

DOI: 10.7667/PSPC151992

基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护

许小雪, 刘建锋, 江玉蓉

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 分析高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)线路边界和线路的频率特性, 直流线路边界和直流线路对故障暂态电流信号高频分量都具有衰减作用。一些文献据此利用高频分量作为单端暂态保护的判据, 但是对于长线路来说, 直流线路对于高频分量的衰减可能会大于直流线路边界对高频分量的衰减作用, 这样可能会造成保护误动作。进一步分析发现, 直流线路边界对于低频分量具有放大作用, 直流线路对于低频分量具有衰减作用。因此提出一种基于多频带能量的 HVDC 线路单端暂态电流保护新原理。利用 0~1.25 kHz 低频带能量、高频带和低频带能量比来区分区内、区外短路故障, 故障性雷击和非故障性雷击, 利用正极和负极的能量比判别故障极。

关键词: HVDC; 频率特性; 多频带能量; 暂态电流; 线路保护

HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy

XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong

(College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The frequency characteristics of HVDC transmission line and line boundary are analyzed, the fault transient high-frequency current signal will be weakened through line boundary and DC line. The high-frequency components are used as a criterion for single ended transient protection in some literature, but for long lines, DC line for attenuation of high frequency components may be larger than line boundary, which may cause malfunction protection. Further analysis shows that physical boundary has an amplification effect on low frequency components, and DC line has an attenuation effect on low frequency components. Based on multiband energy, a new principle of single ended transient current protection for HVDC transmission line is proposed. The identification criterion of internal and external faults, lightning stroke fault and non lightning stroke fault are based on the energy of 0~1.25 kHz low frequency, energy ratio of high frequency and low frequency, the fault line is selected by the energy ratio of the two lines.

Key words: HVDC; frequency characteristic; multiband energy; transient current; transmission line protection

0 引言

目前, HVDC 线路多以行波保护为其主保护。但是传统的行波保护抗过渡电阻能力较弱^[1-5], 目前所有行波保护的新原理都是利用故障后的叠加原理, 但只有线性系统才具有叠加性, 而直流输电系统是非线性系统, 这些新原理是否有效还有待深入研究^[6]。微分欠压保护也存在耐过渡电阻能力差、灵敏度低、整定缺乏依据等问题^[7]。电流纵联差动保护虽抗过渡电阻能力强, 但由于发生故障后直流控制系统的作用, 其不能满足速动性要求。

暂态保护反映了包括暂态量和稳态量在内的全部电气量信息, 耐过渡电阻能力强, 灵敏度高, 不受直流控制系统作用的影响^[1]。同时暂态信息贯穿于故障暂态的整个时域和信号的整个频域, 方便从暂态信号中提取特定的频带信息^[8]。文献[9]利用区内、外故障时保护安装处的暂态电压小波能量的不同来区分直流线路区内、外故障, 但由于电容耦合电压互感器传变高频电压比较困难, 需要对线路一次设备进行改造, 专门设计调谐回路抽取高频电压, 故实际应用起来比较困难。而电流互感器能够可靠传变高频信号, 无需增加一次设备, 易于工程实现。文献[9-12]都是根据区内、外故障时高频分量的差异构造保护判据, 但其只分析了 HVDC 线路边界对于高频分量的衰减作用, 忽略了直流线路对于

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目
(13DZ2251900)

高频分量同样具有衰减作用, 对于线路保护末端区内故障不能可靠识别, 不能保护线路全长。文献[13]考虑了 HVDC 线路边界和线路对暂态信号高频分量的衰减作用, 但其提出, 以线路末端故障时在保护安装点获得的故障暂态电压高频分量为标准, 考虑到 HVDC 输送距离远, 比如向家坝-上海±800 kV 特高压直流输电示范工程的送电距离就接近 2 000 km, 如果仅仅利用高频分量, 当线路很长的的时候, 有可能出现对侧区外故障经线路边界和线路后的高频分量和对侧区内故障经线路后的高频分量相当, 造成保护误动作。

本文利用 HVDC 线路边界对故障暂态信号高频分量的衰减作用, 对低频分量具有增强作用, 而 HVDC 线路对于故障暂态信号中的低频段和高频段

均具有衰减作用, 提出一种基于小波多频带能量的单端暂态电流保护。对故障暂态电流进行小波多尺度分解, 获取特定频段的小波系数值及其在移动时间窗口内的能量值, 利用 0~1.25 kHz 低频带能量和高频带和低频带能量比的来区分区内、区外故障, 以及故障性雷击和非故障性雷击, 利用正极和负极的能量比识别故障极。

1 HVDC 线路边界、线路及雷电流频率特性分析

图 1 为双极 HVDC 系统的结构简图。该系统主要由整流器、平波电抗器、直流滤波器、PLC 滤波器、直流线路、逆变器构成。M 是直流线路上整流侧保护安装处。

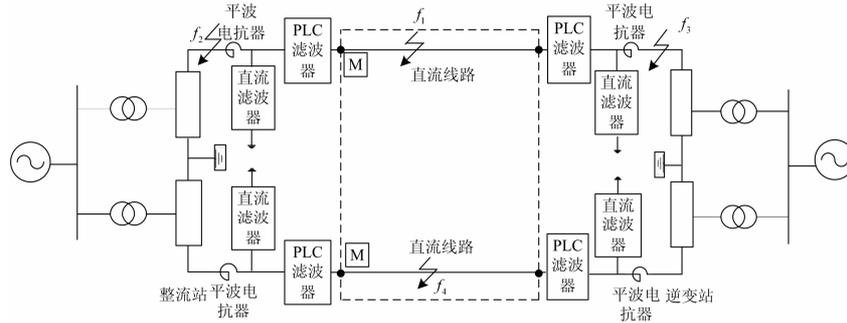


图 1 双极高压直流系统的结构简图

Fig. 1 Configuration of bipolar HVDC system

1.1 线路边界频率特性分析

平波电抗器、直流滤波器和 PLC 滤波器组合构成了直流输电线路的物理边界, 如图 2 所示。

以云广 HVDC 线路为例^[14], 平波电抗器的阻抗为

$$Z_1 = j\omega L_0 = j0.3\omega \quad (1)$$

直流滤波器的等效阻抗如式(2)。

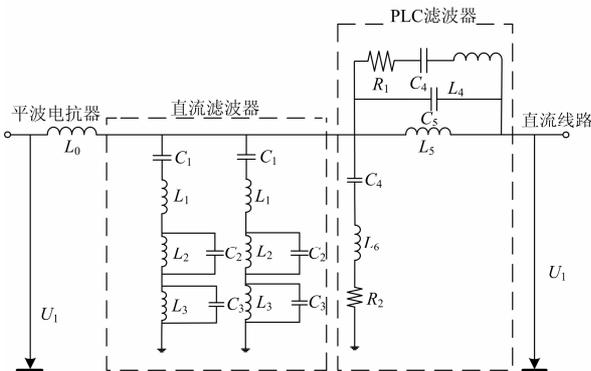


图 2 HVDC 线路边界

Fig. 2 Boundary of HVDC transmission line

$$Z_2(j\omega) = \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + \frac{j\omega L_2}{1 - \omega^2 L_2 C_2} + \frac{j\omega L_3}{1 - \omega^2 L_3 C_3} \right) = 0.5 \times \left(\frac{10^9}{j2\omega} + j1.773 \times 10^{-3} \omega + \frac{j1.0266 \times 10^{-3} \omega}{1 - \omega^2 3.505839 \times 10^{-5}} + \frac{j4.77 \times 10^{-3} \omega}{1 - \omega^2 5.615721 \times 10^{-11}} \right) \quad (2)$$

在分析 HVDC 线路边界的频率特性时, 认为线路侧处于开路状态, 则 PLC 的等效阻抗为

$$Z_3(j\omega) = R_2 + j\omega L_6 + \frac{1}{j\omega C_4} = 2 + j1.2 \times 10^{-5} \omega - \frac{j5 \times 10^7}{\omega} \quad (3)$$

认为线路侧处于开路状态, 定义线路边界元件的传递函数为

$$G(j\omega) = \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} = \frac{Z_2(j\omega)Z_3(j\omega)/(Z_2(j\omega) + Z_3(j\omega))}{Z_2(j\omega)Z_3(j\omega)/(Z_2(j\omega) + Z_3(j\omega)) + Z_1(j\omega)} \quad (4)$$

根据式(4)可绘出直流线路边界元件幅频特性曲线,如图3所示。从图3中可以看出,在直流分量及低频段 $0 < f < 120$ Hz, $|G(j\omega)|=1$ 。在 120 Hz $< f < 1\,277$ Hz, $|G(j\omega)| > 1$,尤其在[850 Hz 950 Hz]频段, $|G(j\omega)| \gg 1$ 。而在 $f > 4\,300$ Hz 频段, $|G(j\omega)| \ll 1$ 。由此看出,直流线路边界元件对高频信号具有强烈的衰减作用,对低频信号有一定的增强作用。综上所述,线路区外故障时,直流线路边界元件对暂态高频信号的衰减作用很强,对暂态低频信号具有增强作用,直流线路保护安装处检测到的高频信号很弱,检测到的低频信号较强。

1.2 直流线路频率特性分析

本文所搭建的直流线路采用频率相关相位模型。参照云广 HVDC 线路参数^[14],经计算,导线电阻为 $0.0463\,3\,\Omega/\text{km}$,每极自电感 $L=0.001\,81\,\text{H}/\text{km}$,极间互电感 $M=0.000\,99\,\text{H}/\text{km}$,每极导体单位长度对地电容为 $9.99 \times 10^{-9}\,\text{F}/\text{km}$,每单位长度两极导体间的电容为 $2.11 \times 10^{-9}\,\text{F}/\text{km}$ 。

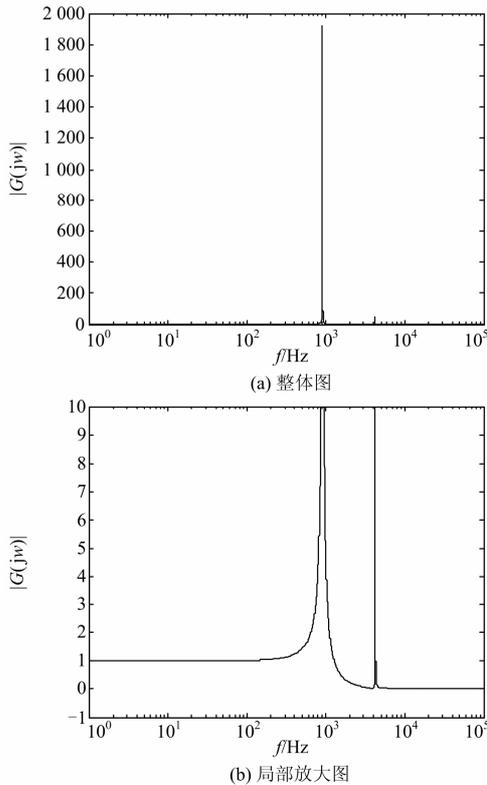


图3 HVDC 线路边界的幅频特性曲线

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristic of HVDC transmission line boundary

线路第 j 个模量($j=0,1$)的模传播系数^[15-16]

$$\gamma_j = \sqrt{(R_j + j\omega L_j)j\omega C_j} \quad (5)$$

x 长度的输电线路传输函数为

$$A_j(j\omega) = e^{-\gamma_j x} \quad (6)$$

式中: R_j 、 L_j 、 C_j 分别表示单位长度线路的模量电阻、模量电感、模量电容。

对双极 HVDC 线路进行相模分析,由式(6)可得到线路模 1 传输函数的幅频特性曲线,如图4所示,模 0 传输函数的幅频特性曲线与其类似。从图4可以看出, HVDC 线路对于低频信号有一定的衰减作用,对于高频信号有较强烈的衰减作用。线路越长,对于信号的衰减作用越强。综上所述,经过直流线路后高频信号和低频信号都会衰减,且线路越长,衰减作用越强烈。如果线路很长的话,线路对高频信号的衰减作用有可能会超过线路边界对高频信号的衰减作用。图5给出了线路边界和 $2\,200\,\text{km}$ 长线路的幅频特性曲线的对比图,可以看出,对于绝大多数的频带来说,直流长线路对于高频分量和低频分量的衰减作用均大于直流线路边界的衰减作用,所以仅仅利用高频分量作为判据,线路末端区内故障与区外故障难以区分,保护并不可靠。

1.3 雷电流的频率特性

雷击从继电保护的角度看可分为故障性雷击和非故障性雷击:前者指直击雷过电压很大而引起绝缘子闪络,造成线路故障,保护应可靠动作;后者是雷电干扰,不造成线路故障,保护应可靠不动作。

雷电流模型采用双指数模型。

$$I(t) = I_0(e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (7)$$

式中: I_0 为雷电流幅值,取 $40\,\text{kA}$; T_1 取 $2.6\,\mu\text{s}$, T_2 取 $50\,\mu\text{s}$ 。

则雷电流的振幅频谱:

$$I(j\omega) = 4 \times 10^4 (1/(1/0.00000026 + j\omega) - 1/(20000 + j\omega)) \quad (8)$$

雷电流 $0 \sim \omega_0$ 部分的能量为:

$$W = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_0} |I(j\omega)|^2 d\omega \quad (9)$$

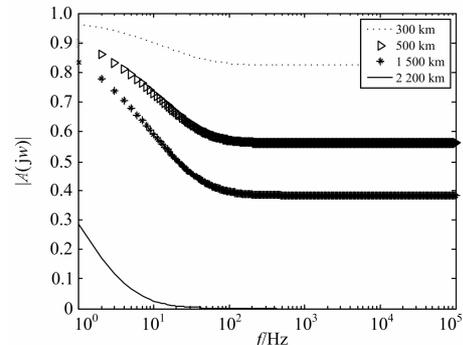
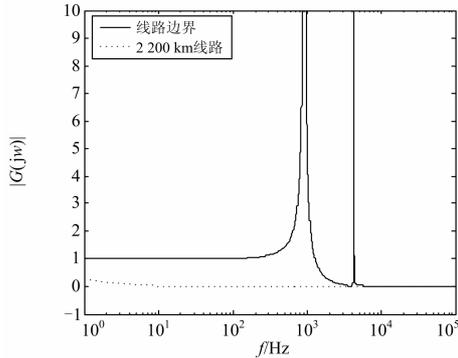
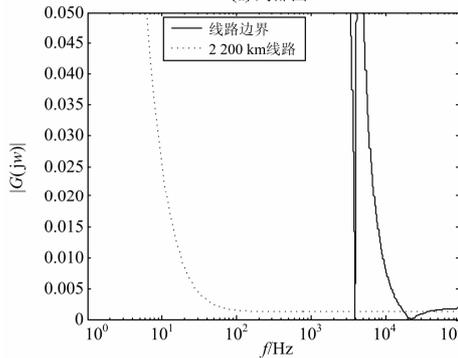


图4 HVDC 线路幅频特性曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic of HVDC transmission line



(a) 局部图



(b) 细节放大图

图5 线路边界和长线路的幅频特性曲线的对比图

Fig. 5 Comparison of amplitude-frequency characteristics of line boundary and long line

由式(8)可画出雷电流的幅频曲线,如图6所示。由式(9)可画出雷电流在 $0\sim 10^7$ Hz 部分的能量,如图7所示。由图6和图7可见,雷电流主要集中在 $0\sim 30$ kHz 频带,雷电能主要集中在 100 Hz~ 100 kHz 频带。因此在非故障性雷击时,暂态量中高频分量含量很大,而低频分量则很小。输电线路发生接地短路时,由于故障附加电压源为一直流源,其产生的能量主要集中于低频段,低频分量远高于非故障性雷击时的情况^[16]。在故障性雷击时,其暂态分量同时具备非故障性雷击和短路故障两种情况的特点。

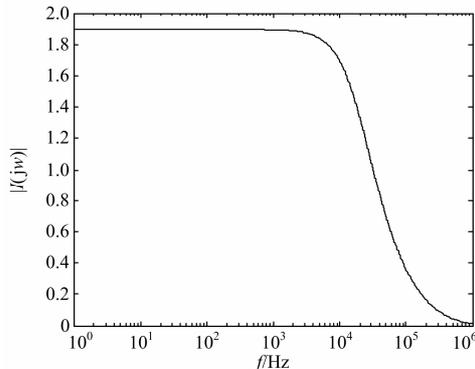


图6 雷电流的幅频特性曲线

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic of lightning current

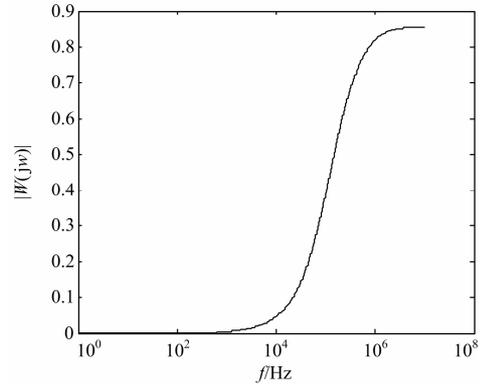


图7 雷电流的能量波形图

Fig. 7 Diagram of lightning current energy

2 电磁暂态仿真分析

本文根据文献[14]的参数利用 PSCAD 搭建了如图1所示的 ± 800 kV 双极 HVDC 系统,线路长度 1500 km,对其中的各个故障位置进行仿真,故障开始时间 0.2 s,单端保护装置位于整流侧。利用小波变换对暂态电流进行多尺度分解,得到特定频段的小波系数值及其在移动时间窗口内的能量值。分析不同暂态情况下小波能量的分布特点,从而识别不同暂态信号类型。

本文选用 dB3 小波,对暂态电流进行 6 尺度小波变换,则小波能量谱序列^[17]为

$$E(6)=[E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_6^0] \quad (10)$$

取采样频率 f_s 为 80 kHz,则频带能量关系如表1所示。

表1 频带能量对应关系表

Table 1 Correspondence of frequency band and energy

小波系数	能量	频带/kHz
d_1	E_1	40~80
d_2	E_2	20~40
d_3	E_3	10~20
d_4	E_4	5~10
d_5	E_5	2.5~5
d_6	E_6	1.25~2.5
a_6	E_6^0	0~1.25

图8分别给出了靠近整流侧直流线路区内故障、靠近逆变侧直流线路区内故障、整流侧直流线路区外故障、区内故障性雷击、区内非故障性雷击和正极故障时负极整流侧暂态电流及其小波分解。

对故障初始行波到达检测装置开始 10 ms 内的暂态电流在各个分解尺度下的小波能量进行了计算,如表2所示。

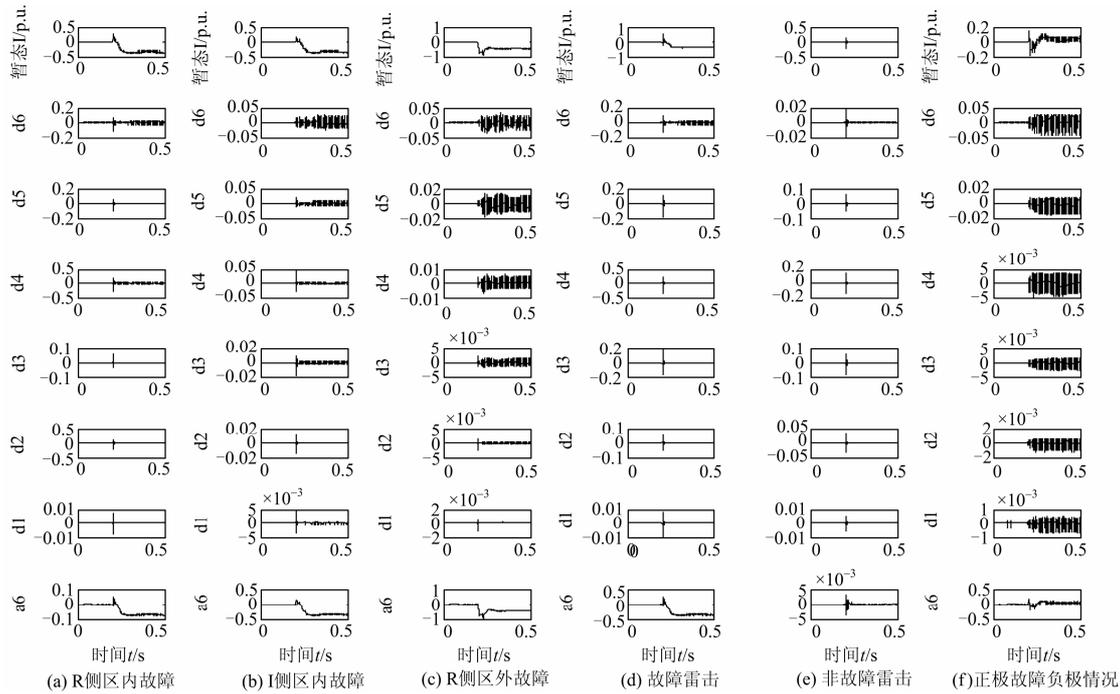


图 8 各尺度小波分解暂态电流图

Fig. 8 Wavelet decomposition of transient current at each scale

表 2 暂态电流在各个分解尺度下的能量(标么值)

Table 2 Energies of transient current at each scale (p.u.)

故障类型	靠近整流侧区内故障	靠近逆变侧区内故障	整流侧线路区外故障	区内故障性雷击	区内非故障性雷击	健全极
E_1	1.851424×10^{-4}	5.579136×10^{-5}	1.873159×10^{-6}	7.995214×10^{-4}	2.734588×10^{-4}	6.888297×10^{-7}
E_2	0.00108367	6.0387554×10^{-4}	1.290533×10^{-5}	0.0239280	0.00873384	2.643940×10^{-6}
E_3	0.0194210	0.00128681	1.972633×10^{-5}	0.252345	0.0714218	2.794299×10^{-5}
E_4	0.00657433	0.0125474	1.263725×10^{-4}	1.202800	0.321257	2.402996×10^{-4}
E_5	0.140667	0.0111042	0.00101732	0.581692	0.0766409	0.00117137
E_6	0.441975	0.0120193	0.00862788	0.681930	0.0212217	0.0174417
E_6^0	11.829377	6.321703	306.599955	11.951690	0.00137764	4.101956

对图 8 和表 2 进行分析, 可知:

1) 整流侧直流线路区外故障时, 整流侧暂态电流 0~1.25 kHz 低频分量 E_6^0 很大, 而高频分量 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 很小;

2) 整流侧直流线路区内故障时, 整流侧暂态电流具有较大的低频分量, 但明显低于区外故障, 而其高频分量也很大, 且明显大于区外故障; 逆变侧直流线路区内故障时, 整流侧暂态电流低频分量和高频分量均明显低于整流侧区内故障时的情况;

3) 发生非故障性雷击时, 整流侧暂态电流低频分量 E_6^0 很小, 高频分量较大; 发生故障性雷击时, 有较大的高频分量和低频分量, 低频分量 E_6^0 和整流侧直流线路区内故障相当, 高频分量尤其是 5 kHz~40 kHz 频带能量 E_2 、 E_3 、 E_4 非常大。

4) 当正极发生故障时, 负极也就是健全极同样会耦合到暂态电流信号, 但是所耦合到的暂态信号强度无论是低频分量还是高频分量始终都弱于故障极的信号强度。

结果表明, 这与上述直流线路边界、线路和雷电流的频率分析结果一致。

3 基于多频带能量的 HVDC 线路单端暂态电流保护判据

1) 启动判据

检测保护装置处的暂态电流, 判断在尺度 2 下的模极大值 $W_{2,max}$ 是否大于门槛值 W_{Th} , 即

$$W_{2,max} > W_{Th} \quad (11)$$

2) 动作判据

考虑到区内短路故障和区内故障性雷击时, 5 kHz~80 kHz 频带的高频分量 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 较区外故障大, 而 0~1.25 kHz 频带的低频分量 E_6^0 较小, 为排除区外故障, 可构造如下判据:

$$K_p = \frac{E_6^0}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} < K_{Th1} \quad (12)$$

式中, K_{Th1} 为整定值。

区内非故障性雷击的低频分量 E_6^0 很小, 为排除区内非故障性雷击, 可构造如下判据:

$$K_p = \frac{E_6^0}{E_1 + E_2 + E_3 + E_4} > K_{Th2} \quad (13)$$

式中, K_{Th2} 为整定值。

但是逆变侧区内故障时, 即线路对端区内故障, 尤其对于长线路和高阻接地来说, 如果仅用式(12)、(13), 很难将其与区外故障区分开来。考虑到区外故障时, 经过线路边界, 0~1.25 kHz 低频分量会被增强; 而线路对端区内短路故障时, 经过直流线路, 0~1.25 kHz 低频分量会被减弱, 同时构造如下判据区分线路对端区内故障和区外故障:

$$E_6^0 < E_{L.Th} \quad (14)$$

式中, $E_{L.Th}$ 为整定值。

综上, 在同时满足式(12)、(13)时, 保护一定动作; 如果不满足式(12), 但是满足式(14)时, 保护仍然动作。

3) 故障极识别判据

考虑到健全极感应到的暂态信号强度无论是低

频分量还是高频分量都始终弱于故障极的信号强度, 可通过比较故障极与健全极线路上的能量, 定义为式(15)。

$$K_q = \left(\sum_{i=1}^6 E_{1i} + E_{16}^0 \right) / \left(\sum_{i=1}^6 E_{2i} + E_{26}^0 \right) \quad (15)$$

式中: $\sum_{i=1}^6 E_{1i} + E_{16}^0$ 为正极各层小波能量之和;

$\sum_{i=1}^6 E_{2i} + E_{26}^0$ 为负极各层小波能量之和。

如果 $K_q > 1$, 则为正极故障; 如果 $K_q < 1$, 则为负极故障。

4 仿真验证

运用 PSCAD 对图 1 的系统进行大量的仿真。为了考察该保护原理的适用性, 线路长度延长为 2 500 km。鉴于篇幅, 只列出部分仿真结果, 分别为: 正极 f_1 、负极 f_4 处区内短路故障, 距离整流侧保护安装处的距离分别为 200 km, 1 000 km, 1 800 km, 2 500 km, 过渡电阻分别为 10 Ω , 200 Ω 的情况; 正极 f_2 、 f_3 处区外故障, 过渡电阻分别为 10 Ω , 200 Ω 的情况。 K_{Th1} 取 600, K_{Th2} 取 5, $E_{L.Th}$ 取 5。仿真结果如表 3 所示。

针对雷击情况, 分别考虑: 正极 f_1 处发生故障性雷击、非故障性雷击, 距离整流侧保护安装处的距离分别为 200 km, 1 000 km, 1 800 km, 2 500 km。仿真结果如表 4 所示。

表 3 区内、区外故障仿真结果

Table 3 Simulation results of internal and external fault

故障位置	过渡电阻/ Ω	K_p	E_6^0 (标么值)	K_q	判断结果
f_1 处, 200 km	10	223.4762	109.6496	3.5665	正极区内故障, 保护动作
	200	321.5788	45.7815	2.7206	正极区内故障, 保护动作
f_1 处, 1000 km	10	335.2433	40.6026	1.7710	正极区内故障, 保护动作
	200	434.1533	11.8351	3.0205	正极区内故障, 保护动作
f_1 处, 1800 km	10	96.1238	6.9882	9.8995	正极区内故障, 保护动作
	200	79.1100	1.2904	3.1288	正极区内故障, 保护动作
f_1 处, 2500 km	10	2143.5402	0.8171	5.2199	正极区内故障, 保护动作
	200	4944.6211	0.1764	5.7456	正极区内故障, 保护动作
f_4 处, 200 km	10	227.9222	165.4000	0.2820	负极区内故障, 保护动作
	200	325.8967	45.8970	0.3188	负极区内故障, 保护动作
f_4 处, 1000 km	10	166.0906	36.0988	0.5479	负极区内故障, 保护动作
	200	206.4705	11.5117	0.3498	负极区内故障, 保护动作
f_4 处, 1800 km	10	76.4797	6.8258	0.0958	负极区内故障, 保护动作
	200	48.2482	1.2298	0.3077	负极区内故障, 保护动作
f_4 处, 2500 km	10	1775.1148	0.8167	0.1897	负极区内故障, 保护动作
	200	4969.0445	0.1804	0.1717	负极区内故障, 保护动作
f_2 处	10	25678.8132	366.6494	1.3309	正极区外故障, 保护不动作
	200	84180.7512	257.2153	1.5294	正极区外故障, 保护不动作
f_3 处	10	6844.7744	34.4722	3.5491	正极区外故障, 保护不动作
	200	638.8183	23.2916	3.2966	正极区外故障, 保护不动作

表 4 雷击干扰仿真结果

Table 4 Simulation results of lightning interference

雷击故障情况	K_p	E_0^0 (标么值)	K_q	判断结果
f_1 处 200 km, 故障性雷击	106.0864	103.5436	4.5048	正极故障, 保护动作
f_1 处 1000 km, 故障性雷击	102.7434	41.6899	3.8911	正极故障, 保护动作
f_1 处 1800 km, 故障性雷击	97.9096	8.6782	1.2597	正极故障, 保护动作
f_1 处 2500 km, 故障性雷击	44.2881	2.9738	43.0970	正极故障, 保护动作
f_1 处 200 km, 非故障性雷击	0.1507	0.1484	96.3229	干扰, 保护不动作
f_1 处 1000 km, 非故障性雷击	0.0096	0.0016	140.3297	干扰, 保护不动作
f_1 处 1800 km, 非故障性雷击	0.0513	0.0015	1087.8480	干扰, 保护不动作
f_1 处 2500 km, 非故障性雷击	0.0205	0.000189	7172.4973	干扰, 保护不动作

从表 3 可以看出, 对于高阻接地故障, 保护装置仍可准确动作, 抗过渡电阻能力强。同时利用低频分量 E_0^0 作为判据, 可以克服区内对端线路保护死区, 有效区分区外故障和区内对端线路保护, 大大提高了保护装置的可靠性。利用故障时正极和负极的能量比, 可有效识别故障极。

从表 4 可以看出, 上述判据可有效区分故障性雷击和非故障性雷击。

5 结束语

本文利用高压直流输电线路边界对于故障暂态信号高频量的衰减作用, 对于低频信号部分频段具有一定的增强作用, 而高压直流输电线路对于故障暂态信号中的低频段和高频段均具有衰减作用, 提出一种基于小波能量的单端暂态电流保护。利用高频带和低频带能量比和 0~1.25 kHz 低频带能量的来区分区内、区外故障, 以及故障性雷击和非故障性雷击, 利用正极和负极的能量比识别故障极。该单端保护原理抗过渡电阻能力强, 动作迅速, 10 ms 内即可判别出是否发生区内故障, 对通信通道要求不高。仿真结果表明, 该保护原理无论线路长短, 在区内短路故障、故障性雷击、高阻接地故障时均可准确动作; 在区外故障和非故障性雷击时可靠不动作; 同时可有效识别故障极。

参考文献

- [1] 于洋, 孙学锋, 高鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.
YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154.
- [2] 董鑫. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2008.

DONG Xin. Research on theory of traveling wave protection of HVDC lines[D]. Changchun: North Dianli University, 2008.

- [3] 邢鲁华. 高压直流输电线路保护与故障测距原理研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
XING Luhua. Research on protection and fault location principles for HVDC transmission lines[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [4] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [5] 李豹, 马业林, 熊双成, 等. ± 800 kV 特高压直流保护优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 71-75.
LI Bao, MA Yelin, XIONG Shuangcheng, et al. Research on optimization of ± 800 kV UHVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 71-75.
- [6] 高本锋, 张学伟, 刘辛晔, 等. 高压直流输电保护定值整定流程的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 400-407.
GAO Benfeng, ZHANG Xuewei, LIU Xinye, et al. Research of HVDC Protection Value Setting Process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 400-407.
- [7] 刘剑, 范春菊, 邵能灵. 考虑直流控制系统影响的 HVDC 输电线路后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 73-80.
LIU Jian, FAN Chunju, TAI Nengling. Backup protection research for HVDC transmission line considering the impact of DC control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 73-80.

- [8] 方达意. 基于暂态电流小波能量谱的超高压输电线路故障类型识别[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
FANG Dayi. Transient current's energy spectrum-based faulty type identification method in EHV lines[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [9] 束洪春, 刘可真, 朱盛强. ± 800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 108-117.
SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang. ± 800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.
- [10] 刘可真, 束洪春, 于继来. ± 800 kV 特高压直流输电线路雷击暂态识别[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3008-3014.
LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai. Transient identification of lightning strokes on ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3008-3014.
- [11] 杨帅雄. 基于故障暂态分量的高压输电线路继电保护方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
YANG Shuaixiong. Research of high-voltage transmission line relaying based on the fault transient components[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [12] 蒋洪涛, 黄纯, 杨帅雄. 基于小波暂态能量的超高压输电线路保护新方法[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 248-253.
JIANG Hongtao, HUANG Chun, YANG Shuaixiong. A new protection approach for EHV transmission lines based on wavelet transient energy[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 248-253.
- [13] 陈仕龙, 束洪春, 万春红, 等. 一种特高压直流输电线路单端电压暂态保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 26-31.
CHEN Shilong, SHU Hongchun, WAN Chunhong, et al. The principle of single-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 26-31.
- [14] 陈仕龙, 束洪春, 叶波, 等. 云广 ± 800 kV 特高压直流输电系统精确建模及仿真[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2012, 37(2): 43-48.
CHEN Shilong, SHU Hongchun, YE Bo, et al. Accurate modeling and simulation of Yunnan-Guangdong ± 800 kV UHVDC transmission system[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 37(2): 43-48.
- [15] 陈仕龙, 束洪春, 谢静, 等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 134-153.
CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 134-153.
- [16] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.
CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [17] 王钢, 李海锋, 赵建仓, 等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.
WANG Gang, LI Haifeng, ZHAO Jiancang, et al. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144.

收稿日期: 2015-11-31; 修回日期: 2016-01-25

作者简介:

许小雪(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其继电保护、电力系统通信; E-mail: 911397469@qq.com

刘建锋(1968-), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为光电互感器、数字化变电站智能装置及电力系统通信。E-mail: bensen@sina.com

(编辑 姜新丽)