

DOI: 10.7667/PSPC171897

## 基于高压直流换流站站域信息的交流线路距离保护方法

王增超<sup>1,2</sup>, 郑俊超<sup>3</sup>, 曾耿晖<sup>1,2</sup>, 刘玮<sup>1,2</sup>, 李一泉<sup>1,2</sup>, 王育学<sup>1,2</sup>, 文明浩<sup>3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 广东电网有限责任公司 RTDS 继电保护仿真重点实验室, 广东 广州 510600, 3. 华中科技大学, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 为了解决发生换相失败时基于工频相量的交流线路距离保护将会受到影响而无法可靠判别故障的难题, 提出了一种基于高压直流换流站站域信息的交流线路距离保护方法。因为未发生换相失败期间, 距离保护可以准确地识别故障位置, 所以可以考虑在换相失败期间闭锁距离保护, 以避免其受到换相失败的影响。逆变器正常换相时, 直流侧电流与交流侧电流基本相等, 而换相失败时直流侧电流将远大于交流侧电流, 利用此故障特征可对换相失败进行检测。基于换流站内换相失败信息的检测与共享, 可对传统距离保护的绩效进行改善。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下建立高压直流输电系统模型, 对所提出保护方法的性能进行验证。仿真结果表明, 新提出的距离保护可以避免换相失败对其的影响, 在交流线路区内、外发生不同类型的故障时均能准确、可靠地判别故障位置。

**关键词:** 站域信息; 高压直流输电系统; 换相失败; 距离保护

### A distance protection method for AC transmission lines based on substation area information in HVDC converter station

WANG Zengchao<sup>1,2</sup>, ZHENG Junchao<sup>3</sup>, ZENG Genghui<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, LI Yiquan<sup>1,2</sup>, WANG Yuxue<sup>1,2</sup>, WEN Minghao<sup>3</sup>

(1. Power Dispatching Control Center, Guangdong Power Grid Limited Liability Company, Guangzhou 510600, China; 2. Key Laboratory of RTDS Relay Protection Simulation, Guangdong Power Grid Limited Liability Company, Guangzhou 510600, China; 3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the traditional distance protection for AC transmission lines is influenced by commutation failure, a novel distance protection based on substation area information sharing is proposed in this paper. The distance protection can detect the fault position correctly when commutation failure do not occur. Thus, to avoid the influence of commutation failure, the distance protection can be blocked when the commutation failure is detected. The current at inverter DC side is approximately equal to the current at AC side when the inverter commutates normally, and the DC current will be larger than the AC current when commutation failure occurs, which can be used to recognize the commutation failure. Based on the detection and sharing of commutation failure information, the traditional distance protection can be improved. A HVDC system model is built in PSCAD/EMTDC simulation environment to test the performance of the improved method. Simulation results show that the novel method can detect the internal and external faults correctly when different types of faults occur, avoiding the influence of commutation failure.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477061) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Limited Liability Company (No. GDKJXM20162476 and No. 036000KK52160029).

**Key words:** substation area information; HVDC system; commutation failure; distance protection

## 0 引言

智能变电站基于全站信息数字化、通信平台网

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477061); 广东电网有限责任公司科技项目资助(GDKJXM20162476, 036000KK52160029)

络化以及信息传输的标准化, 已实现了站内多源信息的应用共享机制<sup>[1-3]</sup>。智能变电站相关技术的不断成熟和发展, 使得继电保护装置可以获得更多站内信息, 为从根本上提高和改善保护性能提供了新的思路。目前, 基于智能变电站站内标准化信息的共享机制, 已有国内外相关学者提出了站域保护概念<sup>[4-5]</sup>。近年来, 高压直流输电(High Voltage Direct Current,

HVDC)系统因具备损耗低、传输容量大、控制灵活等优点而被广泛应用于我国远距离电能传输领域<sup>[6-7]</sup>。随着 HVDC 输电技术的不断应用, HVDC 系统的某些故障形式给传统继电保护造成的影响, 引起了广泛的重视。其中, 换相失败就是 HVDC 系统中一种常见的故障形式<sup>[8-9]</sup>。目前, 国内外文献针对换相失败给继电保护造成的影响展开了大量的研究工作。文献[10]研究了交流线路工频变化量方向保护在换相失败期间的动作性能, 研究指出换相失败对故障和非故障线路的工频变化量方向保护都有影响, 可能导致故障线路拒动或非故障线路误动。文献[11]指出故障发生后, 距离保护中傅氏算法所采用的一个周波的数据可能包含了换相失败和未换相失败两个状态, 跨窗数据的存在将会导致相量计算的准确性降低, 进一步将影响距离保护的测距精度。文献[12]认为直流系统等值电流源作用于过渡电阻会造成测量电抗的波动变化, 导致距离保护的不正确动作。文献[13]指出直流系统换相失败期间向交流侧注入的非周期分量、低频分量以及高频分量是引起保护不能正确测量的根本原因。在理论分析研究的基础上, 部分文献提出了一些应对措施。文献[14]在分析了换相失败对基于工频相量的距离保护的影响的基础上, 提出了解微分方程算法的距离保护来代替原基于工频量计算的距离保护, 以提高保护动作的可靠性。综上, 现阶段大部分文献主要关注的是换相失败给对直流系统继电保护造成的影响, 而给出相应的应对策略的文献较少。

考虑到针对强直弱交系统, 连接直流逆变站的交流线路保护受到换相失败的影响较大, 可以考虑借鉴交流系统智能变电站通过站内多源信息共享改善保护性能的方法, 通过直流换流站站域内换相失败信息的检测和共享改善交流线路保护的性能。本文基于这一思想, 提出一种基于高压直流换流站换相失败信息检测的交流线路距离保护新方法。新方法通过在故障发生后对换相失败进行实时检测, 并在检测到换相失败发生时将保护闭锁, 从而避免了换相失败对交流线路距离保护的性能造成影响。

## 1 理论分析

### 1.1 换相失败对工频距离保护的影响分析

当高压直流输电系统逆变侧交流送出线路上发生故障时, 由于交流母线电压跌落以及直流线流的增大, 可能会导致直流输电系统发生换相失败。而换相失败的发生又可能会影响交流线路的保护。因此, 需要分析换相失败对交流线路保护的影响。

图 1 所示为直流输电系统逆变侧交流输电线路

发生故障时的等效电路图。

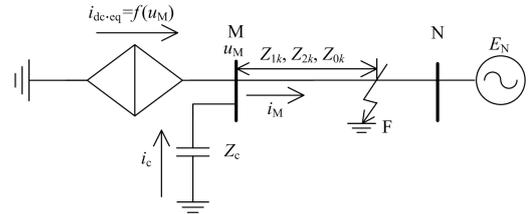


图 1 交直流互联系统等效电路示意图

Fig. 1 Equivalent circuit of the interconnected AC/DC system

如图 1 所示, 由于逆变侧交流母线电压的变化会改变脉冲触发时刻, 进而影响直流电流的输出<sup>[10]</sup>, 因此, 直流系统可以被等效为受母线电压  $u_M$  控制的受控电流源  $i_{dc.eq}$ ;  $Z_c$  表示为交流母线上连接的交流滤波器的等值容抗;  $Z_{1k}$ ,  $Z_{2k}$  和  $Z_{0k}$  分别表示为 M 侧保护安装位置到故障位置之间的正序、负序和零序阻抗。以交流输电线路 F 点发生单相接地故障为例分析, 故障发生后可对一个周波的测量电压  $u_M(t)$ 、测量电流  $i_M(t)$  进行傅里叶变换。

$$\begin{cases} u_M(t) = \sum_{\omega_k=0}^{+\infty} U_k \sin(\omega_k t + \varphi_{k1}) \\ i_M(t) = \sum_{\omega_k=0}^{+\infty} I_k \sin(\omega_k t + \varphi_{k2}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_k$  和  $\varphi_{k1}$  分别为电压谐波分量的幅值和相位;  $I_k$  和  $\varphi_{k2}$  分别为电流谐波分量的幅值和相位。根据基尔霍夫第二定理, 交流线路上角频率为  $\omega_k$  的电压、电流相量始终满足以下关系。

$$\begin{aligned} \dot{U}_M(\omega_k) = & l \cdot z_{1k}(\omega_k) [\dot{I}_M(\omega_k) + \\ & k(\omega_k) \cdot 3\dot{I}_0(\omega_k)] + \dot{U}_F(\omega_k) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\dot{U}_M(\omega_k)$  和  $\dot{I}_M(\omega_k)$  分别为保护安装处测量的相电压、相电流;  $\dot{U}_F(\omega_k)$  为故障点电压;  $\dot{I}_0(\omega_k)$  为零序电流;  $l$  为故障距离; 阻抗零序补偿系数  $k(\omega_k)$  为

$$k(\omega_k) = [z_{0k}(\omega_k) - z_{1k}(\omega_k)] / 3z_{1k}(\omega_k) \quad (3)$$

式中:  $z_{1k}(\omega_k)$  为单位正序阻抗;  $z_{0k}(\omega_k)$  为单位零序阻抗。由式(2)可知, 由于  $z_{1k}(\omega_k)$  和  $z_{0k}(\omega_k)$  的存在, 电压相量和电流相量并非线性关系, 而是一个与角频率  $\omega_k$  相关的函数。这导致距离保护中非工频的谐波电压电流相量所计算的故障距离  $l$  与角频率  $\omega_k$  相关, 因而无法准确计算故障距离。又因为傅氏算法本质上是一种梳状滤波器, 虽然它可以完全滤除整次谐波, 但无法完全滤除非整次的谐波分量。若故障电压电流信号包含较大的非整次谐波分量, 傅氏算法计算的工频相量中也将包含较大的非整次谐波分量。由前文分析可知, 这将会给基于工频量计算的

文献[15]利用 Prony 算法分析未发生换相失败时及发生换相失败时的故障电流谐波含量, 分析结果分别如表 1 和表 2 所示。分析结果表明: 当逆变器未发生换相失败时, 故障电流信号主要包含工频分量, 谐波含量主要以整次谐波为主, 非整次谐波含量较少; 而在换相失败发生期间, 电流信号除了工频分量外, 含有较大的非整次谐波分量。结合上文分析可知: 当未发生换相失败时, 由于傅氏算法可以完全滤除整次谐波分量, 因此基于工频傅氏算法的距离保护可以较为准确地提取工频分量; 而发生换相失败时, 由于较大非整次谐波分量的存在, 基于工频傅氏算法的距离保护将受到较大的影响。

表 1 未发生换相失败时故障电流谐波含量

Table 1 Harmonic components of fault current when the commutation failure doesn't occur

t/ms	电流谐波幅值/kA					
	0 Hz	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	720 Hz
20	3.62	1.16	0.62	0.043	0.067	0.34
40	1.09	2.02	0.71	0.016	0.035	0.39

表 2 发生换相失败时故障电流谐波含量

Table 2 Harmonic components of fault current when the commutation failure occurs

t/ms	电流谐波幅值/kA					
	6 Hz	26 Hz	50 Hz	58 Hz	83 Hz	100 Hz
20	1.54	0.69	2.44	0.41	0.80	0.43
40	1.03	0.36	3.49	0.45	0.8	0.42

此外, 通过全周傅氏算法提取工频相量需要一个周波的数据。如果一个周波内同时存在正常换相和换相失败两个状态下的跨窗数据, 也会导致信号中工频相量无法准确地提取。

## 1.2 基于换相失败信息检测的交流线路距离保护新方法

由以上分析可知, 因为当逆变器未发生换相失败时测量电流主要包含工频分量和整次谐波分量, 所以基于工频相量的距离保护所受的影响较小; 而在换相失败期间, 较大含量的非整次谐波的存在使得距离保护性能受影响较大。因此, 为了防止换相失败对距离保护的判别造成影响, 可利用站内其他元件对换相失败现象进行实时检测, 并将检测结果信息共享给距离保护。若检测到换相失败现象发生, 则将距离保护闭锁; 若检测到换相失败消失, 再将保护重新投入。

基于以上原理, 提出了一种基于换流站站域的换相失败信息检测的交流线路距离保护新方法, 保护的具体流程如图 2 所示。在故障发生之后, 首先

利用换相失败判据根据当前时刻一段时间内的数据判断该时间段内换相失败是否发生。如果期间有换相失败发生, 则在下一个采样时刻重新判别; 如果期间未发生换相失败, 则开放距离保护。利用距离保护判别区内、外故障, 如果判断故障位置位于区内, 距离保护将动作, 否则在下一个采样时刻回到换相失败判据重新判别。

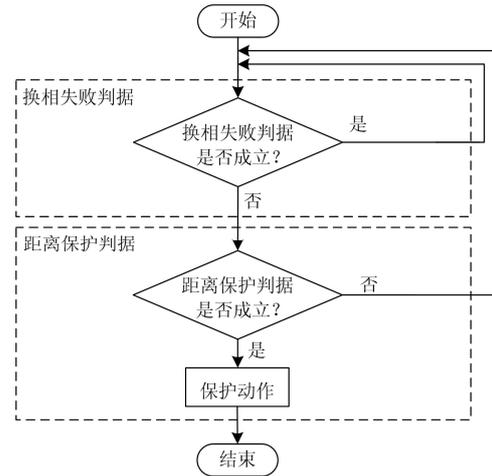


图 2 基于换流站站域的换相失败信息检测的交流线路距离保护流程图

Fig. 2 Flow chart of distance protection for AC line based on the commutation failure information detection

## 1.3 换相失败判据的提出

基于站域换相失败信息的交流线路距离保护新方法首先需要对换相失败进行判别。在换流区保护中, 换相失败保护可以对逆变器是否发生换相失败进行检测, 其主要工作原理如下。

图 3 所示为 12 脉波逆变器的结构示意图。当逆变器正常换相时, 晶闸管为 VT1、VT2 至 VT12 的顺序导通。在顺序导通期间的任意时刻, 总有位于非同桥臂上的两个晶闸管导通。例如, 当晶闸管 VT1 和 VT2 同时导通时, 直流电流  $i_{dH}$  经过晶闸管 VT1 流入交流侧 a 相, 由于三相电流之和为零, b 相电流为 0, c 相电流  $i_c = -i_a$ 。因此, 在晶闸管导通期间, 有  $i_{dH} = i_a = -i_c$  成立。若考虑换相过程, 假设由 VT1 换相至 VT3, 则有  $i_{dH} = i_a + i_b = -i_c$  成立。可见在任意时刻, 直流电流  $i_{dH}$  始终与交流侧三相电流中最大电流值的绝对值保持相等。

当逆变器发生换相失败时, 以 VT1 到 VT5 换相为例, 若阀 VT5 触发时, 由于换相角较大, 导致阀电压过零点后 VT1 上还有截流子。在正向电压的作用下, 不加触发脉冲 VT1 也可重新导通, VT5

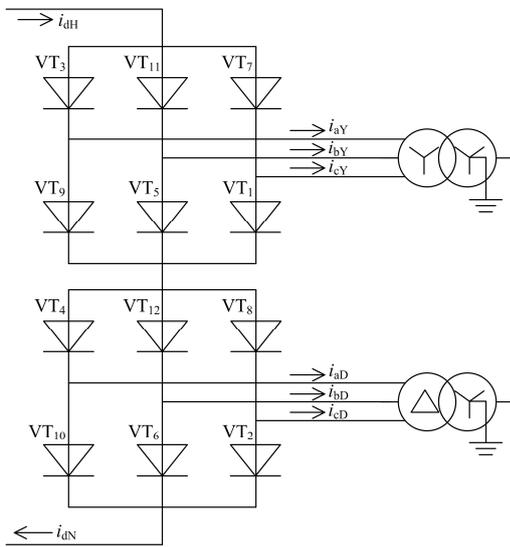


图3 逆变侧12脉波换流器结构示意图

Fig. 3 Structure of 12 pulse converter at the inverter side

倒换相至VT1。当VT7触发导通时，同一个桥臂上的VT1和VT7同时导通形成旁通对，直流侧的电流*i<sub>dH</sub>*大大增加，且不再与交流侧三相电流中最大电流值相等。可见，在换相失败发生时，会出现直流电流大于交流三相电流最大值的情况。因此，根据此特征可以构造判据来判别换相失败是否发生<sup>[16-17]</sup>。

$$\begin{cases} \text{Y桥 } i_{dY} = \max(i_{dH}, i_{dN}) - \max(|i_{aCY}|) > i_{set} \\ \text{D桥 } i_{dD} = \max(i_{dH}, i_{dN}) - \max(|i_{aCD}|) > i_{set} \end{cases} \quad (4)$$

式中：*i<sub>dY</sub>*和*i<sub>dD</sub>*分别表示Y桥和D桥相连的逆变器两侧差动电流；*i<sub>dH</sub>*和*i<sub>dN</sub>*分别表示逆变器直流出口两侧测量电流； $\max(|i_{aCY}|)$ 和 $\max(|i_{aCD}|)$ 分别表示逆变器出口Y桥和D桥三相电流最大值；*i<sub>set</sub>*为设定电流。

换相失败保护可以利用式(4)来判定在每个采样时刻换相失败是否发生，并根据一定时间窗内的换相失败次数来决定是否出口故障<sup>[18-19]</sup>。为了改善距离保护的性能，在换相失败利用判据(4)在每个采样时刻对换相失败是否发生进行判别后，需要将判别结果信息通过站内通信传输给距离保护。

如果在当前时刻向前推30ms的时间段内，逆变站内换相失败保护传输的信息是判据(4)均不满足，则可认为在此期间未发生换相失败，距离保护开放。如果30ms内换相失败保护传输的信息是判据(4)存在满足的情况，说明期间发生了换相失败，距离保护将被闭锁。为了避免可能使用到跨窗数据，距离保护将采用30ms中后20ms时间段内的数据，然后通过全周傅氏算法对工频相量进行提取，基于此对故障位置做出判断。

### 1.4 站内通信延时的影响

在换相失败信息由换相失败保护传输过程中，存在着通信延时的影响。如果通信延时为Δ*t*，距离保护原本的动作时间为*t<sub>op</sub>*，则距离保护最终的动作时间为*t<sub>op</sub>*+Δ*t*。目前，由于在直流换流站还未建立如交流变电站站内信息交互的通信网络，所以我们借鉴交流变电站站域信息通信延时对直流换流站信息交互延时进行分析。文献[20-21]提到，交流变电站站内GOOSE和SV网传输信息时，传输时延应不大于5ms。如果将交流变电站的GOOSE通信网络应用在直流换流站，那么这个通信延时对于距离保护是可以接受的。

## 2 仿真分析

### 2.1 模型搭建

为了验证所提出的新保护方法的动作性能，在PSCAD/EMTDC仿真环境下搭建了±800kV特高压直流输电系统模型，其基本结构如图4所示。

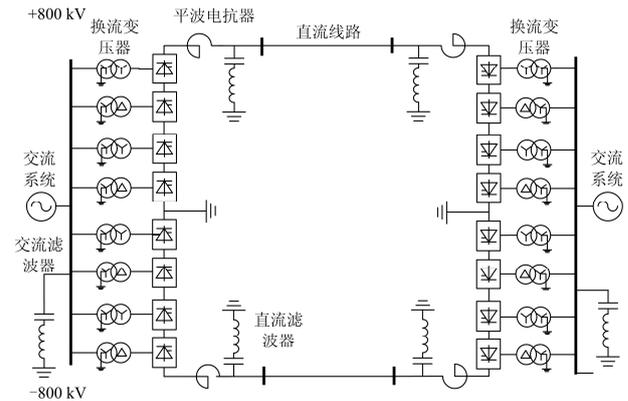


图4 高压直流输电系统结构示意图

Fig. 4 Structure of HVDC transmission system

直流输电系统的主要参数如下所示。系统额定传输功率为*P<sub>N</sub>*=5000MW，直流额定电压*U<sub>N</sub>*=800kV，额定电流*I<sub>N</sub>*=3.125kA。整流侧换流变压器额定功率为750.6MVA，绕组线电压比为525kV/169.9kV，短路阻抗为18%；逆变侧换流变压器额定功率为750.6MVA，绕组线电压比为160.5kV/525kV，短路阻抗为18%。

逆变侧交流系统设置如下，电能通过直流系统传输并经过换流站逆变为交流后，分别经由两条交流线路输送到电流受端，如图5所示。输电线路*l<sub>1</sub>*全长为100km，线路*l<sub>2</sub>*全长为80km。所提出的新型距离保护的安装位置在线路*l<sub>1</sub>*上，故障点位置分别位于图5中保护区内的*F<sub>1</sub>*处(线路中点，距离保护安装处50km)以及保护区外的*F<sub>2</sub>*处(线路中点，

距离保护安装处 40 km), 仿真实验中所有的故障发生时刻均设置在 0.8 s, 故障持续时间为 0.2 s。

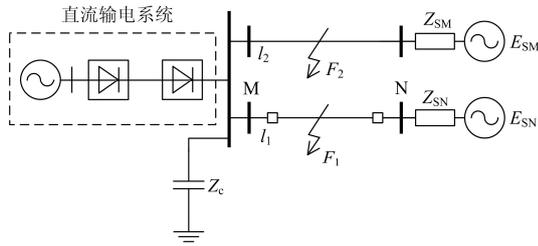


图 5 高压直流输电系统逆变侧交流系统结构图

Fig. 5 Model of AC transmission system at the inverter side

## 2.2 仿真结果分析

### 2.2.1 换相失败判据的性能分析

首先, 需要对换相失败判据的准确性进行验证。图 6 所示为当  $F_1$  处发生三相短路故障时, 由式 (4) 计算得到的一个逆变器的 Y 桥和 D 桥差动电流  $i_{dY}$  和  $i_{dD}$  以及设定电流  $i_{set}$  的波形, 其中  $i_{set}$  设为 0.1 倍的额定电流值。

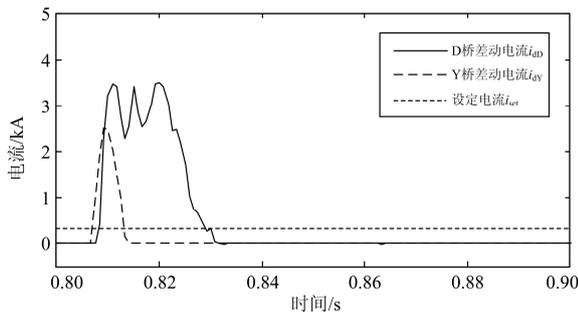


图 6 交流线路  $F_1$  处发生三相故障时换流器差动电流波形

Fig. 6 Waveform of differential current of converter

when a three-phase fault occurs at  $F_1$

由图 6 可知, 在故障发生后, Y 桥和 D 桥相连的逆变器都发生了换相失败, 并且换相失败均仅发生在故障初期。其中, Y 桥的换相失败现象很快消失, D 桥换相失败现象持续到 0.832 s 才消失。

根据本文提出的差动保护判据, 只有在 30 ms 内, 逆变侧所有的 12 脉波换流器的差动电流瞬时值  $i_{dY}$  和  $i_{dD}$  均不满足判据(4)的情况下, 距离保护才能开放。仿真结果表明, 在此故障情况下, 距离保护在约 0.862 s 时刻被开放。考虑到通信延时的影响, 基于 1.4 小节分析, 假定换相失败保护的判别结果传输到距离保护的通信延时长为 5 ms, 则距离保护最终动作出口时间为 0.867 s。

### 2.2.2 换相失败对于距离保护的影响分析

根据理论分析可知, 在交流故障发生后引起的换相失败将导致无法准确提取工频相量, 进而导致

距离保护无法精准测距。因此, 对换相失败下传统距离保护的性能进行了测试。图 7 和图 8 分别为区内  $F_1$  处单相接地故障以及区外  $F_2$  处单相接地故障发生时, 利用全周傅氏算法对工频相量提取之后, 再根据式(1)计算得到的故障距离曲线图。

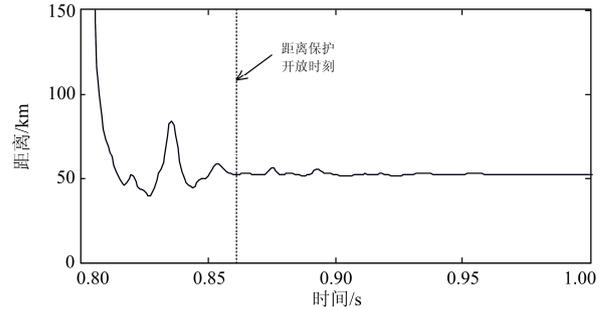


图 7 保护区内  $F_1$  处单相接地故障时距离保护测距曲线

Fig. 7 Waveform of measure distance when a three-phase fault occurs at  $F_1$

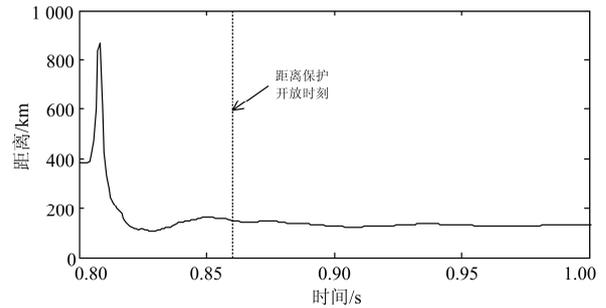


图 8 保护区外  $F_2$  处单相接地故障时距离保护测距曲线

Fig. 8 Waveform of measure distance when a three-phase fault occurs at  $F_2$

由图 7 可知, 在换相失败发生期间, 距离保护的测量距离最高可以达到 84.5 km, 最低为 39.8 km, 测量误差较大。可见, 与理论分析一致, 换相失败期间基于工频量的距离保护性能会受到影响。若采用了提出的距离保护新方法, 在换相失败期间, 距离保护闭锁; 在换相失败消失以后, 距离保护才会被开放。如图 7 所示, 对比保护闭锁期间的测距结果, 保护开放后测距更为稳定和准确。因此, 所提出的保护新方法可以提升距离保护的可靠性。

由图 8 可知, 在换相失败发生期间, 距离保护在区外故障也较为不稳定。若在换相失败期间可以将保护闭锁, 可以提高保护的可靠性。

以上仿真结果可知, 当故障初期由于换相失败的存在, 距离保护测距存在着较大的误差, 甚至出现了区外故障, 保护测距落入了动作区的情况。采用本文提出的距离保护新方法可以提升保护的可靠性。

### 2.2.3 基于站域信息的新型距离保护性能分析

考虑不同故障情况，对所提出的基于站域信息的距离保护性能进行全面仿真验证。考虑各种不同类型的故障情况：不同相发生故障、不同故障位置以及带不同阻值过渡电阻等。

根据表 3 的仿真结果，在直流线路区外线路  $l_2$  上发生各种不同类型的交流故障时，由于新保护方案在换相失败发生期间将距离保护闭锁，因此，距离保护可以避免换相失败对其判别结果的影响。在此情况下，新保护方法均可以可靠不动作。由表 4 数据可知，在区内(80 km 以内)发生各种不同类型的故障时，距离保护均能够可靠动作。综上，新提出的距离保护方法能够准确区分线路区内外故障，具有较高的可靠性。

表 3 区外  $l_2$  线路故障时部分仿真结果

Table 3 Parts of simulation results when external faults occur on the  $l_2$

故障类型	单相接地	两相短路	三相短路
过渡电阻	0 Ω	100 Ω	—
距离保护动作结果			
25	不动作	不动作	不动作
故障	不动作	不动作	不动作
50	不动作	不动作	不动作
距离/km	不动作	不动作	不动作
75	不动作	不动作	不动作
100	不动作	不动作	不动作

表 4 区内  $l_1$  线路故障时部分仿真结果

Table 4 Parts of simulation results when internal faults occur on the  $l_1$

故障类型	单相接地	两相短路	三相短路
过渡电阻	0 Ω	100 Ω	—
距离保护动作结果			
25	动作	动作	动作
故障	动作	动作	动作
50	动作	动作	动作
距离/km	动作	动作	动作
75	动作	动作	动作
100	不动作	不动作	不动作

## 3 结论

本文提出了一种基于高压直流换流站站域信息的交流线路距离保护方法，通过理论分析和仿真实验得到了以下结论：

1) 基于理论分析可知，由于在换相失败期间，电压电流信号中含有较大分量的非整次谐波分量和非周期分量，会导致难以准确计算得到工频相量。考虑到可以利用站内其他信息对换相失败进行检测，在换相失败发生期间将距离保护闭锁，从而消除换相失败对距离保护的影响。基于以上分析，提出了一种基于高压直流换流站站域信息的交流线路

距离保护方法。

2) 当逆变器正常换相时，逆变器直流侧电流与交流侧电流基本相等，而当换相失败发生时，由于逆变器同桥臂晶闸管导通，会出现逆变器直流侧电流远大于交流侧电流的情况。因此，可以根据以上故障特征对换相失败的发生进行判别。

3) 在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下建立高压直流输电系统以及交流送出线路模型，并对所提保护方法的性能进行验证。大量仿真结果表明，新提出的距离保护可以避免换相失败对其的影响，能够可靠地应对交流线路区内、外发生的不同类型的故障。

## 参考文献

[1] 樊占峰, 刘星, 刘益青, 等. 利用站域信息的智能变电站变压器后备保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 140-146.  
FAN Zhanfeng, LIU Xing, LIU Yiqing, et al. Scheme for transformer backup protection using substation-area information in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 140-146.

[2] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.  
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.

[3] 梁鑫钰, 李伟, 张哲, 等. 基于站域信息的各自投研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 50-56.  
LIANG Xinyu, LI Wei, ZHANG Zhe, et al. Automatic bus transfer based on substation area information[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 50-56.

[4] 李志坚, 潘书燕, 宋斌, 等. 智能变电站站域保护控制装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 107-113.  
LI Zhijian, PAN Shuyan, SONG Bin, et al. Development of substation area protection and control device in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 107-113.

[5] 田伟, 刘更, 原宇光, 等. 基于站域保护的变压器中性点地刀智能切换技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 170-175.  
TIAN Wei, LIU Geng, YUAN Yuguang, et al. Research on the smart switching technology of transformer neutral point earthing switch based on substation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 170-175.

[6] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 7-14.

[7] 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.
- [8] 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.
- [9] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.  
HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [10] 李海峰, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(二)故障线路的方向保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 43-49.  
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part two response of the directional protection for faulted line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 43-49.
- [11] 黄少锋, 费彬, 申洪明, 等. 换相失败对距离保护的影响分析及防范措施的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 123-128.  
HUANG Shaofeng, FEI Bin, SHEN Hongming, et al. Effect of commutation failure on distance protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 123-128.
- [12] 费彬. HVDC 换相失败对交流保护的影响及对策[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
FEI Bin. Research on the effect of HVDC commutation failure on the relay protection and its countermeasures[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [13] 张璞, 王钢, 李海峰. 直流馈入下的输电线路距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 56-62.  
ZHANG Pu, WANG Gang, LI Haifeng. Performance of distance protection for transmission lines in a DC/AC interconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 56-62.
- [14] 王峰, 刘天琪, 周胜军, 等. 谐波对 HVDC 系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4888-4894.  
WANG Feng, LIU Tianqi, ZHOU Shengjun, et al. Mechanism and quantitative analysis method for HVDC commutation failure resulting from harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4888-4894.
- [15] 索南加乐, 张健康, 刘林林, 等. 交直流混联系统对距离保护暂态超越的影响及解决措施[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 57-61.  
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, LIU Linlin, et al. Impact of AC-DC component power system on distance protection transient overreach and resolving measures[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(4): 57-61.
- [16] 姜姝. HVDC 换流器故障分析与保护原理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
JIANG Shu. A study on fault analysis and protection principle for HVDC converter[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [17] 宋臻吉, 邢海文, 马龙, 等. 换流站换相失败保护原理分析[J]. 山东电力技术, 2015(5): 45-48.  
SONG Zhenji, XING Haiwen, MA Long, et al. Commutation failure protection principle in convertor station[J]. Shandong Electric Power, 2015(5): 45-48.
- [18] 贺智, 蔡泽祥. 高压直流输电系统继电保护原理和技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 57-58.
- [19] 刘之尧, 唐卓尧, 张文峰, 等. 直流换相失败引起继电保护误动分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 104-107.  
LIU Zhiyao, TANG Zhuoyao, ZHANG Wenfeng, et al. The research on the mal-operation of protection caused by commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 104-107.
- [20] 张新昌, 张项安. 层次化保护控制系统及其网络通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 129-133.  
ZHANG Xinchang, ZHANG Xiangan. Research of hierarchical protection and control system and its communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 129-133.
- [21] 李俊刚, 张爱民, 彭华夏, 等. 区域层次化保护系统研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 34-40.  
LI Jungang, ZHANG Aimin, PENG Huaxia, et al. Research and design of zone area hierarchical protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 34-40.

收稿日期: 2017-12-30; 修回日期: 2018-05-25

作者简介:

王增超(1987—), 男, 硕士, 从事电力系统继电保护管理与技术研究工作;

郑俊超(1992—), 男, 博士, 研究方向为电力系统继电保护研究工作. E-mail: 1450350576@qq.com

(编辑 葛艳娜)