

基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸

成敬周, 张 举

(华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 提出一种单相自适应重合闸的新方案。该方案利用复小波分析来检测电弧产生的谐波, 并以此区分输电线路的单相瞬时性故障和永久性故障。故障发生后, 对于不同的故障性质, 线路首端重合闸安装处的电压谐波含量是不同的。根据电压谐波含量的特征, 提出利用复小波相位和幅值的新算法综合判别来快速确定线路的故障性质。该方法可以在熄弧之前进行判断, 保障了最佳重合时间。线路故障仿真验证了该算法的有效性和实用性。

关键词: 单相自适应重合闸; 瞬时故障; 永久故障; 二次电弧; 复小波分析

中图分类号: TM762 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)07-0021-05

0 引言

传统单相重合闸盲目进行重合, 不能区分瞬时性故障和永久性故障, 当重合于永久性故障时, 会使电力系统再一次受到冲击。自适应重合闸使线路只重合于瞬时性故障从而提高了系统的稳定性。

目前出现了一些自适应重合闸的技术: 电压判据利用了断相后瞬时性故障时恢复电压高于永久性故障时线路互感电压的原理^[1], 受线路参数和负荷影响较大; 用电压谐波参数估计技术和能量比值方法来识别瞬时故障时的二次电弧^[2,3], 需要计算多次谐波; 用复小波获得线路故障性质的方法^[4], 没有考虑电弧的影响, 并且整定较困难。另外利用人工神经网络的智能识别及基于电弧原理提取故障暂态高频信号特征来判别故障性质的方法^[5,6]也在研究之中。

本文的判据是在二次电弧特性分析基础上提出的。通过对不同故障时母线处谐波性质的比较, 用一种改进递归复小波的相位特性来区分故障性质, 并且利用幅值特性来辅助检测各暂态过程。由于该方法基于电弧识别技术, 不需等待电弧熄灭后进行判断, 避免了重合闸失去最佳重合时间而引起系统失稳, 较传统的电压判据具有优越性。用 EMTP 的 TACS 功能对大量电弧仿真验证了该算法的有效性。

1 改进型的复小波

1.1 复小波简介

复小波一般具有平滑性和对称性的优点, 可供选择的相频特性较多, 易与信号的相频特性匹配。

可以在频带划分的基础上, 进行相位谱差异的识别。文献 [7] 介绍了一种包含非因果序列变换的复小波递归算法, 但需要用整个数据窗的数据进行分析。本文采用一种改进递归小波^[8], 该小波变换只由因果序列构成。

引入了频移因子 $e^{i\omega t}$, 其母小波为快速衰减的复函数:

$$(t) = \left[-\frac{3t^3}{3} - \frac{4t^4}{6} - \frac{5t^5}{15} \right] e^{(+i\omega)t} u(-t) \quad (1)$$

为使母小波满足容许性条件 $(0) = 0$, 须使 $\omega = \sqrt{3}$ 。将母小波进行伸缩、平移得:

$${}_{b,a}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

为了使 $1/a$ 等于频率 f , 可以令 $\omega = 2$, 则 $\omega = 2/\sqrt{3}$ 。

设输入信号 $S(nT)$ 的采样周期为 T , 令平移参数 $b = kT$, (k 为整数)。对信号 $S(nT)$ 的小波变换:

$$w_s(kT, f) = \sum_n S(nT) \sqrt{f}^{-1} [f(nT - kT)] T \quad (3)$$

为了满足实时性要求, 对上式施以 Z 变换, 得到快速单向递推算法:

$$w_s(kT, T) = T \sqrt{f} \sum_{i=1}^5 s_i(k-i) T - \sum_{j=1}^6 {}_j w_s[(k-j)T, f] \quad (4)$$

小波变换系数表示了 kT 时刻对信号中频率为 f 的成份的刻画。也就是在位置 $b = kT$ 处, 测量频率为 f 的成份其波形与此位置上对应小波的相似程度。由因果序列递推获得系数 w_s 为一复数序列, 提取复数的幅值信息序列 w 和相位信息序列, 以利于分析。

1.2 复小波检测特征谐波

复小波的幅频特性如图 1 所示,由图 1 可知,当 $a = 1/150$ 时本文所用复小波的中心频率为 150 Hz,其对频率为 150 Hz 的信号反应最灵敏。由于复小波幅频响应的快速衰减,使得对基波及其它频率成分的信号反应不灵敏。

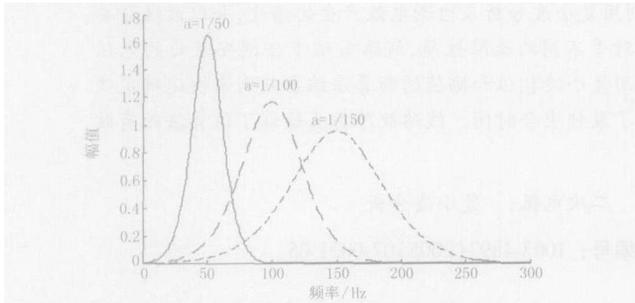


图 1 不同尺度下的幅频特性

Fig 1 Amplitude/frequency characteristics under different scales

考查该递归小波变换后相位的特性,设 $s(t) = \sin(\omega_0 t) + k \sin(3\omega_0 t)$,该信号包含了基波和三次谐波,其比值 k 取 0, 0.02, 0.1, 0.5, a 取 1/150 时,小波变换系数的相位特性如图 2 所示。由图可知,在纯基频 ($k=0$) 信号中,相位变化由 $-\pi$ 到 π 为工频一周期时间;在三次谐波含量为基波的 1/50 ($k=0.02$) 时,变换后的相位曲线已经发生严重畸变;在三次谐波含量达到 0.1 时,相位由 $-\pi$ 到 π 已经变为 1/3 周波时间,其和 $k=0.5$ 时的相位变换曲线基本一致。可以得出尺度为 1/150 时,相位主要反映的为三次谐波特性,而对基波是不灵敏的。

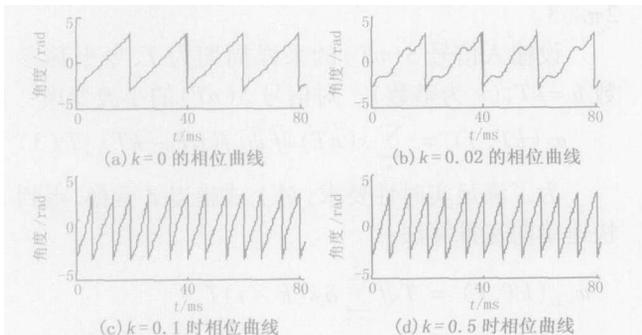


图 2 不同谐波含量的相位变换曲线

Fig 2 Variation of the phase angle under different harmonic signals

从以上分析还可知道:该改进递归小波其主要反映 a 尺度下的 f 频率的特性。 a 在未归一化条件下,当 f 频率信号相对于其他频率信号的含量达到一定比率时,其相位曲线由 $-\pi$ 到 π 经历 $50a$ 的工

频周期时间,当 a 为 1/250 时,反映五次谐波的相位曲线将在 1/5 周期变化一次。

2 线路谐波分析

2.1 电弧产生的谐波信号

在不同故障性质下,电弧具有不同的性质。永久性故障一般由于线路倒塔、断线、绝缘子损坏引起,电弧较短因而快速熄灭。瞬时性故障一般由于绝缘子表面闪络或大风碰线引起,电弧较长,可分为两个阶段:从故障发生后到断路器跳开为一次电弧阶段;断路器跳开后到电弧熄灭前为二次电弧阶段;二次电弧为小电流电弧,一般会经历燃烧-熄灭-重燃-熄灭的反复过程,根据电弧通道的耐压与弧道恢复电压的值来决定是否重燃,是一个复杂的非线性过程。

检测二次电弧的存在与否及熄弧时间可以用来判定线路的故障性质及合闸时间。当判定二次电弧存在时,即可判定为瞬时故障,允许进行合闸。图 3 给出了用 EMTP 的 TACS 控件仿真得到与实际接近的二次电弧波形^[9],前段为电弧电压,后段为熄弧后的恢复电压。二次电弧由于电弧长度变长,其重燃电压也不断变大。当电弧电压低于重燃电压时,电弧电流很小,为熄弧状态;当高于重燃电压时,电弧重燃,直到电弧电压不再大于重燃电压后,二次电弧真正熄灭,并进入恢复电压时期,此时由电感耦合电压及电容耦合电压的矢量和组成。

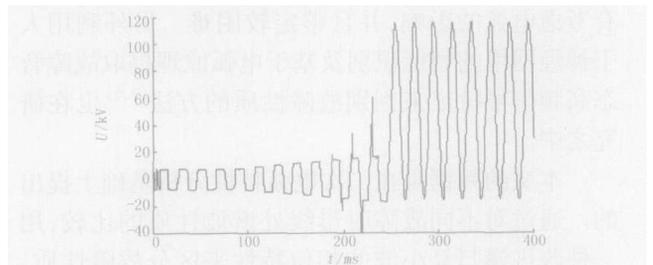


图 3 电弧仿真的电压波形

Fig 3 Arc voltage wave by EMTP simulation

二次电弧重击穿电位梯度由以下非线性的实验公式得到:

$$V_r(t) = [5 + 1620T_e / (2.15 + I_p / \sqrt{2})] (t - T_e) \cdot h(t - T_e) \quad (5)$$

该式中 T_e 为电弧产生到电弧熄弧时间; t 为电弧产生时间; I_p 为电弧电流的峰值。

图 3 中看出,电弧波形由于重燃-熄灭的过程近似方波,由傅氏分析可知它只由各奇次谐波组成,不含偶次分量,可分解为:

$$v(t) = \sum_{k=1} \frac{4V_m}{(2k-1)} \sin(2k-1)\omega t \quad (6)$$

图 4 为电弧的实际频谱,可以清楚看到奇次谐波较大,偶次谐波接近零;三、五次谐波一般占基波的 10%以上。

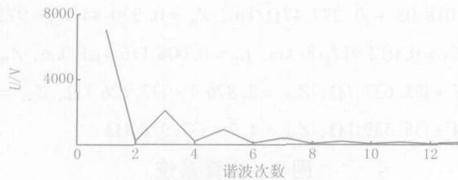


图 4 电弧电压的频谱图

Fig 4 Arc voltage frequency spectra

2.2 母线处谐波分析

非线性二次电弧使得故障处出现了谐波,从而母线处电压、电流中也有谐波存在。图 5 (a)、(b)给出了两种故障全过程的线路首端重合闸安装处的波形。图中 [1]为故障前正常运行状态; [2]为从单相故障发生后到断路器跳闸前的一次电弧阶段; [3]表示断路器跳闸后的二次电弧阶段; [4]表示电弧熄弧后的恢复电压阶段; [5]重合后的状态(永久故障时 [3]为跳闸后无电弧接地状态)。

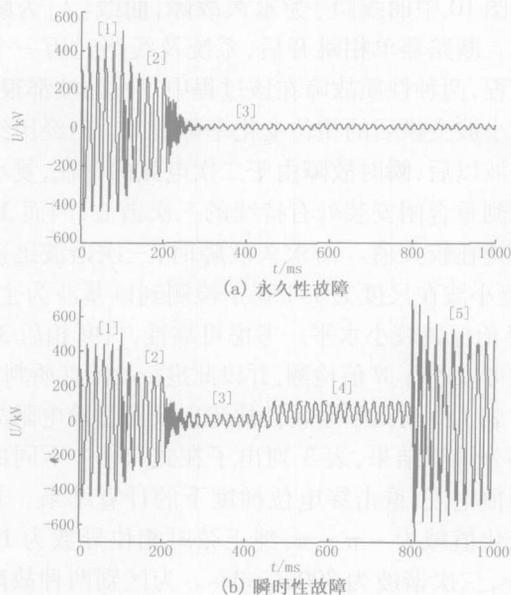


图 5 不同故障时故障相端电压的波形

Fig 5 Phase voltage of sending end under different fault types

考查两种性质故障的三次谐波含量,图 6 给出了三次谐波与基波的比值。可以看出,图 (a)中在永久故障发生和跳闸时,谐波比有两个突变,在跳闸后谐波比迅速减小到零;图 (b)中瞬时故障时,在线

路跳闸(即谐波比值第二次突变)后的一段时间内,由于二次电弧的存在,三次谐波含量始终较大,谐波比值也较大;在电弧熄弧后恢复电压阶段,电压信号由电容耦合电压和电感耦合电压组成,其主要成分是直流偏置分量和基频分量,因此该阶段谐波比接近零。分析五次、七次等奇次谐波可得到同样结论。

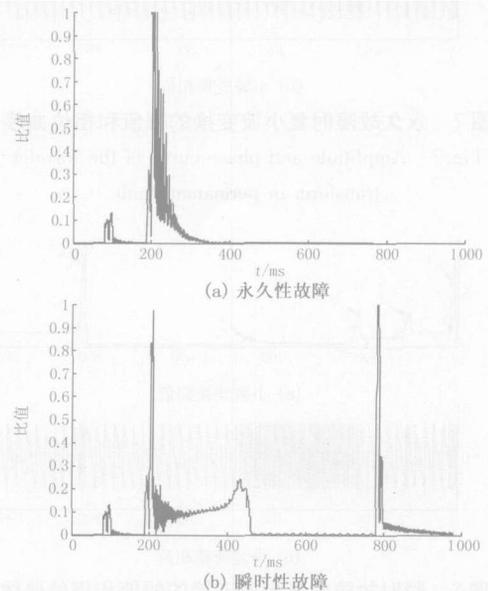


图 6 不同故障的三次谐波与基波的比值

Fig 6 Ratio of triple-harmonic and fundamental-harmonic under different fault types

对以上过程进行复小波分析,如图 7、8 所示。首先考查两过程变换系数的幅值曲线,波头 1 由小波变换初期的暂态过程所致;在波头 2 时发生了单相故障;波头 3 时发生了跳闸;波头 4 时二次电弧熄弧;波头 5 进行重合闸。可以看出,在图 9 (a)中波头 4 很小,无法辨别熄弧时刻;波头 3、4 之间的曲线只有微小波动,基本无信息可利用,因此仅凭小波变换的幅值信息难以辨认故障性质。而在两图的相位曲线中,在图 (a)中的波头对应图 (b)中的相位曲线变化呈不连续性,变化率较大;另外在波头 3、4 之间,由于二次电弧富含奇波分量,其相位曲线从 - 到 经历约为 1/3 周期,图 9 (b)中表现为该段曲线较密,而其它阶段的曲线除波头对应处短时曲线较密外,一般以工频周期变化。

3 实用新型判据的提出

从上节分析可知,可以设计一种算法,检测相位变换的疏密程度和变化规律来检测二次电弧的存在性和熄弧时间,并以幅值信息辅助检测各阶段的突

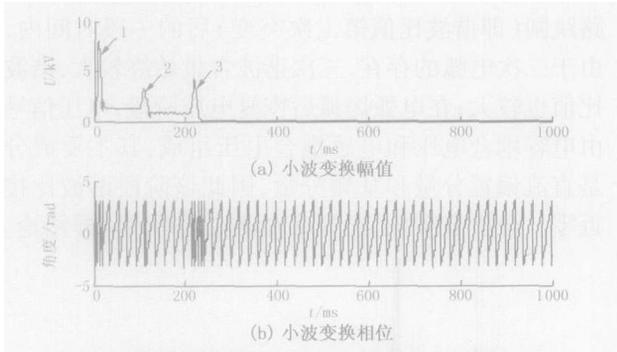


图 7 永久故障时复小波变换的幅值和相位曲线
Fig 7 Amplitude and phase curve of the wavelet transform in permanent fault

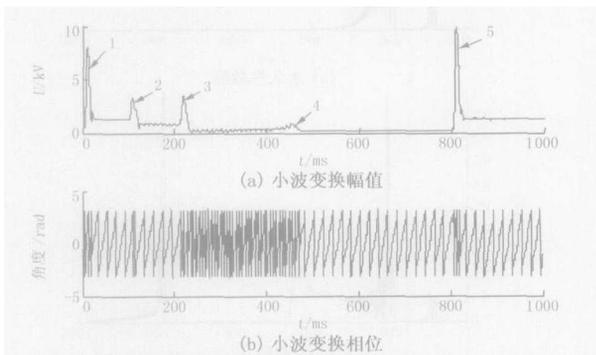


图 8 瞬时故障时复小波变换的幅值和相位曲线
Fig 8 Amplitude and phase curve of the wavelet transform in transient fault

变。设相位曲线函数为 $\theta(t)$, 采样间隔为 T , 考查相位曲线中第 k 点的变化率即相位导数:

$$\theta'(k) = (\theta(kT) - \theta((k-1)T)) / T \quad (7)$$

为明显检测相位信息, 考查 n 点在固定的时间窗 N 内相位变化率情况, 定义相位导数均值能量为:

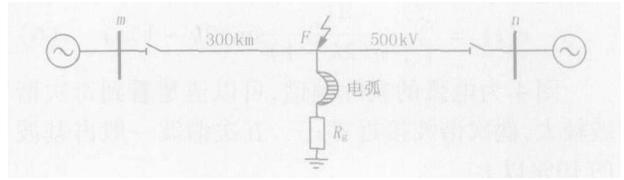
$$M = \sum_{k=n}^{n+N} (\theta'(k))^2 / N \quad (8)$$

在故障发生后, 当选相装置检测为单相故障并跳单相后, 该自适应重合闸装置启动, 并进行 M 值的检测, 当 M 值大于整定值后, 即可判定存在二次电弧, 为瞬时故障, 进行重合, 否则闭锁重合闸。

4 仿真结果分析

图 9 为 ATP 仿真 500 kV、300 km 的分布参数线路, 线路参数来自蔺河—廉州线。

仿真中设重合闸装在 m 侧, 取过渡电阻 R_g 为 200 Ω , 每周波 20 ms 采样 200 点, 数据窗 N 取 1/2 周波即 10 ms 数据。图 10 中示出尺度 a 为 1/150 下, 线路中点发生故障时, 断路器跳开后, 两种故障



$Z_1 = 0.01808 + j0.27747 \text{ } \Omega/\text{km}$, $Z_0 = 0.23084 + j0.9728 \text{ } \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.012917 \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0 = 0.008116 \mu\text{F}/\text{km}$, $Z_{M1} = 1.2857 + j5.6377 \text{ } \Omega$, $Z_{M0} = 2.8764 + j37.1267 \text{ } \Omega$, $Z_{N1} = 1.6714 + j35.5391 \text{ } \Omega$, $Z_{N0} = 4.7 + j37.9784 \text{ } \Omega$

图 9 仿真系统

Fig 9 Power system simulation

性质情况下的变换系数的相位导数均值能量 M 随时间变化曲线。

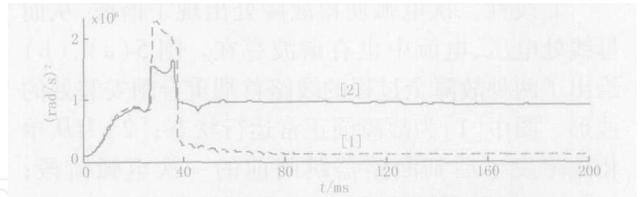


图 10 不同故障性质下判据结果

Fig 10 Estimation results under different fault types

图 10 中曲线 [1] 为永久故障, 曲线 [2] 为瞬时故障。断路器单相跳开后, 系统及线路经历一个暂态过程, 两种性质故障在该过程中三次谐波都很大, 因此小波变换后的相位变化率都很大。但经历约两个周波以后, 瞬时故障由于二次电弧的存在, 复小波检测到重合闸安装处有持续的三次谐波, 因而 M 始终保持在较大值。而永久故障时, 三次谐波迅速衰减, 复小波在尺度为 1/150 下检测到以基波为主, 因而 M 值保持较小水平。考虑可靠性, 自断相后 3~8 周波可以进行 M 值检测, 并以此进行故障性质判别。

表 1、2 列出了金属性故障以及经过渡电阻故障的部分计算结果, 表 3 列出了在式 (5) 中不同的电弧峰值电流、重击穿电位梯度下的计算结果。其角度变化值域为 $-\pi \sim \pi$, 纯正弦时相位导数为 100 rad/s, 三次谐波为 300 rad/s, 为区别两种故障均具有一定裕度, M 整定值可以取两者能量均值 $((100)^2 + (300)^2) / 2$, 即 $0.49 \times 10^6 \text{ rad}^2 / \text{s}^2$ 。

为测试该判据的有效性, 本文对多条超高压线路在不同工况下做了大量的仿真, 结果表明, 对于线路上不同位置、不同过渡电阻等故障情况, 通过 M 值判断均能正确区分故障性质。若干现场录波数据的测试结果也表明该判据的正确性。

表 1 金属性故障测试的 $M (\times 10^6 \text{ rad}^2 / \text{s}^2)$

Tab 1 Estimation result in metal fault case

	出口	20%	50%	80%	末端
瞬时性	>0.81	>0.88	>0.85	>0.87	>0.79
永久性	<0.14	<0.12	<0.10	<0.12	<0.13

表 2 经 200 电阻短路测试的 $M (\times 10^6 \text{ rad}^2 / \text{s}^2)$

Tab 2 Estimation result in transition resistance of 200 fault case

	出口	20%	50%	80%	末端
瞬时性	>0.84	>0.87	>0.88	>0.87	>0.83
永久性	<0.10	<0.11	<0.10	<0.12	<0.11

表 3 不同二次电弧测试的 $M (\times 10^6 \text{ rad}^2 / \text{s}^2)$

Tab 3 Estimation result in different secondary arc case

	$t_p = 15$	$t_p = 20$	$t_p = 30$	$t_p = 40$	$t_p = 50$
瞬时性	>0.84	>0.80	>0.82	>0.82	>0.87
永久性	<0.11	<0.11	<0.10	<0.10	<0.11

5 结论

自适应重合闸技术在重合前进行故障性质的判别,只在瞬时故障时进行重合,在电力系统中具有一定的工程应用价值。本文利用二次电弧的动态模型,模拟了两种故障性质下的单相接地故障,采用复小波对相位特征的提取来建立有效判据,克服了传统 Fourier 变换不能满足灵敏度和故障时刻定位的要求以及实值小波幅值信息难以判断的情况。理论分析和仿真结果都表明,本文设计的重合闸在不同的运行工况下均能进行判别,是一种有效的判别方法。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1996
GE Yao-zhong New Types of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996
- [2] Djuric M B, Terzija V V. A New Approach to the Arcing Faults Detection for Fast Autoreclosure in Transmission Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1793-1798
- [3] 李斌,李永丽,曾治安,等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸 [J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-

57.

LI Bin, LI Yong-li, ZENG Zhi-an, et al Study on Single-pole Adaptive Reclosure Based on Analysis of Voltage Harmonic Signal[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 53-57.

- [4] 林湘宁,刘沛,程时杰. 超高压输电线路故障性质的复值小波识别 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 33-38
L N Xiang-ning, L U Pei, CHENG Shi-jie Identification of the Instant Faults Occurred on the Extra High Voltage Transmission Line with a Complex Wavelet Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 33-38
- [5] Aggarwal R K, Johns A T, Song Y H, et al Neural-network Based Adaptive Single-pole Autoreclosure Technique for EHV Transmission Systems[J]. IEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 1994, 141(2): 155-160
- [6] Bo Z Q, Aggarwal R K, Johns A T, et al A New Concept in Transmission Line Reclosure Using High Frequency Fault Transients [J]. IEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, Part C, 1997, 144(5): 1-6
- [7] Chaari O, Mnichef, Brouaye F. Wavelet: a New Tool for the Resonant Grounded Power Distributed Systems Relaying[J]. IEEE Trans on PWRs, 1996, 11(3): 1301-1308
- [8] 张传利,黄益庄,马晓旭,等. 改进递归小波变换在变压器保护中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 20-22
ZHANG Chuan-li, HUANG Yi-zhuang, MA Xiao-xu, et al Study of Relaying Protection for Transformer Applying RWT[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(17): 20-22
- [9] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved Technique for Modeling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission Systems [J]. IEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 1994, 141(2): 148-154.

收稿日期: 2004-07-22; 修回日期: 2004-10-11

作者简介:

成敬周 (1980 -),男,汉族,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护; E-mail: cjpzpower@sohu.com

张 举 (1946 -),男,汉族,教授,从事电力系统微机保护理论研究及产品开发。

Study of single-phase adaptive reclosure based on arc detection by complex wavelet algorithm

CHENG Jing-zhou, ZHANG Ju

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(下转第 49 页 continued on page 49)

结束时间,然后在存在扰动的区域内,由快速傅里叶算法,能迅速计算出扰动的幅度。仿真结果表明,这种方法能快速、准确地判断扰动,计算幅值;同时,这种方法易于程序实现,在电网电能质量的实时监测中有很高的实用价值。

参考文献:

- [1] Barros J, Cando D, Durana L. A Laboratory for Power Quality Analysis[J]. International Journal of Electrical Engineering Education, 2001, 38(3): 210-222
- [2] Dugan R C, Megrangan M F, Benty H W. Electrical Power System Quality [M]. New York: McGraw-Hill, 1996
- [3] 李天云,陈晓东,赵为红,等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 26-30.
LI Tian-yun, CHEN Xiao-dong, ZHAO Wei-hong, et al Double Wavelets Measurements and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 26-30
- [4] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 10(22): 1-6.
CHEN Xiang-xun Wavelet-based Measurements and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances[J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 10(22): 1-6
- [5] Daubechies I Ten Lectures on Wavelets[A]. SIAM Mathematical Analysis Philadelphia (Pennsylvania): 1992
- [6] 秦前清,杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994.
Q N Qian-qing, YANG Zong-kai Applied Wavelet Analysis[M]. Xi an: Xidian University Press, 1994
- [7] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1995.
CU I Jin-tai The Principle of Wavelet Analysis[M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 1995
- [8] Gaouda A M, Salama M M A, Sultan M R. Power Quality Detection and Classification Using Wavelets-multi-resolution Signal Decomposition[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1469-1476
- [9] Littler T B, Morrow D D J. Wavelets for the Analysis and Compression of Power System Disturbances [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 358-364.
- [10] Santoso S, Powers E J, et al Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using Wavelet-based Neural Classifier, Part : Theoretical Foundation; Part : Application[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 222-235.
- [11] 朱声石,等. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社, 1995. 118-121.
ZHU Sheng-shi, et al Principle and Technology of Protective Relaying in High-voltage Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995. 118-121.

收稿日期: 2004-07-16; 修回日期: 2004-08-28

作者简介:

朱韬析(1980-),男,硕士研究生,从事负荷预测、电能质量检测的研究工作; E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com

江道灼(1960-),男,教授,电力系统及其自动化专业;主要从事 HVDC微机控制技术、FACTS及其应用技术、配电网自动化等方面的科研。

A simple and practical method of measuring short duration power quality disturbances

ZHU Tao-xi, JIANG Dao-zhuo

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A simple and practical method of measuring duration power quality disturbances is introduced. A differential signal is formed firstly for detecting the beginning time of the disturbance; then ending time when the lasting time is more than, equal to and less than one primitive period are located respectively; at last, the range of the disturbance is calculated through Fourier transform. Simulation results of various disturbance signals demonstrate the proposed method is fast, accurate and useful.

Key words: power quality; time domain; primitive period; Fourier transform

(上接第 25 页 continued from page 25)

Abstract: A new scheme used in single-phase adaptive reclosure is proposed. This scheme based on complex wavelet analysis can distinguish the transient faults and permanent faults on EHV transmission lines. After faults occur, different kinds of faults have different percentages of voltage harmonic signals which can be measured on busbar. By analyzing the characteristics of the voltage harmonic signals, this paper employs the unique algorithm based on wavelet's phase and amplitude to distinguish the fault types. This scheme works before the extinction of the arc, and it ensures to reclose in the ideal time. The results of simulation verify its correctness and practicability.

Key words: single-phase adaptive reclosure; temporary fault; permanent fault; secondary arc; complex wavelet analysis