

DOI: 10.7667/PSPC180580

# 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案

周嘉阳<sup>1</sup>, 李凤婷<sup>1</sup>, 陈伟伟<sup>2</sup>, 达塔娜<sup>3</sup>, 梁路明<sup>1</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 3. 国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 针对换流设备直接接入直流母线的双端柔性直流配电网的保护配置问题, 提出一种基于单端电气量的线路保护方案。首先分析了双端柔性直流配电网的直流线路故障特征, 其次重点分析了处于不同母线处的换流器并联电容之间的放电特征差异。结合该差异设计出能够有效识别故障区域、在 5 ms 内隔离故障的主保护。同时为解决主保护可能存在检测失败的问题, 设置了利用过电流判据以及动作延时的后备保护方案。最后通过 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型验证了所提方案的有效性。

**关键词:** 直流配电网; 故障检测; 并联电容; 电容放电; 电流微分

## Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge

ZHOU Jiayang<sup>1</sup>, LI Fengting<sup>1</sup>, CHEN Weiwei<sup>2</sup>, DA Tana<sup>3</sup>, LIANG Luming<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Economics and Technology Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830047, China; 3. Urumuqi Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumuqi 830047, China)

**Abstract:** In order to solve the protection configuration problem of two-terminal flexible DC distribution network when the converters access to DC buses directly, this paper presents a new protection scheme based on single-end electrical signals. Firstly, the fault characteristics of the two-terminal flexible DC distribution network are analyzed, and the difference of discharge characteristics of converts' shunt capacitor at different busbars are analyzed especially. A main protection is designed based on the differences, which can identify fault areas effectively and isolate the fault within 5 ms. In order to solve the issue of failure detection of main protection, the backup protection is designed based on overcurrent criterion and action delay. Finally, a PSCAD/EMTDC simulation model is built and the simulation results show that the schemes are effective.

This work is supported by Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2016D01C036).

**Key words:** DC distribution network; fault detection; shunt capacitor; capacitor discharging; current derivative

## 0 引言

直流线路成本低、输电损耗小, 直流配电系统能减少换流设备的投入且供电可靠, 相比交流配电网更具经济和技术优势<sup>[1-5]</sup>, 如我国已经在深圳地区建立了柔性直流配电网示范工程。然而, 采用柔性换流技术的直流配电网的发展仍然面临一些亟待解决的问题, 尤其是直流系统的故障识别与保护配置一直是限制其发展的关键难题之一。

针对直流配电网保护面临的问题, 国内外相关

学者进行了一定的研究。柔性直流系统线路故障过程可分为电容放电、二极管依次导通以及全部导通 3 个阶段, 为降低故障电流对换流设备的危害, 保护需在电容放电阶段隔离故障<sup>[6-10]</sup>。直流线路的低阻特性导致相邻线路发生故障的电流大小差异很小, 致使依靠动作时间级差的过电流保护选择性较差, 且动作时间较长<sup>[11]</sup>。文献[12]提出通过断开交流侧断路器隔离直流故障的方法, 然而该方法会导致整个直流网络的关断, 尤其不能适用于包含大量负荷的直流配电网。文献[13-14]提出了基于单端电气量的测距式保护, 但是保护的速动性受采样数据长度以及计算时间等因素的影响。直流配电网线路较短一般为 3~10 km, 故障行波的传播时间非常短,

对采样频率要求非常高, 致使行波保护应用于直流配电网的适应性不佳<sup>[15]</sup>。文献[16-17]提出的基于通信系统的保护方案能够有效识别区内、外故障, 但是该方法可能存在通信失败的问题, 影响保护的可靠性。此外, 在直流故障初始阶段故障电流的上升速率极快, 微小的时间同步偏差都会导致电流差动保护很大的计算误差, 从而出现保护误动的情况<sup>[18]</sup>。

针对换流器直接接入直流母线的双端柔性直流配电网, 本文在分析处于不同母线的换流器并联电容的放电电流特征差异的基础上, 提出基于单端电气量的双端柔性直流配电网线路保护方案, 该方案能够有效区分不同线路的故障, 从而快速、有选择地切除故障线路。最后通过 PSCAD/EMTDC 搭建模型仿真验证所提方案的有效性和正确性。

## 1 直流配电网拓扑结构和故障分析

### 1.1 直流配电网拓扑结构

直流配电网的拓扑结构有三种: 辐射状直流配电网、双端直流配电网以及多端直流配电网。本文以图 1 所示的双端柔性直流配电网为例, 研究其故障特性和保护方案, 其中交、直流微网通过 AC/DC、DC/DC 换流设备直接接入直流配电网母线处, 并且线路两侧均装设直流断路器用于隔离故障。

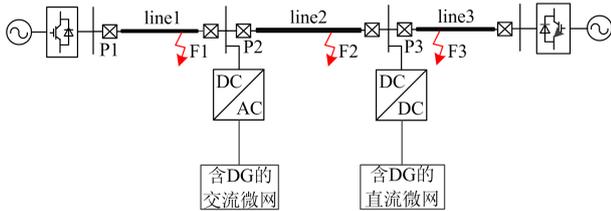


图 1 双端直流配电网拓扑结构

Fig. 1 Two-terminal DC distribution network topology

### 1.2 直流线路故障特征分析

直流线路故障可分为单极接地和极间短路故障, 分别如图 2 中的  $f_1$  和  $f_2$  所示。

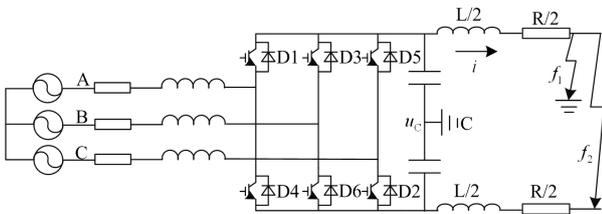


图 2 直流线路故障示意图

Fig. 2 Schematic diagram of DC line fault

直流线路发生故障后 IGBT 因自保护而关断, 直流线路故障过程分为 3 个阶段: 电容放电阶段, 二极管依次导通阶段以及二极管全部导通阶段<sup>[7]</sup>,

本文主要研究其电容放电阶段的故障特性。

#### 1.2.1 极间短路故障

直流线路极间短路故障的电容放电阶段可以用二阶微分方程表示如式(1)所示。

$$\begin{cases} LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \\ i = -C \frac{du_c}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_c$  为极间电容电压;  $i$  为线路故障电流;  $L$  为包含故障回路的电感值;  $R$  为故障回路电阻;  $C$  为极间电容值。假定故障发生时刻为  $t=0$ , 电容初始电压为额定电压  $U_0$ , 线路初始运行电流为  $I_0$ 。则线路故障电流的表达式为

$$i(t) = \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} [e^{p_1 t} - e^{p_2 t}] + \frac{i_L(0)}{p_2 - p_1} [p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}] \quad (2)$$

由式(2)可得故障电流微分的表达式为

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_0}{L(p_1 - p_2)} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) + \frac{I_0}{p_1 - p_2} (p_1^2 e^{p_1 t} - p_2^2 e^{p_2 t}) \quad (3)$$

式中:

$$p_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$p_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

结合式(3)可得故障瞬间即  $t(0+)$  时刻电流微分的值如式(4)所示。

$$\frac{di}{dt}(0+) = \frac{U_0}{L} - I_0 \frac{R}{L} \quad (4)$$

由式(4)可知电流微分初值与线路电感、故障回路电阻以及线路的运行电流有关, 且故障回路电阻越大对应的电流微分越小, 线路电感值越大, 电流微分亦越小。由于配电网线路较短, 线路电阻值很小, 因此故障回路电阻可近似为过渡电阻。

#### 1.2.2 单极接地故障

单极接地故障的电容放电阶段由故障极电容经故障回路向故障点进行放电。由于单极接地故障时, 放电电容大小以及初始电压均为极间短路的一半, 故障位置相同时回路电感值亦为极间短路故障的一半。因此单极接地故障的电流微分方程为

$$\frac{di}{dt}(0+) = \frac{U_0}{L} - I_0 \frac{2R_1}{L} \quad (5)$$

式中,  $R_1$  为单极接地故障回路电阻值。与式(4)对比可知, 相同故障位置的单极接地和极间短路故障的电流微分初值大小有所不同。

### 1.3 母线处换流器的影响

在直流线路发生故障时, VSC 和双向 DC/DC 的直流侧并联电容均会向故障点放电。图 3 为带隔离的双向全桥 DC/DC 换流器等效示意图。

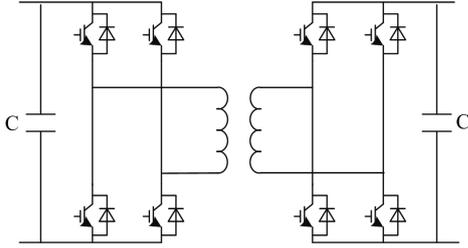


图 3 双向 DC/DC 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of bidirectional DC/DC converter

根据前述分析可知, 上述类型换流器的电容放电阶段的原理相同。然而, 处于不同母线处的 VSC 和 DC/DC 的电容放电电流特征会因其与故障点之间距离的不同以及电容之间的相互作用而存在明显差异。

#### 1.3.1 区外故障特性分析

以图 1 中 F2 处发生极间短路故障为例, 其电容放电阶段的等效电路图如图 4 所示。

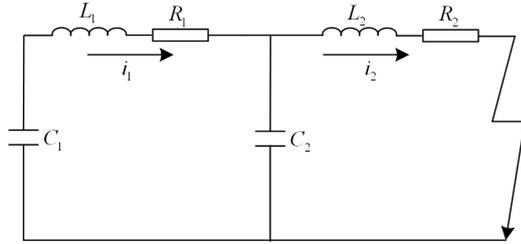


图 4 区外故障等效示意图

Fig. 4 Equivalent schematic diagram of external fault

基于基尔霍夫电压定律列写故障暂态方程为

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 = u_{C1} - u_{C2} \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 = u_{C2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $L_1$  和  $L_2$  分别为不同区段的线路电感值;  $R_1$  和  $R_2$  分别为不同区段的故障回路电阻值;  $i_1$  和  $i_2$  分别为流经线路 1 和线路 2 的故障电流, 线路电流初始值为  $I_1$  和  $I_2$ ;  $u_{C1}$  和  $u_{C2}$  分别为电容 C1 和 C2 两端的电压, 故障前的初始电压为  $U_{C1}$  和  $U_{C2}$ 。对故障  $t=0+$  时刻进行分析可得

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt}(0+) + i_1(0+)R_1 = u_{C1}(0+) - u_{C2}(0+) \\ L_2 \frac{di_2}{dt}(0+) + i_2(0+)R_2 = u_{C2}(0+) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $u_{C1}(0-)=u_{C1}(0+)=U_{C1}$ ;  $u_{C2}(0-)=u_{C2}(0+)=U_{C2}$ ;  $i_1(0-)=i_1(0+)=I_1$ ;  $i_2(0-)=i_2(0+)=I_2$ 。代入式(7)可得

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt}(0+) = \frac{(U_{C1} - U_{C2}) - I_1 R_1}{L_1} \\ \frac{di_2}{dt}(0+) = \frac{U_{C2} - I_2 R_2}{L_2} \end{cases} \quad (8)$$

从式(8)中可以看出, 由于系统正常运行时  $U_{C1}$  和  $U_{C2}$  之间偏差很小, 导致  $\frac{di_1}{dt}(0+)$  很小接近于 0, 而  $\frac{di_2}{dt}(0+)$  则很大, 因此故障初期  $i_1$  的变化速度很小,  $i_2$  的变化速度很快。

#### 1.3.2 区内故障特性分析

以图 1 中 F1 处发生极间短路故障为例, 电容放电阶段的等效电路图如图 5 所示。

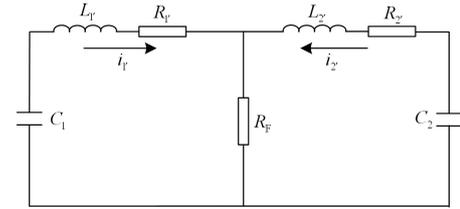


图 5 区内故障等效示意图

Fig. 5 Equivalent schematic diagram of internal fault

结合基尔霍夫电压定律列写故障态方程为

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 = u_{C1} - (i_1 + i_2) R_F \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 = u_{C2} - (i_1 + i_2) R_F \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $L_1$ 、 $R_1$  和  $L_2$ 、 $R_2$  分别为换流器 1、2 到故障点的线路电感值和电阻值;  $R_F$  为故障点的过渡电阻;  $i_1$  和  $i_2$  分别为换流器 1、2 流入故障点的电流, 其初始值分别为  $I_1$  和  $I_2$ ;  $u_{C1}$  和  $u_{C2}$  分别为电容 C1 和 C2 两端的电压, 故障前的初始电压为  $U_{C1}$  和  $U_{C2}$ 。化简式(9)可以得到故障  $t=0+$  时刻的表达式为

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt}(0+) = \frac{U_{C1} - I_1 R_1 - (I_1 + I_2) R_F}{L_1} \\ \frac{di_2}{dt}(0+) = \frac{U_{C2} - I_2 R_2 - (I_1 + I_2) R_F}{L_2} \end{cases} \quad (10)$$

由于故障初期的故障电流  $i_1$  和  $i_2$  的值不会很大, 忽略故障电流  $i_2$  的影响后可将  $i_1$  的电流微分初值简化为

$$\frac{di_1}{dt}(0+) = \frac{U_{C1} - I_1(R_V + R_F)}{L_V} \quad (11)$$

与式(8)进行对比可知,  $\frac{di_1}{dt}(0+)$  远远大于

$\frac{di_2}{dt}(0+)$ 。图 6 为在 F1、F2 处 0.7 s 时发生极间短路故障的流经保护 P1 的故障电流仿真波形图。

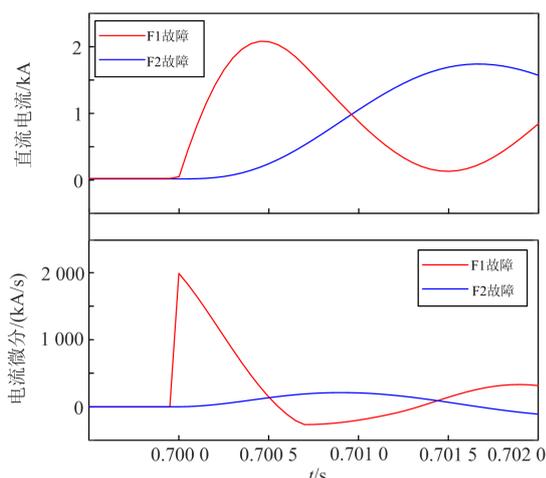


图 6 区内、外故障仿真波形图

Fig. 6 Simulation waveforms of internal and external fault

从图 6 中可以看出, 故障初期的区内故障时流经 P1 的故障电流变化速率远远大于区外故障时的电流变化速率, 且区外故障时流经 P1 的故障电流的变化速率是逐渐变大的。

## 2 保护方案设计

本节将基于前述区内、外故障特征差异设计出能够快速、有选择性地切除故障区域的线路保护方案。

### 2.1 主保护

为了避免利用双端量进行故障检测和识别带来的通信延时和失败的问题, 结合前述区内、外故障电流变化特征差异, 提出基于电流微分的主保护。以保护 P1 为例, 可将保护区域末端故障的电流微分初值作为整定值, 并且需要考虑一定的检测时间限值用于区分区内、外故障。保护判据可设置为

$$\begin{cases} \frac{di(0+)}{dt} > \frac{di}{dt}_{set} \\ t < t_{set} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\frac{di}{dt}_{set}$  为故障电流微分整定值;  $t_{set}$  为故障检测

限值时间。由于发生区内故障时, 故障电流微分在故障初期 100  $\mu$ s 以内达到最大值, 而区外故障时流过保护 P1 的电流微分在故障初期的值很小并逐渐增加至最大值, 因此结合仿真结果可设置检测限值时间  $t_{set}$  为 200  $\mu$ s, 用于区分区内、外故障。

结合式(4)可以得知, 电流微分初值大小与过渡电阻的大小以及线路的运行电流有关。考虑到极间短路故障的过渡电阻较小, 可忽略过渡电阻的影响<sup>[19]</sup>。然而, 单极接地故障的过渡电阻不能近似为 0, 且过渡电阻最大一般为十几欧姆左右<sup>[20]</sup>。因此为简化整定计算, 可将单极接地和极间短路故障的电流微分判据的整定值均设定为

$$\frac{di}{dt}_{set} = k_1 \frac{U_0}{L_c} \quad (13)$$

式中:  $L_c$  为所保护线路全长电感值;  $k_1$  为可靠系数, 取 0.2~0.3。主保护检测的是故障初期的电气量, 故障检测和计算时间可在 2 ms 内完成, 加上直流断路器在 3 ms 内切除故障, 因此主保护能够在 5 ms 内隔离故障。

### 2.2 后备保护

当主保护检测失败时, 有必要配置相应的后备保护及时隔离故障。以图 1 所示的结构进行分析如下: F3 处发生故障时, 主保护 P1、P2 均能够识别出其属于区外故障而不动作, 此时主保护 P3 应能可靠识别并动作。然而, 当主保护未能切除故障线路时, 线路故障电流将大于线路额定运行电流。因此后备保护的判据可设置为

$$I > k_2 I_r \quad (14)$$

式中,  $k_2$  可取 1.1~1.2。然而, 后备保护除了能够在主保护拒动后动作外, 还需要保证一定的选择性。因此需要配置相应的动作延时以实现保护的选择性, 图 7 为后备保护动作时间整定示意图。

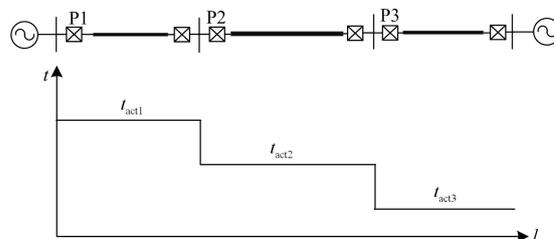


图 7 动作时间整定示意图

Fig. 7 Schematic diagram of action time setting

从图 7 中可知相邻线路后备保护的延时之间的关系为

$$\begin{cases} t_{act1} > t_{act2} > t_{act3} \\ t_{act1} = t_{act2} + \Delta t \\ t_{act2} = t_{act3} + \Delta t \end{cases} \quad (15)$$

式中： $t_{act1}$ 、 $t_{act2}$  分别为 P1 和 P2 后备保护的動作时间； $\Delta t$  为时限阶段，可设置为 5 ms； $t_{act3}$  为后备保护 P3 的動作并隔离故障的时间。P3 属于末级保护，因此不需要動作延时。当主保护 P2 检测失败或拒动时，后备保护 P2 经过 5 ms 延时之后，判断电流大小是否超过设定值进而确定是否動作。同理主保护 P1 拒动时，后备保护 P1 为了不与下一级后备保护的動作时间相重叠，需经过 10 ms 的延时后确定是否動作。此外，后备保护 P1 可作为下级线路的远后备保护。

图 8 为本文所提出的保护方案流程图。

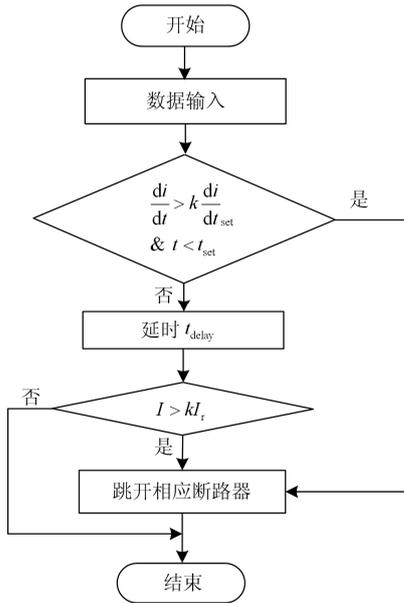


图 8 保护方案流程图

Fig. 8 Flow chart of protection scheme

如图 8 所示，输入数据满足主保护判据时，主保护動作，而当不满足主保护判据时，后备保护经过相应的延时  $t_{delay}$  后检测是否满足后备保护判据，其中不同级保护的  $t_{delay}$  的值是不同的。

### 3 仿真分析

本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 1 所示的双端柔性直流配电网。其中直流线缆 1—3 的长度分别为 4 km、3 km 和 4 km，单位长度电缆的电阻值为 0.01  $\Omega$ /km，电感值为 0.16 mH/km，直流线路额定运行电流为 1 kA。各换流设备的电压等级和容量如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

换流设备	电压	容量
VSC1	10 kV AC/ $\pm$ 10 kV DC	15 MW
VSC2	10 kV AC/ $\pm$ 10 kV DC	15 MW
VSC3	$\pm$ 10 kV DC/380 V AC	-3.5~8 MW
DC/DC	$\pm$ 10 kV DC/400 V DC	-3.5~8 MW

#### 1) 极间短路故障

分别在如图 1 中所示的故障位置 F1 和 F2 处设置 1.5 s 时发生金属性极间短路故障，图 9 为 F1 和 F2 处极间短路故障时的流经 P1 的故障电流仿真波形图。从图 9 中可以看出 F1 和 F2 处极间短路故障时流经 P1 的故障电流变化特征是不同的，其中 F1 故障的电流微分在故障初期达到最大值，而 F2 故障的电流微分在故障后则是由零逐渐增加至最大值。因此通过检测故障初期的电流微分值的大小和设定的故障检测限值时间可以准确地区分区内、外极间短路故障。

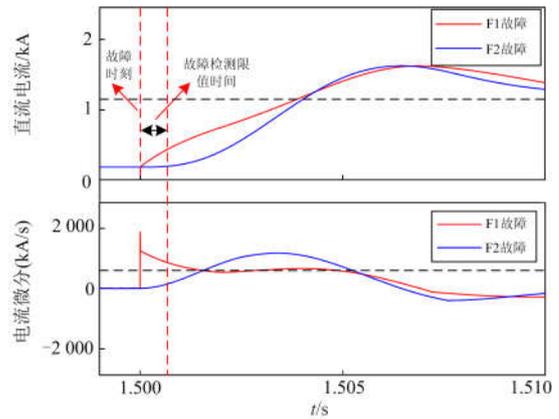


图 9 极间短路仿真波形图

Fig. 9 Simulation diagram of the pole-to-pole fault

#### 2) 单极接地故障

分别在 F1 和 F2 处设置单极接地故障，图 10 为故障电流及其微分的仿真波形图。从图中可以看出 F1 和 F2 处发生单极接地故障时，同样会出现流经 P1 的 F1 故障电流变化速度要明显快于 F2 故障电流的情况，且 F1 故障电流微分在故障初期达到最大值，而 F2 故障电流微分则需经过一定的延时达到最大值，时间远远大于故障检测限值时间 200  $\mu$ s。因此通过设定一定的检测限值时间用于判断区内、外单极接地故障是有效的。

显然，过电流保护作为主保护时，其选择性存在明显不足<sup>[11]</sup>，而电流差动保护虽能够基于通信有效识别区内、外故障，但存在通信延时等问题。由

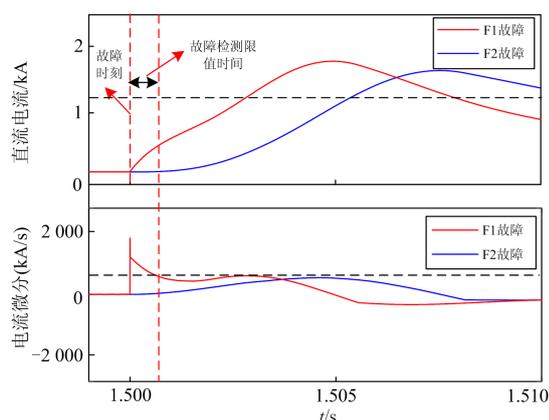


图 10 单极接地故障仿真波形图

Fig. 10 Simulation diagram of the pole-to-ground fault

仿真结果可知, 相比上述保护方案, 本文所提主保护方案能在不依靠通信设备的情况下基于单端电气量有效识别故障区域, 不存在通信延时的问题, 能够满足保护速动性和选择性的要求。

### 3) 后备保护动作性能

如图9中所示, F2处发生故障时, 主保护检测失败后, 故障电流在5 ms延时后超过设定值, 同线路的后备保护P2能够检测到过电流并动作。图11为主保护P2动作后的故障电流仿真波形图, 从图中可看出, 主保护P2在故障发生后5 ms切除故障, 流经P1的电流开始衰减且小于整定值, 因此通过检测故障电流大小能够确定断路器是否跳开, 从而确定上一级的远后备保护是否需要动作。

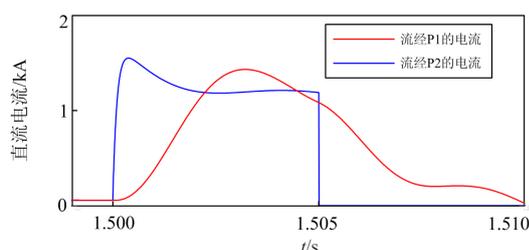


图 11 主保护动作仿真图

Fig. 11 Simulation diagram of main protection action

## 4 结论

本文在分析处于不同母线处换流器电容放电特征的基础上, 提出了一种适用于双端柔性直流配电网的线路保护方案, 其中主保护结合电流微分与故障检测限值时间用于识别区内、外故障, 并针对主保护可能存在检测失败的情况, 设置了基于过电流判据的后备保护方案。仿真结果表明, 本文所提主保护能够基于单端电气量快速、有选择地切除故障线路, 后备保护能够在主保护拒动时可靠动作。

## 参考文献

- [1] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [2] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.  
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [3] 毋炳鑫, 谢卫华, 叶红恩. 交直流混合微电网直流母线电压稳定控制技术[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 62-66.  
WU Bingxin, XIE Weihua, YE Hongen. Study on DC bus voltage deviation control autonomy in hybrid AC/DC micro-grid[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 62-66.
- [4] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.  
XU Huojü, MIAO Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
- [5] 严道, 焦彦军, 杜哲. 基于柔性直流技术的一种交直流混合配电网可行性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 110-116.  
YAN Xiao, JIAO Yanjun, DU Zhe. Feasibility study of AC/DC hybrid distribution network using VSC-based DC technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 110-116.
- [6] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [7] 刘思源, 徐东旭, 梅念, 等. 直流侧故障对模块化多电平换流器的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 48-54.  
LIU Siyuan, XU Dongxu, MEI Nian, et al. Research on the effect of DC side fault on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 48-54.
- [8] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.  
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.

- [9] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.  
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [10] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.  
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.
- [11] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12.  
LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.
- [12] TANG L, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [13] 李猛, 贾科, 毕天姝, 等. 适用于直流配电网的测距式保护[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 719-724.  
LI Meng, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Fault distance estimation-based protection for DC distribution networks[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 719-724.
- [14] 和敬涵, 周琳, 罗国敏, 等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 158-165.  
HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.
- [15] 陈福锋, 杨阳, 宋国兵, 等. 单端量行波保护在中压柔性直流配电网的适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 50-55.  
CHEN Fufeng, YANG Yang, SONG Guobing, et al. Adaptability analysis of single terminal traveling wave protection in mid-voltage DC distribution based on VSC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 50-55.
- [16] 戴志辉, 葛红波, 陈冰研, 等. 柔性中压直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 78-86.  
DAI Zhihui, GE Hongbo, CHEN Bingyan, et al. Line protection schemes for flexible medium voltage DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 78-86.
- [17] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.  
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [18] FLETCHER S D A, NORMAN P J, FONG K, et al. high-speed differential protection for smart DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2610-2617.
- [19] 高仁栋, 吴在军, 范文超, 等. 基于电流微分初始值的 VSC 直流配电系统线路故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 27-33.  
GAO Rendong, WU Zaijun, FAN Wenchao, et al. Line fault location method of VSC-based DC distribution system based on initial current differential value[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 27-33.
- [20] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.  
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.

收稿日期: 2018-05-16; 修回日期: 2018-07-27

作者简介:

周嘉阳(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流电网保护技术; E-mail: 13109925851@163.com

李凤婷(1965—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事含间歇性能源、负荷的系统运行控制与保护研究。E-mail: xjft2009@sina.com

(编辑 周金梅)