

# 小波理论在电力系统微机保护中的应用研究

任 震, 黄群古, 黄雯莹

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 叙述了小波理论在电力系统微机保护中的应用研究的目的和意义, 概述了小波理论在电力系统微机保护中的应用研究现状, 指出了小波理论在微机保护应用中的一些算法及其存在的问题, 展望了小波理论在电力系统微机保护中的应用前景, 提出了小波理论在电力系统应用研究中的一些新思路和应用领域。

**关键词:** 小波理论; 电力系统; 微机保护

**中图分类号:** TM77

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2001)01-0001-04

## 1 引言

小波分析作为一种新型的时频分析工具, 它给信号加上了一个时频可变的窗口, 其变化的形式是根据频率自动调节窗口大小, 以确保捕捉到信号中希望得到的有用成份。小波分析在时域、频域同时具有良好的局部化性质, 使得它比傅立叶分析及短时傅立叶分析更为精确可靠, 并使得具有奇异性、瞬时的故障信号检测也变得更加准确。

小波理论在电力系统中应用的一个突出的领域, 就是微机保护中的应用。这主要是因为微机保护集成了数字滤波、快速算法、以及故障检测与诊断等各个方面。因此, 小波理论在电力系统中的应用研究, 在微机保护中得到了最充分最完美的体现。正因为如此, 基于小波理论的电力系统微机保护的研究文章也相对多一些。

小波变换有对故障信号奇异性进行检测的能力, 这对提高轻微故障时的保护起动能力和灵敏度, 是极为有利的。此外, 小波变换能有效地克服微机保护的傅立叶算法中所出现的衰减直流分量、噪声、频率波动和非整数次谐波的影响, 并能充分利用信号的暂态信息, 以提高保护的灵敏度等。

## 2 小波理论在电力系统微机保护中的应用研究现状

近几年来, 小波理论在电力系统微机保护领域中的应用研究特点, 是理论与应用同时进行。在理论方面, 主要是寻求最优小波函数与快速算法; 在应用方面, 则集中在电力系统故障信号分析与处理上, 包括突变信号的检测和故障诊断。

文献<sup>[1]</sup>利用暂态电流行波进行电力系统输电线路故障测距的研究。由于高压输电线路发生故障后

的暂态电流行波中包含故障距离的信息, 故可用于实现精确故障测距。利用电流行波实现测距存在的问题是, 电流行波无方向性, 可能造成测距失败。针对这个问题, 提出了基于小波变换模极大值的波形比较法, 同时提出了行波测距的新算法——小波变换法。

电流行波信号是一种具有突变性质的非平稳变化的信号。突变点标志着行波到达检测点。分析这种突变信号, 检测其突变点, 小波变换是一个非常有效的工具。

该文指出, 波形比较法是指比较故障线路的行波电流波形和一种非故障线路的行波波形。从开始识别出哪些是故障点的反射波, 哪些是相邻线路的反射波, 而构造特征行波的方法。

该文提出的实施小波变换测距的基本方法是: (1) 构造特征行波并施行小波变换。(2) 考察小波变换不同尺度下变化的情况, 以消除噪声。(3) 设置门槛, 去掉其它非故障点反射波所产生的模极大值。(4) 选择初始电流行波小波变换模极大值所对应的尺度作为检测尺度。(5) 以该尺度下的小波变换模极大值分布作为检测依据, 由第一模极大值和第二模极大值的位置决定出故障距离:  $L = v * t/2$ 。

文献<sup>[2]</sup>阐述了小波分析在微机保护中应用的各种可能性, 构造了基于小波变换的高通和带通滤波器, 并应用于发电机定子不对称故障保护和单相接地保护, 取得了一定的效果。

文献<sup>[3]</sup>构造了一种新型行波故障选相元件。其基本原理是计算模量初试电流行波在小波变换下的模极大值, 根据三个模量的特征选择故障相。该选相元件克服了传统的选相元件缺陷, 充分利用了电流行波中的模故障分量特征, 从而使选相元件准确可靠。

文献<sup>[4]</sup>谈到了高压输电线路发生故障后,线路上将出现运动的电压和电流行波。这种电压和电流行波的主要特征是,随着各种电流行波分别陆续到达检测点,行波信号将出现“突变”。使用三次中心 B 样条小波对电流行波施行二进小波变换,行波信号将出现模极大值。这些模极大值标志着电流行波中的最主要的故障特征,利用这些模极大值可以构造出基于电流行波故障的各种判据。

小波变换对故障信号奇异性检测的能力对提高轻微故障时的保护起动能力和灵敏度极为有利。文献<sup>[5]</sup>开展了小波变换应用于发电机微机保护的起动判据、辅助判据的研究。文献<sup>[6]</sup>提出充分利用暂态零序电流的幅值和相位信息进行单相接地故障选线的方法,取得了较好效果。文献<sup>[7]</sup>提出了利用小波变换提取单相接地故障暂态过程中出现零序电流中特征频率分量(180Hz 和 689Hz)来进行故障选线。该文利用小波变换的方法研究了由 EMTP 仿真的 20kV 带消弧线圈接地的分布式电力网络系统故障,故障信号中含有一系列的自激振荡引起的故障暂态分量。提出了一类特殊的小波函数来分离故障暂态分量。就小波继电保护的快速性、有效性、与传统方法进行了比较,指出小波分析对提高继电保护性能的重要作用。

小波变换在输电线路故障定位中的应用在文献<sup>[8,9]</sup>中得到很好反映,通过线路故障后暂态电流的小波变换提出了新的保护和故障测距原理。文献<sup>[10]</sup>将小波变换应用于配电网接地故障检测中,通过对母线零序电压和出现零序电流进行基波的小波系数提取构成选线判据,受过渡电阻影响小,能提高高阻接地保护的动作性能。文献<sup>[11]</sup>研究了小波包在自适应重合闸中的应用。另外,该文利用小波包变换检测线路暂态电流的局部极大值,区分瞬时性和永久性故障,获得了比传统方法更高的分辨率,解决了自适应重合闸的难题。这也是小波变换在暂态保护中颇有前途的一个实用领域。

传统的继电保护原理是基于对工频信号及稳态信号的分析计算,将故障产生的高频分量当作干扰滤除。这些都是适合于处理平稳信号的实用方法。

小波分析应用于变压器励磁涌流中,能够充分利用小波对奇异信号检测的优点,使保护在励磁涌流期间可靠闭锁。由于变压器空载合闸差动电流具有间断特性,内部故障时电流波形是连续变化的,因而,励磁涌流和内部故障时,差动电流的小波系数表现出不同特征。文<sup>[12]</sup>运用二次中心 B 样条小波,借

助 EMTP 仿真得到的变压器空载合闸和合闸于内部故障的差动电流信号,对其进行小波分解,由前后半波小波系数在数值和方向的对称度,确立了变压器差动保护的小波判据,并从理论上证明了该判据的可行性和优越性。

行波的小波变换能够刻划故障行波信号到达时刻,解决了电流行波测距由于无方向性带来的检测制约。利用电流行波小波变换模极大值随尺度的传播特性,精确定位故障暂态行波两次到达观测点的时刻和时间间隔,实现故障测距。文<sup>[1,13]</sup>用高阶 B 样条,分析了一模拟 500kV 线路故障,提出了消除相邻母线反射行波的“波形比较法”和一种小波模极大值故障测距方法。

文献<sup>[14]</sup>主要叙述了小波理论在电力系统微机保护中的应用,提出了基于小波变换的电力系统微机保护数字滤波器;提出了基于小波变换的电力系统微机保护故障类型的判别方法和选相方法;提出了基于小波变换的电力系统微机保护突变量启动元件。

此外,文献<sup>[15]</sup>提出了故障诊断的小波检测方法,通过计算机仿真,证明了所提出的方法对建立超高压输电线路高速继电保护具有重要意义。文献<sup>[16]</sup>论述了以小波变换为工具,提取行波信号中的故障信息,实现行波极性比较式方向保护原理,避免了保护中谐波的影响问题。文献<sup>[17]</sup>所提出的方法可自动消除“边界”现象,且使故障信号在变换域内更集中,因而可大大提高检测的准确性,这对将小波理论应用于继电保护有好处。文献<sup>[18]</sup>主要借助于 Morlet 小波变换对电力系统几种常见的故障,如电压幅值突然升高、电压幅值突然降低、断电和瞬时振荡,进行了分析,有效地检测到了上述几种故障的特征。

### 3 小波理论在电力系统微机保护应用中的常用算法

目前,在小波理论及其应用中,常用的小波算法有: Mallat 算法、滤波器组算法、小波包算法、合成算法、离散算法等。

Mallat 算法是一种对信号从高频到低频逐次划分的算法。该方法必须先确定系统的最高频率,并且对信号划分完后,还要进行不断的重构过程。其优点是算法简单,每次划分所需要的信号点数逐次减半。缺点是中间过程较多,中间结果占用的内存空间较大,因而减缓了运算速度。

滤波器组算法是一种改进的 Mallat 算法,它首先对信号划分为几个频带,然后对每一个频带再用 Mallat 算法从高频到低频逐次划分。较 Mallat 算法而言,该方法减少了信号中不必要部分的分析,因而提高了计算速度、所占用的内存空间也较少。

小波包算法是一种有选择性的 Mallat 算法,但它需要与其他准则结合起来,以确定算法的最优路径。所选准则的不同,其算法的路径也有不同。其优点是对信号的特征选择更具有针对性,但算法较复杂。

合成算法是基于 Mallat 算法和小波包算法的由几步合成为一步或两步的算法,它把各步的分解算子合并成为一个合成算子,作用于信号。该方法具有简单、运算速度快等特点。缺点是中间结果不明显,且算子合成时对各分解算子的要求较高。

离散算法有多种离散算法。有类似于快速傅立叶变换的算法和类似于滤波器组算法,但这两种算法每步所需的采样点数都较多且较复杂。其优点是没有 Mallat 算法和小波包算法的中间结果,也没有合成算法中算子合成的问题。在离散算法中,应用研究之二中提出了一种非二进小波算法。该算法既简单又快速,是一种适合于电力系统微机保护的算法。此外,合成算法在电力系统微机保护中也是值得考虑的。

在上述算法的基础上,有不少文献还结合了其它一些计算方法,如最大模值法、递归法、插值法、神经网络法等。

#### 4 小波理论在电力系统微机保护应用中存在的问题和应用前景

小波分析尽管克服了傅立叶分析和短时傅立叶分析在某些方面的不足,但若将小波算法用于继电保护的研究成果中,主要解决三个方面的问题:一是观念更新:大胆推广和应用新工具和新方法。二是硬件更替:由于小波算法所处理的不仅是传统的平稳信号,更主要的是现代复杂电力系统的非平稳非线性信号、既突变又时时掺有噪声的信号,因此对待分析信号所需要的采样点数较傅立叶算法要高出几倍甚至上百倍,这就要求现有的微机保护中的 CPU 等硬件需要改进,以提高运算速度,达到微机保护实时性的要求。三是软件研制:在现行的继电保护软件中增加小波算法的程序及其相关的软件。目前,随着计算机技术的飞速发展,将小波算法应用到继电保护中的软硬件方面的问题已不难解决,由此可

见,在现代电力系统继电保护中,以小波算法取代傅立叶算法是继电保护发展的必然趋势。

此外,对于把小波理论应用到电力系统微机保护方面,还需要在以下几个方面作出努力:

(1) 寻求适用于电力系统微机保护的最优小波母函数及其相应的小波变换。

(2) 寻求基于小波理论的电力系统微机保护的实时快速算法,为小波理论在电力系统微机保护中的广泛应用奠定基础。

(3) 大力开发适用于电力系统微机保护的基于小波理论的信号分析和处理软件。

(4) 大力开发基于小波理论的电力系统微机保护设备和装置。如有关的发电机、电动机、变压器、输电线路等微机保护装置。

目前,在电力系统领域,无论是研究小波分析的基本理论方面,还是研究基于小波分析的电力系统应用方面,都呈现出繁荣的景象。

可以预料,在今后的几年中,小波理论作为一种新的工具,在电力系统微机保护中的应用研究将引起电力系统微机保护的一场新的革命。

#### 5 结论

小波分析算法尽管所需信号的采样点数要大于傅里叶分析算法的点数,但随着计算机处理芯片的速度加快,其优势越来越明显。小波变换所具有的优良的时频局部化特性,对电力系统以及电力设备的故障检测与诊断,提高电力系统微机保护的可靠性、快速性、选择性,都具有十分重要意义。此外,本文指出了现阶段小波理论在电力系统微机保护应用中存在的问题,提出了小波理论在电力系统中的应用研究中的一些新的思路和应用领域。

#### 参考文献:

- [1] 董新洲,葛耀中,徐丙根. 利用暂态电流行波的输电线路进行故障测距的研究. 中国电机工程学报,1999,19(4):76~80.
- [2] 林涛,陈德树. 小波分析在大型同步发电机微机保护中的应用研究. 中国电机工程学报,1999,19(8):59~65.
- [3] 董新洲,贺家李. 基于小波变换的行波故障选相研究. 电力系统自动化,1999,23(1):20~23.
- [4] 董新洲,葛耀中,徐丙根. 输电线路暂态电流行波的故障特征及其小波分析. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十三届学术年会论文集,1997,11:1026~1032.
- [5] 林涛. 小波分析在大型同步发电机微机继电保护中的应用研究[学位论文]. 武汉:华中理工大学博士学位论

- 文,1997,9
- [6] 王建勋. 基于小波变换的电力系统暂态信号分析方法研究[学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文,1999,1.
- [7] Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution Systems Relaying. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301 ~ 1308.
- [8] Qin Jian, Chen Xiangxun et al. Travelling Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform. In: Electric Power Research Institute. POWERCON '98. Beijing: Wan Guo Xue Shu Publisher, 1998, 533 ~ 537.
- [9] 董新洲. 小波理论应用于输电线路行波故障测距研究[学位论文]. 西安:西安交通大学博士学位论文,1996.
- [10] 操丰梅, 苏沛浦. 小波变换在配电自动化接地故障检测中的应用研究. 电力系统及其自动化, 1999, 23(13): 33 ~ 36.
- [11] 蔡超豪. 基于小波包变换的自适应重合闸. 继电器, 1999, 27(2): 21 ~ 23.
- [12] 操丰梅, 苏沛浦. 小波变换在变压器差动保护中的应用. 中国电力, 1998, 31(11): 21 ~ 24.
- [13] 董新洲, 等. 小波变换应用于电力系统故障信号分析初探. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 421 ~ 424.
- [14] 黄群古. 小波理论及其在电力系统微机保护中的应用. 湖南大学硕士学位论文, 1998, 3.
- [15] 危韧勇, 刘春芳. 基于小波理论的超高压输电线路故障定位与选相方法. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 85 ~ 88.
- [16] 董杏丽, 董新洲, 张言苍, 等. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究. 电力系统及其自动化, 2000, 24(11): 11 ~ 15.
- [17] 徐淑珍, 陈陈, 朱子述. 平均插值小波在故障检测中的应用. 电力系统及其自动化, 2000, 24(11): 30 ~ 33.
- [18] Shyh - Jier H, Cheng - Tao H, Ching - Lien H. Application Of Morlet Wavelets To Supervise Power System Disturbances. IEEE Transactions On Power Delivery, 1999, 14(1): 235 ~ 241.

收稿日期: 2000-07-11; 改回日期: 2000-08-29

作者简介: 任震(1938-), 男, 教授, 博导, 国务院学位委员会电气工程学科组成员, 主要研究方向: 小波理论及其在电力系统中的应用, 电力系统可靠性, 高压直流输电, 谐波分析等; 黄群古(1960-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 小波理论及其在电力系统中的应用, 微机保护等; 黄雯莹(1939-), 女, 教授, 长期从事小波分析, 可靠性数学等领域的科研和教学工作等。

### Wavelet theory and summarization of its application to microprocessor based protection of power system

REN Zhen, HUANG Qun-gu, HUANG Wen-ying  
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In this paper, both purpose and meaning of application of Wavelet Theory to microprocessor based protection in power systems are mentioned, and existing problems of application of Wavelet Theory to microprocessor based protection in power systems are pointed out. Moreover, this paper shows prospect of application of Wavelet Theory to microprocessor based protection in power system, and some new thought and fields of application of Wavelet Theory to microprocessor based protection in power system.

**Keywords:** wavelet theory; power system; microprocessor based protection