

基于可控IGBT的直流微电网的主动保护控制研究

高宇

天津工业大学, 天津
Email: gaoyukin@163.com

收稿日期: 2021年5月13日; 录用日期: 2021年6月15日; 发布日期: 2021年6月24日

摘要

直流微电网短路下会导致电源烧毁及大量电力电子器件损坏等严重损失, 基于电力电子器件的可控性将主动式保护控制应用到直流微电网的短路保护中, 以含有多能源储能系统的直流微电网作为研究对象, 找出三相AC/DC和三相交错DC/DC两种换流器模式下极间短路故障的共性, 在此基础上, 提出了一种基于全控性器件绝缘栅双极晶体管IGBT的抑制极间短路电流的直流微电网控保协同主动保护方法及其启动判据, 解决直流微电网发生极间短路故障问题, 实现利用变换器内本身电力电子元件特性的主动保护。

关键词

直流微电网, 故障分析, 保护, 控保协同

Research on Active Protection and Control of DC Microgrid Based on Controlled IGBT

Yu Gao

Tiangong University, Tianjin
Email: gaoyukin@163.com

Received: May 13th, 2021; accepted: Jun. 15th, 2021; published: Jun. 24th, 2021

Abstract

The short circuit of DC microgrid will lead to serious losses such as power burned down and damage of a large number of power electronic devices. Based on the controllable type of power electronic devices, active protection control is applied to the short circuit protection of DC microgrid.

In this paper, the DC microgrid containing multi-energy storage system is taken as the research object. It can find out the common characteristics of inter-pole short circuit faults in three-phase AC/DC and three-phase staggered DC/DC converter modes. On this basis, a DC microgrid control protection cooperative active protection method and its start-up criterion are proposed to suppress inter-pole short-circuit current. This method is based on the fully controlled device insulated gate bipolar transistor IGBT. It can solve the problem of inter-pole short circuit fault in DC microgrid and realize the active protection of power electronic components in the converter.

Keywords

DC Microgrid, Fault Analysis, Protection, Control and Protection Coordination

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源是全球各国必不可少的生存资源，而电能是其中最清洁便利的、也是可再生的能源[1]。由于近些年不断增加光伏装机容量，目前中国已经成为世界上风电使用量最大的国家。随着新型电子设备的兴起，大量的直流分布式电源和储能设备通过换流器接入直流微电网，经济性更高且不存在交流微电网稳定性问题的直流微电网逐渐成为供电方式的主流[2] [3] [4] [5] [6]。直流微电网的实现主要通过全控型电力电子器件，当直流系统发生故障时，冲击电流上升速度快，设备耐受过流能力弱，短时间内就会达到器件保护界限，严重影响直流保护的故障诊断，故障发生后需要迅速完成控制保护[7] [8] [9] [10]。

随着电力电子技术的不断发展，部分变换器具备阻断故障电流的能力，直流微电网传统意义控制与保护的分界日益模糊，利用电力电子变换器在故障时刻主动地改变自身状态，向系统施加某种激励，即可实现在线式的主动保护[11] [12] [13]。在进行直流微电网的故障分析时，不可避免地需要对直流换流器换相失败条件下的动态响应特性进行研究，该特性除了与交流故障条件有关，更与直流逆变侧的控制策略有关[14]。但在直流微电网内部故障分析时，大多数研究将系统内的电力电子变换器视为不可控元件，即故障电流通过电力电子开关器件的反并联二极管持续流向故障点[15] [16]。因此，基于含有多能源储能系统的直流微电网，充分考虑故障时变换器主动响应的潜力，提出了一种基于全控性器件绝缘栅双极晶体管 IGBT 的抑制极间短路电流的直流微电网控保协同主动保护方法，从而进一步提高直流微电网保护的性能。

2. 直流微电网的故障特性分析

2.1. 直流微电网的故障特性分析

当三相 AC/DC 模块直流母线侧发生极间短路故障时，交流电源将通过 AC/DC 换流器向故障点提供故障电流，其等效电路如图 1 所示。其中电阻 $R_a = R_b = R_c$ ，电感 $L_a = L_b = L_c$ ，续流二极管由 D1~D6 表示，图中 C 为 AC/DC 变换器直流母线侧并联滤波电容。具有自保护功能的绝缘栅双极型晶体管 IGBT 在发生故障后会迅速完成闭锁动作。在此过程中 IGBT 极短时间内完成自锁，对故障的产生和分析影响很小，因此在对三相 AC/DC 极间短路故障特性分析前可以做出假设：直流线路故障发生瞬间 IGBT 立即闭锁。

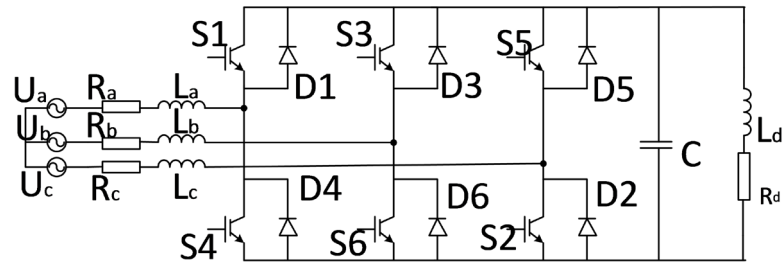


Figure 1. Equivalent diagram of short-circuit fault between three phase AC/DC poles
图 1. 三相 AC/DC 极间短路故障等效图

三相 AC/DC 极间短路故障回路的变化过程，其故障特性包括三个阶段：直流母线侧电容放电阶段、二极管交替换向导通阶段和二极管同时导通阶段。

1) 直流母线侧电容放电阶段

AC/DC 换流器直流母线侧极间短路故障瞬间，电容迅速向故障点提供极大电流，向故障点供电，忽略交流侧续流，直流母线侧电容和电感电阻构成 RLC 电路。图 2(1)给出了该阶段的等效电路。

2) 二极管交替换向导通阶段

电容电压持续降低，待下降到小于交流侧电压时，反并联续流二极管导通，交流源和电容一起向故障点提供故障电流。随电容电压的下降，交流侧通过续流二极管向直流母线侧提供的短路电流逐渐增大。在这个过程中二极管交替导通关断，动态方程的解随着换向过程的发生而改变，前一次换向过程的结果是下一次的初始条件。二极管 D1、D2 导通时故障电流的流电路径如图 2(2)所示。

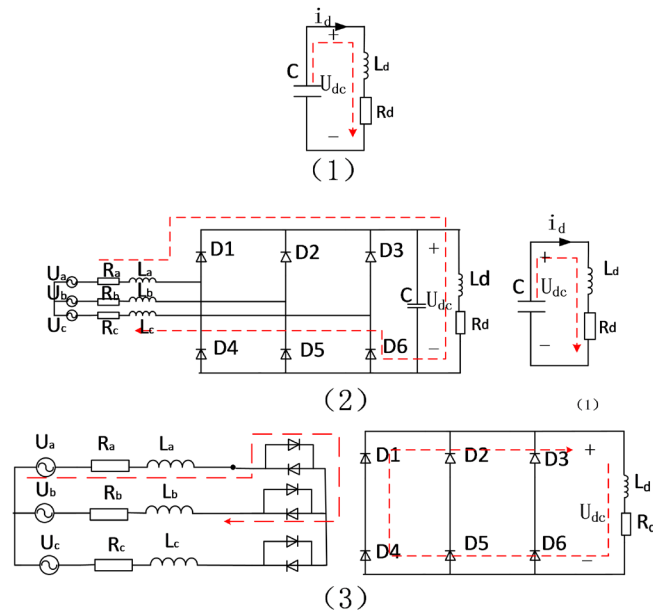


Figure 2. Equivalent diagram of short circuit phase between AC/DC poles
图 2. 三相 AC/DC 极间短路阶段等效图

3) 二极管同时导通阶段

在电容电压 U_{dc} 降低过零时，AC/DC 变换器内 6 个二极管 D1~D6 同时导通，形成一个 RL 放电回路，此时电容电压被二极管钳位为 0，6 个续流二极管对交流侧电源不再表现出单向导通性，交流侧可等效成两个部分，左侧是三相短路部分，右侧是直流母线侧放电部分，如图 2(3)所示。

2.2. 三相交错 DC/DC 极间短路故障响应

依据三相交错 DC/DC 极间短路故障回路的变化过程，其故障特性包括直流母线侧电容放电阶段、二极管导通阶段和双向 DC/DC 极间短路稳定阶段三个阶段(图 3)。

1) 直流母线侧电容放电阶段

直流微电网三相交错 DC/DC 极间换流器直流母线侧极间短路故障瞬间，电容迅速向故障点提供极大电流，向故障点供电。在 I 相工作状态，此时 S2 导通，续流二极管 D1 关断，在此过程中电容电压持续下降。图 4(1)给出了该阶段的等效电路。

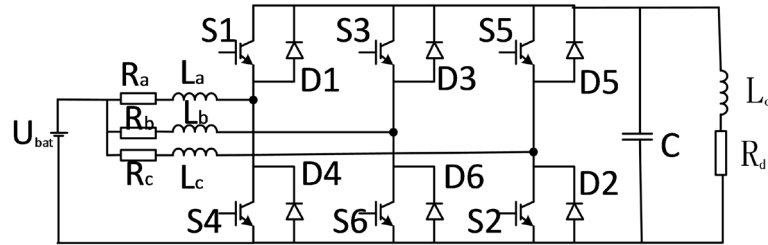


Figure 3. Equivalent diagram of short-circuit fault between three-phase staggered DC/DC poles
图 3. 三相交错 DC/DC 极间短路故障等效图

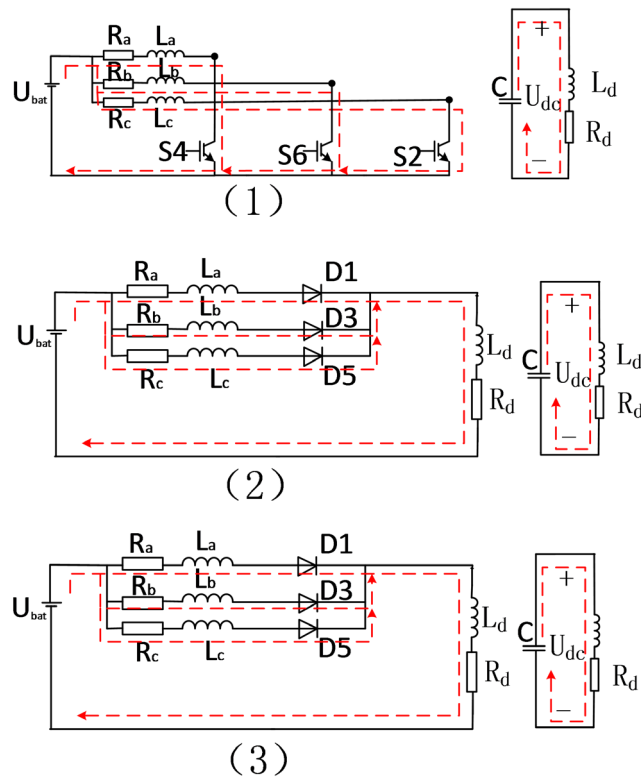


Figure 4. Equivalent diagram of short circuit stage between three-phase staggered DC/DC poles
图 4. 三相交错 DC/DC 极间短路阶段等效图

2) 二极管导通阶段

电容电压持续降低，待下降到小于蓄电池侧电压时，即当 $U_{dc} < U_{bat}$ ，反并联续流二极管导通，蓄电池电源和电容一起向故障点提供故障电流。随电容电压的下降，蓄电池侧通过续流二极管向母线侧提供

的短路电流逐渐增大。二极管 D1、D3、D5 导通时故障电流的流电路径如图 4(2)所示。

3) 三相交错 DC/DC 极间短路稳定阶段

直流母线侧电压下降到接近零，电容向故障点放电结束，蓄电池向故障点和电容供电，如图 4(3)所示。

基于对上述三相 AC/DC 极间短路和三相交错 DC/DC 极间短路故障特性分析，在极间故障发生的整个过程，从第二阶段开始二极管一直处于导通，而且在第三阶段二极管电流突然增大，在此时刻电力电子器件容易被烧毁，因此三相 AC/DC 极间短路和三相交错 DC/DC 极间短路故障需要第三阶段初始时刻在直流母线侧电压过零之前切除，从而保护 AC/DC 和 DC/DC 变换器安全。

3. 直流微电网控制与主动保护

依据对多能源微电网故障特性分析，研究了两种换流器模式下直流母线侧发生极间短路的故障共性及其短路电流关键影响因素，进而提出了基于全控性器件绝缘栅双极晶体管 IGBT 主动保护控制策略及其启动判据，实现安全运行的同时协同控制故障电流。

基于 IGBT 的可控性，提出了能适用于三相 AC/DC 和三相交错 DC/DC 两种换流器拓扑结构的主动保护策略，如图 5、图 6 所示，通过给出指定的控制信号，在发生直流母线侧极间短路故障后，能通过 IGBT 切除电源侧经换流器向故障点供电的通道，能有效控制故障电流和电压，保护设备和电力电子器件安全。

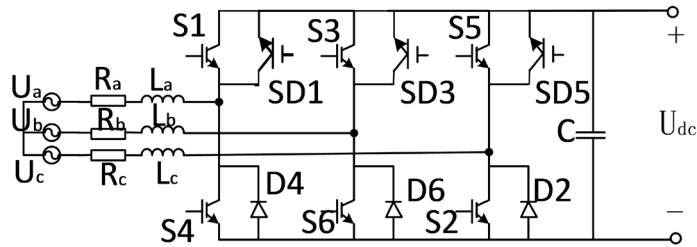


Figure 5. Topology of active short-circuit protection between three-phase AC/DC poles
图 5. 三相 AC/DC 极间短路主动保护拓扑图

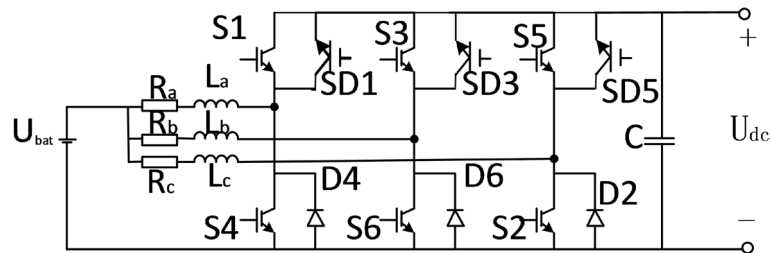


Figure 6. Topology of active protection for short circuit between three-phase staggered DC/DC poles
图 6. 三相交错 DC/DC 极间短路阶段等效图

将换流站中充当续流作用的 IGBT 的谐波注入源由一个特定的单端量变为两个不同频率信号的双端量，进而实现保护的绝对选择性。基于两种换流器模式下直流母线侧发生极间短路的故障共性，多能源微电网主动保护控制方法的流程如图 7 所示。其保护方法及实现的步骤如下：配置 di/dt 、 du/dt 作为所提方法的启动判据，形成启动部分。保护装置启动后，系统中各保护测量点检测直流是否过流，若大于定值，则给变流器 DC/DC、AC/DC 发送闭锁信号，然后开始动作。基于可控的电力电子器件，能在不同拓扑结构和换流阀类别的直流微电网中对系统故障电流和电压控制，达到故障穿越和故障清除的目的。

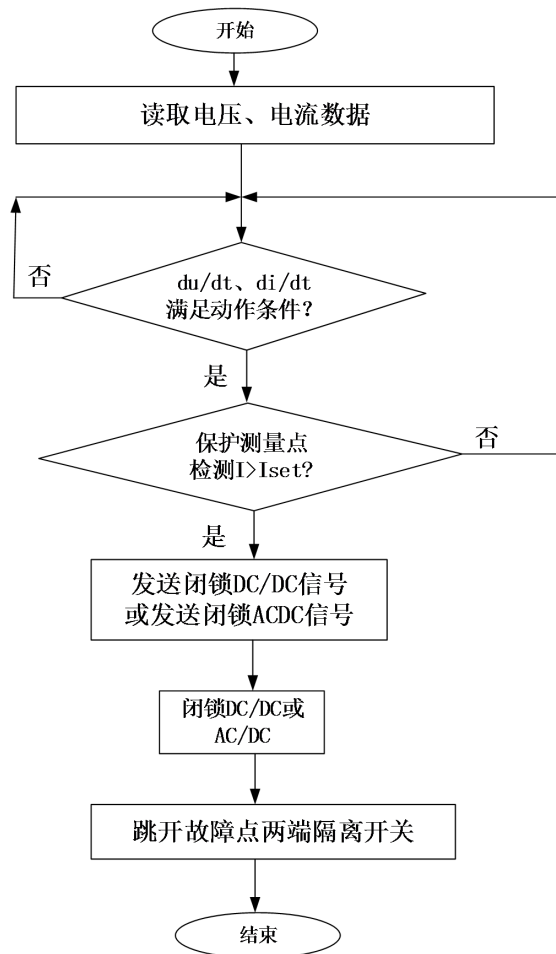


Figure 7. Flow chart of protection scheme design
图 7. 保护方案设计流程图

4. 仿真实验验证

4.1. 短路故障响应仿真

4.1.1. 三相 AC/DC 极间短路故障响应仿真

为了验证上文对三相 AC/DC 极间短路故障特性分析的正确性与合理性，使用 Matlab/Simulink 仿真软件对三相 AC/DC 微电网极间短路故障建立仿真模型，并对仿真结果进行分析。三相 AC/DC 极间短路故障数学模型中磷酸铁锂电池的参数搭建，如表 1 所示。

Table 1. Lithium iron phosphate battery simulation parameters
表 1. 磷酸铁锂电池仿真参数

AC/DC 和 DC/DC 变换器参数	数值
电池额定电压/V	300
电池容量/Ah	100
最大充电电流/A	100
最大放电电流/A	200

Table 2. AC/DC converter parameters
表 2. AC/DC 变换器参数

AC/DC 和 DC/DC 变换器参数	数值
变换器电感/mH	1
DC 母线电压/V	600
开关频率/kHz	10

三相 AC/DC 直流微电网主电路的参数为： $L = 1e-3H$ ， $C = 1e-3F$ (表 2)。

设置 $t = 0.5002$ s 发生极间短路，仿真波形如图 8 所示。

1) 直流母线侧接入端短路瞬间，电容迅速提供极大电流，向故障点供电，在此过程中电容电压持续下降。

2) 当电容电压下降到小于蓄电池电压时， 0.5004 s，故障发生后 2×10^{-4} s，即当 $U_{bat} > U_{dc}$ ，电容和蓄电池电源一起向故障点提供电流。

3) 随电容电压的下降，蓄电池侧通过续流二极管向直流母线侧提供的短路电流逐渐增大。 0.5005 s 时，即故障发生后 3×10^{-5} s，此时直流母线侧电压下降到接近零，电容向故障点放电结束，蓄电池向故障点和电容供电。

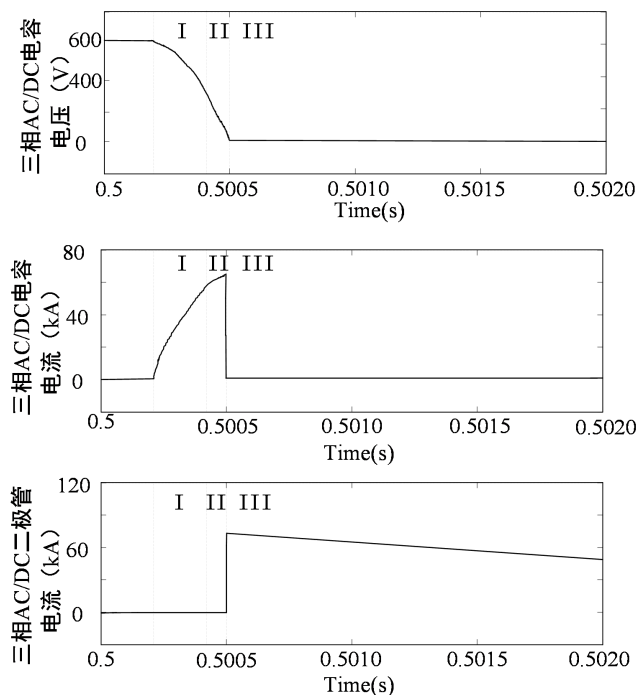


Figure 8. Short-circuit waveforms between three phase AC/DC poles
图 8. 三相 AC/DC 极间短路波形图

4.1.2. 三相交错 DC/DC 极间短路故障响应仿真

设置 $t = 0.5002$ s 发生极间短路，仿真波形如图 9 所示。

1) 直流母线侧接入端短路瞬间，电容迅速提供极大电流，向故障点供电，在此过程中电容电压持续下降。

2) 当电容电压下降到小于蓄电池电压时, 0.50028 s, 故障发生后 8×10^{-5} s, 即当 $U_{\text{bat}} > U_{\text{dc}}$, 电容和蓄电池电源一起向故障点提供电流。

3) 随电容电压的下降, 蓄电池侧通过续流二极管向直流母线侧提供的短路电流逐渐增大。0.50035s 时, 即故障发生后 1.5×10^{-5} s, 此时直流母线侧电压下降到接近零, 电容向故障点放电结束, 蓄电池向故障点和电容供电。

将上文对三相 AC/DC 和三相交错 DC/DC 极间短路故障特性理论分析, 与 MATLAB 仿真波形相对应, 证明了理论分析的正确性。经仿真验证, 第三阶段, 当直流母线侧下降到零, 在故障发生极短时间内电容电流和二极管电流迅速升到最大值, 换流器安全受到威胁。故障理论分析与仿真相结合, 因此三相 AC/DC 和三相交错 DC/DC 极间短路故障需要第三阶段初始时刻在直流母线侧电压过零之前切除, 从而保护三相交错 DC/DC 变换器安全。

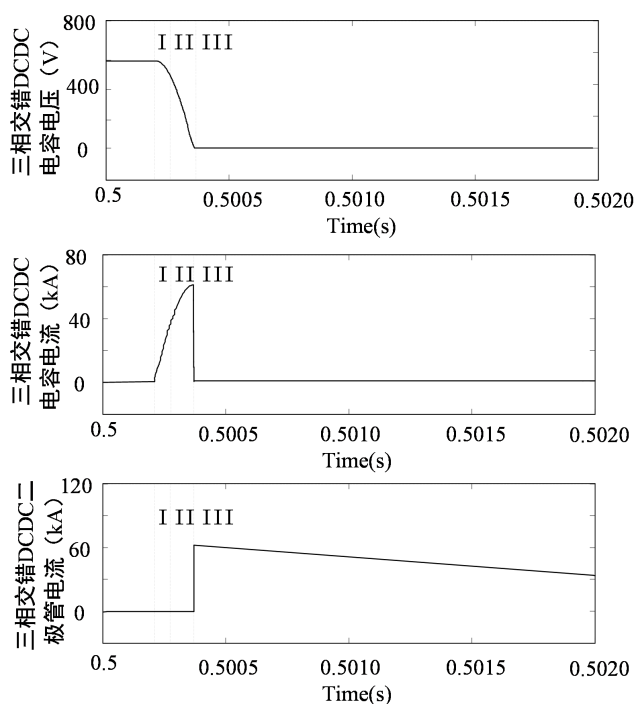


Figure 9. Short-circuit waveforms between three-phase staggered DC/DC poles
图 9. 三相交错 DC/DC 极间短路波形图

4.2. 保护动作仿真

为了验证上述保护设计的正确性与合理性, 使用 Matlab/Simulink 仿真软件对极间短路保护设计建立仿真模型, 并对仿真结果进行分析。直流微电网主电路的参数为: $L = 1\text{e-}3\text{H}$, $C = 1\text{e-}3\text{F}$ (表 3)。

Table 3. AC/DC and DC/DC converter parameters

表 3. AC/DC 和 DC/DC 变换器参数

AC/DC 和 DC/DC 变换器参数	数值
变换器电感/mH	1
DC 母线电压/V	600
开关频率/kHz	30

4.2.1. 三相三相 AC/DC 极间短路主动保护

利用 Matlab/Simulink 仿真平台进行仿真分析，以验证所提限流控制方法的限流效果。设置在 $t = 0.5002$ s 时使双向 DC/DC 母线侧发生极间短路故障，IGBT 在 230 us 后隔离故障。直流故障发生后，故障极电压瞬间跌落，且直流电流迅速上升，在满足 IGBT 给定信号启动判据后，电源侧向故障点供电的通道被切断，仿真结果如图 10 所示。

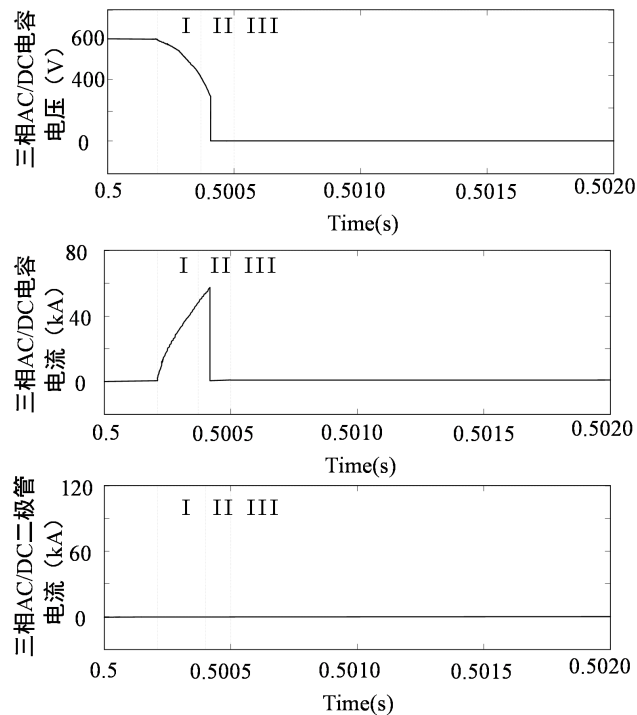


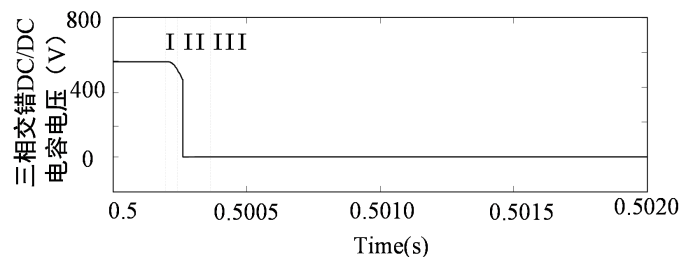
Figure 10. Three-phase AC/DC active protection waveform

图 10. 三相 AC/DC 主动保护波形图

4.2.2. 三相交错 DC/DC 极间短路主动保护

设置在 $t = 0.5002$ s 时使交错 DC/DC 母线侧发生极间短路故障，IGBT 在 50 us 后隔离故障。直流故障发生后，故障极电压瞬间跌落，且直流电流迅速上升，在满足 IGBT 给定信号启动判据后，电源侧向故障点供电的通道被切断，仿真结果如图 11 所示。

从上述保护设计仿真结果图看，交错 DC/DC 在极间短路故障发生 50 us 后三相电源侧向故障点供电的通道，三相 AC/DC 在极间短路故障发生 230 us 后三相电源侧向故障点供电的通道都在极间短路故障电流到达峰值前切除，即第三阶段前，此时直流母线侧电压还未降到零，电源侧向故障点供电的通道被切断，提高了故障阻断响应速度，有效的保护了电力电子器件和系统安全。



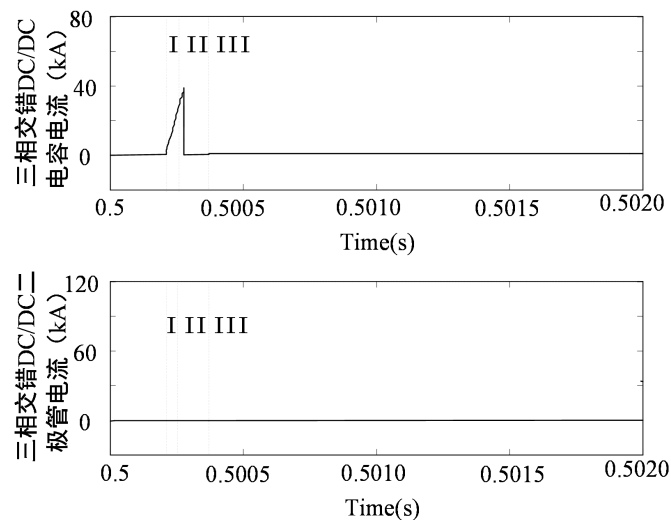


Figure 11. Three-phase staggered DC/DC active protection waveform
图 11. 三相交错 DC/DC 主动保护波形图

5. 结论

针对直流微电网短路下会导致大量电力电子器件损坏，且大多数研究将系统内的电力电子变换器视为不可控元件等问题，提出了一种基于全控性器件 IGBT 的抑制极间短路电流的直流微电网控保协同主动保护方法及其启动判据，在直流微电网三相 AC/DC 和三相交错 DC/DC 两种换流器模式下，在发生极间短路故障第三阶段开始前利用 IGBT 自身可控性，给出指定的控制信号，可以将故障电流阻断，能有效控制故障电流和电压，保护设备和电力电子器件安全，实现利用变换器内本身电力电子元件特性的主动保护。直流微电网的保护与控制的相互配合，利用电力电子器件本身的可控性和速动性，减少了故障恢复时间，同时提高了故障识别准确性，实现直流微电网的稳定运行。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110.
- [2] Yu, M. and Zhao, J. (2021) Power Management for DC Microgrid Cluster with Renewable Microgeneration. In: *Renewable Energy Microgeneration Systems*, Elsevier, Amsterdam, 265-284. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821726-9.00012-6>
- [3] Singh, P. and Lather, J.S. (2021) Power Management and Control of a Grid-Independent DC Microgrid with Hybrid Energy Storage System. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **43**, Article ID: 100924. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100924>
- [4] Gui, Y., Han, R., Guerrero, J.M., et al. (2021) Large-Signal Stability Improvement of DC-DC Converters in DC Microgrid. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3057130>
- [5] Miao, T., Liu, X., Liu, S., et al. (2021) A New Control Strategy for Bi-Directional DC/DC Converter in DC Microgrid. *E3S Web of Conferences*, **233**, Article No. 01051. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123301051>
- [6] Abhishek, A., Ranjan, A., Devassy, S., et al. (2020) Review of Hierarchical Control Strategies for DC Microgrid. *IET Renewable Power Generation*, **14**, 1631-1640. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1136>
- [7] Liang, K. and Nian, H. (2020) Transient Modeling Method for Faulty DC Microgrid Considering Control Effect of DC/AC and DC/DC Converters. *IEEE Access*, **8**, 150759-150772.
- [8] 曹鹏飞, 杨君, 饶纪全, 等. 分布式光伏发电网络构建与仿真[J]. 电气技术, 2019, 20(8): 64-68.
- [9] 张春刚, 罗璐, 李青璇, 等. 低压微电网多台并联逆变电源的功率分配策略综述[J]. 电气技术, 2018, 19(9): 1-5.
- [10] 涂春鸣, 黄红, 兰征, 等. 微电网中电力电子变压器与储能的协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2627-2636.

-
- [11] 谢文强, 韩民晓, 严稳利, 等. 考虑恒功率负荷特性的直流微电网分级稳定控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3430-3443.
- [12] Jamali, S. and Borhani-Bahabadi, H. (2018) Protection Method for Radial Distribution Systems with DG Using Local Voltage Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **34**, 651-660.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2889895>
- [13] 熊雄, 季宇, 李蕊, 孙丽敬, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813.
- [14] 黄昕昱, 张家奎, 徐千鸣, 等. 具有限流功能的模块化直流潮流控制器及其控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 38-46.
- [15] 贺之渊, 陆晶晶, 刘天琪, 等. 柔性直流电网故障电流抑制关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 173-183.
- [16] 韩乃峥, 贾秀芳, 赵西贝, 等. 一种新型混合式直流故障限流器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1647-1658.