

基于潮流计算的直流配电网单极接地故障定位算法

徐铭铭¹, 王鹏¹, 高明春²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

2. 江苏大全长江电器股份有限公司, 江苏 镇江 212211)

摘要: 提出了一种基于潮流计算的直流配电网单极接地故障定位算法。通过分析流过接地故障点的电流特征, 发现故障暂态过程结束后, 故障点对地电压近似为零。利用潮流计算得到负荷电流分布, 配合故障点对地电压近似为零的条件, 计算每个节点故障时各个测量点对地残余电压的分布情况。将其与故障时各测量点残余电压分布情况进行比较, 一致性最高的即为距实际故障点最近的节点。进一步利用阻抗法确定故障点的准确位置。在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型, 仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 直流配电网; 故障定位; 潮流计算; 单极接地故障; 残余电压分布

A fault location algorithm for the single-pole-to-ground fault of DC distribution network based on power flow calculation

XU Mingming¹, WANG Peng¹, GAO Mingchun²

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. Jiangsu Daqo Changjiang Electric Co., Ltd, Zhenjiang 212211, China)

Abstract: This paper presents an algorithm of locating single-pole-to-ground faults in DC distribution network based on power flow calculation. The fault current feature flowing through fault point is analyzed, implying the pole-to-ground voltage at the fault point of fault pole is almost zero when the transient process ends. Given this precondition, the distribution of residual voltage of each measuring point in fault pole can be calculated with the load current, which is obtained by power flow calculation. By comparing the similarity between the distribution and the measured residual voltage distribution in real fault, the node which makes the maximum similarity is identified to be closest to the real fault point. An impedance-based method is applied further to calculate the accurate location of fault point. Simulation model is established based on Matlab/Simulink, and the test results demonstrate the validity of proposed algorithm.

Key words: DC distribution network; fault location; power flow calculation; single-pole-to-ground fault; residual voltage distribution

0 引言

近年来, 配网侧分布式电源的接入和直流负荷的增加使直流配电网成为一个研究热点。相关研究已经论证了直流配电网在降低线路损耗、提高供电质量、接入分布式电源等方面的优势^[1-8]。直流侧采用不接地方式或经高阻接地时, 发生单极接地故障后, 由于没有形成完整的故障回路, 故障电流为系统电容电流; 系统中点对地电压发生位移, 而正负极之间电压仍保持不变, 负荷可以继续运行, 因此提高了供电可靠性^[9-11]。

然而, 非故障极的电压升高, 长时间运行会

导致绝缘损坏并发生严重的极间短路。因此, 直流配电系统发生单极接地故障时应该快速找到并隔离故障点。

目前, 关于直流配电网故障检测和定位的研究较少。文献[12]指出安装绝缘监察装置可以尽早发现单极接地故障。文献[13-14]研究了船用供电系统的接地故障定位算法, 利用小波分析、分形分析等信号处理算法提取故障后高频噪声里包含的故障位置信息, 该研究主要针对船用供电系统等特殊场合。文献[15]初步验证了基于故障行波波头特征判断保护区内、区外接地故障的可行性, 但是未实现故障的精确定位。文献[16-17]研究了双极间故障保护方法,

未涉及接地故障定位。

本文分析了故障后故障电流和故障点残余电压的特征,在此基础上,提出了一种基于潮流计算的直流配电网单极接地故障定位算法。

1 直流配电网接地方式

图1为VSC换流器直流侧经钳位电阻中点接地方式示意图^[10]。同理,对于MMC换流器,文献[11]在正负极间经过对称的高电阻接地,一方面对两极电压进行钳位,另一方面提供直流侧电位参考点,避免正负极对地电位波动。由于钳位电阻值极大,发生单极接地故障时,理论上只是改变了直流侧电位参考点的位置,正负极间的电压保持不变,直流侧负荷可以继续运行。

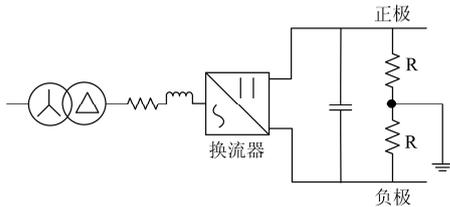


图1 直流侧经钳位电阻中点接地示意图

Fig. 1 Grounding through the middle point of clamp resistance

2 直流配电网单极接地故障模型

不接地或者采用上述接地方式的直流配电网发生单极接地故障时,故障极的电压降低到0附近,而非故障极电压升高到两倍的额定电压,如图2所示。由于两极间的线电压仍保持额定电压不变,负荷的供电不受影响,所以系统可以继续运行。

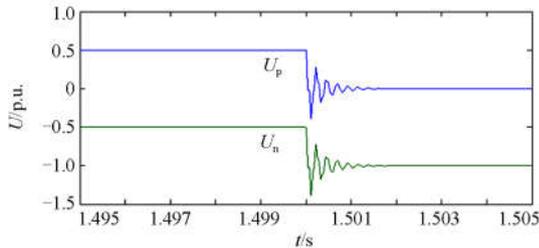


图2 正极接地故障时正负两极电压变化

Fig. 2 Voltage fluctuation of the positive and negative poles in the case of positive-pole-to-ground fault

直流配电网单极接地故障时的故障电流与交流系统有明显的不同。交流电使线路分布电容反复充放电,导致故障点流过持续的电容电流。但是在直流系统中,故障极对地电容中存储的能量释放之后,不再有持续的电容电流流过^[10]。所以直流配电网发生单极接地故障时,故障点流过的电容电流持续时

间很短。

图3为故障暂态时故障极线路等效模型,各处等效电容向故障点放电回路是RLC串联电路,配电网线路参数一般满足临界条件 $R < 2\sqrt{L/C}$,因此电容应发生振荡放电,分布电容 C_i 的放电电流表达式为

$$I_{Ci} = [\frac{U_{0i}}{\omega_i L_i} \sin(\omega_i t) - \frac{I_{0i} \omega_{0i}}{\omega_i} \sin(\omega_i t - \beta_i)] e^{-\delta_i t} \quad (1)$$

$$\delta_i = R_i / 2L_i \quad (2)$$

$$\omega_i = \sqrt{\frac{1}{L_i C_i} - \left(\frac{R_i}{2L_i}\right)^2} \quad (3)$$

$$\omega_{0i} = \sqrt{\delta_i^2 + \omega_i^2} \quad (4)$$

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{\omega_i}{\delta_i}\right) \quad (5)$$

式中: U_{0i} 为初始电压; I_{0i} 为初始电流; ω_i 、 L_i 、 δ_i 分别是分布电容 C_i 的放电回路所对应的振荡频率、等效电感和衰减系数。

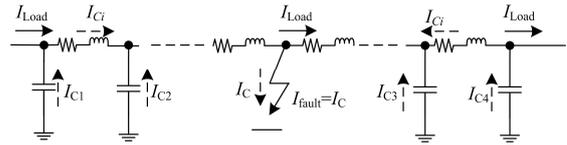


图3 故障暂态时故障极线路等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the fault pole in fault transient

图4为发生单极接地故障前后线路电流的变化情况,负荷电流的幅值在故障前后几乎不变,但在发生故障时,负荷电流上会叠加暂态故障电流,即流经该测量点的暂态电容电流。

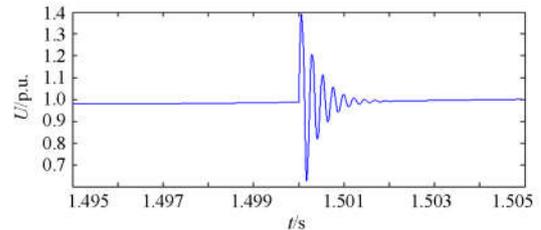


图4 单极接地时线路某处流过的电流 (含负荷电流和暂态电容电流)

Fig. 4 Current flowing through one node in the case of single-pole-to-ground fault (including load current and transient capacitance current)

流过接地点的故障电流为各个分布电容放电电流的总和。

$$I_{\text{fault}} = \sum_i [\frac{U_{0i}}{\omega_i L_i} \sin(\omega_i t) - \frac{I_{0i} \omega_{0i}}{\omega_i} \sin(\omega_i t - \beta_i)] e^{-\delta_i t} \quad (6)$$

式(6)表明流经接地点的故障电流为一组振荡衰减曲线的叠加, 见图 5。

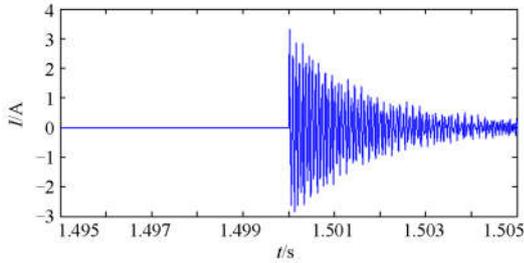


图 5 单极接地时流过故障点的接地电流

Fig. 5 Current flowing through fault point in the case of single-pole-to-ground fault

即使过渡电阻较大, 不满足临界条件 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时, 电容电流也以指数衰减形式衰减到零, 具体表达式不再赘述。

上述分析表明, 当分布电容的充放电过程完成后, 接地点不再流过故障电流(暂态电容电流), 接地点对地残余电压近似为零, 这一特点排除了故障点过渡电阻对故障定位的影响。

3 故障定位算法

故障后重新达到稳态时, 接地点对地残余电压为零, 因此可以考虑使用负荷电流和测量点的电压残余值来计算测量点和故障点之间的距离。负荷电流可以通过直流电网潮流计算得到。

故障暂态过程结束后, 流过故障点的电容电流为零, 无论过渡电阻为多少, 图 6 中故障点对地电压 U_F 近似为零。因此, 可以根据负荷电流计算出故障极上其他各点的残余电压。如图 6 所示。

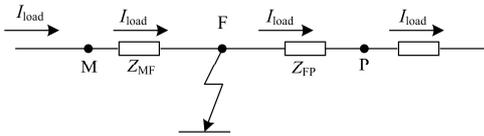


图 6 单极接地故障后故障极负荷电流示意图

Fig. 6 Load current in the fault pole in the case of single-pole-to-ground fault

$$U_M = I_{\text{load}} Z_{MF} \quad (7)$$

或

$$U_P = I_{\text{load}} Z_{FP} \quad (8)$$

式中: Z_{MF} 和 Z_{FP} 为 M 点和 P 点到故障点的阻抗, 直流稳态时只含有电阻; U_M 和 U_P 为故障极上 M 点和 P 点在故障后的残余电压。在实际配电网中, 线路上会接有各种负荷, 导致各段的负荷电流并不一致。因此, 需要对式(7)和式(8)进行修正。

$$U_M = I_{MN} Z_{MN} + I_{NQ} Z_{NF} \quad (9)$$

如图 7 所示, 当 MN 之间接有 $H-1$ 个负荷(即有 $H-1$ 个节点), 则将 MN 分为 H 段, 设第 i 段负荷电流为 I_i , 则可将 U_N 的表达式写为

$$U_N = U_M - \sum_{i=1}^H I_i Z_i \quad (10)$$

$$Z_{NF} = U_N / I_{NQ} \quad (11)$$

$$d_{NF} = Z_{NF} / Z_U \quad (12)$$

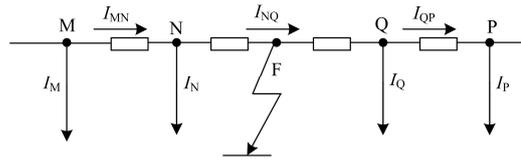


图 7 单极接地故障后故障极负荷电流分布示意图

Fig. 7 Load current in the fault pole in the case of single-pole-to-ground fault

Z_U 为单位距离阻抗, 则测量点 M 到故障点 F 的距离为

$$d_{MF} = d_{MN} + d_{NF} \quad (13)$$

复杂配电网分支较多, 负荷电流的分布也较复杂, 在不同的分支上可能出现多个满足上述距离的点。因此, 只依靠一个测量点, 并不能唯一地确定故障点。

本文提出基于残余电压一致性比较的方法来确定故障点。计算各节点发生故障时网络中残余电压分布情况, 将故障后残余电压分布情况与之进行比较, 一致性最高的节点为距离故障点最近的节点。

根据拓扑和负荷状况进行潮流计算, 得到各段线路上的负荷电流, 结合接地点对地残余电压为零的条件, 可计算出各个 FTU 测量点的残余电压, 形成故障电压数据库 $U_S(V \times N)$, V 为系统中节点数, N 为测量点数量。

采用 N 个测量点, 将故障后这些测量点采集到的残余电压值传送至主站, 存入故障残压矩阵 $U_F(1 \times N)$ 。

将 U_F 与 U_S 中的每一行的残余电压计算值相比较, 电压分布一致性最高的行所对应的节点即为距离故障点最近的节点^[18-19]。因此设目标函数

$$F(i) = \sum_{j=1}^N (U_F(1, j) - U_S(i, j))^2 \quad (1 < i < V) \quad (14)$$

使 $F(i)$ 取得最小值的 i 即为距离故障点最近的

节点编号。若该节点处没有分支,则可以根据式(11)和式(12)计算出该节点附近故障极对地电压为零的点,即为故障点。如果在该节点处有多个分支,则故障点有可能位于该节点附近的任何一个分支上,因此需要额外的信息来排除伪故障点。

如图 8,若节点 N 发生故障时,可使 $F(i)$ 取最小值,负荷电流方向如图 8 中所示,则当 U_N 大于零时,电压为零的点有可能在 NQ 或 NH 之间,即故障点可以为 F_1 或 F_2 。NF₁ 或 NF₂ 的距离可以由式(11)和式(12)算出。为了排除为故障点,需要比较 NH 和 NQ 上的暂态电容电流大小。故障后全系统线路的暂态电容电流都流向接地点。不妨假设 F_1 为故障点,则线路电容放电电流方向如图 9 中 I_c 所示。

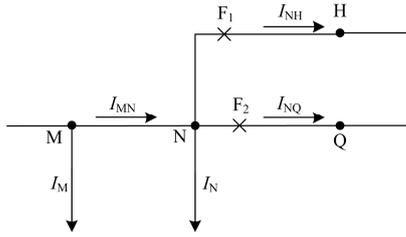


图 8 伪故障点示意图

Fig. 8 Diagram of fake fault point

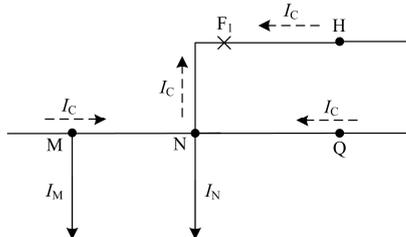


图 9 故障极分布电容放电电流方向

Fig. 9 Direction of the discharging current of the distributed capacitor in fault pole

因此,故障分支上流过的暂态电容电流最大。比较 NH 与 NQ 支路上暂态电容电流的大小,即可确定故障点所在支路。引入信号能量法来比较各支路电容电流的大小。各支路的电容电流能量为

$$S_{I_c} = \int_{t=t_{\text{fault}}^+}^{T_{\text{end}}} [I_c(t)]^2 dt \quad (15)$$

式中, $I_c(t)$ 为暂态电容电流,可以由各支路的总电流减去负荷电流得到,即式(16)所示。

$$I_c(t) = I_{\text{branch}} - I_{\text{Load}} \quad (16)$$

对于离散采样信号,式(15)变为

$$S_{I_c} = \sum_{i=1}^L [A(i)]^2 \quad (17)$$

式中, L 是采样点数。在所有与节点 N 相连的支路中, S_{I_c} 最大的支路为故障分支。确定故障分支后,配合式(11)和式(12)计算得到的 NF₁ 的距离,即可准确确定故障点所在位置。上述整个定位过程无需人工干预,能够实现在线定位,且同时适用于采用主从控制法和下垂控制法的多端直流网络。图 10 为该算法的实现流程图。

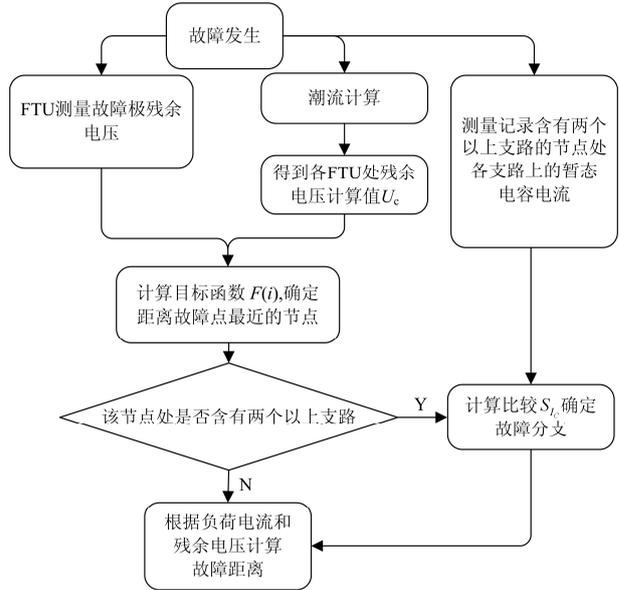


图 10 故障定位算法实现流程

Fig. 10 Realization flow chart of fault location algorithm

判断发生单极接地故障后,主站向各 FTU 发出指令上传各测量点故障极对地残余电压。同时根据负荷和拓扑进行潮流计算,得到负荷电流分布情况,计算出各个节点为故障点时的残余电压分布情况。利用式(14)中的目标函数确定距离故障点最近的节点。如果该节点无分支,则利用式(11)和式(12)确定故障点位置;如果该节点有分支,则利用暂态电容电流能量比较法确定故障分支,进而计算出故障距离。

残余电压测量可以使用加装直流电压传感器的馈线终端单元(FTU)来实现。该定位算法对各个测量点的时间同步性要求不高,各个 FTU 之间不需要严格的时间同步。

4 直流潮流计算

将直流系统中采用恒压控制的节点视为平衡节点,其他节点则视为 PQ 节点。根据节点电压法写出直流系统的节点电压方程。

$$\mathbf{I}_n = \mathbf{Y}_n \mathbf{U}_n \quad (18)$$

式中: \mathbf{I}_n 为节点注入电流矩阵; \mathbf{Y}_n 为节点导纳矩阵; \mathbf{U}_n 为节点电压。节点功率方程为

$$P_i = 2U_i I_i \quad (19)$$

对于 PQ 节点, 已知量为功率, 因此将式(18)代入式(19)中得到非线性方程

$$P_i = 2U_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (20)$$

对于平衡节点, 电压已知, 功率未知, 因此有

$$P_s = -\sum P_i \quad (21)$$

对于式(18)和式(19)构成的方程组可以用牛顿迭代法求解。

直流系统和交流系统形成交直流混合系统, 因此还需要考虑交直流潮流之间的接口问题^[20]。文献[21]将直流潮流计算嵌入交流系统潮流计算中, 形成了交直流混合系统的潮流计算方法。本文采用文献[21]提出的潮流计算方法。

5 仿真实验

图 11 为一个 4 端 9 节点的直流配电系统, 采用双极供电。正极电压为 1 500 V, 负极电压为 -1 500 V。采用主从控制法, 即母线 1 处的换流器采用恒压控制, 其他换流器采用恒功率控制。实现电压测量的 FTU 分别装设在母线 1、2、3、4 上。在 Simulink/Matlab 中搭建上述模型, 模型具体参数见附录。

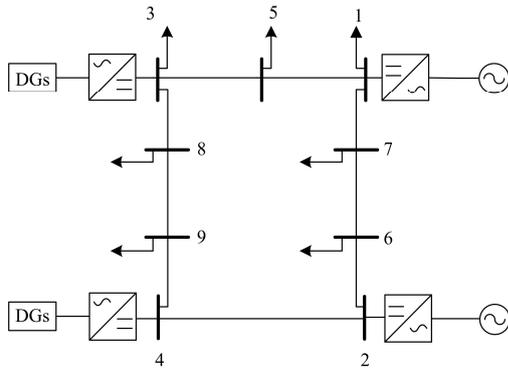


图 11 四端 9 节点直流配电网示意图

Fig. 11 A four-terminal-nine-node DC distribution system

设 4 s 时节点 3 和节点 5 之间发生正极接地故障, 故障点距离节点 3 一侧 176.7 m。判断发生单极接地故障后, 根据拓扑和负荷进行潮流计算, 得到各段线路上的负荷电流分布。假设故障依次发生在编号为 1-9 的各节点上, 根据负荷电流分布分别计算各个节点发生故障时四个 FTU 处的故障极残

余电压值, 形成一个 $\mathbf{U}_s(9 \times 4)$ 矩阵。依据式(14), 可以计算出故障发生在节点 i 时的 $F(i)$ 。用图 12 所示的柱状图做比较, 则可以明显看到节点 3 处的 F 值最小, 因此可以确定故障发生在节点 3 附近。

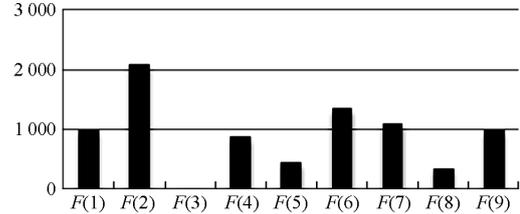


图 12 $F(i)$ 值柱状图

Fig. 12 Histogram of $F(i)$

节点 3 处存在分支, 故障点有可能位于区间(3,5)或(3,8)之间, 因此需要进一步排除伪故障点。由式(17)计算比较区间(3,5)与区间(3,8)上的暂态电容放电电流能量 S_{ic} , 结果表明区间(3,5)为故障分支。再由式(11)和式(12)可确定故障点距节点 3 的距离是 174.6 m, 误差为 1.18%。

改变故障点位置和过渡电阻值, 定位结果记录在表 1 和表 2 中。

表 1 过渡电阻为 0 时的定位结果

Table 1 Result of fault location when fault resistance is zero

故障点位置		定位结果		误差
区间(i,j)	与节点 i 的距离	区间(i,j)	与节点 i 的距离	
(1,5)	707	(1,5)	709	0.28%
(1,7)	137.5	(1,7)	139.1	1.16%
(2,4)	117.8	(2,4)	118.7	0.76%
(2,6)	157.1	(2,6)	150.1	4.4%
(3,8)	785.5	(3,8)	785.01	0.001%
(3,5)	176.7	(3,5)	174.6	1.18%
(4,9)	157.1	(4,9)	161.8	2.99%
(8,9)	1 080.1	(8,9)	1 052	2.6%

表 2 过渡电阻为 5 Ω 时的定位结果

Table 2 Result of fault location when fault resistance is 5 Ω

故障点位置		定位结果		误差
区间(i,j)	与节点 i 的距离	区间(i,j)	与节点 i 的距离	
(1,5)	707	(1,5)	701	0.85%
(1,7)	137.5	(1,7)	139.6	1.5%
(2,4)	117.8	(2,4)	118.8	0.84%
(2,6)	157.1	(2,6)	154.6	1.59%
(3,8)	785.5	(3,8)	777.7	0.99%
(3,5)	176.7	(3,5)	178.2	0.96%
(4,9)	157.1	(4,9)	162.0	3.12%
(8,9)	1 080.1	(8,9)	1 052.7	2.5%

仿真表明, 该算法能够准确确定故障区间, 并计算出故障点在该区间上的具体位置。

6 结语

本文建立了直流配电网单极接地时的故障模型, 分析了故障电压、故障电流特点, 在此基础上提出了基于潮流计算的直流配电网单极接地故障定位算法。仿真结果表明, 该定位算法能够快速确定故障点所在区间, 并计算出接地点在故障区间上的具体位置, 对缩短系统带故障运行时间、避免故障发展为极间短路有重要意义。同时, 该算法不需要各个测量点数据之间的严格同步, 对硬件要求较低, 易于实现。但是, 该算法的定位精度对系统参数的准确性依赖较大; 在潮流计算时, 没有计及换流器开关损耗的影响, 因此在实际应用中, 还需要建立更加准确的系统模型, 并对潮流计算方法做进一步改进。

致谢: 本文在写作过程中, 得到了华北电力大学曹军副教授、华北水利水电大学研究生吴擎的热心帮助, 在此向他们表示衷心的感谢!

附录

表 3 线路参数

Table 3 Line parameters

线路区间	(1,5)	(5,3)	(3,8)	(8,9)	(9,4)
阻抗/p.u.	0.05	0.05	0.06	0.15	0.01
线路区间	(4,2)	(2,6)	(6,7)	(7,1)	—
阻抗/p.u.	0.02	0.02	0.01	0.01	—

表 4 各节点功率

Table 4 Node power

节点编号	2	3	4	5	6	7	8	9
功率/p.u.	0.5	-0.6	-0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

参考文献

[1] 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 development prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.

[2] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67.
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.

[3] 张宏俊, 吴越文, 陈卓, 等. 交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016,

44(15): 79-85.
ZHANG Hongjun, WU Yuewen, CHEN Zhuo, et al. Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 79-85.

[4] 王丹, 毛承雄, 陆继明, 等. 直流配电系统技术分析及设计构想[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 82-88.
WANG Dan, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Technical analysis and design concept of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 82-88.

[5] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.

[6] 徐青山, 吴盛军, 李群, 等. 一种基于直流微电网的电动汽车充电优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S2): 110-119.
XU Qingshan, WU Shengjun, LI Qun, et al. An EV charging optimization control strategy based on the workplace DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 110-119.

[7] 李浪. 面向直流配电系统的新型固态故障限流器设计[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 87-91.
LI Lang. A novel solid state fault current limiter applied to DC distribution system[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 87-91.

[8] 范士雄, 蒲天骄, 刘广一, 等. 主动配电网中分布式发电系统接入技术及其进展[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S2): 92-101.
FAN Shixiong, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Technologies and its trends of grid integration of distributed generation in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 92-101.

[9] CUZNER R M, SIELICKI T, ARCHIBALD A E, et al. Management of ground faults in an ungrounded multi-terminal zonal DC distribution system with auctioneered loads[C] // Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), April 10-13, 2011, Virginia, USA: 300-305.

[10] 徐铭铭, 肖立业, 林良真. 直流配电网单极接地故障定位方法[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(11): 55-62.
XU Mingming, XIAO Liye, LIN Liangzhen. Method of locating single-pole-to-ground fault in DC distribution

- system[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2015, 34(11): 55-62.
- [11] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(23): 82-87.
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(23): 82-87.
- [12] BARNES M, BEDDARD A. Voltage source converter HVDC links — the state of the art and issues going forward[J]. *Energy Procedia*, 2012, 24: 108-122.
- [13] PAN Y, SILVEIRA P M, STEURER M, et al. A fault location approach for high-impedance grounded DC shipboard power distribution systems[C] // *Power and Energy Society General Meeting — Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 1-6.
- [14] PAN Y, STEURER M, BALDWIN T L. Ground fault location testing of a noise pattern based approach on an ungrounded DC system[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, 47(2): 996-1002.
- [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] 秦红霞, 孙刚, 时伯年, 等. 柔性直流配电网极间故障控制保护策略与主设备参数配合研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(21): 150-156.
QIN Hongxia, SUN Gang, SHI Bonian, et al. Research on control and protection strategy of MMC based DC distribution grid with interpoles fault[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(21): 150-156.
- [17] 和敬涵, 孟鑫, 宋晓明, 等. 基于时域微分的地铁直流牵引系统故障定位[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(3): 164-170.
HE Jinghan, MENG Xin, SONG Xiaoming, et al. Fault location research of DC railway traction system based on time-domain differential[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(3): 164-170.
- [18] PEREIRA R A F, DA SILVA L G W, KEZUNOVIC M, et al. Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(2): 852-862.
- [19] 李勋, 龚庆武, 肖辉, 等. 基于相关分析匹配度的配电网故障定位[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(1): 90-94.
LI Xun, GONG Qingwu, XIAO Hui, et al. Fault location for distribution network based on correlation analysis matching degree[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 36(1): 90-94.
- [20] 蒋智化, 刘连光, 刘自发, 等. 网格式中压直流配电网潮流计算与稳态功率分布特性研究[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(3): 1-7, 12.
JIANG Zhihua, LIU Lianguang, LIU Zifa, et al. Research on power flow calculation and steady state power distribution in meshed medium DC distribution network[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(3): 1-7, 12.
- [21] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. Generalized steady-state VSC-MTDC model for sequential AC/DC power flow algorithms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 821-829.
-
- 收稿日期: 2017-04-22; 修回日期: 2017-09-04
- 作者简介:
- 徐铭铭(1985—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为智能配电网技术; E-mail: xu_ming_ming@vip.sina.com
- 王 鹏(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网技术; E-mail: 249656186@qq.com
- 高明春(1985—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为中压电器设备及其智能化。E-mail: gaomingchun@daqo.com
- (编辑 周金梅)