

一种配电网线-缆混合线路故障选线新方法

束洪春, 彭仕欣, 赵兴兵

(昆明理工大学电力工程学院, 云南省昆明市 650051)

摘要:城市配电网中线-缆混合线路的应用广泛。针对配电网发生单相接地故障时线-缆混合线路暂态电容电流较大的特点,提出一种基于小波包分解的故障选线相关分析新方法。应用小波包良好的频域分频特性,以适当频率带宽对配电网发生单相接地故障后各条线路的暂态零序电流进行分解,得到其在不同频段的输出。按能量最大的观点确定特征频段,并根据故障线路与健全线路的暂态电容电流在特征频段的相似性最弱的原理,通过对特征频段的小波包分解系数进行相关分析实现故障选线。理论分析和仿真结果表明,对于线-缆混合线路,该方法选线准确、可靠。

关键词:混合线路;小波包;小电流接地系统;单相接地故障;故障选线;相关分析

中图分类号: TM755; TM727.2

0 引言

随着城市电网的迅速发展,铺设电缆不仅能够提高线路的输送容量、降低变电站的出线规模,而且能减轻对线路通道方面的压力,提高通道利用率,简化网络接线,因此,电网中电缆线路的比例逐渐上升,线-缆混合线路也越来越多。由于电缆的对地电容较大,系统发生单相接地故障后,电缆线路暂态过程明显,暂态电容电流较大,呈现出与纯架空线路配电网不同的特征,此时再应用针对架空线路的选线方法,其效果不理想。随着电缆、线-缆混合线路在配电网中的广泛应用,配电网电缆、线-缆混合线路故障选线方法的研究越来越重要。

小波包分析在多分辨分析基础上提供了一种更加精细的暂态信号分析方法,将频带进行多层次划分,能对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解,从而更精确、有效地提取暂态分量^[1]。以往基于小波的分析选线方法大多在一个频段选线^[2-4]。由于暂态量的频率成分和大小受故障角、网络参数等因素影响,且在小电流接地系统中不同线路暂态量的频率分布不总是完全一致,各线路暂态电容电流分布也并不总是集中在一个频段,因此,在一个频段选线的结果并不可靠,而应该在多频段选线^[5-8]。

现有的在多频段选线的方法仅用特征频段的幅值或相位信息来实现选线,未能利用特征频段的幅

值和相位综合信息。本文提出了基于小波包分解的故障选线相关分析法,利用小波包对配电网各条线路的故障零序电流进行分解,选出 2 个特征频段,分别对 2 个特征频段的幅值和相位综合信息进行相关分析,实现选线。

1 故障特征分析

谐振接地系统发生单相接地故障时,故障电流暂态过程持续的时间很短,且含有丰富的特征量。在故障瞬间,流过故障点的暂态接地电流既存在工频分量,又存在高频振荡分量。接地电流的暂态分量由故障相对地电容的放电电流、健全相对地电容的充电电流和消弧线圈的暂态电感电流叠加而成^[9-14]。接地电流暂态分量的表达式为:

$$i_d = I_{Cm} \frac{\omega_i}{\omega} \sin(\omega_i t + \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_C}} + (I_{Lm} \cos \varphi) e^{-\frac{t}{\tau_L}} \quad (1)$$

式中: I_{Cm} 为电容电流稳态幅值; ω_i 为暂态自由分量振荡分量的角频率; τ_C 为电容回路的时间常数; I_{Lm} 为电感电流的稳态值; τ_L 为电感回路的时间常数。

由式(1)可见,接地电流暂态分量的值等于电容电流的暂态自由振荡分量与电感电流的暂态直流分量之和,两者幅值不仅不能相互抵消,还可能叠加,使暂态电流幅值明显增大。单相接地故障大多发生在相电压接近于最大值瞬间,此时暂态电容电流较暂态电感电流大得多,而且暂态频率也很高,流过消弧线圈的电流很小,对暂态不起作用。所以在故障初期,电感电流与电容电流不能相互补偿,其暂态接地电流的特性主要由暂态电容电流的特性所决定。

谐振接地系统发生单相接地故障时,健全线路

收稿日期: 2007-12-26; 修回日期: 2008-03-20。

国家自然科学基金资助项目(90610024, 50467002, 50347026); 云南省科技攻关资助项目(2003GG10); 云南省自然科学基金资助项目(2005F0005Z, 2004E0020M, 2002E0025M)。

对地电容的充放电相似,其零序电流具有极强的相似性;而故障线路由于附加零序电压源的存在,其零序电流与其他线路的差异最大;当母线故障时,各线路零序电流都具有极强的相似性。

基于上述分析,当谐振接地系统发生单相接地故障时,可以通过分析故障零序电流的相似性来选出故障线路。实际谐振接地系统发生单相接地故障前,故障线路和健全线路的零序电流不为0,含有幅值很小的不对称分量,故障馈线与健全馈线零序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,故障馈线与健全馈线零序电流中的稳态工频分量大小和相位也可能相近。因此,零序电流特征频段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值和相位差异;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,提取各线路零序电流的特征频段,并对特征频段的暂态信息进行相关分析能够实现完善的选线。

2 故障特征的小波包分解和相关分析

2.1 特征频段的确定

采用 db10 小波包对各线路零序电流进行 4 层分解,除去工频所在的最低频段(4,0)后,能量较大的频段包含了暂态电容电流的主要特征。因此,按频段将所有线路暂态零序电流的能量求和,能量和较大的频段必然综合反映了各线路之间的本质关系。按式(2)计算各线路暂态零序电流在除(4,0)以外各频段的能量 ϵ ,并计算各频段所有线路暂态零序电流的能量和,选择能量和的最大值和次大值所在的频段为特征频段。

$$\epsilon = \sum_n (\omega_k^{(j)}(n))^2 \quad (2)$$

式中: $\omega_k^{(j)}(n)$ 为小波包分解第 (j,k) 子频段的系数,每个子频段共有 n 个系数。

2.2 相关分析

相关函数能综合反映信号中每一频率分量的综合相位关系及幅值信息,是时频描述随机信号统计特征的一个非常重要的数字特征。确定性信号可以看做是平稳且具有遍历性的随机信号的特例,因而其基本概念和定义同样也适用于确定性信号的相关分析^[15]。从相关分析的理论而言有其内在的物理含义,设 $x(t)$ 和 $y(t)$ 为 2 个能量有限的实信号波形。为研究它们之间的差别,衡量其在不同时刻的相似程度,引入下式:

$$\epsilon = x(t) - \lambda y(t + \tau) \quad (3)$$

式中: λ 为常数。

由式(3)可见,显然有一最佳的值使得 2 个波形在均方误差最小准则下获得最佳的逼近,取 ϵ^2 的时间平均值 W 来衡量二者之间的相似性,则有:

$$W = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \epsilon^2 dt = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T (x(t) - \lambda y(t + \tau))^2 dt \quad (4)$$

令 $dW/dt=0$,求得最佳的 λ_{opt} 使 2 个波形最相似,并将其代入式(4),得到 W 的最小值为:

$$W_{min} = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt (1 - \rho_{xy}^2(\tau)) \quad (5)$$

式中:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau) dt}{\sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt} \sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T y^2(t+\tau) dt}} \quad (6)$$

将式(6)离散化,并令 $\tau=0$,则有:

$$\rho_{xy}(0) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \left(\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式(7)表示 $x(t)$ 与 $y(t)$ 波形在一定的数据窗内同步采样的相关关系,定义为二者的相关系数,它可以衡量同一数据窗内 2 路信号的相似程度。显然, ρ_{xy} 越大, W 越小,2 个波形越相似。当 $\rho_{xy} = \pm 1$ 时, $W=0$,说明 $x(t)$ 与 $y(t)$ 完全相似。 $\rho_{xy} = 1$ 时为正相似; $\rho_{xy} = -1$ 时为负相似。

3 故障选线方法

基于上述分析,谐振接地系统发生单相接地故障时,故障线路与健全线路零序电流在特征频段的幅值、相位差异显著,利用这一特征可实现完善的选线算法,其实现步骤如下:

1) 利用 db10 小波包对各线路零序电流进行 4 层分解,按式(2)计算各线路暂态零序电流在除(4,0)以外各频段的能量,并计算各频段所有线路的能量和值,确定特征频段。

2) 依次对故障后各条线路零序电流在 2 个特征频段的小波包分解系数进行两两相关分析,分别求取 2 个特征频段每条线路相对于其他线路的相关系数 $\rho_s(i)$ 。其中: $i=1,2,\dots,m$; m 为系统出线条数; $s=1,2$,表示 2 个特征频段。为综合反映信号在 2 个特征频段的相关性,取信号在 2 个特征频段的相关系数的平均值作为选线判据的综合相关系数 $\rho(i)$,即

$$\rho(i) = \frac{1}{2} (\rho_1(i) + \rho_2(i)) \quad (8)$$

3) 比较各条线路的综合相关系数,当 $\rho(i) > \rho_{set}$

$(i=1,2,\cdots,m)$ 恒成立时(本文取 0.1),判定系统发生母线接地故障。否则,最小的 ρ 对应的线路即为故障线路。

4 数字仿真验证

4.1 仿真模型

系统模型如图 1 所示。该系统为一个有 6 条出线的 110 kV/35 kV 变电所,Z 形变压器中性点通过消弧线圈串联电阻接地。出线采用架空线路、线-缆混合线路和电缆线路,其中,架空线路采用 JS1 杆型, LGJ-70 型导线,档距为 150 m,电缆线路采用 YJLW03 型高压电缆。

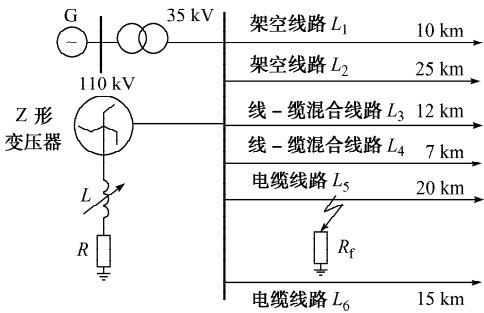


图 1 辐射状谐振接地系统
 Fig. 1 Radial resonant earthed system

4.2 仿真算例分析

限于篇幅,本文仅给出架空馈线 L_1 在故障合闸角 45° 、距母线 3 km 处经 $20\ \Omega$ 过渡电阻发生单相接地故障的选线过程。以 4 kHz 采样频率对图 1 所示系统进行录波,得到各线路零序电流如图 2 所示。

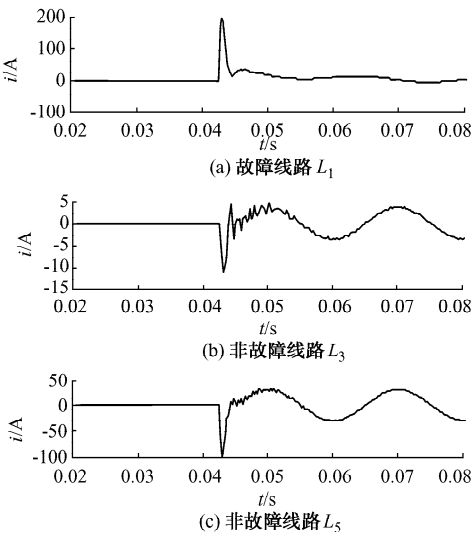


图 2 线路零序电流
 Fig. 2 Line zero-sequence current

利用 db10 小波包对各线路故障前后 1 个周期

的零序电流进行分解,考虑到最终用于故障选线的频段宽度应适当,若过细,则频段对应采样点数过少,将降低故障选线的可靠性;若过宽,则信息含量增加,不利于进一步信号分析。综合利弊后选线频段宽度定为 125 Hz,根据小波包的频率二分特性,分解层数应为 4 层。按式(2)计算各线路零序电流在各频段下的能量,并按频段将所有线路零序电流的能量求和。能量和的最大值和次大值所在的频段(4,1)和(4,3)即为特征频段。依次在(4,1)和(4,3)频段上对故障后各线路暂态零序电流的小波包分解系数进行两两相关分析,得到如下综合相关系数:
 $\boldsymbol{\rho}_1 = [-0.660\ 7, 0.663\ 8, 0.662\ 3, 0.664\ 0, 0.665\ 0, 0.663\ 9]$; $\boldsymbol{\rho}_2 = [-0.664\ 3, 0.663\ 7, 0.663\ 3, 0.663\ 7, 0.664\ 9, 0.663\ 8]$; $\boldsymbol{\rho} = [-0.662\ 5, 0.663\ 8, 0.662\ 8, 0.663\ 9, 0.665\ 0, 0.663\ 9]$ 。由综合相关系数 $\boldsymbol{\rho}$ 可知: $\rho(i) > 0.1, i = 1, 2, \cdots, 6$, 且 $\rho(1)$ 最小,由此可判断线路 L_1 为故障线路。

4.3 算法适应性分析

改变故障点位置、接地电阻大小、故障角大小,发现本方法不受其影响,仿真实验结果验证了该方法的正确性和有效性。仿真结果如表 1 所示。

表 1 故障选线结果
 Table 1 Results of fault line detection

故障线路	X_f/km	R_f/Ω	$\theta/^\circ$	相关系数	选线结果
L_1	3	20	0	$[-0.644, 0.671, 0.671, 0.672, 0.671, 0.671]$	正确
	7	200	30	$[-0.588, 0.655, 0.638, 0.654, 0.659, 0.656]$	正确
	5	500	90	$[-0.488, 0.506, 0.421, 0.560, 0.544, 0.511]$	正确
L_3	7	500	0	$[0.755, 0.783, -0.320, 0.787, 0.788, 0.785]$	正确
	2	200	60	$[0.449, 0.454, -0.408, 0.107, 0.446, 0.457]$	正确
	10	20	90	$[0.418, 0.589, -0.587, 0.563, 0.587, 0.590]$	正确
L_5	15	200	0	$[0.675, 0.681, 0.687, 0.684, -0.528, 0.682]$	正确
	4	20	30	$[0.451, 0.557, 0.432, 0.570, -0.565, 0.556]$	正确
	10	500	90	$[0.561, 0.588, 0.564, 0.478, -0.580, 0.584]$	正确
母线	0	500	0	$[0.962, 0.992, 0.990, 0.993, 0.992, 0.991]$	正确
	0	20	60	$[0.281, 0.662, 0.650, 0.330, 0.109, 0.662]$	正确
	0	200	90	$[0.302, 0.425, 0.499, 0.435, 0.363, 0.422]$	正确

注: X_f 为故障点距母线距离; R_f 为过渡电阻; θ 为故障合闸角。

实际系统中,单相接地故障大多表现为间歇性电弧故障,电弧过程非常复杂。本文采用“控制论”模型,即用压控开关作为实际电弧接地的理想数学化模型。仿真时,用开关的开合来表征电弧的重燃和熄灭,1 s 内燃熄弧 100 次。馈线 L_2 在距母线 5 km 处发生电弧故障的选线结果如表 2 所示。

表 2 线路 L_2 电弧故障的选线结果
Table 2 Results of arc-grounding fault in line L_2

$\theta/(^{\circ})$	相关系数	选线结果
0	[0.668, -0.658, 0.668, 0.668, 0.668, 0.668]	正确
60	[0.666, -0.666, 0.665, 0.666, 0.666, 0.666]	正确
90	[0.667, -0.666, 0.667, 0.667, 0.667, 0.667]	正确

5 结 语

针对实际配电网中线-缆混合线路单相接地故障暂态量明显的特征,本文利用小波包分解方法,根据能量最大原则提取各线路故障零序电流的特征频段,并对 2 个特征频段的小波包分解系数进行相关分析,实现故障选线。本方法特点如下:

- 1)应用小波包分解,在 2 个特征频段使用相关分析法,不仅排除了工频量和其他非特征频段的影响,而且更加有效地利用了故障暂态过程中包含的幅值和相位综合信息。
- 2)不会出现因干扰和测量误差而导致故障特征被湮没的情况,可以提高故障选线的灵敏性和可靠性。
- 3)选线过程仅利用了暂态电流信息,消除了电压互感器传变特性对选线准确性的影响。
- 4)在小故障角时也能准确选线,具有较强的抗电弧能力。

参 考 文 献

[1] CHAARI O, MEUNIER M, BROUAYE F. Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301-1308.

[2] 齐郑,杨以涵,林榕,等. 基于小波变换和维纳滤波技术的小电流接地系统单相接地故障选线研究. 电网技术, 2004, 28(13): 23-26.

QI Zheng, YANG Yihan, LIN Rong, et al. Study on faulty line detection of single phase to ground fault in small current neutral grounding system based on wivener filter technology. Power System Technology, 2004, 28(13): 23-26.

[3] 苏战涛,吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线新方法. 电网技术, 2004, 28(12): 30-33.

SU Zhantao, LÜ Yanping. A new wavelet packet analysis based method to detect faulty line for single phase to ground fault occurred in distribution net work with small current neutral grounding. Power System Technology, 2004, 28(12): 30-33.

[4] 张帆,潘贞存,张慧芬,等. 基于零序电流暂态极大值的小电流接地选线新判据. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 45-48.

ZHANG Fan, PAN Zhencun, ZHANG Huifen, et al. New criterion of fault line selection in non-solidly earthed network based on zero sequence transient current. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 45-48.

[5] 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. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 56-58.

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. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 56-58.

[6] 潘露,吕艳萍,于芳. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 76-79.

PAN Lu, LÜ Yanping, YU Fang. Fault line selection in non-solidly earthed network based on phase-frequency characteristic and multi-frequency band analysis. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 76-79.

[7] 戴剑锋,张艳霞. 基于多频率分析的自适应配电网故障选线研究. 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. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.

[8] 贾清泉,窦春霞,张华,等. 配电网单相接地故障多频带奇异量选线方法. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 74-77.

JIA Qingquan, DOU Chunxia, ZHANG Hua, et al. Singularity detection for phase-to-ground fault in non-effective grounded power networks based on multi-frequency bands analysis. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 74-77.

[9] 薛永瑞,徐丙垠,冯祖仁,等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.

XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solidly earthed network. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.

[10] 束洪春,肖白. 配电网单相电弧接地故障选线暂态分析法. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 58-61.

SHU Hongchun, XIAO Bai. A transient-based fault line selection for single-phase to ground fault on distribution system. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 58-61.

[11] 束洪春,刘娟,王超,等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 72-76.

SHU Hongchun, LIU Juan, WANG Chao, et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 72-76.

[12] 束洪春,刘娟,司大军,等. 一种自适应消弧线圈接地系统故障选线的实用新方法. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 64-68.

SHU Hongchun, LIU Juan, SI Dajun, et al. An adaptive new method for fault line selection in little current grounding system. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 64-68.

[13] 薛永瑞,冯祖仁,徐丙银,等. 基于暂态零序电流比较的小电流

接地选线研究. 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. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.

[14] 薛永端, 陈羽, 徐丙银, 等. 利用暂态特征的新型小电流接地故障监测系统. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 83-87.

XUE Yongduan, CHEN Yu, XU Bingyin, et al. Characteristic transient based monitoring system for earth fault in non-solidly earthed network. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 83-87.

[15] 毛鹏, 段玉倩, 姜娜. 基于相关分析的故障选线方法. 电网技术, 2004, 28(2): 36-39.

MAO Peng, DUAN Yuqian, JIANG Na. A correlation

analysis based method to detect faulty line under single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding. Power System Technology, 2004, 28(2): 36-39.

束洪春(1961—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新型继电保护和故障测距、数字信号处理及其应用、电力系统 CTI 技术等. E-mail: kmshc@sina.com

彭仕欣(1980—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统继电保护。

赵兴兵(1977—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统继电保护。

A New Fault Line Detection Method for Hybrid Transmission Lines of Distribution Network

SHU Hongchun, PENG Shixin, ZHAO Xingbing

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: With an increasingly extensive application of overhead-cable mixed lines in the distribution network, a new fault line detecting method with correlation analysis using wavelet packets decomposition is proposed based on the features of big capacitance current of overhead-cable mixed lines as a single phase grounded fault occurs. By using the good frequency dividing characteristic of wavelet packets, the transient zero sequence current of each line is decomposed to obtain the outputs of different frequency bands after the occurrence of a single phase grounded fault in the distribution network. The characteristic wave band can be determined by the theory of maximum energy. According to the similarity weakest principle of the capacitance current between the fault line and faultless line in the characteristic wave band, the fault line can be detected by a correlation analysis of wavelet packets decomposition factors from the characteristic wave band. The theoretical analysis and simulations indicate that the fault line detecting method is correct and reliable for the distribution network with overhead-cable mixed lines.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90610024, 50467002, 50347026), the Key Science and Technology Project of Yunnan Province (No. 2003GG10) and Natural Science Foundation of Yunnan Province (No. 2005F0005Z, 2004E0020M, 2002E0025M).

Key words: hybrid transmission lines; wavelet packets; small current neutral grounding system; single phase grounded fault; fault line detection; correlation analysis