

DOI: 10.7667/PSPC171396

基于直流电抗电压的柔性直流配电网故障测距方法

周嘉阳¹, 李凤婷¹, 刘渊², 辛超山³, 达塔娜¹

(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昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100;
3. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 故障测距是柔性直流配电网发展所需的关键技术之一, 传统的高压直流输电系统故障测距方法在直流配电网中适应性不好。因此在考虑线路配置直流电抗器的情况下, 提出一种基于直流电抗电压的直流配电网双端故障测距方法。该方法从直流故障的电容放电阶段进行研究, 利用线路两端直流电抗电压构建包含故障距离和过渡电阻的两个未知参数的时域微分方程, 并利用最小二乘法进行求解。PSCAD 仿真结果表明该方法能够有效地进行故障定位, 并且能够计算出故障点过渡电阻, 可以满足直流配电网的故障测距要求。

关键词: 直流配电网; 故障测距; 直流电抗电压; 电容放电; R-L 模型

A fault location method for flexible DC distribution network based on DC reactor voltage

ZHOU Jiayang¹, LI Fengting¹, LIU Yuan², XIN Chaoshan³, DA Tana¹

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;
2. Changji Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 831100, China;
3. Economics and Technology Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830047, China)

Abstract: Fault location is one of the key technologies for the development of flexible DC distribution network. The fault location methods of conventional HVDC transmission line are not applicable to the DC distribution network. Considering the DC reactor installed on the line, a fault location method based on DC reactor voltage for DC distribution network is proposed. This method studies the capacitor discharging process of DC fault, and establishes the time domain differential equation based on the DC reactor voltages, which contains two unknown parameters of fault location and transition resistance, and solves the equation by least-squares method. Simulation results by PSCAD show that the proposed method can obtain the fault location and transition resistance accurately, and meet the requirement of DC distribution network fault location.

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

Key words: DC distribution network; fault location; DC reactor voltage; capacitor discharging; R-L model

0 引言

随着分布式能源和直流负荷的大量接入, 直流配电系统因能减少换流设备的投入, 相较于交流系统更具经济优势^[1], 并已成功应用于船舶供电、数据中心及深圳柔性直流配电网示范工程。我国直流配电技术仍处于起步阶段, 故障检测隔离技术和定位方法是限制其发展的关键技术问题^[2-6]。直流输电线路的低阻特性使得线路故障电流上升速度非常快, 如果不能及时隔离故障, 将会烧毁变流器造成

严重的经济损失。因此直流线路保护必须在几毫秒内检测并隔离故障, 同时有必要投入故障限流设备限制故障电流的快速上升, 为故障检测及隔离提供更多的时间^[7-8]。

国内外有关直流线路故障测距的研究主要集中在高压直流输电系统, 对直流配电网的故障测距研究较少。文献[7-10]对柔性直流系统线路故障特征进行分析, 研究了极间短路故障的电容放电、二极管依次导通以及全部导通 3 个阶段。文献[11-16]基于行波原理, 利用暂态行波在测量点与故障点之间传输时间进行故障定位, 但是该方法对采样精度要求非常高。文献[17-20]基于高压直流输电线路的分布参数模型, 从时域的角度利用单/双端电气量进行

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助 (2016D01C036)

故障定位,降低了对采样精度要求。然而对于柔性直流配电网而言,输电线路较短,一般为3~10 km,故障行波传输时间非常短,并且会受到外界干扰从而导致行波波头检测不到,致使应用于高压直流输电系统的行波测距方法和基于线路分布参数的故障测距方法不能较好地适用。文献[21]将电容串接到故障线路形成放电回路,利用放电电流的特征频率和衰减系数进行故障定位。虽然该方法能够实现单端测距,但是需要投入额外的设备,增加系统成本。文献[22]提出利用单端电气量计算出测量点到故障点之间的线路电感值,从而确定故障位置,该方法适用于辐射状直流配电系统。对于双端直流配电系统由于线路两侧均向故障点注入电流,基于单端电气量的测距方法不能满足测量精度要求。

本文针对直流线路两端配置电抗器的情况下,分析了直流电抗器电压用于故障检测的优势,结合对电容放电阶段的分析,提出利用线路两端直流电抗器电压的双端故障测距方法。最后通过 PSCAD/EMTDC 软件搭建双端直流配电系统进行仿真,仿真结果表明该方法能够有效地进行故障定位,通过将过渡电阻作为待求量,消除过渡电阻的影响。

1 柔性直流配电网故障特征分析

1.1 直流配电网拓扑结构

直流配电网的拓扑结构可以分为三种类型:辐射状、双端以及多端直流配电网^[2]。其中辐射状直流配电网的拓扑结构较为简单,供电可靠性低,双端和多端直流配电网的供电可靠性高,但是故障识别和保护配置较为复杂。本文针对如图1所示的双端直流配电网的故障测距方法进行研究。双端直流配电网采用双极供电方式,直流系统经 AC/DC 换流器从交流电网获取电能,通过 DC/AC、DC/DC 换流器为负荷供电,亦经换流器接入分布式电源和储能设备。

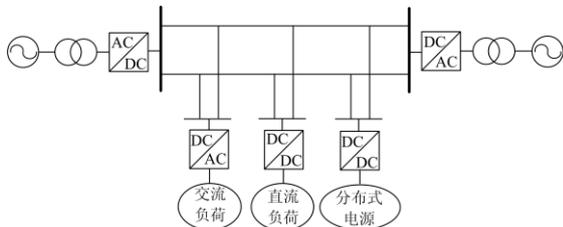


图1 双端供电系统结构图

Fig. 1 Structure of two terminal power supply system

1.2 直流线路故障特征分析

直流线路故障可以分为单极接地和极间短路故障。单极接地故障特征与直流配电系统的接地方式

有关,比较典型的接地方式是 TN-S 接地方式即换流器的中性点连接大地,故障发生时,会有较大的故障电流和电压暂变现象^[1]。极间短路危害更大,其故障特征与接地方式无关。

图2为极间短路故障示意图,故障发生后,IGBT 会因自身保护而关断,故障过程分为三个阶段:电容放电阶段,二极管依次导通阶段以及全部导通阶段^[7]。

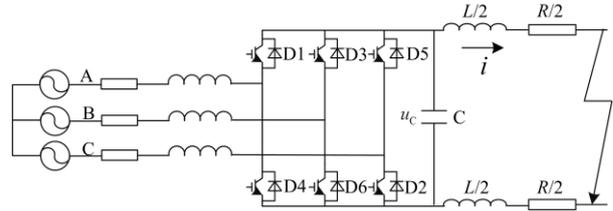


图2 极间短路故障示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pole-to-pole short circuit fault

结合图2可知电容放电阶段可以用二阶微分方程表示,如式(1)。

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

式中: u_c 为极间电容电压; i 为线路电流; L 为包含直流电抗器的故障回路电感值; R 为故障回路电阻; C 为极间电容。忽略过渡电阻影响时,由于线路电阻非常小,显然 $R < 2\sqrt{L/C}$ 。假定故障发生时刻为 t_0 , 电容电压为额定电压 V_0 , 线路初始电流为 I_0 。求解微分方程(1)可得

$$\begin{cases} u_c = \frac{V_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_0}{\omega C} e^{-\delta t} \sin \omega t \\ i = -\frac{I_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) + \frac{V_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\delta = R/2L$; $\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2}$; $\beta = \arctan(\omega/\delta)$, $\omega^2 = 1/LC - (R/2L)^2$ 。

当电容电压 u_c 下降到交流线电压时,交流侧开始经过二极管依次向故障点注入电流,该过程属于二极管依次导通阶段。考虑到交流侧线路电感的限流作用,注入电流上升速度不会很快,此时故障电流还是以电容放电电流为主。若在 t_1 时刻电容电压降为 0, 结合式(2)可得电容放电时间为

$$t_1 - t_0 = (\pi - \gamma) / \omega \quad (3)$$

式中, $\gamma = \arctan[(V_0 \omega_0 C \sin \beta) / (V_0 \omega_0 C \cos \beta - I_0)]$ 。

当电容电压降为 0 后,交流侧短路电抗的反向电压使续流二极管全部导通,相当于三相短路^[7]。

单极接地故障的故障极电容放电过程原理相同, 在此不再赘述。

2 基于直流电抗电压的故障测距方法

2.1 直流电抗电压

由于直流系统线路本身的低阻特性, 故障电流会在 1 ms 内上升到较高水平, 严重影响系统的安全运行, 因此常采用在直流线路上投入直流电抗器的方法限制故障电流的快速上升。直流电抗电压与线路电流的关系式为

$$u_L = L_S \frac{di}{dt} \quad (4)$$

式中: u_L 为电抗电压; L_S 为直流电抗器电感值; 电流微分可用直流电抗电压表示, 如式(5)。

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_L}{L_S} \quad (5)$$

以极间短路故障为例, 故障发生时刻为 $t = 1$ s, 图 3 为线路故障电流与直流电抗电压波形图。

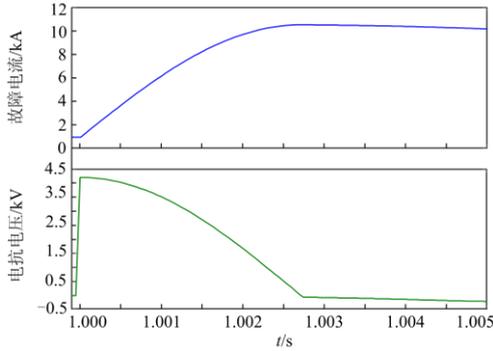


图 3 线路故障电流与直流电抗电压波形图

Fig. 3 Comparison of fault current and reactance voltage

从图3中可以看出相比于线路故障电流, 直流电抗电压能够更加快速达到最大值, 因此通过测量直流电抗电压可以实现快速的故障检测。

2.2 单极接地故障测距

由于配电网输电线路较短, 线路分布电容相比换流器侧电容很小, 可以忽略其影响, 因此本文采用 RL 模型进行测距分析, 利用测量的故障极线路两端的直流电抗器电压进行故障测距, 图 4 为单极接地故障的等效电路图。

图中 L_S 为直流电抗器, C_1 和 C_2 为换流器 1、2 的故障极电容且电容值均为 C , x 为故障点与换流器 1 之间的距离, D 为直流输电线路总长度。 r 为直流线路的单位电阻值, l 为直流线路单位电感值, R_F 为故障点过渡电阻, i_1 和 i_2 分别为换流器 1 和换流器 2 的故障极电容注入故障点的电流, u_{C1} 和 u_{C2} 分别为换流站 1、2 的故障极电容电压, u_{L1} 和 u_{L2} 分

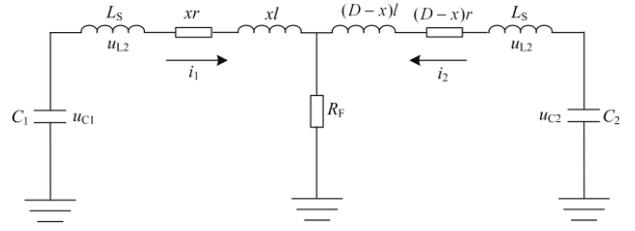


图 4 单极接地故障等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of single pole grounding fault

别为线路两端的直流电抗电压, 故障暂态方程为

$$\begin{cases} u_{C1} = (L_S + xl) \frac{di_1}{dt} + xr i_1 + R_F (i_1 + i_2) \\ u_{C2} = (L_S + (D-x)l) \frac{di_2}{dt} + (D-x)r i_2 + R_F (i_1 + i_2) \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)求导可得

$$\begin{cases} \frac{du_{C1}}{dt} = (L_S + xl) \frac{d^2 i_1}{dt^2} + xr \frac{di_1}{dt} + R_F \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) \\ \frac{du_{C2}}{dt} = (L_S + (D-x)l) \frac{d^2 i_2}{dt^2} + (D-x)r \frac{di_2}{dt} + R_F \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) \end{cases} \quad (7)$$

故障电流与电抗电压以及电容电压之间存在式(8)所示的关系, 式(7)中的电流微分和电流二次微分可用电抗电压和电抗电压微分表示。

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{u_{L1}}{L_S} \\ \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{i_1}{C} \\ \frac{d^2 i_1}{dt^2} = \frac{1}{L_S} \frac{du_{L1}}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)可以进一步得到在电容放电阶段的电容电压微分可用电抗电压的定积分表示。

$$\begin{cases} \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{1}{L_S C} \int_t^{t+\Delta t} u_{L1} dt \\ \frac{du_{C2}}{dt} = \frac{1}{L_S C} \int_t^{t+\Delta t} u_{L2} dt \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入式(7)中可得用两端直流电抗电压表示的故障方程为

$$\begin{cases} \frac{1}{L_S C} \int_t^{t+\Delta t} u_{L1} dt = \frac{(L_S + xl)}{L_S} \frac{du_{L1}}{dt} + \frac{xr}{L_S} u_{L1} + \frac{R_F}{L_S} (u_{L1} + u_{L2}) \\ \frac{1}{L_S C} \int_t^{t+\Delta t} u_{L2} dt = \frac{(L_S + (D-x)l)}{L_S} \frac{du_{L2}}{dt} + \frac{(D-x)r}{L_S} u_{L2} + \frac{R_F}{L_S} (u_{L1} + u_{L2}) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)中两式相加并化简可得包含故障距离 x 和过渡电阻 R_F 两个未知量的矩阵方程式如式(11)所示。

$$\mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_F \end{bmatrix} = \mathbf{B} \quad (11)$$

式中： \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 都是由两端直流电抗电压采样值经过运算构成的矩阵，采样个数为 N 时，则矩阵 \mathbf{A} 是 N 行 2 列， \mathbf{B} 是 N 行 1 列。

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \left[l \left(\frac{du_{L1}}{dt} - \frac{du_{L2}}{dt} \right) + r(u_{L1} - u_{L2}) \quad 2(u_{L1} + u_{L2}) \right] \\ \mathbf{B} = \frac{1}{C} \left(\int_t^{t+\Delta t} u_{L1} dt + \int_t^{t+\Delta t} u_{L2} dt \right) - L_S \left(\frac{du_{L1}}{dt} + \frac{du_{L2}}{dt} \right) - \\ D l \frac{du_{L2}}{dt} - D r u_{L2} \end{cases}$$

最后可将由线路两端测量到的直流电抗电压数据代入式(12)中即可求解出故障距离和故障点过渡电阻值为

$$\begin{bmatrix} x \\ R_F \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (12)$$

2.3 极间短路故障测距

与单极接地故障分析类似，基于线路的 RL 模型，利用测量的线路两端直流电抗电压对极间短路故障进行测距，图 5 为极间短路故障电容放电阶段的等效电路图。

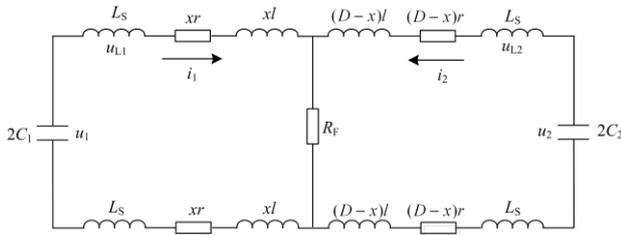


图 5 极间短路等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit of pole-to-pole short circuit fault

如图 5 所示，其中 $2C_1$ 和 $2C_2$ 分别为换流站 1、2 的极间电容且电容值为 $2C$ ， u_1 和 u_2 分别为极间电容电压， i_1 和 i_2 分别为故障时换流器 1、2 的极间电容注入故障点的电流。结合基尔霍夫定律可得极间短路的暂态方程为

$$\begin{cases} u_1 = 2(L_S + xl) \frac{di_1}{dt} + 2xri_1 + R_F(i_1 + i_2) \\ u_2 = 2(L_S + (D-x)l) \frac{di_2}{dt} + 2(D-x)ri_2 + \\ R_F(i_1 + i_2) \end{cases} \quad (13)$$

同样对式(13)进行求导可得

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dt} = 2(L_S + xl) \frac{d^2i_1}{dt^2} + 2xr \frac{di_1}{dt} + R_F \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) \\ \frac{du_2}{dt} = 2(L_S + (D-x)l) \frac{d^2i_2}{dt^2} + 2(D-x)r \frac{di_2}{dt} + \\ R_F \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) \end{cases} \quad (14)$$

将两端直流电抗电压代入式(14)中并化简可得包含故障位置和过渡电阻值两个未知量的矩阵方程式为

$$\mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_F \end{bmatrix} = \mathbf{B} \quad (15)$$

式中矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \left[l \left(\frac{du_{L1}}{dt} - \frac{du_{L2}}{dt} \right) + r(u_{L1} - u_{L2}) \quad (u_{L1} + u_{L2}) \right] \\ \mathbf{B} = \frac{1}{4C} \left(\int_t^{t+\Delta t} u_{L1} dt + \int_t^{t+\Delta t} u_{L2} dt \right) - L_S \left(\frac{du_{L1}}{dt} + \frac{du_{L2}}{dt} \right) - \\ D l \frac{du_{L2}}{dt} - D r u_{L2} \end{cases}$$

最后将线路两端测量的数据代入矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 中并结合式(12)求出故障位置和过渡电阻值。由于单极接地与极间短路故障回路的参数有所不同导致计算公式的不同，因此需在区分故障类型后，使用对应的故障测距公式。

2.4 数据处理

在具体求解过程中，需要对采集的数据进行处理。公式中的时域定积分和时域微分可用数值积分和数值微分进行表示。具体替换公式为

$$\begin{cases} \frac{du_L}{dt} = \frac{u_L(k) - u_L(k-1)}{\Delta t} \\ \int_t^{t+\Delta t} u_L dt = [u_L(k) + u_L(k+1)]\Delta t \end{cases} \quad (16)$$

式中： $u_L(k)$ 是第 k 个采样时刻的电抗电压值； Δt 是采样时间间隔。

3 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的双端柔性直流配电网模型，表 1 为仿真模型参数。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
直流电压/kV	10	直流电抗器/H	0.01
额定容量/MVA	10	交流电抗器/H	0.02
直流电容/F	0.02	直流线路长度/km	10
$r/(\Omega/\text{km})$	0.01	$l/(\text{mH}/\text{km})$	0.16

设定 $t=1\text{ s}$ 时线路首端发生金属性极间短路故障, 电容电压, 二极管 D1 电流, 故障电流以及直流电抗电压的仿真波形如图 6 所示。由于直流电抗器的作用, 故障电流上升速度受到限制, 二极管 D1 的导通电流在故障发生后 2 ms 内数值很小, 故障电流以电容放电电流为主。为了减少二极管导通电流对测距精度的影响, 因此设置 2 ms 的采样时间用于检测线路两端直流电抗器电压, 采样频率为 50 kHz。

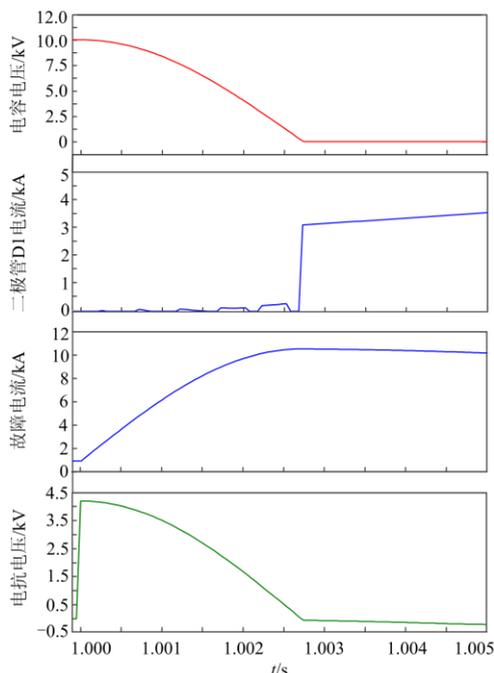


图 6 极间短路故障波形图

Fig. 6 Electrical waveform of pole-to-pole fault

3.1 单极故障测距结果

在直流线路的不同位置设置过渡电阻分别为 $0.1\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 和 $50\ \Omega$ 的单极接地故障, 利用所采集的直流电抗电压数据进行计算, 测距结果如表 2 所示。测距误差公式为

$$\text{测距误差} = \frac{|\text{测距结果} - \text{实际故障距离}|}{\text{线路全长}} \times 100\%$$

表 2 单极接地测距结果

Table 2 Fault location results of single pole grounding fault

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	计算距离/km	误差/%
0.5	0.1	0.481 2	0.188
	10	0.462 6	0.374
	50	0.445 3	0.547
5	0.1	4.972 4	0.276
	10	4.962 3	0.377
	50	4.948 1	0.519
9	0.1	8.975 6	0.244
	10	8.967 2	0.328
	50	8.943 3	0.567

从表 2 结果可以看出, 测距误差保持在 1% 以内, 且测量误差会随着过渡电阻增大而增大。这是因为输电线路较短, 线路电阻相比过渡电阻较小导致的。

3.2 极间短路测距结果

在线路不同位置设置过渡电阻分别为 $0.1\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 和 $20\ \Omega$ 的极间短路故障, 测距结果如表 3 所示。

表 3 极间短路测距结果

Table 3 Fault location results of single pole-to-pole fault

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	计算距离/km	误差/%
0.5	0.1	0.483 4	0.167
	10	0.464 6	0.354
	20	0.440 3	0.597
5	0.1	4.978 4	0.216
	10	4.969 2	0.308
	20	4.948 5	0.515
9	0.1	8.982 1	0.179
	10	8.963 4	0.366
	20	8.942 6	0.574

表 3 结果显示极间短路故障时本算法同样能实现精确的故障定位, 测距误差能够保持在 1% 以内。

4 结论

本文所提出的柔性直流配电网故障测距方法是在分析电容放电阶段各电气量之间关系的基础上, 利用线路两端直流电抗电压建立时域微分方程, 用数值方法求出故障距离和过渡电阻值。大量仿真结果表明该方法能够实现精确的故障测距, 并具备以下优点:

1) 所需采集电气量较少。本方法仅需线路两端直流电抗电压进行故障测距。

2) 受过渡电阻的影响较小。本文将过渡电阻作为待求量, 从而消去过渡电阻对故障测距的影响。

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] 杜翼, 江道灼, 尹瑞, 等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 139-145.
DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145.

- [3] 卫思明, 张森, 黄永章. 新型直流断路器拓扑及在多端柔直工程中的仿真研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 7-13.
WEI Siming, ZHANG Sen, HUANG Yongzhang. Research on a novel topology of dc breaker and its application in simulation of multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 7-13.
- [4] 陆地, 李玉, 武文广, 等. 大功率电力电子技术在我国直流输配电领域的应用[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 1-8.
LU Di, LI Yu, WU Wenguang, et al. Application of high power electronic technology in dc transmission and distribution[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 1-8.
- [5] 付东, 陈冰, 张勇军. 柔性直流配电网的连接方式与建模综述[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 1-8.
FU Dong, CHEN Bing, ZHANG Yongjun. Review on connection mode and modeling of flexible DC power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 1-8.
- [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] JIN Yang, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [8] 魏承志, 史文博, 文安. 三端MMC-HVDC换流站直流母线双极短路故障特性分析[J]. 广东电力, 2016, 29(9): 63-66, 113.
WEI Chengzhi, SHI Wenbo, WEN An. Analysis on characteristic of bipolar short-circuit fault of dc bus of three-terminal MMC-HVDC converter station[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(9): 63-66, 113.
- [9] 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.
- [10] 陈继开, 孙川, 李国庆, 等. 双极MMC-HVDC系统直流故障特性研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 53-60.
CHEN Jikai, SUN Chuan, LI Guoqing, et al. Study on characteristics of DC fault in bipolar MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 53-60.
- [11] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.
DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method based on traveling-wave instantaneous frequency for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [12] 郝勇奇, 王倩, 周士琼, 等. 基于LMD与Teager能量算子的VSC-HVDC输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 81-88.
HAO Yongqi, WANG Qian, ZHOU Shiqiong, et al. Fault location for VSC-HVDC transmission lines based on LMD and Teager energy operator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 81-88.
- [13] 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.
- [14] 李德坤, 宋国兵, 高淑萍, 等. VSC-HVDC输电线路单端行波自动化故障定位方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1128-1133.
LI Dekun, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. Study on automatic fault location for VSC-HVDC transmission lines based on one-terminal traveling wave[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1128-1133.
- [15] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [16] 廖凯, 何正友, 李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 104-109.
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Fault location of HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-109.
- [17] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on

- the basis of the distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [18] 宋国兵, 李德坤, 褚旭, 等. 基于参数识别原理的 VSC-HVDC 输电线路单端故障定位[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 94-99.
SONG Guobing, LI Dekun, CHU Xu, et al. One-terminal fault location for VSC-HVDC transmission lines based on principles of parameter identification[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 94-99.
- [19] 宋国兵, 周德生, 焦在滨, 等. 一种直流输电线路故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 57-61.
SONG Guobing, ZHOU Desheng, JIAO Zaibin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [20] 康丽红, 唐昆明, 罗建, 等. 直流输电线路单极接地双端故障测距[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2268-2273.
KANG Lihong, TANG Kunming, LUO Jian, et al. Two-terminal fault location of monopolar earth fault in HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2268-2273.
- [21] 徐铭铭, 肖立业, 王海风, 等. 一种基于 Prony 算法的直流配电网电缆故障定位方法[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(4): 1-5.
XU Mingming, XIAO Liye, WANG Haifeng, et al. Novel method of locating cable fault in DC distribution based on Prony algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy, 2015, 34(4): 1-5.
- [22] FENG Xianyong, LI Qi, PAN Jiuping. A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection[C] // IEEE Industry Applications Society Meeting, October 2-6, 2016 Portland, USA: 1-5.

收稿日期: 2017-09-19; 修回日期: 2018-02-14

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: xjlf2009@sina.com

(编辑 周金梅)