

基于奇异性检测的高压输电线路暂态保护判据仿真研究

韩笑, 宋丽群, 李先允

(南京工程学院电力工程系, 江苏 南京 210013)

摘要: 根据小波分析及奇异性检测的基本理论, 利用小波多尺度分析方法对高压输电线路的暂态电流波形奇异点处的奇异性进行了分析与仿真, 并给出了一种适合于暂态保护的判据。此判据通过比较不同时间窗口、不同频率段内暂态信号的小波变换谱能量比值及模分量极大值比值来实现区内外故障的准确识别。以 M 文件的形式用 Matlab 语言编程完成了奇异点检测算法程序并根据 500 kV 输电线路模型对暂态保护判据进行了大量仿真。仿真结果证明此判据对不同的故障情况均能正确判断。

关键词: 奇异性检测; 保护判据; 输电线路; 小波变换; 仿真

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)11-0026-05

0 引言

近年来, 以 CT(电流互感器)二次侧电流作为研究对象的电流量暂态保护得到广泛的关注^[1-4]。利用单端电流量来实现无通道的暂态保护, 利用 CT 良好的高频传变特性, 以 CT 二次侧暂态电流作为研究对象, 不必在一次侧增加设备, 且不受系统振荡、运行方式等影响。该保护利用区内故障时, 电流高频分量由于输电线路的分布参数特性而衰减较少, 因此在一个时间段内的高频与低频分量的能量差异不大, 而针对区外故障时由于母线杂散电容以及阻波器、结合电容等原因的影响, 暂态电流在一个时间段内较高频分量的能量远低于较低频分量的能量的特点, 运用小波变换可调的柔性时频窗对高频、低频信号分别采取可变的尺度进行分析, 提出了一种基于小波变换的暂态量保护判据^[1]。但在线路末端故障、线路末端装设串补电容等情况下, 该判据暴露出灵敏度不足, 难以整定的缺点, 甚至可能造成误判断^[4]。

本文根据任意频率的故障分量由故障点传输到保护安装处时间(即保护所感受到的高频分量模极大值出现的时刻)相对稳定这一特点^[5], 提出一种将奇异点检测理论与原判据相结合的新型保护判据, 并通过 Matlab 仿真工具, 重点对保护的算法实现进行了编程及仿真。以期能将暂态保护原理早日应用于保护装置中。

1 小波分析理论在单端量保护的运用

1.1 小波变换模极大值的定义及检测算法

小波变换模极大值的定义为: 对于小波函数

(x) , 信号 x 在尺度 s 下的小波变换系数的绝对值为 $|Wf(x, s)|$, 如果在 x_0 的邻域的一边有条件 $|Wf(x, s)| < |Wf(x_0, s)|$, 而在 x_0 的邻域的另一边有条件 $|Wf(x, s)| > |Wf(x_0, s)|$, 称 $|Wf(x_0, s)|$ 为该尺度上 x_0 附近的小波变换模(局部)极大值^[6]。

电力系统故障暂态信号属缓变奇异信号, 其奇异度是不确定的^[7]。对缓变奇异信号的奇异点位置的检测算法归纳如下。

1) 对 f 利用小波作离散小波变换, 利用 Mallat 算法求出

$$\{Wf(x_j, s) \mid j=1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

其中: N 为采样点数; x_j 为各点采样值; Wf 为小波函数。

2) 求出 $\{Wf(x_j, s) \mid j=1, 2, \dots, N\}$ 的极大值, 并记录相应的极大值点, 则极大值点就是所求的缓变奇异信号的奇异点。

算法中的小波变换由下式定义: 对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 其小波变换为

$$W_{f(a,b)} = \int_R |a|^{-\frac{1}{2}} f(t) \frac{(t-b)}{a} dt \quad (2)$$

式中: $(a, b) \in R, a > 0$ 。

1.2 改进后单端量暂态保护判据

对国内外学者近年来所提出的单端量电流量暂态保护判据的改进思路为: 对于某一固定频率的滤波器而言, 先根据线路的长度, 计算出(或通过试验得出)线路末端故障时, 高频分量模极大值产生的时间 T_{max} , 并根据此时间, 对于高频分量及次高频分量, 分别以不同的数据窗计算能量, 高频分量的时间窗取值等于或略大于 T_{max} , 次高频分量的时间可取

2~3 T_{max} (如此选择主要考虑到保护的速动性), 利用区内故障时, 在 T_{max} 时间段内, 有高频能量的模极大值出现, 而区外故障时, 在 T_{max} 时间段内无高频能量模极大值出现这一特点, 对原主、辅判据进行改进。

1.2.1 主判据

以模量电流 I_m ($I_m = I_a + I_b - 2I_c$, I_a 、 I_b 、 I_c 为 A、B、C 相电流采样值) 高频分量通过小波变换后得到不同尺度 j 上的小波变换系数, 在某一固定时间窗内的平方和表征了某一频带暂态电流在时间窗内的能量。设小波变换后在尺度 j_1 和 j_2 上的能量为 S_{j_1} 和 S_{j_2} , 改进后的主判据为:

$$\begin{cases} S_{j_1}(n_1, T_1) = \sum_1^{n_1} |W_{I_{m1}}(j_1, n_1, T_1)|^2 \times T_1 \\ S_{j_2}(n_2, T_2) = \sum_2^{n_2} |W_{I_{m2}}(j_2, n_2, T_2)|^2 \times T_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$Ratio = \frac{S_{j_1}(n_1, T_1)}{S_{j_2}(n_2, T_2)} \times kk > R_{set} \quad (4)$$

式中: kk 为尺度因子, 这里取为 300; I_{m1} 、 I_{m2} 为不同采样频率下的模电流采样序列; n_1 、 n_2 为 I_{m1} 、 I_{m2} 小波变换时间窗的窗口采样数; T_1 、 T_2 分别为计算 I_{m1} 、 I_{m2} 的采样间隔; j_1 、 j_2 为小波变换选择的不同尺度; R_{set} 为能量比率的整定值, 应以区外故障最大的 $Ratio$ 作为基准。

取 $j_2 > j_1$, 即 S_{j_1} 为尺度 j_1 上的高频能量, S_{j_2} 为尺度 j_2 上的次高频能量, 若为区内故障, $Ratio$ 较大; 而区外故障, $Ratio$ 则较小。如区内、区外故障的 $Ratio$ 值较为接近时, 可通过调节尺度因子 kk , 以使保护通过 $Ratio$ 的大小来区分区内、区外故障。

1.2.2 辅助判据

与主判据的改进思路相同, 改进后的辅助判据为在尺度 j_1 上的高频分量与尺度 j_2 上的次高频分量的模极大值之比

$$Ratio_1 = kk \times \frac{\max_j \{ | < h_{j_1, n_1}, I_{m1} > | \}}{\max_j \{ | < h_{j_2, n_2}, I_{m2} > | \}} > R_{set} \quad (5)$$

式中: R_{set} 为模极大值比率的整定值, 应以区外故障最大的 $Ratio_1$ 作为基准; n_1 、 n_2 为 I_{m1} 、 I_{m2} 小波变换时间窗的窗口采样数, kk 为尺度因子, 取 300。

取 $j_2 > j_1$, 可通过 $Ratio_1$ 的大小来判别区内和区外故障。区内故障时, $Ratio_1$ 较大; 区外故障时, $Ratio_1$ 较小。如区内、区外故障的 $Ratio_1$ 值较为接近

时, 可通过调节尺度因子 kk , 以使保护通过 $Ratio_1$ 的大小来区分区内、区外故障, 考虑到暂态量保护尚处于理论研究阶段, 故未给出主判据及辅助判据定值。

1.3 小波基及尺度的选择

就改进后的保护判据而言, 小波基的选择既要考虑能反映较高频小波能量与较低频能量的强弱对比, 又要能反映故障发生后模极大值所出现的时刻, 还要能如实反映小波尺度变化对奇异度的影响。因此必需选用具有相关阶消失矩的紧支撑的小波函数。经大量的仿真实验, 最终选用 5 系数 Daubechies 小波基 (db5), 它具有正交、紧支以及高阶消失矩, 滤波效果较好。选取尺度 2 上重构的细节信号, 分别求出其能量值及模极大值, 输入保护判据公式。对于采样频率为 $f_s = 200$ kHz 的电流采样信号, 尺度 2 上细节信号相当于采用 db5 带通滤波器对高频分量进行滤波后输出的 25~50 kHz 高频电流信号, 该信号高频成分丰富, 且故障后衰减非常快, 高频分量模极大值以突变量的形式出现, 模极大值点即为奇异点。如以 $f_s/20$ 采样率对电流采样信号进行再采样 (分频), 然后采用同样小波变换手段, 则可得到 1.25~2.5 kHz 的次高频电流信号, 而次高频分量在故障后一段时间内始终存在, 且基本不衰减。

2 编程及仿真

2.1 仿真环境设计

采用 Matlab 对如图 1 所示带串联补偿的 500 kV 输电线路进行仿真模型构造, 并进行不同故障点、不同故障类型的仿真, 仿真时, 选取采样频率为 $f_s = 200$ kHz, 存储流过母线 M 侧保护安装处故障电流采样值, 通过计算得到模量电流。图中 K_1 点代表为 M 母线出口处故障; K_2 点代表距 M 母线 133 km 处 (线路中段) 故障; K_3 点代表串补电容线路侧故障; K_4 点代表串补电容母线侧故障; K_5 点代表 N 母线上故障; K_6 代表距 N 母线 100 km 处故障。

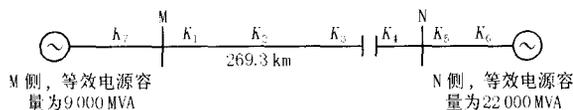


图 1 故障网络及故障点定义

Fig 1 Fault network and definition of fault position

经初步计算可知, 在 MN 线路及 N 母线侧末端故障时, 无论是串补电容前还是串补电容后故障, 高

分量模极大值出现时刻都为故障后 0.9 ms , 即 $T_{\max} = 0.9 \text{ ms}$ 。计算起始时间为故障前 1 ms , 终止时间为故障后 2 ms , 时间窗口 3 ms , 采用 db5, 对于模量电流的高频分量的小波能量及模极大值的时间窗口 T_1 取 0.92 ms , 计算机取 192 个采样点数, 对于模量电流的次高频分量 (20 分频后) 的时间窗口 T_2 取 2 ms , 采样点数为 20 个。

2.2 仿真程序流程图

仿真程序流程图如图 2 所示。

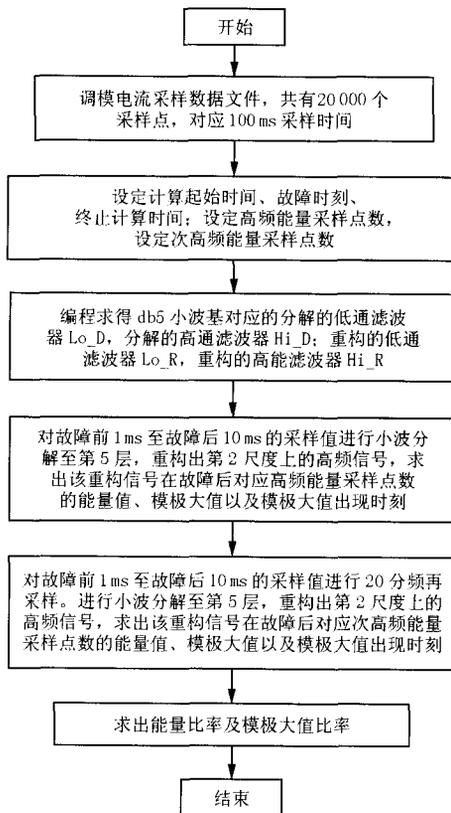


图 2 仿真程序流程图

Fig 2 Flow chart of simulation program

2.3 核心代码

以 M 文件形式的保护判据仿真程序的核心部分如下:

```
load file; Ts=5e-6; %调模电流采样数据文件,共有
20 000个采样点
STME=3 800; %计算起始时间为故障前 1 ms,即第
3 800个采样点处
FTME=4 000; %故障时间为第 4 000个采样点处
ETME=4 400; %终止计算时间为故障后 2 ms,即第
4 400个采样点处
CTME_h=184; %计算高频能量采样点数,对应
0.92 ms
CTME_1=400; %计算次高频能量采样点数,对应 2
```

ms

```
[Lo_D,Hi_D] = DBC(10, min); %求得 db5小波基
对应的 Lo_D为分解的低通滤波器;Hi_D为分解的高通滤
波器;为适应微机保护算法的需要,编写 DBC为专门适用于获
得 db滤波器系数的 M文件程序,因篇幅关系,此处略去,读
者可用 wfilters函数获得。
```

```
A=[Hi_D,Lo_D];C=A;
```

```
Hi_R=C(1:10);Lo_R=C(11:20);%求得 db5小波
基对应的 Lo_R为重构的低通滤波器;Hi_R为重构的高通滤
波器。
```

```
In1=la(STME:ETME);%得到故障前 1 ms至故障
后 10 ms的采样值
```

```
[c,l]=wavedec(In1,5,Lo_D,Hi_D);%用 db5小波分
解 In1信号到 5层
```

```
d1=wrcoef(d,c,l,Lo_R,Hi_R,2);%重构出第 2尺
度上的高频信号
```

```
Sj1=[0];
```

```
tc=FTME-STME;
```

```
for i=tc:tc+CTME_h;X=d1(i)
```

```
Sj1=Sj1+X^2;
```

```
end;%求出重构信号在故障后 0.92 ms内的能量值
```

```
d1=abs(d1);Mj1=d1(1);TMH=1;
```

```
for i=2:200+CTME_h
```

```
if d1(i)>Mj1;
```

```
Mj1=d1(i);TMH=i;%求出重构信号在故障后
0.92 ms内的模极大值
```

```
end
```

```
end
```

```
TMH=(TMH+STME-FTME)*Ts;%求出模极大
值出现时刻
```

```
In2=la(STME:20:ETME);%得到故障前 1 ms至
故障后 10 ms的对原信号 20分频后采样值
```

```
[d,m]=wavedec(In2,5,Lo_D,Hi_D);%用 db5小波
分解信号到 5层
```

```
d2=wrcoef(d,d,m,Lo_R,Hi_R,2);%重构出第 2尺
度上的高频信号
```

```
Sj2=[0];
```

```
for i=tc/20:CTME_1/20;
```

```
X=d2(i);
```

```
Sj2=Sj2+X^2;
```

```
end;%求出重构信号在故障后 2 ms内的能量值
```

```
d2=abs(d2);
```

```
Mj2=d2(1);
```

```
for i=2:CTME_1/20
```

```
if d2(i)>Mj2;
```

```
Mj2=d2(i);
```

```
end
```

```
end;%求出重构信号在故障后 2 ms内的模极大值
```

```
kk=300;%Ratio放大倍数
```

$Ratio = (S_{j1}/S_{j2}) * kk$; %求出能量比率 Ratio

$Ratio1 = 300 * (M_{j1}/M_{j2})$; %求出模极大值比率 Ratio₁

2.4 仿真结果及分析

针对图 1 所示的 500 kV 输电线路实例,根据编制程序,分别对不同故障地点,故障形式的暂态电流采样值进行分析,得到结果如表 1 所示。

表 1 电压过 0 时故障的小波变换分析结果

Tab 1 Results of wavelet transform analysis for voltage overtimed

参数	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
Ratio(单相接地 A相)	245.792 2	127.580 1	89.172 0	96.738 1	29.923 2	0.001 4
Ratio(两相短路 BC)	350.810 0	96.730 0	59.250 0	36.010 8	30.745 3	0.000 2
Ratio(三相短路)	342.650 0	96.260 0	36.270 0	36.030 0	29.9200	0.000 4
Ratio ₁ (单相接地 A相)	226.163 9	206.738 3	304.568 2	274.920 0	161.230 0	83.118 2
Ratio ₁ (两相短路 BC)	673.340 0	335.630 0	362.040 0	251.260 0	229.540 0	81.740 0
Ratio ₁ (三相短路)	620.780 0	333.930 0	258.830 0	258.480 0	233.320 0	79.970 0
TMH(单相接地 A相)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.000 0
TMH(两相短路 BC)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.000 0
TMH(三相短路)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.000 0

注:计算起始时间为故障前 1 ms,终止时间为故障后 2 ms,时间窗口 3 ms,采用 db5,分析到第五层,能量比值计算时间为故障后 0.92/2 ms, TMH 的单位为 s。

分析表 1 可知:

1)采用新判据能够较明显地区分出故障点是否在整定范围以内,即对于模极大值高频分量在 0.9 ms 以后出现的故障,其 Ratio 及 Ratio₁ 都较小,且比值差距十分显著。

2)保护区末端的故障 (K_4),与相邻线路出口的故障 (K_5)相比,对于某些故障,其 Ratio 及 Ratio₁ 值相比变化并不明显。但都能满足区内故障的 Ratio 及 Ratio₁ 值较区外的大。如以 K_5 点的 Ratio, Ratio₁ 值进行整定计算,可靠系数的取值必然非常接近于 1,因此目前只能满足在单相接地故障形式下,对暂态保护从理论上进行整定。对于相间故障的选择性需进一步研究。

3)串补电容前的故障 (K_3)与串补电容后的故障 (K_4)相比, Ratio 及 Ratio₁ 值相比变化并不明显。这说明在电容前及电容后的故障,都会产生较大故障高频分量。

4)对于同一地点,不同类型的故障,其模极大值出现的时刻 TMH 都是相同的。

3 结论

本文借助于 Matlab 仿真工具,通过对 500 kV 输电线路具体仿真表明,新型的暂态保护判据能区分区内区外故障;但是能量比值的计算时间将决定保护范围的大小。对于单端量保护而言,要实现全线速动,必须对计算时间进行非常精确的计算,才能将保护区末端定位于对侧母线上。同时选择合适的小波基及变换尺度对于模极大值出现时刻的正确提取

及提高判据的准确性,都具有十分重要的意义。

本文给出了利用小波变换及奇异点检测基本原理的仿真实现方法。并以 M 文件的形式用 Matlab 语言编程完成了能量比较及奇异点检测算法程序,通过大量仿真结果证明新型保护判据对不同的故障情况均能正确判断。

参考文献:

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

[2] 张保会,哈恒旭,吕志来. 利用暂态电流的输电线路单端量保护新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 56-61.

ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, L ü Zhi-lai A Novel Principle of Non-unit Protection Based on Transient Components for EHV Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 56-61.

[3] 林湘宁,刘沛,杨春明,等. 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.

LN Xiang-ning, LU Pei, YANG Chun-ming, et al A Wavelet Analysis Based on Communication Protection Scheme for Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 9-14.

[4] 夏明超,黄益庄,赵沃泉. 利用多端暂态电流的高压输电线路保护新算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 39-42.

XIA Ming-chao, HUANG Yi-zhuang, ZHAO Wo-quan A Novel Protection Algorithm for High Voltage Transmis-

- sion Line Using Multi-end Transient Currents [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 39-42
- [5] 韩笑,宋丽群,李先允. 串补电容对电流暂态量的影响分析[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2003, 1(4): 64-67.
HAN Xiao, SONG Li-qun, LI Xian-yun Analysis of Series Capacitor Compensation Affecting Faults Current's High Frequency Transient Component[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology, Natural Science, 2003, 1(4): 64-67.
- [6] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [7] 张兆宁,毛鹏,孙雅明. 电力系统故障暂态信号的小波奇异性检测[J]. 继电器, 2000, 28(4): 24-27.
ZHANG Zhao-ning, MAO Peng, SUN Ya-ming Singularity Detection of Fault Transient Signals in Power System with Wavelet Transform [J]. Relay, 2000, 28(4): 24-27.
- 收稿日期: 2004-09-14; 修回日期: 2004-10-11
- 作者简介:
韩笑(1969-),男,硕士,讲师,主要从事变电站综合自动化、电力系统继电保护的研究与教学工作; E-mail: hxslqc@sina.com
宋丽群(1967-),女,硕士,讲师,主要从事电力系统继电保护、电力系统自动装置的研究和教学工作;
李先允(1964-),男,副教授,高级工程师,中国电工技术学会高级会员,从事电力系统保护与控制、电力电子技术应用、小波分析在电力系统中的应用等领域的教学与研究工作。

Simulation research on protection criterion for high-voltage transmission line based on theory of singularity detection

HAN Xiao, SONG Li-qun, LI Xian-yun

(Department of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: Based on the basic theory of wavelet analysis and singularity detection, analysis and simulation of singularity of transient current signal in high-voltage transmission line at sudden change point by wavelet multi-scale detection method are made. And a new criterion which is suitable for the transient protection is provided. Therefore, a fault can be identified as internal or external one according to the ratio of spectrum energies of wavelet transform and the ratio of modulus maximum value of wavelet transform based on different time windows. The singularity detection and calculation program are accomplished as M-file by programming in Matlab language. Simulations in 500 kV transmission line demonstrate that the criterion can judge different fault conditions properly.

Key words: singularity detection; power protection criterion; transmission line; wavelet transform; simulation

北京配网项目通过出厂验收

继 2005年3月18日,北京城区配网自动化项目中标之后,于2005年5月20日,许继电气配网事业部——珠海许继电网自动化有限公司为北京配网项目工程设计开发的 TOSCAN-D3000C 配电自动化系统,通过了出厂验收,北京电力公司、北京城区供电公司的有关领导对系统进行了验收。

TOSCAN-D3000C 配电自动化系统是许继电气配网事业部在引进日本东芝公司先进、成熟的配电自动化系统技术基础上,结合我国城市配电网系统的特点而研究开发的配电自动化系统。该系统技术先进、功能成熟、性能可靠,适用于不同规模的配电网系统,该系统已经通过了国家电力部、机械工业部的鉴定。

此项目中标,说明许继产品和服务具有较强的竞争实力,公司能够为用户提供一揽子解决方案,负责从一次设备和馈线自动化终端的选型改造、通信通道的建立、配电子站的建设到主站系统的集成,形成了一套符合实际情况的配电自动化系统。

该项目的顺利实施,将大大提高北京城区的供电可靠性,为北京城区配电网的生产、调度、管理提供实用、可靠的系统解决方案。

许继电气配网事业部