

# 基于触发角变化特性的高压直流线路纵联保护

祝新驰,李海锋,黄烜超,王 钢

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

**摘要:**现有的行波保护和电流差动保护间的配合存在延时,使得故障过程中的直流控制暂态阶段缺乏相应的保护。基于控制保护融合的思路,利用故障后直流控制暂态阶段两换流站侧的触发角变化特征,提出一种基于触发角变化特性的高压直流线路纵联保护新原理。通过构造整流侧和逆变侧的触发角变化率均值间的余弦相似度判据和固定时间间隔的触发角变化量判据,实现区内外故障的准确识别。PSCAD/EMTDC仿真结果表明,所提方案可在直流控制暂态阶段识别故障,耐受过渡电阻能力强,动作速度较快,且数据采集不需要严格同步,可作为高压直流线路的快速后备保护。

**关键词:**直流控制特性;触发角控制;余弦相似度;纵联保护;继电保护;控制保护融合

**中图分类号:**TM 773

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202005024

## 0 引言

高压直流输电(HVDC)系统凭借远距离大功率传输、控制快速灵活、损耗低的特点,在现代电力系统中获得了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。直流线路发生故障后,故障过程可分为行波初始阶段、直流控制暂态阶段以及直流控制稳态阶段。目前关于高压直流线路保护的研究大部分集中在行波初始阶段和直流控制稳态阶段,包括行波保护和电流差动保护,但是实际工程应用的行波保护和电流差动保护间的配合需要延时,使得故障过程中的直流控制暂态阶段缺乏相应的保护<sup>[3-5]</sup>。因此基于控制保护融合的思路,分析故障过程中的直流控制暂态过程,研究新的保护原理,对于提升现有的直流线路保护性能和提高直流输电系统的安全可靠性具有重要意义。

故障行波初始阶段具有故障电压、电流突变更明显及不受直流系统控制影响的特点,因此实际工程中均将基于故障初始行波的单端保护原理作为直流线路的主保护,包括行波保护和微分欠压保护。但行波保护存在采样频率较高、耐受过渡电阻能力差等问题<sup>[6]</sup>,对此国内外学者提出了很多改进方法<sup>[7-8]</sup>。与单端量保护相比,基于暂态量的纵联保护受过渡电阻的影响较小,因此受到了广泛的关注。文献[9]和文献[10]分别利用反行波幅值积分和测量波阻抗识别区内外故障,所提方案耐受过渡电阻的能力较高,可以快速识别区内外故障,但是需要线路两端数据采集严格同步;文献[11]考虑故障初始行波的频变特性,利用故障线路两端电流的固有频率和故障位置的关系识别区内外故障,该保护原理对不同的

故障位置和故障类型以及干扰均具有较强的适应性,但是需要较高的采样频率提取固有频率的信号,计算量较大。此外,上述保护原理均基于故障初始行波/暂态量特征,只在故障初期的暂态行波阶段有效。基于直流控制稳态阶段的保护原理主要有电流差动保护,该纵联保护具有灵敏性高的优点,但测量数据需要严格同步,并且易受到长线路分布电容的影响,同时其需要设置较长的延时以躲避区外交流侧故障的影响,导致故障长时间存在而难以切除<sup>[12-13]</sup>。

实际上,直流线路发生故障后的直流控制暂态阶段也包含着重要的故障信息。文献[14]利用触发角和直流侧二次谐波量的变化特征识别区内外故障,提高了后备保护的速动性,但逆变侧阀侧直流母线故障会干扰区内故障的识别,使保护方案容易误动。文献[15]利用直流控制过程的中间控制变量电流偏差均值构成保护判据,但该判据忽略了比例积分(PI)控制和定熄弧角控制模块对故障电压、电流的响应特性,因此不能全面反映故障控制响应过程,且其没有考虑降功率等运行方式改变的影响。

为此,基于控制保护融合的思路,本文结合直流控制暂态过程,对区内外故障造成的控制量变化特性进行研究。首先研究了整流站和逆变站的触发角控制响应特性;在此基础上,分析了区内外故障下两端换流站触发角的变化率均值和变化量的控制变化特征,进而提出了一种基于触发角变化特性的高压直流线路纵联保护新原理;最后用PSCAD/EMTDC仿真软件搭建±800 kV双极高压直流输电系统模型,对所提保护原理的性能进行了仿真测试。

## 1 触发角的控制响应特性

根据CIGRE标准直流模型,单极直流线路的控制特性如图1所示。图中, $\Delta I_r$ 为整流侧电流偏差

收稿日期:2019-10-28;修回日期:2020-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577072)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577072)

量,  $\Delta I_1$  为逆变侧电流偏差量,  $\Delta \delta_\gamma$  为熄弧角偏差量, 三者均为控制变量; 整流侧采用定电流控制和定  $\alpha_{\min}$  角控制; 逆变侧采用定电流控制、电流偏差控制和定  $\gamma_{\min}$  角控制。

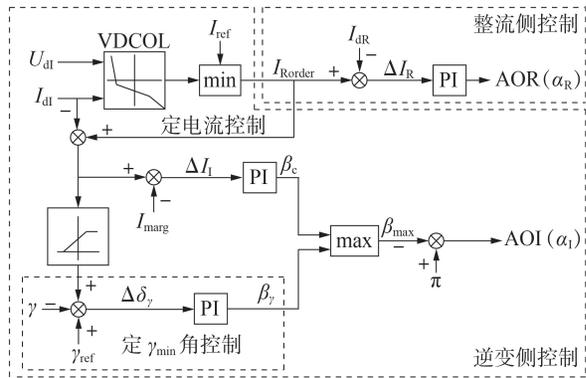


图1 CIGRE标准直流模型控制系统简化图

Fig.1 Simplified diagram of control system of CIGRE HVDC benchmark system

在图1中, 当整流侧的控制工作点采用定电流控制时, 由整流侧触发角  $\alpha_R$  的控制传递函数可以得到其微分方程形式为:

$$\begin{cases} -\frac{d\alpha_R(t)}{dt} = k_{PR} \frac{d\Delta I_R(t)}{dt} + k_{IR} \Delta I_R(t) \\ \Delta I_R = I_{Rorder} - I_{dR} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $k_{PR}$  和  $k_{IR}$  分别为整流侧的定电流 PI 控制的比例系数和积分系数, 均大于 0;  $I_{Rorder}$  为整流侧低压限流控制的整定电流;  $I_{dR}$  为整流侧的测量电流。由式(1)可知, 整流侧触发角  $\alpha_R$  反映了直流系统对整流侧电流的控制情况, 即对整流侧电流偏差量  $\Delta I_R$  的调节。

当整流侧工作在定  $\alpha_{\min}$  角控制时, 将失去对电流的控制能力, 这时直流系统控制的调节取决于逆变侧的控制; 而逆变侧控制采用定  $\gamma_{\min}$  角控制、电流偏差控制和定电流控制, 相对整流侧控制较为复杂, 且逆变侧控制的配合取决于电压跌落程度的大小。

当电压跌落程度  $\Delta U$  较大(如发生低阻接地故障)时, 逆变侧为定电流控制。由逆变侧触发角  $\alpha_1$  的控制传递函数可得其微分方程形式为:

$$\begin{cases} -\frac{d\alpha_1(t)}{dt} = k_{PI} \frac{d\Delta I_1(t)}{dt} + k_{II} \Delta I_1(t) \\ \Delta I_1 = I_{Rorder} - I_{d1} - I_{marg} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $k_{PI}$  和  $k_{II}$  分别为逆变侧的定电流 PI 控制的比例系数和积分系数, 且均大于 0;  $I_{d1}$  为逆变侧的电流;  $I_{marg}$  为电流裕度。

当电压跌落程度  $\Delta U$  较小(如发生高阻接地故障)时, 逆变侧为定  $\gamma_{\min}$  角控制, 此时有:

$$\begin{cases} -\frac{d\alpha_1(t)}{dt} = k_{PY} \frac{d\Delta \delta_\gamma(t)}{dt} + k_{IY} \Delta \delta_\gamma(t) \\ \Delta \delta_\gamma = \gamma_{ref} - \gamma + k(I_{Rorder} - I_{d1}) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $k_{PY}$  和  $k_{IY}$  分别为逆变侧的定  $\gamma_{\min}$  角控制中 PI 控制的比例系数和积分系数, 且均大于 0;  $\gamma$  为熄弧角;  $\gamma_{ref}$  为逆变侧正常运行时熄弧角整定值;  $k$  为电流偏差控制系数。

结合式(2)和式(3)可知, 逆变侧触发角  $\alpha_1$  综合反映了直流系统对逆变侧的控制情况, 即  $\alpha_1$  既能反映对逆变侧电流偏差量的调节, 又能反映对熄弧角的调节。因此, 直流系统发生故障时, 整流侧触发角  $\alpha_R$  和逆变侧触发角  $\alpha_1$  反映了直流控制系统对故障的响应情况, 下面进一步量化分析其变化特性。

## 2 触发角变化率均值的故障控制特性

### 2.1 发生区内外故障时的控制特性

基于第1节的理论分析, 将式(1)离散化可得:

$$\frac{\alpha_R(i+1) - \alpha_R(i)}{\Delta t} = k_{PR} \frac{\Delta I_R(i+1) - \Delta I_R(i)}{\Delta t} + k_{IR} \Delta I_R(i) \quad (4)$$

其中,  $\Delta I_R(i)$  为整流侧的第  $i$  个电流偏差量采样点;  $\Delta t$  为采样间隔。

考虑在故障线路的直流控制暂态过程中, 触发角受到控制系统的影响而出现不同程度的波动, 但其整体变化趋势较为明显, 故本文结合式(4)构造整流侧的触发角变化率均值函数为:

$$\alpha_{MR}(n) = \frac{\alpha_R(n+1) - \alpha_R(1)}{n\Delta t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_R(i+1) - \alpha_R(i)}{\Delta t} = -\frac{f}{n} \left( k_{PR} \Delta I_R(n+1) + \frac{1}{f} k_{IR} \sum_{i=1}^n \Delta I_R(i) \right) \quad (5)$$

其中,  $\alpha_{MR}(n)$  为整流侧的触发角变化率均值函数;  $f$  为采样频率,  $f=1/\Delta t$ ;  $n$  表示故障启动后第  $n$  个采样点;  $\alpha_R(1)$  为初始稳态触发角;  $\Delta I_R(1)$  为正常运行时的电流偏差量,  $\Delta I_R(1)=0$ 。

同理可得逆变侧的触发角变化率均值函数为:

$$\alpha_{MI}(n) = \frac{\alpha_1(n+1) - \alpha_1(1)}{n\Delta t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_1(i+1) - \alpha_1(i)}{\Delta t} = \begin{cases} -\frac{f}{n} \left( k_{PY} \Delta \delta_\gamma(n+1) + \frac{1}{f} k_{IY} \sum_{i=1}^n \Delta \delta_\gamma(i) \right) & \Delta U \text{ 较小} \\ -\frac{f}{n} \left( k_{PI} \Delta I_1(n+1) + \frac{1}{f} k_{II} \sum_{i=1}^n \Delta I_1(i) \right) & \Delta U \text{ 较大} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\alpha_{MI}(n)$  为逆变侧的触发角变化率均值函数;  $\alpha_1(1)$  为逆变侧初始触发角;  $\Delta I_1(1)$  和  $\Delta \delta_\gamma(1)$  分别为正常运行时的电流偏差量和熄弧角变化量, 其值均为 0。

直流输电线路发生不同故障时, 两换流站侧的触发角变化率均值的变化极性不同, 故对不同区内外故障位置下的触发角变化特性进行分析。

(1) 直流系统在额定工况下正常运行时, 整流侧

电流维持不变,则整流侧控制变量  $\Delta I_R=0$ ; 逆变侧熄弧角不变,则逆变侧控制变量  $\Delta \delta_\gamma=0$ 。此时有:

$$\alpha_{MR}=0, \alpha_{MI}=0 \quad (7)$$

(2) 发生整流侧区外故障时,整流侧电流减小,其控制工作点采用定  $\alpha_{\min}$  角控制,则整流侧控制变量  $\Delta I_R>0$ ; 逆变侧电流减小,其控制工作点采用低压限流控制、定最小电流控制,则逆变侧控制变量  $\Delta I_I>0$ 。此时有:

$$\alpha_{MR}<0, \alpha_{MI}<0 \quad (8)$$

(3) 发生逆变侧区外故障时,整流侧电流增加,则有  $\Delta I_R<0$ ; 逆变侧电流增加,控制工作点采用定  $\gamma_{\min}$  角控制(或定电流控制),则有  $\Delta \delta_\gamma<0$ (或  $\Delta I_I<0$ )。此时有:

$$\alpha_{MR}>0, \alpha_{MI}>0 \quad (9)$$

(4) 发生区内故障时,整流侧的电流增大,其控制工作点经历低压限流控制、定最小电流控制,则整流侧控制变量  $\Delta I_R<0$ ; 逆变侧的电流减小,其控制工作点经历定  $\gamma_{\min}$  角控制(或者低压限流控制、定最小电流控制),则逆变侧控制变量  $\Delta \delta_\gamma>0$ (或者  $\Delta I_I>0$ )。此时有:

$$\alpha_{MR}>0, \alpha_{MI}<0 \quad (10)$$

## 2.2 电磁耦合的影响

当故障发生时,由于极间线路间存在电磁耦合,使健全极上感应出暂态电压和电流,从而引起直流控制系统响应,导致其整流侧和逆变侧的触发角发生变化<sup>[16]</sup>。由于电磁耦合的影响,健全极上感应的电压、电流变化相对较小,则健全极逆变侧采用定  $\gamma_{\min}$  角控制,而非定电流控制。图2为正极区内中点发生过渡电阻为  $100 \Omega$  的故障时,故障极和健全极的两换流站侧控制变量的变化曲线。图中,  $\Delta I_R$  和  $\Delta I_I$  均为标幺值。

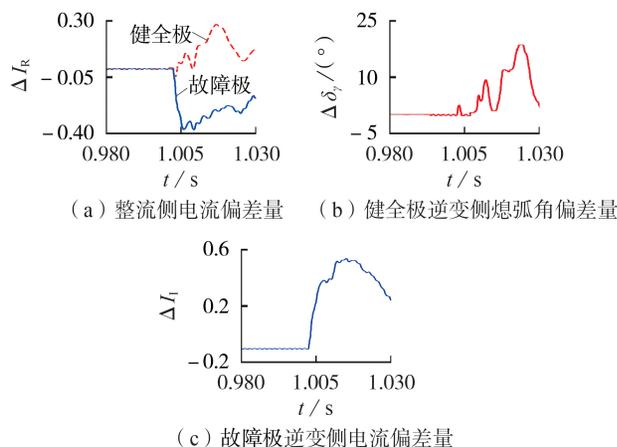


图2 故障极与健全极控制变量的比较

Fig.2 Comparison of control variables between fault pole and healthy pole

当直流线路发生区内故障时,由图2(a)、(c)可知,故障极的整流侧控制变量  $\Delta I_R<0$ , 逆变侧的控制

变量  $\Delta I_I>0$ 。由于电磁耦合的影响,健全极耦合的电流和故障极电流的极性相同,并且由于正常运行时健全极的电流极性与故障极相反,则故障极突变量的极性与健全极耦合出的突变量电流的极性相反,使得健全极整流侧的控制变量  $\Delta I_R>0$ 。如图2(b)所示,由于电磁耦合的影响,健全极逆变侧电压降低,使得逆变侧在定  $\gamma_{\min}$  角控制下,经过电流偏差控制产生正的熄弧角修正差,因此逆变侧的控制变量  $\Delta \delta_\gamma>0$ 。因此,在直流控制系统的影响下,结合式(5)和式(6)可知,健全极整流侧和逆变侧的触发角变化率均值变化特性为:

$$\alpha_{MR}<0, \alpha_{MI}<0 \quad (11)$$

根据式(11)可知,健全极的整流侧与逆变侧的触发角变化率均值的变化极性相同,这与2.1节中分析所得的区外故障特征类似。因此,利用线路两侧的触发角变化率均值故障特征可以有效识别直流线路的区内外故障,具体如表1所示。

表1 故障触发角变化率均值特征

Table 1 Characteristics of values of  $\alpha_{MR}$  and  $\alpha_{MI}$

| 运行工况 | 故障极           |               |      | 健全极           |               |      |
|------|---------------|---------------|------|---------------|---------------|------|
|      | $\alpha_{MR}$ | $\alpha_{MI}$ | 变化方向 | $\alpha_{MR}$ | $\alpha_{MI}$ | 变化方向 |
| 区内故障 | $>0$          | $<0$          | 相反   | $<0$          | $<0$          | 相同   |
| 正常状态 | 0             | 0             | —    | 0             | 0             | —    |
| 区外故障 | $>0$ 或 $<0$   | $>0$ 或 $<0$   | 相同   | $>0$ 或 $<0$   | $>0$ 或 $<0$   | 相同   |

## 3 触发角变化量的故障控制特性

除了故障会引起触发角调节外,直流输电系统的运行方式变化,如电压的调整和降功率运行等,均会造成直流控制系统触发角的改变,其中降功率运行方式改变时,对触发角的影响较为明显。图3为降功率运行和区内故障情况下的触发角变化对比。图中,  $R_f$  为过渡电阻。

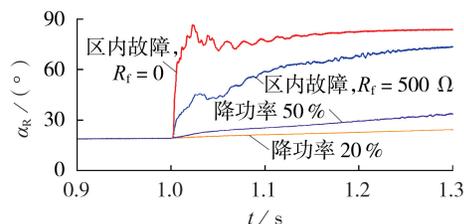


图3 降功率运行和区内故障情况下的触发角对比

Fig.3 Comparison of firing angle between reduced power operation condition and internal fault condition

由于触发角变化量和时间窗有关,考虑到保护的响应时间,设置不同运行工况条件,获取故障启动到故障稳态期间的触发角变化量  $\Delta \alpha_R$ , 如表2所示。表中,  $U_{dc}$ 、 $I_{dc}$  分别为正常运行时的稳态直流电压和直流电流; 获取触发角变化量的间隔时间窗为  $200 \text{ ms}$ 。

表2 降功率运行和区内故障情况下的触发角  
变化量比较

Table 2 Comparison of firing angle change between  
reduced power operation condition and  
internal fault condition

| 运行工况                     | 稳态电压     | 稳态电流         | $\alpha_R(1) / (^\circ)$ | $\Delta\alpha_R / (^\circ)$ |
|--------------------------|----------|--------------|--------------------------|-----------------------------|
| 降功率20%                   | $U_{dc}$ | $0.8 I_{dc}$ | 18                       | 4                           |
| 降功率50%                   | $U_{dc}$ | $0.5 I_{dc}$ | 18                       | 11                          |
| 区内金属性故障                  | —        | —            | 18                       | 64                          |
| 区内故障( $R_f=500 \Omega$ ) | —        | —            | 18                       | 51                          |

结合图3和表2可知:发生区内故障时,基于故障线路直流控制暂态过程,即使在 $R_f=500 \Omega$ 的情况下,整流侧触发角的变化量仍远大于降功率运行方式改变时触发角的变化量,故可将整流侧触发角变化量作为反映故障和运行方式干扰的故障特征。

## 4 基于触发角变化特性的高压直流线路纵联保护

### 4.1 启动判据

直流线路发生故障后,因为电压、电流的突变,触发角在直流控制系统的影响下也会发生明显的突变,故构造启动判据为:

$$\left| \frac{d\alpha_R}{dt} \right| > \varepsilon_1 \text{ 且 } \left| \frac{d\alpha_I}{dt} \right| > \varepsilon_2, \text{ 持续成立 } 0.3 \text{ ms} \quad (12)$$

其中, $\varepsilon_1$ 的取值应大于正常运行时整流侧的最大触发角变化率; $\varepsilon_2$ 的取值应大于正常运行时逆变侧的最大触发角变化率。考虑到 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 与采样频率和实际控制元件响应的的时间有关,为了确保启动判据的灵敏性,本文取 $\varepsilon_1=0.5 (^\circ) / \text{ms}$ 、 $\varepsilon_2=2 (^\circ) / \text{ms}$ 。同时为了提高安全性,式(12)所示的判据必须持续成立一段时间后才能启动保护,为了兼顾快速性,本文中选取该时间为0.3 ms。

### 4.2 保护动作判据

余弦相似度作为一种描述相量相似程度的几何方法,对相量的轨迹变化趋势具有较强的识别能力,因此在文本挖掘和信息检索领域得到了广泛应用<sup>[17]</sup>。基于第2、3节的理论分析,本文利用两换流站侧的触发角变化率均值方向的余弦相似度和固定时间间隔的触发角变化量对故障进行识别。

(1)整流侧和逆变侧的触发角变化率均值间的余弦相似度 $S$ 定义如式(13)所示。

$$S(\alpha_{MR_j}, \alpha_{MI_j}) = \frac{\langle \alpha_{MR_j}, \alpha_{MI_j} \rangle}{\|\alpha_{MR_j}\| \|\alpha_{MI_j}\|} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_{MR_j}(i) \alpha_{MI_j}(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\alpha_{MR_j}(i))^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\alpha_{MI_j}(i))^2}} \quad (13)$$

其中, $j=1$ 表示正极, $j=2$ 表示负极; $\alpha_{MR_j}$ 和 $\alpha_{MI_j}$ 分别

为整流侧和逆变侧触发角变化率均值; $N$ 为时间窗 $T_1$ 中采集的点数; $S \in [-1, 1]$ ,当 $S=1$ 时相似度最高,当 $S=-1$ 时相似度最低。

图4为 $\pm 800 \text{ kV}$ 双极高压直流输电系统模型。图中, $I_{R1}$ 、 $I_{I1}$ 和 $I_{R2}$ 、 $I_{I2}$ 分别为线路两端保护安装处测得的正极和负极直流电流; $f_1$ 和 $f_2$ 分别为正、负极线路故障点; $f_3$ 和 $f_4$ 分别为整流侧、逆变侧直流母线故障点; $f_5$ 为双极线路故障点。考虑直流线路发生故障后,阀组控制级触发角指令变化响应需要1~4 ms,而直流暂态过程一般持续100 ms左右(参考图4所示模型),为了充分利用直流控制暂态过程信息,考虑触发角变化响应时长和保护的速动性,本文的时间窗 $T_1$ 取为10~20 ms。

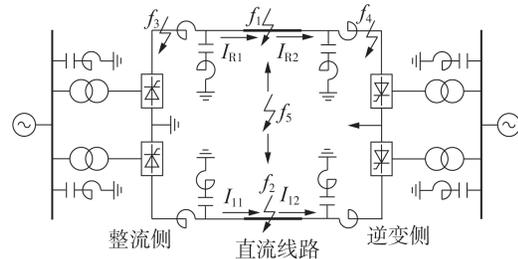


图4  $\pm 800 \text{ kV}$  双极高压直流输电系统模型

Fig.4 Model of  $\pm 800 \text{ kV}$  bipolar HVDC system

(2)触发角变化量定义如式(14)所示。

$$\Delta\alpha_{R_j} = \alpha_{R_j}(t_0 + T_2) - \alpha_{R_j}(t_0) \quad (14)$$

其中, $t_0$ 为采样点时刻; $T_2$ 为计算触发角变化量的间隔时间。

综上所述,双极高压直流线路保护动作判据为:

$$\begin{cases} S(\alpha_{MR_j}, \alpha_{MI_j}) < \varepsilon_3 \\ \Delta\alpha_{R_j} > \Delta\alpha_{R_{set}} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\varepsilon_3$ 为余弦相似度判据动作门槛, $\varepsilon_3 \in [-1, 0)$ ,由于在故障后的直流控制暂态阶段 $S < 0$ ,且 $S$ 不断接近-1,考虑保护动作的速动性、电磁耦合以及运行方式的影响,本文设置 $\varepsilon_3 = -0.5$ ;  $\Delta\alpha_{R_{set}}$ 为整流侧触发角变化量判据的整定值,其整定原则如式(16)所示。

$$\Delta\alpha_{R_{set}} = k_{rel} \Delta\alpha_{R_{nf,max}} \quad (16)$$

其中, $k_{rel}$ 为可靠系数; $\Delta\alpha_{R_{nf,max}}$ 为降功率运行时的最大触发角变化量,在实际中可以取其稳态值进行估算,由于实际的触发角变化量和时间窗的长度有关,引入一个时间窗系数 $k_T$ ,具体见式(17)。

$$\Delta\alpha_{R_{nf,max}} = k_T \left[ \arccos \frac{0.5U + (3/\pi)X_r I}{1.35E} - \alpha_R(1) \right] \quad (17)$$

其中, $U$ 、 $I$ 分别为降功率运行时的电压、电流; $X_r$ 为整流站每相换相电抗; $E$ 为换流变压器阀侧空载线电压有效值;考虑到保护的動作时间窗要远小于降功率时稳态触发角的变化时间,在实际中取 $k_T=0.5$ 即有足够的裕度。

本文所提的基于触发角变化特性的高压直流线路纵联保护方案流程图如附录中的图 A1 所示。

### 5 仿真验证与分析

利用 PSCAD / EMTDC 电磁暂态仿真软件,搭建如图 4 所示的 ±800 kV 双极高压直流输电系统模型。该系统直流线路全长为 1438 km,采用 J-Marti 线路参数频变模型,送电容量为 5000 MW,额定电压和电流分别为 800 kV 和 3.125 kA。仿真中,采样频率为 10 kHz;  $T_1=10$  ms;  $T_2=10$  ms;  $\alpha_R(1)=18^\circ$ ; 一般情况下,降功率超过 50% 时,直流系统可能出现失稳,故考虑最严重的降功率 50% 的情形,取可靠系数  $k_{rel}=1.1$ ,基于式(16)和式(17)设置  $\Delta\alpha_{Rset}=14^\circ$ 。

#### 5.1 典型故障仿真分析

##### 5.1.1 整流侧区外故障

图 5 为整流侧区外  $f_3$  处发生金属性接地故障时的仿真结果,故障时刻为 1 s。由图可知,故障发生后,两换流站侧的触发角变化率均值间的余弦相似度  $S > \varepsilon_3$ , 不满足保护动作判别式(15), 正极保护不动作; 同理可知, 负极保护不动作。

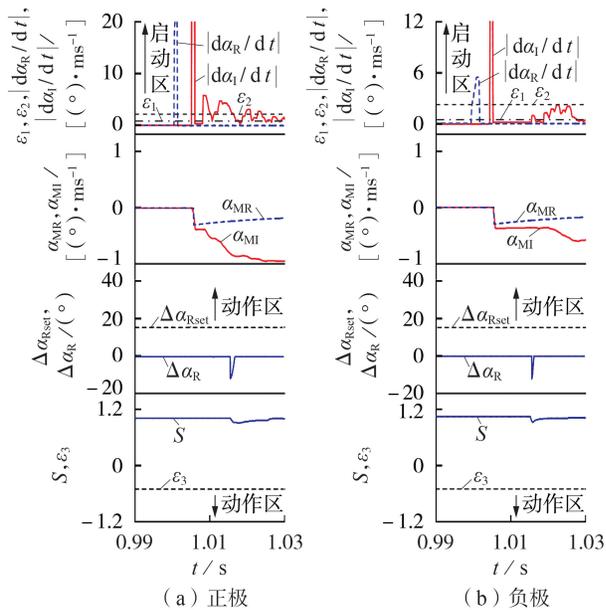


图 5 发生整流侧区外故障时的仿真结果

Fig.5 Simulative result during external fault at rectifier side

##### 5.1.2 逆变侧区外故障

图 6 为逆变侧区外  $f_4$  处发生金属性接地故障时的仿真结果,故障时刻为 1 s。由图可知,此时正极线路两换流站侧的触发角变化率均值的余弦相似度  $S > \varepsilon_3$ , 不满足保护动作判别式(15), 正极保护不动作; 同理可知, 负极保护不动作。

##### 5.1.3 线路区内故障

图 7 为正极线路中点发生过渡电阻为 100 Ω 的

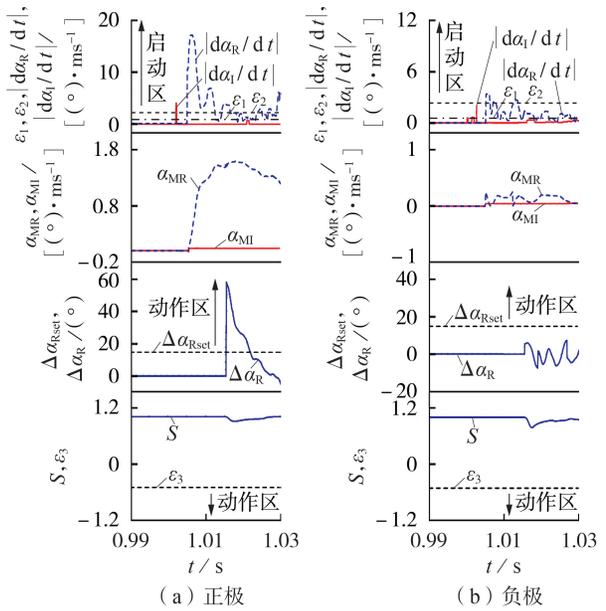


图 6 逆变侧区外故障时的仿真结果

Fig.6 Simulative results during external fault at inverter side

接地故障时的仿真结果,故障时刻为 1s。由图可知,正极两换流站侧的触发角变化率均值的余弦相似度  $S < \varepsilon_3$ , 并且在固定间隔时间  $T_2$  下  $\Delta\alpha_R > \Delta\alpha_{Rset}$ , 满足式(15), 正极保护动作; 同理可知, 负极保护不动作。

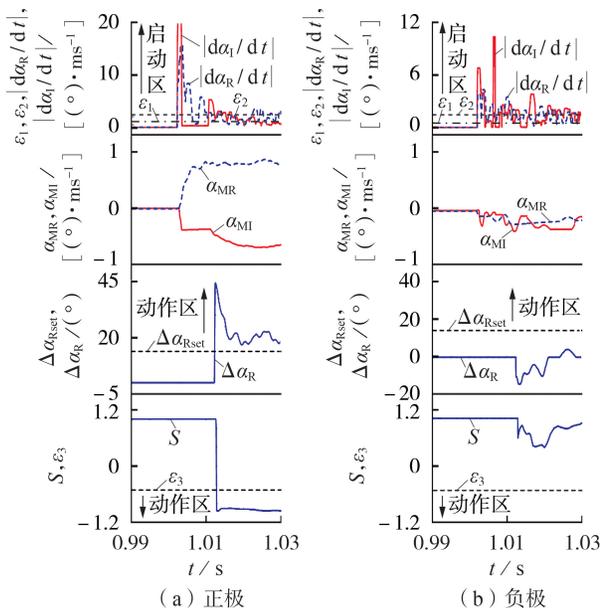


图 7 正极直流线路中点发生过渡电阻为 100 Ω 的接地故障时的仿真结果

Fig.7 Simulative results of grounding fault with 100 Ω transition resistance at midpoint of positive polar HVDC line

#### 5.2 保护判据的性能测试

为了测试所提保护判据的性能,考虑不同故障位置、故障距离和过渡电阻的影响,根据本文所提保护原理进行了大量的仿真。在图 4 所示双极 ±800 kV

直流输电系统简化模型中,设置以下故障:在线路中点、线路始端、线路末端分别设置过渡电阻为1、300、500  $\Omega$ 的单极接地故障;在线路近端(距整流站400 km)和远端处(距整流站1 038 km)分别设置过渡电阻为1、300、500  $\Omega$ 的极间故障;在正极线路区外整流侧和逆变侧直流母线处分别设置过渡电阻为1、300、500  $\Omega$ 的单极接地故障。仿真计算结果如附录中的表A1所示。由表可知:发生区内故障时,在不同故障距离和过渡电阻的影响下,故障极的余弦相似度 $S < \varepsilon_3$ 且 $\Delta\alpha_R > \Delta\alpha_{Rset}$ ,均能正确判别为区内故障,而健全极保护均可靠不动作;发生区外故障时,在不同过渡电阻的影响下,余弦相似度 $S$ 均大于 $\varepsilon_3$ ,不满足保护动作条件,保护不会误动。

### 5.3 直流输电系统降功率的影响

本文通过减小直流控制系统的电流指令模拟直流输电系统功率的下降过程。参照实际工程的降功率参数,本文采用的降功率速率为3 000 MW/s<sup>[18]</sup>,将直流功率下降50%,得到的仿真结果如图8所示。由图可知,直流线路功率下降过程中,正极线路的整流侧出现类似区内故障的特征,但触发角变化缓慢,在故障启动后, $\Delta\alpha_R$ 始终远小于整定值 $\Delta\alpha_{Rset}$ ,不满足保护判据式(15),因此保护不会误动作;同理可知,负极保护不动作。

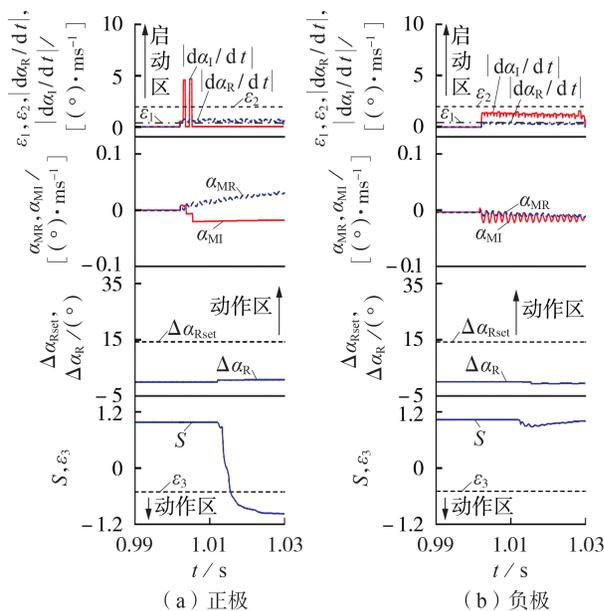


图8 正极直流线路降功率运行时的仿真结果

Fig.8 Simulative results during power reduction operation of positive polar HVDC line

## 6 结论

本文提出一种基于触发角变化特性的高压直流输电线路纵联保护方案。该方案通过两换流站侧的触发角变化率均值的余弦相似度和固定间隔时间的触发角变化量准确识别直流线路的区内外故障。理论分

析和仿真验证表明:所提方案基于控制保护融合的思路,充分利用直流控制暂态阶段触发角的变化特征,能够准确识别直流线路区内外故障及不同运行方式干扰且耐受过渡电阻能力较高,动作速度较快,不受电磁耦合、直流降功率等非故障扰动的影响,不需要严格的数据同步,具有较高的灵敏性、速动性和可靠性,可作为高压直流线路的快速后备保护。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:1-25.
- [2] 罗汉武,乐健,毛涛,等. 扎鲁特—青州±800 kV特高压直流输电工程运行特性分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):53-59. LUO Hanwu, LE Jian, MAO Tao, et al. Analysis of operation characteristics of Zhaluote-Qingzhou ±800 kV UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):53-59.
- [3] SONG Guobing, GU Yaobin, HUANG Xinghua, et al. Research on a new scheme of LCC-HVDC line protection[J]. The Journal of Engineering, 2017(13):1176-1180.
- [4] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. ±800 kV云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):179-188. SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Simulation and analyses for Yun-Guang ±800 kV HVDC transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31):179-188.
- [5] 刘兴茂,林圣,李小鹏,等. 利用基波电流相量变化率识别行波保护中雷击干扰[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):55-61. LIU Xingmao, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Apply fundamental current phasor change rate to identify lightning disturbance to travelling wave protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2):55-61.
- [6] 舒兵成,李海锋,武霁阳,等. 采样频率对直流线路行波保护的影响[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):91-95. SHU Bingcheng, LI Haifeng, WU Jiyang, et al. Influence of sampling frequency on traveling wave protection of DC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):91-95.
- [7] 孔飞,张保会,王艳婷,等. 超高速直流输电线路保护方向元件[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):83-88. KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting, et al. Ultra-high-speed directional element of relay protection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8):83-88.
- [8] WU Jiyang, LI Haifeng, WANG Gang, et al. An improved traveling-wave protection scheme for LCC-HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1):106-116.
- [9] 李小鹏,汤涌,滕予非,等. 基于反行波幅值比较的高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术,2016,40(10):3095-3101. LI Xiaopeng, TANG Yong, TENG Yufei, et al. Pilot protection method based on amplitude comparison of backward traveling wave for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(10):3095-3101.
- [10] 李小鹏,滕予非,刘耀,等. 基于测量波阻抗的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术,2017,41(2):617-623. LI Xiaopeng, TENG Yufei, LIU Yao, et al. Pilot protection based on measured surge impedance for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(2):617-623.
- [11] 高杉,林圣,何正友. 基于行波固有频率一、二次频差 HVDC

- 输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2002-2009.
- GAO Shan, LIN Sheng, HE Zhengyou. A HVDC transmission line pilot protection method based on frequency difference between dominant natural frequency and secondary natural frequency of traveling wave[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2002-2009.
- [12] GAO Shuping, LIU Qi, SONG Guobing. Current differential protection principle of HVDC transmission system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(5): 1286-1292.
- [13] 宋璇坤, 申洪明, 黄少锋, 等. 特高压分布电容对电流差动保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 169-172, 192.
- SONG Xuankun, SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, et al. Effect of distributed capacitance on differential current protection and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 169-172, 192.
- [14] 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.
- [15] 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 characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2159-2167.
- [16] 武霁阳. 高压直流输电线路电磁耦合特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- WU Jiyang. Study on the electromagnetic coupling characteristic of HVDC lines[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [17] BISWAS S K, MILANFAR P. One shot detection with laplacian object and fast matrix cosine similarity[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 38(3): 546-562.
- [18] 樊丽娟, 金小明. 云广直流系统应对交流低电压的直流功率限制功能参数整定[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 21-24.
- FAN Lijuan, JIN Xiaoming. Parameter setting for Yunnan-Guangdong DC system's power limitation function responding to the AC low voltage[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 21-24.

#### 作者简介:



祝新驰

祝新驰(1993—), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电故障分析与继电保护(**E-mail**: epzhu.xc@mail.scut.edu.cn);

李海锋(1976—), 男, 广东五华人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**: lihf@scut.edu.cn);

黄灿超(1995—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向为直流输电线路保护(**E-mail**: huangdachao01@qq.com);

王钢(1966—), 男, 福建连江人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统保护、控制及自动化(**E-mail**: wangg@scut.edu.cn)。

(编辑 任思思)

## Pilot protection of HVDC power transmission lines based on variation characteristics of firing angle

ZHU Xincheng, LI Haifeng, HUANG Dachao, WANG Gang

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** There exists a matching delay between the traveling wave protection and the current differential protection, which leads to the lack of protection during the transient process of DC control. Based on the idea of control and protection combination, a new principle of pilot protection for HVDC power transmission lines is proposed by using the changing characteristics of the firing angle at two converter stations in the transient process of DC control after fault. In the protection, the cosine similarity criterion between the mean values of the firing angle changing rate of the rectifier and inverter stations and the firing angle variation criterion with the fixed time interval are constructed to identify the internal and external faults. The simulative results of PSCAD/EMTDC show that the proposed scheme can identify the faults in the transient process of DC control with fast motion speed and strong ability to withstand transition resistance, and it does not need strict synchronization of data acquisition. Therefore, the proposed scheme can be used as a fast backup protection for HVDC lines.

**Key words:** DC control characteristics; firing angle control; cosine similarity; pilot protection; relay protection; control and protection combination

附录

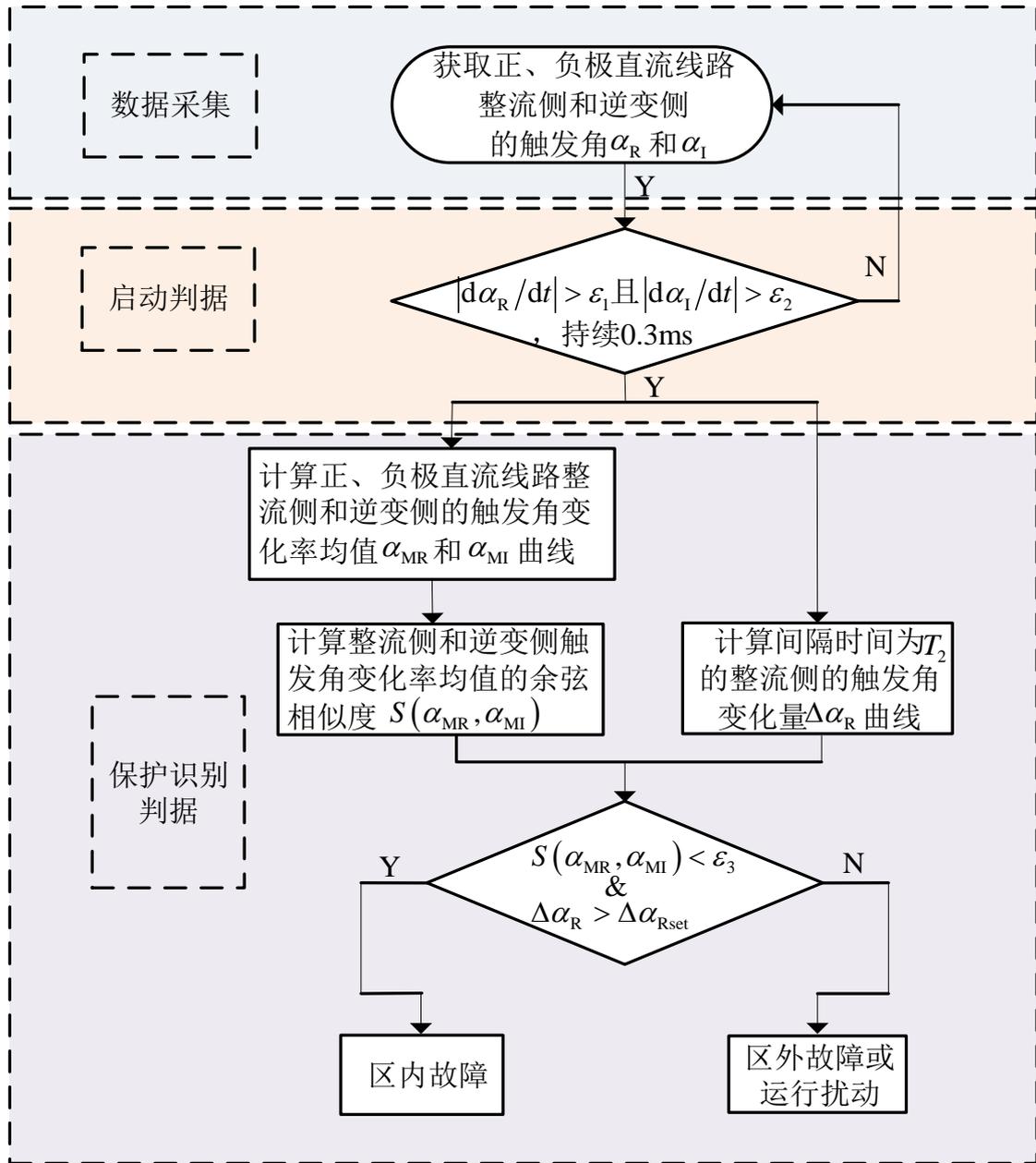


图 A1 本文所提保护方案流程图  
Fig.A1 Flowchart of proposed protection scheme

表 A1 直流线路区内外故障下保护判据的性能测试

Table A1 Performance testing of protection criterion for internal and external faults in HVDC line

| 故障位置              | 故障距离/km | 过渡电阻/ $\Omega$ | 故障极              |        | 结果    | 健全极              |        | 结果    |
|-------------------|---------|----------------|------------------|--------|-------|------------------|--------|-------|
|                   |         |                | $\Delta\alpha_R$ | $S$    |       | $\Delta\alpha_R$ | $S$    |       |
| 区内<br>正极<br>$f_1$ | 10      | 1              | 35.86            | -0.988 | $Y_T$ | -10.12           | 0.793  | $N_T$ |
|                   |         | 300            | 18.15            | -0.967 | $Y_T$ | -7.19            | 0.878  | $N_T$ |
|                   |         | 500            | 16.83            | -0.952 | $Y_T$ | -7.09            | 0.890  | $N_T$ |
|                   | 719     | 1              | 60.31            | -0.973 | $Y_T$ | -10.67           | 0.553  | $N_T$ |
|                   |         | 300            | 40.31            | -0.969 | $Y_T$ | -7.59            | 0.427  | $N_T$ |
|                   |         | 500            | 25.72            | -0.985 | $Y_T$ | -5.58            | 0.651  | $N_T$ |
|                   | 1428    | 1              | 56.07            | -0.990 | $Y_T$ | -9.11            | 0.632  | $N_T$ |
|                   |         | 300            | 18.33            | -0.964 | $Y_T$ | -8.37            | 0.783  | $N_T$ |
|                   |         | 500            | 16.12            | -0.924 | $Y_T$ | -5.36            | 0.728  | $N_T$ |
| 区内<br>负极<br>$f_2$ | 10      | 1              | 36.22            | -0.987 | $Y_T$ | -10.17           | 0.792  | $N_T$ |
|                   |         | 300            | 18.18            | -0.967 | $Y_T$ | -7.20            | 0.877  | $N_T$ |
|                   |         | 500            | 16.81            | -0.952 | $Y_T$ | -7.06            | 0.891  | $N_T$ |
|                   | 719     | 1              | 60.57            | -0.971 | $Y_T$ | -10.90           | 0.562  | $N_T$ |
|                   |         | 300            | 39.38            | -0.968 | $Y_T$ | -7.76            | 0.418  | $N_T$ |
|                   |         | 500            | 25.62            | -0.987 | $Y_T$ | -6.55            | 0.644  | $N_T$ |
|                   | 1428    | 1              | 56.06            | -0.976 | $Y_T$ | -9.15            | 0.632  | $N_T$ |
|                   |         | 300            | 18.34            | -0.933 | $Y_T$ | -6.27            | 0.772  | $N_T$ |
|                   |         | 500            | 16.15            | -0.930 | $Y_T$ | -4.23            | 0.719  | $N_T$ |
| 区内<br>双极<br>$f_5$ | 400     | 1              | 45.09            | -0.946 | $Y_T$ | 45.07            | -0.941 | $Y_T$ |
|                   |         | 300            | 23.40            | -0.932 | $Y_T$ | 23.42            | -0.929 | $Y_T$ |
|                   |         | 500            | 20.79            | -0.917 | $Y_T$ | 20.78            | -0.914 | $Y_T$ |
|                   | 1038    | 1              | 37.59            | -0.932 | $Y_T$ | 36.84            | -0.932 | $Y_T$ |
|                   |         | 300            | 26.41            | -0.919 | $Y_T$ | 16.29            | -0.912 | $Y_T$ |
|                   |         | 500            | 19.83            | -0.908 | $Y_T$ | 19.42            | -0.906 | $Y_T$ |
| 区外<br>$f_3$       | 0       | 1              | -13              | 0.925  | $N_T$ | -13              | 0.920  | $N_T$ |
|                   |         | 300            | -13              | 0.906  | $N_T$ | -13              | 0.895  | $N_T$ |
|                   |         | 500            | -13              | 0.927  | $N_T$ | -13              | 0.914  | $N_T$ |
| 区外<br>$f_4$       | 1438    | 1              | 57.64            | 0.979  | $N_T$ | 5.99             | 0.921  | $N_T$ |
|                   |         | 300            | 27.56            | 0.957  | $N_T$ | 3.91             | 0.885  | $N_T$ |
|                   |         | 500            | 16.03            | 0.977  | $N_T$ | 2.84             | 0.849  | $N_T$ |

注： $Y_T$ 表示保护动作， $N_T$ 表示保护不动作。