

基于小波能谱熵的单端量暂态保护的研究

杨明玉¹, 赵志强¹, 姚万业²

(1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;
2. 华北电力大学控制科学与工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 区内外故障时暂态电流包含的各频率成分(特别是阻波器的阻塞频带内)对应的能量占总能量的比例各不相同, 而小波能谱熵计算简单, 对动态系统参数的微小变化具有独特的敏感性, 算法具有实时性, 且能反映电流在时域与频域空间的能量分布信息, 所以利用小波能谱熵值的差异可以构成区分区内外故障的判据。基于 ATP/EMTP 的故障仿真结果表明: 该保护判据能快速准确地区分区内外故障, 并且不易受到故障位置、故障类型、过渡电阻、故障时刻等因素的影响, 具有较好的适应性。

关键词: 暂态信号; 小波变换; 信息熵; 小波能谱熵; 暂态保护; 保护判据

A study of transient protection based on wavelet energy entropy for EHV transmission line

YANG Ming-yu¹, ZHAO Zhi-qiang¹, YAO Wan-ye²

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, North China Electric Power University, Ministry of Education, Baoding 071003, China; 2. Control Science & Engineering School, North China Electric Power University, Ministry of Education, Baoding 071003, China)

Abstract: When internal fault and external fault occurrence, the ratio of the energy of transient current various frequency component(especially the trap blocking frequency band) to the total energy is very different. While the wavelet energy entropy has the characteristics of easy calculation, unique sensitivity of the small changes of dynamic system parameters, and real-time and can reflect the energy distribution information of the electric current in the time and frequency domain space, so we can use the difference of the wavelet energy entropy value to construct the criterion of distinguishing internal fault and external fault. Simulations in ATP/EMTP show that this protection criterion can distinguish internal fault and external fault rapidly and accurately and it won't be affected by faulty location, faulty types, transition resistance or faulty time, so it will have a good adaptability.

Key words: transient signal; wavelet transform; information entropy; wavelet energy entropy; transient protection; protection criterion

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0010-05

0 引言

随着电力系统暂态过程研究的深入, 利用故障产生的暂态分量构成超高速线路保护的研究得到了长足发展。主要体现在两个方面, ①利用故障行波波头及其传播的特征, 提出了一系列的行波保护^[1,2]; ②利用故障时的高频暂态量在线路特性阻抗不连续点的透反射特征, 提出的暂态量保护^[3,4]。

暂态保护技术的实施关键是暂态特征的提取和暂态保护机理的建立, 行波保护运行效果还不是很理想, 其根本原因是故障信息处理的手段落后。90年代发展起来的小波分析具有可调的时频窗, 恰好在处理非平稳暂态信号等领域具有它独特的优

势, 特别适合电力系统暂态信号的分析 and 处理, 为暂态保护的实现提供了技术基础和保障。信息熵是对系统不确定性程度的描述, 而小波能谱熵将小波分析理论与熵原理相结合, 充分发挥二者的优点, 既能达到信息融合的目的, 又能更为有效地分析突变信号, 能更好地适应电力系统暂态信号的特征提取。

小波分析和熵的结合已初步应用在生物医学、机械故障诊断领域中。本文采用暂态电流信号作为测试信号, 利用小波能谱熵提取区内外故障时各频段对应能量的差异, 基于此构成暂态保护判据。借助ATP仿真表明, 基于小波能谱熵的暂态保护判据具有可实现性和实用性, 且不受故障类型、故障位置、

过渡电阻、故障时刻等的影响。

1 小波能谱熵 (Wavelet Energy Entropy)

1.1 基于多分辨率分析的快速小波变换^[6]

基于多分辨率分析的快速小波变换对时间序列信号进行逐步分解, 高、低通滤波器产生的信号分别为高、低频逼近分量; 此两分量所占频带宽度相等, 各占 1/2 频带; 每次分解后, 将信号的采样频率降低一半, 下一步对低频分量重复上述过程, 再得 2 个分解分量, 并依次分解下去。

设暂态信号 $x(n)$ 经上述快速变换后, 在第 j 分解尺度下 k 时刻的高频分量系数为 $d_j(k)$, 低频分量系数为 $a_j(k)$, 进行单支重构后得到信号分量 $D_j(k)$, $A_j(k)$ 。原始信号序列 $x(n)$ 可以表示为各分量的和, 即

$$x(n) = D_1(n) + A_1(n) = D_1(n) + D_2(n) +$$

$$A_2(n) = \dots = \sum_{j=1}^m D_j(n) + A_m(n)$$

为了统一, 用 $D_{j+1}(n)$ 代替 $A_j(n)$, 则有:

$$x(n) = \sum_{j=1}^{m+1} D_j(n)$$

$D_j(n)$ 表征了暂态信号 $x(n)$ 在不同尺度下的分量, 也为暂态信号的多尺度表示。为与后面的描述统一, 本文用 $D_j(k)$ 表示小波变换的结果, $j=1, 2, \dots, m$ 表示尺度, $k=1, 2, \dots, N$ 为第 k 个采样点。

1.2 小波能谱熵 (Wavelet Energy Entropy)

信息熵是 Shannon 对不确定性的科学称谓。设各种结果 $X_j(j=1, 2, \dots, n)$ (信号) 出现的概率为 P_j , 各个 P_j 的值不尽相同, Shannon 给出计算不确定性的公式为

$$H = -\sum_{j=1}^n P_j \log_a P_j$$

对数底 a 决定了熵的单位, 当 $a=2, e, 10$ 时, 熵的单位分别为 bit, nat, Hartley。习惯上取 $a=e$ 。当所有事件 X_j 具有等概率时, 熵值最大; 对于确定性事件, 熵为零。因此, 熵可作为不确定性的度量。当电力系统输电线路发生故障时, 其故障信号的幅值和频率都会发生很大变化。结合小波变换和熵的概念, 定义适当的小波熵, 可有效进行故障的特征提取。下面给出小波能谱熵的定义^[6,7]:

设 $E=E_1, E_2, \dots, E_j$ 为信号 $x(n)$ 在 j 个尺度上的小波能谱, 则在尺度域上 E 可形成对信号能量的一种划分。由正交小波变换的特性可知, 在某一时间窗内 (窗宽为 $W \in N$) 信号总功率 E 等于各分量功率 E_j 之和。设 $P_j=E_j/E$, 则 $\sum_j P_j=1$, 于是定义相应的小波能

谱熵 W_{EE} (wavelet energy entropy) 为

$$W_{EE} = -\sum_j P_j \ln P_j$$

其中: $E_j = \sum_k |D_j(k)|^2$ 。

随着窗的滑动, 可以得到小波能谱熵随时间的变化规律。尺度空间与频率空间具有一定的对应关系, 当选取小波分解尺度 $J=4$ 时, 电力系统暂态电流信号被分为 5 个频率段。如图 1 所示, 如果 5 个频率段占总能量的比都为 1/5, 则能谱熵值为 1.6095; 如果所占比值分别为 1/4, 1/8, 1/8, 1/8, 3/8, 则能谱熵值将变为 1.4941。可见, 能量分布不同将导致能谱熵值的不同。所以小波能谱熵能反映暂态电流信号在时域与频域空间的能量分布信息。

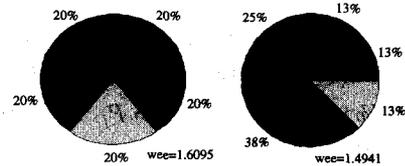


图1 能量分布不同对应的能谱熵

Fig.1 WEE of various energy distribution

1.3 小波基的选择

在小波分析中, 如何选取最佳的小波基函数目前还没有一个理论标准。一般是依照小波基函数的属性、被检信号的特征和所作分析的具体要求而定。另外, 还要根据信号处理的目的是来决定尺度的大小, 如果小波变换仅仅要反映信号整体的、近似的特性, 则往往选用较大的尺度, 反之选用尺度较小的小波。为了提取高频分量的差异, 本文按正则性相似性的原则来选择小波基。采用 Daubiechies10 小波。

2 基于小波能谱熵的单端量暂态保护原理

文献[8]对线路边界(包括母线对地电容和阻波器)的频率特性进行了分析, 得出如下结论: 线路边界对高频暂态分量有较强的透射衰减作用或反射作用, 也就是说, 对于阻塞频带内的频率分量, 不管是阻波器、母线对地电容还是两者的组合, 线路边界使信号经过后被衰减或反射; 而对于较低频的暂态分量则没有明显的作用。

由此可以推论: 对于来自于线路边界外部的信号, 其高频(特别是阻塞频带内)分量穿越线路边界后, 将大为衰减地进入被研究线路的内部, 而低频分量几乎不衰减地进入被研究线路的内部, 这就使得暂态信号中高频分量与低频分量的比例将较原有水平大为偏低; 对来自于线路边界内部的信号, 由

于不受线路边界的影响, 仅受线路本身微弱衰减的影响, 因而暂态信号中高频分量与低频分量的比例基本保持在其原有水平上。

本文取信号采样频率 $f_s=1$ MHz, 则总频带为(0~500 kHz), 窗宽 $W=100$, 小波分解尺度 $J=4$ 时, 则信号的频域空间被分为: 高频信号 D_1 (250~500 kHz), D_2 (125~250 kHz), D_3 (62.5~125 kHz), D_4 (31.25~62.5 kHz), 和低频信号 A_4 (0~31.25 kHz), 记为 D_5 。假设高频信号 D_j ($j=1, 2, \dots, 4$) 的能量分别为 E_j ($j=1, 2, \dots, 4$), 低频信号 D_5 的能量为 E_5 , 总能量为 $E = \sum_j E_j$ ($j=1, 2, \dots, 5$)。

则各频率段占总能量的比例为 $P_j=E_j/E$, ($j=1, 2, \dots, 5$), 且 $\sum_j P_j=1$ 。

由上面的理论分析和大量的仿真, 可知各频带的分布情况: 设区内各频带的能量比为 P_j' , 区外的为 P_j'' , 则 $10\% > P_j' (j=1, 2, \dots, 4) > P_j'' (j=1, 2, \dots, 4) > 0$; $90\% < P_5' < P_5'' < 100\%$ 。

记函数 $y_j=-P_j \cdot \ln(P_j)$, P_j 为各频率段能量占总能量的比值。则小波能谱熵可表示为 $W_{EE} = \sum_j y_j$ 。

函数 $y_j=-P_j \cdot \ln(P_j)$ 如图2所示: $[0-0.38]$ 为增函数, $[0.38-1]$ 为减函数。因为 $0.38 > 10\% > P_j' (j=1, 2, \dots, 4) > P_j'' (j=1, 2, \dots, 4) > 0$, 所以区内的 y_j' ($j=1, 2, \dots, 4$) > 区外的 y_j'' ($j=1, 2, \dots, 4$); 又因为 $0.38 < 90\% < P_5' < P_5'' < 100\%$, 所以区内的 $y_5' > 区外的 y_5'' 。由小波能谱熵的定义知: 区内小波能谱熵值大于区外小波能谱熵值, 由此可以选取合适的阈值作为区分区内外的判据。$

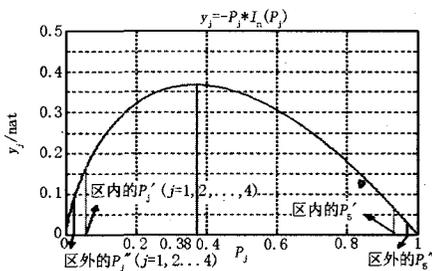


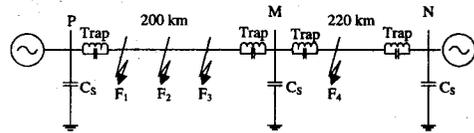
图2 $y_j=-P_j \cdot \ln(P_j)$ 的曲线图

Fig.2 Curve of $y_j=-P_j \cdot \ln(P_j)$

3 仿真分析

—500 kV实际输电线路的简化仿真模型如图3所示。每条线路两端都装有阻波器, 频带为48~500 kHz, 假定母线P、M、N对地电容为0.1 μ F。F₁点、F₂点、F₃点距离母线M分别为10 km、100 km、190 km,

F₄点距母线N为10 km。故障发生后, 故障相电流显著增加, 并富含大量的高频暂态分量。由于线路的耦合效应, 健全相B和C也含有高频暂态分量, 为了消除相间的耦合关系, 对三相暂态电流信号作“相模变换”, 并采用模电流分量 I_m ($I_m=I_a+I_c-2I_b$) 进行分析。



系统参数: $Z_{m1}=1.92+j191.92 \Omega$, $Z_{m0}=1.16+j116.33 \Omega$

$Z_{n1}=1.645+j164.5 \Omega$, $Z_{n0}=1.33+j133.33 \Omega$

线路参数: $Z_1=0.024+j0.27 \Omega/\text{km}$, $C_1=0.0131 \mu\text{F}/\text{km}$,

$Z_0=0.223+j0.87 \Omega/\text{km}$, $C_0=0.0081 \mu\text{F}/\text{km}$

图3 典型500 kV输电线路

Fig.3 Typical 500 kV transmission line

下面对不同故障点发生AG时进行仿真, 得出各频带的能量比例图, 如图4。

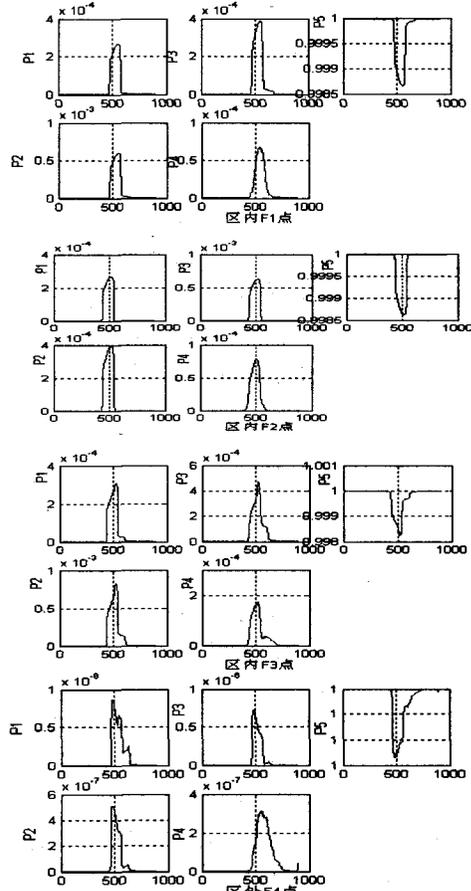


图4 不同故障点发生AG时各频带的能量比例图

Fig.4 Energy scale diagram of every frequency band when A-phase fault occurs at different locations

图5为各故障点发生AG时的能谱熵值。

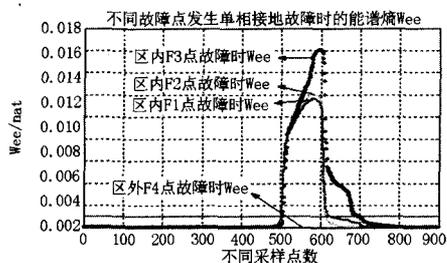


图5 不同故障点发生AG时的能谱熵值

Fig.5 The wavelet energy entropy value when A-phase fault occurs at different locations

从图5中可以看出：区内的小波能谱熵值Wee是明显大于区外的，所以利用小波能谱熵值的差异是可以区分区内外故障的。通过大量的仿真验证，我们选取 $K=1E-3$ 作为区分区内外故障的阈值，大于 $1E-3$ 的为区内故障，小于 $1E-3$ 的为区外故障。

3.1 不同故障位置、故障类型对保护判据的影响

当分别在 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 点发生不同类型短路故障时（过渡电阻为 150Ω ，故障时刻为 $0.0025s$ ）的小波能谱熵值：

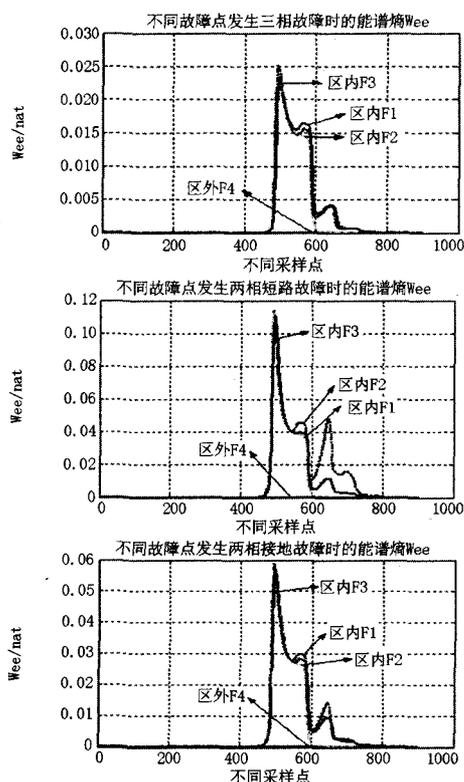


图6 不同故障点发生不同故障类型的能谱熵值

Fig.6 The wavelet energy entropy value when different faulty types occur at different locations

从图6中可以看出：区内各点发生故障时的能

谱熵值都大于 $1E-3$ ，而区外的能谱熵值都小于 $1E-3$ ，因此可以区分区内、外故障。说明保护判据不受故障类型的影响。

此外，区内不同位置发生故障时的能谱熵值差异较小，但都大于 $1E-3$ ，和区外故障时的能谱熵值仍有明显差异，所以可以区分区内、外故障，说明保护判据不受故障位置的影响。

3.2 不同过渡电阻对保护判据的影响

当分别在 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 点经不同的过渡电阻（ $R_g=0, 150 \Omega, 300 \Omega$ ，故障时刻为 $0.0025s$ ）发生AG时的小波能谱熵值：

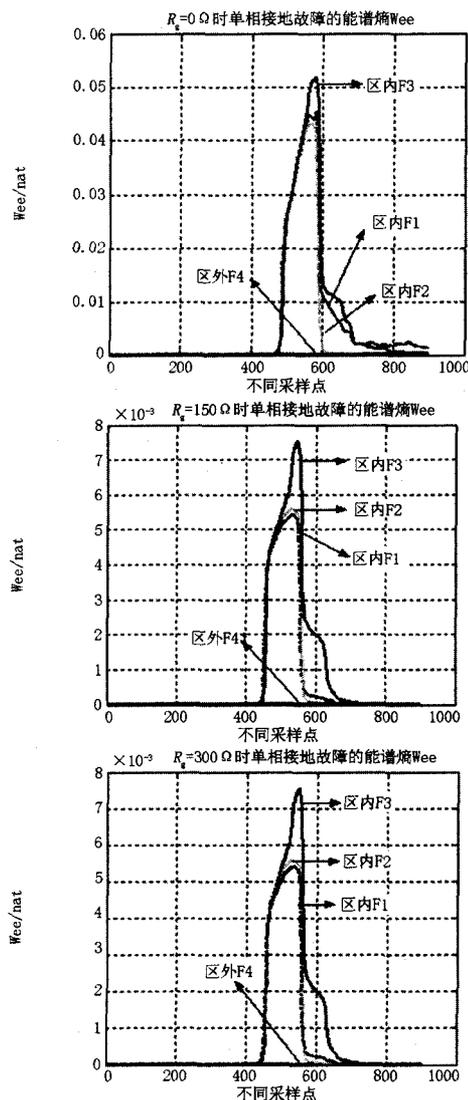


图7 经不同过渡电阻发生单相接地的能谱熵值

Fig.7 The wavelet energy entropy value when A-phase shortcuts through different transition resistance

从图7中可以看出：经不同过渡电阻发生故障

时,区内、外故障时的能谱熵值都有明显差异,可以区分区内、外故障,说明保护判据不受过渡电阻的影响。随着过渡电阻的变大,能谱熵值有减小的趋势,但区内外的能谱熵值差异越大,保护灵敏度也越高。

3.3 故障时刻的影响

当分别在 F_3 、 F_4 点以不同初始角(因为零时刻故障很少发生,故选取 5° 、 45° 、 90° ,过渡电阻为 $150\ \Omega$)发生AG时的小波能谱熵值:

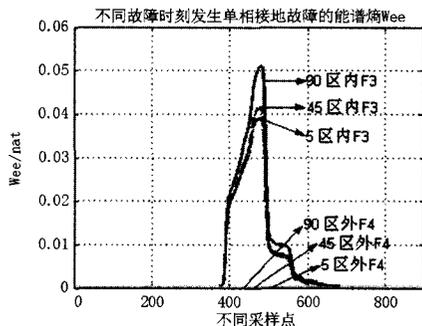


图8 不同故障时刻发生单相接地故障的能谱熵值

Fig. 8 Wavelet energy entropy value when A-phase shortcuts at different faulty time

从图8可知:不同故障时刻时发生区内、外故障时的能谱熵值有明显差异,说明保护判据不受故障初始角的影响。随着初始角的增大,能谱熵值增大,区内外的能谱熵值差异也增大,灵敏性增强。

4 结论

(1) 对于超压输电线路,区内、区外故障后的暂态电流波形具有差异,该差异主要体现在暂态电流的高频分量(特别是阻波器的阻塞频带内),利用小波的时频可变特性可以准确地捕捉到这种差异。

(2) 小波能谱熵计算简单,对动态系统参数的微小变化具有独特的敏感性,它反映了暂态电流信号在时域和频域空间的能量分布信息。利用区内、外故障时的暂态电流信号的小波能谱熵值的差异,可以区分区内、外故障,构成暂态保护判据。它具有准确、快速、实时性等特点。

(3) 该判据不受故障位置、故障类型、故障时刻以及过渡电阻等的影响,具有较高的灵敏度和可靠性。

(4) 对于输电线路母线对地电容、阻波器、复杂故障、网络操作、雷电冲击等干扰因素对本判据的影响有待进一步探讨。

参考文献

- [1] Chamia M, Liberman S. Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines—Development, Design and Application[J]. IEEE on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(6): 2104-2116.
- [2] Crossley P A, McLaren P G. Distance Protection Based on Traveling Waves[J]. IEEE on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(9): 2971-2983.
- [3] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. Non-unit Protection Technique for EHV Transmission Systems Based on Fault-generated Noise, Part I: Signal Measurement[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1994, 141(2): 137-140.
- [4] Bo Z Q. A New Non-communication Protection Technique for Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1073-1078.
- [5] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].北京:科学出版社,1999.
PENG Yu-hua. Wavelet Transform and Project Application[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [6] 何正友,刘志刚,钱清泉.小波熵理论及其在电力系统中应用的可行性探讨[J].电网技术,2004,28(21): 17-21.
HE Zheng-you, LIU Zhi-gang, QIAN Qing-quan. Study on Wavelet Entropy and Adaptability of Its Application in Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 17-21.
- [7] 何正友,蔡玉梅,钱清泉.小波熵理论及其在电力系统故障检测中应用研究[J].中国电机工程学报,2005,25(5): 38-43.
HE Zheng-you, CAI Yu-mei, QIAN Qing-quan. A Study of Wavelet Entropy Theory and Its Application in Electric Power System Fault Detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 38-43.
- [8] 段建东,张保会,任晋峰,等.超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J].中国电机工程学报,2007,27(1): 37-43.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, REN Jin-feng, et al. Single-ended Transient-based Protection for EHV Transmission Lines Basic Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43.

收稿日期:2008-08-16; 修回日期:2008-09-17

作者简介:

杨明玉(1965-),女,副教授,主要从事电力系统微机继电保护方面的研究和教学工作;E-mail: yangmy1026@yahoo.com.cn

赵志强(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

姚万业(1965-),男,副教授,主要从事控制理论与控制工程的研究。