

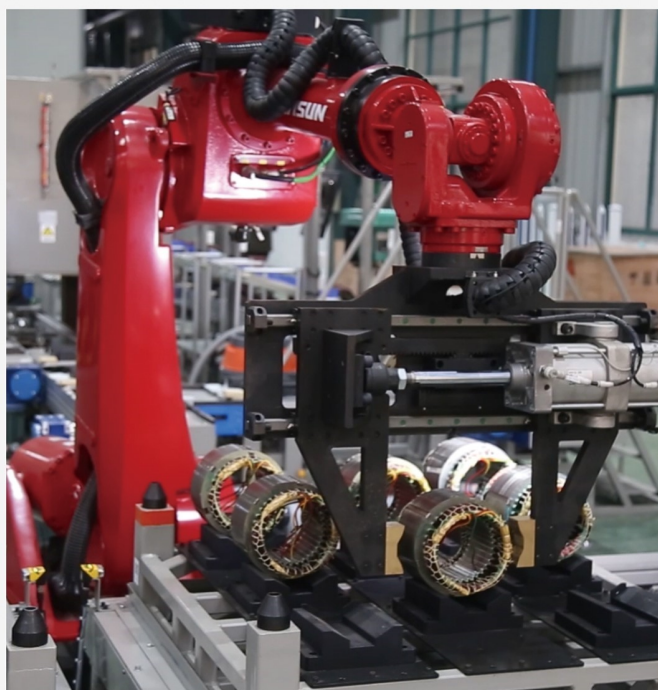
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

吴芳柱.
基于LCC-MMC的混合直流输电系统优化
控制方法.
电机与控制应用, 2021, 48(11): 86.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

基于 LCC-MMC 的混合直流输电系统优化控制方法

吴芳柱

(国网南京供电公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 混合直流输电系统常会出现不同类型的故障, 传统控制方法的故障处理时间过长, 对此, 研究基于换相换流器(LCC)和模块化多电平换流器(MMC)的混合直流输电系统优化控制方法。根据系统结构特征绘制拓扑结构图, 建立 LCC 数学模型和 MMC 数学模型; 利用三角星型接法和星型接法控制整流侧直流电压, 实现整流侧 LCC 的优化控制; 利用电压源逆变器(VSC)双闭环控制器对逆变侧 MMC 进行优化控制; 通过从系统直流侧直接充电, 减少中间电流转接过程, 利用 MMC 数学模型计算电压调制波, 实现均衡电压, 控制系统稳定运行。仿真结果表明, 应用所提方法可以在 5 s 内控制整流站交流故障, 面对直流线路单极故障问题, 所提方法在 5 s 内快速反应, 将 LCC 和 MMC 的电流控制在稳定的区间内, 同时对三组电流的控制均有较好的效果, 能够实现混合直流输电系统优化控制, 快速解决输电系统故障。

关键词: 混合直流输电系统; 电网换相换流器; 模块化多电平换流器; 整流侧; 逆变侧; 均衡电压; 相间环流

中图分类号: TM 72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)11-0086-06

doi: 10.12177/emca.2021.111

Optimal Control Method of Hybrid DC Transmission System Based on LCC-MMC

WU Fangzhu

(State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210012, China)

Abstract: Hybrid DC transmission system often has different types of faults, and the traditional control method takes too long to deal with such faults, so the optimization control method of hybrid DC transmission system based on line-commutated converter (LCC) and modular multilevel converter (MMC) is studied. The topological diagram is drawn according to the system structure characteristics, and the LCC and MMC mathematical models are established. The rectifier side DC voltage is controlled by the triangle and star connection to realize the optimal control. The inverter side MMC is optimized by the voltage-sourced converter (VSC) double-closed-loop controller. By directly charging from the system DC side, the intermediate current transfer process is reduced, and the voltage modulation wave is calculated by the MMC mathematical model to achieve balanced voltage and stable operation of the control system. Simulation results show that the proposed method can control the AC fault of the rectifier station within 5 s. For the DC line unipole fault, the proposed method can quickly respond within 5 s, and the currents of LCC and MMC can be controlled in a stable range. All three currents are effectively controlled, proving that the optimal control of the hybrid DC transmission system is realized and the transmission system faults can be handled quickly.

Key words: hybrid DC transmission system; line-commutated converter (LCC); modular multilevel converter (MMC); rectifier side; inverter side; equalizing voltage; interphase circulation

收稿日期: 2021-09-01; 收到修改稿日期: 2021-09-30

作者简介: 吴芳柱(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及自动化, 配电网交直流技术等。

0 引言

国内能源和电力呈分布式布局,一些地区需要以“西电东送”的方式优化能源和电力配置,混合直流输电系统被应用在能源和电力配置工作当中。近年来,随着科技水平的不断提升,混合直流输电系统多次优化升级,如特高压并联型三端混合直流输电系统。该系统通过闭锁前3站的功率参数,实现对系统故障功率的转换,降低了功率损失^[1]。

针对各类故障问题,文献[2]基于脉宽调制型电流源换流器(PWM-CSC)优化了系统运行,通过 PWM-CSC,优化系统故障响应功能,通过特定谐波消除法,控制调制和切换脉宽,在依托两相静止坐标系构建数学模型的基础上,实现对电网运行的控制。但系统运行当中存在一些小因素扰动的问题。文献[3]利用换相换流器(LCC)和模块化多电平换流器(MMC),优化控制系统中存在的各项干扰问题,由此诞生了全新的、具有 LCC-MMC 共同作用的混合直流输电系统。为了进一步优化系统的获取、识别和维护处理工作,文献[4]基于双树复小波变换方法,优化系统控制策略,该方法根据混合直流输电线路中常见的故障特征,利用电磁暂态仿真模型优化管理参数。文献[5]考虑到计算可处理性和测试输电网扩展规划(TEP)模型性能的能力,详细描述了网络拓扑、发电组合和负荷特性,分析间歇性可再生能源(VRE)(风电和光伏)输出和负荷曲线的全年时间序列。文献[6]比较了2种串并联混合动力电动汽车,使用经验证的电气变量变速器模型,不仅可用于优化内燃机的工作点,还可用于寻找最佳直流母线电压,以优化系统级效率。

基于以上研究成果,本文提出了新的基于 LCC-MMC 的混合直流输电系统优化控制方法,根据 MMC 和 LCC 各自的优缺点,对其进行优化,降低发生故障的可能性,然后将优化后的2个模型应用到混合直流输电系统中,均衡系统的电压,进一步解决更多的系统运行故障问题,保障系统的稳定运行。

1 混合直流输电系统拓扑结构

设该系统的整流站为12脉动 LCC,每间安装

6脉动换流器,通过 YD 接线 MMC 逆变站换流变压器,经高电阻运行,监测故障问题,以并联的方式相互连接,此时的拓扑结构能够传送大容量电荷,同时满足弱交流传送的基本要求^[5]。混合直流输电系统的拓扑结构,如图1所示。

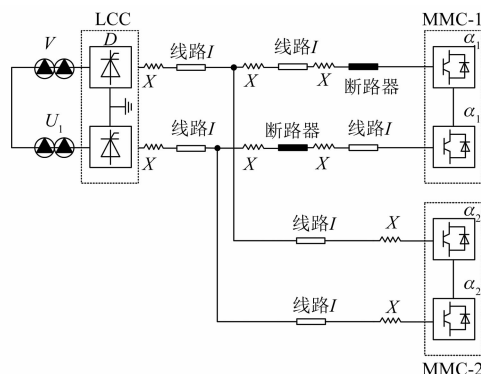


图1 系统拓扑结构图

图1中,参数 V 表示空载线电压; X 表示换相电抗; D 表示交流电抗器; α 表示触发角; I 表示运行过程中的直流电流,根据图1设置的拓扑结构,构建数学模型。

2 基于 LCC-MMC 的换流器数学模型

2.1 LCC 数学模型

设置双极间输出直流电压为 U 。默认整流侧直流电压为 U_1 ,已知此次需要安装的整流器为6脉动,计算 LCC 正常运行状态下的 LCC 数学模型,为

$$U_1 = 2.7U \cos \alpha - \frac{6}{\pi} XI \quad (1)$$

假设触发延迟角和触发重叠角分别为 α_1 和 α_2 ,根据图1和式(1),得到 LCC 整流站数学模型:

$$\begin{cases} P_1 = 2U_1 I \\ P_2 = P_1 \tan \alpha_1 \\ \cos \theta' = \frac{\cos \theta + \cos(\theta + \alpha_2)}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_1 、 P_2 分别表示电流 I 下的有功功率和无功功率; $\cos \theta$ 表示在固定触发角度 θ 下的功率因数^[6]。根据 LCC 结构特征,完成对 LCC 数学模型的设计。

2.2 MMC 数学模型

结合图 1 所示的系统逆变站结构, 设置 j 的桥臂为 u 和 v 。已知系统利用 M 个电路 SM 子模块串联控制两桥臂, 设置 2 个桥臂的电压和输出电压分别为 U_{uj} 、 U_{vj} 、 U_j , 电流和交流侧电流分别为 I_{uj} 、 I_{vj} 和 I_j 。根据基尔霍夫电压定律基本计算原理, 通过下列方程组计算不同桥臂中经过的电压和电流:

$$\begin{cases} U(t) - a_{uj}(t) = D_0 \frac{dI_{uj}(t)}{dt} + FI_j(t) + D \frac{dI_j(t)}{dt} \\ \frac{U(t)}{2} - a_{vj}(t) = D_0 \frac{dI_{vj}(t)}{dt} + FI_j(t) + D \frac{dI_j(t)}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_j(t) = I_{uj}(t) - I_{vj}(t) \\ I_{diff}(t) = \frac{I_{uj}(t) + I_{vj}(t)}{2} = \frac{1}{3}I_j(t) + I(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $a_{uj}(t)$ 、 $a_{vj}(t)$ 表示桥臂的常数参数; D_0 、 D 表示交流电抗; F 表示电阻。

默认桥臂电流与环流方向均为正方向, 确定时域范围内的交流侧电流与环流, 发现桥臂电压影响上述设置的参数, 因此假设导通状态下的桥臂电流与电容电压相关, 则存在:

$$I(t) = C \frac{dU_{jr}(t)}{dt} \quad (5)$$

式中: $U_{jr}(t)$ 表示桥臂 r 的电容器电压。

根据上述计算过程发现, 上、下桥臂可作为 2 个独立存在的可控电压源, 则根据三相静止坐标系的组成, 通过下列计算公式描述构建的 MMC 数学模型:

$$\begin{cases} U_a(t) - U'_a(t) = D \frac{dI_a(t)}{dt} + FI_a(t) \\ U_b(t) - U'_b(t) = D \frac{dI_b(t)}{dt} + FI_b(t) \\ U_c(t) - U'_c(t) = D \frac{dI_c(t)}{dt} + FI_c(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: a 、 b 、 c 表示三相。

至此获得 MMC 数学模型^[7]。利用上述两组数学模型, 约束混合直流输电系统。

3 混合直流输电系统优化控制方法

3.1 整流侧 LCC 的优化控制

直流输电换流器多为晶闸管器件, 通过控制

触发角控制运行状态下的系统电压和功率。换流器按照三相桥式的方式设计电路, 利用 6 个波头的换流器, 实现对固定传输周期内, 整流电压工作频率的实时控制。当多组换流器以串联、并联协同使用的方式建立工作连接后, 换流器形成具有更强控制效果的 12 脉动^[8]。当阳极电压为正时, 晶闸管根据电压波动调整运行参数, 切换到其他工作状态。由于晶闸管只能单向导通, 所以不受触发脉冲直接控制, 导通后则一直处于导通状态。在电流减小、阳极电压值小于等于零的情况下, 晶闸管根据该电压值将状态切换为关断。要求桥臂的电压差为 35° , 分别利用“三角星型”接法和“星型”接法控制整流侧直流电压, 通过上述接线方式, 根据式 (1) 和式 (2) 设计的 LCC 数学模型, 实现对整流侧 LCC 的优化控制。

3.2 逆变侧 MMC 的优化控制

对于系统自身来说, 逆变侧 MMC 的优化控制工作更为复杂, 作为一个非线性系统, 其运行稳定性受到了极大干扰。已知 MMC 与稳定控制系统电压源逆变器 (VSC) 的拓扑结构一致, 所以参考 VSC 双闭环控制器优化控制逆变侧 MMC。根据图 1 的结构可知, 逆变侧 MMC 由锁相环、坐标变换、瞬时功率计算、内环电流外环功率控制以及触发脉冲生成等模块组成, 通过双环控制实时监管内环、外环功率和电流的大小, 实现对系统运行参数的跟踪。对于内环电流的控制, 依据电压前馈补偿和电流反馈, 控制直流输电换流器的输出电压。前馈补偿条件下的输出阀侧电压为

$$\begin{cases} V_{dord} = U_1 + \omega DI_1 - [d_{pid}(I_{dord} - I_2) + d_{iid}(I_{dord} - I_2) dt] \\ V_{qord} = U_2 + \omega DI_2 - [d_{piq}(I_{qord} - I_1) + d_{iid}(I_{qord} - I_1) dt] \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_{dord} 、 V_{qord} 表示不同端的参考电压; ω 表示权重; I_1 、 I_2 表示外环功率的电流输出控制指令; d_{pid} 、 d_{piq} 表示控制电流运行过程中, 控制器的轴比例系数; I_{dord} 、 I_{qord} 表示实时电流; d_{iid} 表示不同方向电流的积分^[9]。通过上述函数解耦控制内环电流。

根据系统下发的实时工作指令, MMC 会产生 2 种不同性质的电流 (有功和无功), 当 MMC 连接到强电网时, 由于功率变化不会直接影响强电网连接处电压, MMC 适用于控制功率。在内环

工作状态下,根据 MMC 的期望电流和控制器结构层,消除稳态误差,所以在稳态条件下,利用下列公式描述交流系统与功率:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(U_{11}I_{11} + U_{12}I_{12}) \\ Q = \frac{3}{2}(U_{12}I_{11} - U_{11}I_{12}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_{11} 、 U_{12} 表示不同坐标轴的交流母线基波电压; I_{11} 、 I_{12} 表示交流母线基波电流分量。

根据上述公式得到控制器的运行电流给定值,实现逆变侧 MMC 的优化控制。

3.3 均衡电压

系统能量改变会影响 MMC 电压值,在增加大量 MMC 子模块后,会出现不同程度的损耗,使子模块之间的电压值频繁波动,不再以相等的数值出现,这些波动幅度极大的电压值影响系统稳定运行,为此,结合文献[10]提出的均衡控制策略,在监测子模块运行常态电压、各个单元运行电压等级、桥臂电流实时传输方向的前提下,设计一个能量均分控制器^[11-13]。假设控制器实时获取 MMC 的 a 相子模块电容电压,结合构建的 LCC 数学模型输出平均电压值和环流值,通过该控制器进行能量均分,公式为

$$Q = Z_1(I - I') + Z_2 \int (I - I') dt \quad (9)$$

式中: Q 表示电容电压能量均分调制量; Z_1 、 Z_2 表示不同位置节点处与子模块对应的控制器; I' 表示 a 相环流参考值。

比较子模块电容电压的实际测量值和参考值,根据电流在不同桥臂上的传输方向,判定参数 Q 的极性,当平均电压值 $\leq Q$ 时,说明系统处于充电状态,此时,利用 LCC 模型的 12 脉动高控制性通过触发角控制运行状态下的系统电压和功率,从 LCC-MMC 系统直流侧直接充电,减少中间电流转接过程,有利于电压的均衡稳定,进一步降低故障率;当平均电压值 $> Q$ 时,说明电容能量过剩引发放电现象,影响直流侧供电。根据 MMC 数学模型,设置 a 相子模块的初始电压为 $\frac{V}{20} - \frac{U}{10}$,所以在不考虑相间环流的条件下,得出最终的调制波:

$$Q' = Q + Q_1 + Q_2 \quad (10)$$

式中: Q_1 、 Q_2 表示桥臂电压平衡均量和调制量。

利用 MMC 消除稳态误差,对混合直流输电系统进行强约束。通过 LCC 数学模型控制平均电压值和环流值,降低系统能量损耗,从而避免电压值频繁波动,保障系统的稳定运行,同时从直流侧直接充电,减少中间电流转接过程,有利于电压的稳定。利用 MMC 数学模型计算调制波,通过调制波调节供电量,实现最终的均衡电压^[14-15]。

4 应用测试

4.1 试验准备

通过表 1 所示的参数,搭建仿真测试模型。

表 1 系统仿真参数

参数名称	LCC	MMC-1	MMC-2
交流侧额定电压/kV	545	545	545
直流额定电压/kV	340	340	340
容量/MW	960	600	600
桥臂电抗/mH	-	65	65
子模块电容/ μ F	-	28 000	28 000

仿真试验共进行 4 轮,第 1 轮仿真整流站交流故障、第 2 轮仿真逆变站交流故障、第 3 轮和第 4 轮分别仿真直流线路单极故障、极间故障。将本文方法与常规方法(基于双树复小波变换的控制方法^[4])进行对比,测试不同控制方法对不同系统故障的处理效果。

4.2 结果与分析

4.2.1 整流站交流故障控制效果

第 1 轮测试。在系统的整流站交流侧仿真 a 相发生接地故障,要求接地电阻和故障持续时间不小于 9.5Ω 和 1.5 s 。分别利用本文方法和常规方法控制系统混合直流输电,得到的仿真波形如图 2 所示。

已知从第 2.5 s 开始,LCC 的 a 相电压开始跌落,触发角也随之改变,最小值仅为 4.8° 。图 2 中,曲线 a 代表本文方法、曲线 b 代表常规控制方法,比较 2 组方法控制下的 LCC 直流电压和 MMC 直流电压,发现本文方法控制后的电压在 5 s 内逐渐稳定,系统的直流功率在出现短暂的波动后明显提高,5 s 过后恢复到故障之前的状态。常规控制方法,同样在第 2.5 s 时发现了故障,但在 2.5~5 s 之间,触发角没有被重新调整到初始值,

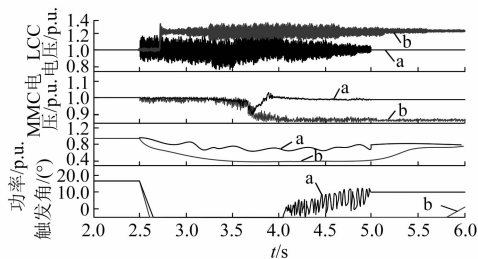


图2 不同方法对整流站交流故障的控制效果

所以 LCC 和 MMC 直流电压一直处于不稳定的状态,导致系统功率一直处于波动较大的状态当中,直至第 6 s 也没有恢复到稳定状态,说明常规方法的控制效果不够理想。

4.2.2 逆变站交流故障控制效果

第 2 轮测试。设置 MMC-1 的 ab 相间发生接地故障问题,要求电阻和故障持续时间不小于 $16\ \Omega$ 和 800 ms。分别利用 2 组方法控制系统输电,得到的测试结果如图 3 所示。

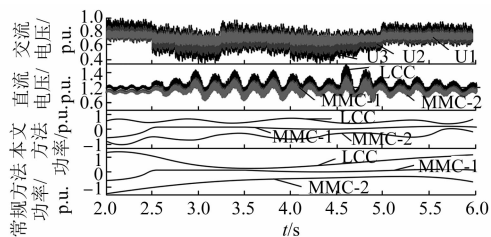
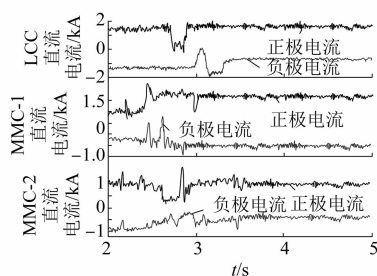


图3 不同方法对逆变站交流故障的控制效果

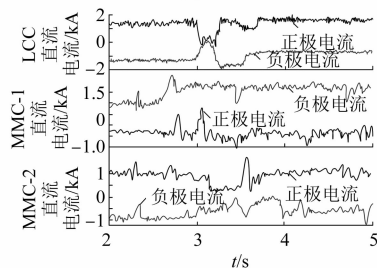
已知交流电压和直流电压均从第 2 s 开始剧烈波动,造成逆变站中的 MMC-1 传输功率持续降低。当系统输入能量和输出能量之间存在不平衡问题时,会出现电压异常的情况,此时需要将多余的能量传输到 MMC-2 当中,通过均衡控制系统电压,保证功率维持稳定状态。根据 2 种方法的控制测试效果可知,本文方法控制下的系统,其输入能量和输出能量实现了互补均衡,但常规控制方法没能在 6 s 之内均衡输入能量和输出能量。本文方法对于逆变站交流故障问题,有更可靠的控制效果,能够快速解决逆变站交流故障问题。

4.2.3 直流线路单极故障控制效果

第 3 轮测试。设置 MMC-1 和 MMC-2 之间的直流线路突发正极接地故障,要求电阻和故障持续时间不少于 $12\ \Omega$ 和 800 ms。分别利用 2 种方法控制系统运行,得到的结果如图 4 所示。



(a) 本文方法



(b) 常规方法

图4 不同方法对直流线路单极故障的控制效果

根据图 4 显示的测试结果可知,面对直流线路单极故障问题,本文方法在 5 s 内快速反应,将 LCC 和 MMC 的电流控制在稳定的区间内,而常规方法在同样的测试时间内,没能更有效地控制 LCC 和 MMC 的电流,继续下去会影响混合直流输电,最终影响电力负荷配置。

4.2.4 直流线路极间故障控制效果

第 4 轮测试。设置 LCC 和 MMC-2 之间的直流线路突发极间故障,要求电阻和故障持续时间不小于 $15\ \Omega$ 和 800 ms。测试结果如图 5 所示。

根据图 5 显示的测试结果可知,同样的测试条件下,本文方法对 3 组电流的控制均有较好的效果,常规控制方法对 MMC-2 直流电流的控制效果不佳,说明此次研究的方法更满足应用要求。

5 结 语

为了更快地解决混合直流输电系统故障问题,提出了基于 LCC-MMC 的混合直流输电系统优化控制方法。结合 LCC 和 MMC 两个换流器,应用正常运行状态下的 LCC 数学模型与 MMC 数学模型,结合逆变侧 MMC 的锁相环、坐标变换、瞬时功率计算、内环电流外环功率控制以及触发脉冲生成等模块,优化了混合直流输电系统的运行,试验结果表明,应用本文方法可以在较短时间将 LCC 和 MMC 的电流控制在稳定的区间内,

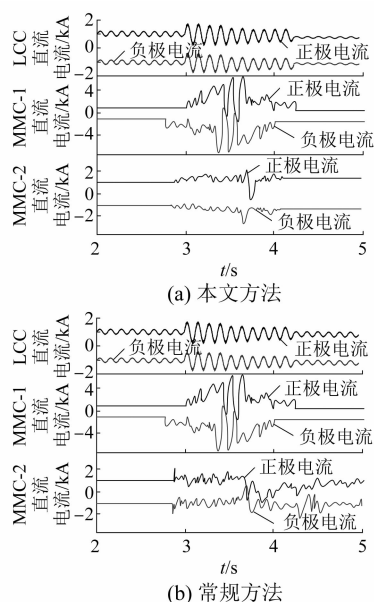


图5 不同方法对直流线路极间故障的控制效果

能够实现混合直流输电系统优化控制,快速解决输电系统故障。

但是本次研究尚未说明 MMC 相间环流抑制过程和效果,系统可能出现小干扰失稳现象,今后将针对 MMC 相间环流抑制的相关问题展开研究,设置合理的控制参数,为稳定系统运行态势,提供更加可靠的控制技术。

【参考文献】

- [1] 俞翔,王杨正,张庆武,等. 特高压并联型三端混合直流输电系统功率转带策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(23): 150.
- [2] 夏冰,李耀华,李子欣,等. 基于 PWM-CSC 的混合直流输电系统电网故障穿越策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(11): 120.
- [3] 郭春义,殷子寒,王焯,等. LCC-MMC 型混合直流输电系统小干扰稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4): 1040.

- [4] 陈争光,周泽昕,王兴国,等. 基于双树复小波变换的混合直流输电线路行波保护方法[J]. 电网技术,2019,43(10): 3832.
- [5] ZHUO Z Y, ZHANG N, YANG J W, et al. Transmission expansion planning test system for AC/DC hybrid grid with high variable renewable energy penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(4): 2597.
- [6] VERBELEN F, LHOMME W, VINOT E, et al. Comparison of an optimized electrical variable transmission with the Toyota hybrid system [J]. Applied Energy,2020,278(15): 115616.
- [7] 李探,尹诗媛,姚志,等. 构建虚拟桥臂数学模型的 MMC 阀损耗快速计算方法研究[J]. 电网技术,2019,43(12): 4509.
- [8] 杨硕,郑安然,彭意,等. 混合级联型直流输电系统直流故障特性及恢复控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(9): 166.
- [9] 周剑桥,王晗,张建文,等. 基于波动功率传递的 MMC 型固态变压器子模块电容优化方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12): 3990.
- [10] 高锋阳,强国栋,高云波,等. 基于变基准值比较的 MMC 电容电压优化均衡控制策略[J]. 中国电力,2019,52(8): 26.
- [11] 李晓栋,徐政,胡四全,等. 3 种混合直流输电系统的交流故障特性对比[J]. 电力自动化设备,2019,39(9): 22.
- [12] 何梦雪. 混合直流输电系统的控制保护技术研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [13] 张谢平,宁雪姣. 混合直流输电系统控制策略分析与研究[J]. 电力勘测设计,2019(12): 33.
- [14] 郝亮亮,詹清清,陈争光,等. LCC-MMC 型混合直流送端交流系统故障时直流电流的暂态过程解析[J]. 电力自动化设备,2019,39(9): 220.
- [15] 王燕宁,郭春义,郑安然,等. 极弱受端交流系统下 LCC-MMC 型混合直流输电系统的附加频率-电压阻尼控制[J]. 电工技术学报,2020,35(7): 1509.