

基于 MMC 的多端柔性直流配电网控制与保护

刘会强^{1,2}, 李丹丹^{1,2}, 刘石川^{1,2}, 慕腾^{1,2}, 邢华栋^{1,2}, 武海燕^{1,2}, 郭建华^{1,2}

(1. 内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古自治区电力系统智能化电网仿真企业重点实验室, 呼和浩特 010020)

摘要:为提高多端柔直配电网系统的稳定运行能力,本文首先对分割的城市中压配电网进行互联设计了多端柔性直流混合配电网,对主要换流设备选型进行实例设计;基于下垂控制策略并结合功率参考值平移的曲线特性,将考虑电压限值的直流电压斜率控制方法应用于多端柔直配网,并制定本文设计案例的换流器保护配置策略。在 PSCAD/EMTDC 中完成 10 kV 多端柔直配网应用案例的搭建,最后仿真验证直流电压斜率控制策略及保护配置方案的有效性。

关键词:直流配电网; MMC; 电压下垂控制; 保护配置

Control and Protection of Multiple-terminal Flexible DC Distribution

Network Based on MMC

LIU Huiqiang^{1,2}, LI Dandan^{1,2}, LIU Shichuan^{1,2}, MU Teng^{1,2}, XING Huadong^{1,2},

WU Haiyan^{1,2}, GUO Jianhua^{1,2}

(1. Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot, 010020; 2. Key Laboratory of Intelligent Power Grid Simulation Enterprise of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, 010020)

Abstract: For improving stable operation ability of multi terminal flexible direct distribution network system, the divided urban medium voltage distribution network is interconnected firstly in this paper, the multi terminal flexible DC hybrid distribution network is designed, and the selection of main converter equipment is designed; Based on the droop control strategy and combined with the curve characteristics of power reference value translation, the DC voltage slope control method considering voltage limit is applied to multi terminal flexible direct distribution network, and the converter protection configuration strategy of design case is formulated. The application case of 10 kV multi terminal flexible direct distribution network is set up in PSCAD / EMTDC. Finally, the effectiveness of DC voltage slope control strategy and protection configuration scheme is verified by simulation.

Keywords: DC distribution network; MMC; voltage droop control; protection configuration

0 引言

随着大城市负荷密度的不断增加,采用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流技术对中压配电网进行互联形成多端柔性直流混合配电网,集成大容量供电、传输损耗小、优质电能质量、分布式电源装置便捷接入等优点^[1-3]。基于 MMC 的多端柔性直流配电网^[4-6]逐渐发展成为支撑现代电力能源物联网广泛互联的关键技术之一。

直流电压控制目前是多端柔性直流配电网的热点之一,控制方式对于系统运行的稳定及供电可靠起关键性作用^[7]。文献[8]基于附加缓冲减载算

法,提出一种应用于交直流柔性配电网的主从控制策略,有效避免了负载剧烈波动对直流电压的干扰;将考虑安全域的改进蓄电池减载控制方法应用于荷电边际条件,并提出一种将分布式电源、化学储能等互联电气装置的协同联合控制方案。文献[9]提出将配置在分布式储能站中的直流变压器参与到电压裕度控制中,改进了传统主从控制,制定了考虑动作优先级顺序的电压边界控制策略。文献[10]提出在交直流配电网系统引入松弛节点作为主站的外环控制变量,利用从站跟随主站电压阈值的方法实现换流站功率与电压的协调控制,从而实现配电网系统能量合理分配。

收稿日期:2023-03-14

基金项目:内蒙古自治区重点研发与成果转化项目(2023-YFHH0097);内蒙古电科院青科项目(2022-QK-01)。

多端柔性直流配电网由交直流互联负载、分布式电源等大量电气设备构成,具有复杂程度高、非线性强等特点^[10],因此在交直流系统换流器保护识别、故障隔离等方面出现新的挑战。文献[12]首先将故障直流电流控制在1.2倍并识别其他支路的同时过零性,然后依托电力电子开关与断路器协同控制,实现故障隔离。文献[13]基于零序电路结构提出将共模电压、电流结合有功方向判别条件作为计算条件,将3次谐波纵向分量与换流阀零序电压建立时序逻辑,针对直流单级接地故障验证了在故障状态网络中的可行性。文献[14]引入单级接地故障后Pear相关性的概念区别故障次暂态电压的差异性,结合限流电压构成反方向差动保护来判别区内外故障。

本文首先对基于MMC的多端柔性直流配电系统的主要换流设备选型、主接线形式及接地方式进行实例设计,建立某城市电网柔性直流配电系统应

用案例。然后根据柔性直流配电系统的运行及故障特性,结合一次设备的性能与配置,提出一种考虑电压限值的直流电压斜率控制策略,并完成应用案例换流器保护配置。研究城市配电网中基于MMC的多端柔直系统建模技术,通过设计完成的应用案例建立基于PSCAD/EMTDC的数字多端柔直系统离线模型。仿真分析验证了系统模型及控制保护配置的正确性。

1 多端柔性直流配电系统实例设计

设计的多端环状直流配电系统拓补结构见图1。该系统中,三端接入10 kV交流配电网,一端接入新能源,一端接入储能系统,另外一端接入直流负荷,一端接入交流负荷;交直流负荷均经过换流器接入柔直系统的直流母线,参数表1。对于10 kV直流配网,考虑电压波动范围-10%~+5%^[15]。

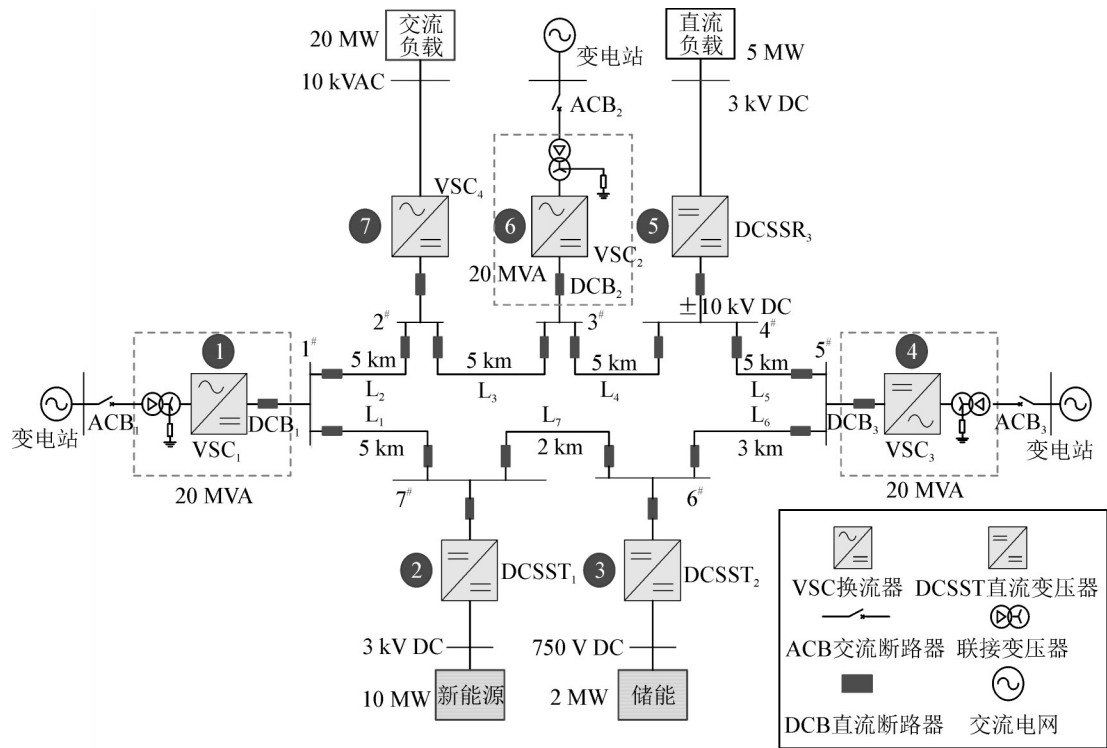


图1 多端柔性直流配电系统拓补结构
Fig. 1 Topology structure of multi terminal flexible DC distribution system

表1 多端环网主回路参数
Table 1 Main loop parameters of multi terminal ring network

节点	接入设备	电压等级	总容量
1号	交流配电网	10 kVa.c./±10 kVd.c.	20 MVA
2号	新能源	3 kVd.c./±10 kVd.c.	10 MW
3号	储能	750 Vd.c./±10 kVd.c.	2 MWh
4号	交流配电网	10 kVa.c./±10 kVd.c.	20 MVA
5号	直流负荷	3 kVd.c./±10 kVd.c.	5 MW
6号	交流配电网	10 kVa.c./±10 kVd.c.	20 MVA
7号	交流负荷	10 kVa.c./±10 kVd.c.	20 MW

1.1 电压源换流器设计
图1中,换流器VSC₁~VSC₄选用MMC型换流器。额定容量20 MVA,额定有功功率20 MW,静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)运行模式时最大无功需求为20 Mvar。交流系统额定电压10 kV,电流1 154 A,直流系统额定电压±10 kV,电流1 000 A,桥臂额定电流666 A。为满足系统谐波需求,桥臂联接数设置为25个,考虑一定裕量可以选用1 700 V/1 200 A等级器件。换流器选用经

典载波移相调制(carrier phase shift modulation, CPSM)方法^[16]。基于CPSM,采用直流电容电压平衡的附加控制策略,桥臂的模块能量调整通过控制其参考电压实现平衡分布。桥臂模块参考电压控制原理见图2。

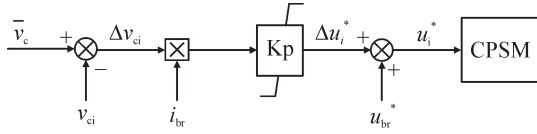


图2 附加平衡控制框图

Fig. 2 Additional balance control block diagram

图2中: v_{ci} 为桥臂子模块 i 的电容电压; $\bar{v}_c$ 表示平均值取值为 N 个子模块的电容电压; Δv_{ci} 取 v_{ci} 与 $\bar{v}_c$ 的差值作为附加平衡控制输入; Δv_{ci} 和桥臂电流 i_{br} 的乘积经过比例环后得到附加控制值 Δu_i^* , Δu_i^* 通过限幅附加于桥臂得到系统参考电压值。

1.2 直流变压器设计

双主动全桥(dual-active-bridge, DAB)结构包括2个全桥、1个隔离变压器,此结构可以充分提升功率传输密度^[17]。 n 个DAB在高压端、中压端分别以串联、并列形式接入中压及低压直流母线,多端柔性直流配电系统中,根据系统运行需求,DCSST₁、DCSST₂用于接入有功率交换需求的风光储直流微网,在定直流电压、定功率控制方式下具备相向传输能力。

1.3 主接线及接地设计

设计的基于MMC的多端柔直配电系统采用单极对称接线方式。联接变压器绕组设计为Dyn方案并采用中性点经电阻接地形式,见图3。



图3 系统主接线形式

Fig. 3 Main wiring form of system

充分考虑孤岛运行可能,直流变压器控制调整 ± 10 kV 中压直流母线电压,为了保证电压平衡,在直流变压器高压侧采用集中电容设置中性点接地,并且为了减少孤岛运行时的单极故障电流,设计采用中性点经过电阻接地方式,另外,为了避免直流配电侧接地方案对中压配电网交流侧接地参数产生影响,设置直流变压器在孤岛方式下接地开关投入运行。

2 控制与保护方案设计

2.1 附加电压阈值的直流电压斜率控制策略

下垂控制方法已广泛应用到柔性直流配电网

中^[18-22]。在此基础上分别设定电压上限阈值 U_{dmax} 及下限阈值 U_{dmin} 来控制母线电压波动范围,当电压达到边界值 U_{dmax} 或 U_{dmin} 时,换流站功率由电压阈值反馈并实现下垂曲线移动。考虑电压阈值的特性曲线见图4,当换流站沿着曲线1运行到 (P_1, U_1) 时,电压达到上限阈值 U_{dmax} ,将 P_1 反馈设定为功率参考值 P_{ref} 得到曲线2并控制换流站运行到电压稳定点。同理,电压达到下限值 U_{dmin} 时反馈运行到曲线3对应的电压稳定点。设定电压上下限阈值反馈的功率参考值修改流程见图5。

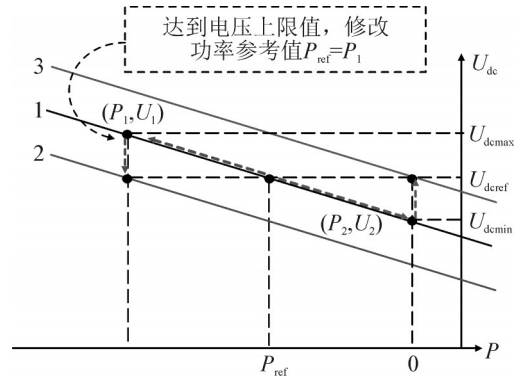


图4 附加电压阈值的控制特性曲线

Fig. 4 Control characteristic curve of additional voltage threshold

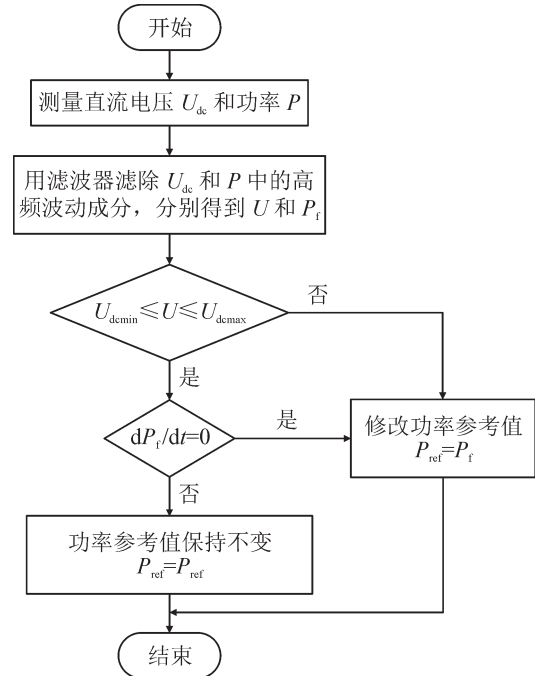


图5 设定电压阈值的功率参考值流程

Fig. 5 Power reference value flow of setting voltage threshold

采用滤波器过滤 U_{dc} 高频分量得到 U 作为基准值。当运行电压达到上下限阈值时设定反馈参考值得到新运行曲线,确保电压运行在 $[U_{dmax}, U_{dmin}]$ 区间。

2.2 换流器保护配置方案

换流器保护包括联接变压器及换流器所包含的区域,保护信号测点见图6。

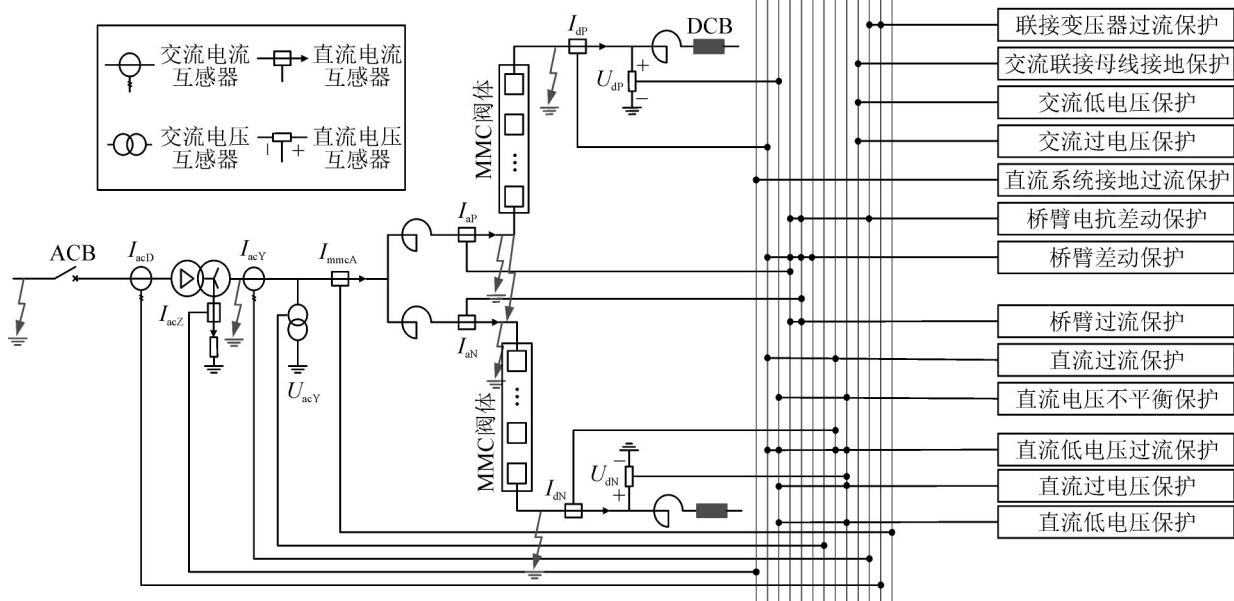


图6 换流器保护区保护信号测点图
Fig. 6 Protection signal measuring point diagram of converter protection area

3 仿真验证

基于本文设计的±10 kV 城市配电网多端柔性直流系统应用案例,在PSCAD软件中完成图1的柔直仿真系统搭建,采用单极对称接线方式,仿真验证所提控制策略及保护配置的有效性。

3.1 直流电压斜率控制仿真验证

仿真时间设定为3 s,换流站容量均为10 MVA,交流负荷容量4 MVA,通过换流站DCSST₁并入直流母线,新能源容量4 MW,直流负荷容量5 MW,电压上下限分别为20.5 kV、19.5 kV,换流器斜率分别为0.067、0.05、0.04。交流负载、直流负载、储能、新能源并入直流系统的时间分别为0.5 s、0.6 s、0.7 s、0.8 s。

设置输出功率在1 s后稳定运行,直流母线电压初始稳定运行在20 kV。直流电压斜率控制仿真以换流站1端口电压为例。设定系统电压上下限阈值分别为20.5 kV、19.0 kV。各换流站和交流负载的功率变换曲线如图7-14。

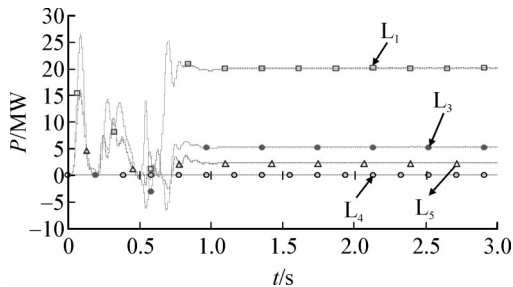


图7 负载功率曲线
Fig. 7 load power curve

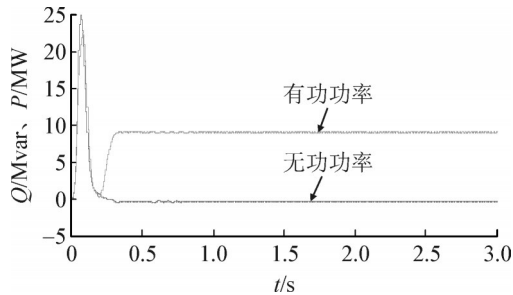


图8 1号换流站的功率曲线
Fig. 8 Power curve of converter station 1

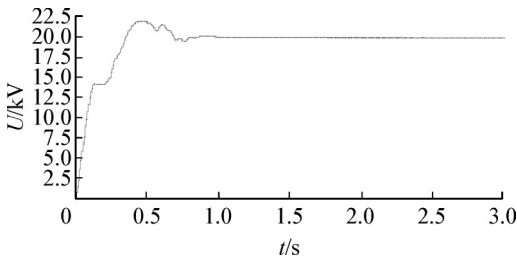


图9 1号换流站端口直流电压曲线
Fig. 9 DC voltage curve of No. 1 converter station port

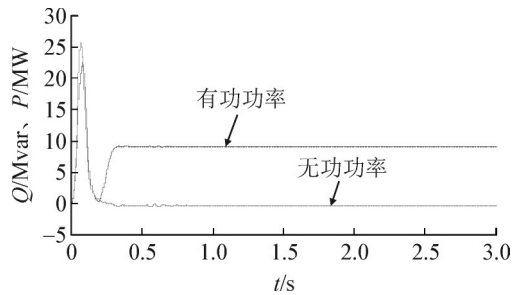


图10 2号换流站的功率曲线
Fig. 10 Power curve of converter station 2

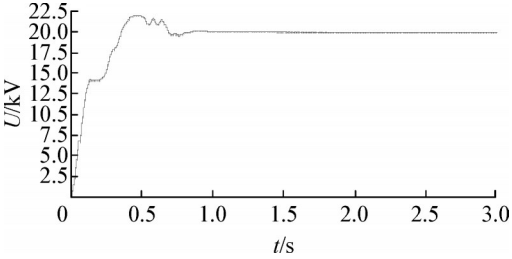


图 11 2号换流站端口直流电压
Fig. 11 DC voltage at No. 2 converter station port

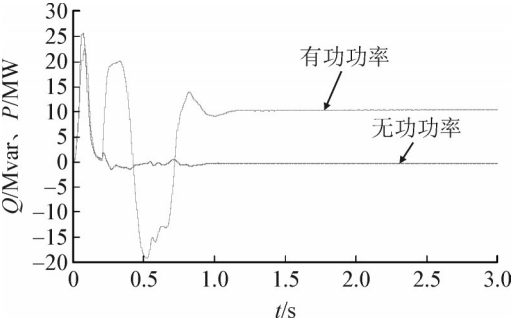


图 12 3号换流站的功率曲线
Fig. 12 Power curve of No.3 converter station

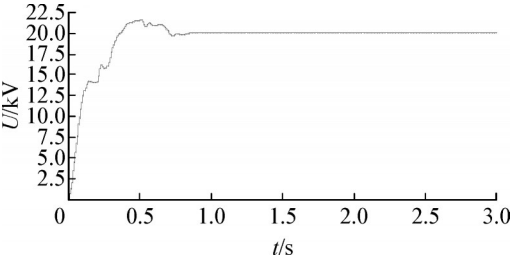


图 13 3号换流站端口直流电压
Fig. 13 DC voltage at port of No. 3 converter station

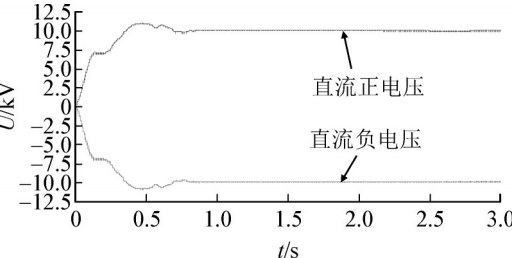


图 14 多端柔直正负直流母线直流电压
Fig. 14 DC voltage of positive and negative DC bus of multi terminal flexible DC network

由图可知,当系统负荷突变时,为维持系统功率及电压稳定,各换流站按照设定的控制策略及时调整功率及电压稳定,换流站输出功率在系统运行正常后逐渐恢复至初始稳态数值。

仿真结果表明基于电压上下限阈值的直流电压斜率控制策略有效改善了系统电压,随着负载输出功率的变化,在达到电压阈值边界后及时反馈跟随功率参考值移动到稳定运行点,保证了系统直流

电压运行在设定区间。

3.2 换流器故障仿真验证

设置在 1.2 s 时刻 1 号换流器阀顶接地故障,1 号交流系统交流电压、阀侧交流电压发生畸变,保护系统在 3 ms 将 1 号换流器闭锁,在 5 ms 切除故障,1 号换流器在收到闭锁信号后,直流出力迅速下降为 0,1 号换流器出口正电压降为 0,负电压降为 -5 kV,见图 15-17;由于 2 号换流器为定功率控制,在振荡后功率保持在 9 MW,3 号换流器出力迅速增加以补充 1 号换流器闭锁造成的功率缺口,1.5 s 稳定在 20 MW。由于 2 号、3 号换流器直流出力急剧振荡、增加造成换流器阀侧交流电压波形出现小幅降低,在换流器出力稳定后交流电压波形恢复正常。

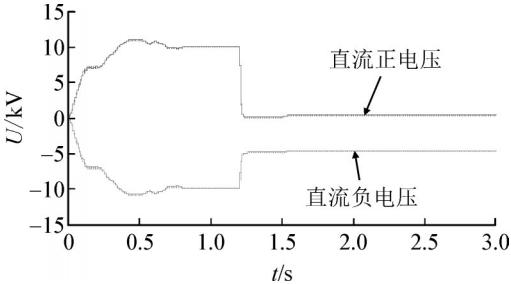


图 15 1号换流器直流电压曲线
Fig. 15 DC voltage curve of No. 1 converter

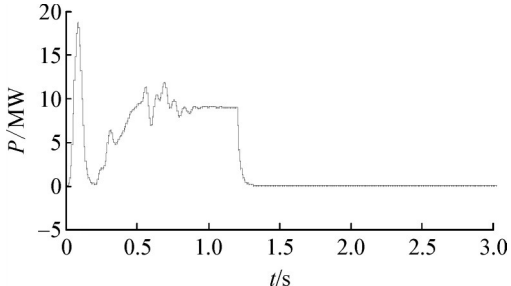


图 16 1号换流器直流功率曲线
Fig. 16 DC power curve of No.1 converter

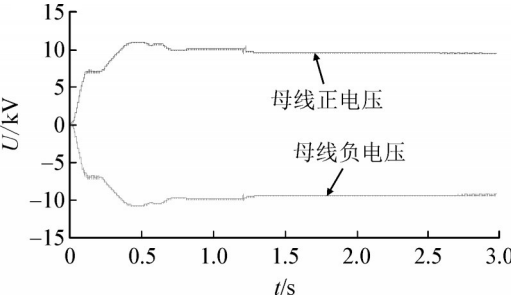


图 17 母线—电压曲线
Fig. 17 Bus— voltage curve

交流负荷功率曲线见图 18,交流负荷电压曲线见图 19。故障后由于 1 号、3 号、5 号、6 号、7 号线损负荷增加,各直流母线电压小幅下降,由图 18-19

可知,由于故障过程中直流电压未发生大波动,交流负荷未受影响。

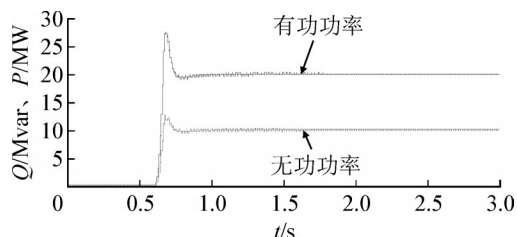


图 18 交流负荷功率曲线
Fig. 18 AC load power curve

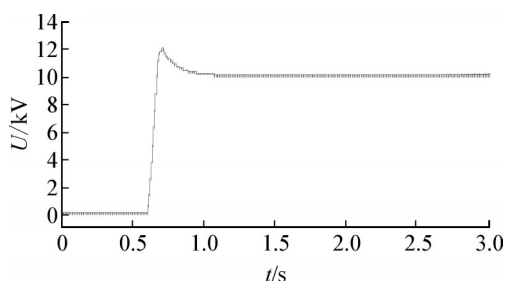


图 19 交流负荷电压曲线
Fig. 19 AC load voltage curve

4 结语

为推动现代城市电力物联网成熟发展,构建了基于 MMC 的多端柔性直流配电系统,主要内容如下:

1)综合考虑系统侧电源、分布式能源、储能及负荷特性,设计基于 MMC 的城市多端环状柔直供电系统,设计换流器直流电容电压基于载波移相调制的附加平衡控制策略;并根据主回路结构对主要设备、接线方式进行实例设计;

2)设计多点微分平均值跟随功率扰动的方法,提出一种直流电压斜率控制策略,通过自动修改直流电压-有功功率下垂曲线的功率参考值,设定电压上下限阈值实现直流电压平移并运行到稳定运行区间,并根据柔性直流配电系统的运行及故障特性,制定保护配置策略;

3)研究基于 MMC 的多端柔性直流配电系统建模技术,建立数字多端柔性直流配电系统离线模型。仿真验证了所提直流电压斜率控制策略与保护配置方案的有效性,大幅提升系统的运行控制与优化能力。

参考文献

- [1] 陆翌,宣佳卓,陈骞,等. 基于成本分析的柔性直流配电网综合规划方案研究[J]. 电测与仪表,2020,57(19):33-39.
LU Yi, XUAN Jiazhao, CHEN Qian, et al. Comprehensive approach for flexible DC distribution network planning

based on cost analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(19):33-39.

- [2] 李盈含,高亮,陈蒙蒙. 柔性直流配电系统控制策略及保护技术研究综述[J]. 电测与仪表,2020,57(9):8-16.

LI Yinghan, GAO Liang, CHEN Mengmeng. Review on control strategy and protection technology of flexible DC distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9):8-16.

- [3] 张志荣,邱晓燕,孙旭,等. 基于 ADMM 的交直流混合配电网分布式电压优化模型[J]. 电网技术,2021,45(11):4551-4559.

ZHANG Zhirong, QIU Xiaoyan, SUN Xu, et al. Distributed voltage optimization model for AC/DC hybrid distribution network based on ADMM[J]. Power System Technology, 2021, 45(11):4551-4559.

- [4] 吴杰,李传江,周鸣,等. 柔性直流配电网混合拓扑变流器的自治控制[J]. 电工技术学报,2020,35(24):5175-5186.

WU Jie, LI Chuanjiang, ZHOU Ming, et al. Grid forming control of hybrid topology converter for flexible DC distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(24):5175-5186.

- [5] 公铮,赵思涵,朱荣伍,等. 基于 MMC 主动限流的柔性直流配电网优化配合保护策略[J]. 电网技术,2021,45(11):4277-4285.

GONG Zheng, ZHAO Sihan, ZHU Rongwu, et al. Optimized coordination protection strategy based on active current limiting for MMC-based flexible DC distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(11):4277-4285.

- [6] 周泓宇,姚伟,左文平,等. 海上风电直流单极接地故障下容错运行的组网方案与控制[J]. 中国电机工程学报,2022,42(13):4835-4847.

ZHOU Hongyu, YAO Wei, ZUO Wenping, et al. Grid forming scheme and control for fault-tolerant operation of offshore wind power under DC unipolar grounding fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13):4835-4847.

- [7] 管恩齐,何晋,骆通. 适用于双极直流电网最优潮流控制的双鱼群算法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(10):35-43.

GUAN Enqi, HE Jin, LUO Tong. Double fish-swarm algorithm for optimal power flow control of bipolar DC grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10):35-43.

- [8] 张学,裴玮,范士雄,等. 含多端柔性互联装置的交直流混合配电网协调控制方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(7):185-191.

ZHANG Xue, PEI Wei, FAN Shixiong, et al. Coordinated control method of AC/DC hybrid distribution network with multi-terminal flexible interconnection devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):185-191.

- [9] 郑鹏威. 柔性中压直流配电网电压控制的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
- [10] 季一润, 袁志昌, 赵剑锋, 等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 335-341.
JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 335-341.
- [11] 季一润. 中压柔性直流配电网关键控制技术研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [12] 郑涛, 吴琼, 吕文轩, 等. 基于主动限流控制的直流配电网保护及故障隔离方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 114-121.
ZHENG Tao, WU Qiong, LYU Wenxuan, et al. Protection and fault isolation scheme based on active current-limiting control for DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 114-121.
- [13] 上官鑫. 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流配电网保护方案研究[D]. 太原:太原理工大学, 2020.
- [14] 肖烽. 多端柔性中压直流配电网的电压控制研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [15] 陈瑞洁, 袁旭峰, 李雨龙, 等. 基于双端有源阻尼的直流配电网稳定性提升技术研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 73-80.
CHEN Ruijie, YUAN Xufeng, LI Yulong, et al. Improvement in stability of DC distribution network based on double-terminal active damping[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 73-80.
- [16] 叶满园, 陈乐, 康力璇. 基于载波自由度的改进载波移相PWM技术[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(3): 134-142.
YE Manyuan, CHEN Le, KANG Lixuan. Improved carrier phase shift PWM technology based on carrier degrees of freedom[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(3): 134-142.
- [17] 李彬彬, 张书鑫, 赵晓东, 等. 基于容性能量转移原理的高压大容量DC/DC变换器[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1103-1113.
LI Binbin, ZHANG Shuxin, ZHAO Xiaodong, et al. Capacitive energy transfer principle based high-voltage high-power DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1103-1113.
- [18] 施家博, 苗虹, 曾成碧. 基于复合型虚拟阻抗与自适应下垂控制的并联逆变器功率均分策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 77-82.
SHI Jiabo, MIAO Hong, ZENG Chengbi. Power sharing strategy of parallel inverter based on complex virtual impedance and adaptive droop control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12): 77-82.
- [19] 刘文亮. 直流微电网自适应两阶段下垂控制方法[J]. 电器与能效管理技术, 2021(8): 58-63.
LIU Wenliang. Adaptive two-stage droop control method for islanded DC micro-grids[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(8): 58-63.
- [20] 林翔, 方健, 王红斌, 等. 计及风光荷相关性的变压器运行风险的概率评估方法[J]. 变压器, 2022, 59(1): 28-33.
LIN Xiang, FANG Jian, WANG Hongbin, et al. Probabilistic assessment of transformer operating risk considering correlation among wind power, photovoltaic and load[J]. Transformer, 2022, 59(1): 28-33.
- [21] 焦建立, 向新宇, 薛阳, 等. 基于改进下垂控制的直流微电网功率均衡策略[J]. 浙江电力, 2022, 41(6): 32-36.
JIAO Jianli, XIANG Xinyu, XUE Yang, et al. A power balance strategy of DC microgrid based on improved droop control[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(6): 32-36.
- [22] 柴影辉, 钟建英, 张进, 等. 柔性直流工程用气体绝缘穿墙套管设计[J]. 电瓷避雷器, 2023(3): 189-196.
CHAI Yinghui, ZHONG Jianying, ZHANG Jin, et al. Design of SF₆ gas insulated wall bushing for vsc-hvdc[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(3): 189-198.

作者简介:

刘会强(1990—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统无功补偿与控制。E-mail: 1940434952@qq.com。

李丹丹(1979—), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析。

刘石川(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析。

邢华栋(1987—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析。

慕腾(1992—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析。

武海燕(1991—), 女, 工程师, 研究方向为电力系统分析。

郭建华(1996—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统仿真分析。