45	0.94	0.61	2.01	0.01	1.51	0.46	2.42	0.01	1.93	0.44	1.97
$\rho=2.61$		$\rho=0.30$		$\rho=0.01$		$\rho=0.19$		$\rho=0.01$		$\rho=0.22$	
故障线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路		健全线路	
注：负刻度在求和后去绝对值与正刻度和进行比较。											

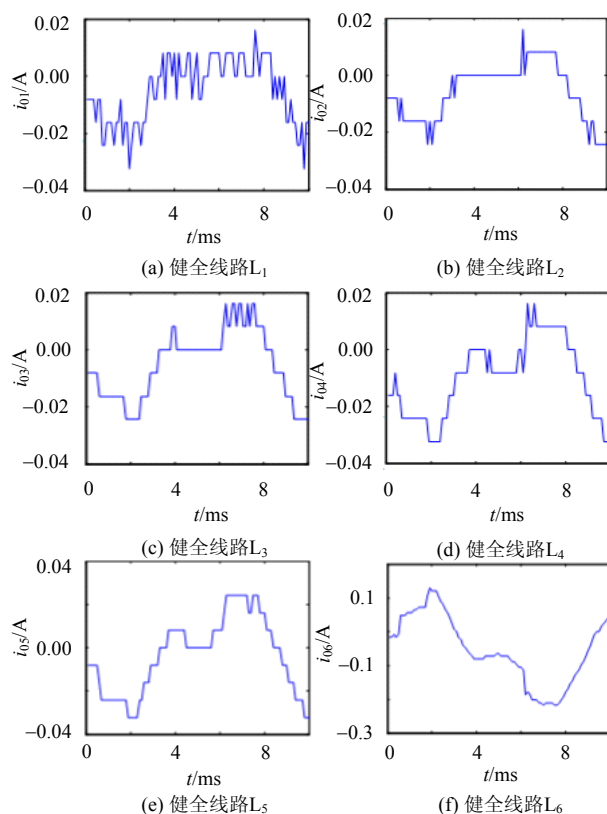


图 B1 线路 L_6 发生高阻接地时各线路零模电流

Fig. B1 Zero mode current of each line when high impedance grounding fault occurs at line L_6

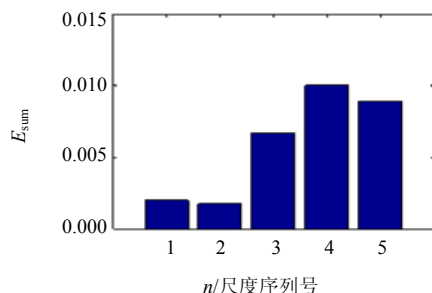


图 B2 池店变线路 L_6 发生高阻接地故障时各线路在 5 个频带上的零模电流能量和

Fig. B2 Zero mode current summing energy of each line when high impedance grounding fault occurs in line L_6 in Chidian substation

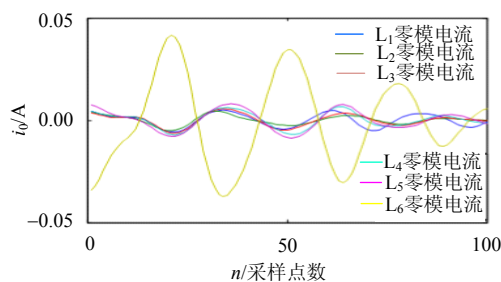


图 B3 池店变线路 L_6 发生高阻接地故障时 6 条线路在特征频带内的电流

Fig. B3 Currents of six lines in the characteristic frequency band when high impedance grounding fault occurs in line L_6 in Chidian substation

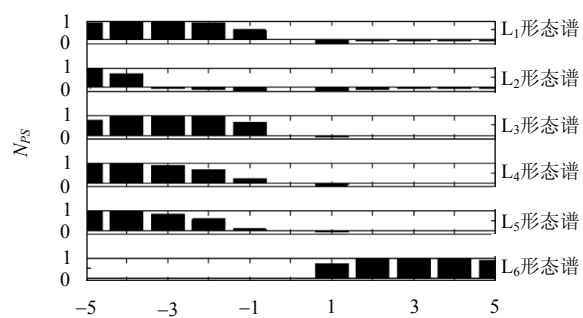


图 B4 线路 L₆ 发生高阻接地时各线路零模电流形态谱

Fig. B4 Form spectrum of zero mode current of each line when high impedance grounding fault occurs at line L₆