

DOI: 10.7667/PSPC161641

利用故障全过程信息的消弧线圈接地系统 间歇性接地故障选线方法

蔡颖倩¹, 王钢¹, 樊晨曦¹, 李海锋¹, 张俊潇²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东电网发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要: 在间歇性接地故障全过程中, 各种故障特征的强弱随时间推移而变化, 提出综合利用故障全过程信息的选线方法。通过对接地故障全过程进行分阶段处理, 分别利用特征频带暂态能量特征量和零序有功功率稳态特征量进行计算, 从而实现对接地故障全过程中暂态与稳态特征的充分利用, 提高单一选线方法的准确性和灵敏性。其中, 在具体分析相控式消弧线圈输出电流高频特性的基础上, 提出能有效消除其高频分量影响的特征频带暂态能量幅值判据。仿真结果表明, 所提选线方法对于相控式消弧线圈接地系统中所发生的含间歇性接地故障在内的各类接地故障均能实现其可靠的故障选线。

关键词: 故障选线; 间歇性接地; 相控式消弧线圈; 暂态能量; 零序有功功率

Faulty line selection based on information in the whole process of intermittent earth fault in resonant grounding distribution networks

CAI Yingqian¹, WANG Gang¹, FAN Chenxi¹, LI Haifeng¹, ZHANG Junxiao²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Power Grid Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: During the whole process of intermittent earth fault, the significance of each fault feature changes over time. This paper presents a faulty line selection method based on information in the whole process of intermittent earth fault. First the stages of earth fault are divided. Then the algorithms are designed accordingly utilizing the transient component of selected frequency band (SFB) and the steady component of zero sequence active power, in order to make full use of both transient and steady fault features in the whole process, and to maximize the effect of each algorithm. Considering the high-frequency output characteristic of Petersen coil based on thyristor controlled reactor (TCR), a new criterion of transient power magnitude of SFB is designed to avoid the negative effects of the high-frequency components. According to simulation results, the proposed method has a high accuracy and reliability in faulty line selection of different kinds of single-phase-to-ground faults in resonant grounding system with Petersen coil based on TCR, including intermittent earth faults.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477057).

Key words: faulty line selection; intermittent earth fault; Petersen coil based on TCR; transient power; zero-sequence active power

0 引言

消弧线圈接地系统是我国配电网的一种主要的中性点接地形式。而单相接地故障时的故障选线问题则一直是消弧线圈接地系统需要重点解决的问题之一。在各种单相接地故障中, 间歇性弧光接地由

于具有故障电流较小、电弧的非线性和随机性等特点, 更是大大增加了故障选线的难度, 也是消弧线圈接地系统亟待解决的问题之一。

针对消弧线圈接地系统中发生间歇性弧光接地时的故障选线问题, 国内外学者开展了大量的研究工作, 从所利用的故障信息角度主要可分为稳态和暂态选线方法两大类。传统的稳态类选线方法利用周期稳态的工频信号或谐波信号, 其中谐波法、

零序有功功率法等可用于消弧线圈接地系统^[1-2]。由于稳态特征量的幅值较小, 稳态类方法在暂态振荡过程中极易受到干扰而失效。而暂态类选线方法则利用接地初期的故障暂态特征, 如瞬时能量特征、暂态高频电流特征等^[3-6]。暂态类方法通常选取接地后 10~40 ms 的数据窗进行计算, 其弊端在于当选线装置启动存在延时或暂态特征不明显时难以正确选线^[7-8], 尤其对于间歇性接地故障, 其通常伴随高阻接地的情况, 导致首次接地产生的暂态量较小。

而实际上间歇性接地故障全过程可包含多个暂态过程及稳定接地阶段, 将分别产生可供利用的暂态与稳态故障信息。为充分利用电弧重燃产生的故障暂态信息, 文献[9]提出基于特征频带暂态无功能量极性的选线方法, 该方法对包括暂态及稳态的故障全过程的特征频带功率进行积分, 则当对故障稳态阶段进行积分时, 将有可能放大误差。尤其在经相控式消弧线圈接地系统中, 电力电子器件的通断过程将产生高频谐波电流, 从而对暂态类选线方法产生影响, 使得基于特征频带暂态能量的极性特征失效^[10], 有待进一步改进。

此外, 针对暂态与稳态选线算法的融合技术, 目前已有许多学者进行相关研究, 如文献[11]首先判断故障暂态能量主要集中在高频带或低频带, 并选择相应判据进行选线, 但该方案实际只选择一种算法, 没有融合多种特征。文献[12-14]基于证据理论或神经网络等现代智能技术, 从选线决策层面实现多判据融合, 但未考虑间歇性接地故障的特点。

由于在间歇性接地故障全过程中, 各种暂态和稳态故障特征的强弱将随时间的推移而在不同的阶段呈现不同的变化趋势, 因此对故障全过程进行分阶段处理, 将能进一步充分利用暂稳态的故障信息, 从而提高单一方法的准确性, 达到最佳的综合效果。为此, 本文首先分析接地故障过程的零序电压电流变化特性, 在此基础上提出划分故障暂态阶段与稳态阶段的实用判据, 对基于特征频带暂态能量的选线算法及基于零序有功功率的稳态选线算法分别进行分阶段处理, 进而形成综合利用故障全过程信息的选线方法。通过对相控式消弧线圈接地系统的各种接地故障进行仿真分析, 验证了选线方法的有效性。

1 消弧线圈接地系统接地故障分析

1.1 零序等效网络

当中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时, 系统的零序等效网络如图 1 所示。

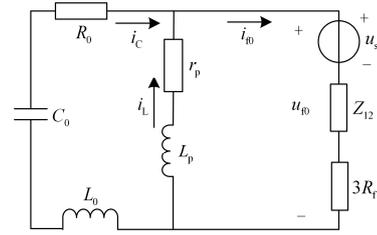


图 1 零序等效网络

Fig. 1 Zero sequence equivalent circuit

图 1 中, $u_s = U_m \cos(\omega t + \varphi)$ 为短路前故障点电压, ω 为系统角频率, φ 为接地初始角; u_0, i_0 为故障点零序电压、电流; L_p, r_p 分别为消弧线圈等值电感及电阻; R_0, L_0, C_0 分别为线路的零序等值电阻、等值电感及对地电容总和; Z_{12} 为系统等值正序阻抗与负序阻抗之和; R_f 为过渡电阻。

接地零序电流 i_0 主要包含补偿后的工频分量及衰减暂态分量, 其表达式为^[15]

$$i_0 = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} \quad (1)$$

式中: I_{Cm} 为电容电流 i_c 的稳态幅值; I_{Lm} 为补偿电流 i_l 的稳态幅值; ω_f 为暂态主振荡角频率; δ 为衰减系数。

忽略线路压降, 则母线零序电压近似等于故障点零序电压。另外, 由于系统零序阻抗远大于正负序阻抗, 为简化分析, 可忽略 Z_{12} , 则母线零序电压表达式为

$$u_0 = u_s - R_f i_0 \quad (2)$$

由式(2)可见, u_0 同样由稳态工频分量及衰减暂态分量组成, 当接地暂态电流衰减完毕时, 零序电压进入稳态。

1.2 零序暂态电流高频特性分析

进一步分析系统零序相频特性。以线路的始端及末端作为端口, 由二端口网络方程可求得线路的零序等值输入阻抗, 其在低频段呈容性, 该频带称为特征频带。对于第 k 条线路, 其首次串联谐振角频率计算公式为

$$f_k = 1 / (4l_k \sqrt{L_{0k} C_{0k}}) \quad (3)$$

式中: l_k 为线路长度; L_{0k}, C_{0k} 分别为单位长度零序电感和对地电容。

在消弧线圈接地系统中, 特征频带的下限取为 150~200 Hz, 而特征频带上限为各线路的首次串联谐振角频率中的最小值, 即 $f' = \min(f_k)$ ^[9]。

假设 $t=0$ 为接地故障发生时刻。系统共有 N 回线路, 则第 n 条线路的特征频带暂态无功能量为

$$E_n(t) = \int_0^t i_{n0, \text{sb}}(\tau) du_{0, \text{sb}}(\tau) \quad n=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中, $u_{0, \text{sb}}(t)$, $i_{n0, \text{sb}}(t)$ 为母线零序电压及各线路零序电流的特征频带分量。

若系统中仅存在由单相接地故障引起的高频暂态电流, 则故障线路的参量 E 为各健全线路之和, 而极性与任一健全线路均相反。

当系统采用经相控式消弧线圈接地时, 其可控硅控制回路将产生一定含量的高频谐波电流, 而滤波回路的设计仅针对含量较大的 3、5、7 次等谐波, 无法完全滤除特征频带内的高频电流, 因此须考虑此高频分量对特征频带暂态电流分布特性的影响。

利用傅里叶展开可得消弧线圈输出电流 I_p 的 k 次谐波幅值表达式为

$$I_{p,k} = \frac{U_m}{\pi \omega L_p} \left| \frac{2 \sin(k-1)\varphi}{k(k-1)} - \frac{2 \sin(k+1)\varphi}{k(k+1)} \right| \quad k=3, 5, \dots \quad (5)$$

式中, $\psi = \theta + \pi/2$, θ 为可控硅触发角。

由式(5)可见, 高次谐波幅值与触发角呈现非线性关系。总体而言, 高次谐波含量随导通角的增加而减少, 当可控硅完全导通时, 高次谐波含量为 0。

由以上分析可知, 相控式消弧线圈可视为包含多个频率分量的高频电流源, 则各线路的高频暂态电流为单相接地引起的暂态电流与消弧线圈产生的高频电流之和。

对于单相接地引起的高频暂态电流, 其最大值受过渡电阻、接地初始角影响而具有不确定性, 且具有明显的衰减特性。而消弧线圈产生的高频电流在消弧投入的全过程中持续存在, 当过渡电阻较大时, 其流入健全线路的分量可能大于流入故障线路的分量, 从而改变各线路的特征频带暂态无功功率分布。

1.3 暂态特性仿真分析

为进一步研究相控式消弧线圈影响下的系统特征频带暂态特性, 利用 Pscad/EMTDC 仿真平台搭建 10 kV 配电网仿真模型, 系统参数设置如下: 电源额定电压为 110 kV, 系统侧等值阻抗为 $j4.084 \Omega$ 。主变额定容量为 40 MVA, 变比为 110/10.5。10 kV 母线共带有 6 回馈线, 且均为电缆线路, 单位长度电缆参数如表 1 所示, 各线路长度在 2.5~7.5 km。设定消弧补偿度为过补偿 5%, 当中性点采用相控式消弧线圈接地时, 可控硅导通角为 120° 。消弧选线装置在接地信号出现后立刻投入, 设置选线采样频率为 5 kHz。采用 6 阶 butterworth 带通滤波器对各线路零序电流特征频带分量进行提取, 由式(3)可

得特征频带上限为 $f' = 1 / (4 \times 7.5 \times \sqrt{L_0 C_0}) \approx 2000 \text{ Hz}$, 特征频带下限取为 200 Hz, 则特征频带范围为 200~2000 Hz。

表 1 电缆参数

Table 1 Cable parameters

交流电阻/ (Ω/km)	工作电容/ ($\mu\text{F}/\text{km}$)	电缆电抗/ (Ω/km)	正负序阻抗/ (Ω/km)	零序阻抗/ (Ω/km)
0.0788	0.3755	0.0885	0.1185	2.2983

设置 $t=0.26 \text{ s}$ 时刻, 线路 4 中点发生永久性单相接地, 过渡电阻为 150Ω , 接地初始角为 0° 。对比中性点采用相控式消弧线圈及固定电感情况下的仿真结果, 如图 2—图 5 所示。

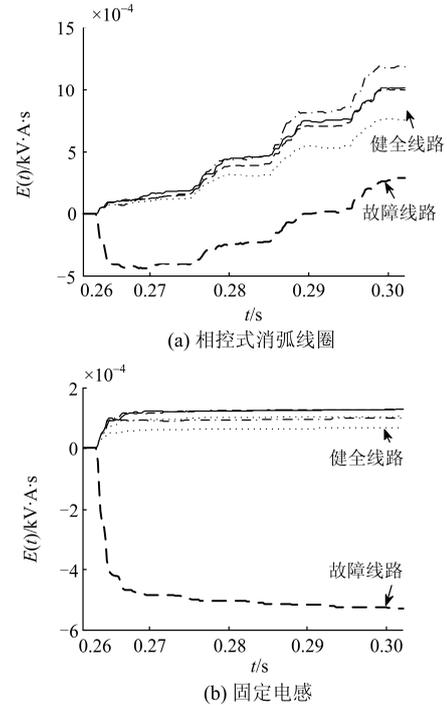
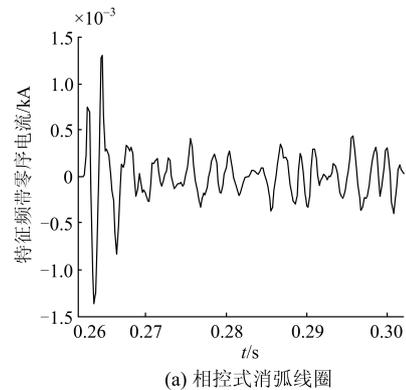


图 2 参量 $E(t)$ 仿真波形

Fig. 2 Simulative waveform of $E(t)$



(a) 相控式消弧线圈

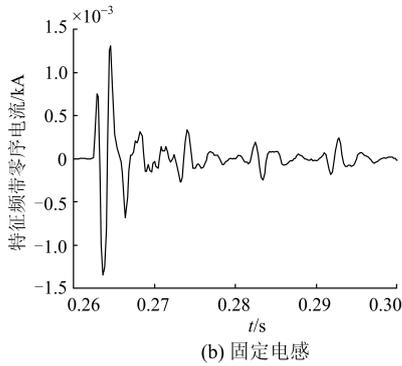


图 3 故障线路特征频带电流
Fig. 3 SFB current on the faulty line

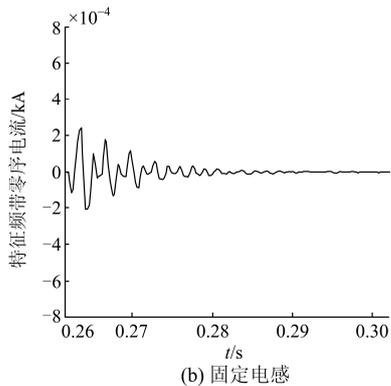
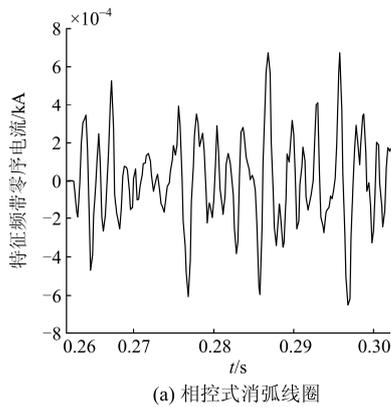


图 4 健全线路特征频带电流
Fig. 4 SFB current on the healthy line

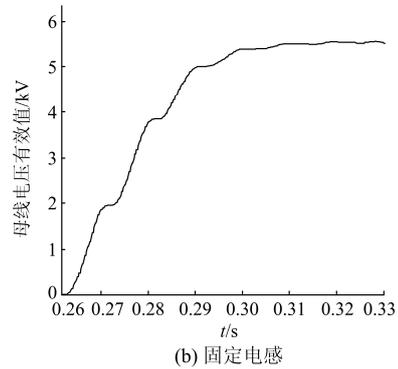
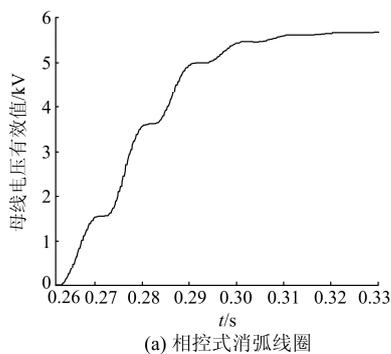


图 5 母线零序电压有效值
Fig. 5 Effective value of zero-sequence voltage at the bus

对比以上仿真结果可知，若不采用相控式消弧线圈，接地产生的特征频带暂态电流经过约 30 ms 衰减完毕，进入稳定接地阶段后各线路的参量 E 基本维持不变。而当采用相控式消弧线圈时，特征频带电流将持续存在，故障线路的参量 E 仅在接地初期 30 ms 内满足极性相反的特征，这是由于在接地初期，故障暂态高频电流幅值较大，消弧线圈产生的高频电流含量相对较低，各线路的参量 E 未明显受到消弧线圈影响。当故障暂态电流衰减至较低水平后，各线路的参量 E 值仍不断增大，此时特征频带无功功率全部由消弧线圈产生，致使判据失效。

2 利用故障全过程信息的故障选线方法

2.1 接地故障全过程的阶段划分

接地故障暂态特征与稳态特征的强弱在故障全过程的各个时期将有所不同。对于永久性接地故障，其包含短暂的接地暂态阶段与持续的稳定接地阶段，在接地暂态过程中，系统零序电压将呈现迅速升高的变化趋势；当进入稳定接地阶段，零序电压幅值基本维持不变。而对于间歇性接地，则存在电弧熄灭过程，此时零序电压逐渐衰减为零，当电弧重燃时则零序电压将再次升高。此后，则是多个上述暂稳态交替过程的重复，只是每个过程的暂稳态持续时间及电压电流特性将随接地初始角、过渡电阻等故障条件的变化而变化。

由上述分析可知，不管是永久性接地还是间歇性接地，均可以利用母线零序电压的变化情况表征暂态和稳态阶段，对于暂态选线算法，其在稳定接地阶段将明显受相控式消弧线圈等因素的影响。而对于稳态选线算法，其利用的工频稳态量本身含量较低，易受系统干扰而产生误判，需避开扰动较大的接地暂态阶段。

为此，本节提出通过检测母线零序电压有效

值, 对故障全过程进行阶段划分, 具体判据如下。

1) 为实现消弧选线装置的快速启动, 实时监测母线零序电压 $u_0(t)$, 当其幅值高于门槛值时启动故障选线, 并设 $t=0$ 为接地时刻。快速启动判据为

$$|u_0(t)| > u_{\text{set}} \quad (6)$$

另外, 若对于 $t>0$ 的某一时刻, 零序电压有效值 $U_{0,\text{RMS}} < u_{\text{set}} / \sqrt{2}$, 则认为接地消失, 为确保故障已经清除, 并充分积累间歇性接地期间的暂态信息, 设置装置经过较长的延时返回。则当熄弧时间不超过设定的延时而再一次发生燃弧, 暂态选线算法能继续对电弧重燃产生的暂态信息进行积累。

2) 实时获取母线零序电压的有效值 $U_{0,\text{RMS}}$, 利用差分计算其在一个采样周期时间段所对应的变化率, 记为 $dU_{0,\text{RMS}}/dt$ 。对于故障暂态阶段, 定义暂态系数 $p_t(t)$, 在消弧选线装置启动以后, $p_t(t)$ 表达式为

$$p_t(t) = \begin{cases} 1 & dU_{0,\text{RMS}} / dt > \varepsilon \\ 0 & dU_{0,\text{RMS}} / dt \leq \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中, ε 为设定阈值。

当处于燃弧暂态过程时, 暂态系数为 1, 当进入故障稳定阶段或电弧熄灭期间, 暂态系数均为 0, 直至再一次发生燃弧, 在其接地暂态过程中, 暂态系数重新变为 1。配合装置的快速启动算法, 暂态选线方法能对电弧首次接地产生的绝大部分暂态能量进行有效捕捉。

3) 对于故障稳态阶段, 定义稳态系数 $p_s(t)$, 当满足式(8)时, $p_s(t)=1$, 否则 $p_s(t)=0$ 。

$$\begin{cases} |dU_{0,\text{RMS}} / dt| \leq \varepsilon \\ U_{0,\text{RMS}} \geq u_{\text{set}} / \sqrt{2} \end{cases} \quad (8)$$

当零序电压有效值高于设定值时, 说明系统处于电弧接地状态, 而电压变化率接近零, 则表明处于故障稳定阶段。

通过对接地故障全过程进行阶段划分, 进而分别对暂态及稳态选线算法采取分阶段处理, 有利于提高单一算法的准确性与灵敏性, 对故障全过程的暂态及稳态故障特征实现充分有效的利用。

2.2 改进的特征频带暂态能量选线算法

对于间歇性接地故障, 若首次燃弧暂态特征不明显时, 考虑到装置分辨率和判据的可信度等因素, 可能难以在电弧首次接地的极短时间内完成选线, 而电弧重燃过程也将产生接地故障暂态量, 通过对其不断积累, 仍有可能在后续燃弧阶段进行正确选线。当接地故障暂态分量衰减以后, 相控式消弧线圈产生的高频分量将对暂态选线判据造成不利影响。为排除其干扰, 并充分利用间歇性接地全过程

的暂态信息, 本节利用上节中对故障全过程的暂稳态阶段划分, 提出针对间歇性接地故障的特征频带暂态能量幅值判据。

1) 获取消弧补偿电流 $i_p(t)$, 第 n 条线路零序电流 $i_{n0}(t)$ 。为判别母线故障, 令母线零序故障电流为

$$i_M(t) = -\sum_{n=1}^N i_{n0}(t) - i_p(t) \quad (9)$$

2) 利用带通滤波器提取特征频带分量 $u_{0,\text{sfb}}(t)$, $i_{n0,\text{sfb}}(t)$, $i_{M,\text{sfb}}(t)$ 。

3) 根据式(7)求取暂态系数 $p_t(t)$ 。

4) 计算第 n 条线路的特征频带暂态能量为

$$W_n(t) = \int_0^t |p_t(\tau) \cdot i_{n0,\text{sfb}}(\tau) \cdot du_{0,\text{sfb}}(\tau)| \quad (10)$$

母线的暂态能量为

$$W_M(t) = \int_0^t |p_t(\tau) \cdot i_{M,\text{sfb}}(\tau) \cdot du_{0,\text{sfb}}(\tau)| \quad (11)$$

对比各线路及母线的特征频带暂态能量参量, 取其中的最大值 $W_{\text{max}} = \max\{W_1, \dots, W_N, W_M\}$, 其对应元件为故障元件。为避免故障暂态特征量过小时受系统干扰而产生的误判, 设定选线门槛值 W_{set} , 当 $W_{\text{max}} < W_{\text{set}}$ 时, 认为故障暂态特征不足以选线。

2.3 零序有功功率稳态选线算法

特征频带暂态能量暂态选线方法对于高阻接地故障的识别能力较差, 而过渡电阻的增加将同时增大故障电流有功分量的比例, 因此零序有功功率判据与暂态选线判据具有良好的互补性。本文选取零序有功功率作为稳态选线判据, 有功功率的获取可利用快速傅里叶分解实现。

计算第 n 条线路的零序瞬时功率为

$$p_{0n}(t) = p_s(t) \cdot u_0(t) \cdot i_{n0}(t) \quad (12)$$

其直流分量 $|\bar{p}_0|_n$ 具有单向传递特性, 可反映线路的零序有功功率^[16]。

由式(9)得母线的零序瞬时功率为

$$p_{0M}(t) = p_s(t) \cdot u_0(t) \cdot i_M(t) \quad (13)$$

同样以其直流分量的幅值 $|\bar{p}_0|_M$ 作为母线故障的零序有功功率参量。

设定选线判据为

$$|\bar{p}_0|_{\text{max}1} > |\bar{p}_0|_{\text{max}2} + |\bar{p}_0|_{\text{max}3} \quad (14)$$

式中, $|\bar{p}_0|_{\text{max}1}$, $|\bar{p}_0|_{\text{max}2}$, $|\bar{p}_0|_{\text{max}3}$ 为特征参量前 3 个最大值。则 $|\bar{p}_0|_{\text{max}1}$ 对应线路为故障线路。

2.4 基于可信度的故障选线决策方法

以上两种判据分别反映了故障的暂态阶段特征与稳态阶段特征, 具有较好的互补性。若两种算法所得结果一致时, 可明确判定故障线路; 若其中一种故障特征不够明显时, 则可能出现误选的情况,

此时该判据的可信度问题属于一个模糊性问题, 则利用模糊理论的思想, 根据判据所关注的故障特征量的大小关系可建立判据的可信度系数函数, 其函数值为[0,1]区间, 当两种选线算法所得结果不一致时, 应当由可信度较大的选线判据判别故障线路。

对暂态及稳态两种判据的可信度系数 k_1, k_2 分别计算为

$$k_i = \begin{cases} \left(\frac{X_{\max}}{\alpha_i X_{\Sigma}}\right)^2 & X_{\max} < \alpha_i X_{\Sigma} \\ 1 & X_{\max} \geq \alpha_i X_{\Sigma} \end{cases} \quad i=1,2 \quad (15)$$

式中: X_{\max} 为特征量最大值; X_{Σ} 为其余各线路特征量之和; α 为临界系数。对于特征频带暂态能量判据, 考虑到消弧线圈等系统干扰因素, 取临界系数 $\alpha_1=0.8$ 。对于零序有功功率判据, 考虑到消弧线圈有功电流的助增作用, 取临界系数 $\alpha_2=1.2$ 。

当最大值 X_{\max} 明显大于其他线路的特征值时, 其占有所有元件故障特征值之和的比例较高, 则表明故障特征明显, 从而判据具有很高的可信度; 若 X_{\max} 所占比例低于临界值, 则认为故障特征不够明显, 且 X_{\max} 所占比例越小, 判据的可信度相应越低。

2.5 故障选线流程

综上所述, 故障选线流程如图 6 所示。

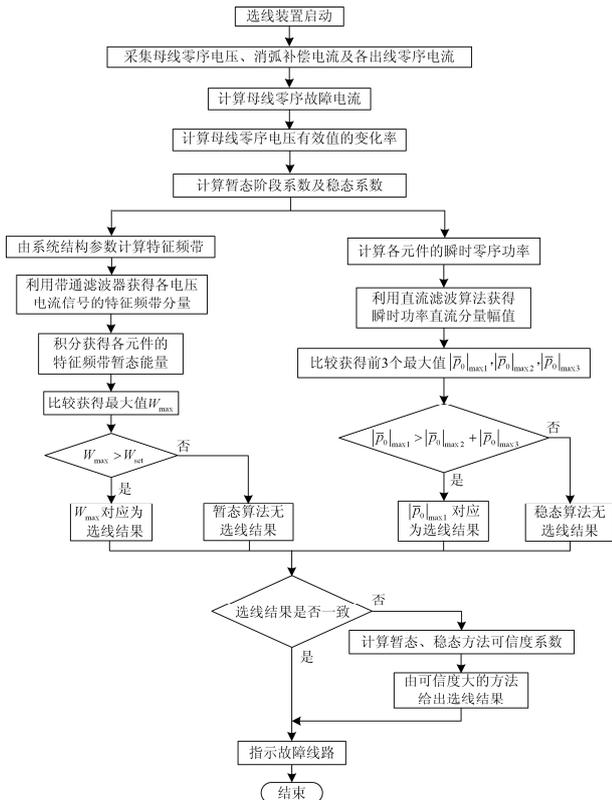


图 6 故障选线流程图

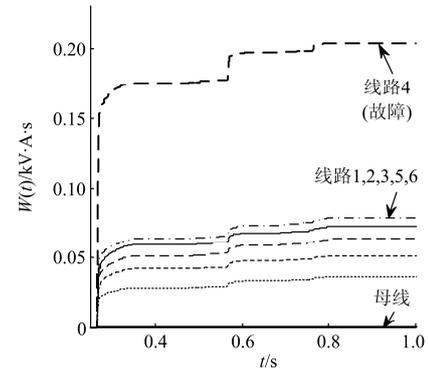
Fig. 6 Flow chart of faulty line selection

3 仿真算例验证

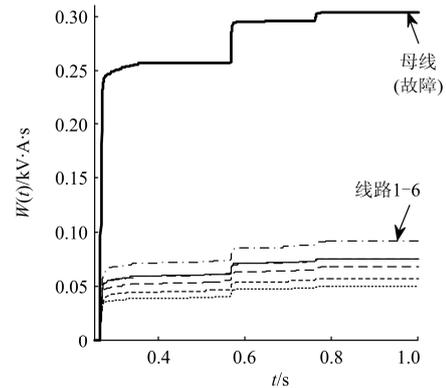
3.1 特征频带暂态能量选线算法仿真分析

为验证本文所提特征频带暂态能量幅值判据应用于相控式消弧线圈接地系统的选线效果, 利用 1.3 节所建配电网模型进行仿真分析。

Case1: 设置在 $t=0.2\sim 1$ s 期间系统发生间歇性接地, 过渡电阻为 $20\ \Omega$ 。当故障点分别位于线路 4 中点及母线时, 各线路的特征频带暂态能量参量 W_i 仿真结果如图 7 所示。



(a) 故障点位于线路4



(b) 故障点位于母线

图 7 间歇性接地故障仿真结果(Case1)

Fig. 7 Simulation results of intermittent earth fault in Case1

由图 7 仿真结果可知, 由式(10)、式(11)所得特征频带暂态能量幅值判据可准确判别线路或母线故障。

Case2: 间歇性接地故障点位于线路 4 中点, 设置接地时刻与 Case1 相同, 过渡电阻为 $200\ \Omega$ 。将本文所提算法仿真结果与直接由式(4)所得仿真结果进行对比, 如图 8 所示。

由图 8(a)可知, 对于本文所提算法, 故障线路的特征频带暂态能量 W_4 随着多次燃弧暂态过程的积累而不断增大, 在间歇性接地全过程中始终大于其他线路。

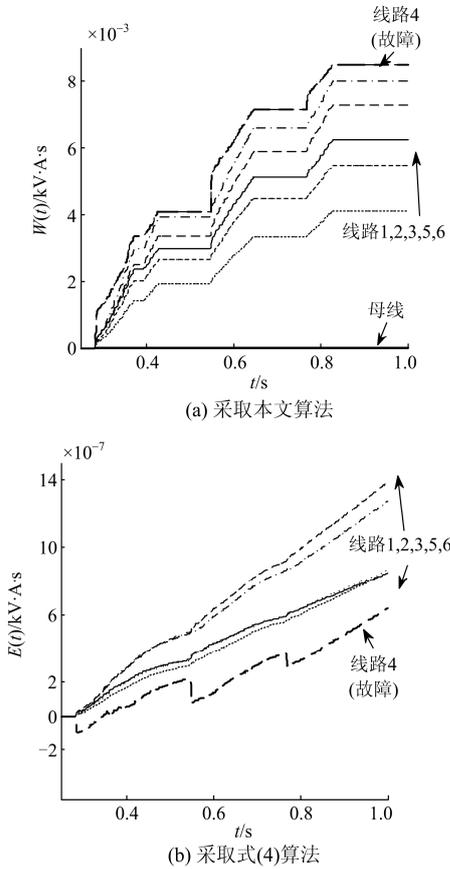


图 8 间歇性接地故障仿真结果(Case2)

Fig. 8 Simulation results of intermittent earth fault in Case2

对比图 8(b)可知, 在间歇性接地的多次燃弧暂态过程中, 故障线路流过负极性的特征频带无功功率。但在稳定接地期间, 故障线路与健全线路均流过由相控式消弧线圈引起的正极性的特征频带无功功率, 导致各线路的参量 E 均不断增大。仅在接地后 60 ms 以内, 故障线路 E_4 满足幅值最大、极性相反的特征, 但其幅值仅为 $-0.001 \text{ kV}\cdot\text{A}\cdot\text{s}$, 考虑到装置分辨率及设定阈值等因素, 在这段时间内未必能正确选线。此后尽管电弧多次发生重燃, 故障线路 E_4 极性始终为正, 而幅值小于健全线路, 由式(4)的极性判据或幅值判据均无法判别故障。

由以上仿真结果可知, 本文所提算法能有效避免因首次接地暂态特征不明显而造成的选线困难, 同时明显减少相控式消弧线圈引起的不利影响, 有利于间歇性接地期间多次暂态故障信息的积累。

3.2 利用故障全过程信息的选线方法仿真验证

为验证本文所提利用故障全过程信息的间歇性接地故障选线方法, 设置系统发生间歇性接地故障, 考虑不同故障位置、过渡电阻、接地初始角、接地时间间隔等条件, 选线结果如表 2—表 4 所示。

1) 设置经过较短的时间间隔发生多次燃弧和熄弧, 其中电弧持续时间为 10~90 ms, 熄弧时间不超过 90 ms。选线结果如表 2 所示。

表 2 间隔时间较短的故障选线结果

Table 2 Selection of intermittent earth fault with short intervals

(a) 接地初始角均为 90°					
故障线路	过渡电阻/ Ω	暂态阶段参量 最大值(线路)	稳态阶段参量 最大值(线路)	方法 可信度	选线 结果
L4	100	0.1692(L4)	—	1.00/0	L4
L4	700	0.0028(L4)	0.0015(L4)	0.94/0.72	L4
L5	200	0.0500(L5)	0.0091(L5)	1.00/0.07	L5
L5	500	0.0048(L5)	0.0022(L5)	1.00/0.73	L5
L6	300	0.0279(L6)	0.0072(L6)	1.00/0.71	L6
L6	600	0.0055(L6)	0.0023(L6)	1.00/0.72	L6
母线	10	5.1593(母线)	—	1.00/0	母线
母线	400	0.0046(母线)	0.0047(母线)	1.00/0.72	母线
(b) 接地初始角均为 0°					
故障线路	过渡电阻/ Ω	暂态阶段参量 最大值(线路)	稳态阶段参量 最大值(线路)	方法 可信度	选线 结果
L4	100	0.0077(L4)	0.0222(L4)	1.00/0.73	L4
L4	700	—	0.0033(L4)	0/0.76	L4
L5	200	0.0042(L6)	0.0138(L5)	0.12/0.72	L5
L5	500	0.0013(L6)	0.0052(L5)	0.14/0.76	L5
L6	300	0.0024(L6)	0.0074(L6)	0.17/0.74	L6
L6	600	—	0.0032(L6)	0/0.76	L6
母线	10	0.2075(母线)	0.0309(母线)	1.00/0.71	母线
母线	400	0.0033(L6)	0.0072(母线)	0.11/0.73	母线

由表 2 结果可见, 基于特征频带暂态能量的暂态判据可适用于相控式消弧线圈接地系统, 通过对多次接地过程中暂态信息的积累, 能避免单次接地信息不足造成的选线困难, 但本判据在接地初始角始终接近 0° 、高阻接地等情况下准确率明显降低。

基于零序有功功率的稳态判据对于燃熄弧间隔时间很短而暂态振荡过程持续较长的间歇性故障可能失效。但本判据受过渡电阻影响较小, 在高阻接地时也能实现正确选线, 且方法可信度不会明显降低; 当接地初始角接近 0° 时, 暂态振荡过程持续时间短, 同样有利于零序有功功率算法的故障选线。可见两种判据之间具有较好的互补性。

2) 设置经过较长的时间间隔发生多次燃弧和熄弧, 其中电弧持续时间为 100~300 ms, 熄弧时间不超过 200 ms。选线结果如表 3 所示。由于电弧接地时间远大于接地暂态的持续时间, 系统发生永久性接地故障的情况与此类似。

由表 3 结果可见, 本文所提选线方法不仅适用于间歇性接地, 对于稳定接地故障也能准确识别。从而该方法对于相控式消弧线圈接地系统所发生的各种类型的单相接地故障, 均能实现其有效的故障选线。

表 3 间隔时间较长的故障选线结果

Table 3 Selection of intermittent earth fault with long intervals

(a) 接地初始角均为 90°					
故障 线路	过渡 电阻/ Ω	暂态阶段参量 最大值(线路)	稳态阶段参量 最大值(线路)	方法 可信度	选线 结果
L4	100	0.0570(L4)	0.0198(L4)	1.00/0.74	L4
L4	700	0.0043(L4)	0.0037(L4)	1.00/0.74	L4
L5	200	0.0290(L5)	0.0131(L5)	1.00/0.74	L5
L5	500	0.0086(L5)	0.0056(L5)	1.00/0.74	L5
L6	300	0.0182(L6)	0.0068(L6)	1.00/0.74	L6
L6	600	0.0054(L6)	0.0032(L6)	1.00/0.74	L6
母线	10	2.9356(母线)	0.0390(母线)	1.00/0.73	母线
母线	400	0.0041(母线)	0.0070(母线)	1.00/0.73	母线

(b) 接地初始角为任意角度					
故障 线路	过渡 电阻/ Ω	暂态阶段参量 最大值(线路)	稳态阶段参量 最大值(线路)	方法 可信度	选线 结果
L4	100	0.0619(L4)	0.0153(L4)	1.00/0.75	L4
L4	700	0.0114(L6)	0.0011(L4)	0.12/1.00	L4
L5	200	0.0216(L5)	0.0141(L5)	1.00/0.76	L5
L5	500	0.0047(L5)	0.0046(L5)	0.48/0.77	L5
L6	300	0.0110(L6)	0.0063(L6)	0.88/0.77	L6
L6	600	0.0034(L6)	0.0025(L6)	0.57/0.78	L6
母线	10	1.4922(母线)	0.0540(母线)	1.00/0.73	母线
母线	400	0.0023(母线)	0.0064(母线)	0.27/0.75	母线

3) 加入随机白噪声干扰, 设置信噪比为 20%。选线结果如表 4 所示。

表 4 加入噪声干扰的选线结果

Table 4 Selection of intermittent earth fault with white noise

故障 线路	过渡 电阻/ Ω	接地初 始角/ $^\circ$	暂态阶段参量 最大值(线路)	稳态阶段参量 最大值(线路)	方法 可信度	选线 结果
L4	100	90	0.1793(L4)	—	1.00/0	L4
L4	700	任意	—	0.0019(L4)	0/0.73	L4
L5	200	90	0.0576(L5)	—	1.00/0	L5
L5	500	0	—	0.0023(L5)	0/0.74	L5
L6	300	任意	0.0099(L6)	0.0083(L6)	1.00/0.76	L6
L6	600	90	0.0128(L6)	—	1.00/0	L6
母线	10	0	0.099(母线)	0.008(母线)	1.00/0.29	母线
母线	400	任意	0.003(母线)	0.005(母线)	0.55/0.72	母线

由表 4 结果可见, 系统噪声干扰对暂态算法和稳态算法均可能产生不利影响, 在故障特征量原本不足的情况下, 系统噪声的存在可能进一步恶化选线条件, 容易导致其中一个判据由于其故障特征量较弱, 处于判断边界条件而失效。另一个判据虽然同样受到噪声影响而使其参量指标发生变化, 但仍然能够可靠地识别故障线路。因此, 总体上系统噪声对于综合选线结果的影响不明显, 在各种故障条件下均能正确判别出故障线路。

4 结论

本文提出利用零序电压有效值的变化率对接

地故障进行阶段划分, 通过对故障全过程进行分阶段处理, 分别利用暂态阶段的特征频带暂态能量及稳态阶段的零序有功功率构成判据, 从而形成综合利用故障全过程信息的选线方法。其中, 计及相控式消弧线圈对特征频带暂态电流分布的影响, 提出特征频带暂态能量幅值判据, 该判据能有效减少消弧线圈高频电流的干扰, 提高故障暂态特征不明显情况下的选线准确性和灵敏性。经仿真验证, 本文所提选线方法对于相控式消弧线圈接地系统中所发生的含间歇性接地故障在内的各类接地故障均能实现其可靠的故障选线。

参考文献

- [1] 梁睿, 辛健, 王崇林, 等. 应用改进型有功分量法的小电流接地选线[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 375-379. LIANG Rui, XIN Jian, WANG Chonglin, et al. Fault line selection in small current grounding system by improved active component method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 375-379.
- [2] 贾晨曦, 杨龙月, 杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 145-154. JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu. Review of key technologies on full current compensation arc suppression coil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 145-154.
- [3] 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.
- [4] 闫光太, 梁甲文, 王新涛, 等. 利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 64-68. YAN Guangtai, LIANG Jiawen, WANG Xintao, et al. A faulty line selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.
- [5] 陈亚, 李梦诗. 基于瞬时能量比的输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 56-64. CHEN Ya, LI Mengshi. A faulty phase selection scheme for transmission lines based on instantaneous energy ratio[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 56-64.
- [6] 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 selection 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.
- [7] MARCINIAK L. Detection of high resistance earth faults in medium voltage networks[C] // Electric Power Engineering (EPE), 2015 16th International Scientific Conference, Kouty nad Desnou: IEEE, 2015: 111-115.
- [8] 耿建昭, 王宾, 董新洲, 等. 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, et al. 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.
- [9] 杨健翔, 常仲学, 豆敏娜, 等. 一种配网单相接地选线的频带自适应获取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 60-66.
YANG Jianxiang, CHANG Zhongxue, DOU Minna, et al. A novel frequency band self-adaptive selection method of fault line selection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 60-66.
- [10] SU Yongzhi, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. The transient analysis of electronic arc-suppression coil and its effect on transient based fault line selection for single phase to earth fault[C] // 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Beijing, China: IEEE, 2011: 2410-2416.
- [11] 任志玲, 张媛媛. 基于改进的 HHT 变换和信心度的配电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 8-13.
REN Zhiling, ZHANG Yuanyuan. Faulty line selection of distribution network based on improved Hilbert-Huang transform and identification confidence degree[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 8-13.
- [12] 吴靓, 张英杰, 徐高, 等. 基于原子分解的谐振接地系统自适应故障选线方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3554-3562.
WU Liang, ZHANG Yingjie, XU Gao, et al. Adaptive fault line selection method for resonant grounding system based on atomic decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3554-3562.
- [13] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.
JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.
- [14] 张俊芳, 刘鹏. 基于改进模糊神经网络的配电网故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 120-125.
ZHANG Junfang, LIU Peng. Research on fault line detection for distribution network based on improved fuzzy neural networks algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 120-125.
- [15] 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.
- [16] 李斌, 束洪春. 谐振接地系统单相接地故障瞬时功率分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 260-268.
LI Bin, SHU Hongchun. Analysis on instantaneous power during single-phase earth fault occurred in resonant grounded system[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 260-268.
- [17] 张民, 贺仁睦. 基于 PSCAD/EMTDC 的直流控制保护仿真系统仿真平台及其在直流工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 112-117.

收稿日期: 2016-09-30; 修回日期: 2016-12-20

作者简介:

蔡颖倩(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为继电保护技术; E-mail: cyq9525@foxmail.com

王钢(1966-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: wangg@scut.edu.cn

樊晨曦(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为继电保护技术。E-mail: fanchenxitju@163.com

(编辑 周金梅)