第 49 卷 第 2 期：702-713　　高电压技术　　Vol.49, No.2: 702-713
2023 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211799

基于直流滤波器多频率单端电气量的高压直流线路保护

戴志辉[1]，赵中秋[1]，王兴国[2]，郭雅蓉[2]，秦昊宇[1]，邱宏逸[1]
（1. 华北电力大学电力工程系，保定 071003；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘　要：针对传统高压直流输电线路保护耐受过渡电阻能力有限、保护速动性不足的问题，提出一种基于线路边界元件的多频率单端电气量保护方案。首先基于附加网络分析了不同频率下电气故障分量幅值比的特征，得到在区内、外故障情况下，线路单侧边界测点处特定高频电气量幅值比的差异。据此，利用多个特定频率电气故障分量的比值构造判据，准确有效地识别线路内部故障与整流侧和逆变侧区外故障。理论分析与仿真验证表明，该保护方案原理简单、计算量小，仅通过单端电气量即可准确识别区内、外故障，在保证良好耐受过渡电阻能力基础上能够可靠且快速保护线路全长。

关键词：高压直流；单端保护；线路保护；边界元件；故障分量；高频暂态

HVDC Line Protection Based on DC Filter Multifrequency Single-end Electric Parameters

DAI Zhihui[1], ZHAO Zhongqiu[1], WANG Xingguo[2], GUO Yarong[2], QIN Haoyu[1], QIU Hongyi[1]
(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To address the issues of limited withstand transition resistance and insufficient protection speed of traditional HVDC transmission line protection, a multi-frequency single-ended protection scheme based on line boundary elements is proposed. Firstly, based on the superimposed network, the characteristics of the amplitude ratio of electrical fault components at different frequencies are analyzed. It is obtained that, in the case of internal and external faults, the amplitude ratio of specific high-frequency electrical quantities at the boundary measuring points on one side of the line is different. Based on this, the ratio of multiple specific-frequency electrical fault components is used to construct a criterion to accurately and effectively distinguish internal faults from external faults at the rectifier and inverter sides. Theoretical analysis and simulation verification show that the protection scheme has the advantages of simple principle and small amount of calculation. Internal and external faults can be accurately identified only based on single-terminal electrical quantities. On the basis of ensuring good tolerance to transition resistance, the whole length of the line can be reliably and quickly protected.

Key words: high voltage direct current; single-ended protection; line protection; boundary element; fault component; high frequency transient

0　引言

高压直流输电具有运行方式灵活、控制调节快速、线路造价低廉的特点，在远距离、大容量输电方面占有举足轻重的地位，对实现可再生能源的规模性调配具有重要意义[1-4]。直流线路输电距离长，途径区域地理气候条件复杂多变，相较于输电系统中其他元件更容易发生短路、雷击等故障[5]。根据典型直流保护事故统计[6]，直流输电系统故障中线路故障的占比达到了一半。配置速动可靠的线路保护方案能够避免线路故障导致直流输电系统安全受到严重威胁，保障直流输电系统的安全运行。

当前普遍应用于直流输电线路的主保护为行波保护与电压突变量保护[7-8]，其具有动作速度快的优点，但在高阻接地故障尤其是线路末端过渡电阻较大时存在灵敏性降低导致保护误判的可能[9-11]。微分欠压保护和电流纵差保护作为主要的后备保

基金资助项目：国家自然科学基金(51877084)；中国电力科学研究院有限公司科技项目(JBB51202102780)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51877084), Science and Technology Project of China Electric Power Research Institute (JBB51202102780).

护，前者在行波保护利用电压变化率原理的基础上提高了上升沿展宽，仍存在耐过渡电阻能力差的缺点[12]；后者虽然能对高阻接地故障进行准确识别，但速动性不足[13]。

为此，文献[14]利用区内、外故障时线路两侧前行波与反行波波形相似度的差异性构造保护识别原理，保证快速识别区内外故障的同时具有准确检测高阻接地故障的能力，但需要信道传递波形数据。文献[15]根据保护安装处电压和电流突变量在区内、外故障时极性不同的特征，利用 S 变换构造相角差的方法进行区内外故障识别，该保护保证灵敏可靠的同时抗高阻能力较强，但数据处理计算复杂。文献[16]基于线路边界两侧特定频带能量比值构造保护识别原理，计算量小，能够快速识别区内、外故障，可靠地保护了线路全长，且耐过渡电阻能力强、不受分布电容影响，但对信道传递速度要求高，测点及测量元件数量多。

基于边界元件的幅频特性是区分区内、外故障的重要基础，也是目前单端量保护研究的重要方向。单端量保护解决了线路保护抗高阻故障能力差的缺点，但需要保护装置有较高采样频率与较强数据处理能力，且雷击容易引起暂态干扰[17]；文献[18-19]所提出的高压直流输电线路单端保护原理由于对长直流线路导致的高频量衰减考虑不足，存在故障判别所需电气量衰减过多从而造成整定困难等问题；文献[20]根据直流滤波环节在区内、外故障时的阻抗特性差异，利用输电线路一端的电流量构建了直流输电线路保护判据，具有良好的速动性与选择性，采样频率的要求低，可靠性高，但未对过渡电阻尤其是高阻故障的情况进行分析讨论。

针对上述问题，本文提出一种基于单端线路边界元件多频率电气量比值的保护方案，并且在 PSCAD/EMTDC 中搭建向上特高压直流输电工程模型，仿真验证了所提方案的正确性。

1 高压直流输电系统边界元件特性

高压直流输电系统主要包含整流站、直流输电线路和逆变站三部分。双极 HVDC 输电系统如图 1 所示。

图 1 中直流滤波环节线路两侧边界由平波电抗器 L_p 及直流滤波器组成；F_1—F_5 表示故障点位置。

在向上 800 kV 特高压直流输电工程中，两端换流站正负极线均设有一组参数相同的三调谐直流滤波器以及电感值为 0.15 H 的直流平波电抗器。

结合向上工程直流滤波器参数[14]，画出直流滤波器的阻抗−频率特性如图 2 所示，由图可知 600 Hz 与 1950 Hz 为直流滤波器谐振频率，此时其阻抗接近于 0 Ω；当频率在大于 3 kHz 时，其阻抗幅值大于 100 Ω 且随频率增大近似呈线性增加；在 1950 Hz 到 10 kHz 频率区间内其阻抗相位约为 90°，此时直流滤波器可等效为电感。

2 直流线路区内外故障特征分析

2.1 整流侧区外故障分析

根据叠加原理，得到整流侧区外故障时系统的故障附加网络，如图 3 所示。

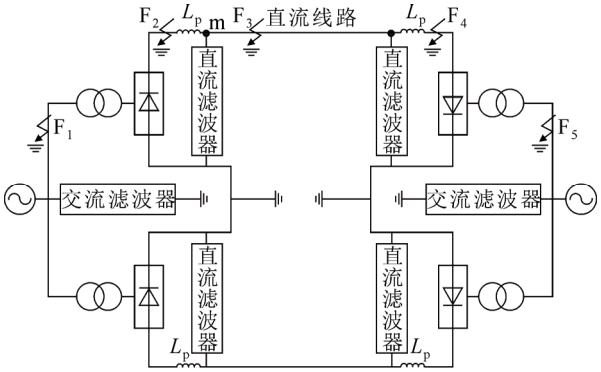
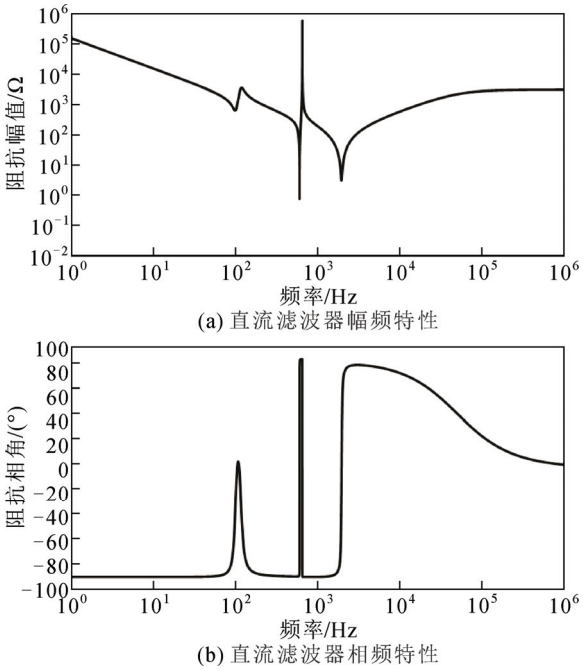


图 1 双极 HVDC 系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of bipolar HVDC system structure



(a) 直流滤波器幅频特性

(b) 直流滤波器相频特性

图 2 直流滤波器阻抗−频率特性

Fig.2 Impedance-frequency characteristic of DC filters

图中 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}$ 分别为测点 m 处电流、电压故障分量(故障后与正常运行状况下电流、电压之差)；$-\boldsymbol{U}_{\mathrm{F|0|}}$ 为故障点 F 处附加电压源；R_{F} 为过渡电阻；Z_{line} 为直流输电线路等值阻抗；Z_{sm} 和 Z_{sn} 分别为整流站、逆变站等值阻抗；Z_{lb} 为直流滤波器等值阻抗；Z_{p} 为平波电抗器等效阻抗；图中电压、电流均为相量。

由图 3 可知，整流侧区外发生故障时，测点 m 处故障分量电流、电压存在如下关系：

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}=\frac{\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}}{Z_{\mathrm{line}}+Z_{\mathrm{a}}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}=\frac{\left(Z_{\mathrm{line}}+Z_{\mathrm{a}}\right)//Z_{\mathrm{lb}}}{\left(Z_{\mathrm{line}}+Z_{\mathrm{a}}\right)//Z_{\mathrm{lb}}+Z_{\mathrm{p}}}\times\boldsymbol{U}_{\mathrm{f}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{U}_{\mathrm{F|0|}}\times\frac{\left(\left(Z_{\mathrm{line}}+Z_{\mathrm{a}}\right)//Z_{\mathrm{lb}}+Z_{\mathrm{p}}\right)//Z_{\mathrm{sm}}}{\left(\left(Z_{\mathrm{line}}+Z_{\mathrm{a}}\right)//Z_{\mathrm{lb}}+Z_{\mathrm{p}}\right)//Z_{\mathrm{sm}}+R_{\mathrm{F}}} \tag{3}$$

$$Z_{\mathrm{a}}=\left(Z_{\mathrm{P}}+Z_{\mathrm{sm}}\right)//Z_{\mathrm{lb}}\approx\left(Z_{\mathrm{P}}+Z_{\mathrm{sn}}\right)//Z_{\mathrm{lb}} \tag{4}$$

$\boldsymbol{U}_{\mathrm{f}}$ 为故障点 F 处的电压；由于两侧换流站直流滤波器参数配置相同，送端和受端系统等值阻抗差异对后续分析影响不大，故将两侧包括边界元件和换流器在内的整体等值阻抗均作 Z_{a} 处理。实际工程中，换流器等值电感受到换相重叠角及其所连交流系统强度等因素的影响，高频段内等效电感 Z_{lb} 一般在 10 mH 左右，远小于平波电抗器的电感值[21-22]，结合式(4)可知阻抗 Z_{a} 与 Z_{lb} 幅值近似相等，为简化运算，方便推导，可将 Z_{a} 替换为 Z_{lb} 进行分析。

由第 1 章可知，直流滤波器在谐振频率处等值阻抗近似为零；在通过大于 3 kHz 高频信号时相当于阻抗幅值随频率增加的电感，利用该特征差异构造保护原理。用下角标区分两种频率下的参数，下标 1 代表 f_1 频率，下标 2 代表 f_2 频率，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m1}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{m1}}$ 为测点在 f_1 频率下的电流电压故障分量；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m2}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{m2}}$ 为测点在 f_2 频率下的电流电压故障分量。

定义 k_{Im} 为 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{m1}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m2}}$ 的幅值比，表达式为

$$k_{\mathrm{Im}}=\left|\frac{\boldsymbol{I}_{\mathrm{m1}}}{\boldsymbol{I}_{\mathrm{m2}}}\right| \tag{5}$$

定义 k_{m} 为测点处两种频率下测量阻抗的幅值比，表达式如式(6)所示

$$k_{\mathrm{m}}=\left|\frac{\boldsymbol{I}_{\mathrm{m1}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m2}}}{\boldsymbol{I}_{\mathrm{m2}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m1}}}\right| \tag{6}$$

由上文分析可知，Z_{a} 幅值近似等于 Z_{lb}，其远小于线路阻抗幅值，所以 k_{m} 值主要由两种频率下线路阻抗幅值比决定。为便于推导简化运算，将线路等值阻抗 Z_{line} 幅值与频率视为线性关系[23]，定义 k_{L} 为两者比值；并定义 k_{f} 为频率 f_2 与频率 f_1 的比值。

$$\begin{cases}k_{\mathrm{f}}=f_2/f_1\\ k_{\mathrm{L}}=\left|Z_{\mathrm{line}}\right|/f\end{cases} \tag{7}$$

式中 f 表示 f_1 或 f_2。

求取 k_{m} 在整流侧区外故障时的表达式，根据式(6)对 k_{m} 的定义，将两种频率下电流电压故障分量代入式(1)进行比值运算，并结合上述分析将式(7)中的比值量引入，化简得 k_{m} 如式(8)所示

$$k_{\mathrm{m}}=\left|\frac{Z_{\mathrm{line2}}+Z_{\mathrm{a2}}}{Z_{\mathrm{line1}}+Z_{\mathrm{a1}}}\right|\approx\left|\frac{Z_{\mathrm{line2}}}{Z_{\mathrm{line1}}}\right|\approx\frac{k_{\mathrm{L}}f_2}{k_{\mathrm{L}}f_1}=k_{\mathrm{f}} \tag{8}$$

2.2 区内故障分析

图 4 为直流线路故障后系统故障附加网络，Z_{x}、Z_{y} 分别为故障点到线路两端边界所对应两段距离下输电线路等值阻抗，其他字母含义同图 3。

由图 4 可知，区内故障时，测点 m 处电流、电压故障分量之间关系可表示为：

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}=-\frac{\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}}{Z_{\mathrm{a}}} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}=\frac{Z_{\mathrm{a}}}{Z_{\mathrm{a}}+Z_{\mathrm{x}}}\times\boldsymbol{U}_{\mathrm{f}} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{U}_{\mathrm{F|0|}}\times\frac{\left(Z_{\mathrm{a}}+Z_{\mathrm{x}}\right)//\left(Z_{\mathrm{a}}+Z_{\mathrm{y}}\right)}{\left(Z_{\mathrm{a}}+Z_{\mathrm{x}}\right)//\left(Z_{\mathrm{a}}+Z_{\mathrm{y}}\right)+R_{\mathrm{F}}} \tag{11}$$

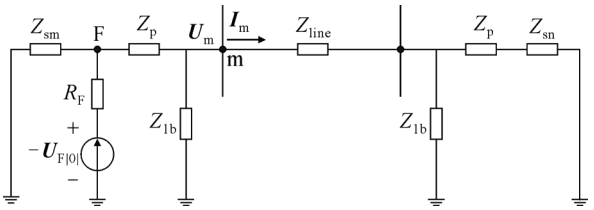


图 3 整流侧区外故障后系统故障附加网络

Fig.3 Superimposed network of the system after external faults at the rectifier side

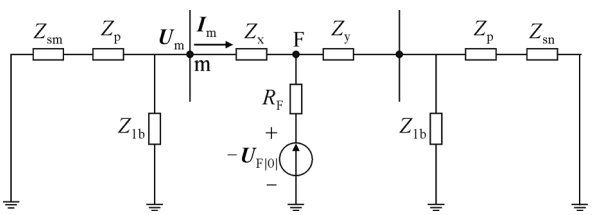


图 4 区内故障后系统故障附加网络

Fig.4 Superimposed network of the system after internal faults

式(10)—(11)中 Z_a 含义及处理同 2.1 节。同样以下角标表示 f_1、f_2 两种频率下的参数，k_{Im} 与 k_m 参数定义与上节相同。定义 k_A 为阻抗 Z_{a2} 与 Z_{a1} 幅值之比；d 为故障发生点到整流侧边界距离占线路全长的比例，约等于阻抗 Z_x 与 Z_{line} 幅值之比；k_a 为阻抗 Z_{a1} 幅值与频率 f_1 之比，若 f_1 为谐振频率，根据谐振频率处阻抗特性可知 k_a 将近似于 0。

$$\begin{cases} k_A=|Z_{a2}|/|Z_{a1}| \\ d=|Z_x|/|Z_{line}| \\ k_a=|Z_{a1}|/f_1 \end{cases} \tag{12}$$

为求取区内故障时 k_m 与 k_{Im} 的表达式，根据 k_m 的定义式(6)和 k_{Im} 的定义式(5)，将两种频率下的故障分量代入式(9)进行比值运算，化简得 k_m、k_{Im} 表达式分别为式(13)、(14)：

$$k_m=\left|\frac{\boldsymbol{I}_{m1}\boldsymbol{U}_{m2}}{\boldsymbol{I}_{m2}\boldsymbol{U}_{m1}}\right|=\left|\frac{Z_{a2}}{Z_{a1}}\right|=k_A \tag{13}$$

$$k_{Im}=\left|\frac{\boldsymbol{I}_{m1}}{\boldsymbol{I}_{m2}}\right|=\left|\frac{Z_{a2}}{Z_{a1}}\times\frac{\boldsymbol{U}_{m1}}{\boldsymbol{U}_{m2}}\right| \tag{14}$$

根据式(10)进行运算，得到式(14)两种频率下电压故障分量之比为

$$\frac{\boldsymbol{U}_{m1}}{\boldsymbol{U}_{m2}}=\frac{Z_{a1}\left(Z_{a2}+Z_{x2}\right)}{Z_{a2}\left(Z_{a1}+Z_{x1}\right)}\times\frac{\left(Z_{a1}+Z_{x1}\right)//\left(Z_{a1}+Z_{y1}\right)}{\left(Z_{a2}+Z_{x2}\right)//\left(Z_{a2}+Z_{y2}\right)}\times \frac{\left(Z_{a2}+Z_{x2}\right)//\left(Z_{a2}+Z_{y2}\right)+R_F}{\left(Z_{a1}+Z_{x1}\right)//\left(Z_{a1}+Z_{y1}\right)+R_F} \tag{15}$$

将式(15)代入式(14)即可获得 k_{Im} 具体表达式，为便于分析，将其拆解为 M 与 N 的乘积，分别进行推导。

$$M=\left|\frac{Z_{a2}+Z_{x2}}{Z_{a1}+Z_{x1}}\right| \tag{16}$$

$$N=\left|\frac{\left(Z_{a2}+Z_{x2}\right)//\left(Z_{a2}+Z_{y2}\right)+R_F}{\left(Z_{a1}+Z_{x1}\right)//\left(Z_{a1}+Z_{y1}\right)+R_F}\right|\times \left|\frac{\left(Z_{a1}+Z_{x1}\right)//\left(Z_{a1}+Z_{y1}\right)}{\left(Z_{a2}+Z_{x2}\right)//\left(Z_{a2}+Z_{y2}\right)}\right| \tag{17}$$

1）对 M 的理论分析

将式(7)、(12)中定义的比值量代入式(16)中对 M 进行化简分析得式(18)

$$M=\frac{k_Ak_a+k_Lk_fd}{k_a+k_Ld} \tag{18}$$

若 f_1 取为谐振频率，且 $k_A>k_f$，则随着故障点从线路首端向末端移动，M 值将从 k_A 向 k_f 递减。

2）对 N 的理论分析

当线路发生金属性故障，式(17)中 N 值近似为 1；而非金属性故障时，同样结合式(7)、(12)中的比值量，随过渡电阻 R_F 增大，N 值将趋于式(19)。

$$N=\frac{\left(k_a+k_L(1-d)\right)\left(k_a+k_Ld\right)\left(2k_Ak_a+k_fk_L\right)}{\left(k_Ak_a+k_fk_L(1-d)\right)\left(k_Ak_a+k_fk_Ld\right)\left(2k_a+k_L\right)} \tag{19}$$

式(19)在线路两端故障、线路中点故障时可分别化简为式(20)、(21)：

$$N=\frac{\left(k_a+k_L\right)\left(2k_Ak_a+k_fk_L\right)}{k_A\left(k_Ak_a+k_fk_L\right)\left(2k_a+k_L\right)} \tag{20}$$

$$N=\frac{\left(k_a+0.5k_L\right)}{\left(k_Ak_a+0.5k_fk_L\right)} \tag{21}$$

除过渡电阻外，k_A 和 k_f 取值同样影响 N 的计算结果，若取 $k_A>k_f>1$，则 N 在式(20)中的数值小于其在式(21)中的计算结果，且两式中 N 均小于 1。

结合对 M 与 N 分析可知，直流线路区内故障时，过渡电阻大小以及故障点位置不确定，将影响 k_{Im} 最终的数值。当取 f_1 为谐振频率，且 $k_A>k_f>1$ 时，k_{Im} 数值在线路首端即整流侧线路边界发生金属性故障时取得最大，在线路末端即逆变侧线路边界发生故障且过渡电阻较大时趋于最小，k_{Im} 极值为

$$k_{Im}=\frac{\left(2k_Ak_a+k_fk_L\right)}{k_A\left(2k_a+k_L\right)} \tag{22}$$

由前文分析可知，f_1 为谐振频率时，k_a 将近似为 0，此时上式中 k_{Im} 约等于 k_f 与 k_A 的比值。

2.3 逆变侧区外故障分析

图 5 为逆变侧区外故障时系统故障附加网络，图中所有等值阻抗字母含义同图 3。

由图 5 可知，逆变侧区外故障时测点 m 处电流、电压故障分量之间关系如下所示：

$$\boldsymbol{I}_m=-\frac{\boldsymbol{U}_m}{Z_a} \tag{23}$$

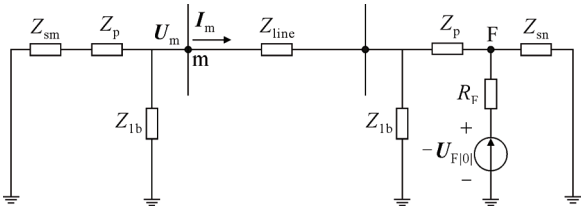


图 5 逆变侧区外故障后系统的故障附加网络

Fig.5 Superimposed network of the system after external faults at the inverter side

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}=\frac{Z_{\mathrm{a}}}{\left(Z_{\mathrm{a}}+Z_{\mathrm{line}}\right)//Z_{\mathrm{lb}}+Z_{\mathrm{p}}}\times\boldsymbol{U}_{\mathrm{f}} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{f}}=-\boldsymbol{U}_{\mathrm{F|0|}}\times\frac{\left(\left(Z_{\mathrm{a}}+Z_{\mathrm{line}}\right)//Z_{\mathrm{lb}}+Z_{\mathrm{p}}\right)//Z_{\mathrm{sn}}}{\left(\left(Z_{\mathrm{a}}+Z_{\mathrm{line}}\right)//Z_{\mathrm{lb}}+Z_{\mathrm{p}}\right)//Z_{\mathrm{sn}}+R_{\mathrm{F}}} \tag{25}$$

式(23)—(25)中 Z_{a} 的含义及处理方法同 2.1 节。同样以下角标表示 f_1、f_2 两种频率下的参数，k_{Im} 与 k_{m} 参数定义与前文相同。定义 k_{p}、k_{n} 分别为 Z_{p}、Z_{sn} 阻抗幅值与对应频率 f 之比。

$$\begin{cases}k_{\mathrm{p}}=\left|Z_{\mathrm{p}}\right|/f\\ k_{\mathrm{n}}=\left|Z_{\mathrm{sn}}\right|/f\end{cases} \tag{26}$$

同样根据 k_{m} 和 k_{Im} 定义式，将两种频率下的故障分量代入式(23)进行运算，化简求得逆变侧区外故障时 k_{m} 及 k_{Im} 的表达式分别为式(27)、(28)：

$$k_{\mathrm{m}}=\left|\frac{\boldsymbol{I}_{\mathrm{m1}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m2}}}{\boldsymbol{I}_{\mathrm{m2}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{m1}}}\right|=\left|\frac{Z_{\mathrm{a2}}}{Z_{\mathrm{a1}}}\right|=k_{\mathrm{A}} \tag{27}$$

$$k_{\mathrm{Im}}=\left|\frac{\boldsymbol{I}_{\mathrm{m1}}}{\boldsymbol{I}_{\mathrm{m2}}}\right|=\left|\frac{Z_{\mathrm{a2}}}{Z_{\mathrm{a1}}}\times\frac{\boldsymbol{U}_{\mathrm{m1}}}{\boldsymbol{U}_{\mathrm{m2}}}\right| \tag{28}$$

k_{Im} 分析步骤与区内故障时相同，而 k_{m} 中电压故障分量比可根据式(24)运算得到，如式(29)所示。

$$\begin{aligned}\frac{\boldsymbol{U}_{\mathrm{m1}}}{\boldsymbol{U}_{\mathrm{m2}}}=&\frac{Z_{\mathrm{a1}}\left(\left(Z_{\mathrm{a2}}+Z_{\mathrm{line2}}\right)//Z_{\mathrm{lb2}}+Z_{\mathrm{p2}}\right)}{Z_{\mathrm{a2}}\left(\left(Z_{\mathrm{a1}}+Z_{\mathrm{line1}}\right)//Z_{\mathrm{lb1}}+Z_{\mathrm{p1}}\right)}\times\\ &\frac{\left(\left(Z_{\mathrm{a1}}+Z_{\mathrm{line1}}\right)//Z_{\mathrm{lb1}}+Z_{\mathrm{p1}}\right)//Z_{\mathrm{sn1}}}{\left(\left(Z_{\mathrm{a2}}+Z_{\mathrm{line2}}\right)//Z_{\mathrm{lb2}}+Z_{\mathrm{p2}}\right)//Z_{\mathrm{sn2}}}\times\\ &\frac{\left(\left(Z_{\mathrm{a2}}+Z_{\mathrm{line2}}\right)//Z_{\mathrm{lb2}}+Z_{\mathrm{p2}}\right)//Z_{\mathrm{sn2}}+R_{\mathrm{F}}}{\left(\left(Z_{\mathrm{a1}}+Z_{\mathrm{line1}}\right)//Z_{\mathrm{lb1}}+Z_{\mathrm{p1}}\right)//Z_{\mathrm{sn1}}+R_{\mathrm{F}}}\end{aligned} \tag{29}$$

将上式代入(28)得到 k_{Im} 具体表达式后拆解为 J 与 K 的乘积，分别进行推导。

$$J=\left|\frac{\left(Z_{\mathrm{a2}}+Z_{\mathrm{line2}}\right)//Z_{\mathrm{lb2}}+Z_{\mathrm{p2}}}{\left(Z_{\mathrm{a1}}+Z_{\mathrm{line1}}\right)//Z_{\mathrm{lb1}}+Z_{\mathrm{p1}}}\right| \tag{30}$$

$$\begin{aligned}K=&\left|\frac{\left(\left(Z_{\mathrm{a2}}+Z_{\mathrm{line2}}\right)//Z_{\mathrm{lb2}}+Z_{\mathrm{p2}}\right)//Z_{\mathrm{sn2}}+R_{\mathrm{F}}}{\left(\left(Z_{\mathrm{a1}}+Z_{\mathrm{line1}}\right)//Z_{\mathrm{lb1}}+Z_{\mathrm{p1}}\right)//Z_{\mathrm{sn1}}+R_{\mathrm{F}}}\right|\times\\ &\left|\frac{\left(\left(Z_{\mathrm{a1}}+Z_{\mathrm{line1}}\right)//Z_{\mathrm{lb1}}+Z_{\mathrm{p1}}\right)//Z_{\mathrm{sn1}}}{\left(\left(Z_{\mathrm{a2}}+Z_{\mathrm{line2}}\right)//Z_{\mathrm{lb2}}+Z_{\mathrm{p2}}\right)//Z_{\mathrm{sn2}}}\right|\end{aligned} \tag{31}$$

1）对 J 的理论分析

将上文中定义的比值量代入式(30)，对 J 进行化简分析得

$$J=\frac{k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}\left(k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{L}}\right)}{2k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{L}}}}{k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{a}}\left(k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{L}}\right)}{2k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{L}}}} \tag{32}$$

若取 f_1 为谐振频率，由 2.2 分析可知 k_{a} 约等于 0，则 J 值略大于 k_{f} 且小于 k_{A}。

2）对 K 的理论分析

逆变侧区外发生金属性故障时 K 值近似于 1；而非金属性故障时，随着过渡电阻 R_{F} 的增加，K 值逐渐趋于式(33)。

$$K=\frac{\left(k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{a}}\left(k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{L}}\right)}{2k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{L}}}\right)\left(k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}\left(k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{L}}\right)}{2k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{L}}}\right)}{k_{\mathrm{f}}\left(k_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{a}}\left(k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{L}}\right)}{2k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{L}}}\right)\left(k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}\left(k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{L}}\right)}{2k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{L}}}\right)} \tag{33}$$

结合对 J、K 的分析可知，逆变侧区外故障时，k_{Im} 值受过渡电阻不确定的影响。发生金属性故障时 k_{Im} 值等于 J；随过渡电阻增大，k_{Im} 值趋于式(32) J 与式(33) K 的乘积，极值如式(34)所示。

$$k_{\mathrm{Im}}=\frac{k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}\left(k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{L}}\right)}{2k_{\mathrm{A}}k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{f}}k_{\mathrm{L}}}}{k_{\mathrm{f}}\left(k_{\mathrm{n}}+k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{a}}\left(k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{L}}\right)}{2k_{\mathrm{a}}+k_{\mathrm{L}}}\right)} \tag{34}$$

若取 f_1 为谐振频率，此时 k_{a} 约等于 0，式(34)中 k_{Im} 值同样略大于 k_{f} 且小于 k_{A}。

2.4 故障分析总结

通过对 3 种故障情况下 k_{m} 的分析，由式(8)可知整流侧区外故障时 k_{m} 值大小主要由频率比 k_{f} 决定；对比式(13)与(27)，可知区内故障与逆变侧区外故障时 k_{m} 表达式相同，均主要由对应频率下直流滤波器阻抗比 k_{A} 决定。通过利用区内外故障时 k_{m} 值的差异来构造判据，取 $k_{\mathrm{A}}\gg k_f$ 的一组频率，k_{m} 在区内及逆变侧区外故障时将远大于其在整流侧区外故障时的计算值，据此可以区分故障发生于整流侧或是线路侧。

k_{m} 在区内故障以及逆变侧区外故障时的分析结果相同，需进一步判别区内外故障。根据前两小节分析，当选取 f_1 为谐振频率，且 $k_{\mathrm{A}}>k_{\mathrm{f}}>1$ 时，区内故障时有 $(k_{\mathrm{f}}/k_{\mathrm{A}})<k_{\mathrm{Im}}<k_{\mathrm{A}}$，而在逆变侧区外故障时 k_{Im} 值略大于 k_f，变动范围小，可据此差异构造新的判据。

考虑两种故障情况时 k_{Im} 存在交集，即存在特定距离、特定过渡电阻情形，使两类故障 k_{Im} 计算值相等，此时将不能准确识别区内外故障。由式(18)、(19)对 M 与 N 的分析可知，区内故障时 k_{Im} 值随故障点在线路上位置和过渡电阻变化而变化，k_{Im} 可视为 d 与 R_{F} 的函数。以过渡电阻较大时为例，

将 R_F 看作定值，得到式(19)的反函数如式(35)所示。

$$\begin{cases} d=\dfrac{k_L P+2k_A k_a Q+k_f k_L Q}{2k_L P} \\ P=\left(2k_A k_a+k_f k_L-2k_{Im}k_a k_f{}^2-k_{Im}k_f{}^2 k_L\right) \\ Q=\sqrt{\dfrac{\left(2k_a+k_L\right)\left(2k_a+k_L-2k_{Im}k_A k_a-k_{Im}k_f k_L\right)P}{\left(2k_A k_a+k_f k_L\right)}} \end{cases} \tag{35}$$

式中 P、Q 为中间表达式，无实际意义。将逆变侧区外故障时 k_{Im} 代入，可得区内高阻故障时对应误判点，不同过渡电阻误判分析同理。由式(35)不难看出，线路误判区随 k_A、k_a、k_f 取值的变化而移动，选取不同频率及对应频率下直流滤波器阻抗幅值进行判据整定，可影响误判区域在线路上的位置。设置频率比不同的两组方案，将两种方案下 k_{Im} 计算结果分别记为 $k_{Im(1)}$、$k_{Im(2)}$，结合直流滤波器幅频特性选择特定频率，可使两组方案的误判区域不重叠，最后设置区内外故障逻辑进行判定，即可避免误判区问题，准确识别区内外故障。

3 保护方案

高频信号衰减迅速、暂态特性时间短，数据窗长度选择不宜过长，以避免控制系统对保护造成影响。对向上工程控制系统投入及闭锁情况下进行仿真，得到测量点电压电流波形图如附录 B 所示，可知控制系统在线路故障后不会立刻响应，而是经过约 5 ms 的故障初瞬阶段后[24]，进入到故障暂态过程才开始作用。因此本文将数据窗长度选取为 5 ms，在充分利用故障信息的同时，保证故障识别的快速性与准确性。

根据 2.1 与 2.2 节分析，选定 $k_A>k_f$ 的一组频率 f_1、f_2 区别整流侧区内外故障；为进一步判定逆变侧区内外故障，根据直流滤波器幅频特性选取方案 1 频率 f_3、f_4，选取方案 2 频率 f_5、f_6，使故障电流幅值比 $k_{Im(1)}$、$k_{Im(2)}$ 对应误判区域不重叠。

以向上直流输电工程为例，结合图 2 对直流滤波器幅频特性及区内外故障特征的分析，选取 f_1、f_3、f_5 为谐振频率，使各组频率下 $k_A>k_f>1$，f_2、f_4、f_6 应高于 3 kHz，考虑高频分量对采样频率要求高，同时含量低且容易受到雷击干扰，所以选取频率也不宜过高。最终选定 f_1、f_3、f_5 为谐振频率 1950 Hz，记为 f'；选定 f_2、f_4 等于 4 kHz，记为 f''；选定 f_6 等于 5 kHz，记为 f'''，减少采样频率数可节省采样通道，简化判定流程。

3.1 故障启动判据

直流输电系统在正常运行时，线路边界上电压高频分量近似于零；故障发生后，测点处 $f'\sim f'''$ 频带电压分量明显增大。据此构造保护启动判据如(36)所示。

$$\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(\left|u_m(n)\right|\right)>u_{set} \tag{36}$$

式中：u_m 为测点 m 处 $f'\sim f'''$ 频带电压采样值；u_{set} 为启动判据门槛值；$n=1, 2,\cdots, N$，N 为 5 ms 数据窗内采样点个数。由于高频信号的强度和幅值会受到线路边界、线路距离、过渡电阻的阻碍作用而发生减弱，所以启动判据门槛值需保证保护在逆变侧区外以及线路末端高阻接地故障时仍可靠启动。以向上直流输电工程为例，计算得到直流线路末端过渡电阻为 1000 Ω 时整流侧采样点处 1950 Hz~5 kHz 频带的电压值，并保留一定的裕度，最终设定门槛值 u_{set}=2 kV。

3.2 区内外保护判据

根据上节理论分析可知，判据表达式均由暂态电气量幅值构造而成，采样测点处频率为 f'、f'' 的暂态电压平均幅值为 U'_m、U''_m，暂态电压幅值为 u'_m、u''_m；频率 f'、f''、f''' 的暂态电流平均幅值记为 I'_m、I''_m、I'''_m，暂态电流幅值为 i'_m、i''_m、i'''_m。各暂态电气量平均幅值以及瞬时幅值之间关系式如(37)所示。

$$\begin{cases} U'_m=\sum_{n=1}^{N}u'_m(n), U''_m=\sum_{n=1}^{N}u''_m(n) \\ I'_m=\sum_{n=1}^{N}i'_m(n), I''_m=\sum_{n=1}^{N}i''_m(n), I'''_m=\sum_{n=1}^{N}i'''_m(n) \end{cases} \tag{37}$$

定义整流侧区内外的识别因子 X_1，逆变侧区内、外的识别因子 X_2、X_3 如式(38)所示。

$$X_1=\frac{I'_m U''_m}{I''_m U'_m};\ X_2=\frac{I'_m}{I''_m};\ X_3=\frac{I'_m}{I'''_m} \tag{38}$$

基于以上识别因子构造区内外故障识别逻辑判据如式(39)所示。

$$\begin{cases} X_1<k_{set1} & \text{整流侧区外故障} \\ X_1>k_{set1}\text{不同时满足}k_{set2}<X_2<k_{set3}\text{和}k_{set4}<X_3<k_{set5} & \text{线路区内故障} \\ X_1>k_{set1}\text{且同时满足}k_{set2}<X_2<k_{set3}\text{和}k_{set4}<X_3<k_{set5} & \text{逆变侧区外故障} \end{cases} \tag{39}$$

当识别因子 X_1 小于门槛值 k_{set1} 时，判别为整流

侧区外故障；当 X_1 大于门槛值 k_{set1} 时，则继续判断是否同时满足条件 $k_{\text{set2}}<X_2<k_{\text{set3}}$、$k_{\text{set4}}<X_3<k_{\text{set5}}$，若同时满足则判别为逆变侧区外故障，否则判别为线路区内故障。k_{set1}—k_{set5} 为整定值。

由图 2(a)向上工程直流滤波器的幅频特性，可知所选频率下直流滤波器阻抗幅值如表 1 所示。

结合附录A所示向上工程输电线路等值阻抗参数[25]，代入前文比例系数定义式可得所选频率下各比例系数值如表 2 所示。

根据上节的理论分析，将以上比例系数值分别代入对应公式进行计算得到所选频率比下的 k_{Im} 值区间如表 3 所示。

k_{set1} 整定值需介于 4000 Hz：1950 Hz 频率比下 k_{f} 与 k_{A} 之间，为保证判据可靠性，构造 3 者为等比数列并将 k_{set1} 取整；关于 k_{set2}—k_{set5} 的整定，根据两种频率比下的判定值 k_{Im} 区间，取可靠系数 k_{rel}=1.2，令上区间界值乘以 k_{rel} 并向上取整，下区间界值除以 k_{rel} 并向下取整，门槛值整定为

$$\begin{cases} k_{\text{set1}}=11, \quad k_{\text{set2}}=3 \\ k_{\text{set3}}=15, \quad k_{\text{set4}}=7 \\ k_{\text{set5}}=50 \end{cases} \tag{40}$$

在数据窗采集点处高频电压分量幅值均值若大于启动定值，则保护启动，根据采样数据计算识别因子；若其小于启动定值，则继续采集电压数据，直到满足要求。只需利用单端电气量构造的识别因子即可识别直流线路区内外故障，无需通道进行线路两端数据传送。

表 1 所选频率下直流滤波器阻抗幅值

Table 1 Impedance amplitude of the DC filter at the selected frequency

频率/Hz	1950	4000	5000
阻抗幅值/Ω	2.959	188.951	261.803

表 2 所选频率下各比例系数值

Table 2 Proportional coefficients at the selected frequency

比例系数	所选频率	系数值
k_{f}	4000 Hz:1950 Hz	2.051
	5000 Hz:1950 Hz	2.564
k_{A}	4000 Hz:1950 Hz	63.856
	5000 Hz:1950 Hz	88.477
k_{a}	1950 Hz	1.517×10^{-3}
k_{L}	—	1.758

表 3 所选频率比下判定值区间

Table 3 Setting value ranges at the selected frequency

频率比	4000 Hz:1950 Hz	5000 Hz:1950 Hz
k_{Im} 区间	3.675~11.857	12.175~38.757

3.3 故障选极判据

双极 HVDC 输电系统单极与极间故障情况下正负极电压故障分量幅值具有明显的差异性，相比于极间故障时正负极电压故障分量幅值近似相等，单极故障时故障极电压故障分量幅值将大于非故障极，据此差异构造选极函数 P_{z}、P_{f} 及其判据分别如式(41)、(42)所示：

$$P_{\text{z}}=\sum_{n=1}^{N}\left(\left|u_{\text{mz}}(n)\right|\right), \quad P_{\text{f}}=\sum_{n=1}^{N}\left(\left|u_{\text{mf}}(n)\right|\right) \tag{41}$$

$$\begin{cases} P_{\text{z}}>P_{\text{f}} \text{且} \dfrac{P_{\text{z}}}{P_{\text{f}}}\geq k_{\text{set6}}, & \text{正极故障} \\ P_{\text{z}}<P_{\text{f}} \text{且} \dfrac{P_{\text{f}}}{P_{\text{z}}}\geq k_{\text{set6}}, & \text{负极故障} \\ P_{\text{z}}\geq P_{\text{f}} \text{且} \dfrac{P_{\text{z}}}{P_{\text{f}}}<k_{\text{set6}}, & \text{双极故障} \\ P_{\text{z}}\leq P_{\text{f}} \text{且} \dfrac{P_{\text{f}}}{P_{\text{z}}}<k_{\text{set6}}, & \text{双极故障} \end{cases} \tag{42}$$

式(42)中：u_{mz}、u_{mf} 为 $f'\sim f'''$ 频带下整流侧正极与负极测点处的电压故障分量；k_{set6} 为故障选极判据整定值。考虑到线路末端高阻接地故障时，长线路与接地电阻对信号的衰减作用将使故障极与非故障极测点处电压信号幅值差异性减小，保留一定的裕度，最终选取 k_{set6}=1.2。

3.4 保护逻辑

综合以上的保护判据，整理可得保护方案流程如图 6 所示。整流侧边界时刻采集特定频率电流、电压数据，若采集到的电压满足式(36)，则启动保护元件，根据式(37)计算线路保护安装处数据窗时间长度的特定频率暂态电气量幅值，代入式(38)得到识别因子；将 X_1、X_2、X_3 3 个识别因子与门槛值进行比较，根据故障判别条件中的逻辑关系，实现利用单端故障分量判定区内外故障。若判定结果为区内故障，则需要结合式(41)计算选极函数 P_{z}、P_{f}，根据式(42)实现故障极的判定。

4 仿真验证

利用 PSCAD 建立如图 1 所示的±800 kV 向上高压直流工程仿真模型。直流系统额定输送功率为 6400 MW，线路全长 1891 km，两极直流线路采用依频参数模型，平波电抗器电感值为 150 mH。故障发生在 t=2 s 时刻，故障持续时间为 2 s；仿真实

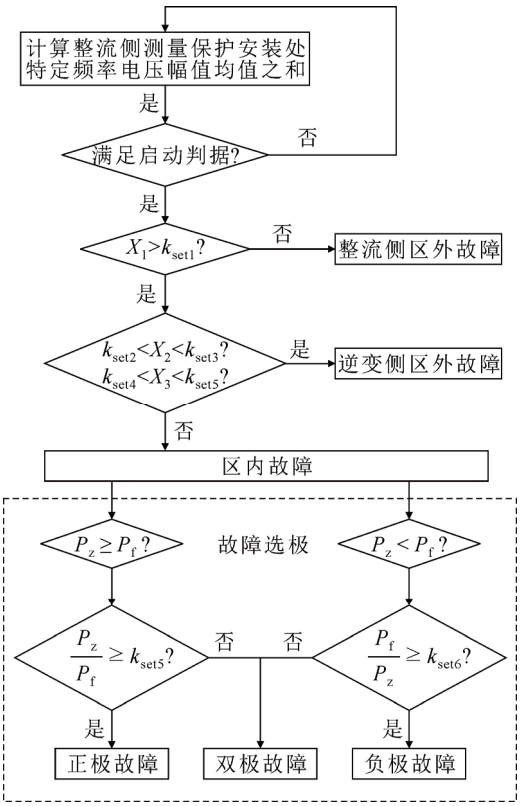


图 6　保护方案流程

Fig.6　Protection scheme flow

验中利用快速傅里叶变换提取暂态电气量幅值信息。根据第 3 章保护方案，需提取最高频率为 5 kHz 的电气量。实际高压直流输电工程常采用 6.4 kHz、10 kHz 和 20 kHz 采样频率。采样频率在满足采样定理的同时应保留一定裕度以提高保护特征量计算精度，故本保护的采样频率选取为 20 kHz。

4.1　整流侧区外故障

整流端平波电抗器阀侧发生金属性接地故障时，启动电压和保护特征量如图 7 所示。

由图 7(a)可以看出，故障发生后，测点 m 处特定频带电压 u_m 明显增大，在 2.000 s 时刻，数据窗采样点 u_m 幅值均值远大于启动判据门槛值 u_{set}，保护启动。由图 7(b)和图 7(c)可知，在故障后 1～5 ms 内，u'_m 幅值大于 u''_m，i'_m 幅值大于 i''_m，取此时间段内电流、电压幅值数据，代入式(37)计算得到整流侧识别因子 X_1=0.999，远小于门槛值 k_{set1}=11，从而保护判为整流侧区外故障。

表 4 为各种整流侧区外故障条件下保护的动作情况，进一步验证了所提方案可靠性。由表 4 可以看出，在各种整流侧区外故障情况下，识别因子 X_1 均小于门槛值，实现整流侧区外故障准确可靠识别。

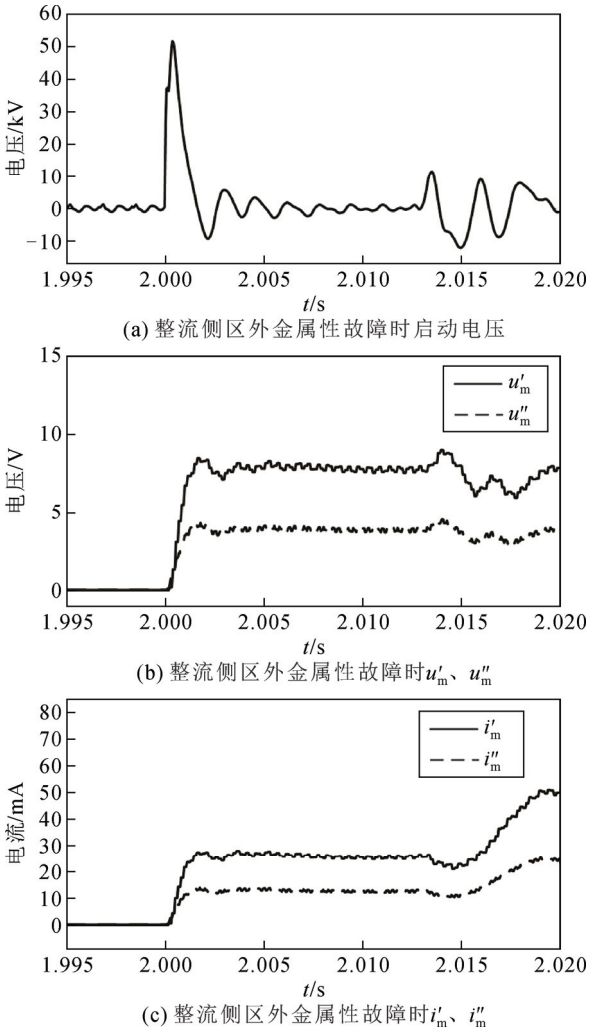


图 7　整流侧区外故障时启动电压和保护特征量

Fig.7　Pickup voltage and protection characteristics in case of external faults at the rectifier side

表 4　各种整流侧区外故障情况下保护识别结果

Table 4　Protection identification results in the case of external faults at the rectifier side

故障位置	故障类型	启动情况	X_1	识别情况
整流侧	单相接地	启动	1.176	整流区外
	两相接地	启动	0.991	整流区外
	三相接地	启动	1.282	整流区外
整流端平波电抗器阀侧	金属性	启动	0.999	整流区外

4.2　线路区内故障

正极线路中点经 50 Ω 过渡电阻接地时启动电压、整流侧边界保护特征量和选极电压如图 8 所示。

由图 8(a)可以看出，故障发生后，测点 m 处特定频带电压 u_m 明显增大：2.003 s 时刻开始，u_m 幅值远大于启动判据门槛值 u_{set}，保护启动。由图 8(b)、图 8(c)可知，区内线路中间故障发生 3 ms 后，i'_m 的

幅值远大于 i''_m 和 i'''_m 的幅值，u'_m 的幅值大于 u''_m 的幅值。保护启动后，取 5 ms 数据窗（2.003～2.008 s）的电流、电压数据，计算得到识别因子 X_1=40.806，远大于门槛值 k_{set1}=11；X_2=27.342，大于 k_{set3}=15，从而保护判为线路区内故障，符合第 2 章理论分析结果。由图 8(d)可知，正极电压 u_{mz} 幅值大于负极电压 u_{mf} 幅值，经计算得到选极函数 P_z 与 P_f 比值为

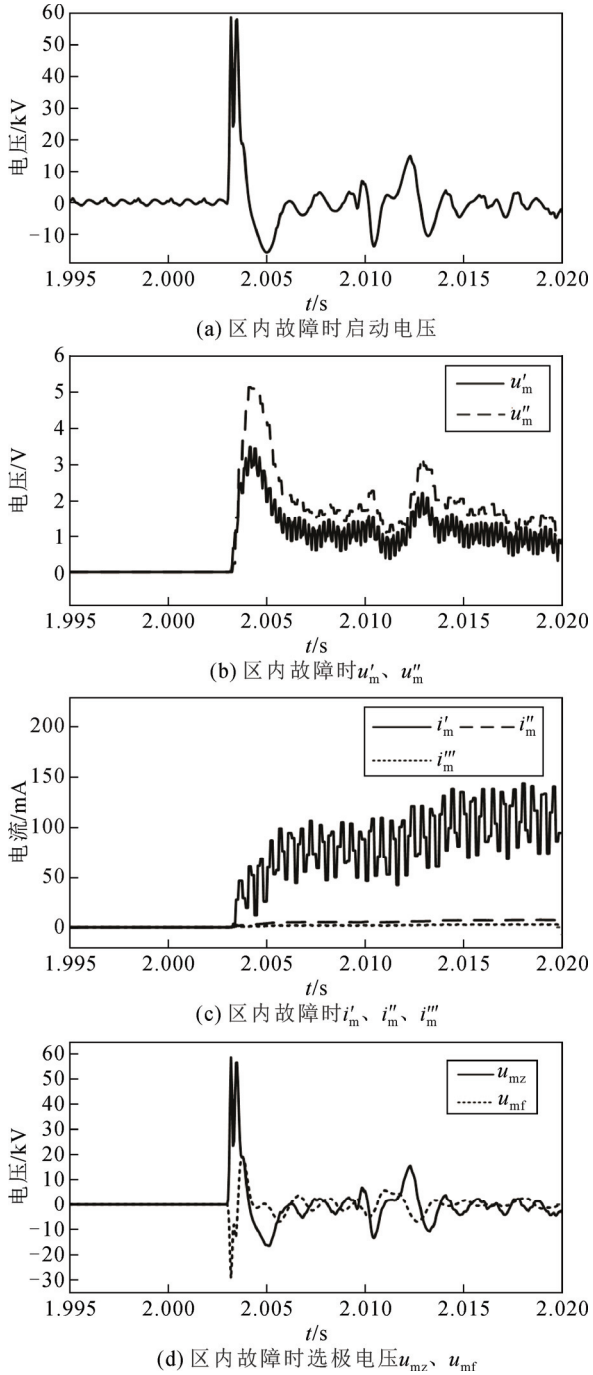


图 8 区内故障时启动电压和保护特征量

Fig.8 Pickup voltage and protection characteristic values under internal faults

2.476，大于整定值 k_{set6}=1.2，判定为正极故障，实现准确选极。

表 5 给出了各种区内故障条件下保护的动作情况来进一步验证所提方案的可靠性。由表 5 可以看出，在各种区内故障情况下，识别因子 X_1 均大于门槛值 k_{set1}，当识别因子 X_2 介于 k_{set2} 与 k_{set3} 之间时，识别因子 X_3 在 k_{set4} 与 k_{set5} 区间之外，反之亦然，各种区内故障情况都能够准确识别。

4.3 逆变侧区外故障

逆变端平波电抗器阀侧发生金属性接地故障时，启动电压和保护特征量如图 9 所示。

由图 9(a)可以看出，逆变侧区外发生故障后，由于受线路传输时延的影响，故障后的 5 ms 内，整流侧特定频带电压 u_m 仍接近于 0，从 2.006 s 开始，频带电压 u_m 幅值远大于门槛值 u_{set}=2 kV，保护启动。由图 9(b)和图 9(c)可知，逆变侧区外故障发生 6 ms 后，i'_m 的幅值远大于 i''_m 和 i'''_m 的幅值，u'_m 的幅值小于 u''_m 的幅值。保护启动元件动作后，利用保护启动后 5 ms 的电流、电压数据，得到识别因子 X_1=34.49，大于 k_{set1}，识别因子 X_2=7.291，介于门槛值 k_{set1} 与 k_{set3} 之间，识别因子 X_3=19.122，介于门槛值 k_{set4} 与 k_{set5} 之间，从而判定为逆变侧区外故障，计算结果符合理论分析。

选择多组具有代表性的区外故障来验证所提保护方案的可靠性，各种区外故障情况下保护动作特性如表 6 所示。

由表 6 可知，在各种逆变侧区外故障情况下，识别因子 X_1 同样大于门槛值 k_{set1}，识别因子 X_2、X_3 均介于所在判定区间内，准确识别为逆变侧区外

表 5 各种区内故障情况下保护动作情况

Table 5 Protection actions under various internal faults

故障类型	过渡电阻/Ω	启动情况	X_1	X_2	X_3	识别结果	选极结果
首端单极接地	0	启动	43.839	53.755	75.674	区内	正极
	500	启动	46.981	21.625	28.142	区内	正极
	1000	启动	39.347	6.176	3.261	区内	正极
中点单极接地	0	启动	37.694	32.087	42.495	区内	正极
	500	启动	46.563	24.043	18.962	区内	正极
	1000	启动	44.425	21.997	12.985	区内	正极
末端单极接地	0	启动	38.331	8. 353	3.156	区内	正极
	500	启动	47.453	1.765	0.847	区内	正极
	1000	启动	41.737	0.229	0.106	区内	正极
首端双极接地	0	启动	35.203	59.228	72.685	区内	双极
末端双极接地	0	启动	33.318	10.458	6.029	区内	双极

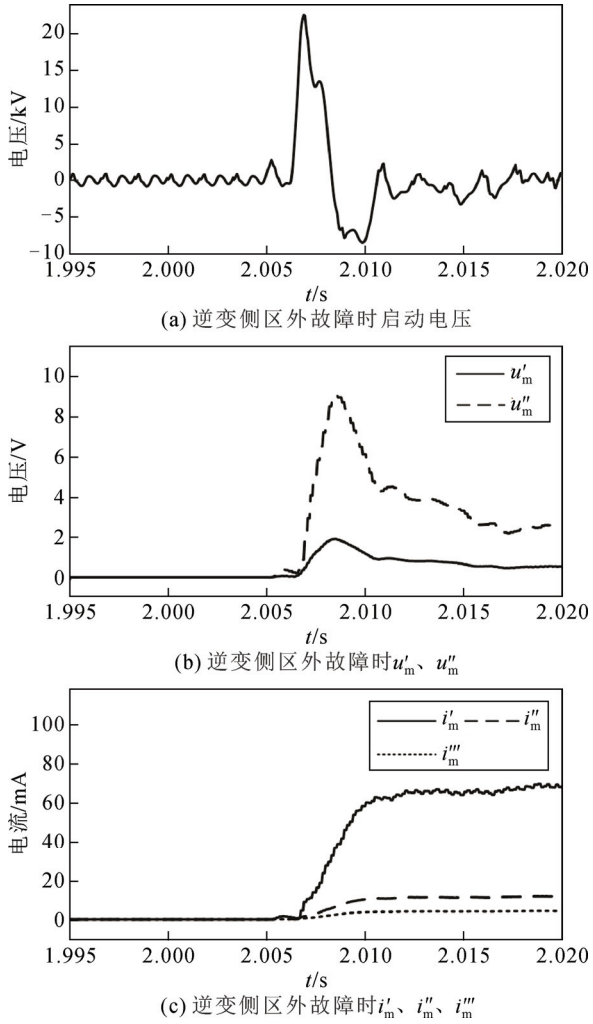


图 9　逆变侧区外故障时启动电压和保护特征量

Fig.9　Pickup voltage and protection characteristic values in case of external faults at the inverter side

表 6　各种逆变侧区外故障情况下保护识别结果

Table 6　Protection identification results under various external faults on the inverter side

故障位置	故障接地类型	启动情况	X_1	X_2	X_3	逆变侧故障识别情况
逆变侧	单相	启动	51.139	11.044	30.805	区外
	两相	启动	48.276	8.571	20.534	区外
	三相	启动	31.971	9.171	23.400	区外
平波电抗器阀侧	0 Ω	启动	36.003	9.248	32.727	区外
	500 Ω	启动	33.250	6.245	13.921	区外
	1000 Ω	启动	43.729	5.517	8.679	区外

故障。理论分析与仿真结果表明，本文基于直流滤波环节，利用整流侧边界多频率电气量比值构建判据实现保护，不会因高频量强度衰减与传输时延而发生拒动或误动，且区内外故障时仅需利用单端电气量即可准确快速识别，可靠保护线路全长。

5　结论

本文基于直流滤波器幅频特性，根据叠加原理搭建故障分量附加网络，对直流输电系统整流侧区外、线路区内及逆变侧区外进行理论分析推导得出：

1）当整流侧区外故障时，整流端线路边界测点处特定频率的测量阻抗幅值比 k_m 约等于频率比，而区内及逆变侧区外故障时，k_m 接近于相应频率下直流滤波器阻抗幅值比，两者在数值上具有明显差异；特定频率电流故障分量幅值比 k_{Im} 在线路内部以及逆变侧区外故障时取值范围不同但存在重叠域。据此选取多组频率并结合逻辑判定避免误判区域，提出了基于单端线路边界多频率电气量幅值比的直流线路保护方案。

2）理论和仿真实验表明，本保护在仅利用单端多频率电气量的情况下，即可保证良好的耐过渡电阻能力；能与直流控保系统协调配合，实现对线路全长快速且可靠的保护；具有原理简单、计算量小的优点；降低了对信号通道、测量点及测量元件数量的要求。

3）仿真表明直流长线路对故障信号的传递具有延时作用，这导致保护的快速性难以进一步提高；保护方案中特定频率的选定可进行定量分析的研究。综合考虑上述因素，有待构建更完备的线路保护方案。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 王渝红，寇　然，宋瑞华，等. 基于多判据预测的特高压直流分层接入系统换相失败抑制策略[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1304-1313.
WANG Yuhong, KOU Ran, SONG Ruihua, et al. Commutation failure suppression strategy based on multi-criteria prediction in UHVDC hierarchical connection system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1304-1313.

[2] 张凤鸽，文明浩，刘　铁，等. 特高压三端直流输电线路的动态物理模拟[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2064-2071.
ZHANG Fengge, WEN Minghao, LIU Tie, et al. Establishment of dynamic physical model of three-terminal UHV DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2064-2071.

[3] 周远翔，陈健宁，张　灵，等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Lin, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.

[4] 戴志辉，刘宁宁，张　程，等. 基于电流特征量相关系数的 UHVDC 线路高阻接地故障保护[J]. 电力系统自动化，2019，43(19)：156-163.
DAI Zhihui, LIU Ningning, ZHANG Cheng, et al. Pilot protection for high-resistance grounded fault of UHVDC transmission line based on correlation coefficient of current variable[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2019, 43(19): 156-163.
[5] 赵江涛，戴 敏，陈 伟，等. 山地地形对±1 100 kV 输电线路雷电屏蔽性能影响模型试验[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3318-3324.
ZHAO Jiangtao, DAI Min, CHEN Wei, et al. Model test of the effect of mountain terrain on lightning shielding performance of ±1 100 kV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3318-3324.
[6] 劳颖然. 提高高压直流继电保护事故处理效率实用措施研究[D]. 广州：华南理工大学，2018.
LAO Yingran. A study on practical measures to improve efficiency of HVDC protection accidents handling[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2018.
[7] 戴志辉，张 程，刘宁宁，等. 特高压直流线路保护原理及动作策略分析[J]. 电力系统自动化，2019，43(21)：1-11.
DAI Zhihui, ZHANG Cheng, LIU Ningning, et al. Analysis of UHVDC line protection principle and operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 1-11.
[8] 王俊生，柳焕章. 高压直流输电线路保护的前加速[J]. 电力系统自动化，2019，43(9)：1-8，30.
WANG Junsheng, LIU Huanzhang. Pre-acceleration of protection for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 1-8, 30.
[9] 戴志辉，张 程，刘宁宁，等. 基于反行波差值的特高压直流线路纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(21)：1-10.
DAI Zhihui, ZHANG Cheng, LIU Ningning, et al. A pilot protection scheme for UHVDC lines based on backward traveling-wave difference[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 1-10.
[10] CHENG S J, ZHANG B H, WANG J H. Analytical analysis and protection setting of taveling wave protection in hybrid HVDC system[C]//2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Xi'an, China: IEEE, 2019: 1652-1656.
[11] 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.
[12] 李晓华，戴扬宇，丁晓兵，等. 高压直流纵差保护动作特性分析及改进[J]. 电网技术，2016，40(1)：283-289.
LI Xiaohua, DAI Yangyu, DING Xiaobing, et al. HVDC longitudinal differential protection operating characteristic analysis and improvement[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 283-289.
[13] 束洪春，田鑫萃，董 俊，等. 利用电压相关性的±800 kV 直流输电线路区内外故障判断方法[J]. 中国电机工程学报，2012，32(4)：151-160.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Identification between internal and external faults of ±800kV HVDC transmission lines based on voltage correlation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 151-160.
[14] 孔 飞，张保会，王艳婷. 基于行波波形相关性分析的直流输电线路纵联保护方案[J]. 电力系统自动化，2014，38(20)：108-114.
KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on waveform correlation analysis of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 108-114.
[15] 李 钊，邹贵彬，许春华，等. 基于 S 变换的 HVDC 输电线路纵联保护方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(5)：1228-1235.
LI Zhao, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1228-1235.
[16] 戴志辉，刘宁宁，何永兴，等. 基于直流滤波环节暂态能量比的高压直流线路纵联保护[J]. 电工技术学报，2020，35(9)：1985-1998.
DAI Zhihui, LIU Ningning, HE Yongxing, et al. A Pilot Protection for HVDC Transmission Lines Based on the Ratio of DC Filter Link Transient Energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1985-1998.
[17] WANG X, LI N, LI K, et al. Lightning fault location and visualization for UHV transmission lines[C]//2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China: IEEE, 2020: 896-899.
[18] 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.
[19] SONG G B, CHU X, GAO S P, et al. A new whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, USA: IEEE, 2018: 1.
[20] 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.
[21] 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.
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.
[22] 徐亮亮. 高压直流输电系统直流滤波器综合设计[J]. 电力勘测设计，2018(增刊 2)：100-104.
XU Liangliang. Integrated design of DC filter for HVDC transmission system[J]. Electric Power Survey & Design, 2018(Supplement 2): 100-104.
[23] 蔡成良，范 毅，程 澜. 直流输电线路阻抗频率特性的测试方法[J]. 武汉大学学报(工学版)，2014，47(6)：825-828.
CAI Chengliang, FAN Yi, CHENG Lan. Test method for impedance frequency characteristics of DC transmission line[J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Science), 2014, 47(6): 825-828.
[24] 田鑫萃. 基于实测数据的特高压直流线路保护及接地极线路故障定位研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2015：37-40.
TIAN Xincui. The research on protection for UHVDC transmission line and fault location of electrode line based on actual fault data[D]. Kunming, China: Kunming University of Science and Technology, 2015: 37-40.
[25] 景 璟. 向上特高压直流输电工程建模及线路保护定值研究[D]. 北京：华北电力大学，2016：15-18.
JING Jing. Research on modeling and protection setting of line protection of Xiangjiaba-Shanghai UHVDC transmission project[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016: 15-18.



DAI Zhihui
Ph.D., Professor
Corresponding author

戴志辉(通信作者)
1980—，男，博士，教授，博导
研究方向为电力系统保护与控制
E-mail: daihuadian@163.com

收稿日期 2021-11-09 修回日期 2022-10-26 编辑 陈 蔓

附录 A

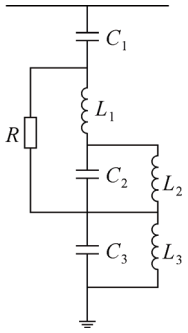


图 A1　直流滤波器结构示意图

Fig.A1　Dc filter structure diagram

表 A1　直流滤波器参数

Table A1　Dc filter parameters

元件参数	R/Ω	C_1/μF	L_1/mH	C_2/μF	L_2/mH	C_3/μF	L_3/mH
数值	3.095	1.050	9.847	3.286	582.950	5.105	11.745

表 A2　直流线路参数

Table A2　DC line parameters

参数	R/(Ω·km^{-1})	L/(mH·km^{-1})
数值	0.0398	0.1487

附录 B

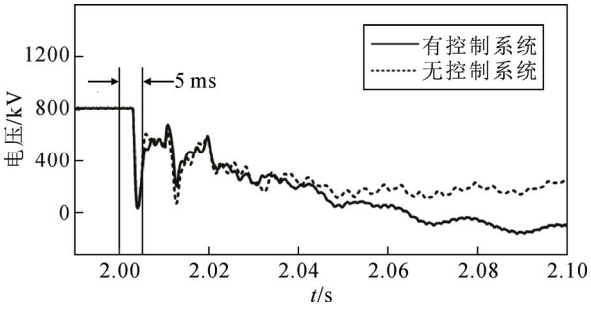


图 B1　投入与闭锁控制系统时测点电压

Fig.B1　Voltage at the measured point when the control system is enabled and blocked

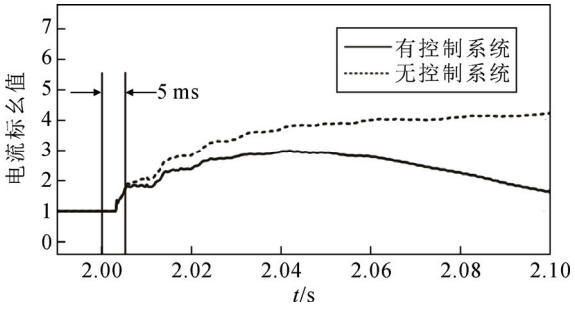


图 B2　投入与闭锁控制系统时测点电流

Fig.B2　Current at the measured point when the control system is enabled and blocked