

DOI: 10.7667/PSPC160467

一种新的谐振接地系统单相接地故障选线方法

宋金钊, 李永丽, 石 峥, 马立凡

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 为解决谐振接地系统单相接地故障在小故障合闸角情况下选线准确率不高的问题, 利用集合经验模态分解(EEMD)和希尔伯特变换在频带分析方面的优势, 提出了一种新的谐振接地系统故障选线方法。通过分析单相接地故障时暂态零序电流的分布特征, 比较系统暂态电容电流与衰减直流分量的能量大小, 自适应将能量较大的信号用于故障选线。暂态电容电流能量大时通过比较暂态电容电流的极性确定故障线路; 衰减直流分量能量大时通过比较消弧线圈与初选线路衰减直流分量的能量确定故障线路。分别对不同故障合闸角, 不同过渡电阻的单相接地故障进行了仿真验证。仿真结果表明, 该方法选线准确率高, 在小故障合闸角情况下亦能准确选线, 具有一定的应用价值。
关键词: 谐振接地系统; 单相接地故障选线; 小故障合闸角; 衰减直流分量; EEMD; 希尔伯特变换

A fault line selection method for resonant earthed system with high accuracy

SONG Jinzhao, LI Yongli, SHI Zheng, MA Lifan

(College of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To solve the problem of low accuracy of fault line selection in resonant earthed system when the fault switching angle is small, a novel fault line selection method is proposed by taking the advantage of Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) and Hilbert-transform in frequency band analysis. By analyzing the distribution characteristics of transient zero sequence current and comparing the energy of transient capacitance current with that of decaying DC component, the signal with higher energy is used for fault line selection adaptively. When the energy of transient capacitance current is higher, the fault line is identified by comparing the polarity of transient capacitance current. When the energy of decaying DC component is higher, the fault line is identified by comparing the decaying DC component energy of arc suppression coil with that of primary selection line. Simulations of single-phase earth fault under different switching angle and transition resistance conditions have been done, the results show that the proposed method has high accuracy and can select the fault line even in small fault switching angle occasions. The proposed method may take effect in its applications.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177108 and No. 51577128).

Key words: resonant earthed system; fault line selection of single-phase grounding; small fault switching angle; decaying DC component; EEMD; Hilbert transform

0 引言

谐振接地系统发生单相接地故障后, 由于消弧线圈的补偿作用, 其选线问题一直没有得到很好的解决。基于零序电流稳态信号的选线方法由于故障电流微弱, 电弧不稳定等原因, 实际使用效果并不理想。由于故障后暂态能量大, 含有丰富的故障信息, 基于暂态信号的选线方法受到普遍关注。已经

研究出的选线方法有基于小波变换的选线方法^[1-4]、基于S变换的选线方法^[5-6]、基于特征频段的选线方法^[7-9]、基于HHT的选线方法^[10-11]、基于行波的选线方法^[12-13]等。现有基于暂态信号的选线方法多利用母线零序电压和各路出线的高频零序电流信号选线。但是, 零序电流高频分量的幅值大小受故障时刻(合闸角)和过渡电阻的影响。在小故障合闸角或大过渡电阻的情况下, 零序电流高频分量的幅值较小, 幅值、极性受噪声、误差等因素干扰较大, 影响选线可靠性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177108, 51577128)

本文主要解决谐振接地系统单相接地故障小故障合闸角情况下选线困难的问题,在这一方面,有学者做了大量研究。文献[3]提出根据故障线路暂态电容电流的极性与非故障线路不同的原理,通过比较所有线路在各自特征频段下的小波包分解系数的极性来自适应地实现故障选线。该方法在理想情况下选线准确率高,但在小故障合闸角情况下受噪声干扰的影响可能出现误选线;文献[4]提出利用小波分解与重构的方法提取直流分量进行故障选线,直流方法和高频方法形成优势互补,但该方法在低频段有效数据点数少,易导致误差增大;文献[14]提出利用暂态信号能量和重心频率进行故障选线,该方法在出线故障时能可靠选线,但需要安装三相电流互感器,且母线故障时需要通过拉线来判断。此外,许多选线方法^[1-3]使用小波作为信号分析和处理工具,但小波基函数的选取问题一直没有得到很好的解决。

集合经验模态分解(EEMD)与希尔伯特变换是一种新的非平稳信号分析方法^[15],它的核心是通过EEMD得到一组基于信号自身特征的本征模态函数(IMF),通过对IMF作希尔伯特变换求其希尔伯特谱进行时频分析。该方法具有自适应性、多分辨等优势,且不需要预先确定基函数。近年来,该方法已成功应用于地震信号分析、机械故障诊断等领域。

总结前人工作,本文在分析谐振接地系统单相接地故障暂态零序电流特征的基础上,发现在小故障合闸角情况下,衰减直流分量能量较大,而大故障合闸角情况下,暂态电容电流能量较大。利用这一特征,本文提出了一种新的谐振接地系统单相接地故障选线方法。该方法结合了集合经验模态分解(EEMD)和希尔伯特变换在信号分析方面的优势,首先进行故障线路初选,然后通过计算、比较系统暂态电容电流与衰减直流分量能量的大小,将能量较大的信号用于故障选线并最终确定故障线路,解决了小故障合闸角情况下选线准确率不高的问题。

1 暂态零序电流特征

1.1 暂态零序电流分布规律

谐振接地系统发生单相接地故障后的零序等效网络如图1所示,系统共 n 条出线,第 n 条线路发生单相接地故障。图中仅考虑各出线的对地电容,忽略了线路阻抗与对地电导, L_i 为线路编号, $C_{0i}(i \neq n)$ 为非故障线路对地电容, C_{0n1} 为故障线路母线侧对地电容, C_{0n2} 为故障线路负荷侧对地电容, C_{0s} 为电源线路对地电容, L 为消弧线圈等效电感, U_0 为故障点处零序等效电源。

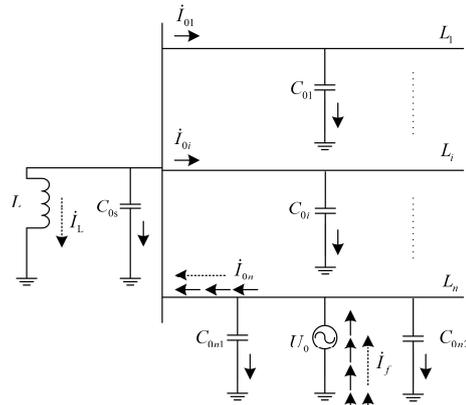


图1 出线故障暂态零序电流分布图

Fig. 1 Transient zero sequence current distribution diagram of feeder fault

谐振接地系统在单相接地故障发生后的短时间内存在暂态零序电流,包括幅值随时间衰减的暂态电容电流和直流分量。对于暂态电容电流,根据文献[16],其频率主要集中在300~3000Hz,此时消弧线圈的阻抗远大于线路的对地容抗,故可忽略消弧线圈的作用。根据基尔霍夫定律,暂态电容电流在系统中的分布如图1中“→”所示。衰减直流分量只能由消弧线圈与故障支路形成回路,其在系统中的分布如图1中“----->”所示。当单相接地故障发生在母线上时,暂态零序电流分布如图2所示,图2中符号含义与图1中相同。

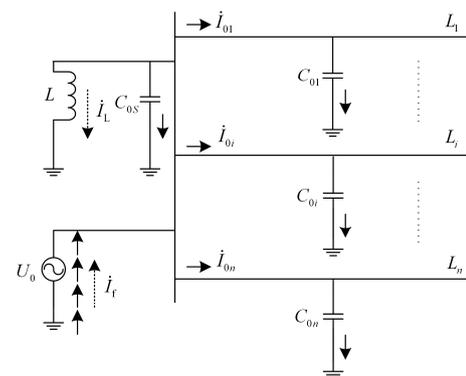


图2 母线故障暂态零序电流分布图

Fig. 2 Transient zero sequence current distribution diagram of bus fault

由图1、图2可知,当出线发生单相接地故障时,故障线路与非故障线路中的暂态电容电流极性相反且故障线路中暂态电容电流幅值、能量最大,此外故障线路中存在衰减直流分量而非故障线路中没有;当母线发生单相接地故障时,所有出线中暂态电容电流极性相同且均不存在衰减直流分量,各出线的暂态电容电流幅值、能量只与线路参数有关,

相互之间并无直接关系。因此,若首先选出暂态信号能量最大的出线则可以将故障选线的范围缩小为两个:暂态信号能量最大的出线或者母线。

1.2 故障合闸角对暂态零序电流的影响

根据文献[16],谐振接地系统发生单相接地故障后的故障电流暂态分量为

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

式中: I_{Cm} 为电容电流的幅值; ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率; φ 为故障时电压相角,即故障合闸角; ω 为工频角频率; I_{Lm} 为电感电流的幅值; τ_c 、 τ_L 为时间常数。式中第一项为高频电容电流分量,第二项为电感电流的衰减直流分量。由式(1)可知,故障电流的暂态分量受故障合闸角 φ 的影响。对于暂态电容电流,当 $\varphi = 0$ 时,其值最小,当 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 时,其值最大,其余情况介于两者之间;对于衰减直流分量,当 $\varphi = 0$ 时,其值最大,当 $\varphi = \frac{\pi}{2}$ 时,其值最小,其余情况介于两者之间;此外,随着故障合闸角 φ 的增大暂态电容电流和电感电流的幅值变化趋势相反。

2 选线方法

2.1 衰减直流分量与暂态电容电流能量计算

为缩小选线范围,根据第 1.1 节的分析,首先选出暂态信号能量最大的出线,记为初选线路,同时记能量仅次于初选线路的出线为参考线路。暂态信号能量可以通过对信号进行快速傅立叶变换然后计算频谱能量得到,本文不再详述。下面,故障选线只需要区分是初选线路故障还是母线故障。

由 1.2 节的分析可知,小故障合闸角时衰减直流分量幅值、能量较大,大故障合闸角时暂态电容电流幅值、能量较大,因此本文提出根据系统衰减直流分量与暂态电容电流能量的不同定性地区分故障合闸角的大小,并在衰减直流分量能量大时(故障合闸角小)使用衰减直流分量选线,在暂态电容电流能量大时(故障合闸角大)使用暂态电容电流选线。这样可以保证用于选线的信号无论在大故障合闸角还是在小故障合闸角情况下始终具有较大的幅值,减小噪声、误差等干扰对信号极性的影响,进而提高选线准确率。由于故障点处的衰减直流分量与暂态电容电流均为系统中的最大值,故将其定义为系

统衰减直流分量与暂态电容电流。本文所提方法中系统衰减直流分量与暂态电容电流分别取自消弧线圈与初选线路的零序电流。由于衰减直流分量由故障点和消弧线圈形成回路,故两处信号能量近似相等。对于暂态电容电流,在出线故障时,初选线路首端测得的暂态电容电流能量与系统所有非故障线路暂态电容电流能量之和相等,近似等于系统暂态电容电流能量;在母线故障时,系统暂态电容电流能量要比初选线路的能量大,但由于母线电流数据难以测量且初选线路为暂态能量最大的出线,故使用初选线路的暂态电容电流能量近似代替系统暂态电容电流能量,仿真实验证明这样近似在选线中是可行的。

在多数故障情况下,衰减直流分量的初始幅值小于暂态电容电流的初始幅值,但衰减直流分量持续时间较暂态电容电流长,故两者能量可比。而希尔伯特边缘谱能够反映整个时间范围内能量的累积^[16],故用希尔伯特边缘谱计算系统衰减直流分量与暂态电容电流能量。计算方法如下所述。

1) 首先对消弧线圈与初选线路的零序电流数据进行集合经验模态分解(EEMD),将信号分解为若干本征模态分量(IMF)和剩余分量。

$$S(t) = \sum_{i=0}^n C_i(t) \quad (2)$$

式中: $S(t)$ 为原始信号; n 为 IMF 分量的数量; $C_i(t)$ 为第 i 层 IMF 分量,其中 $C_0(t)$ 为剩余分量。

2) 之后,对各层 IMF 分量分别进行希尔伯特变换并求出相关参数。

$$\hat{C}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi_i(t) = \arctan \left(\frac{\hat{C}_i(t)}{C_i(t)} \right) \\ f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \\ a_i(t) = \sqrt{C_i(t)^2 + \hat{C}_i(t)^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$E_i(t) = a_i^2(t) \quad (5)$$

式中: $\varphi_i(t)$ 为瞬时相位; $f_i(t)$ 为瞬时频率; $a_i(t)$ 为瞬时幅值; $E_i(t)$ 为瞬时能量。

3) 最后求希尔伯特能量谱和希尔伯特边缘谱。

$$H(f, t) = \text{Re} \sum_{i=0}^n E_i(t) e^{j2\pi \int f_i(t) dt} \quad (6)$$

$$h(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f, t) dt \quad (7)$$

式(6)为希尔伯特能量谱, 希尔伯特能量谱表示瞬时能量在时间、频率平面上的分布。式(7)为希尔伯特边际谱, 由式(6)在时间上的积分得到, 边际谱的物理意义是各个频率成分在整个信号长度上的幅值(能量)和。

分别对消弧线圈零序电流边际谱低频段与初选线路零序电流边际谱高频段进行积分, 即得衰减直流分量与暂态电容电流的能量。比较两者大小, 衰减直流分量能量大时使用衰减直流分量选线, 暂态电容电流能量大时使用暂态电容电流选线。

2.2 基于衰减直流分量判据

当衰减直流信号用于选线时, 由于出线故障时初选线路中存在衰减直流分量而母线故障时初选线路中不存在, 并且无论出线故障还是母线故障衰减直流分量都流过消弧线圈, 因此通过比较初选线路与消弧线圈中的衰减直流分量能量是否相近即可确定故障线路。若两衰减直流分量能量相近, 则初选线路为故障线路, 否则为母线故障。

衰减直流分量通过对初选线路与消弧线圈中的零序电流进行集合经验模态分解(EEMD)并重构瞬时频率平均值小于 15Hz 的 IMF 分量提取。EEMD 方法同式(2), 利用希尔伯特变换求瞬时频率方法同式(3)、式(4)。判断能量是否相近本文采用能量差占比与门限值比较的方法, 能量差占比定义为消弧线圈与初选线路衰减直流分量能量差的绝对值与消弧线圈衰减直流分量能量之比, 门限值设为 50%。由于在线路故障和母线故障情况下, 线路中的衰减直流分量为存在和不存在之间的差别, 故门限值设为 50%完全能够满足正确选线的要求。

2.3 基于暂态电容电流判据

当暂态电容电流信号用于选线时, 根据 1.1 节的分析, 根据暂态电容电流信号的极性确定故障线路。若初选线路与其余出线暂态电容电流极性相反, 则初选线路为故障线路; 若初选线路与其余出线暂态电容电流极性相同, 则为母线故障。

为了避免暂态能量小的出线极性不准确干扰选线, 同时降低计算量, 暂态电容电流判据仅比较初选线路与参考线路的暂态电容电流极性确定故障线路。

3 选线步骤

基于上述方法的谐振接地系统单相接地故障选线步骤如下:

1) 监视电压互感器二次侧开口零序电压, 当电压超过门限值时启动故障选线算法;

2) 获取消弧线圈与各路出线故障后的若干周波零序电流数据;

3) 对各路出线零序电流数据进行快速傅立叶变换, 计算暂态信号能量, 确定能量最大的线路为初选线路, 能量次之为参考线路;

4) 计算系统衰减直流分量与暂态电容电流能量, 首先对消弧线圈与初选线路的零序电流数据进行集合经验模态分解, 然后对本征模态分量进行希尔伯特变换, 并求出希尔伯特边际谱, 分别对消弧线圈零序电流边际谱低频段与初选线路零序电流边际谱高频段进行积分即得衰减直流分量与暂态电容电流的能量, 计算方法如式(2)一式(7);

5) 比较系统衰减直流分量与暂态电容电流能量大小, 衰减直流分量能量大时使用基于衰减直流分量判据, 通过计算能量差占比并与门限值比较的方法确定故障线路, 暂态电容电流能量大时使用基于暂态电容电流判据, 通过比较初选线路与参考线路暂态电容电流极性确定故障线路。

4 仿真实验

4.1 仿真模型

采用 Matlab 建立如图 3 所示的 10 kV 谐振接地系统仿真模型。模型包含 5 路出线 $L_1 \sim L_5$, 其中 L_1 、 L_2 为架空线, 长度分别为 30 km、15 km; L_3 、 L_4 为电缆线, 长度分别为 12 km、8 km; L_5 为架空电缆混合线, 电缆线部分靠近母线, 长 5 km, 架空线长 7 km。架空线路、电缆线路参数如表 1 所示。所有负荷均采用三相串联 RLC 负载。

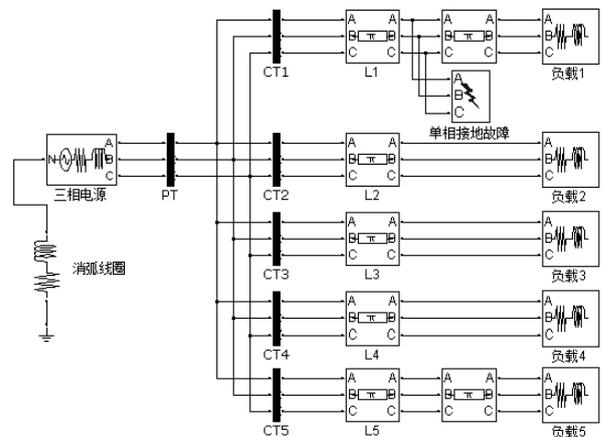


图 3 10 kV 谐振接地系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of 10 kV resonant earthed system

消弧线圈补偿度取 8%, 由线路参数求出系统对地分布电容 C_{Σ} , 进而计算出消弧线圈等效电感

$L = 1/1.08 \times 1/(3\omega^2 C_{\Sigma}) = 0.7559 \text{ H}$ 。消弧线圈的有功损耗取感性损耗的 3%^[18], $R_L = 0.03\omega L = 7.1242 \Omega$ 。采样频率为 6.4 kHz。此外, 在零序电流波形中添加随机噪声以模拟实际系统中存在的种种噪声干扰。

表 1 线路参数^[10]

Table 1 Line parameters^[10]

线路类型	相序	电阻/ $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	电感/ $\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$	电容/ $\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$
架空线路	正序	0.1700	1.2100	0.0097
	零序	0.2300	5.4800	0.0060
电缆线路	正序	0.2650	0.2550	0.1700
	零序	2.5400	1.0190	0.1530

4.2 算法验证

4.2.1 故障合闸角为 0° 时的仿真验证

算例 1: 线路 L_1 故障, 故障合闸角 0°, 过渡电阻 5 Ω , 故障点距离母线 3 km。

初选线路为 L_1 , 参考线路为 L_3 ; 计算得系统衰减直流分量能量大于暂态电容电流能量, 使用基于衰减直流分量判据。使用 EEMD 方法分解消弧线圈与初选线路的两组零序电流信号并重构衰减直流分量如图 4 所示, 图中实线为消弧线圈衰减直流信号, 虚线为 L_1 衰减直流信号。由图可见, 两衰减直流信号极为相似; 经计算, 能量差占比为 13.8%, 故可判定为出线 L_1 故障。

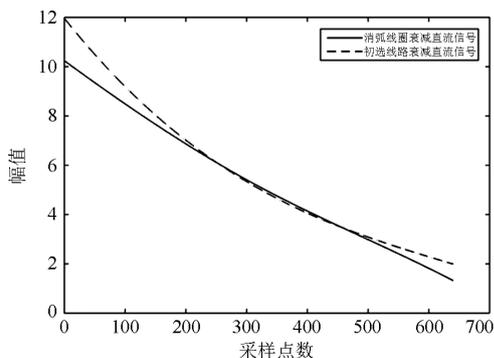


图 4 消弧线圈与初选线路中衰减直流信号对照 (出线故障)

Fig. 4 Comparison of decaying DC component between arc suppression coil and primary selection line (feeder fault)

算例 2: 母线故障, 故障合闸角 0°, 过渡电阻 5 Ω 。

初选线路为 L_3 , 参考线路为 L_4 。计算得系统衰减直流分量能量大于暂态电容电流能量, 使用基于衰减直流分量判据。使用 EEMD 方法分解消弧线圈与初选线路的两组零序电流信号并重构衰减直流分量如图 5 所示, 图中实线为消弧线圈衰减直流信号, 虚线为 L_3 衰减直流信号。由图可见, 两衰减直流信号差异很大; 经计算, 能量差占比为 99.9%, 故可

判定为母线故障。

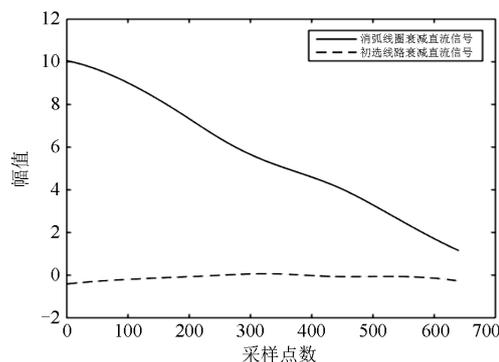


图 5 消弧线圈与初选线路中衰减直流信号对照 (母线故障)

Fig. 5 Comparison of decaying DC component between arc suppression coil and primary selection line (bus fault)

由算例 1、2 可知, 无论出线故障还是母线故障, 新方法在小故障合闸角情况下灵敏性高, 均能可靠、准确选线。

4.2.2 随机故障情况下的仿真验证

谐振接地系统的暂态过程除受故障时刻影响外还与过渡电阻、系统参数等众多因素有关。为了全面验证选线方法, 并与前人所提方法进行对比分析, 本文对上述影响因素的不同组合进行了大量仿真, 具体故障情况如表 2 所示, 表中故障时刻用故障合闸角代表, 测试个数指不同影响因素的自由组合数。

选择文献[3]所提方法与本文方法进行对比分析, 仿真结果表明: 在系统中没有随机噪声干扰时, 文献[3]方法, 选线准确率达 100%, 在小故障合闸角情况下依然能够准确选线; 但系统中存在随机噪声干扰时, 文献[3]方法随着故障合闸角减小和故障电阻增大选线效果变差。在表 2 所列的故障工况下, 选线准确率仅为 35.36%。

表 2 测试样本的故障情况

Table 2 Fault conditions of test samples

故障馈线	故障合闸角/(°)	过渡电阻/ Ω	故障距离/km	测试个数
L_1			(0,30]内随机取 5 个整数	180
L_2			(0,15]内随机取 5 个整数	180
L_3	0、30、60、90、120、150	0、10、50、100、500、1000	(0,12]内随机取 5 个整数	180
L_4			(0,8]内随机取 5 个整数	180
L_5			(0,12]内随机取 5 个整数	180
母线				36

仿真测试本文所提方法, 结果表明: 在表 2 所列的故障工况下, 过渡电阻为 500Ω 及以下时选线准确率为 100%, 过渡电阻为 1000Ω 时选线准确率为 93.59%。误选原因为大电阻接地情况下采样信号过小, 系统噪声干扰幅值已与采样信号可比, 并且采样信号小时运算误差大, 故出现误选。考虑到实

际系统中故障合闸角情况下发生大电阻接地情况的概率很低, 该选线准确率已能满足工程实际需求。现将部分选线结果列于表 3 中。表中极性针对基于暂态电容电流判据而言, 能量差占比针对基于衰减直流分量判据而言。

表 3 测试样本的部分选线结果

Table 3 Simulation results of partial test samples

故障馈线	故障合闸角/ $^{\circ}$	过渡电阻/ Ω	故障距离/km	初选线路	选线判据	极性 / 能量差占比	选线结果
L_1	0	10	3	L_1, L_3	衰减直流分量	16.5%	L_1
L_2	30	0	8	L_2, L_3	暂态电容电流	相反	L_2
L_3	0	100	4	L_3, L_4	衰减直流分量	18.6%	L_3
L_3	90	100	4	L_3, L_4	暂态电容电流	相反	L_3
L_4	0	1000	2	L_4, L_5	衰减直流分量	29.9%	L_4
L_5	60	500	9	L_5, L_3	暂态电容电流	相反	L_5
母线	150	10	/	L_3, L_5	衰减直流分量	99.8%	母线

由表 3 可以看出, 新方法在不同故障合闸角情况下能自适应地选择基于衰减直流分量判据或者基于暂态电容电流判据选线; 两判据在不同过渡电阻、故障距离或者母线故障情况下选线准确率高。

5 结论

为解决谐振接地系统单相接地故障在小故障合闸角情况下选线准确率不高的问题, 本文在分析谐振接地系统暂态零序电流特征的基础上, 提出了一种新的单相接地故障选线方法, 得到的主要结论如下:

1) 谐振系统发生单相接地故障后, 故障合闸角较小时衰减直流分量能量大, 故障合闸角较大时暂态电容电流能量大, 将能量较大的信号用于故障选线, 可以保证用于选线的信号始终具有较大的幅值, 减小噪声、误差等干扰对信号极性的影响, 进而提高选线准确率;

2) 故障合闸角较小情况下, 根据消弧线圈与初选线路中衰减直流信号能量是否相近可确定故障线路, 提高了谐振接地系统在故障合闸角较小时选线的灵敏性;

3) 所提方法将集合经验模态分解与希尔伯特变换应用于故障选线, 充分发挥了其在时频分析方面的优势。

本文能够有效解决谐振接地系统在小故障合闸角情况下选线准确率低的问题, 大量 Matlab 仿真表明, 该方法选线准确率高, 适应性强, 为实际选线提供了新思路。所提方法需要采集消弧线圈零序电流数据, 这一数据可以通过在消弧线圈加装电流互感器获得, 具有采集电流数据功能的消弧线圈装置在实际设备中已较为常见。

参考文献

- [1] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
WANG Yaonan, HUO Bailin, WANG Hui, et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [2] 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.
- [3] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.
DAI Jianfeng, ZHANG Yanxia. Study on adaptively choosing fault line under single-phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.
- [4] 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.
- [5] 束洪春, 彭仕欣. 基于短窗数据 S 变换能量的缆-线混合配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 152-159.
SHU Hongchun, PENG Shixin. A fault line detection

- algorithm for distribution network of overhead line and underground cable mixed lines using S-transform energy from short window data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 152-159.
- [6] 张钧, 何正友, 贾勇. 基于S变换的故障选线新方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 109-115.
ZHANG Jun, HE Zhengyou, JIA Yong. Fault line identification approach based on S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 109-115.
- [7] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.
XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin, et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 金涛, 褚福亮. 基于暂态非工频零序电流的含DG新型配电网的接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 96-105.
JIN Tao, CHU Fuliang. A fault line-selection method in new distribution network with DG based on transient non-power frequency zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 96-105.
- [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. Fault 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] 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 traveling wave for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.
- [13] 董新洲, 王珺, 施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 154-160.
DONG Xinzhou, WANG Jun, SHI Shenxing. Principle and algorithm of traveling waves based single-phase-to-ground protection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 154-160.
- [14] 肖先勇, 张文海, 汪颖, 等. 基于故障相暂态信号特征的二维故障选线法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 178-184.
XIAO Xianyong, ZHANG Wenhai, WANG Ying, et al. Two-dimensional fault line detection based on transient signal features of fault phase[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 178-184.
- [15] 刘德利, 曲延滨. 改进的希尔伯特-黄变换在电力谐波中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 69-73.
LIU Deli, QU Yanbin. Application of improved HHT approach to harmonic analysis in power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 69-73.
- [16] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [17] 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. 希尔伯特黄变换中边际谱的研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1323-1326.
ZHONG Youming, QIN Shuren, TANG Baoping. Study on the marginal spectrum in Hilbert-Huang transform[J]. System Engineering and Electronics, 2004, 26(9): 1323-1326.
- [18] 任建文, 张猛, 谷雨峰. 基于本征模态熵的谐振接地系统故障选线研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 53-59.
REN Jianwen, ZHANG Meng, GU Yufeng. Study on resonant earthed system fault line detection based on intrinsic mode entropy[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2014, 41(6): 53-59.

收稿日期: 2016-04-04; 修回日期: 2016-09-28

作者简介:

宋金钊(1992-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为小电流接地系统故障选线; E-mail: 1547601677@qq.com

李永丽(1963-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 张爱琴)