利用暂态电流的高压输电线路暂态保护新方案

胡 巨, 杨明玉

(华北电力大学电力工程系,河北 保定 071003)

摘要: 提出了一种基于多尺度小波分析的高压输电线路暂态保护的新方案。介绍了高压输电线路及母线对高频暂态电流衰减的特点,通过利用多个频带内暂态信号的谱能量来实现区内外故障的准确识别。从而避免了仅利用某个频率信号能量的比值所造成的利用故障信息不充分和电压过零故障时信号很小不易识别的缺点。仿真分析证明了该方案在各种故障条件下的可行性。

关键词: 输电线路; 小波变换; 暂态电流

中图分类号: TM773 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)01-0021-03

0 引言

高压输电线路故障时的暂态分量中包含大量的故障信息,其中包括故障类型、方向、位置,持续时间等,暂态信号的频率成分贯穿整个频谱。这种通过检测故障暂态量中除工频以外的其它频率成分来实现传输线及电力设备的保护被称为暂态量保护(Transient based Protection)[1]。

近年来,基于检测故障所产生的高频暂态量的高压输电线路保护得到广泛研究[2~4],这种新的保护原理可以提高高压输电线路保护的动作速度,不受电流互感器饱和、系统振荡,以及运行方式等的影响。但也有一些不足之处:仅仅利用暂态信号中的某个频率成分的谱能量的比值,所包含的故障信息不充分。另外,当电压过零点故障时信号将很小,仅利用这个比值所构成的保护判据可靠性不高。

本文提出了一种利用线路故障时的暂态电流量,通过多尺度小波变换提取多个频段内暂态信号的谱能量特征来区分区内、区外故障的方案。该方案充分地利用了故障信息,同时当电压过零点故障信号很小时保持了较好的可靠性。仿真结果表明方案的有效性和可行性。

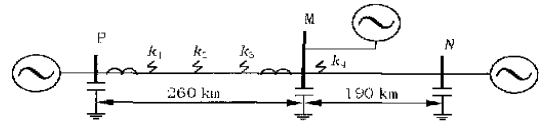
1 小波分析的原理

小波分析可以对信号进行多尺度分析,具有很强的特征提取功能,对暂态信号的处理优势尤为明显。它可以对暂态信号进行多分辨分析、时频分析、多尺度边缘检测等,利用小波分析使得对暂态信号的分析和识别更加快速和精确[5]。同时,基于多分辨分析的小波变换快速算法类似于 FFT,具有较好的实时性。

2 保护的算法及分析

2.1 EHV 线路暂态保护的基本原理[1]

图 1 为一实际的 500 kV 输电线路模型,当传输线路发生故障时,系统将产生高频宽带暂态电流,暂态电流信号从故障点沿线路的正反方向传播,当遇到变电站母线等不连续波阻抗时,部分反射回来,另一部分通过母线传播到下一段。由于母线对地电容的存在,暂态电流通过母线时将有一定的衰减,且频率越高成分衰减越大。基于这一性质,利用单端暂态电流实现暂态保护的区内外故障选择变得可行。



$X_1 = 0.278\ 2\ \Omega/\text{km}$, $X_0 = 0.649\ 1\ \Omega/\text{km}$, $R_1 = 0.027\ 0\ \Omega/\text{km}$
$R_0 = 0.194\ 8\ \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.012\ 7\ \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0 = 0.009\ 0\ \mu\text{F}/\text{km}$

图 1 超高压输电系统模型

Fig. 1 A EHV transmission line model

2.2 保护的基本过程

由于高压输电线路相间的耦合作用,使得相间的暂态信号互相影响。为了消除相间的耦合关系,本文对三相电流暂态信号作模变换,获得模分量为 I_m($I_m = I_a + I_c - 2I_b$)更能适应故障类型的任意性。基于小波变换的暂态保护的主要流程图如图 2 所示。高频的暂态电流信号被传感器所捕获,然后被分解成多个合适的尺度,再用特征提取方法获得 EHV 输电线路的故障特征分量,通过与设定的故障门槛值进行比较,判断是否有故障在被保护线路上发生。

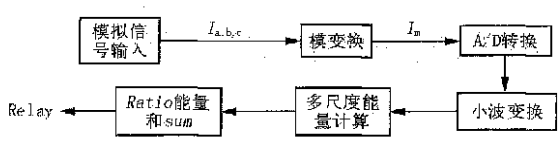


图 2 暂态电流处理流程图

Fig. 2 Block diagram of transient current processing

2.3 暂态电流保护判据

小波变换具有一定的自适应能力,适合于各频段的信号提取。通常信号的特征提取一般采用重构信号的能量,但考虑到速度上的要求,可采用信号直接被变换后的小波变换系数的平方和,以表征重构信号的能量。设小波变换后在第 i 个尺度上 2^{ji} 的能量为 s_{ji} 则

$$s_{ji}(n\Delta t) = s_{ji}[(n-1)\Delta t] + WI^2(ji, n\Delta t) \quad (1)$$

$$Ratio(i) = \frac{s_{ji}(n\Delta t)}{s_{j5}(n\Delta t)} k_{ki} \quad (2)$$

$$sum = \sum_{i=1}^{4} Ratio(i)^2 \quad (3)$$

式中: $WI(ji, n\Delta t)$ 为暂态电流在第 i 尺度上小波变换系数; s_{ji} 表示暂态电流在尺度 i 上小波变换后计算的能量; k_{ki} 为不同频率成分所对应的衰减系数; sum 为各个频段小波能量比值的平方和。

s_{j1}、s_{j2}、s_{j3}、s_{j4} 为高频成分, s_{j5} 为低频成分,通过调整衰减系数 k_{ki},则区内故障, $Ratio(i)$ 较大;区外故障时, $Ratio(i)$ 较小。由于故障暂态到达 CT 后, S_{j1} 会有突变,可以此作为本保护的启动判据。于是,启动判据和跳闸判据分别为式(4)和式(5):

$$|s_{j1}(n\Delta t) \geq s_{1set}| \quad (4)$$

$$sum \geq sum_{set} \quad (5)$$

式中: s_{j1} 为暂态电流在小波变换后尺度 1 上计算的能量; s_{1set}、sum_{set} 分别为各自设定的门槛值。

本保护原理充分利用了暂态电流信号的多个频段的故障信息。由于 sum 中包含有频率相对较低的多个频段的能量比值,从而大大地增加了判据的可靠性,特别当电压过零点故障信号较小时,仍然会有较大的输出。

3 仿真分析

选取一 500 kV 实际输电线路的简化模型如图 1 所示。假定母线 P、M、N 对地电容均为 0.1 μF,故障线路为 PM,线路参数如图所示。选取采样频率为 f =200 kHz,小波函数选取 Daubechies 的 4 阶小波(db4),选取 1、2、3、4、5 尺度参数,按多分辨分析的性质,其频率范围分别为 50 ～100 kHz,25～50 kHz, 12.5～25 kHz、6.25～12.5 kHz、3.125～6.25 kHz。取故障时刻起能量窗宽 M = 500,即 $M\Delta T$ = 2.5 ms。

3.1 典型故障分析

在系统的典型位置 k_1～k_4 点发生单相接地故障时,表 1、2 分别表示不同故障初相角 α、不同故障过渡电阻 R、不同的故障位置时暂态电流模分量 I_m 的各频段能量比值的平方和 sum。对于本例的可靠系数 k_k 应小于区内故障的各频段能量和的最小值与区外故障的最大值之比 k_k = 14.058/5.349。

表 1 在典型位置不同故障初相角的结果(A 相故障)

Tab. 1 Results for various fault inception angles at typical position(phase A fault)

故障时刻/度	区内 K_1	区内 K_2	区内 K_3	区外 K_4
90	155.123	95.321 4	40.899 6	5.349 3
45	39.030	19.153 4	16.348	2.566 8
0	18.152 5	15.746 1	14.058	0.255 2

表 2 在典型位置不同过渡电阻的结果(A 相故障)

Tab. 2 Results for various fault resistances at typical position (phase A fault)

过渡电阻/Ω	区内 K_1	区内 K_2	区内 K_3	区外 K_4
0.1	85.331 5	41.785 0	19.272 1	1.675 2
100	94.713 2	45.725 2	22.358	1.968 5
200	120.448	89.331 4	36.526	3.354 1

表 3 在典型位置不同故障类型的结果

Tab. 3 Results for various fault types at typical position

故障类型	区内 K_1	区内 K_2	区内 K_3	区外 K_4
两相短路	118.135	19.552 8	186.280	0.267 1
两相接地	103.268	20.808 8	292.537	0.446 0
三相短路	104.836	19.273 9	186.473	0.258 4

表 3 分别给出当系统发生两相短路(以 A、B 两相短路为例),两相接地短路和三相短路时在各个典型位置的情况。说明不同的故障类型并不影响本文提到的判据。

3.2 与单尺度判据的比较

由于单尺度判据仅仅采用一个频率段上能量的比值 Ratio(1),而本判据采用了多个频段上的暂态信号的谱能量 sum 的特征,所以相对于仅利用单一频段上的暂态信号判据来说具有更好的可靠性。下面仅以电压过零点附近发生 A 相故障的情况进行说明,数据如表 4 所示。

表 4　单尺度判据和多尺度判据的比较结果

Tab. 4　Comparison results of single-criterion and multi-criterion methods

判据种类	区内故障	区外故障	区内/区外
单尺度判据	$Ratio(1)$ = 3.456 0	$Ratio(1)$ = 0.201 4	17.160
多尺度判据	sum = 14.058	sum = 0.255 2	55.086

从表中可以看出,在相同的故障条件下,单尺度判据对区内、区外故障的区分不如利用多尺度判据明显。多尺度判据通过利用多个频段上的暂态分量相当于对故障分量进行了放大,从而能够更有效的辨别故障。

4　影响因素

1) 故障初相角。从表 1 的结果可以发现,电压峰值时刻故障时,对应的窗能量最大。电压过零时刻故障时,暂态电流的小波窗能量最小,但是由于是利用多个频段的小波能量,所以数值并不小,能可靠的满足要求。

2) 弧光电阻。弧光过渡电阻的存在会使得本保护方案灵敏度受影响,过渡电阻越大保护灵敏度越高,反之过渡电阻越小,高频分量所占的比率越小。因此弧光电阻对于暂态保护是有利的。本文的仿真结果在最不利的情况下(过渡电阻为 0.1 Ω),依然能够满足要求。

3) 关于尺度 j_5 和衰减系数 k_{ki}。被比较的尺度选为 j_5 而不是更大是因为在此采样率下尺度 5 上的信号频率较低,受故障条件的影响较大,不利于区内外故障的判别。另外,各频段的衰减系数取值也不同,高频取值大,而低频取值小。k_{ki} 的取值应视采样率、线路参数及拓扑结构等的不同而具体选取。

5　结语

超高压输电线路的故障暂态电流含有丰富的故障信息。本文在 EHV 输电线路单端量电流暂态保护的基础上,利用小波变换提取暂态电流的多个频率成分来构成各个频段小波谱能量比值的平方和。理论分析和仿真结果表明该方案充分地利用了故障信息,同时当电压过零点故障信号很小时仍保持了较好的可靠性。

参考文献:

[1] Bo Z Q. A New Non-communication Protection Technique for Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1073-1078.

[2] 林湘宁,刘沛,杨春明. 基于小波分析的超高压输电线路无通信全线速动保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 9-14.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, YANG Chun-ming. A Wavelet Analysis Based Non-communication Protection Scheme for Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 9-14.

[3] 何正友,钱清泉. EHV 输电线路单端量电流暂态保护探讨[J],电力自动化设备, 2002, 22(2), 16-19.
HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. A Study of Non-Unit Current Transient Protection for EHV Transmission Lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(2): 16-19.

[4] 张保会,哈恒旭,吕志来. 利用单端暂态量实现超高压输电线路全线速动保护新原理的研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(8): 1-6.
ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, LÜ Zhi-lai. Study of Non-unit Transient-based Whole-line High Speed Protection for EHV Transmission Line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(8): 1-6.

[5] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.
CHENG Zheng-xing. Arithmatic and Application of Wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.

收稿日期: 2004-05-10; **修回日期**: 2004-10-22

作者简介:

胡　巨(1979 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统暂态保护;E-mail: hu1freedom@163.com

杨明玉(1965 -),女,讲师,从事微机继电保护的教学与研究工作。

A novel scheme of non-unit protection for EHV transmission line based on transient components

HU Ju, YANG Ming-yu

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

Abstract: A new scheme based on multi-resolution analysis for EHV transmission lines non-unit transient protection is introduced. According to characteristics of EHV transmission line fault transient current, a fault can be identified as internal or external one based on the spectrum energies in many frequency bands. It can avoid the defects of not using the fault information fully or indentifying the fault easily. The validity of scheme facing different fault conditions is verified with Matlab simulation test.

Key words: transmission line; wavelet transform; transient current