

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210326

# 特高压直流近区交流输电线路智能重合闸策略

曹虹<sup>1</sup>, 夏秋<sup>1</sup>, 俞斌<sup>2</sup>, 王同文<sup>2</sup>, 邵庆祝<sup>2</sup>, 王兴国<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061)

**摘要:** 提出了一种特高压直流近区交流输电线路智能重合闸策略, 避免重合于永久性故障带来的二次冲击, 从而避免直流连续换相失败和直流闭锁事故, 提高特高压交直流混联系统的安全稳定性。分析了现有基于电压特征的永久性故障判别算法的不足, 提出了基于故障测距结果的双参数故障判别算法。而后在计算交流侧安全裕度指标和直流侧安全裕度指标的基础上, 建立重合闸投切与系统安全关联度指标以预判系统安全性。结合预判结果综合判别永久性故障和瞬时性故障, 构建智能重合闸策略。RTDS 仿真结果验证了智能重合闸策略的有效性和可行性。智能重合闸策略为特高压直流近区交流输电线路重合闸提供了新的思路。

**关键词:** 特高压直流近区; 智能重合闸; 安全裕度指标; 永久性故障; 瞬时性故障

## Intelligent reclosing strategy for near area AC transmission lines connected with UHVDC

CAO Hong<sup>1</sup>, XIA Qiu<sup>1</sup>, YU Bin<sup>2</sup>, WANG Tongwen<sup>2</sup>, SHAO Qingzhu<sup>2</sup>, WANG Xingguo<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China)

**Abstract:** An intelligent reclosing strategy for the near area AC side of the UHV AC/DC hybrid system is proposed. It avoids secondary impact caused by reclosing in permanent fault which leads to DC blocking accident caused by DC continuous commutation failure, and improves the safety and stability of UHV AC/DC hybrid system. This paper analyzes the shortcomings of the existing permanent fault discrimination algorithm based on voltage characteristics, and puts forward a two-parameter fault discrimination algorithm based on fault location results. Then, based on the calculation of AC side safety margin index and DC side safety margin index, the correlation index between reclosing switching and system safety is established to predict system safety. Combined with the prediction results, the permanent fault and transient fault are comprehensively distinguished, and the intelligent reclosing cooperation strategy is constructed. RTDS simulation results verify the effectiveness and feasibility of intelligent reclosing strategy. Intelligent reclosing strategy provides a new idea for reclosing of UHVDC near area AC transmission line.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGAH0000TKJS1900055).

**Key words:** UHVDC near area; intelligent reclosing; safety margin index; permanent failure; transient fault

## 0 引言

随着特高压直流输电技术的快速发展, 我国进入特高压交直流混联电网运行时代, “强直弱交”特征日益突出<sup>[1-2]</sup>。特高压直流近区交流系统故障可能诱发直流系统换相失败, 尤其是特高压直流近区交

流输电线路永久性故障, 若重合断路器将给直流系统带来二次冲击, 易引发连续换相失败, 造成直流闭锁。一旦发生直流闭锁故障, 受端电网会出现巨大的功率缺额, 将影响电网的频率和电压稳定<sup>[3-4]</sup>。故特高压直流近区交流线路的正确重合闸对于整个电网的安全稳定运行至关重要。

重合闸技术广泛应用于交流输电线路, 以切除瞬时性故障并快速恢复供电。但是, 传统的自动重合闸技术不区分永久性故障和瞬时性故障, 经固定的延时重合断路器, 而后再进行故障的判别以决定

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目资助“特高压交直流近区输电线路高阻故障快速识别及智能重合闸技术研究”(SGAH0000TKJS1900055)

是否再次跳闸,易对电气系统造成不利影响<sup>[5]</sup>。为此,国内外学者开展了自适应重合闸的研究<sup>[6-8]</sup>。文献[9]基于故障后残压幅值识别故障类型,但当线路中互感电压大于电容耦合电压时,容易发生误判。文献[10]利用模糊综合策略优化了基于故障残压幅值特性的判据,减少了误判率,但受限于模糊理论自身的缺陷,仍然存在误判区。文献[11]利用人工神经网络对故障类型进行精确识别,但是神经网络的搭建需要大量计算训练,难以应用于实际工程。文献[12-15]以电弧模型为基础,利用故障后是否产生电弧特性来鉴别故障类型,然而电弧模型的准确性仍有待进一步研究,此方法不具有普适性。文献[16-18]利用并联电抗器参数特性,补充了对带并联电抗器线路的故障类型识别方法,不过仅适用于带并联电抗器的线路。

鉴于以上问题,本文提出了智能重合闸的概念,建立重合闸投切与系统安全关联度指标,在预判系统安全性的基础上综合判别永久性故障和瞬时性故障,构建重合闸配合策略,减小重合于永久性故障对交直流系统的冲击,提高特高压交直流混联系统的稳定性和安全性。本文分析了现有基于电压特征的永久性故障判别算法的不足,提出了基于故障测距结果的双参数故障判别算法,而后在计算交流侧安全裕度指标和直流侧安全裕度指标的基础上,综合判别故障类型,提出智能重合闸策略。仿真结果验证了智能重合闸策略的有效性和可行性。智能重合闸策略为特高压直流近区交流输电线路重合闸提供了新的思路。

## 1 永久性故障判别算法

### 1.1 传统基于电压特征的故障判别算法

当三相交流线路中的一相线路由于发生故障而被切除时,健全相的对地电压和线路电流分别通过相间电容耦合和电磁耦合在开断相产生感应电压,分别称为电容耦合电压和电感耦合电压。

电容耦合电压是横向的,主要由健全相电压耦合产生,当线路C相发生故障且两侧断路器开断时,如图1所示,故障点电压即为电容耦合电压,可表示<sup>[9]</sup>为

$$\dot{U}_f = \dot{U}_y = \frac{b_1 - b_0}{2b_1 + b_0} (\dot{U}_a + \dot{U}_b) \quad (1)$$

式中: $\dot{U}_f$ 是故障点电压; $\dot{U}_y$ 是电容耦合电压; $b_1$ 和 $b_0$ 分别为线路中单位长度的正序和零序电纳; $\dot{U}_a$ 和 $\dot{U}_b$ 为故障点处健全相电压。

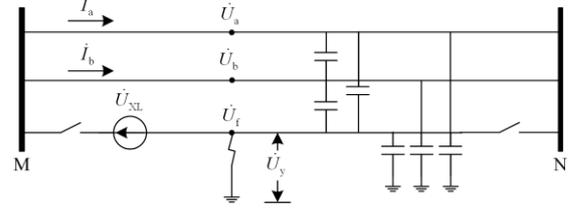


图1 C相故障示意图

Fig. 1 Fault voltage of phase C

电感耦合电压是纵向的,和负载电流、线路长度成正比,当图1中的故障点位于线路末端时,线路全长的电感耦合电压表达式<sup>[9]</sup>为

$$\dot{U}_{xl} = (\dot{i}_a + \dot{i}_b) Z_m L = \frac{(\dot{i}_a + \dot{i}_b)(Z_0 - Z_1)}{3} = \dot{U}_x L \quad (2)$$

式中: $\dot{U}_{xl}$ 是电感耦合电压; $\dot{i}_a$ 和 $\dot{i}_b$ 为两个健全相的电流; $Z_m$ 为单位长度线路的互感; $L$ 为线路长度; $Z_0$ 和 $Z_1$ 分别为每单位长度线路下零序和正序阻抗; $\dot{U}_x$ 是每单位长度线路下的电感耦合电压。

瞬时性故障是电弧性故障,熄弧后故障点消失,健全相和故障相之间的耦合使得故障相恢复电压包括电感耦合电压和电容耦合电压。而永久性故障时,由于故障点一直存在,电容耦合电压的值会快速减小,故障相恢复电压主要由电感耦合电压构成。

利用瞬时性故障与永久性故障时电压幅值的大小区分,传统基于电压特征的判据<sup>[5]</sup>构造为

$$U_m \geq K_k U_{xl} \quad (3)$$

式中: $K_k$ 为裕度系数,一般取为1.1~1.2; $U_m$ 为故障相测量点电压。

当故障类型为瞬时性故障时,测量点电压为电容耦合电压和电感耦合电压的和,大于 $K_k U_{xl}$ ,判据动作,可靠判定为瞬时性故障;当故障类型为永久性故障时,故障点一直存在,电容耦合电压迅速衰减,测量点电压只有电感耦合电压,小于 $K_k U_{xl}$ ,判据可靠不动作,判定为永久性故障。

然而,传统基于电压特征的判据的可靠性较低<sup>[19-20]</sup>,电容耦合电压较小时,当线路上发生瞬时性故障时,测量点电压也较小,此时若小于 $K_k U_{xl}$ ,传统的判据容易拒动,误判为永久性故障。若直接减少系数 $K_k$ ,可以减少误判范围,但是在 $K_k$ 值小于1的情况下,线路末端永久性故障时判据容易误动,误判为瞬时性故障。

为解决这个问题,本文提出基于故障测距结果的双参数故障判别算法,提高故障判别准确性。

### 1.2 基于故障测距结果的双参数故障判别算法

本节结合故障测距结果,提出利用电容耦合电

压和电感耦合电压复合调整的双参数故障判别算法,避免电容耦合电压的大小对于判据结果的影响,有效降低误判区域范围。

当发生永久性故障时,因为故障点一直存在,无论是金属性故障还是经过渡电阻故障,故障点电压肯定小于瞬时性故障时的电容耦合电压<sup>[10]</sup>,因此,有式(4)成立。

$$U_m = kU_{xl} + U_f < U_{xl} + U_y \quad (4)$$

式中:  $k$  为故障距离与线路总长度的比值;  $U_{xl}$  为测量点的电感耦合电压。

瞬时性故障与永久性故障的本质区别在于故障点一直存在与否,在瞬时性故障下,其故障电压为电容耦合电压和电感耦合电压的叠加,有式(5)成立。

$$U_m = kU_{xl} + U_f = U_{xl} + U_y \quad (5)$$

因此,利用电容耦合电压和电感耦合电压,可明显地区分瞬时性故障和永久性故障。将电容耦合电压和电感耦合电压作为双参数,通过调节双参数的双裕度系数,设置双参数阈值为

$$U_{set} = |k_1 U_{xl} + k_2 U_y| \quad (6)$$

式中,  $k_1$  和  $k_2$  为双裕度系数,取值范围为 0.7~0.9,由不同的工况和判定范围要求决定。当线路较长、电感值较大时,线路中的电感耦合电压占比较大,可以适当减小  $k_1$ , 增大  $k_2$ ; 当线路较短、电容耦合电压占比较大时,可以增大  $k_1$ , 减小  $k_2$ , 减少因扰动和误差造成的判据误判情况,增加判据的可靠性。

进一步地,将式(1)、式(2)代入式(6)可得

$$U_{set} = \left| k_1 \left[ \frac{b_1 - b_0}{2b_1 + b_0} (\dot{U}_a + \dot{U}_b) \right] + k_2 (I_a + I_b) Z_m l \right| \quad (7)$$

又,  $\dot{U}_a$  和  $\dot{U}_b$  可由式(8)求得

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \dot{U}_{ma} - (I_a Z_1 + I_b Z_m) l \\ \dot{U}_b = \dot{U}_{mb} - (I_b Z_1 + I_a Z_m) l \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\dot{U}_{ma}$  和  $\dot{U}_{mb}$  分别为另两相健全线路测量点的电压;  $Z_1$  为线路单位长度的自感。结合式(8),式(7)可整理为

$$U_{set} = \left| k_1 \left[ \frac{b_1 - b_0}{2b_1 + b_0} (\dot{U}_{ma} + \dot{U}_{mb} - (I_a + I_b)(Z_1 + Z_m)l) \right] + k_2 (I_a + I_b) Z_m l \right| \quad (9)$$

为进一步提高算法的准确性,引入测量阻抗法来计算故障距离  $l$ , 计算公式<sup>[21-22]</sup>为

$$l = (X_m - \frac{R_m \tan \varphi - X_m}{\tan \varphi \cot(\arg \frac{\Delta \dot{I}_m}{I_m}) - 1}) / X_1 \quad (10)$$

式中:  $X_1$  为单位长度线路的正序电抗;  $R_m$  和  $X_m$  分别为保护安装处的电阻和电抗,由测量点电压和电流的比值求得;  $\varphi$  为线路的正序阻抗角;  $\Delta \dot{I}_m$  为故障分量电流。

因此,结合故障测距结果的双参数故障判别算法为

$$U_m < U_{set} = k_1 \left[ \frac{b_1 - b_0}{2b_1 + b_0} (\dot{U}_{ma} + \dot{U}_{mb} - (I_a + I_b)(Z_1 + Z_m)l) \right] + k_2 (I_a + I_b) Z_m (X_m - \frac{R_m \tan \varphi - X_m}{\tan \varphi \cot(\arg \frac{\Delta \dot{I}_m}{I_m}) - 1}) / X_1 \quad (11)$$

满足判据(11)时,判定为瞬时性故障;否则,判定为永久性故障。

和传统算法相比,双参数故障判别算法综合利用了电容耦合电压和电感耦合电压,对故障后线路残压的计算更加准确,双裕度系数  $k_1$ 、 $k_2$  的设置提升了判据的适应性和可调性,且  $k_1$ 、 $k_2$  均小于 1,保证了  $U_{set}$  可靠小于瞬时性故障时的测量电压,留有更宽泛的判定裕度,减少了误判几率。

## 2 智能重合闸策略

### 2.1 直流侧安全裕度指标

受端交流系统故障引发直流换相失败是交直流混联系统最常见也是最主要的问题之一,故障后的首次换相失败往往影响较小且难以避免,但连续多次换相失败会造成直流系统闭锁、直流系统功率传输中断、交流系统传输功率剧烈变化甚至反向,严重威胁电网的安全稳定运行<sup>[23]</sup>。抑制直流系统连续换相失败,改善交直流系统运行特性,具有十分重要的意义,也是目前需要重点解决的问题。

直流系统的安全性评估主要考虑直流系统连续换相失败导致直流闭锁的发生概率。由直流运行经验<sup>[24]</sup>可知,交直流系统对连续换相失败的承受能力主要受直流输送功率以及换相失败时间间隔两个因素影响。交流电压上升、关断角裕度、谐波等均会影响换相过程<sup>[25]</sup>。直流输送功率越高,连续换相失败的时间间隔越短、次数越多,则系统承受能力越弱,越容易导致直流闭锁。目前,工程用换相失败保护加速段则结合系统耐受连续换相失败的时间,通过换相失败发生的次数及时间间隔来判断是否闭锁直流。对于额定输送功率为 12 000 MW 的直流系统:当直流双极输送功率小于 6 000 MW 时,连续 4 次及以上的换相失败时间间隔小于 200 ms,则可能会导致直流闭锁;当直流双极输送功率大于

6 000 MW 时, 连续 3 次及以上的换相失败时间间隔小于 200 ms, 则可能导致直流闭锁。

故本文将直流输送功率、换相失败次数作为直流侧安全裕度指标。

## 2.2 交流侧安全裕度指标

若交流线路重合闸重合于永久性故障, 对直流系统带来二次冲击, 可能引发连续换相失败, 同时严重影响交流系统的安全稳定性。换相失败发生后, 直流系统向交流系统的馈入功率降低, 交流滤波器及无功补偿装置等将向交流系统倒送大量无功功率, 直流系统相当于时变谐波电流源, 近区交流线路的电压、电流波形产生不同程度的畸变, 严重时可能导致交流电网失步。因此, 如何依据交流侧电气量可靠识别永久性故障和瞬时性故障对于提高交流系统的安全稳定性至关重要。

由 1.2 节分析可知, 基于故障相的故障残压  $U_m$  与双参数门槛值  $U_{set}$  的比较, 可以判别永久性故障和瞬时性故障, 而  $U_{set}$  的大小设置原则直接影响判据的动作性能, 故将双参数门槛值  $U_{set}$  作为交流侧安全裕度指标。由于不同类型故障时故障残压的幅值差异较大,  $U_{set}$  具有较大的调整范围,  $U_{set}$  可引入调整系数  $k_3$ , 如式(12)。

$$U_{set} = k_3 \left| \begin{array}{l} k_1 \left[ \frac{b_1 - b_0}{2b_1 + b_0} (\dot{U}_{ma} + \dot{U}_{mb} - (I_a + I_b)(Z_1 + Z_m)l) \right] + \\ k_2 (I_a + I_b) Z_m \left( X_m - \frac{R_m \tan \varphi - X_m}{\tan \varphi \cot(\arg \frac{\Delta \dot{I}_m}{I_m}) - 1} \right) / X_1 \end{array} \right| \quad (12)$$

当直流系统判定为较安全状态时, 可以减少  $k_3$ , 适当压低判据门槛, 增大瞬时性故障类型的判定范围, 偏向选择线路重合操作, 快速恢复通电, 提升系统的可靠性; 在已经发生多次换相失败的系统, 应将任务的核心放在维护直流侧系统, 上调  $k_3$ , 提高判据门槛值, 增大永久性故障的判定范围, 偏向选择闭锁重合闸, 避免二次冲击。

## 2.3 智能重合闸方案

本文提出了一种防止直流连续换相失败的交流线路重合闸策略, 针对直流近区交流线路, 线路发生故障后自动调整线路两侧重合闸策略, 减小重合闸于永久性故障对直流系统的冲击, 有效避免连续换相失败进而导致的直流闭锁。

智能重合闸流程图如图 2 所示, 主要分为以下步骤:

### 2.3.1 安全性预判

获取直流输送功率、换相失败信号, 以断路器断开时刻为 0 时刻。

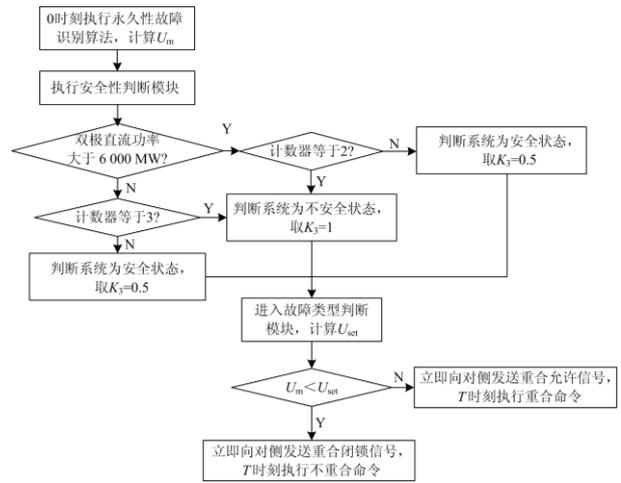


图 2 智能重合闸逻辑

Fig. 2 Logic of smart reclosing

1) 当直流双极功率  $\leq 6\ 000$  MW 时, 对于重合前 200 ms—重合前 500 ms 时间区段, 当收到任一桥换相失败信号, 计数器计 1 并自保持 200 ms; 计数器计 1 往前 200 ms 到 400 ms 期间收到任一桥换相失败信号, 计数器计 2 并自保持 200 ms; 计数器计 2 往前 200 ms 到 400 ms 期间收到任一桥换相失败, 计数器计 3。上述任一条件不满足, 计数器清 0。其中,  $T$  为重合闸时间。

(1) 当计数器达到 3 时, 判定系统为不安全状态, 进入故障类型判断阶段。

(2) 当计数器小于 3 时, 判定系统为安全状态, 进入故障类型判断阶段。

2) 直流双极功率  $> 6\ 000$  MW 时, 对于重合前 200 ms—重合前 500 ms 时间区段, 当收到任一桥换相失败信号, 计数器计 1 并自保持 200 ms; 计数器计 1 往前 200 ms 到 400 ms 期间收到任一桥换相失败信号, 计数器计 2。上述任一条件不满足, 计数器清 0。

(1) 当计数器达到 2 时, 判定系统为不安全状态, 进入故障类型判断阶段。

(2) 当计数器小于 2 时, 判定系统为安全状态, 进入故障类型判断阶段。

### 2.3.2 故障类型判断

依据安全性预判阶段的判别结果调整双参数故障判别算法中的双参数门槛值的大小, 即调整式(12)中的  $k_3$  值, 而后依据调整后的门槛值计算双参数故障判别判据, 判别故障类型。

若安全性预判结果为安全状态,  $k_3=0.5$ , 增加瞬时性故障的判定区域, 尽量重合一次, 保证瞬时性故障的判定, 如果重合于永久性故障再次跳开。

若安全性预判结果为不安全状态,  $k_3=1$ , 减少永久性故障的误判区。

### 2.3.3 执行重合命令

依据故障类型判断阶段的结果, 最终判定交流线路换流站侧是否执行重合命令。若执行重合命令, 则重合闸时间为  $T$  时, 执行重合命令, 同时向对侧发送重合允许信号, 对侧收到允许信号后重合。若执行不重合命令, 则重合闸时间  $T$  时, 执行不重合命令, 同时向对侧发送重合闭锁信号, 对侧收到闭锁信号后不重合。

## 3 仿真验证

为了验证上述理论分析的正确性, 本文采用 RTDS(Real Time Digital Simulation System)进行了实时数字仿真实验。依据实际工程参数, 搭建了  $\pm 100$  kV 昌吉(新疆)-古泉(安徽)特高压交直流混联电网, 如图 3 所示。其中, 古泉至繁昌线长 58 km, 古泉至芜湖线长 5.5 km, 线路正序参数  $z_{11} = 0.0196 \Omega/\text{km}$ ,  $z_{c1} = 0.23057 \times 10^6 \Omega \cdot \text{km}$ , 零序参数  $z_{10} = 0.1828 \Omega/\text{km}$ ,  $z_{c0} = 0.34698 \times 10^6 \Omega \cdot \text{km}$ 。

以昌吉-古泉特高压直流近区古泉-繁昌交流线路为例, 分析不同故障工况下的智能重合闸策略动作结果。受篇幅限制, 其他线路故障下的动作特性类似, 不再赘述。

昌吉-古泉直流额定功率(12 000 MW)运行时, 在古泉-繁昌交流线路古泉侧设置永久性故障, 持续时间为 1 000 ms。换相失败信号、古泉侧线路电压仿真结果如图 4、图 5 所示。

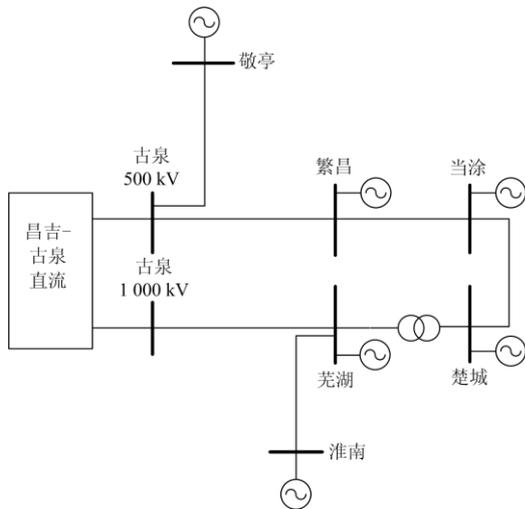


图 3  $\pm 100$  kV 昌吉(新疆)-古泉(安徽)特高压交直流混联输电系统

Fig. 3  $\pm 100$  kV Changji (Xinjiang)-Guquan (Anhui) UHV AC/DC hybrid transmission system

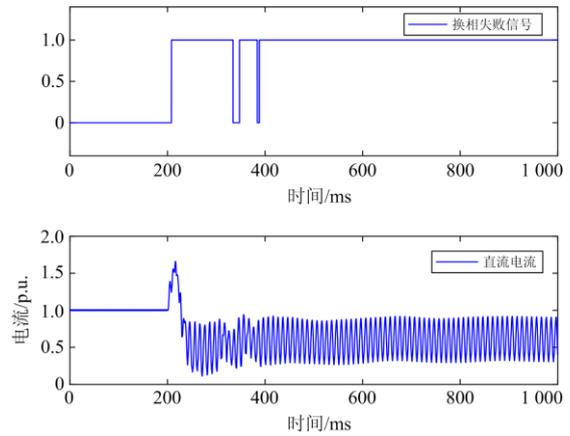


图 4 古泉侧系统发生永久性故障下换相失败信号波形  
Fig. 4 Commutation failure signal waveform under a permanent fault at Guquan side of the line

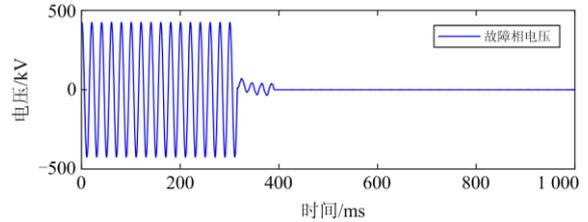


图 5 古泉侧系统发生永久性故障下电压仿真波形  
Fig. 5 Voltage simulated waveform under a permanent fault at the Guquan side of the line

由图 4 可知, 永久性故障后, 持续检测出换相失败信号, 当重合闸时间设置为 800 ms 时, 故障后 600 ms(重合前 200 ms)时, 收到换相失败信号, 计数器计 1, 而后在 400 ms 时又收到换相失败信号, 计数器计 2。由于此时昌吉-古泉直流功率大于 6 000 MW, 且计数器达到 2, 那么判定系统为不安全状态,  $k_3=1$ ,  $U_{set}=39.976$  kV。由图 5 可知, 当永久性故障距离为 0 时, 断路器断开后测量点电压  $U_m$  约为 0.012。故  $U_m$  可靠小于  $U_{set}$ , 准确判定为永久性故障, 线路古泉侧执行不重合命令, 同时向繁昌侧发送重合闭锁信号, 繁昌侧收到闭锁信号后可靠不重合。

不同故障位置、不同过渡电阻情况下的永久性故障仿真结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 在特高压直流近区发生永久性故障时, 检测到多次换相失败信号, 安全性预判均判断为不安全状态,  $k_3=1$ , 调整后的定值对于 500  $\Omega$  过渡电阻的永久性故障依然留有足够的判定裕度,  $U_m$  可靠小于  $U_{set}$ , 准确判定为永久性故障。即智能重合闸策略通过安全性预测, 可自适应调整  $k_3$  的值, 高阻故障时, 依然可靠判断为永久性故障, 可靠不重合。

表 1 不同故障位置、不同过渡电阻情况下  
永久性故障仿真结果

Table 1 Simulation results of permanent faults under different fault positions and different transition resistance

$R_f / \Omega$	$l / \%$	$k_3$	$U_{set} / \text{kV}$	$50\%U_{set} / \text{kV}$	$U_m / \text{kV}$	结果
0	50	1	45.189	22.595	5.389	永久性故障
0	100	1	50.402	25.201	10.918	永久性故障
50	0	1	39.976	19.988	0.495	永久性故障
50	50	1	45.189	22.595	6.177	永久性故障
50	100	1	50.402	25.201	12.494	永久性故障
100	0	1	39.976	19.988	1.016	永久性故障
100	50	1	45.189	22.595	6.809	永久性故障
100	100	1	50.402	25.201	13.031	永久性故障
500	0	1	39.976	19.988	15.071	永久性故障
500	50	1	45.189	22.595	20.063	永久性故障
500	100	1	50.402	25.201	25.698	永久性故障

当昌吉-古泉直流额定功率低于 6 000 MW 时, 发生永久性故障后安全性预判也可靠判断为不安全状态, 分析过程类似, 此处不再赘述。

昌吉-古泉直流额定功率(1 2000 MW)运行时, 在古泉-繁昌交流线路古泉侧设置瞬时性故障, 持续时间 100 ms。换相失败信号、古泉侧线路电压仿真结果如图 6、图 7 所示。

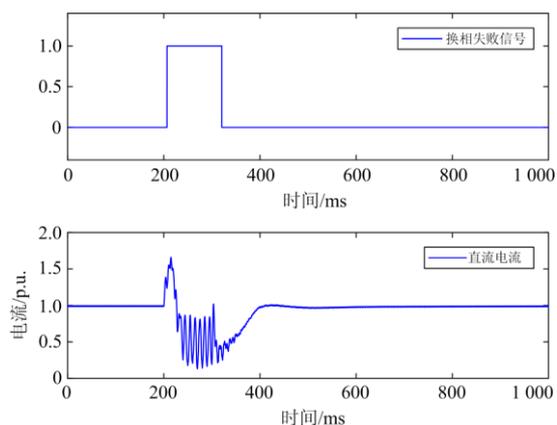


图 6 古泉侧系统发生瞬时性故障下换相失败波形

Fig. 6 Commutation failure waveforms under a transient fault at the Guquan side of the line

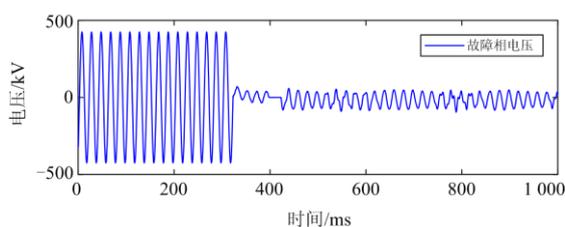


图 7 古泉侧系统发生瞬时性故障下电压仿真波形

Fig. 7 Voltage simulation waveform under a transient fault at the Guquan side of the line

由图 6 可知, 瞬时性故障后, 仅检测出一次换相失败信号, 当重合闸时间设置为 800 ms 时, 故障后 300~600 ms(重合前 200 ms—重合前 500 ms)时, 没有收到换相失败信号, 计数器计 0, 判定系统为安全状态,  $k_3=0.5$ ,  $U_{set}=19.988$  kV。由图 7 可知, 当瞬时性故障距离为 0 时, 断路器断开后测量点电压  $U_m$  约为 43.011 kV。故  $U_m$  可靠大于  $U_{set}$ , 准确判定为瞬时性故障, 线路古泉侧执行重合命令, 同时向繁昌侧发送重合允许信号, 繁昌侧收到闭锁信号后可靠重合。

不同故障位置、不同过渡电阻情况下的瞬时性故障仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同故障位置、不同过渡电阻情况下  
瞬时性故障仿真结果

Table 2 Simulation results of permanent faults under different fault positions and transition resistance

$R_f / \Omega$	$l / \%$	$k_3$	$U_{set} / \text{kV}$	$50\%U_{set} / \text{kV}$	$U_m / \text{kV}$	结果
0	50	0.5	45.189	22.595	50.303	瞬时性故障
0	100	0.5	50.402	25.201	59.627	瞬时性故障
50	0	0.5	39.976	19.988	42.324	瞬时性故障
50	50	0.5	45.189	22.595	48.112	瞬时性故障
50	100	0.5	50.402	25.201	61.932	瞬时性故障
100	0	0.5	39.976	19.988	44.121	瞬时性故障
100	50	0.5	45.189	22.595	50.302	瞬时性故障
100	100	0.5	50.402	25.201	60.102	瞬时性故障
500	0	0.5	39.976	19.988	43.323	瞬时性故障
500	50	0.5	45.189	22.595	50.239	瞬时性故障
500	100	0.5	50.402	25.201	58.922	瞬时性故障

由表 2 可知, 在特高压直流近区发生瞬时性故障时, 仅检测到一次换相失败信号, 安全性预判均判断为安全状态,  $k_3=0.5$ , 调整后的定值对于 500  $\Omega$  过渡电阻的永久性故障依然留有足够的判定裕度,  $U_m$  可靠大于  $U_{set}$ , 准确判定为瞬时性故障。即智能重合闸策略通过安全性预测, 可自适应调整  $k_3$  的值, 高阻故障时, 依然可靠判断为瞬时性故障, 可靠重合。

当昌吉-古泉直流额定功率低于 6 000 MW 时, 发生瞬时性故障后安全性预判也可靠判断为安全状态, 分析过程类似, 此处不再赘述。

## 4 结论

本文分析了现有基于电压特征的永久性故障判别算法的不足, 提出了基于故障测距结果的双参数故障判别算法, 然后在计算交流侧安全裕度指标和直流侧安全裕度指标的基础上, 建立重合闸投切与系统安全关联度指标以预判系统安全性, 结合预判

结果综合判别永久性故障和瞬时性故障，构建智能重合闸策略。

经 RTDS 仿真验证表明：特高压直流近区交流线路永久性故障时，结合直流输送、换相失败信号，可靠判定系统为不安全状态，保持双参数阈值在高水平、高过渡电阻情况下，测点电压依然可靠小于双参数阈值，可靠判定为永久性故障，可靠不重合；特高压直流近区交流线路瞬时性故障时，结合直流输送、换相失败信号，可靠判定系统为安全状态，降低双参数阈值，保证测点电压可靠大于双参数阈值，可靠判定为瞬时性故障，可靠重合。

本文提出的智能重合闸策略可依据判定的系统安全状态自适应调整双参数故障判据的阈值，提高判据可靠性和灵敏性，高阻故障时依然可以准确判定故障类型，为特高压直流近区交流输电线路重合闸提供了新的思路。

参考文献

[1] 索南加乐, 张健康, 焦在滨, 等. 交直流混联电网交流系统故障特征分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1461-1467.  
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, JIAO Zaibin, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1461-1467.

[2] 杨堤, 程浩忠, 姚良忠, 等. 多端直流输电接入下的交直流混联系统电压稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2201-2209.  
YANG Di, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Research review on AC/DC hybrid system with multi-terminal HVDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2201-2209.

[3] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.  
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.

[4] 饶宏, 张东辉, 赵晓斌, 等. 特高压直流输电的实践和分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2481-2488.  
RAO Hong, ZHANG Donghui, ZHAO Xiaobin, et al. Practice and analysis of UHV DC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2481-2488.

[5] 索南加乐, 刘辉, 吴亚萍, 等. 基于故障测距的单相自动重合闸永久故障电压自适应补偿判据[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 84-88.  
SUONAN Jiale, LIU Hui, WU Yaping, et al. An adaptive

voltage compensation criterion for permanent fault in the single phase automatic re-closing based on fault location[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 84-88.

[6] 方春恩, 李煜昊, 陈川江, 等. 基于 Prony 算法的串补空载线路选相关合最佳重合闸时刻研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 15-22.  
FANG Chun'en, LI Yuhao, CHEN Chuanjiang, et al. Study on optimal closing time of selective correlation of series compensated no-load line based on Prony algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 15-22.

[7] 沈军, 舒治淮, 陈军, 等. 自适应重合闸在电力系统中的应用实践[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 152-156.  
SHEN Jun, SHU Zhihuai, CHEN Jun, et al. Application of adaptive auto-reclosure in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 152-156.

[8] KHAN W A, BI Tianshu, JIA Ke. A review of single phase adaptive auto-reclosing schemes for EHV transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 205-214.

[9] 范越, 施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.  
FAN Yue, SHI Wei. Modification of voltage criterion in the single-pole automatic reclosing of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 44-47.

[10] 聂宏展, 董爽, 李天云, 等. 基于模糊神经网络的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 75-79.  
NIE Hongzhan, DONG Shuang, LI Tianyun, et al. Single-phase adaptive auto-reclosure based on fuzzy neural network[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 75-79.

[11] 郭添亨. 浅析基于 BP 神经网络的自适应单相重合闸[J]. 科技经济导刊, 2016(29): 57.  
GUO Tianheng. Analysis of adaptive single-phase reclosing based on BP neural network[J]. Science & Technology Economic Guide, 2016(29): 57.

[12] 廖一帆, 胡传良, 唐军, 等. 考虑电流元雷诺应力的绝缘子串并联间隙电弧运动特性分析[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 169-175.  
LIAO Yifan, HU Chuanliang, TANG Jun, et al. Analysis of arc motion characteristics of insulator string parallel gap considering current element Reynolds stress[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 169-175.

[13] 张冠英, 张艳娇, 赵远, 等. 基于高斯过程分类的串联直流电弧故障检测[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 1-7, 14.  
ZHANG Guanying, ZHANG Yanjiao, ZHAO Yuan, et al.

- Series DC arc fault detection based on Gaussian process classification[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(4): 1-7, 14.
- [14] 刘洪顺, 李庆民, 邹亮, 等. 安装故障限流器的输电线路潜供电弧特性与单相重合闸策略[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(31): 62-67.  
LIU Hongshun, LI Qingmin, ZOU Liang, et al. Secondary arc characteristics and single-phase autoreclosure scheme of EHV transmission line with fault current limiter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(31): 62-67.
- [15] 刘玉, 文俊, 肖湘宁. 特高压线路单相自适应重合闸仿真分析[J]. *电网技术*, 2010, 34(3): 11-15.  
LIU Yu, WEN Jun, XIAO Xiangning. Simulation analysis on single-phase adaptive autoreclosure of UHV transmission line[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(3): 11-15.
- [16] 邵文权, 宋国兵, 索南加乐, 等. 带并联电抗器输电线路三相自适应重合闸永久性故障判别[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(4): 91-98.  
SHAO Wenquan, SONG Guobing, SUONAN Jiale, et al. Identification of permanent faults for three-phase adaptive reclosure of the transmission lines with shunt reactors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(4): 91-98.
- [17] 林达, 王庆庆, 王慧芳, 等. 带并联电抗器同杆双回线自适应重合闸方案[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(6): 101-106.  
LIN Da, WANG Qingqing, WANG Huifang, et al. Adaptive reclosure scheme for parallel lines with shunt reactors[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(6): 101-106.
- [18] 罗勋华, 黄纯, 江亚群, 等. 基于电压内积的带并联电抗器输电线路单相自适应重合闸[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(11): 17-25.  
LUO Xunhua, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A voltage inner product based approach for single-phase adaptive reclosure on transmission line with shunt reactors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(11): 17-25.
- [19] 吕哲, 王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(6): 18-26.  
LÜ Zhe, WANG Zengping. Lightning interference and fault identification method of transmission line based on transient waveform characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 18-26.
- [20] 杨杰, 吴浩, 董星星, 等. 基于电流故障分量特征和随机森林的输电线路故障类型识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(13): 53-63.  
YANG Jie, WU Hao, DONG Xingxing, et al. Transmission line fault type identification based on current fault component characteristics and random forest[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(13): 53-63.
- [21] ABDELHAMID B, ABDELMALEK K, SAAD M. Transmission line fault location by solving line differential equations[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 192(2).
- [22] 彭浩, 沈兴来, 陈奎. 电缆单端故障测距的阻抗-行波组合法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(23): 110-114.  
PENG Hao, SHEN Xinglai, CHEN Kui. Impedance-traveling wave assembled method of cable single-terminal fault location[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(23): 110-114.
- [23] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 179-187.  
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 179-187.
- [24] 许朋见, 黄金海, 许静静, 等. 宾金特高压直流换相失败保护的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(2): 140-146.  
XU Pengjian, HUANG Jinhai, XU Jingjing, et al. Study of Bin-Jin UHVDC project commutation failures protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(2): 140-146.
- [25] 王璐, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 考虑直流电流变化的HVDC系统不对称故障换相失败分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 17-23.  
WANG Lu, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Analysis of asymmetric fault commutation failure in an HVDC system with DC current variation[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 17-23.

收稿日期: 2021-03-26; 修回日期: 2021-08-24

作者简介:

曹虹(1990—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: caohong@epri.sgcc.com

(编辑 葛艳娜)