

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.08.005

基于BP神经网络的直流电网故障定位与保护方法

蒋原¹, 李擎¹, 冯茜¹, 郭琳¹, 崔家瑞¹, 沙广林²

(1. 北京科技大学自动化学院工业过程知识自动化教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 灵活的交直流混合电网将成为未来电网中的重要环节,其故障定位方法和保护方法是保障电网安全、稳定、可靠运行的基础。但是,目前直流电网的故障辨识方法不易判断故障发生时间、位置,导致难以形成稳健的保护策略。文中首先分析了直流电网中广泛存在的多类故障影响,提出了基于电流、电流变化率等特征的神经网络模型的实时故障诊断方法;然后,在混合式双极性直流断路器上利用反时限过流保护策略,隔离故障区域;最后,通过MATLAB/Simulink仿真,验证了该保护方案可以有效、准确、快速地定位、隔离故障区域,有利于提高直流电网运行的可靠性。

关键词: 直流配电网; 故障保护; 神经网络; 故障定位

Fault Location and Protection Method for DC Power Grid Based on BP Neural Network

JIANG Yuan¹, LI Qing¹, FENG Qian¹, GUO Lin¹, CUI Jiarui¹, SHA Guanglin²

(1. Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes of Ministry of Education, School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Flexible AC/DC hybrid grid will become an important link in the future power grid. The fault location method and protection method are the basis to ensure safe, stable and reliable operation of power grid. However, the fault identification methods of DC power grid are not easy to determine the time and location of a fault, which makes it difficult to form a robust protection strategy. This paper analyses the influences of many kinds of faults widely existing in DC power grid, and proposes a real-time fault diagnosis method based on BP neural network model with current and current change rate characteristics. Then, the fault area is isolated by using inverse-time overcurrent protection strategy on hybrid bipolar DC circuit breaker. MATLAB/Simulink simulation verifies that the protection scheme can locate and isolate the fault area effectively, accurately and quickly, and is conducive to improving the reliability of DC power grid operation.

Key words: DC distribution network; fault protection; BP neural network; fault location

0 引言

近年来,随着中国经济的迅速发展和能源需求的大幅增长,能源发展面临资源和环境的巨大挑战,环境问题日益严重,能源产业结构亟需改善。因此以风光储为代表的分布式发电系统,作为新能源领域中重要的供给形式,受到了广泛的关注和研

究^[1-2]。与此同时,包含微电网、灵活配电、智能电网等新元素的能源互联网体系催生了新的能源利用体系以及新一代电力系统,传统配电网面临着需要与分布式能源发电和交直流混合配电等新技术进行融合的挑战。

目前能实现交流侧与直流侧能量交换的装置是换流器,实际中应用最广泛的是两电平电压源换

收稿日期:2020-02-14; 修回日期:2020-04-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(FRF-TP-19-035A1)。

Project Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (FRF-TP-19-035A1).

流器(voltage source converter, VSC)和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。但无论是基于VSC或是MMC的直流配电系统,都面临着同样的技术问题:当直流侧发生故障时,换流器内部的IGBT可以快速关断,但是续流二极管将构成不控整流桥,使交流侧持续向直流侧提供短路电流,因此必须采取措施快速保护。

与交流电网相比,直流电网的系统架构、工作模式等均有不同,因此传统的交流保护方法并不完全适合直流系统。直流保护的技术难点表现在以下方面:直流网故障电流上升速度快,暂态分量丰富;直流配电网故障特征复杂,受系统运行控制策略、过渡电阻等因素影响大^[3]。对此,文[4]将直流网络短路故障的暂态过程分段,提取其中电容放电的暂态过程来进行故障测距。文[5]利用直流电容放电电流变化率与故障位置的关系,提出一种可用于具有多级馈线的直流配电系统线路保护方案及其整定方法。但该方法仅可对故障进行定位,没有对故障类型进行分类,否则在保护策略上可有进一步的优化。此外,直流系统中电流没有自然过零点,无法应用交流断路器中成熟的灭弧技术^[6]。使用直流断路器可以实现故障线路的快速隔离,保证直流电网运行的可靠性^[7-9]。全固态直流断路器以电力

电子开关器件作为分断故障电流的核心单元,其可靠性高、可控性好、动作速度快但在实际应用中,通态损耗仍是制约其推广的一个重要因素^[10]。混合式直流断路器可以兼顾机械开关的低通态损耗特性和电力电子开关的快速分断特性,是目前的研究热点^[11-12]。

文中利用BP神经网络算法对直流电网故障进行分类和定位:当低压直流侧发生短路故障时,通过实时检测电流值的大小,以 i_L 、 di_L/dt 和 d^2i_L/dt^2 作为特征值,利用BP神经网络算法对故障进行分类及定位,并在MATLAB/Simulink中对该方法进行了仿真验证。

1 直流配电网故障分析

1.1 直流配电网拓扑

直流电网的高压交流侧与配电网10 kV连接,通过级联的MMC将高压工频交流转化为直流,实现高压直流母线与交流母线的接口,高压侧直流母线电压为 ± 10 kV。隔离变换级电力电子变压器采用双主动桥(dual active bridge, DAB)拓扑,将高压直流 ± 10 kV转换为低压直流 ± 400 V。另外低压380 V交流侧通过VSC转换为低压直流 ± 400 V,组成配电系统。集成保护功能的直流配电网拓扑见图1。

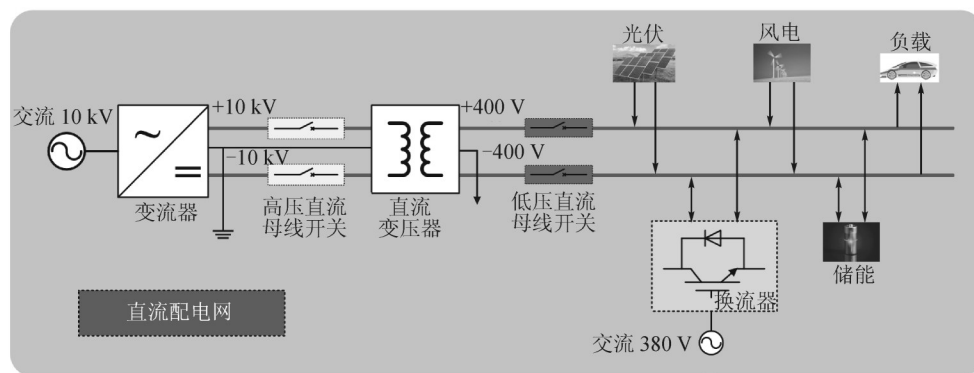


图1 集成保护功能的直流配电网拓扑

Fig. 1 DC distribution network topology with integrated protection function

1.2 故障分析

1.2.1 极间短路故障

极间短路故障是VSC型直流配电网中最为严重的故障。当故障发生时,流过IGBT的电流急剧上升,VSC在自身保护的作用下会快速闭锁IGBT。直流侧电容放电,短路电流上升,同时直流侧电压下降;当电压降为零时,直流侧电感的续流作用使得VSC中6个二极管同时导通;之后VSC工作在不控整流状态,进入交流侧电流回馈阶段。因此根据故障后电流电压变化的特性不同,可以将极间短路故

障过程分为3个阶段:电容放电阶段、二极管续流阶段以及交流侧电流回馈阶段^[13]。

但需要注意的是,二极管续流阶段相当于发生三相短路故障。因此必须保证在二极管续流阶段即电容放电到零之前将短路故障切除,否则VSC中二极管将会承受极大的电流,发生毁灭性的损坏^[14]。从实际应用角度出发,文中只分析短路故障的电容放电阶段,对其余阶段不再进行讨论。

极间短路等效电路见图2,其中直流侧电容值远大于线路的分布电容,可忽略线路的对地电容,

电容放电阶段的二阶微分方程为

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (1)$$

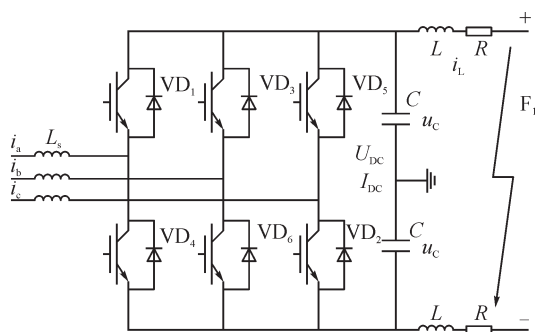


图2 极间短路故障等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit for bipolar short circuit fault

由于极间故障通常是金属性故障,其线路阻抗较小,因此只对欠阻尼的情况进行讨论。设发生短路故障时刻 t_0 ,直流电容总电压初值为 U_{DC} ,电流初值为 I_{DC} ,则故障期间电容电压和电感电流的表达式为

$$\begin{cases} u_C = \frac{U_{DC} \omega_0}{2\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_{DC}}{4\omega C} e^{-\delta t} \sin \omega t \\ i_L = e^{-\delta t} \left(\frac{U_{DC}}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega t + I_{DC} \cos \omega t \right) \end{cases} \quad (2)$$

令电容电压为零,可以求得直流侧电压从故障发生到降为零,即切除故障所需的时间为

$$t = t_0 + \frac{\pi - \gamma}{\omega} \quad (3)$$

1.2.2 单极接地故障

单极接地故障也是直流配电网常见的故障之一,发生故障时,直流侧电容中性点与故障点等电位。根据故障电流回路的不同,可以将故障过程分为3个阶段:直流侧电容放电阶段、交流侧电流回馈阶段、电压恢复阶段。与双极短路类似,单极接地故障首先也是直流侧电容放电阶段,等效电路见图3。

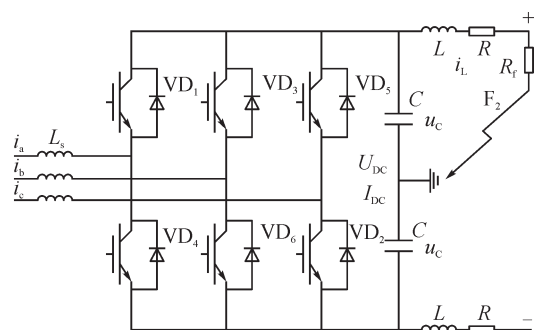


图3 单极接地故障等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit for single pole grounding fault

但单极接地故障既可以是金属性故障,也可以是过渡电阻性故障,其电路振荡形式与线路等效阻

抗 R 以及过渡电阻 R_f 的大小有关。欠阻尼放电过程的分析与极间短路故障类似,该节分析过阻尼非振荡过程,电路的解为

$$\begin{cases} u_C = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \\ i_L = -C(A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}) \end{cases} \quad (4)$$

若线路等效阻抗及过渡电阻较大或者保护系统在电容放电过程中及时响应,则可避免因交流侧电流回馈导致该阶段二极管过流击穿。在过阻尼放电过程中,随着电容放电的进行,故障极电容电压下降,非故障极电容电压上升,可以直接进入电压恢复阶段:直流系统通过非故障相单极运行,使其在电压恢复阶段具备短时持续运行能力,可为故障清除争取时间。

2 低压侧保护方案

2.1 保护策略

VSC型直流配电网的主要故障类型有极间短路故障和单极接地故障。两种故障出现的时候都具有双重不确定性,包括时刻不确定性和位置不确定性。其中时刻不确定性使保护系统对于故障要有较高的敏感度和反应度,而位置不确定性要求系统具有只对故障段断路器发出跳闸信号的功能。为了提高故障位置的定位精确度,文中提出了利用反向传播神经网络(BP neural network)算法的故障分类和定位方法。采用离线训练,在线诊断的思想:故障发生时,根据实时采集得到的数据来进行分析,判断故障的类型和位置,向相应的保护断路器发出跳闸信号。保护策略的流程图见图4。

2.2 BP神经网络

由式(2)、(4)可知,当电网出现故障时,电压和电流都会出现变化,其变化规律遵循电容放电的二阶微分方程。根据实际工况两种故障类型的特点,该节在分析过程中设极间短路故障为欠阻尼情况,而单极接地故障为过阻尼情况。如果仅以 i_L 作为单一输入量,只能对正常情况和故障情况进行区分。若要将极间短路故障和单极接地故障区分开来,应该加入 di_L/dt 这一输入量。另外,训练神经网络的目的是对故障进行定位,仅以前面两种输入量的数据对比难以进一步对故障位置进行标定,因此需要增加输入量 $d^2 i_L/dt^2$,可在区分出故障类型的前提下确定故障的位置范围。

由式(2)可以得到,在极间短路故障中的 di_L/dt 和 $d^2 i_L/dt^2$ 为

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = e^{-\delta t} \left[\left(\frac{\omega U_{DC}}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} - \delta I_{DC} \right) \cos \omega t - \left(\frac{\delta U_{DC}}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \omega I_{DC} \right) \sin \omega t \right] \\ \frac{d^2 i_L}{dt^2} = e^{-\delta t} \left\{ \left[(\delta^2 - \omega^2) I_{DC} - \omega \delta U_{DC} \sqrt{\frac{C}{L}} \right] \cos \omega t + \left[2\omega \delta I_{DC} + \frac{(\delta^2 - \omega^2) U_{DC}}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \right] \sin \omega t \right\} \end{cases} \quad (5)$$

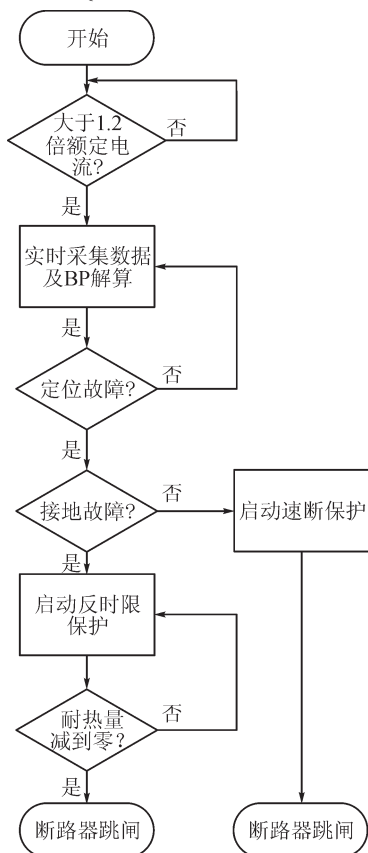


图4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

由式(4)可以得到,在单极接地故障中的 di_L/dt 和 d^2i_L/dt^2 为

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -C(A_1 p_1^2 e^{p_1 t} + A_2 p_2^2 e^{p_2 t}) \\ \frac{d^2 i_L}{dt^2} = -C(A_1 p_1^3 e^{p_1 t} + A_2 p_2^3 e^{p_2 t}) \end{cases} \quad (6)$$

由式(2)、(4)、(5)、(6)可以看出,输入量 i_L 、 di_L/dt 和 d^2i_L/dt^2 都有确定的表达式,由于在故障发生时,会出现不同的线路阻抗,而单极接地故障还会可能有过渡电阻,因此根据不同的情况可以得到不同的3个

输入量,从而利用神经网络实现直流电网的运行状况分类和故障定位。

在建立BP神经网络之前,文中首先通过MATLAB对直流电网进行仿真,得到电网无故障状态以及两种故障状况下的数据。为了根据电网运行状况和故障发生位置等进行相应数据的类别标识,用一维数据作为输出量。至此,可以确定BP神经网络的结构,其拓扑图见图5。

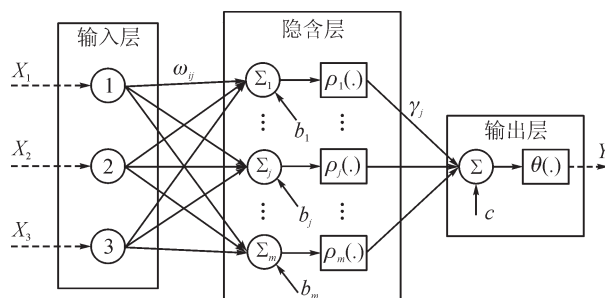


图5 BP神经网络拓扑图

Fig. 5 The topology of BP neural network

通过离线训练得到的BP神经网络,在经过数据测试后,若可以达到一定的准确率,则证明该网络可以使用;否则需要重新对网络进行初始化和训练,直到网络的分类性能达到要求。性能满足要求的神经网络,能够被放入电网保护系统的处理器中,实时对采集到的各项数据进行处理,判断当下电网运行状况或故障出现时的故障类型以及位置,并把相应的指令发送到对应的保护断路器中,实现故障切除而保护直流电网。

3 仿真结果与分析

3.1 馈线分布模型

为了验证神经网络方法的可行性,文中在仿真时将10 km的母线—馈线网络划分成3段,见图6,每个区域都有对应的断路器进行保护。

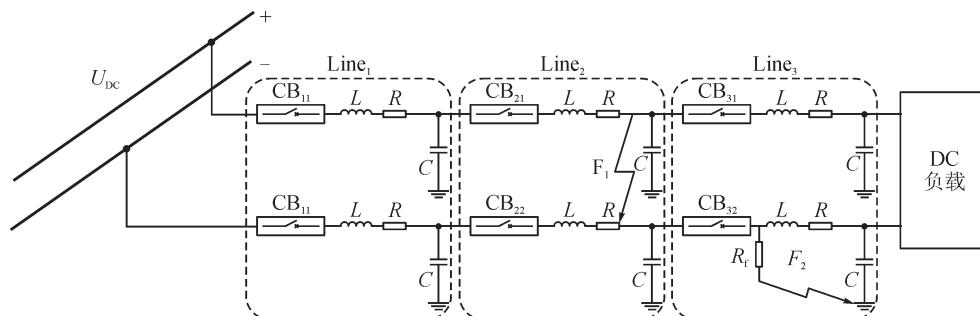


图6 低压馈线及直流故障分布图

Fig. 6 Low-voltage feeder and DC fault

3.2 故障定位及诊断精度

在BP神经网络的仿真中,文中对不同的状况以及故障类型进行分类,并且以一维输出来进行表示,其中的分类情况见表1。采集5 258组数据,通过利用4 500组数据进行神经网络训练,剩下758组数据进行测试,得到各工况识别准确率见表1。

表 1 BP神经网络分类、输出及准确率

Table 1 Classification, output and accuracy of BP neural network

线路段	故障分类	输出类别	准确率/%
Line ₁₋₃	无故障状况	1	94.97
Line ₁	单极接地故障	2	93.75
Line ₂	单极接地故障	3	90.00
Line ₃	单极接地故障	4	91.53
Line ₁	极间短路故障	5	95.65
Line ₂	极间短路故障	6	95.49
Line ₃	极间短路故障	7	95.37

3.3 单极接地故障

电网在Line₃段出现单极接地故障时的电流和BP神经网络输出波形图见图7。从波形图可以看出,短路故障发生在5 ms,故障电流峰值为额定电流的4倍。在故障被定位在Line₃的负极后,启动反时限保护。根据耐热量法,在故障发生40 ms后向CB₃₂发出跳闸信号。整定时间为

$$t = \frac{B \cdot T_{ps}}{\left(\frac{I_f}{I_{ps}}\right)^m - 1} = \frac{99 \cdot 5 \text{ ms}}{\left(\frac{I_f}{I_{ps}}\right)^2 - 1} \quad (7)$$

对于极限反时限, $B = 99, m = 2$ 。 T_{ps} 表示10倍故障电流时的保护时间。

3.4 极间短路故障

直流电网在Line₂段发生极间短路故障时的电流和神经网络输出波形图见图8。电网额定电流为500 A,短路故障发生在5 ms,短路电流峰值达到5 kA。可以看出当故障发生时,BP神经网络根据 i_L 、 di_L/dt 和 d^2i_L/dt^2 解算出故障位置。在故障发生0.4 ms后,向CB₂₁和CB₂₂发出跳闸信号,故障在9 ms之前被清除。

4 结语

文中对VSC型直流电网的极间短路故障和单极接地故障进行了分析。由于不同位置、不同类型故障会对应不同的 i_L 、 di_L/dt 和 d^2i_L/dt^2 ,文中提出了利用3种特征量训练的BP神经网络来进行故障类型的定位和分类的保护方法,具有较高的识别准确率。能够有效应对故障发生时的时间及位置的双重不定性,快速有效地定位切除故障。通过相应的

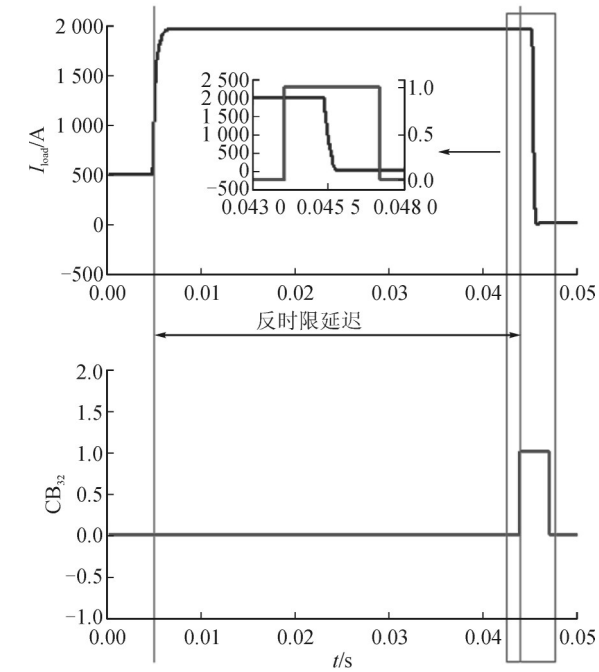


图 7 单极接地故障电流及输出类别波形图
Fig. 7 Fault current and output type of singlepole grounding

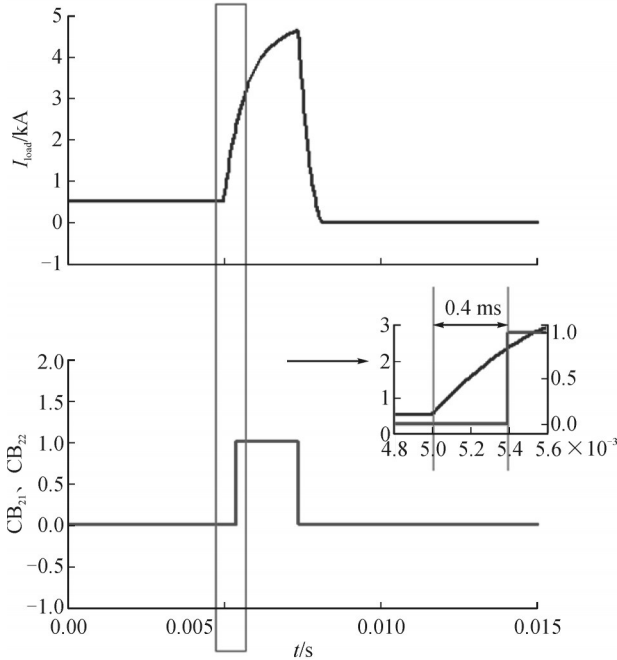


图 8 极间短路故障电流及输出类别波形图
Fig. 8 Fault current and output type of bipolar short circuit

理论分析及仿真验证,文中提出的这种故障诊断和保护方法可以在低压直流系统中仿真实现。

参考文献:

[1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7): 1893-1904.

- ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [2] 别朝红,王旭,胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6445-6462.
- BIE Chaohong, WANG Xu, HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6445-6462.
- [3] 吴翊,荣命哲,钟建英,等. 中高压直流开断技术[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 337-346.
- WU Yi, RONG Mingzhe, ZHONG Jianying, et al. Medium and high voltage DC breaking technology[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 337-346.
- [4] 和敬涵,张明,罗国敏,等. 一种利用故障暂态过程的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 985-992.
- HE Jinghan, ZHANG Ming, LUO Guomin, et al. A fault location method of flexible DC distribution network based on fault transient process[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 985-992.
- [5] 孙原冰,段建东,周一. 基于电流变化率的多级直流配电馈线保护研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 214-219.
- SUN Yuanbing, DUAN Jiandong, ZHOU Yi. Line protection scheme for multistage DC power distribution system based on current changing rate[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(2): 214-219.
- [6] 丁凡凡. 交直流配电网的故障分析与保护方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 7-8.
- DING Fanfan. Research on fault analysis and protection method of AC/DC distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 7-8.
- [7] 史宗谦,贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 1-9.
- SHI Zongqian, JIA Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker: A review[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 1-9.
- [8] 何俊佳,袁召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
- HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [9] 李威,吴学光,常彬,等. 基于电压变化率故障检测的高压直流断路器保护策略[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 554-565.
- LI Wei, WU Xueguang, CHANG Bin, et al. Research on protection strategy of HVDC circuit breaker based on rate of change of voltage fault detection[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 554-565.
- [10] 刘伟,马海超,张海涛,等. 配电网用全固态混合式直流断路器研发[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 37-42.
- LIU Wei, MA Haichao, ZHANG Haitao, et al. Development of solid hybrid DC circuit breaker for DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 37-42.
- [11] 陈政宇,余占清,吕纲,等. 基于IGCT串联的10 kV直流混合断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 317-326.
- CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, LYU Gang, et al. Researches on 10 kV DC hybrid circuit breaker based on IGCT series[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 317-326.
- [12] 张帆,杨旭,任宇,等. 一种适用于固态直流断路器的IGBT串联均压电路[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 656-663.
- ZHANG Fan, YANG Xu, REN Yu, et al. Voltage balancing circuit for series-connected IGBTs in solid-state breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 656-663.
- [13] YANG Jin, 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.
- [14] 许士锦. 直流电网中VSC的双极短路故障分析与保护技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 20-23.
- XU Shijin. Bipolar short-circuit fault analysis and protection technology of VSC in DC grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 20-23.
- 蒋原(1985—),男,博士,讲师,研究方向为航空真空开关电弧理论及应用、电器状态检测与故障诊断、智能微网及新能源技术(E-mail: jiangyuan@ustb.edu.cn)。
- 李擎(1971—),男,博士,教授,研究方向为智能控制理论及其在电力系统保护、交流调速系统中的应用、智能优化理论及其在路径规划、基于数据驱动建模中的应用(通讯作者)(E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn)。