

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202115

# 基于暂态功率方向的柔性直流配电网线路单极接地保护方法

李卫丰<sup>1</sup>, 王超<sup>2</sup>, 薛永端<sup>1</sup>, 李娟<sup>3</sup>, 徐丙垠<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 济南 250101;  
3. 国网江苏省电力科学研究院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 单极接地故障是柔性直流配电网最为常见的故障。采用小电流接地方式的 MMC 型柔性直流配电网发生单极接地故障时, 短路电流小(主要是分布电容电流), 故障识别困难, 柔性直流配电网接地故障检测亟待解决。利用相模变换建立了基于 MMC 的多端环状柔性直流配电网单极接地故障的零模网络电路, 分析了零模网络换流器和直流线路的阻抗特性。在所关注的特征频段内将零模网络简化等效, 分析得到故障线路两端的零模电压导数与零模电流的极性均相反, 非故障线路两端至少有一端的零模电压导数与零模电流极性相同。利用该故障线路与非故障线路差异特征, 设计了一种利用暂态功率的方向纵联保护方法。其中故障线路两端暂态功率方向均为负, 非故障线路两端功率方向至少有一端为正。最后在 PSCAD/EMTDC 平台搭建仿真验证。结果表明, 所提保护方法能可靠识别区内区外故障, 不依赖线路边界元件, 无需数据同步, 具有较好的耐受过渡电阻能力。

**关键词:** 柔性直流配电网; 模块化多电平换流器; 单极接地故障; 暂态; 方向纵联保护

## A flexible DC distribution network line unipolar grounding protection method based on transient power direction

LI Weifeng<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>2</sup>, XUE Yongduan<sup>1</sup>, LI Juan<sup>3</sup>, XU Bingyin<sup>2</sup>

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Kehui Electric Co., Ltd., Jinan 250101, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Unipolar grounding faults are the most common faults in flexible DC distribution networks. When a single-pole grounding fault occurs in MMC-type flexible DC distribution networks using small current grounding methods, the short-circuit current is small (mainly distributed capacitance current) and fault identification is difficult. The ground fault detection of flexible DC distribution network is an urgent matter. Phase-to-mode conversion is used to establish a multi-terminal ring-shaped flexible DC distribution network with a single-pole ground fault zero-mode network circuit based on MMC, and the impedance characteristics of the zero-mode network converter and the DC line are analyzed. In the characteristic frequency band of interest, the zero-mode network is simplified and made equivalent, and the relationship between the transient zero-mode current and the zero-mode voltage of each line is obtained. Based on the distribution characteristics of the transient zero-mode current and zero-mode voltage of each line, a directional longitudinal protection method using transient power is designed. The transient power directions at both ends of the fault line are all negative. At least one end of the power direction at both ends of the non-faulty line is positive. Finally, a simulation verification is built on the PSCAD/EMTDC platform. The results show that the protection method is simple and can be implemented reliably. It also has a good ability to withstand transition resistance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077221).

**Key words:** flexible DC grid; MMC; single pole ground fault; transient state; directional pilot protection

## 0 引言

随着电力电子技术的进步, 柔性直流配电网得

到长足发展, 相比交流配电网, 柔性直流配电网具有供电容量大、线路损耗小、电能质量好、无需无功补偿以及适于各类电源和负载接入等优点<sup>[1-5]</sup>, 尤其是多端柔性直流配电系统, 在供电可靠性方面具有明显优势<sup>[6]</sup>。模块化多电平换流器(Modular Multilevel

Converter, MMC)由于其输出特性好、易于扩展和结构模块化等优势,基于 MMC 的多端柔性直流配电网逐渐成为国内外学者研究的热点<sup>[7-11]</sup>。

为了实现直流配电网的安全运行,保护技术是直流配电网研究的重点内容之一,线路单极接地短路故障是直流系统最为常见的故障,单极接地故障特征与接地方式密切相关,基于 MMC 的柔性直流配电网多采用小电流接地方式<sup>[12-13]</sup>(直流侧大电阻钳位接地、交流侧不接地或经大电阻接地),发生单极接地故障时故障电流小<sup>[14]</sup>,正、负极极间电压保持不变,功率正常传输,在绝缘满足要求的情况下,允许系统工作一段时间<sup>[15]</sup>。然而,由于健全极电压升高为原来的 2 倍,正负极电压不对称运行,同时交流侧电压将出现直流偏置,会严重威胁系统的绝缘。因此,有必要对多端柔直配电网的单极接地故障保护进行深入研究。

采用小电流接地的 MMC 型柔性直流配电网发生单极接地故障后因故障特征不明显,故障识别难度大。文献[12-13]利用线路两端差流的短时能量和小波时间熵进行单极接地故障检测,可以正确检测直流线路的单极接地故障,但该方法对硬件要求较高。文献[15]研究了基于直流线路两端的直流电抗器的保护方案,利用线路边界对电流高频分量的阻滞作用,通过小波变换提取区内、外故障的高频暂态能量差异区分线路故障,能兼顾可靠性和速动性。文献[16]利用线路正负极暂态电压 Pearson 相关系数在区内外故障时的差异进行故障识别,其本质为利用线路两端的直流电抗器对电流的抑制作用,该方法不受过渡电阻影响,能可靠识别单极接地故障。文献[17]提出利用附加直流电抗器初始电压的单端量故障识别方案,该方案无需通信,但其关于保护的整定值依赖于附加电感值,且需要较高的采样频率。文献[15-17]均依赖于线路两端的直流电抗器充当边界元件,然而,并非所有的直流配网都支持在直流出口侧配备电抗器<sup>[18]</sup>,且直流电抗器参数以及边界整定值仍未有一套比较完善系统的计算方法<sup>[19]</sup>。文献[20]针对交流侧大电阻接地方式下发生单极接地故障时电流差动保护拒动这一问题,通过在交流侧中性点短时投切小电阻,增大故障电流,使得电流差动保护动作,该方法需要投入额外的设备,并且在投入小电阻过程中存在过流的风险。文献[21]基于零模网络建立了区内、区外故障的数学模型,通过零模差动电流测量值分别与通过区内、区外数学模型预先计算值的相似度比较来识别故障线路,保护定值整定简单,但其仍然受过渡电阻和故障位置影响。文献[22]利用线路两端正负极电流故障分

量的极性关系识别故障区段,不受线路分布电容影响,但其保护整定依赖于仿真数据。文献[23]分析了直流侧经钳位电阻接地、交流侧直接接地和交流侧经电阻接地三种接地方式下单极接地故障的特性,针对直流侧经钳位电阻接地和交流侧大电阻接地方式,仅分析了故障后的稳态结果,且其忽略了线路对地电容电流,对于暂态过程未予以分析。

随着未来直流配电系统的发展,从电压等级、输出功率和供电半径需求的逐步提高,线路的长度会变长<sup>[24]</sup>,线路的分布式电容已然不能忽视。采用小电流接地方式的直流配电网发生单极故障时故障线路和非故障线路的差异体现在暂态电流上<sup>[13]</sup>,目前未有文献对该暂态过程进行详细分析,且关于柔直系统单极接地故障的保护研究相对尚少。针对上述问题,本文以基于 MMC 的多端环状柔性直流配电网为研究对象,首先通过相模变换分析了系统单极接地故障的零模网络,在所关注频段内将零模网络简化,进一步分析得到故障后线路的暂态零模电流的分布特征;其次基于特征频段内暂态零模电流的分布特征,设计一种方向纵联保护;最后在 PSCAD/EMTDC 搭建仿真验证理论分析的正确性和保护方案的可行性。

### 1 系统模型

本文以基于 MMC 的四端环状直流配电系统作为研究对象,其系统结构如图 1 所示<sup>[25]</sup>。图中:MMC1-MMC4 为四端换流站, S<sub>1</sub>-S<sub>4</sub> 为交流系统,换流站经联结变压器与交流系统相连, l<sub>1</sub>-l<sub>4</sub> 为直流配电网线路, f<sub>1</sub>-f<sub>4</sub> 分别为线路 l<sub>1</sub>-l<sub>4</sub> 上故障点, CB 为线路两端断路器,也是保护安装的位置。

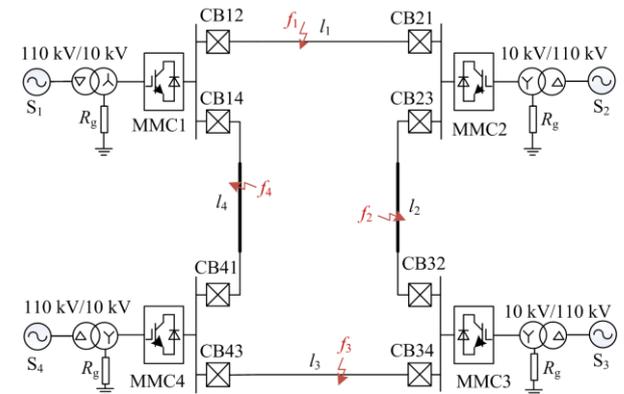


图 1 系统拓扑

Fig. 1 System topology

系统采用主从控制方式, MMC1 定直流电压控制, MMC2、MMC3、MMC4 定功率控制。柔直系

统接地点有直流侧接地点和交流侧联结变压器接地点。小电流接地方式的柔直系统具有更高的供电可靠性, 本文采用联结变压器换流器侧经大电阻接地, 直流侧不接地, 接地电阻  $R_g$  参考深圳宝龙柔直示范工程选为  $2\ 500\ \Omega$ 。

## 2 零模网络故障暂态电压电流分析

### 2.1 两相相模变换

单极接地故障时正负极电气量不对称, 文献[26]构造了一种适用于直流线路的相模解耦方法, 变换矩阵如式(1)、式(2), 其中  $x_p$  和  $x_n$  为直流线路正、负极电气量, 其中正负极电流参考方向均为从母线流向线路; 通过相模变换, 将不对称的正负极电气量变换为独立的一模和零模分量<sup>[16]</sup>,  $x_1$ 、 $x_0$  为对应的一模和零模电气量。

$$\mathbf{H} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

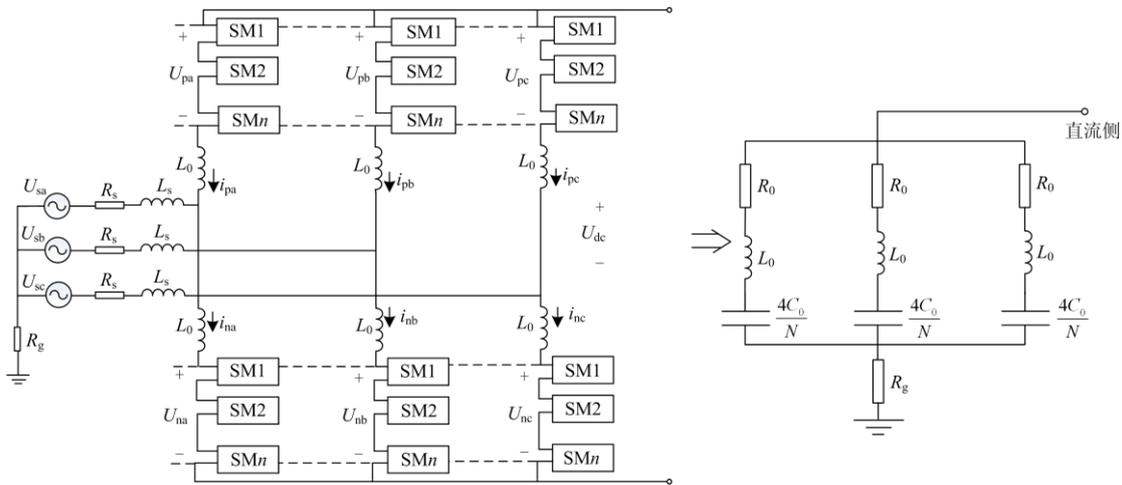


图 2 MMC 零模等效模型

Fig. 2 MMC zero-mode equivalent model

因此, MMC 零模等效的集中参数为

$$\begin{cases} R_{eq} = \frac{R_0}{3} + 2R_g \\ L_{eq} = \frac{L_0}{3} \\ C_{eq} = 12C_0 / N \end{cases} \quad (3)$$

MMC 阻抗为

$$Z_{mmc} = \frac{R_0}{3} + 2R_g + \frac{sL_0}{3} + \frac{N}{s12C_0} \quad (4)$$

式中,  $s$  为拉普拉斯算子。根据式(4), 可将 MMC 零模阻抗等效为一 RLC 串联集中模型。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_0 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_p \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.2 换流器零模等效分析

由于 MMC 是非线性元件, MMC 直流侧等效阻抗是在某个工作点上的线性化系统给出的<sup>[27]</sup>, 即在某个工作点上, 可将 MMC 的阻抗线性等效。采用小电流接地方式时, 由于接地大电阻的存在, 直流侧发生单极接地故障不会出现过流, 换流器可带故障运行一段时间<sup>[21]</sup>(不发生闭锁), 因此, MMC 的阻抗在正常运行状态的零模阻抗与发生单极接地故障时的零模阻抗一致。

零模电流通道需要以大地为回路, MMC 直流侧等效模型如图 2 所示, 以换流器正常运行状态下, 基于子模块电容器储能不变和承受总电压不变的原则<sup>[27]</sup>, 将 MMC 零模阻抗等效为 RLC 串联模型, 图 2 中  $R_0$  为桥臂等效电阻和联结变压器等效电阻之和,  $L_0$  为桥臂电抗和联结变压器等效电抗之和,  $C_0$  为子模块电容,  $R_g$  为交流侧中性点接地电阻。

### 2.3 零模网络分析

以故障  $f_1$ (线路  $l_1$  中点发生单极接地故障)为例, 零模网络如图 3 所示。

考虑线路对地电容, 线路采用分布参数模型, 忽略线路对地电导, 图中,  $u_{f0}$  为故障点零模电压,  $L_{u0}$ 、 $R_{u0}$ 、 $C_{u0}$  分别为单位长度零模电感、电阻和对地电容,  $T_1$ — $T_4$  为四端 MMC 换流器母线,  $R_{eq1-4}$ 、 $L_{eq1-4}$ 、 $C_{eq1-4}$  为换流器 1—4 等效零模阻抗, 由式(3)可求得等效阻抗的值。  $l_{1f}$  表示故障点距母线  $T_1$  端的部分线路,  $l_{1b}$  表示故障点距母线  $T_2$  端的部分线路,  $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$  为线路 2—4。

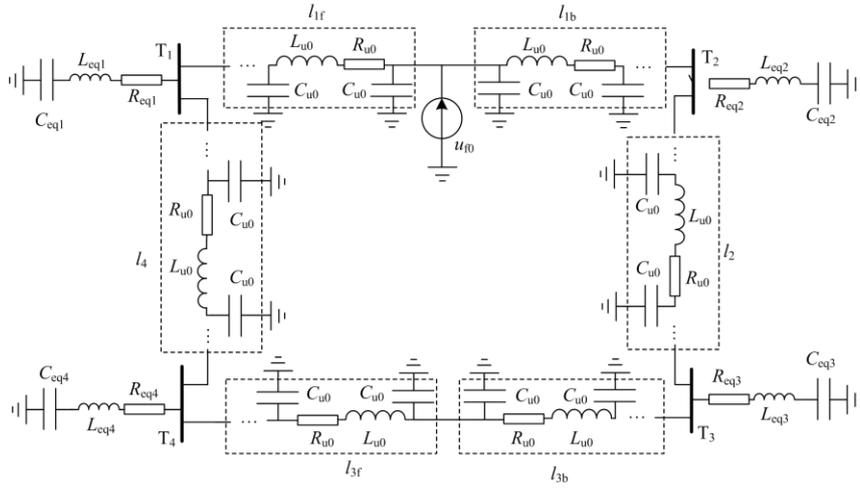


图3 零模网络示意图

Fig. 3 Schematic diagram of zero-mode network

由式(4)可知, MMC 换流器零模阻抗包含联结变压器阀侧中性点接地大电阻  $R_g$ , 为降低单极接地故障对系统的威胁,  $R_g$  一般取值较大, 参考深圳宝龙柔直示范工程, 本文取  $2.5 \text{ k}\Omega$ , 由式(4)可知, 换

流器的零模阻抗  $|Z_{\text{mmc}}| \geq 2R_g = 5 \text{ k}\Omega$ , 因此, 可将 MMC 的零模通道视为开路, 单极接地故障零模网络可等效为图 4 所示。

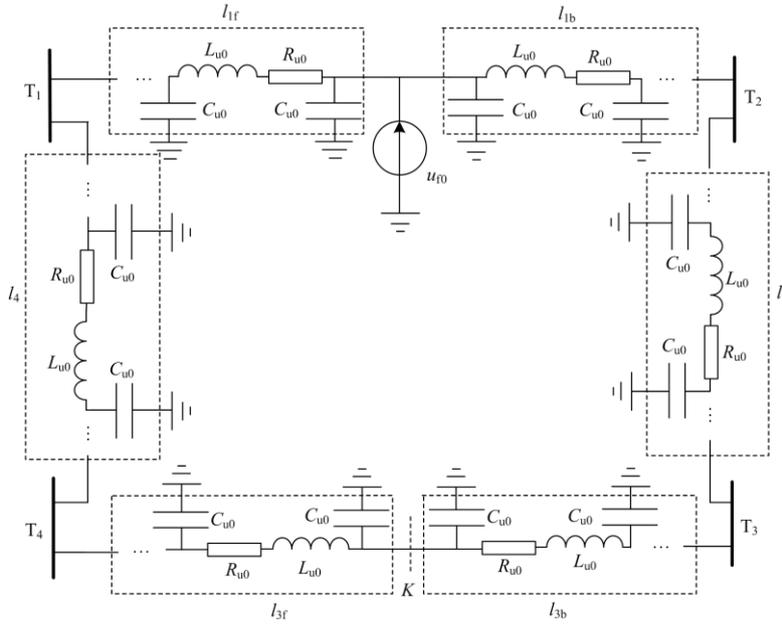


图4 零模网络等效图

Fig. 4 Schematic diagram of zero-mode network

将 MMC 换流器做开路处理后的零模网络, 是一个由四条线路构成的环形结构, 每条线路的阻抗参数相同, 在故障点对角处(距故障点总线路长度一半  $l = (l_1 + l_2 + l_3 + l_4)/2$  位置)零模电流为零, 即图 3 中虚拟断开点  $K$ ,  $K$  点的具体位置由四条线路的长度决定, 假设  $f_1$  故障时  $K$  点落在线路  $l_3$  上。在  $K$  点处虚拟断开, 零模网络可看作两条末端开路的分布

参数线路的并联。

忽略电阻影响, 末端开路的分布参数均匀传输线频域阻抗模型为<sup>[28]</sup>

$$Z_0(\omega) = -j\sqrt{\frac{L_{u0}}{C_{u0}} \cot(\omega l \sqrt{L_{u0} C_{u0}})} \quad (5)$$

根据式(3)可知, 末端开路的分布参数均匀传输线阻抗的相位特性在频域上表现以等间隔交替变化

呈现容性与感性, 令  $\omega l \sqrt{L_{u0} C_{u0}} = \pi/2$ , 可得到零模线路的首谐振频率  $\omega_{0s}$  为

$$\omega_{0s} = \frac{\pi}{2l \sqrt{L_{u0} C_{u0}}} \quad (6)$$

根据式(6)可知, 首谐振频率取决于线路的阻抗参数和线路长度, 以目前直流配电网普遍使用的电缆参数作为参考(文中表2和表3给出了典型电缆线路参数), 首谐振频率  $\omega_{0s}$  约在 0.5~2.5 kHz 之间。线路在首谐振频段  $0 \sim \omega_{0s}$  内呈容性, 首谐振频段内等效电容  $C_{01F}(\omega)$  为

$$C_{01F}(\omega) = \frac{2\omega_{0s} C_{u0} l}{\pi \omega} \tan\left(\frac{\pi \omega}{2\omega_{0s}}\right) \quad (7)$$

以零模网络中线路的首谐振频段  $0 \sim \omega_{0s}$  为特征频段, 零模网络中线路在特征频段  $0 \sim \omega_{0s}$  内阻抗呈容性, 可等效为一集中电容, 因此, 在特征频段  $0 \sim \omega_{0s}$  内, 可将单极接地故障零模网络简化为图5, 其中  $u_0$  为故障点零模电源,  $i_{0m\_n}$  ( $m, n=1, 2, 3, 4$ ) 表示线路  $m$  在母线  $n$  端的零模电流,  $C_{011}$  为故障点距母线  $T_1$  端的线路等效零模电容,  $C'_{011}$  为故障点距母线  $T_2$  端的线路等效零模,  $C_{012}$ 、 $C_{014}$  为线路  $l_2$ 、 $l_4$  等效零模电容,  $C_{013}$  为虚拟断开点距母线  $T_3$  的线路等效零模电容,  $C'_{013}$  为虚拟断开点距母线  $T_4$  的线路等效零模电容。

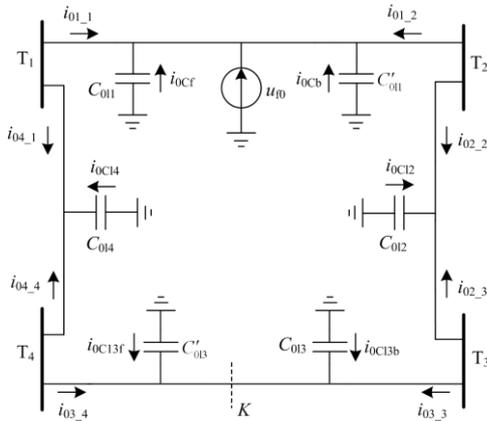


图5 单极接地故障零模网络简化电路

Fig. 5 Equivalent circuit of unipolar ground fault zero-mode network

根据图5中零模电压与零模电流的分布特征, 可得各线路两端的零模电压和零模电流满足式(8)的关系。

根据图5及式(8), 故障线路  $l_1$  两端的暂态零模电流同向, 均从母线流向线路; 对于非故障线路  $l_2$

和  $l_4$ ,  $l_2$  两端的零模电流反向, 一端从母线流向线路, 另一端从线路流向母线,  $l_4$  线路两端零模电流方向与  $l_2$  相同; 对于非故障线路  $l_3$ , 由于此时虚拟断开点  $K$  落在线路  $l_3$  上, 线路  $l_3$  两端的零模电流也同向, 但其方向从线路流向母线。基于上述线路两端零模电流的方向特征, 可以设计一种方向纵联保护方案。

引入方向信号  $S$ , 定义保护安装处零模电流从母线流向线路方向为 1, 从线路流向母线方向为 0, 比较线路两端的的方向信号, 仅有区内故障时“ $S_M \& S_N$ ” ( $S_M$  和  $S_N$  分别为线路首端和末端方向信号) 为 1, 区外故障时“ $S_M \& S_N$ ” 为 0。因此, 利用线路两端零模电流的方向关系, 可以实现接地故障区段定位。

$$\begin{cases} i_{01-1} = -(C_{014} + C'_{013}) \frac{du_0}{dt} \\ i_{01-2} = -(C_{012} + C_{013}) \frac{du_0}{dt} \\ i_{02-2} = (C_{012} + C_{013}) \frac{du_0}{dt} \\ i_{02-3} = -C_{013} \frac{du_0}{dt} \\ i_{03-3} = C_{013} \frac{du_0}{dt} \\ i_{03-4} = C'_{013} \frac{du_0}{dt} \\ i_{04-4} = -C'_{013} \frac{du_0}{dt} \\ i_{04-1} = (C_{014} + C'_{013}) \frac{du_0}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

### 3 暂态功率方向保护方法

#### 3.1 保护原理

本文保护方法是利用特征频段 ( $0 \sim \omega_{0s}$ ) 内线路两端暂态零模电流的方向关系实现故障区段定位。考虑到暂态零模电流是振荡衰减的信号, 为便于表示零模电流的方向, 采用一种表征无功功率的参量  $\rho(t)$  来表示零模电流的方向<sup>[29]</sup>,  $\rho(t)$  的定义为

$$\rho(t) = i_0(t) \cdot \frac{du_0(t)}{dt} \quad (9)$$

$\rho(t)$  与零模电流和零模电压导数成正比, 其极性可表示零模电流的方向。以线路  $l_1$  两端参量  $\rho(t)$  为例说明在区内故障 ( $f_1$ ) 时  $\rho(t)$  与电流的方向关系, 将式(8)代入式(9), 线路  $l_1$  两端的参量  $\rho(t)$  分别为

$$\begin{cases} \rho_M(t) = -\frac{i_{01\_1}^2(t)}{(C_{014} + C'_{013})} \leq 0 \\ \rho_N(t) = -\frac{i_{01\_2}^2(t)}{(C_{012} + C_{013})} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,故障线路两端参量  $\rho(t)$  的极性恒为负,其表示零模电流从母线流向线路。可见,  $\rho(t)$  的极性为负,表示零模电流从线路流向母线,  $\rho(t)$  的极性为正,表示零模电流从母线流向线路。

考虑到暂态信号随时间不断衰减,为充分利用暂态信息,提高抗干扰能力,以故障时刻作为 0 时刻对  $\rho(t)$  积分,得到表征无功能量的参量  $E(t)$ ,显然,参量  $E(t)$  的极性与  $\rho(t)$  一致,同样能表示零模电流的方向。

$$E(t) = \int_0^t \rho(\tau) d\tau \quad (11)$$

定义方向信号函数  $S$ ,参量  $E(t)$  小于 0 时  $S$  取 1,  $E$  大于 0 时  $S$  取 0, 如式(12)所示。

$$S = \begin{cases} 1, E(t) < 0 \\ 0, E(t) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

结合式(9)一式(12),以  $f_1$  故障为例,各条线路两端保护安装处各参量的极性有表 1 的关系,表 1 中带有下标 M、N 表示线路首端和末端保护安装处 M、N 的参量。

表 1  $f_1$  故障时各线路两端保护安装处参量极性

Table 1 Parameters polarities at both ends of each line protection installation when  $f_1$  fault

线路编号	$E_M(t)$	$E_N(t)$	$S_M$	$S_N$	$S_M \& S_N$
$l_1$	-	-	1	1	1
$l_2$	+	-	0	1	0
$l_3$	+	+	0	0	0
$l_4$	-	+	1	0	0

因此,保护的判据为

$$\begin{cases} S_M \& S_N = 1, \text{ 区内故障} \\ S_M \& S_N = 0, \text{ 区外故障} \end{cases} \quad (13)$$

### 3.2 启动判据

发生单极接地故障后,直流侧零模电压发生突变,为实现保护的快速启动,可根据零模电压变化率作为启动判据,具体启动判据为

$$\left| \frac{du_0}{dt} \right| > U_{0set} \quad (14)$$

$$U_{0set} = K_{set} U_{dc}$$

式中:  $U_{0set}$  为启动门槛值;  $K_{set}$  为启动系数,躲过系统正常运行时不平衡电压最大变化率;  $U_{dc}$  为直流额定电压。

### 3.3 保护流程

保护方案实施的过程为,检测到单极接地故障后,获取线路两端零模电流和零模电压,滤除零模电流和零模电压中的高频分量,得到特征频段内零模电压电流信息,计算出线路两端无功功率参量  $\rho(t)$ ,对  $\rho(t)$  积分计算参量  $E(t)$ ,根据参量  $E(t)$  的极性确定方向信号  $S$ ,向线路对端传递方向信号并接收对端的方向信号,比较线路两端的方向信号,“ $S_M \& S_N$ ”为 1 时判定区内故障,保护流程图如图 6 所示。

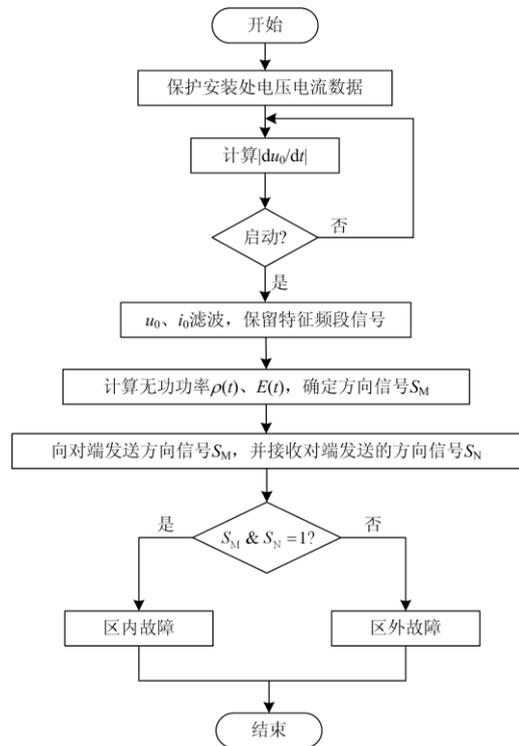


图 6 保护流程图

Fig. 6 Protection flow chart

### 4 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 上搭建图 1 所示的四端环状柔性直流配电网仿真模型,仿真步长  $1 \mu s$ ,采样频率为 20 kHz,保护的算法步长为  $50 \mu s$ ,仿真参数如表 2、表 3 所示。

表 2 系统仿真参数

Table 2 System simulation parameters

系统参数	数值	系统参数	数值
额定直流电压/kV	$\pm 10$	交流额定电压/kV	110
子模块电容/ $\mu F$	4 800	桥臂电感/mH	6
换流站 1 电压/kV	$\pm 10$	换流站 2 功率/MW	8
换流站 3 功率/MW	-5	换流站 4 功率/MW	6
线路 1 长度/km	12	线路 2 长度/km	8
线路 3 长度/km	8	线路 4 长度/km	10

表 3 直流线路参数

Table 3 DC line parameters

线路 类型	$R/(\Omega/\text{km})$		$L/(\text{mH}/\text{km})$		$C/(\mu\text{F}/\text{km})$	
	一 模	零 模	一 模	零 模	一 模	零 模
电缆	0.28	2.8	0.26	1.11	0.38	0.28

在  $l_1$  线路 5 km 处发生正极金属性接地故障, 线路  $l_1$  两端零模电流、零模电压和无功功率分别如图 7 所示。从图 7 可以看出, 滤波之后的零模电压和电流包含了原始信号的大部分能量, 线路两端的

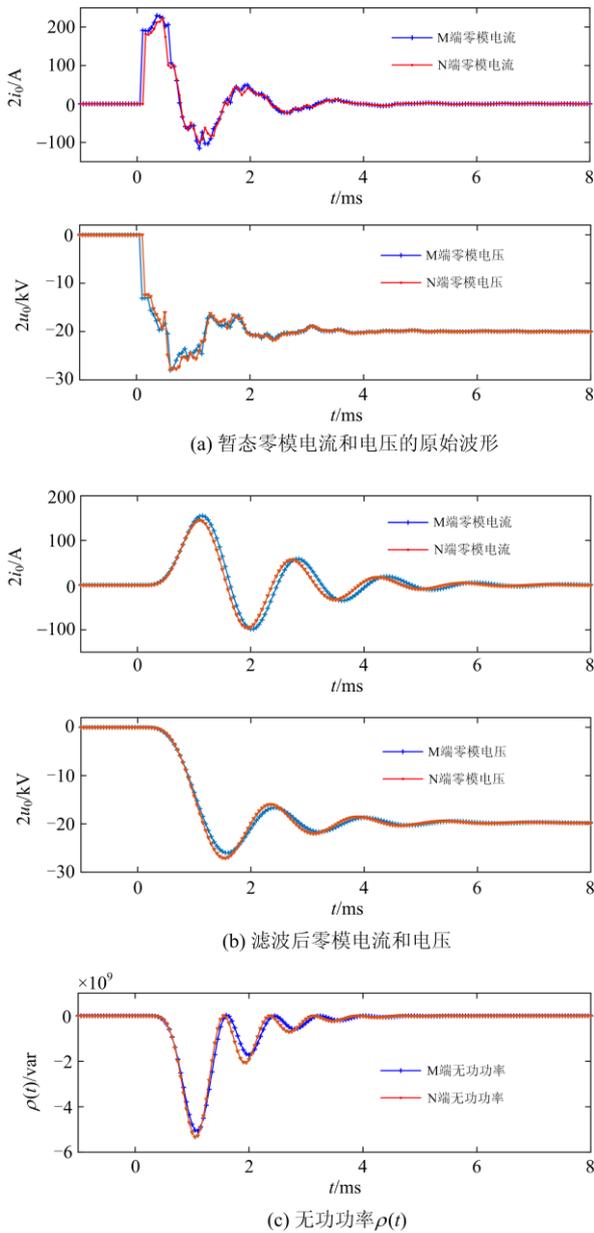


图 7 故障线路两端各参量波形

Fig. 7 Waveforms of parameters at both ends of the fault line

零模电流方向相同, 功率参量  $\rho(t)$  在暂态持续期间恒为负, 线路两端的的方向信号  $S_M$ 、 $S_N$  均为 1。

图 8 所示为非故障线路  $l_2$  两端各参量的暂态波形, 由图 8 可见, 线路两端的零模电流方向相反, 无功功率一端为负一端为正, 两端的的方向信号  $S_M$  为 1,  $S_N$  为 0。受篇幅限制, 非故障线路  $l_3$ 、 $l_4$  的参量暂态波形未予展示, 将不同情况接地故障时各线路参量记录于表 4。可以看出, 故障线路两端参量

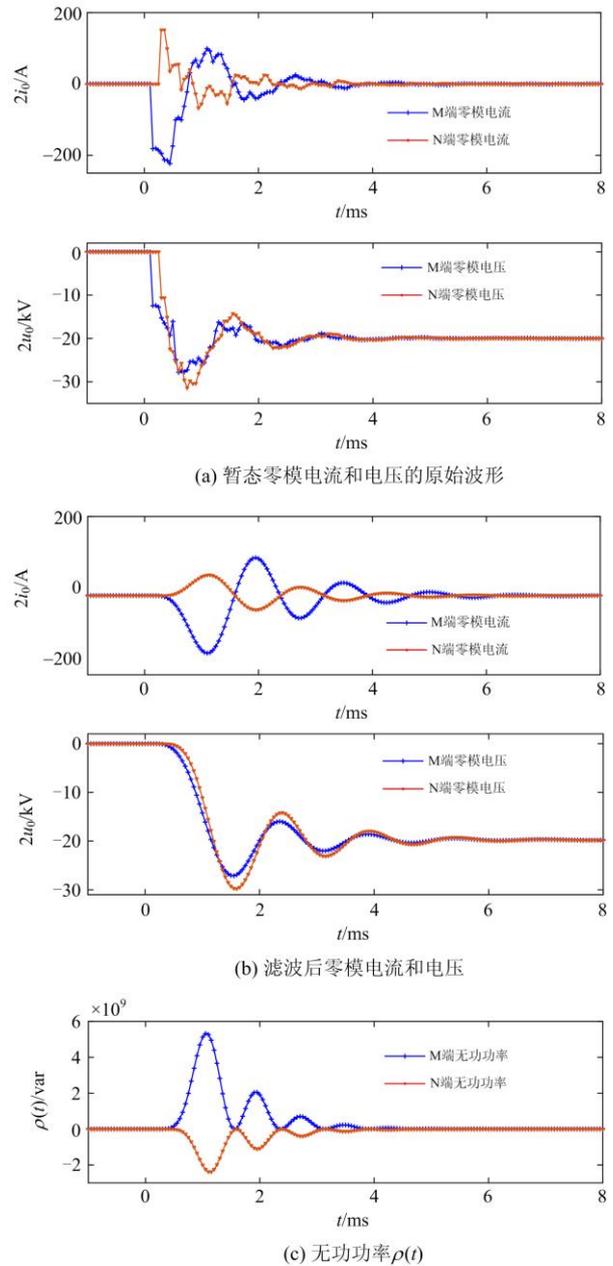


图 8 区外故障线路两端各参量波形

Fig. 8 Waveforms of parameters at both ends of the fault line outside the area

表 4 不同故障情况下各线路两端零模无功功率

Table 4 Zero-mode reactive power at both ends of each line under different fault conditions

故障类型	故障位置	过渡电阻/ $\Omega$	$l_1$		$l_2$		$l_3$		$l_4$		区段定位结果
			$E_M/10^6$	$E_N/10^6$	$E_M/10^6$	$E_N/10^6$	$E_M/10^6$	$E_N/10^6$	$E_M/10^6$	$E_N/10^6$	
$f_1$	2 km	0.01	-3.78	-3.16	3.17	-0.42	0.42	3.16	-3.16	3.77	$l_1$
		5	-2.42	-1.83	1.84	-0.23	0.23	1.83	-1.83	2.47	$l_1$
		10	-1.86	-1.30	1.30	-0.16	0.16	1.30	-1.30	1.88	$l_1$
		20	-1.29	-0.82	0.82	-0.09	0.09	0.82	-0.82	1.29	$l_1$
$f_1$	5 km	0.01	-3.74	-3.75	3.75	-1.65	1.65	2.38	-2.38	3.89	$l_1$
		5	-2.36	-2.25	2.25	-0.93	0.93	1.34	-1.34	2.41	$l_1$
		10	-1.76	-1.63	1.63	-0.64	0.64	0.94	-0.94	1.78	$l_1$
		20	-1.17	-1.05	1.05	-0.39	0.39	0.58	-0.58	1.17	$l_1$
$f_1$	8 km	0.01	-3.58	-4.02	4.02	-2.78	2.78	1.30	-1.30	3.72	$l_1$
		5	-2.17	-2.54	2.54	-1.58	1.58	0.72	-0.72	2.21	$l_1$
		10	-1.56	-1.89	1.89	-1.11	1.10	0.50	-0.50	1.58	$l_1$
		20	-1.01	-1.26	1.26	-0.69	0.69	0.30	-0.31	1.01	$l_1$
$f_1$	10 km	0.01	-3.25	-3.97	3.97	-3.37	3.37	0.44	-0.44	3.37	$l_1$
		5	-1.92	-2.63	2.63	-1.96	1.95	0.24	-0.25	1.96	$l_1$
		10	-1.37	-2	2	-1.38	1.38	0.17	-0.17	1.38	$l_1$
		20	-0.87	-1.37	1.37	-0.87	0.87	0.10	-0.10	0.87	$l_1$
$f_2$	5 km	5	-1.14	2.56	-2.55	-2.42	2.43	-0.75	0.75	1.22	$l_2$
$f_3$	5 km	5	0.70	1.95	-1.97	2.56	-2.57	-2.24	2.24	-0.75	$l_3$
$f_4$	5 km	5	2.31	-0.25	0.25	1.62	-1.62	2.55	-2.81	-2.4	$l_4$

$E(t)$ 的极性始终为负, 两端的方向信号均为 1; 非故障线路两端参量  $E(t)$ 的极性一正一负或者均为正, 即非故障线路至少有一端的方向信号为 0。此外, 随着过渡电阻的增大, 尽管暂态信号变弱, 参量减小, 但其正负极性依旧明确, 本文方法仍然可以明确地定位出故障区段, 说明其具有较好的耐过渡电阻能力。

## 5 结论

本文针对 MMC 型多端环状柔直配电网分析了单极接地故障的零模网络并提出保护方法。结论如下:

1) 采用小电流接地方式的 MMC 型换流器直流侧的零模阻抗, 由于包含接地大电阻, 可视为开路, 发生单极接地故障时, 零模网络由多条直流线路构成的环网, 零模网络中存在虚拟断开点, 零模网络可视为两条末端开路的线路组成。

2) 基于特征频段下的零模电流分布特征, 故障线路两端零模电流方向均从母线流向线路, 非故障线路两端零模电流方向至少有一端从线路流向母线, 利用线路两端的零模电流方向关系提出一种方向纵联保护方法。该方法保护原理简单, 方向判据

极性明确, 能可靠识别区内区外故障, 无需安装额外边界元件。该方法通信时只需传递方向信号, 无需传输完整的故障数据, 不需要严格的数据同步, 降低了保护对通信要求, 可行性高。

## 参考文献

- [1] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-020-00173-9.
- [2] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114-3122. XUE Shimin, CHEN Chaochao, JIN Yi, et al. A research review of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [3] 梁汉东, 高毓群, 侯婷, 等. 柔性直流配电系统负荷波动对系统过电压及过电流影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 56-62. LIANG Handong, GAO Yuqun, HOU Ting, et al. Study on the influence of load fluctuation on overvoltage and overcurrent of a VSC-DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 56-62.

- [4] WANG Y, YUAN Z, FU J, et al. A feasible coordination protection strategy for MMC-MTDC systems under DC faults[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, 90: 103-111.
- [5] 赵政嘉, 李海波, 赵宇明, 等. 多类型分布式电源接入下的低压交流与直流配电网运行经济性对比[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(12): 50-61.  
ZHAO Zhengjia, LI Haibo, ZHAO Yuming, et al. Operational economic comparison of low voltage AC and DC distribution networks with multi-type distributed generation integration[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(12): 50-61.
- [6] 梅军, 张丙天, 朱鹏飞, 等. 基于故障电流主动控制的柔性直流配电网故障定位方法[J/OL]. *电力系统自动化*: 1-15[2021-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210830.1310.008.html>.  
MEI Jun, ZHANG Bingtian, ZHU Pengfei, et al. Fault location method of flexible dc distribution network based on fault current active control[J]. *Automation of Electric Power Systems*: 1-15[2021-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210830.1310.008.html>.
- [7] 高冰, 崔泽坤. 基于高频暂态稀疏测量的复杂直流配电网故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(16): 38-49.  
GAO Bing, CUI Zekun. Fault location of a complex DC distribution network based on high-frequency transient sparse measurement[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(16): 38-49.
- [8] LI B, REN X, LI B. Study on the charge transfer criterion for the pole-to-ground fault in DC distribution networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 102386-102396.
- [9] 王丹, 柳依然, 梁翔, 等. 直流配电网电压等级序列研究[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 19-25, 47.  
WANG Dan, LIU Yiran, LIANG Xiang, et al. DC distribution network voltage class series[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 19-25, 47.
- [10] 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.
- [11] 张鑫宇, 樊艳芳, 马健, 等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电网线路纵联保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(18): 128-136.  
ZHANG Xinyu, FAN Yanfang, MA Jian, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(18): 128-136.
- [12] 毕天姝, 王帅, 贾科, 等. 基于短时能量的多端柔性直流单极接地故障线路识别方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(3): 689-695.  
BI Tianshu, WANG Shuai, JIA Ke, et al. Short-term energy based approach for monopolar grounding line identification in MMC-MTDC system[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(3): 689-695.
- [13] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(7): 2179-2185.  
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(7): 2179-2185.
- [14] 余修勇, 肖立业. 直流配电网故障识别和定位技术研究综述[J]. *电工电能新技术*, 2019, 38(7): 56-66.  
YU Xiuyong, XIAO Liye. An overview of fault identification and location technology for DC distribution networks[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2019, 38(7): 56-66.
- [15] 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, 6016.  
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, 6016.
- [16] 上官鑫, 秦文萍, 夏福良, 等. 基于暂态电压 Pearson 相关性的 MMC 多端柔性直流配电网单极接地故障保护方案[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5): 1740-1749.  
SHANGGUAN Xin, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Pole-to-ground fault protection scheme for MMC multi-terminal flexible DC distribution network based on Pearson correlation of transient voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5): 1740-1749.
- [17] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波, 等. 环状柔直配电网线路的单端量保护原理[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23): 6825-6836, 7117.  
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo, et al. Single-terminal quantity based line protection for ring flexible DC distribution system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6825-6836, 7117.
- [18] 李再男, 段建东, 路文超, 等. 柔性中压直流配电网线路加速纵联保护[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 80-88.  
LI Zainan, DUAN Jiandong, LU Wenchao, et al. Pilot acceleration line protection of flexible MVDC distribution

- network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 80-88.
- [19] 张章, 胡源, 罗涛, 等. 中压直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 109-118.  
ZHANG Zhang, HU Yuan, LUO Tao, et al. Review on research of protection technology for medium voltage DC distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 109-118.
- [20] 王守相, 王振宇, 刘琪, 等. 基于控制与保护协同的直流配电系统单极接地故障保护策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 120-126.  
WANG Shouxiang, WANG Zhenyu, LIU Qi, et al. Protection strategy of single-pole grounding fault in DC distribution system based on coordination of control and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 120-126.
- [21] 戴志辉, 刘雪燕, 黄敏, 等. 基于相似度比较的环状柔直配电网线路单极接地故障保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 107-115.  
DAI Zhihui, LIU Xueyan, HUANG Min, et al. Similarity comparison based single-pole grounding fault protection for lines in ring-shaped flexible DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 107-115.
- [22] 戴志辉, 刘雪燕, 刘自强, 等. 基于电流故障分量的柔直配电网线路纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1684-1693.  
DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Pilot protection scheme for flexible DC distribution grids based on superimposed current[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1684-1693.
- [23] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配电网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.  
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaiibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [24] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3832.  
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3832.
- [25] 陈鹏浩, 李慧璇, 李猛, 等. 基于改进人工蜂群算法的直流配电网典型应用场景拓扑结构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 57-65.  
CHEN Penghao, LI Huixuan, LI Meng, et al. Research on the topological structure of typical application scenarios of a DC distribution network based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 57-65.
- [26] ZHANG Y, TAI N, XU B. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1583-1591.
- [27] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [28] 李娟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 单相均匀传输线暂态模型参数计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1083-1089.  
LI Juan, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. A method to calculate parameters of transient model for single-phase uniform transmission line[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1083-1089.
- [29] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.  
XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-10-15

作者简介:

李卫丰(1995—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统保护与自动化; E-mail: dliwef@163.com

王超(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电网继电保护、配电自动化技术、接地故障检测与保护技术; E-mail: mywayli@foxmail.com

薛永端(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为配网自动化及其故障检测、智能配电网故障自愈技术。E-mail: xueyd70@126.com

(编辑 张爱琴)