第 43 卷　第 21 期　2019 年 11 月 10 日
DOI：10.7500/AEPS20181126010
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 43 No. 21 Nov. 10，2019

# 基于暂态功率的高压直流线路单端量保护

侯俊杰，宋国兵，常仲学，张晨浩，吴　磊，王　婷
（西安交通大学电气工程学院，陕西省西安市 710049）

**摘要**：针对传统高压直流单端量保护存在可靠性较低的问题，通过计及直流边界、线路频变等因素影响，研究了高压直流线路暂态功率故障特性，提出了基于暂态功率的单端量保护方案。根据暂态功率在正方向区内外故障的频率段差异性，利用高低频段暂态能量比值，构成边界保护元件；针对利用暂态功率频率衰减特征无法区分正反方向故障的局限性，利用暂态功率极性构造方向辅助判据。结合保护启动元件和故障选极元件构成基于暂态功率的单端量保护方案。仿真结果表明，该保护方案能够快速有效地区分直流线路区内外故障，具有一定的抗过渡电阻性能及抗干扰能力，可靠性较高。

**关键词**：高压直流；线路保护；单端量保护；暂态功率；边界保护

## 0　引言

高压直流（HVDC）输电系统凭借其远距离、大功率传输的特点，在电力系统中获得了广泛的应用。直流输电线路距离长且输电走廊环境复杂，使得直流线路故障成为直流系统中发生概率最大的故障[1-3]。当今直流线路保护主要分为行波保护、微分欠压保护、差动保护。其中行波保护和微分欠压保护极易受到波头信息提取不准确、整定值选取、高阻接地故障等因素影响，保护可靠性差，存在适应性问题。差动电流保护延时时间过长，不能快速切除故障[4-7]。

目前，利用直流系统边界效应构成暂态量保护已成为高压直流线路保护的发展方向[8-21]。文献[8-12]详细研究了直流边界元件对高频暂态电气量信息衰减特性的影响，提出一系列单端量暂态保护原理。但上述原理未考虑线路对暂态量衰减特性的影响。文献[13-14]考虑利用保护安装处两端的暂态量电压信息构成暂态量保护原理，具有较高的可靠性，但需要两端通信信息的交互，保护的速动性低。文献[15-18]提出单端量暂态保护需同时考虑直流线路和直流边界对暂态量高频信息的衰减作用。其中文献[15]提出一种利用电压频谱波形进行故障区域判别，但对于频率信息的选择与整定值的选取仍需要进一步的研究。文献[16]提出利用小波分解方法构成单端量暂态保护原理，其整定值的选择依赖于小波分解的结果。但考虑小波变换尺度、种类的选择对保护性能可能造成一定的影响，仍需进一步研究。文献[17]提出利用形态学对单端量暂态电流进行分析，以判别故障区域。该方法处理数据所需采样率高，整定结果依赖于数学方法处理结果，保护的实用性仍需要进一步研究。文献[18]指出电流量相比于电压量，拥有更加丰富的故障信息，以此提出一种单端量暂态电流保护原理，该原理利用模态经验分解（EMD）进行模态分解，但考虑实际中 EMD 算法本身抗混叠效果较差，提取高频信息将出现一定误差，并且算法本身需要一定的运算时长，在工程应用中可能仍需要进一步讨论。因此，有必要对单端量暂态量保护原理展开进一步研究，提高高压直流线路单端量保护原理的适应性和可靠性。文献[19-21]考虑利用保护安装处暂态量电压和电流极性信息构成暂态保护原理。该原理为研究含暂态电压/电流及功率的复合电气信息的暂态量保护提供了一定的思路。

本文综合考虑线路和直流边界衰减在不同故障区域的影响，利用暂态功率极性在正反方向故障的差异性，构造方向辅助判据，当判别为正方向故障时，根据暂态功率在正方向区内外故障的频率段差异性，构造高低频段暂态能量比值，当能量比值大于整定值时，判别为区内故障，反之判别为区外故障。结合保护启动元件和选极元件，通过大量仿真对暂态功率的单端量保护方案进行验证。

收稿日期：2018-11-26；修回日期：2019-05-05。
上网日期：2019-07-05。
国家自然科学基金重点项目（U1766209）；国家自然科学基金资助项目（51477131）。

## 1　功率频率特征分析

### 1.1　边界元件的功率频率特征分析

对于直流边界元件，其等效图见附录 A 图 A1，其中直流滤波器的等效阻抗为 $Z_w(j\omega)$，平波电抗器的等效阻抗为 $Z_L(j\omega)$。$U_1(\omega)$，$U_2(\omega)$和 $I_1(\omega)$，$I_2(\omega)$分别为边界元件两端的电压和电流时域瞬时值对应的频域形式，后文中 $U(\omega)$和 $I(\omega)$均表示时域瞬时值对应的频域形式。

其中，$Z_w(j\omega)$和 $Z_L(j\omega)$分别为：

$$Z_w(j\omega)=0.5\left(\frac{1}{j\omega C_1}+j\omega L_1+\frac{\frac{L_2}{C_2}}{\frac{1}{j\omega C_2}+j\omega L_2}+\frac{\frac{L_3}{C_3}}{\frac{1}{j\omega C_3}+j\omega L_3}\right) \tag{1}$$

$$Z_L(j\omega)=j\omega L \tag{2}$$

式中：$C_1$，$C_2$，$C_3$，$L$，$L_1$，$L_2$，$L_3$ 分别对应附录 A 图 A1 直流边界元件中的电容、电感值。

由附录 A 图 A1 可知：根据电路分析，当直流线路区外发生故障时，对应的电压、电流传输函数分别为 $G_{Ub}(j\omega)$和 $G_{Ib}(j\omega)$。其中，

$$U_2(\omega)=U_1(\omega)G_{Ub}(j\omega)=U_1(\omega)\frac{Z_w(j\omega)}{Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)} \tag{3}$$

$$I_2(\omega)=I_1(\omega)G_{Ib}(j\omega)=I_1(\omega)\frac{Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)}{2Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)} \tag{4}$$

考虑瞬时功率 $p$，其中 $p=ui$。根据时-频域卷积定理可知：2 个信号乘积对应 2 个信号傅里叶变换的卷积的 $1/(2\pi)$。若时域 $f_1$ 对应频域 $F_1(\omega)$，时域 $f_2$ 对应频域 $F_2(\omega)$，卷积符号为“$*$”，则由频域卷积定理可知：

$$F[f_1f_2]=\frac{1}{2\pi}F_1(\omega)*F_2(\omega) \tag{5}$$

将时域下 $u_1$，$u_2$，$i_1$，$i_2$ 分别代入式(5)中可得：

$$F[u_1i_1]=\frac{1}{2\pi}U_1(\omega)*I_1(\omega)=P_1(\omega) \tag{6}$$

$$F[u_2i_2]=\frac{1}{2\pi}U_2(\omega)*I_2(\omega)=P_2(\omega) \tag{7}$$

则暂态功率对应的频域 $G_{Pb}(j\omega)$可表示为：

$$G_{Pb}(j\omega)=\frac{P_2(\omega)}{P_1(\omega)}=\frac{U_2(\omega)*I_2(\omega)}{U_1(\omega)*I_1(\omega)} \tag{8}$$

结合式(3)和式(4)，式(8)可进一步写成：

$$G_{Pb}(j\omega)=\frac{(U_1(\omega)G_{Ub}(j\omega))*(I_1(\omega)G_{Ib}(j\omega))}{U_1(\omega)*I_1(\omega)} \tag{9}$$

考虑式(9)中，电压、电流边界的传输函数 $G_{Ub}(j\omega)$和 $G_{Ib}(j\omega)$均小于 1，若不考虑电压、电流的畸变点，则在特定频段内，其衰减幅值近似可等效为常数[10-16]。因此为抓住主要矛盾，定性说明功率边界传输函数的衰减特性，可将式(9)做近似等效(相关说明见附录 A 图 A2、图 A3)，则式(9)可近似表示为：

$$G_{Pb}(j\omega)\approx\frac{Z_w(j\omega)}{Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)}\frac{Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)}{2Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)}=\frac{Z_w(j\omega)}{2Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)} \tag{10}$$

由式(10)可知，功率传输函数小于 1，边界元件对两端电气量具有衰减作用。但考虑电压、电流传输函数 $G_{Ub}(j\omega)$和 $G_{Ib}(j\omega)$在通频带内随着频率变化而变化，而式(10)中对于功率传输函数的近似表达存在误差。

为保证功率传输函数的准确性，本文仍按照式(9)对边界的功率传输函数进行求解。

其中 $U_1(\omega)$利用故障分量网络进行分析时，其在故障瞬间可简化为阶跃信号，表示为 $1/(j\omega)$；考虑两侧换流器可近似等效为电感模型，其值远小于线路中平波电抗器的数值，可近似忽略[22]。因此根据电路分析，$I_1(\omega)$可近似表示为 $(1/(j\omega))/[Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)Z_c/(Z_w(j\omega)+Z_c)]$，其中 $Z_c$ 表示线路的波阻抗。

将 $Z_c$ 代入式(9)可得式(11)：

$$G_{Pb}(j\omega)=\frac{\left(\frac{1}{j\omega}\frac{Z_w(j\omega)}{Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)}\right)*\left(\frac{\frac{1}{j\omega}}{Z_L(j\omega)+\frac{Z_w(j\omega)Z_c}{Z_w(j\omega)+Z_c}}\frac{Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)}{2Z_L(j\omega)+Z_w(j\omega)}\right)}{\frac{1}{j\omega}*\frac{\frac{1}{j\omega}}{Z_L(j\omega)+\frac{Z_w(j\omega)Z_c}{Z_w(j\omega)+Z_c}}} \tag{11}$$

以某地区±800 kV UHVDC直流输电工程为例，其中线路边界组成元件的参数分别为 $C_1=2.0\ \mu F$，$L_1=11.773\ mH$，$C_2=3.145\ \mu F$，$L_2=10.226\ mH$，$L_3=4.77\ mH$，$C_3=11.773\ 6\ \mu F$，平波电抗器 400 mH，直流架空线路 $Z_c$ 选择 400 Ω。将上述参数代入式(11)，考虑常规卷积运算对全频段进行卷积运算，但考虑本文中采样率和有效频段选择，本文选择 0～5 000 Hz，其对应的功率传输函数幅频特性如图 1 所示。

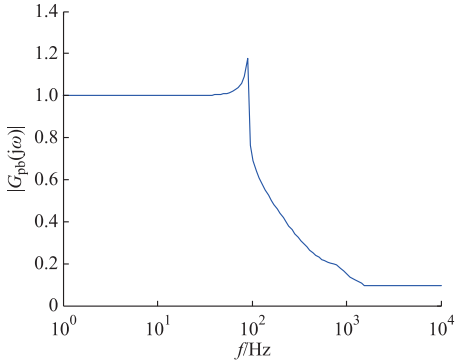



**图 1　边界元件的功率传输函数幅频特性**

**Fig. 1　Amplitude-frequency characteristics of power transmission function of boundary element**

由图 1 可知，边界元件衰减的传输函数在频率小于 100 Hz 频段内近似为 1，即可认为不发生衰减；100 Hz～1 kHz 的频率信息衰减程度持续不断增大；当暂态量功率的频率超过 1.5 kHz 时，其对应的传递函数远小于 1。由此可以看出，直流滤波器和平波电抗器组成的直流边界对暂态功率的高频信息有非常明显的衰减作用。

## 1.2　线路的功率频率特征分析

当直流线路发生故障时，直流线路同样将对线路的不同频段信息有不同程度的衰减，因此须对线路频率衰减特性展开研究。

考虑频率相关参数的直流线路电压、电流传递函数表达式[14-16,18,23]，如下式所示：

$$A_L(j\omega)=\exp(-\gamma(j\omega)x) \tag{12}$$

式中：$x$ 为线路长度；$\gamma(j\omega)$为传输系数。

$$\gamma(j\omega)=\sqrt{(R(\omega)+j\omega L(\omega))(G(\omega)+j\omega C(\omega))} \tag{13}$$

式中：$R(\omega)$，$L(\omega)$，$G(\omega)$，$C(\omega)$分别为单位长度的电阻、电感、电导、电容。

考虑某极线路任意一点发生故障时，该点电压记为 $U_{11}(\omega)$，保护安装处测得的电压记为 $U_{22}(\omega)$；同理该点电流记为 $I_{11}(\omega)$，保护安装处测得的电流记为 $I_{22}(\omega)$。其对应的时域形式为 $u_{11}$，$u_{22}$，$i_{11}$，$i_{22}$。根据电压、电流的线路频率相关参数传输函数表达式，考虑直流线路衰减的电压电流关系可表示为：

$$U_{22}(\omega)=U_{11}(\omega)A_L(j\omega)=U_{11}(\omega)\exp(-\gamma(j\omega)x) \tag{14}$$

$$I_{22}(\omega)=I_{11}(\omega)A_L(j\omega)=I_{11}(\omega)\exp(-\gamma(j\omega)x) \tag{15}$$

由 1.1 节同理可知：

$$F[u_{11}i_{11}]=\frac{1}{2\pi}U_{11}(\omega)*I_{11}(\omega)=P_{11}(\omega) \tag{16}$$

$$F[u_{22}i_{22}]=\frac{1}{2\pi}U_{22}(\omega)*I_{22}(\omega)=P_{22}(\omega) \tag{17}$$

则暂态功率对应的直流传输函数频域形式 $G_{Pl}(j\omega)$ 可表示为：

$$G_{Pl}(j\omega)=\frac{P_{22}(\omega)}{P_{11}(\omega)}=\frac{U_{22}(\omega)*I_{22}(\omega)}{U_{11}(\omega)*I_{11}(\omega)} \tag{18}$$

结合式(12)和式(13)，式(18)可进一步写成：

$$G_{Pl}(j\omega)=\frac{(U_{11}(\omega)A_L(j\omega))*(I_{11}(\omega)A_L(j\omega))}{U_{11}(\omega)*I_{11}(\omega)} \tag{19}$$

考虑式(19)中，在 $A_L(j\omega)$中，当线路长度 $x$ 一定时，衰减系数 $\gamma(j\omega)$可近似等效为定值[22,24]，$A_L(j\omega)$可近似等效为常数。

因此为定性分析功率的线路传输衰减特性，式(19)可近似等效为：

$$G_{Pl}(j\omega)\approx\exp(-2\gamma(j\omega)x) \tag{20}$$

由式(20)可知，功率的线路传输衰减程度较电压、电流的线路传输衰减作用更加显著。

但考虑到功率传输函数 $G_{Pl}(j\omega)$中的 $R(\omega)$，$L(\omega)$，$G(\omega)$，$C(\omega)$在实际情况下的频变参数效应，使得其传输函数随着频率和线路长度的改变而发生变化。为更加准确地描述功率传输函数随着线路变化的情况，本文中仍按式(19)进行线路的功率传输函数求解。

考虑式(19)中，$U_{11}(\omega)$利用故障分量网络进行分析时，其在故障瞬间可简化为阶跃信号，表示为 $1/(j\omega)$；根据电路分析，$I_{11}(\omega)$可近似表示为 $(1/(j\omega))/[Z_c+Z_w(j\omega)Z_L(j\omega)/(Z_w(j\omega)+Z_L(j\omega))]$。代入式(19)可得式(21)：

$$G_{\mathrm{Pl}}(\mathrm{j}\omega)=\frac{\left(\frac{1}{\mathrm{j}\omega}\exp(-\gamma(\mathrm{j}\omega)x)\right)*\left(\frac{\frac{1}{\mathrm{j}\omega}}{Z_{\mathrm{c}}+\frac{Z_{\mathrm{w}}(\mathrm{j}\omega)Z_{\mathrm{L}}(\mathrm{j}\omega)}{Z_{\mathrm{w}}(\mathrm{j}\omega)+Z_{\mathrm{L}}(\mathrm{j}\omega)}}\exp(-\gamma(\mathrm{j}\omega)x)\right)}{\frac{1}{\mathrm{j}\omega}*\frac{\frac{1}{\mathrm{j}\omega}}{Z_{\mathrm{c}}+\frac{Z_{\mathrm{w}}(\mathrm{j}\omega)Z_{\mathrm{L}}(\mathrm{j}\omega)}{Z_{\mathrm{w}}(\mathrm{j}\omega)+Z_{\mathrm{L}}(\mathrm{j}\omega)}}} \tag{21}$$

故障距离选取首端 100 km、中点 750 km，末端 1 500 km，采用频变参数线路模型，将相关线路参数和边界参数代入式(21)中，其线路的功率传输函数幅频特性如图 2 所示。

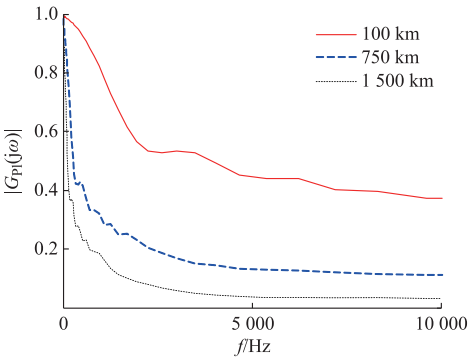



**图 2　线路的功率传输函数幅频特性**

**Fig. 2　Amplitude-frequency characteristics of power transmission function of line**

由图 2 可知，线路的功率传输函数随着频率的增加而降低；故障距离越长，传输函数降低越显著。

### 1.3　区内外故障的功率频率特征分析

#### 1.3.1　正方向区内/区外故障

当故障发生在正方向直流线路区外时，由故障点向保护安装处传输的暂态功率将经过边界信号与直流线路双重衰减作用。正方向区外故障时，其功率传输函数为：

$$G_{\mathrm{Plb}}(\mathrm{j}\omega)=G_{\mathrm{Pl}}(\mathrm{j}\omega)G_{\mathrm{Pb}}(\mathrm{j}\omega) \tag{22}$$

考虑目前直流工程中，直流保护的最大采样率为 10 kHz。根据香农定理，可获得暂态信号的频率在 5 kHz 以下。根据式(22)选取不同频率段，对正方向区内外故障时的不同频率的功率传输函数进行对比，如图 3 所示。

由图 3 可知，对于区内故障，当故障距离达到 1 500 km 时，即区内末端故障时，频率为 3 500 Hz 以上的信号几乎衰减为 0。

对于正方向区外故障，受线路全长和直流边界元件的双重衰减影响，频率为 1 200 Hz 以上的信号几乎衰减为 0。

综上可知，区内外故障的频率段差异显著。因此发生正方向故障时，可依据保护安装处获得的暂态功率频率特征差异性，判断正方向故障区域。

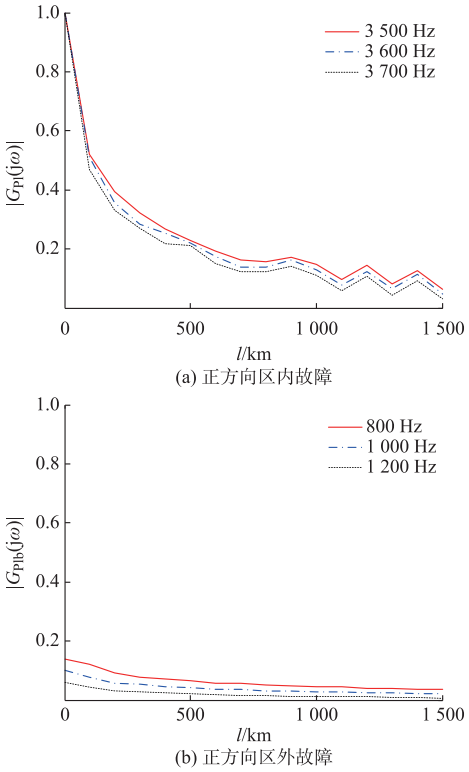



**图 3　区内外故障的功率传输函数幅频特性**

**Fig. 3　Amplitude-frequency characteristics of power transmission function with internal and external faults**

#### 1.3.2　正方向区内故障和反方向故障

当线路正方向区内发生故障时，由保护安装处测量得到的暂态功率仅受线路频率衰减特性影响；而反方向故障时，其暂态功率仅受直流边界衰减特性影响。因此，2 种情况下的衰减特性可能在线路达到一定长度时达到等价效果，因此需要对两者的频率衰减特性进行进一步的对比分析。

结合 1.1 节、1.2 节可知，考虑线路频率衰减特性及边界频率影响，假定当两者衰减程度相等时，即

$$G_{\mathrm{Pb}}(\mathrm{j}\omega)=G_{\mathrm{Pl}}(\mathrm{j}\omega) \tag{23}$$

式(23)可进一步表示为：

$$G_{\mathrm{Pb}}(\mathrm{j}\omega)=\frac{(U_{11}(\omega)\exp(-\gamma(\mathrm{j}\omega)x_{\mathrm{bd}}))*(I_{11}(\omega)\exp(-\gamma(\mathrm{j}\omega)x_{\mathrm{bd}})}{U_{11}(\omega)*I_{11}(\omega)} \tag{24}$$

当线路长度达到 $x_{bd}$ 时，线路功率的频率衰减程度将等价于边界元件的衰减程度；当线路长度大于 $x_{bd}$ 时，线路功率的频率衰减程度将大于边界元件的衰减程度。导致反映频率衰减特征的边界保护原理无法区分正方向远端和反方向区外故障。

考虑目前直流工程中，直流保护的最大采样率为 10 kHz。根据香农定理，可获得暂态信号的频率在 5 kHz 及以下，因此根据式(24)选取 3 kHz 和 5 kHz 的频率段，对不同频段下的线路功率衰减函数与边界元件衰减值(由于直流边界传输函数的频率超过 2 kHz 时，频率衰减函数值趋于稳定，因此选择此时的衰减函数值作为边界元件的衰减值)进行对比，其结果如图 4 所示。

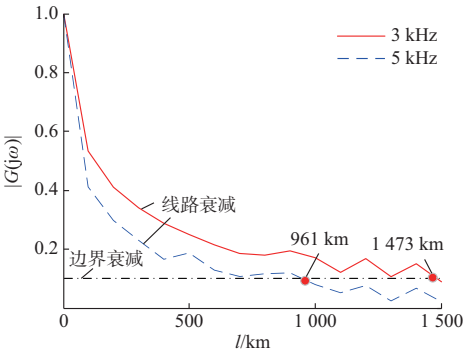



**图 4　线路与边界元件的功率传输函数对比**

**Fig. 4　Comparison of power transmission functions between line and boundary element**

由图 4 可知：信号频率为 3 kHz 时，当线路长度超过 1 473 km，线路的衰减程度超过直流边界衰减；信号频率为 5 kHz 时，当线路长度超过 961 km 时，线路的衰减程度大于边界的衰减程度。

由上述分析可知，直流边界与线路均对暂态信号的频段信息具有较强的衰减效果，当故障发生在正方向线路末端和反方向区外时，可能导致反映频率衰减特征的边界保护原理无法区分正方向远端和反方向区外故障。

### 1.4　功率频率特征总结

1)功率传输函数和电压、电流传输函数均具有较为明显的衰减效应。可充分利用暂态功率的传输函数衰减效应，对区内外故障进行区分。

2)当故障发生在正方向区内/区外时，可利用区内外故障时暂态功率信息的频率段差异特征区分线路区内故障和正方向区外故障。

3)故障发生在反方向或线路正方向区内时，需增加方向元件区分反方向和正方向远端故障。

## 2　基于暂态功率的单端量保护

### 2.1　基本思路

利用暂态功率频段信息在区内外故障时的差异性特点，分别利用高/低通滤波器构造高低频暂态能量比值，实现区内外故障的甄别。针对反方向故障引入方向元件作为辅助判据，并结合保护启动元件构成暂态功率单端量保护。

### 2.2　启动元件

当发生线路故障时，保护安装处将感受到较大的暂态电压 $\Delta u$、电流 $\Delta i$，可以利用暂态功率的幅值作为启动判据，考虑正常运行时，允许的电压波动一般不得超过基准值的 20%，而直流电流多采用定电流控制，故所允许的电流波动一般控制在额定值的 10%。考虑故障极与非故障极的耦合作用，应留有一定裕度，设定可靠系数 $K_{rel}$ 为 1.2，整定值 $\Delta P_{set}$ 为 0.024。启动判据为：

$$\Delta P_{star}=K_{rel}|\Delta u(i)\Delta i(i)|>\Delta P_{set} \tag{25}$$

为保证一定的抗干扰性能，可设定保护装置的启动条件为：连续检测到 3 个数据点的 $\Delta P_{star}$ 均大于整定值。

### 2.3　边界保护元件

根据 1.3.1 节，当发生正方向区外故障时，受线路全长和直流边界元件的双重衰减影响，特定频率段(以第 1 节中某一直流输电工程模型频谱分析结果为例，选择 1 200 Hz，考虑不同实际工程，其频率选择稍有差别，因此为更好地适应不同实际工程需求，门槛数值可以稍做调整)以上的暂态功率信号几乎衰减为 0。而发生区内故障时，当故障距离达到 1 500 km 时，即区内末端故障时，特定频率段(以第 1 节中某一直流输电工程模型频谱分析结果为例，选择 3 500 Hz)以上的暂态功率频率信号几乎衰减为 0。由此可知，区内外故障的暂态功率频率特征差异显著，因此可利用此特征构造边界保护原理。

利用低通滤波器，获取频率为 1 200 Hz 以下的暂态功率信息 $\Delta P_L$；再利用高通滤波器，获取频率为 1 200 Hz 以上的暂态功率信息 $\Delta P_H$。利用高频段功率 $\Delta P_H$ 和低频段功率 $\Delta P_L$，分别构造暂态能量 $E_H$ 和 $E_L$，求解暂态能量 $E_H$ 与 $E_L$ 的比值 $K_{HL}$，构造边界保护原理。

此时，暂态能量 $E_H$ 与 $E_L$ 表示为：

$$\begin{cases}E_H=\int_0^T|\Delta P_H|\,\mathrm{d}t\\ E_L=\int_0^T|\Delta P_L|\,\mathrm{d}t\end{cases} \tag{26}$$

式中：$T$ 为数据窗长度。

式(26)的离散化可表示为：

$$\begin{cases} E_{\mathrm{H}} = \sum_{i=1}^{N} \mid \Delta P_{\mathrm{H}}(i) \mid \\ E_{\mathrm{L}} = \sum_{i=1}^{N} \mid \Delta P_{\mathrm{L}}(i) \mid \end{cases} \tag{27}$$

式中：$N$ 为数据离散化点数，其中 $N=T/T_{\mathrm{s}}$，$T_{\mathrm{s}}$ 为采样间隔。

暂态能量 $E_{\mathrm{H}}$ 与 $E_{\mathrm{L}}$ 的比值 $K_{\mathrm{HL}}$ 可表示为：

$$K_{\mathrm{HL}} = \frac{E_{\mathrm{H}}}{E_{\mathrm{L}}} \tag{28}$$

考虑实际中滤波器处理数据的误差及互感器提取暂态信息的误差，同时为更好地满足不同工程的适应性要求，本文在大量仿真的基础上，在考虑留有较大裕度的前提下，选取 $1\times10^{-3}$ 作为 $K_{\mathrm{HL}}$ 的整定值 $K_{\mathrm{set}}$，则判据为：

$$K_{\mathrm{HL}} > K_{\mathrm{set}} \tag{29}$$

当高低频暂态能量比值大于整定值时，判定为区内故障，否则判定为区外故障。

由 1.3.2 节可知，当发生反方向和正方向区内故障时，利用暂态功率频率信息可准确区分正反方向故障，因此须添加方向辅助元件。

### 2.4　方向元件

利用暂态功率在正反方向的正负性特征，当暂态功率为负值时，判别为正方向故障，反之判别为反方向故障[19-20]。为克服畸变点和雷击干扰对方向保护中暂态功率的影响，选取一段数据窗长度，采用暂态功率的积分形式，对暂态功率的离散化数据点数进行求和构成暂态能量，其方向判据为：

$$\Delta E_{\mathrm{d}} = \int_{0}^{T} \Delta p \, \mathrm{d}t < 0 \tag{30}$$

式(30)的离散化表达式为：

$$\Delta E_{\mathrm{d}} = \sum_{i=1}^{N} \Delta p(i) < 0 \tag{31}$$

由式(31)可知，当暂态能量 $\Delta E_{\mathrm{d}}<0$ 时，判别为正方向故障，反之判别为反方向故障。

## 3　保护原理的相关问题讨论

### 3.1　雷击干扰分析

本文的方向保护、边界保护元件判据对暂态功率的处理均采用一定数据窗长的积分求和，在原理上受雷击和采样数据点突变的影响较小，具有一定的抗干扰性能。为保证绝对的可靠性，后续可加入雷击识别判据。

### 3.2　过渡电阻影响

考虑保护启动元件的灵敏度可能会随着过渡电阻的增大而受到影响。方向元件利用暂态功率在正反方向的极性进行故障方向判别，而过渡电阻主要对其幅值大小造成影响，对极性影响较小。方向元件在原理上受过渡电阻影响较小。

针对边界保护元件，利用暂态功率频段信息差异性，构造高低频暂态功率比值的保护判据。由于过渡电阻对全频段信息均有影响，因此利用高低频比值构成边界保护判据时，可在一定程度上消除过渡电阻对边界保护的影响。

### 3.3　噪声干扰影响

方向元件利用暂态功率在正反方向的极性进行故障方向判别，一定强度的随机噪声干扰对极性影响较小。方向元件在原理上受噪声干扰较少。针对边界保护元件，由于随机噪声包含全频段信息，因此利用高低频比值构成边界保护判据时，可在一定程度上消除随机噪声对边界保护的影响。

### 3.4　极间耦合的影响分析

当输电线路发生单极故障时，线路故障点处会产生故障行波，并由故障点向输电线路两端传输；由于双极线路耦合作用，在健全线路上将感应产生故障行波[25]。另外由电磁耦合和电容耦合[20]也可说明该问题。相关研究表明：由于线路极间耦合作用，健全极将产生感应电气量，且耦合作用的强度与谐波频率有关，高频故障谐波耦合作用强，故健全极与故障极的高频信号差异较小；低频信号的耦合作用弱，故障极低频信号远高于健全极[25]。

考虑本文设定保护启动判据，在一定程度上已减少非故障极误动的风险，但为保证保护的可靠性，可构造故障极判别辅助判据[8-11,21]。

考虑故障极的暂态功率明显大于非故障极的暂态功率，尤其是表现为低频分量部分[10,21,25]。因此，考虑采用较低频段信息构成暂态功率故障选极判据。本文暂态量功率信息的频率段选取 1 200 Hz 以下，如下式所示：

$$K = \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{\Delta p_{\mathrm{pl}}(i)}{\Delta p_{\mathrm{nl}}(i)} \right| \tag{32}$$

式中：$\Delta p_{\mathrm{pl}}$ 和 $\Delta p_{\mathrm{nl}}$ 分别表示频率为 1 200 Hz 以下的正、负极暂态功率瞬时值变化量；$K$ 为正负极暂态功率比值。为保证保护判别的快速性，选取 2 ms 数据进行离散化运算。

通过与整定值进行比较，实现保护动作。具体判别结果如下：

$$\begin{cases} K > K_{\mathrm{set1}} & \text{故障发生在正极} \\ K < K_{\mathrm{set2}} & \text{故障发生在负极} \\ K_{\mathrm{set2}} \leqslant K \leqslant K_{\mathrm{set1}} & \text{极间故障} \end{cases} \tag{33}$$

式中：$K_{\mathrm{set1}}$ 和 $K_{\mathrm{set2}}$ 分别为判断为正/负极的整

定值。

考虑通过大量仿真实验，同时考虑双极不对称运行状态，设定整定值 $K_{set1}$ 和 $K_{set2}$ 分别为 20 和 10。考虑不同实际工程，门槛值数值可以进行相应调整。

### 3.5　保护算法的实用性分析

考虑目前的技术条件下，直流输电工程控制保护平台极限运行周期为 0.1 ms，最高采样率为 10 kHz[9-10]。本文采用 10 kHz 采样频率，满足直流工程中对采样频率的要求，因此在保护原理的实用性方面优于部分依赖高采样率的保护原理。

## 4　保护原理实现流程

本文提出的单端量暂态功率快速保护方案具体步骤如下。

1）利用保护安装处的暂态电压、电流标幺值得到暂态功率。进行启动判别，满足条件时启动保护。

2）根据暂态功率正负性特征构成方向判别元件，对区内外故障区域进行初判：若暂态能量 $\Delta E_d$ 大于 0，判定为反方向故障；若 $\Delta E_d$ 小于 0，判定为正方向故障，需要进一步判别。

3）对暂态功率特定频率段（以第 1 节中某一直流输电工程模型频谱分析结果为例，选择 1 200 Hz）信息进行滤波处理。提取高频暂态功率 $P_H$ 以及低频暂态功率 $P_L$，求解暂态能量 $E_H$ 与 $E_L$ 的比值 $K_{HL}$。

4）对暂态能量比值 $K_{HL}$ 与整定值进行比较，判别是否区内故障。

5）分别对正负极的暂态功率进行故障选极判别，通过与预设整定值进行比较，实现故障极判别。

保护原理流程如附录 B 图 B1 所示。

## 5　仿真算例

参照某地区特高压直流输电系统及实际参数，搭建如附录 C 图 C1 所示的±800 kV 双极直流输电模型，直流额定功率为 5 000 MW，直流额定电流为 3.125 kA，直流输电线路全长为 1 500 km，导线型号为 6×LGL-630/45，弧垂 2 m，采用频变参数线路模型。输电线路导线自电阻为 0.046 33 Ω/km，导线互电阻为 $4.51\times10^{-7}$ Ω/km，每极自电感为 0.001 81 H/km，极间互电感为 0.000 99 H/km，每极导体单位长度对地电容为 $9.99\times10^{-9}$ F/km，每单位长度两极导体间的电容为 $2.11\times10^{-9}$ F/km。

仿真采样频率为 10 kHz，仿真时长 4 s，在 3 s 时发生金属性接地故障，故障位置分别为直流输电线路 $f_1$、直流线路末端 $f_4$、整流侧和逆变侧区外 $f_2$ 和 $f_3$，故障持续 0.2 s。采用 PSCAD 得到仿真数据，导入 MATLAB 进行保护算法验证。

### 5.1　边界保护元件验证

以整流侧正极距首端 100 km、中点、末端、正方向区外发生金属性接地故障为例，数据窗长度选取保护启动后的 5 ms 数据。则经过滤波后的高频段功率 $|\Delta P_H|$ 和低频段功率 $|\Delta P_L|$ 如图 5 所示。

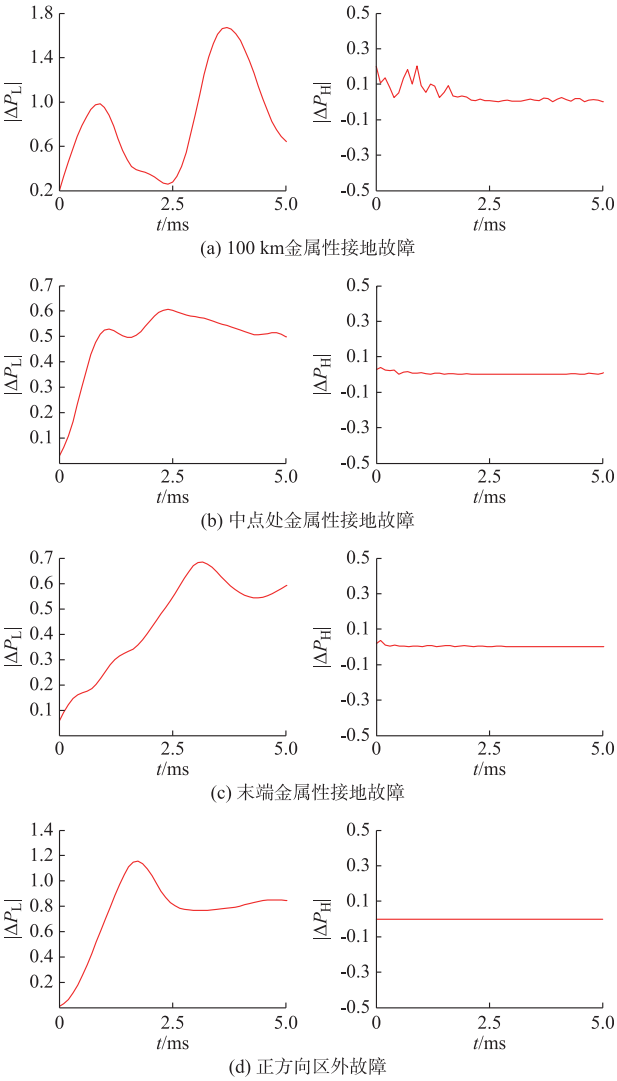



**图 5　不同故障区域的高/低频功率**

**Fig. 5　High/low frequency power in different fault areas**

将图 5 结果进行汇总，如附录 C 表 C1 所示。结合图 5 和表 C1 可知，当发生区内故障时，高低频暂态能量比值 $K_{HL}$ 远大于整定值 $K_{set}$，保护动作。当发生正方向区外故障时，高频暂态能量近似为 0，$K_{HL}$ 小于整定值 $K_{set}$，保护不动作。

### 5.2　保护原理性能验证

本节结合暂态功率启动/选极/方向保护与暂态功率边界保护构成单端量暂态功率快速保护方案，分别随机选取正负极不同的故障位置（整流侧母线、

距整流侧 100，750，1 500 km 和逆变侧母线），以及不同过渡电阻（0.01 Ω 和 500 Ω）对该保护原理进行验证。动作结果如附录 C 表 C2 所示。

由仿真结果可以看出，本文提出的单端量暂态功率保护具有良好的保护性能和较高的可靠性。

### 5.3　抗干扰性能验证

考虑实际工程中，外界噪声和互感器传变误差对保护原理造成的干扰，本文利用随机高斯白噪声对原理的抗干扰性能进行验证，白噪声选取信号信噪比为 40 dB，对整流侧正极的不同故障位置（整流侧母线、距整流侧 100，750，1 500 km 和逆变侧母线）发生经 0.01 Ω 接地故障的保护原理进行抗干扰能力验证，结果如附录 C 表 C3 所示。

由仿真结果可知，本文提出的单端量暂态功率保护在发生区内故障时，保护能够准确动作，且具有一定的抗干扰性能。

### 5.4　抗过渡电阻性能验证

以正极线路末端发生经 0.01，100，200，300，400，500，600，700，800，900，1 000 Ω 过渡电阻接地故障为例，对保护方案中各个保护元件的抗过渡电阻性能进行测试。

启动元件的动作结果如附录 C 图 C2 所示（图中仅展示部分过渡电阻情况下的动作结果），将所有保护元件动作结果汇总至附录 C 表 C4。

结合图 C2 和表 C4 动作结果可知：一方面，保护动作的可靠性受保护启动元件的影响，当过渡电阻达到 700 Ω 时，保护启动值低于整定值，保护将出现拒动现象；另一方面，保护方案中的方向元件、选极元件、边界保护元件均不受过渡电阻影响。

综上，本文提出的单端量保护方案具有一定的抗过渡电阻性能，后续可对启动判据进行进一步的改进，以增强保护原理的抗过渡电阻性能。

## 6　结语

本文提出了基于暂态功率的单端量保护原理，可得到如下结论。

1）直流边界元件的功率传输函数和电压、电流传输函数均具有较为明显的衰减效应。可充分利用功率传输函数对频率信息较强的区分能力，构造边界保护原理。

2）利用暂态功率频率段差异性特征，可构造高低频暂态能量比值，对正方向区内外故障进行甄别，具有较高的可靠性。针对暂态功率频率衰减特征无法区分正反方向故障区域的局限性，可利用暂态功率极性进行方向区分。

3）由保护启动元件、选极元件、方向元件、边界元件构成单端量暂态功率保护，能够快速有效地区分直流线路区内外故障，具有一定的抗干扰性能和抗过渡电阻性能，可靠性较高、适应性良好。

4）考虑保护原理的高低频带和整定值的选择与实际直流工程相关参数设定具有一定关联，应用于不同实际工程时，对于频率段及整定值的选取略有差异，本文已通过大量仿真数据进行频率范围和整定值的确定，在保证保护原理可靠性的前提下留有裕度，具有一定的通用性。

后续为更好地适应不同实际工程需求，可根据其参数变化进行相应调整。另外，本文中采用功率突变量元件作为保护原理的启动元件，后续可对启动判据进行进一步改进，以增强抗过渡电阻性能。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx）。

## 参考文献

[1] 周家培，赵成勇，李承昱，等. 采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统自动化，2018，42(14)：165-171. DOI：10.7500/AEPS20170526010.
ZHOU Jiapei，ZHAO Chengyong，LI Chengyu，et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component[J]. Automation of Electric Power Systems，2018，42(14)：165-171. DOI：10.7500/AEPS20170526010.

[2] 郑超，莫品豪，文继锋，等. 直流滤波器高压电容器接地故障保护判据和方案[J]. 电力系统自动化，2018，42(1)：132-137. DOI：10.7500/AEPS20170613014.
ZHENG Chao，MO Pinhao，WEN Jifeng，et al. Criterion and scheme for high-voltage capacitor earth fault protection of DC filter[J]. Automation of Electric Power Systems，2018，42(1)：132-137. DOI：10.7500/AEPS20170613014.

[3] 周家培，赵成勇，李承昱，等. 基于直流电抗器电压的多端柔性直流电网边界保护方案[J]. 电力系统自动化，2017，41(19)：89-94. DOI：10.7500/AEPS20180329001.
ZHOU Jiapei，ZHAO Chengyong，LI Chengyu，et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on voltage of DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems，2017，41(19)：89-94. DOI：10.7500/AEPS20180329001.

[4] 郑俊超，文明浩，秦瑜，等. 具备故障选极能力的高压直流输电线路差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报，2018，38(15)：4350-4358.
ZHENG Junchao，WEN Minghao，QIN Yu，et al. A novel differential protection scheme with fault line selection capability for HVDC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE，2018，38(15)：4350-4358.

[5] 陈国平，李明节，许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化，2018，42(22)：2-10. DOI：10.7500/AEPS20180502008.
CHEN Guoping，LI Mingjie，XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J].

Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 2-10. DOI: 10.7500/AEPS20180502008.

[6] 杨亚宇，邰能灵，范春菊，等. 利用峰值频率的高压直流输电线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报，2017，37(15)：4304-4314.
YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on specific-frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4304-4314.

[7] 刘琪，宋国兵. 基于电流偏差均值控制特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报，2016，36(8)：2159-2167.
LIU Qi, SONG Guobing. A novel pilot protection for HVDC transmission lines using mean current error control [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2159-2167.

[8] 高淑萍，索南加乐，宋国兵，等. 利用单端电流的高压直流输电线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报，2012，32(7)：107-113.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 107-113.

[9] 张保会，孔飞，张嵩，等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报，2013，33(4)：179-185.
ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Technical development of non-unit protection devices based on transient signals for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 179-185.

[10] 张保会，张嵩，尤敏，等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(15)：18-23.
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.

[11] 束洪春，刘可真，朱盛强，等. ±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, et al. ±800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.

[12] 高杉. 基于时频分析的高压直流输电线路保护方法[D]. 成都：西南交通大学，2017.
GAO Shan. Protection method for HVDC transmission lines based on time-frequency analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[13] 陈仕龙，束洪春，谢佳伟，等. 利用保护元件区分对侧区内外故障的特高压直流输电线路双端电压暂态保护原理[J]. 电力系统保护与控制，2013，41(15)：14-20.
CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jiawei, et al. Principle of double-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line which uses protector to identify the opposite internal and external fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 14-20.

[14] 陈仕龙，张杰，毕贵红，等. 基于小波分析的特高压直流输电线路双端电压暂态保护[J]. 电网技术，2013，37(10)：2719-2725.
CHEN Shilong, ZHANG Jie, BI Guihong, et al. Wavelet analysis based two-terminal transient voltage protection for UHVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2719-2725.

[15] 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.

[16] 许小雪，刘建锋，江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(22)：32-39.
XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 32-39.

[17] 陈仕龙，曹蕊蕊，毕贵红，等. 基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电力自动化设备，2016，36(1)：67-72.
CHEN Shilong, CAO Ruirui, BI Guihong, et al. Single-end current direction transient protection based on morphology for UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 67-72.

[18] 陈仕龙，张杰，刘红锐，等. 特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电工技术学报，2016，31(2)：171-177.
CHEN Shilong, ZHANG Jie, LIU Hongrui, et al. A single-ended current direction transient protection of UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 171-177.

[19] 邢鲁华，陈青，高湛军. 基于电压和电流突变量方向的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化，2013，37(6)：107-113.
XING Luhua, CHEN Qing, GAO Zhanjun. A new protection principle for HVDC transmission lines based on directions of fault components of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 107-113.

[20] 张艳霞，马桦岩，李婷，等. 基于 Kaiser 窗滤波的高压直流输电线路突变量功率保护[J]. 高电压技术，2016，42(1)：19-25.
ZHANG Yanxia, MA Huayan, LI Ting, et al. HVDC line protection based on the mutant power through Kaiser window [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 19-25.

[21] LIU J, XUAN Y, SHAO L, et al. Forward fault identification element based transient power for DC line protection in UHVDC system[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, August 5-10, 2018, Portland, USA.

[22] XIAO Hao, LI Yinhong, LIU Ruoping, et al. Single-end time-domain transient electrical signals based protection principle and its efficient setting calculation method for LCC-HVDC lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(5): 1233-1242.

[23] 赵航，林湘宁，喻锟，等. 基于模量 Hausdorff 距离波形比较的直流输电线路选择性快速保护方案[J]. 中国电机工程学报，2017，37(23)：6888-6900.
ZHAO Hang, LIN Xiangning, YU Kun, et al. A high-speed

protection scheme for HVDC transmission line based on Hausdorff distance comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6888-6900.

[24] 李爱民,蔡泽祥,李晓华.直流线路行波传播特性的解析[J].中国电机工程学报,2010,30(25):94-100.
LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.

[25] 褚旭,王亮,王华伟,等.高压直流输电线路极间耦合影响及故障选极方案[J].电力自动化设备,2017,37(4):140-146.
CHU Xu, WANG Liang, WANG Huawei, et al. Analysis of inter-pole coupling effect and faulty pole selection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 140-146.

侯俊杰(1993—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: 826686025@qq.com

宋国兵(1972—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: song.gb@163.com

常仲学(1991—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: changzhx@163.com

(编辑 章黎)

## Transient Power Based Single-end Protection for HVDC Transmission Line

*HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, ZHANG Chenhao, WU Lei, WANG Ting*

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low reliability of traditional single-ended protection for high-voltage direct current (HVDC) lines, by considering the influence of DC boundary, line parameter frequency variation and other factors, this paper studies the transient power fault characteristics of HVDC lines, and puts forward a scheme of single-end protection based on transient power. According to the difference in the frequency band of fault transient power in and out of the positive direction, using the ratio of transient energy between high and low frequency bands, a boundary protection element is built. Considering the limitation of using frequency attenuation characteristics of transient power to distinguish positive and negative direction faults, a directional auxiliary criterion is constructed by using transient power polarity. Combined with the actuating element and the fault pole element, the single-end protection scheme based on transient power is constructed. The simulation results show that the scheme can distinguish the internal and external faults of DC line area rapidly and effectively, with certain resistance to transition resistance and anti-interference ability, and have high reliability.

This work is supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. U1766209) and National Natural Science Foundation of China (No. 51477131).

**Key words:** high-voltage direct current (HVDC); line protection; single-end protection; transient power; boundary protection