

基于 SFB 和相关分析法的小电流接地故障选线方法

王玉梅,董洋洋,刘兴艳

(河南理工大学 电气工程及其自动化学院,河南 焦作 454003)

摘要: 提出了利用 B-样条小波包选择出故障暂态特征最明显的有效频带(SFB),并融合相关分析法对单相接地后各条馈线间的故障暂态波形进行综合相关度分析的方法。利用 B-样条小波在阶数增加时具有最优时频窗口的特点,与一般小波分解相比能够更好地提取暂态零序电流信号故障特征,运用相关分析法对各条线路的特征进行分析,正常线路的相关系数较大,故障线路较小。通过求取相关系数平均值,避免数据采集不同步引起的计算误差,得到按照发生线路故障可能性大小排列的故障选线序列。EMTP 仿真结果表明该方法不受故障条件的影响,能准确、可靠地解决小电流接地系统单相接地故障选线的问题。

关键词: B-样条小波;有效频带;相关分析;故障选线

中图分类号: TM 86

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0048-04

0 引言

小电流接地系统在我国配电网中应用广泛,但配电网拓扑结构的多变性导致零序电流复杂多变,致使现有的比相、比幅选线方法都不能做到完全可靠,而注入法的附加设备多,成本高,而且注入信号的强度受电压互感器容量限制,给检测带来困难。虽然小波分析检测奇异性比较模极大值的方法,效果有所改善,但在现场干扰下,由于小波分析方法对波形的奇异点比较敏感,加上本身信号比较弱,因而故障与非故障线路的区分阈值难以确定,选线的可靠裕度不大,不能有效地提高现场应用的可靠性^[1-5]。本文融合相关分析法及小波包分解技术的各自优势,先用 B-样条小波包选出各条线路上的有效频带(SFB),然后对各线路 SFB 所对应的小波包分解系数波形进行相关分析。求出各线路与其他线路的相关系数,按接地故障发生可能性大小进行排列,即可选出故障线路。该方法充分运用了有效频率分量的综合相位关系以及幅值信息,不受故障时接地电阻、故障合闸角和故障位置等因素影响,有效地解决了故障选线问题。

1 B-样条小波包的构造及有效频带的选取

1.1 B-样条小波包的构造

使用基数 B-样条函数是构造小波的基本方法。基数 B-样条函数是一类具有最小支撑的简单多项式函数,它具有低通特性和对称性,奇数阶 B-样条函数具有反对称性,偶数阶 B-样条函数具有正对称性。基数 B-样条函数满足式(1)的递推关系^[6]。

$$N_m(t) = \frac{t}{m-1} N_{m-1}(t) + \frac{m-x}{m-1} N_{m-1}(t-1) \quad (1)$$

当阶数 $m=4$ 时得到的三次 B-样条函数具有接近最优窗口,而且三次 B-样条函数的滤波特性较好^[7]。所以本文选用三次 B-样条函数作为原函数,以其导函数作为小波母函数。在信号的奇异性检测中,小波的对称性非常重要。时域的对称性可以获得频域的线性相位,这能够使得一个合成信号在某点的奇异性经小波变换形成的各个成分的模极大值点仍集中于一点,不会产生错位。B-样条小波能够满足这种要求。

1.2 有效频带的选取

首先对线路的相频特性进行分析,从而选出用于故障选线的有效频带。

1.2.1 单线路

一条线路的 π 型等效网络如图 1 所示,其中 C 、 L 和 R 分别表示该线路自身总的对地分布电容、电感和电阻, D 为检测点。

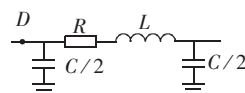


图 1 单线路 π 型模型
Fig.1 π -type model of single line

一般线路电阻相对线路电感较小,线路的串联谐振频率 ω_s 和并联谐振频率 ω_p 分别可表示为 $\omega_s \approx \sqrt{2/(LC)}$; $\omega_p \approx 2/\sqrt{LC} = \sqrt{2} \omega_s$ 。从检测点 D 看,该线路的相频特性见图 2。

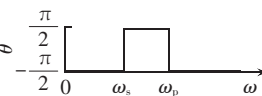


图 2 单线路相频特性
Fig.2 Phase-frequency characteristic curve of single line

即在 $0 \sim \omega_s$ 频段,线路阻抗呈现容性;在 $\omega_s \sim \omega_p$ 频段,线路阻抗呈现感性;在大于 ω_p 的频段线路阻抗呈现容性。使线路阻抗呈现容性的频段即为选线的 SFB。

1.2.2 中线点不接地系统单相接地故障

中性点不接地系统发生单相接地故障时的零序

网络如图3所示(其中S闭合表示中性点经消弧线圈接地,S断开表示中性点不接地)。 U_{α} 为故障点虚拟电源在零序网络上的电压; L_{0j} 、 R_{0j} 和 C_{0j} 分别为第 j 条健全线路($j \neq i$)或者故障电路($j = i$)从故障点到母线之间的零序电感、电阻和分布电容; D_j 为各出线的检测点; L 为消弧线圈零序电感。

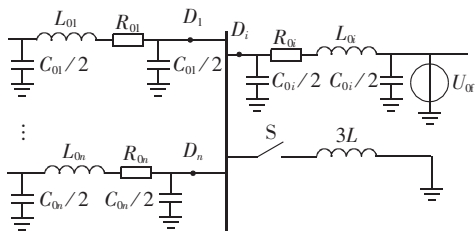


图3 单相接地故障的零序网络等效图

Fig.3 Equivalent zero-sequence network of single-phase grounding fault

健全线路 j ($j \neq i$)检测点 D_j 检测的是本线路的等效阻抗,其相频特性等于单线路的相频特性,串联谐振和并联谐振各只有一次;故障线路 i 检测点 D_i 检测的背后阻抗是所有健全线路总体等效阻抗,其存在多个串联谐振过程和并联谐振过程。母线上具有4条出线的中性点不接地系统典型的相频特性如图4所示。

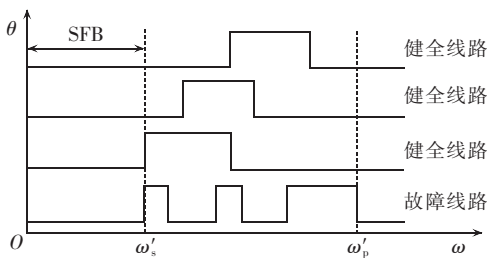


图4 不接地系统零序网络相频特性示意图

Fig.4 Phase-frequency characteristic curves of zero-sequence network of ungrounded system

设 ω'_s 为所有健全线路自身串联谐振频率的最小值, ω'_p 为所有健全线路自身并联谐振的最大值。结合上述分析,由图4可知: $0 \sim \omega'_s$ 频带和大于 ω'_p 的频带即为SFB,每条健全线路的阻抗均呈现容性,故障线路 i 检测点 D_i 检测的背后阻抗也呈容性,此时故障线路零序电流与所有健全线路零序电流极性相反。

1.2.3 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障

在中性点经消弧线圈接地系统中,所有健全线路检测点的相频特性不受影响,而故障线路检测点背后的相频特性将有所变化^[8]。母线上具有4条出线的中性点经消弧线圈接地系统典型的相频特性如图5所示。

同理,结合上述分析,由图5可知: $\omega_l \sim \omega'_s$ 频带和大于 ω'_p 的频带即为SFB,故障线路检测点 D_i 背后阻抗为容性,即故障线路的零序电流与所有健全线路的零序电流的极性相反。

2 相关分析法

相关函数是时频描述随机信号的一个非常重要

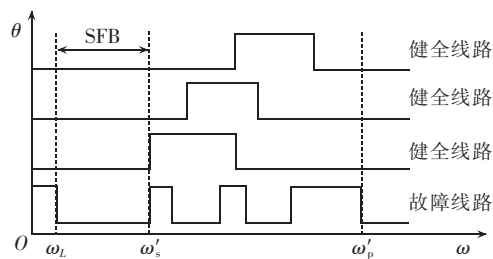


图5 消弧线圈接地系统零序网络相频特性示意图

Fig.5 Phase-frequency characteristic curves of zero-sequence network of system grounded via arc-suppression coil

的数字特征。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: $\delta = x(t) - \alpha y(t + \tau)$, α 为常数。显然有一最佳的 α_{opt} 值使得两波形在均方误差最小准则下获得最佳的逼近,即取 δ^2 的时间平均值 S 来衡量二者之间的相似性,则有

$$S = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \delta^2 dt = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [x(t) - \alpha y(t + \tau)]^2 dt \quad (2)$$

令 $\frac{dS}{d\alpha} = 0$,求得最佳的 α_{opt} ,并将其代入式(2),得到最小的 S 值为

$$S_{min} = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt [1 - \rho_{xy}^2(\tau)] \quad (3)$$

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}} \quad (4)$$

显然, ρ 越大,则 S 越小,2个波形越相似。将式(4)离散化,并令 $\tau = 0$,则有

$$\rho_{xy}(0) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n)}{\left[\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) \right]^{-1/2}} \quad (5)$$

式(5)表示了 $x(t)$ 、 $y(t)$ 波形在一定数据窗内同步采样的相关关系, ρ 称为相关系数,它可以衡量同一数据窗内2路信号的相似程度。此系数综合反映了2路信号中每一频率分量的综合相位关系以及幅值信息。可由此得到相关系数矩阵,从而求得每条线路的综合相关系数。

3 故障选线原理

发生单相接地故障时,故障线路与健全线路零序电流在SFB上的幅值、相位差异显著,利用这一特征可实现选线算法。

3.1 步骤1:确定故障选线的有效频带

记各线路零序电流小波包分解后在各有效子频带上的模极值为 $\{W_{ljk} | k=1,2,\dots,N_{lj}\}$,其中, $l=1,2,\dots,n$; n 表示母线出线总回路数; $j=1,2,\dots$ 为有效子频带编号; k 为小波包分解后子频带内模极值点序号; N_{lj} 为第 l 回路在第 j 个子频带上的模极值点数。各线路在各有效子频带上的模极值能量为

$$E_{lj} = \sum_{k=1}^{N_{lj}} |W_{ljk}|^2 \quad (6)$$

将各线路的能量特征向量组成能量矩阵为

$$E=\begin{bmatrix} E_{11} & \cdots & E_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ E_{n1} & \cdots & E_{np} \end{bmatrix}_{n \times p} \quad (7)$$

式(7)中某一行向量的最大元素所在的列*j*对应的子频带即为线路的特征频带,如果小波包分解层数为*m*,则该行所对应的线路特征频带为[*m*,*j*]。

3.2 步骤 2:求得相关系数矩阵

若各条线路特征频段一致,由式(5)求取各线路在该特征频段下的小波包分解系数波形的两两相关系数,形成相关系数矩阵:

$$M=\begin{bmatrix} \rho_{11} & \cdots & \rho_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \rho_{n1} & \cdots & \rho_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (8)$$

其中, ρ_{ij} 为给定数据窗下线路*i*与*j*暂态故障电流在该特征频段下小波包分解系数波形之间的相关系数。显然,该矩阵是对角线元素均为 1 的对称阵。

3.3 步骤 3:求综合相关系数

根据相关系数矩阵求得每条线路综合相关系数。将矩阵每行元素求和后再平均作为每条线路的综合相关系数。综合相关系数为负且绝对值越大的线路发生接地故障的可能性越大,综合相关系数为正且绝对值越大的线路发生接地故障的可能性越小。

4 仿真及结果分析

利用 EMTP 建立仿真系统模型,35 kV 母线上有 5 条出线(见图 6)。各线路的零序和正序参数如表 1 所示。

主变参数:额定电压为 110/38.5 kV,容量为 31.5 MV·A;取过补偿方式为 8%;采样频率为 10 kHz。

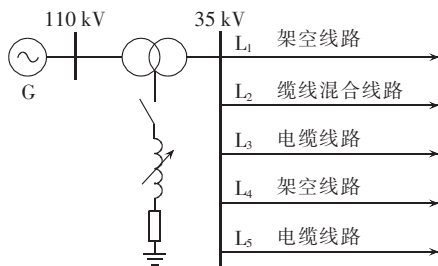


图 6 仿真系统模型

Fig.6 Model of simulation system

表 1 线路参数

Tab.1 Line parameters

类型	$R_0/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$L_0/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	$C_0/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
架空线路	0.23	5.478 0	0.008 00
电缆线路	2.70	1.019 1	0.280 00

类型	$R_1/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$L_1/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	$C_1/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
架空线路	0.17	1.210 0	0.009 69
电缆线路	0.27	0.254 8	0.339 10

仿真考虑的因素有:接地电阻 R_f 、故障合闸角 α 、出线传输距离、故障点位置 D_f 、故障相别 P_f 、线路故障前运行状态 S_1 等,各种情况下的仿真结果如表 2 所示。由表第 1 行与第 11 行的选线序列输出可知,在不同接地电阻的情况下,综合相关系数序列的输出仍然能够准确地选出故障线路,虽然除故障线路外的其他线路排序不同,但不影响选线的结果,在其误差范围之内。同理,表第 3 行与第 7 行比较可知不受故障合闸角的影响;表第 2 行与第 8 行比较可知不受故障位置的影响;表第 5 行与第 6 行比较可知不受故障前运行状态的影响。综合表 1 中各种故障条件,可知此选线方法在各种故障模式下都能可靠地给出选线结果,准确率达 100 %。

表 2 单相接地故障选线结果

Tab.2 Results of faulty line selection for single-phase grounding

故障线路// 各馈线长度/km	故障条件						综合相关系数序列
	R_f/Ω	D_f/km	$\alpha/(\circ)$	P_f	$S_1/\%$		
$L_1//20,35,18,17,30$	5	10	0	B 相	0	1(-0.607),3(0.547),5(0.547),4(0.554),2(0.554)	
$L_1//20,35,18,17,30$	150	10	0	B 相	0	1(0.178),2(0.713),4(0.713),3(0.717),5(0.717)	
$L_1//20,35,18,17,30$	15	15.5	90	A 相	100	1(-0.530),3(0.519),5(0.519),4(0.532),2(0.532)	
$L_2//20,35,18,17,30$	15	25.5	90	A 相	0	2(-0.539),4(0.589),1(0.606),3(0.606),5(0.606)	
$L_2//20,35,18,17,30$	5	4.5	0	B 相	100	2(0.104),4(0.775),1(0.776),3(0.776),5(0.776)	
$L_3//20,35,18,17,30$	5	4.5	0	B 相	50	3(-0.571),1(0.405),5(0.405),2(0.430),4(0.430)	
$L_3//20,35,18,17,30$	15	14.5	0	A 相	100	3(-0.525),1(0.507),5(0.507),2(0.521),4(0.521)	
$L_4//20,35,18,40,20$	150	34.5	0	B 相	0	4(0.224),5(0.787),2(0.789),1(0.798),3(0.798)	
$L_4//20,35,18,40,20$	5	4.5	0	A 相	100	4(0.113),2(0.777),3(0.778),1(0.778),5(0.779)	
$L_5//20,35,18,40,20$	150	4.5	90	A 相	0	5(0.057),2(0.528),4(0.544),1(0.618),3(0.618)	
$L_5//20,35,18,40,20$	150	10	0	B 相	0	5(0.378),4(0.843),2(0.844),1(0.845),3(0.845)	
母线//20,35,18,40,20	5		0	A 相	100	母,4(0.963),5(0.982),1(0.986),3(0.986),2(0.987)	
母线//20,35,18,40,20	150		0	B 相	0	母,4(0.801),2(0.826),5(0.857),1(0.861),3(0.861)	

5 结论

本文将相关分析法及小波包分解技术有机地融合起来,详细研究了基于 SFB 相关分析故障选线的方法。在有效频段上对故障电流的小波包分解序列波形进行相关分析,充分利用了故障电流波形的幅

值及相位信息,避免了仅进行相位比较而可能造成的故障信息丢失。仿真结果表明:对于单相接地故障选线问题该方法抗干扰能力强,不受配电网运行方式、系统参数、故障初相角、故障点位置及过渡电阻的影响,具有高度的灵敏性和可靠性。

参考文献:

- [1] 宋东驰,吴国忠,屠雪勇. 基于小波理论的小电流单相接地故障分析[J]. 机电工程,2008,25(2):107-110.
SONG Dongchi,WU Guozhong,TU Xueyong. Wavelet theory based method to analyze fault of small current single phase ground [J]. Electrical and Mechanical Engineering,2008,25(2):107-110.
- [2] 石勇,张艳霞,沈勇环. 基于数字信号处理器和小波包重构算法的配电网接地选线装置的研究[J]. 电网技术,2005,29(4):50-54.
SHI Yong,ZHANG Yanxia,SHEN Yonghuan. Digital signal processors and wavelet packet reconstruction algorithm based to research of distribution network grounding line selection device [J]. Power System Technology,2005,29(4):50-54.
- [3] 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[J]. 电力系统自动化,2006,30(4):45-48.
ZHANG Fan,PAN Zhencun,ZHANG Huifen. New criterion of small current grounding line based on the transient zero sequence current maximum value[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(4):45-48.
- [4] 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[J]. 电力系统自动化,2007,31(4):76-79.
PAN Lu,LÜ Yanping,YU Fang. Based on the phase-frequency characteristic and multi-band analysis of the small current grounding fault line selection[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(4):76-79.
- [5] 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[J]. 电力系统自动化,2007,31(2):74-77.
JIA Qingquan,DOU Chunxia,ZHANG Hua,et al. Line selection method of multi-band single-phase ground fault and fault singularity in distribution[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(2):74-77.
- [6] 束洪春,彭仕欣,赵兴兵. 一种配电网线-缆混合线路故障选线新方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(11):61-65.
SHU Hongchun,PENG Shixin,ZHAO Xingbing. A new fault line detection method for hybrid transmission lines of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(11):61-65.
- [7] 王侃,施慎行,杨建明,等. 基于暂态行波的接地选线装置及其现场试验[J]. 电力自动化设备,2008,28(6):118-121.
WANG Kan,SHI Shenxing,YANG Jianming,et al. Transient-traveling-wave-based grounding line selector and its field tests [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(6):118-121.
- [8] 成敬周,张举,陈琛,等. 基于高频暂态分量进行相关分析及模糊推理的选相新方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(5):50-55.
CHENG Jingzhou,ZHANG Ju,CHEN Chen,et al. New selection line method of based on correlation analysis and fuzzy inference in high-frequency transient components[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(5):50-55.

(编辑:康鲁豫)

作者简介:

王玉梅(1963-),女,河南新乡人,副教授,主要研究方向为变电站综合自动化与供配电新技术;

董洋洋(1984-),男,河南郑州人,硕士,主要研究方向为电力系统保护及其安全稳定控制(E-mail:dongyang0003@163.com)。

Selection of faulty line based on SFB and correlation analysis for small-current neutral grounding system

WANG Yumei,DONG Yangyang,LIU Xingyan

(Electrical Engineering and Automation College,Henan Polytechnic University,Jiaozuo 454003,China)

Abstract: The B-spline wavelet packet is used to select the SFB(Selected Frequency Bands) with most obvious fault transient characteristics and the integrated correlation between the transient waveforms of feeders during single-phase grounding fault are analyzed. As the B-spline wavelets have the optimal time-frequency window when order increases,it extracts the fault characteristics of transient zero sequence current much better than the general wavelet decomposition does. The characteristics of each line are analyzed with the correlation analysis and the correlation coefficient of faulty line is smaller than those of healthy lines. The average correlation coefficient is calculated to remove the errors caused by asynchronous sampling and the faulty line selection list is sorted according to the fault probability of line. Simulation with EMTP shows the proposed method selects the faulty line correctly and reliably under different fault conditions.

This work is supported by the Henan Province Control Engineering Key Discipline Open Foundation(KG2009-20).
Key words: B-spline wavelet packet; SFB; correlation analysis; faulty line selection