

基于 HHT 超高压输电线路高速行波差动保护新算法

A New Algorithm for High-speed Traveling Wave Differential Protection Based on Hht Ultra-high Voltage Transmission Lines

王达 徐皇清

Da Wang Huangqing Xu

广东电网有限责任公司揭阳供电局 中国 · 广东 揭阳 522000

Jieyang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Jieyang, Guangdong, 522000, China

摘要: 首先, 利用希尔伯特-黄变换 (HHT) 提取方向电流行波波头信息。其次, 计算从保护元件安装处收到方向电流行波开始的数十微秒内方向电流行波积分值。最后, 将超高压线路两端同向电流行波积分值的差值作为行波电流差动保护的动作判据。当被保护线路区外短路故障时, 输电线路两端的同向电流行波积分值的差值很小, 而被保护线路区内短路故障时, 该差值很大, 从而区分出线路的区内和区外故障, 该算法由于只利用了行波起始部分数十微秒内的信息, 其动作时间主要取决于线路两端通信时间, 此算法的动作时间只需几毫秒。

Abstract: First, the Hilbert-yellow transform (HHT) is used to extract the directional electropop wave head information. Secondly, the integral value of directional current traveling wave within tens of microseconds from the directional current traveling wave from the protection element is installed. Finally, the difference of the integral value of the traveling wave current at both ends of the EHV line is taken as the action criterion of the traveling wave current differential protection. When there is a short-circuit fault outside the protected line, the difference between the integral values of the current traveling waves in the same direction at both ends of the transmission line is very small, while when there is a short-circuit fault inside the protected line, the difference is very large, so as to distinguish the faults inside and outside the line. Because the algorithm only uses the information within tens of microseconds at the beginning of the traveling wave, its action time mainly depends on the communication time at both ends of the line, and the action time of this algorithm only takes a few milliseconds.

关键词: 希尔伯特-黄变换; EMD; IMF; 高速行波差动保护

Keywords: Hilbert-yellow transformation; EMD; IMF; high-speed traveling wave differential protection

DOI: 10.12346/peti.v3i4.6424

1 引言

超高速微机保护的動作时间在毫秒级, 其不再依赖工频电压、电流信号, 主要利用故障后暂态电压、电流信号, 即行波电压、电流信号。

短路故障的行波信息几乎全部包含在行波波头中, 保护判据要依赖行波信息, 那么提取行波波头信息就至关重要。

利用希尔伯特-黄变换对行波进行处理而提取行波波头信息, 提出一种行波差动保护的新算法。

2 利用 HHT 提取行波波头信息

Norden E.Huang 在 1998 年提出经验模态分解方法

EMD, 引入 Hilbert 变换和 Hilbert 谱分析, 美国 NASA 将此方法命名为 Hilbert-Huang Transform, 简称 HHT, 即希尔伯特-黄变换。

对任意的时间序列 $X(t)$, Hilbert 变换 $Y(t)$ 定义为:

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

其中, P 是柯西主值, 此变换对所有的 L^p 类都成立。

根据这一定义, 当 $X(t)$ 与 $Y(t)$ 形成一个复共轭时, 就可以得到一个解析信号:

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (2)$$

【作者简介】王达 (1991-), 男, 满族, 中国吉林伊通人, 本科, 助理工程师, 从事输电线路研究。

其中： $a(t)=\sqrt{X^2(t)+Y^2(t)}$ ， $\theta(t)=\arctan(Y(t)/X(t))$ 。
定义瞬时频率为：

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3)$$

应用 HHT 时需执行两个基本步骤：①用 EMD 把信号分解成一些本征模态函数 IMF；②对分解得到的 IMF 分量进行 Hilbert 变换，得到时频平面上 Hilbert 谱^[1]。

IMF 要求：①在整个数据序列中，极值点的数量与过零点的数量必须相等，最多相差不能多于一个；②在任一时间点上，信号的局部极大值和局部极小值定义的包络平均值为零。

2.1 用 EMD 方法把行波波头信号分解成 IMF

Step1: 把行波波头信号 $s(t)$ 作为原始信号，找出 $s(t)$ 所有的极大值点，并将其用三次样条函数拟合成原数据序列的上包络线；找出 $s(t)$ 所有的极小值点并将其用三次样条函数拟合成原数据序列的下包络线。

Step2: 计算上下包络线的均值，记为 $m_1(t)$ ；将原数据序列 $s(t)$ 减去该均值，可得到一个去掉低频的新数据序列 $h_1(t)$ ，即：

$$h_1(t) = s(t) - m_1(t) \quad (4)$$

Step3: 如果 $h_1(t)$ 不是一个 IMF 分量序列，为此需要对 $h_1(t)$ 重复进行上述处理过程至符合 IMF 要求，所得到的均值趋于零为止，即：

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (5)$$

从而得到了行波波头信号 $s(t)$ 第 1 个 IMF 分量 $c_1(t)$ ，即为 $s(t)$ 最高频率分量，即：

$$c_1(t) = h_{1k}(t) \quad (6)$$

Step4: 将 $c_1(t)$ 从行波波头信号 $s(t)$ 中分离出来，得到一个去掉高频分量的差值信号 $r_1(t)$ ，即：

$$r_1(t) = s(t) - c_1(t) \quad (7)$$

Step5: 将 $r_1(t)$ 做原始信号，重复 Step1 至 Step3，得到 IMF 的第 2 个分量 $c_2(t)$ ，重复 n 次，得到 IMF 的第 n 个分量 $c_n(t)$ ，即：

$$\begin{cases} r_2(t) = r_1(t) - c_2(t) \\ \vdots \\ r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t) \end{cases} \quad (8)$$

上述算法使用了循环，循环结束的条件是： $r_n(t)$ 成为一个单调的函数。因此，IMF 包含了一系列不同频率的分量。

2.2 对 IMF 进行 Hilbert 变换和得到 Hilbert 时频谱

用 EMD 方法把行波波头信号 $s(t)$ 分解成有限个 IMF 与残余函数 $r_n(t)$ 之和，即：

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (9)$$

然后对 IMF 的每一个分量进行 Hilbert 变换和进行谱分

析，得到：

$$s(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\theta_i(t)} \quad (10)$$

忽略残余函数 $r_n(t)$ ，Re 表示取实部，根据瞬时频率 $\omega = \frac{d\theta(t)}{dt}$ 定义，得到：

$$s(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (11)$$

式 (11) 就是 Hilbert 时频谱，简称 Hilbert 谱，记为：

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (12)$$

式 (12) 是行波波头信号 $s(t)$ 瞬时振幅在频率—时间平面上的分布。

在式 (10) 中省略残余函数 $r_n(t)$ ，因它是常数，或者单调函数，但不管 $r_n(t)$ 是常数或者函数，其必为低频分量，而行波波头信息主要在高频分量中，对 $r_n(t)$ 做了省略处理是合理的^[2]。

3 行波差动保护原理

行波差动保护是建立在方向电流行波在一条没有支路的回路中传播时大小不变的原理上的。

当被保护线路 mn (图 1) 外部 F_1 短路时，近故障端 m 端首先提取到正向电流行波，经过线路 mn 全长行波传播时间 T 后，该行波到达远故障端 n 端，成为远故障端的正向电流行波，故有两端同向行波电流之差 $i_{dm}^+(t)$ ， $i_{dn}^+(t)$ 有： $i_{dm}^+(t) = i_m^+(t-T) - i_n^+(t)$ ， $i_{dn}^+(t) = i_n^+(t-T) - i_m^+(t)$ 。其中， $i_m^+(t)$ ，为 m 端看到 n 端的正向电流行波； $i_n^+(t)$ 为 n 端看到 m 端的正向电流行波。

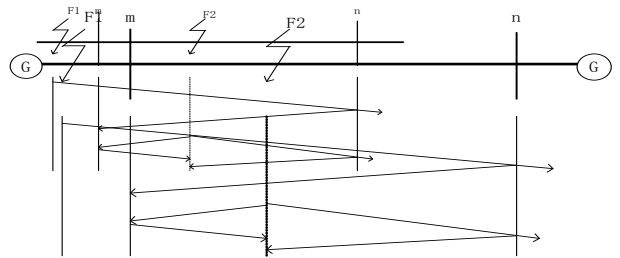


图 1 方向行波示意图

相差时间 T 的两端同向行波电流之差应该为 0，即：

$$i_{dm}^+(t) = i_m^+(t-T) - i_n^+(t) = 0 \quad (13)$$

$$i_{dn}^+(t) = i_n^+(t-T) - i_m^+(t) = 0 \quad (14)$$

当线路 mn 内部 F_2 发生短路时 (图 1)，在 mn 支路中增加了短路支路，式 (13) 和式 (14) 所示等式被破坏，差动行波电流等于短路支路电流。根据式 (13) 和 (14) 行波差动电流可以判别是否在区内发生短路故障，这是行波差动

保护的原理。以 m 端为参考点, 由 m 端指向 n 端方向为参考方向, 则方向电流行波的 (2 倍) 测量方法如下:

$$i_m^+(t) = i_m(t) + u_m(t) / Z_C \quad (15)$$

$$i_m^-(t) = -i_m(t) + u_m(t) / Z_C \quad (16)$$

$$i_n^+(t) = i_n(t) + u_n(t) / Z_C \quad (17)$$

$$i_n^-(t) = -i_n(t) + u_n(t) / Z_C \quad (18)$$

其中, $i_m^+(t)$, $i_m^-(t)$ 分别为 m 端看到 n 端的正向, 反向电流行波; $i_n^+(t)$, $i_n^-(t)$ 为 n 端看到 m 端的正向, 反向电流行波; $Z_C = \sqrt{L/C}$ 是线路波阻抗, L , C 分别是线路的电感和电容; $u_m(t)$, $u_n(t)$ 分别是 m , n 端的电压。

4 高速行波差动保护新方法

高速行波差动保护的要求: ①尽可能利用初始行波波头信息; ②尽可能减少通信量, 降低对通信要求。

如图 1 所示, 由行波差动保护原理可知, 当被保护线路 mn 外部发生短路故障时 (如 F_1 点故障), 近故障端 m 端先检测到正向电流行波, 经时间 T 后远故障端 n 端同时出现正向和反向电流行波; 当内部短路 (F_2 点故障) 时, 线路任一端都会同时出现正向和反向电流行波, 可按下述方法构造行波差动新算法。

4.1 区外故障

外部短路时 (F_1 点短路), 近故障端 m 端只检测到正向电流行波, 保护测控元件启动并记录下波头到达时间 t_1 , 且对正向电流行波进行 Δt 时间积分, 即:

$$I_m^+(t_1) = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i_m^+(t) dt \quad (19)$$

远故障端 n 端在 t_2 时刻出现正向电流行波和反向电流行波, 该端保护测控元件在 t_2 时刻启动并对正向电流行波进行 Δt 时间积分, 即:

$$I_n^+(t_2) = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i_n^+(t) dt \quad (20)$$

式 (20) 中 $i_n^+(t)$ 在 n 端看是反向电流行波, 在 m 端看是正向电流行波。按行波差动保护原理式 (13), 外部故障时有:

$$\int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i_m^+(t-T) dt - \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i_n^+(t) dt = 0 \quad (21)$$

式 (21) 中等式左边第 1 项可看成 m 端正向电流行波无衰减到达 n 端后的积分, 显然, 其与式 (19) 所示的积分值相等。 m 端将时间 t_1 、积分值 $I_m^+(t_1)$ 和无反向电流行波信息一起发送给 n 端, n 端将时间 t_2 、积分值 $I_n^+(t_2)$ 和反向电流行波积分值发送给 m 端。 m 端保护判断 $|t_1 + T - t_2| \leq \Delta t$ (Δt 为允许时间误差) 是否成立, 若成立, 则进行式 (21) 的判据计算, 而式 (21) 不是绝对等于 0 的, 在进行执行保护判据时, 可以令式 (21) 左边的绝对值小于一个很小的正数 ε_1 , 即:

$$|I_m^+(t_1) - I_n^+(t_2)| \leq \varepsilon_1 \quad (22)$$

若式 (22) 成立, 则判为外部故障。为了便于比较, 也可用式 (23) 判别:

$$|1 - I_n^+(t_2) / I_m^+(t_1)| \leq \varepsilon_2 \quad (23)$$

同理, n 端保护进行如下判断:

$$|1 - I_m^+(t_1) / I_n^+(t_2)| \leq \varepsilon_2 \quad (24)$$

4.2 区内故障

当区内发生短路故障时 (如 F_2 点短路), mn 线路任一端都会同时产生反向和正向电流行波。在 t_1 时刻 m 端测得正向、反向电流行波 $i_m^+(t)$ 、 $i_m^-(t)$, 计算积分值:

$$I_m^+(t_1) = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i_m^+(t) dt, \quad I_m^-(t_1) = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i_m^-(t) dt; \quad \text{在 } t_2 \text{ 时刻 } n \text{ 端测得正向、反向电流行波 } i_n^+(t)$$

和 $i_n^-(t)$, 并计算积分值: $I_n^+(t_2) = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i_n^+(t) dt$, $I_n^-(t_2) = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i_n^-(t) dt$, 此时 $|t_2 - t_1| < T$ 。

以行波差动保护原理, 内部故障时正向电流行波之差为:

$$i_m^+(t-T) - i_n^+(t) = i_{F_2}(t-T_{mF}) \quad (25)$$

其中: T_{mF} 为行波从 m 端传到故障点 F_2 的时间, $i_{F_2}(t-T_{mF})$ 为短路点的短路电流。

式 (25) 表明, 线路区内故障时, 时间差为 T 的 m 、 n 端正向电流行波之差的数值很大。

对式 (25) 等式两边从 $t_1 + T$ 时刻到 $t_1 + T + \Delta t$ 时刻进行积分:

$$\int_{t_1+T}^{t_1+T+\Delta t} i_m^+(t-T) dt - \int_{t_1+T}^{t_1+T+\Delta t} i_n^+(t) dt = \int_{t_1+T}^{t_1+T+\Delta t} i_{F_2}(t-T_{mF}) dt \quad (26)$$

式 (26) 等号左侧第 1 项中用 t 替换 $t-T$, 则有:

$$\int_{t_1+T}^{t_1+T+\Delta t} i_m^+(t-T) dt = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i_m^+(t) dt \quad (27)$$

因此, 式 (26) 变为以下形式:

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} i_m^+(t) dt - \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i_n^+(t) dt = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} i_{F_2}(t-T_{mF}) dt \quad (28)$$

式 (28) 表示 m 端正向电流行波波头积分与 n 端正向电流行波波头积分之差, 等于短路点短路电流的积分, 因此, 内、外部短路故障有显著的区别。 m 端将时间 t_1 和积分值 $I_m^+(t_1)$, $I_m^-(t_1)$ 发送给 n 端, n 端将时间 t_2 和积分值 $I_n^+(t_2)$, $I_n^-(t_2)$ 发送给 m 端^[3]。取一个比较大的正数 ε_3 , 则 m 端保护计算下式:

$$|1 - I_n^+(t_2) / I_m^+(t_1)| \geq \varepsilon_3 \quad (29)$$

若式 (29) 成立, 则 m 侧启动跳闸。

同理, n 端保护计算下式:

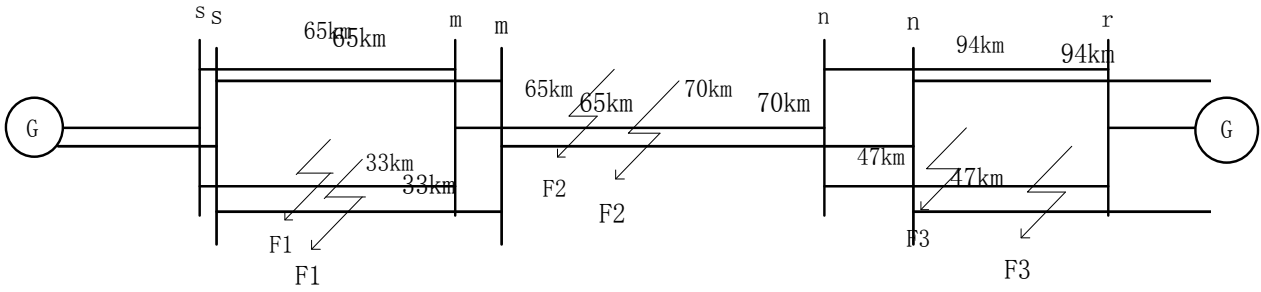


图 2 算例中的线路模型

$$\left| 1 - I_m^+(t_1) / I_n^+(t_2) \right| \geq \varepsilon_3 \quad (30)$$

若式 (30) 成立, 则 n 侧启动跳闸。

5 算例分析

图 2 是一个 500kV 输电线路, mn 为待研究的被保护线路。正序阻抗 $z_1=(0.01273 + j0.2932)\Omega/\text{km}$; 零序阻抗 $z_0=(0.3864 + j1.2957)\Omega/\text{km}$; 线路对地正序电容 $C_1=0.01274\mu\text{F}/\text{km}$; 线路对地零序电容 $C_0=0.07751\mu\text{F}/\text{km}$; 采样频率 1.0MHz。

图 2 中, F_1 点在 mn 线路外部距 m 端 33km 处, F_2 点在 mn 线路内部距 m 端 65km 处, F_3 点在 mn 线路外部距 n 端 47km 处。

6 行波波头信息的捕捉

行波波头捕捉的准确与否直接影响保护的可靠性, 以图 2 中 mn 线路外部 F_1 点发生 A 相金属性短路为例, 图 3 (a) 表示 m 端检测到的受到噪声干扰的 1 模正向电流行波, 经过 HHT 后提取到如图 3 (b) 所示的 1 模正向电流行波 $i_m^1(t)$, 对图 3 (b) 所示的正向电流行波进行式 (31) 的差分运算, 得到各采样时刻的差分值:

$$\Delta i_m^1(n) = i_m^1(n) - i_m^1(n-k) \quad (31)$$

这里, k 可取 3~5。

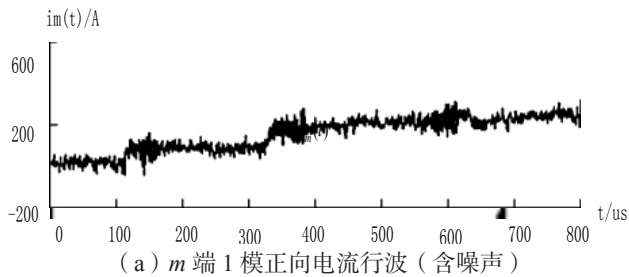
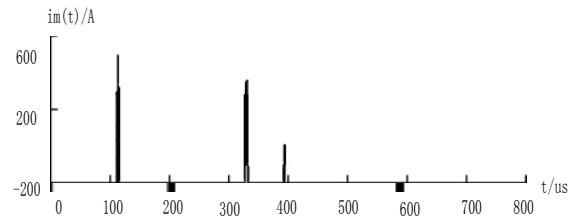
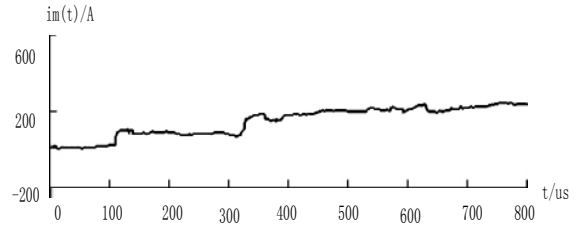


图 3 波头捕捉图



续图 3 波头捕捉图

7 结论

论文提出的是方向电流行波差动保护新算法, 算法基于方向电流行波波头积分得到的, 采用 HHT 对电流和电压信号进行处理, 能准确提取行波波头信息, 从而保证方向电流行波波头积分差值能够正确反映区内、区外短路故障, 由于本算法利用方向电流行波波头的积分, 且积分时间很短, 不需等行波来回折、反射, 保护的動作速度很快, 可以构成超高压输电线路超高速保护。

参考文献

- [1] 苏斌,董新洲,孙元章.串联电容补偿线路行波差动保护研究[J].清华大学学报(自然科学版),2005(1):137-140.
- [2] 张武军,何奔腾,沈冰.特高压带并联电抗器线路的行波差动保护[J].中国电机工程学报,2007(10):56-61.
- [3] 张武军,王慧芳,何奔腾.T接线行波差动保护[J].电力系统自动化,2007(3):61-66.