

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.02.014

一种多功能模块化直流故障限流器拓扑及控制策略

张亮¹, 李丹栋¹, 史明明², 葛雪峰², 袁宇波²

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:直流故障限流器(FCL)是抑制直流短路故障电流的关键设备,其在交直流混合电网中十分重要。文中提出一种多功能模块化直流 FCL 拓扑,由多个电力电子功率单元子模块串联组成,通过模式控制与切换,实现故障限流、能耗泄放和直流网压支撑3种功能。文中详细分析了多功能模块化直流 FCL 的运行机理,给出了其在交直流混合电网中的典型配置方案,并针对3种功能对应的工作模式,完成了控制策略设计与开发。为验证拓扑结构及控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 中构建多工况仿真模型。仿真结果表明,所提模块化直流 FCL 拓扑及控制策略能够满足交直流混合电网多种故障情况下的故障限流应用需求。

关键词:交直流混合电网;直流故障;故障限流器(FCL);模块化;能耗泄放;多功能化

中图分类号:TM471

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)02-0105-05

0 引言

随着分布式电源的高比例广泛接入,直流配电网因技术上的优势,成为工程示范探索热点。然而,直流短路故障具有短路电流幅值大、上升率高以及直流网压跌落严重等缺点,在直流配电网的推广中须克服该缺点。直流故障限流器(fault current limiter, FCL)能够快速抑制故障电流,是目前实际工程中解决直流短路故障较为常用的设备之一。

近年来,国内外学者针对直流 FCL 进行了大量研究^[1-2],主要为超导型 FCL 和电力电子型 FCL。其中,超导型 FCL^[3-4]由于制造工艺和成本问题,尚未得到广泛应用,因此目前重点关注电力电子型 FCL 的研究。文献[5]提出一种桥式 FCL,通过电力电子器件通断实现低频到高频的转换,并通过改变占空比实现过流抑制能力的调节。文献[6]提出一种混合磁饱和型 FCL,结合磁饱和特性,在保证限流效果的基础上降低装置成本和损耗。文献[7]研究了混合型直流 FCL,基于电流转移原理,使用直流断路器实现故障电路的分断。文献[8]研究了一种固态直流 FCL,具有器件少、成本低和工作可靠等优点。此外,还有一些学者关注了复合功能型 FCL 的研究。文献[9]提出一种新型的电阻式直流 FCL,可以提高直流故障电流回路的阻尼,有效抑制故障电流,使得断路器在直流短路发生时,更安全有效地动作,从而隔离故障。文献[10]提出一种具有2种工作模式的新型多功能饱和铁芯 FCL,通过模式

切换,可实现故障电流限制和潮流控制。文献[11]提出一种具备串联补偿能力的 FCL,通过适当的参数配合,在满足故障限流的同时提供串联补偿功能。文献[12]提出一种新型多功能电力电子限流器,通过控制绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)和晶闸管支路实现电能质量优化和故障限流。从 FCL 研究现状来看,现有 FCL 大部分功能有限,无法满足直流电网不同故障工况下的复合应用需求^[13-16]。

鉴于此,文中提出一种多功能模块化直流 FCL 新型拓扑,在分析其运行机理的基础上,分别针对故障限流、能耗泄放和直流网压支撑功能,完成控制策略设计与开发。并在 Matlab/Simulink 中构建仿真模型,验证了所提多功能模块化 FCL 在交直流混合电网典型故障工况下的应用有效性。

1 模块化直流 FCL 拓扑及工作机理

1.1 模块化直流 FCL 拓扑

文中提出一种多功能模块化直流 FCL 电路拓扑,其连接方式和子模块拓扑如图1所示。

图中多功能模块化直流 FCL 由多个电力电子功率单元子模块串联组成,具有故障限流、短路能量泄放、直流网压支撑功能。功率单元子模块中 L 为限流电感, R 为泄能电阻, C 为支撑电容,依靠不同支路电力电子器件的通断,实现上述3种功能。故障限流功能通常在故障发生后投入,及时抑制故障电流。另外,针对交直流电网实际容量和应用需求, FCL 依据配置的电阻是否满足系统的能量泄放要求,选择短路能量泄放模式或者直流网压支撑功

收稿日期:2021-10-25;修回日期:2022-01-09

基金项目:江苏省重点研发计划资助项目(BE2017169)

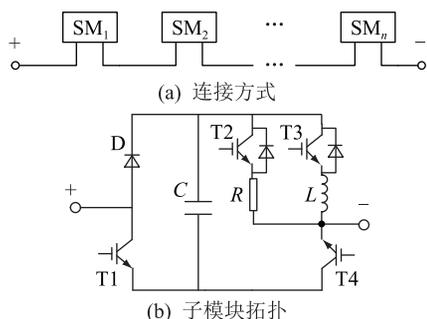


图1 多功能模块化直流 FCL 电路连接方式及子模块拓扑
Fig.1 Connection mode and sub-module topology of multifunctional modular DC FCL

能来配合限流模式。

为及时响应短路故障,需将多功能直流 FCL 串联于交直流混合电网电力电子变压器 (power electronic transformer, PET) 出口与直流电网母线正极之间,具体如图 2 所示。

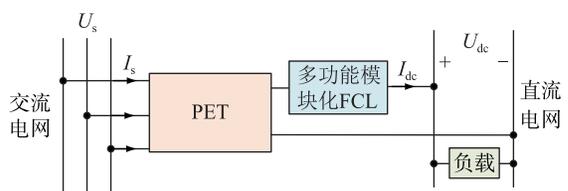


图2 直流 FCL 典型配置

Fig.2 Typical configuration of DC FCL

其中, U_s 为交流电网电压; I_s 为交流电网输入电流; I_{dc} 为 PET 直流侧电流; U_{dc} 为直流电网电压。

1.2 模块化直流 FCL 运行状态

多功能模块化直流 FCL 有 4 种工作模式,分别为旁路运行模式、故障限流模式、短路能量泄放模式以及直流网压支撑模式,具体如图 3 所示,其中, T1—T4 采用 IGBT。

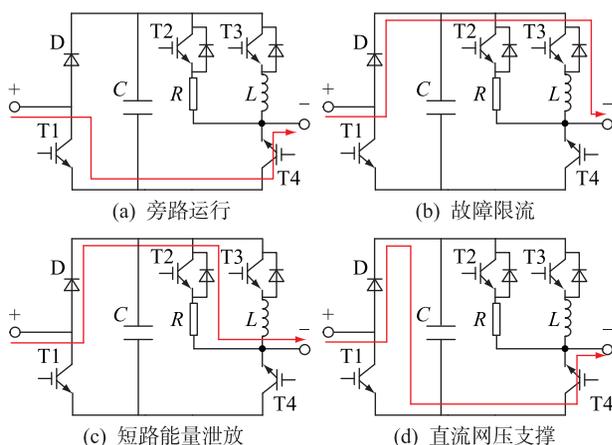


图3 多功能模块化直流 FCL 运行模式

Fig.3 Operation modes of multifunctional modular DC FCL

旁路运行模式下,功率子模块中的 T1、T4 导

通,其余 IGBT 关断,子模块整体旁路。故障限流运行模式下, T3 导通,其余 IGBT 关断,子模块限流电感投入,实现故障限流。短路能量泄放运行模式下, T2 导通,其余 IGBT 关断,子模块泄能电阻投入,实现短路能量泄放,同时在一定程度上稳定直流侧电压。直流网压支撑运行模式下, T4 导通,其余 IGBT 关断,实现直流网压支撑。

2 模块化直流 FCL 的控制策略设计

2.1 限流模式的控制策略

限流模式通常在故障发生后立即运行,从而快速限制故障激增电流。图 4 为限流模式的控制策略框图,其中 I_{dc_rated} 为直流侧电流额定值,当直流侧电流 I_{dc} 超过 I_{dc_rated} 时,判断为系统发生故障^[17], FCL 运行于限流模式。

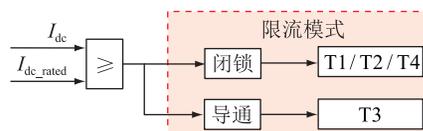


图4 限流模式控制策略

Fig.4 Control strategy of current limit mode

2.2 限流结合短路能量泄放模式的控制策略

假定交直流混合系统直流电网等效负载为 R_{load} , 在泄放模式下,为使得模块化 FCL 完全满足故障能量的泄放需求,理论上须保证投入子模块的泄放电阻阻值之和大于 R_{load} ,并结合工程要求合理选择电阻功率。

图 5 为短路能量泄放模式控制策略框图,其中 I_{dc_limit} 为直流侧故障电流阈值; V_{dc_normal} , I_{dc_normal} 分别为交直流系统正常运行时直流网侧电压和直流侧电流; R_{sum} 为所有模块泄放电阻阻值之和。

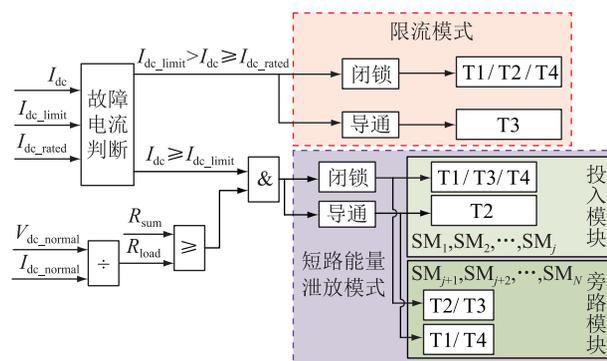


图5 短路能量泄放模式控制策略

Fig.5 Control strategy of short-circuit energy discharge mode

模块化 FCL 通过改变子模块投入数量组合出不同阻值的等效阻抗,达到不同的泄放能力,以应

对不同限流与能量泄放需求^[18]。假设 R_{i_load} 为模块化 FCL 前 i 个子模块投入后的等效电阻,即 $R_{i_load} = R_1 + R_2 + \dots + R_i$ 。当刚好满足 $R_{i_load} > R_{load}$ 时,表示投入 i 个子模块电阻即满足限流与泄放功率所需。

2.3 限流结合直流网压支撑模式的控制策略

实际工程中 FCL 子模块和泄放电阻有体积、功率和成本限制,所配置的电阻 R_{sum} 可能并不足以泄放全部故障能量。此时, FCL 还可以选择工作于直流网压支撑模式,并与系统中其他电力电子设备协同工作实现故障穿越。图 6 为多功能模块化直流 FCL 工作于直流网压支撑模式时的控制策略框图。

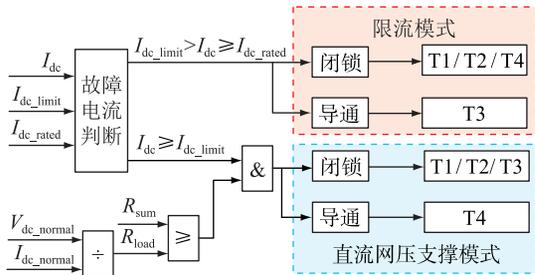


图 6 直流网压支撑功能控制策略

Fig.6 Control strategy of DC grid voltage support function

综上所述,故障发生时,多功能模块化直流 FCL 会及时启动限流功能。当故障持续超出限流能力时,根据所配置的泄放等效电阻进行状态综合判断,从而切换至短路能量泄放模式或者直流网压支撑模式^[19—20]。

3 模块化直流 FCL 仿真分析与验证

在 Matlab/Simulink 中搭建配置模块化 FCL 的交直流混合电网仿真模型,其中直流侧电网电压为 750 V;交流侧电网电压为 10 kV;模块化 FCL 模块数为 5 个;单模块限流电感根据工程实际需要选择。开展模块化直流 FCL 与传统电感型 FCL 应用对比分析,几种典型工况见表 1。模拟的故障类型为直流侧永久性极间短路故障,短路故障发生于 0.15 s。

表 1 交直流混合电网典型故障工况

Table 1 Typical fault conditions of AC-DC hybrid grid

工况	FCL 类型	投入模式
1	电感型	限流
2	多功能模块化	限流+短路能量泄放
3	多功能模块化	限流+直流网压支撑

工况 1:配置传统电感型 FCL,系统运行情况如图 7 所示。

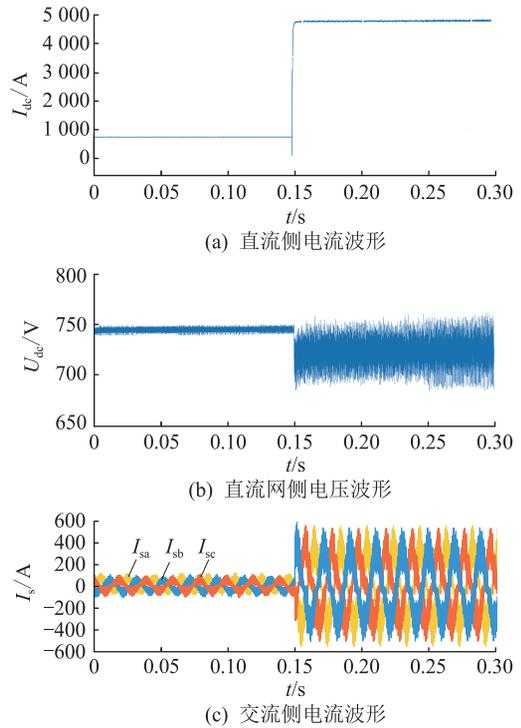


图 7 工况 1 下系统运行情况

Fig.7 The operation situation of system under condition 1

由图 7 可知,采用传统电感型 FCL,极间短路故障电流得到一定程度的抑制,故障电流被限制后仍为正常运行时的数倍。

工况 2:故障期间多功能模块化 FCL 选择故障限流结合短路能量泄放模式,系统运行情况如图 8 所示。

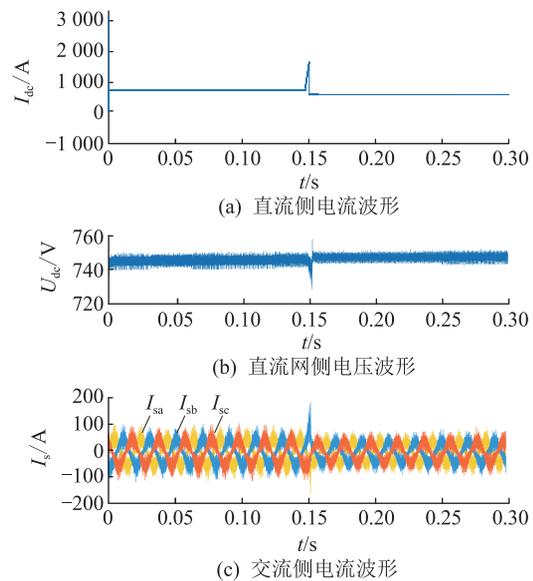


图 8 工况 2 下系统运行情况

Fig.8 The operation situation of system under condition 2

由图 8 可知,故障发生后出现短时过流,判断到

超出故障限流能力后,系统选择能量泄放模式,从而有效抑制故障电流,直流网压与交流电压维持稳定。

工况 3:故障期间多功能模块化 FCL 选择故障限流结合直流网压支撑模式,运行情况如图 9 所示。

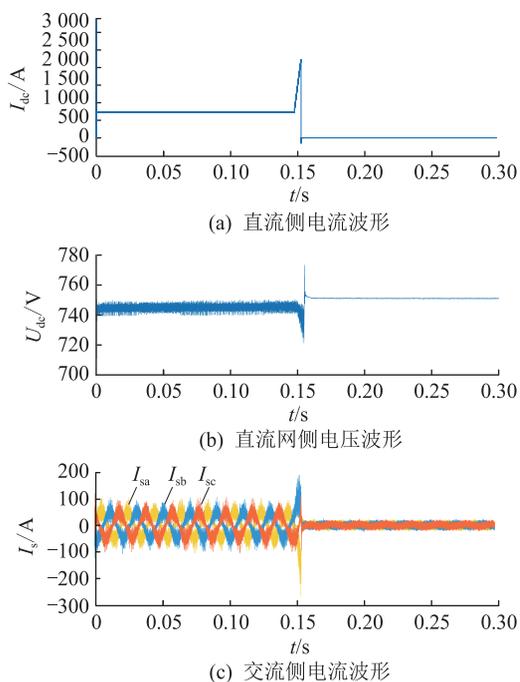


图 9 工况 3 下系统运行情况
Fig.9 The operation situation of system under condition 3

由图 9 可知,当泄能电阻小于交直流混合电网的等效负载时,即不满足承担交直流混合电网的功率泄放要求时,选择直流网压支撑模式,此时直流电压能够稳定在额定电压值,换流器运行在空载状态。

对比图 7—图 9,传统电感型直流 FCL 在故障发生瞬间仅起到抑制电流激增功能,故障电流仍数倍于正常运行值。多功能模块化 FCL 不仅可将故障电流控制在安全范围内,还可以实现直流网压在故障期间的稳定,更容易满足故障穿越等高级应用需求。

4 结语

针对传统直流 FCL 无法满足直流电网不同故障工况下的复合应用需求,提出一种多功能模块化直流 FCL 拓扑。文中详细分析了其工作原理,并针对性地开展了不同模式切换的控制策略设计,构建多工况仿真模型,开展仿真验证研究。结果表明,文中模块化多功能 FCL 拓扑和控制方法能够满足交直流混合电网多种故障情况下的故障限流需求。文中研究成果可为后续交直流混合电网的直流故

障限流工程实践提供理论参考。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019131)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 王晓晨,吴学光,王婉君,等. 高压直流断路器快速限流控制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):997-1005.
WANG Xiaochen, WU Xueguang, WANG Wanjun, et al. Fast current limiting control of high voltage DC breakers[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(4):997-1005.

[2] 魏晓光,杨兵建,汤广福. 高压直流断路器技术发展与工程实践[J]. 电网技术,2017,41(10):3180-3188.
WEI Xiaoguang, YANG Bingjian, TANG Guangfu. Technical development and engineering applications of HVDC circuit breaker[J]. Power System Technology,2017,41(10):3180-3188.

[3] 赵晔. 桥路型超导故障限流器的研究[D]. 南京:东南大学,2016.
ZHAO Ye. Study on bridge type superconducting fault current limiter[D]. Nanjing:Southeast University,2016.

[4] 叶莺,肖立业. 超导故障限流器的应用研究新进展[J]. 电力系统自动化,2005,29(13):92-96.
YE Ying, XIAO Liye. New development of high temperature superconducting fault current limiter system[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(13):92-96.

[5] 李春华,赵成勇,刘羽超,等. 一种新型 HVDC 直流限流器拓扑设计与分析[J]. 电网技术,2015,39(7):1819-1824.
LI Chunhua, ZHAO Chengyong, LIU Yuchao, et al. Analysis and design of topological structure for a new HVDC current limiter[J]. Power System Technology,2015,39(7):1819-1824.

[6] 钟永恒,谢耀恒,刘赞,等. 桥式混合型磁饱和故障限流器[J]. 高压电器,2020,56(8):148-154.
ZHONG Yongheng, XIE Yaoheng, LIU Yun, et al. Novel bridge-type hybrid saturated-core fault current limiter[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(8):148-154.

[7] 陈家帅,黄彦全,卢博衍,等. 一种结合直流断路器的直流故障限流器拓扑[J]. 高压电器,2020,56(5):33-38.
CHEN Jiashuai, HUANG Yanquan, LU Boyan, et al. DC fault current limiter topology combined with DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(5):33-38.

[8] 官二勇,董新洲,冯腾. 一种固态直流限流器拓扑结构[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):978-986.
GUAN Eryong, DONG Xinzhou, FENG Teng. A solid DC current limiter topology[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(4):978-986.

[9] XIE S J, QIU Y F, BI T S. Resistive DC fault current limiter[J]. The Journal of Engineering,2017(13):1682-1685.

[10] ZHONG Y H, XIE Y H, LIU Y, et al. A novel multi-function saturated-core fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2019,55(6):1-5.

[11] 陈金祥,董恩源,邹积岩. 具有串联补偿作用的新型故障限流器(FCL)的研究[J]. 电工技术学报,2001,16(1):48-51.
CHEN Jinxiang, DONG Enyuan, ZOU Jiyuan. Study of a new

- fault current limiter (FCL) with series compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 48-51.
- [12] 帅智康,姚鹏,涂春鸣,等. 一种新型多功能电力电子限流器的工作机理及仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 85-90.
- SHUAI Zhikang, YAO Peng, TU Chunming, et al. Mechanism and simulation analysis of a novel multi-functional power electronic current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 85-90.
- [13] 袁佳歆,陈凡,赵晋斌,等. 电感式直流限流器研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1595-1605.
- YUAN Jiaxin, CHEN Fan, ZHAO Jinbin, et al. Review on inductive fault current limiters in direct current systems[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1595-1605.
- [14] GAO L, NING L H, TENG H D, et al. DC fault transient characteristics and fault ride-through control strategy based on hybrid MMC-HVDC[C]//2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Xi'an, China. IEEE, 2019: 683-687.
- [15] 孔明,汤广福,贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.
- KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351.
- [16] 张文嘉,王荃荃,李海坤,等. 基于对称双极接线的全桥型 MMC-HVDC 直流侧短路故障穿越控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 147-154.
- ZHANG Wenjia, WANG Quanquan, LI Haikun, et al. DC short circuit fault ride-through method based on symmetrical bipolar FBSM-MMC HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 147-154.
- [17] 梁远升,王钢,李海锋,等. 基于电位系数矩阵的同塔双回直流输电线路故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 97-102.
- LIANG Yuansheng, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault line selection scheme of double HVDC transmission lines on same tower based on potential coefficient matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 97-102.
- [18] SHEN H C, MEI F, CHEN H F, et al. Novel topology of DC energy-released circuit for saturated-core fault current limiter[J]. IEEE Access, 2019, 7: 125939-125951.
- [19] 赵森林,卢亚军,吕鹏飞,等. 特高压直流保护动作策略优化[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 143-149.
- ZHAO Senlin, LU Yajun, LYU Pengfei, et al. Optimization of UHVDC protection action strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 143-149.
- [20] 刘青,徐宏璐. 提高 STATCOM/BESS 风电系统频率与电压支撑的智能联调优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 62-71.
- LIU Qing, XU Honglu. Intelligent joint optimization control method for improving frequency and voltage support of STATCOM/BESS wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 62-71.

作者简介:



张亮

张亮(1982),男,博士,副教授,研究方向为交直流混合配电网、电能质量(E-mail: zhldream@126.com);

李丹栋(1996),男,硕士在读,研究方向为交直流混合配电网;

史明明(1986),男,博士,研究员级高级工程师,从事交直流配电网、电能质量相关工作。

Topology and control strategy of a multifunctional modular DC fault current limiter

ZHANG Liang¹, LI Dandong¹, SHI Mingming², GE Xuefeng², YUAN Yubo²

(1. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: DC fault current limiter (FCL) is a key device for suppressing DC short-circuit fault currents, which is important in AC/DC hybrid grid. In this paper, topology of a multifunctional modular DC FCL is proposed, which consists of multiple series-connected power electronic modules. On the basis of analyzing its working mechanism, three functions of fault current limit, energy release and DC grid voltage support are realized. The operation mechanism of the multifunctional modular DC FCL is analyzed in detail. A typical configuration scheme is presented for its application in AC-DC hybrid grid. The design of control strategy is completed for the three functional corresponding operation modes. In order to verify the effectiveness of the topology and control strategy, a multi-case simulation model is constructed in Matlab/Simulink. The simulation results show that the proposed modular DC FCL topology and control strategy satisfy the requirements for fault current limiting applications under various fault conditions in AC/DC hybrid grid.

Keywords: AC/DC hybrid grid; DC fault; fault current limiter (FCL); modularization; energy release; multifunctional

(编辑 方晶)