

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.01.023

柔性直流输电用干式直流电容器工况验证试验回路研制

盖斌¹, 贾华¹, 张腾¹, 徐子萌¹, 吴云翼², 易承乾³, 陈炎¹, 张波³

(1.西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077; 2.中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101199; 3.清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 干式直流电容器作为柔性直流输电换流阀的核心组件, 尚未开展阀组级工况试验验证。通过对目前实验室条件下换流阀组件运行情况的调研, 确定采用被试阀段与陪试阀段对拖运行的拓扑, 以满足验证试验回路构建的要求。通过仿真分析和系统试验, 证明在满足经济性和实用性要求下, 正常工作时回路各阀段至少需要5个子模块串联。考虑到该试验回路需要针对不同型号规格的电容器开展运行试验, 叠层母排采用了特殊的设计, 方便参数测量和电容器更换。
关键词: 柔性直流输电; 直流电容器; 工况验证试验回路; 子模块; 仿真; 输出电压波形; 阀段间电流波形

Research on the Operating Conditions Verification Platform of DC-link Capacitor for Flexible HVDC Transmission

GAI Bin¹, JIA Hua¹, ZHANG Teng¹, XU Zimeng¹, WU Yunyi², YI Chengqian³,
CHEN Yan¹, ZHANG Bo³

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. CTG Science and Technology Research Institute, Beijing 101199, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As the core component of flexible HVDC transmission converter valves, DC-link capacitors have not yet been tested and verified in valve section operating conditions. Through research on the operation of the converter valve components under current laboratory conditions, it has been determined that the circuit topology of towing operation mode between the test valve section and the accompanying valve section can meet the requirements of constructing the verification test circuit. Through simulation analysis and system testing, it is proved that at least 5 sub modular need to be connected in series for each valve section of the circuit to verify the normal operation, while meeting the requirements of economy and practicality. Considering that the test circuit needs to conduct operational tests on capacitors of different models and specifications, the stacked busbar adopts a special design to facilitate parameter measurement and capacitor replacement.

Keywords: flexible HVDC transmission; DC-link capacitor; operating conditions verification test circuit; sub modular; simulation; waveform of output voltage; waveform of current between valve sections

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 未来中国的能源将以水电、风电及光伏等可再生能源为主, 特高压直流输电及柔性直流电网已成为解决可再生能源接纳和远距离大范围电能输送、构建以新能源为主体的

新型电力系统的有效技术手段^[1-7]。采用电压源换流器(voltage sourced converter, VSC)的柔性直流输电系统, 具有独立、精确、灵活方便的有功功率和无功功率调节能力和调节特性, 非常适合新能源发电并网、城市供电、岛屿供电等领域^[8-15]。

作为 VSC 结构中应用最为广泛的模块化多电平

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2401505)。

电压源换流器(modular multi-level converter, MMC), 需要给每个子模块(sub modular, SM, 也称为功率模块)配置直流电容器,以支撑和稳定换流阀组子模块的电压,抑制直流侧的纹波,缓冲交流侧与直流侧的能量交换^[16-20]。MMC子模块结构示意图见图1,子模块由2个绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)开关器件 T_1 、 T_2 和与之反并联的二极管 D_1 、 D_2 以及1个直流电容器 C_0 构成^[21-25]。

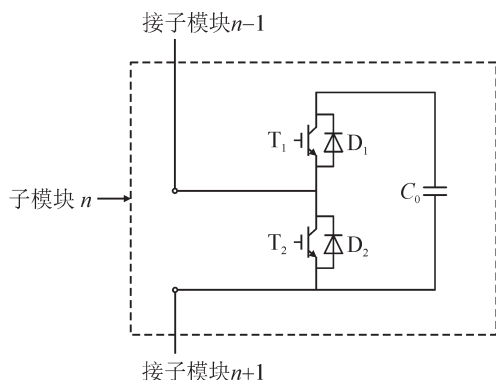


图1 MMC子模块结构示意图
Fig. 1 Schematic structure of MMC submodular

柔性直流输电用直流电容器的单台电压通常采用2 200 VDC或2 800 VDC电压等级,单台容量7~10 mF,最大可达13 mF,单台重量超过100 kg。出于安全性考虑,此类电容器一般采用无油化设计,介质材料为金属化聚丙烯薄膜、填充树脂类固体材料。据测算,柔性直流输电工程中直流电容器占据换流阀组件60%的重量和50%以上的体积。

干式直流电容器作为柔性直流输电换流阀的核心组件之一,其性能直接影响电能变换的质量与安全。然而,由于与国外水平存在明显差距,我国已建设工程应用的干式直流电容器基本被国外企业垄断。发展高端电容器及其薄膜介质材料入选《科技日报》发布的35项“卡脖子”关键技术问题之一^[26]。

国内柔性直流输电用干式直流电容器虽起步较晚,但近几年研发投入明显加大。目前行业已有近20家企业针对工程项目研制出了相应的产品,部分已实现小批量挂网试运行。

值得注意的是,目前国内外均缺乏柔性直流输电用干式直流电容器的专用标准,此类产品的测试标准主要为GB/T 17702—2021《电力电子电容器》,此标准等同采用IEC 61071:2017^[27-28]。然而,相较于常规的电力电子电容器,干式直流电容器工作耐受电压高、运行电流大,需要承受极高电流变化率(di/dt)的特点,在GB/T 17702规定的试验项目中还不能全面得到考核。

另外,目前在试验室条件下,干式直流电容器

尚未开展过阀组级工况的试验验证,难以研究其作为组件与换流阀子模块整体运行时状态和存在的问题。因此,建立换流阀组级工况的干式直流电容器试验回路,开展换流阀组件运行工况下电容器的性能测试,对于验证干式直流电容器的可靠性,研究系统性试验技术,乃至相关标准的制定都是非常必要的。

1 试验回路拓扑分析

理想状态下,干式直流电容器换流阀组级工况试验回路如果采用和柔性直流输电工程相同的换流阀组件运行回路设计,可以完全体现电容器真实的运行情况。然而,这样设计带来的占地和造价,从经济性和实用性角度讲缺乏可操作性。

通过调研发现,目前在实验室条件下开展的换流阀组件试验回路,基本采用多个功率模块串联、两组阀段对拖的方式。

文献[29]采用被试阀段和陪试阀段各6个功率模块串联的试验回路,针对MMC阀段运行试验中功率模块数不对等情况下的旁路试验,通过数学模型分析试验回路电压电流参数,提出了功率模块数不对等条件下的阀段运行试验方法,利用PSIM仿真软件对该试验方法进行验证并建立试验平台对所提出试验方法进行了实际应用验证。

文献[30]采用两组各8个功率模块串联的试验回路,对MMC换流阀运行试验装置电路拓扑做出改进,根据相关原理设计了阀组电流及子模块电容电压控制算法,并在PSCAD软件中搭建模型对电路及控制算法进行仿真验证。

文献[31]基于现有柔性直流换流阀对冲试验方法,采用两组各8个功率模块串联的试验回路,提出无需额外充电回路的柔性直流功率变换单元和模块化多电平换流器(MMC)阀段对冲试验电路拓扑,设计采用直流补能电源进行电容预充电的策略以及增设补能回路二极管降低电流峰值的方法,实现功率变换单元和MMC阀段传输交直流功率能力的有效检验,并利用搭建的PLECS电磁暂态仿真试验,证明了所提的试验方法的正确性和有效性。

综合上述的调研信息,项目组提出了类似的试验回路拓扑,见图2,SM_n表示第n个子模块。

干式直流电容器换流阀组级工况验证试验回路拟采用两组各n个子模块串联的对拖运行回路,回路由被试阀段、陪试阀段、负载电感以及补能电源构成。运行时,首先由电源向陪试阀段电容充电,待陪试阀段电容电压到达额定值时,通过陪试阀段向被试阀段脉冲式充电,使被试阀段电容电压

阶梯式抬升。待被试阀段电容电压到达额定值时,将全部功率模块解锁,陪试阀段与被试阀段按照各自的调制波运行。运行时,补能电源系统通过陪试阀段的其中一个模块对整个系统补能,两个阀段在功率交换过程中依靠回路电流及均压方式保持子模块电容电压的均衡。

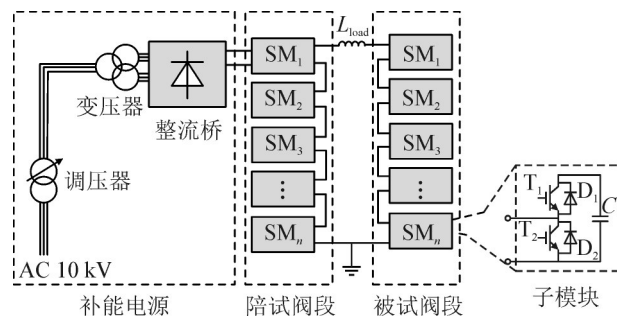


图2 工况验证试验回路拓扑

Fig. 2 Topology of operating conditions verification test circuit

2 子模块串联数量选择

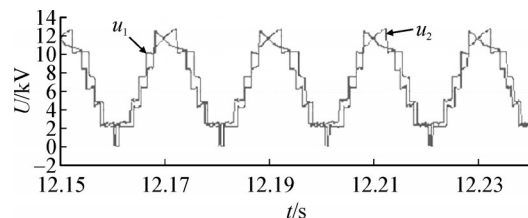
如前所述,对拖回路中子模块串联数量受经济性和实用性两方面因素的制约。串联数量过多会导致验证平台建设成本显著增加,经济性变差;而串联数量过少则有可能使得子模块工作状态不稳定甚至无法正常运行。

依据文献报道,6个及以上子模块串联的试验回路均能正常运行^[29-31],笔者尝试再减少1~2个串联数,分别选择5个功率模块串联和4个功率模块串联两种情况用PSCAD软件进行仿真计算,分析被试阀段中模块的开关信号、电压和电流波形,以确定运行回路中子模块的最优串联数量。

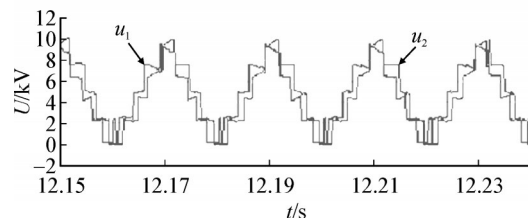
仿真分析的参数中,子模块电压额定值为2.3 kV,给定的桥臂电流峰值最大为2 kA,直流电容器的电容量为9 mF。

仿真波形见图3~5。各图中,(a)均表示5个子模块串联时的波形,(b)均表示4个子模块串联时的波形,仿真数据分析结果见表1。

仿真波形和数据分析显示,采用4个子模块串联的阀段电流峰值达到2.5 kA,超过了给定的桥臂电流峰值最大2 kA的要求,且波形畸变严重;采用5个模块子时阀段电流峰值基本保持在2 kA的水平,波形畸变相对较小。另外,阀段子模块稳态开关频率超过140 Hz,且分散性较大,明显高于5个模块串联阀段的稳态平均值120 Hz。将开关频率降低到合适的水平,有助于减小MMC的损耗,提高系统的运行特性^[32-33]。



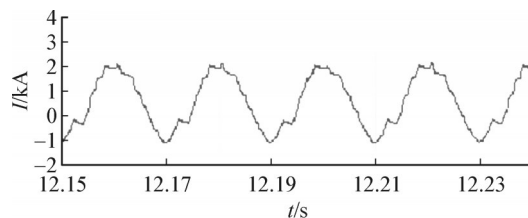
(a) 5个子模块串联



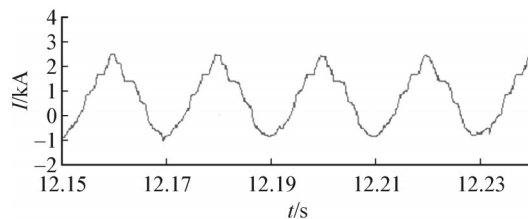
(b) 4个子模块串联

图3 阀段端间输出电压仿真波形

Fig. 3 Simulation waveform of output voltage between valve sections



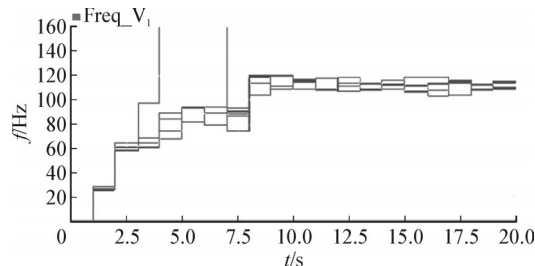
(a) 5个子模块串联



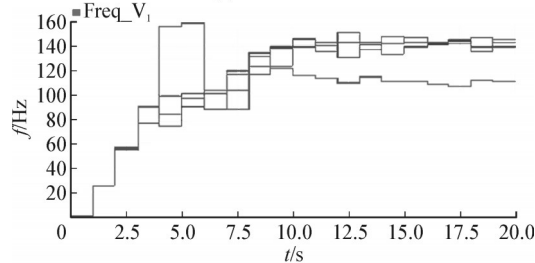
(b) 4个子模块串联

图4 阀段间电流仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform of current between valve sections



(a) 5个子模块串联



(b) 4个子模块串联

图5 被试阀段稳态开关频率

Fig. 5 Steady-state switching frequency of test valve section

综上,为保证干式直流电容器换流阀组级工况验证试验回路的正常工作,至少需要两组各5个子模块串联的阀段,也是本项目最终选择的子模块串联数。

表1 不同数量子模块串联的仿真结果

Table 1 Simulation result of different numbers of sub modular connected in series

参数	5模块串联	4模块串联	参考波形
段间输出电压/kV	0~12	0~10 kV	图3
实际峰值/kA	2	2.5	图4
电流畸变情况	较小	严重	
开关频率/Hz	120	>140	图5

3 子模块及主要部件技术参数

组成子模块的部件包括 IGBT、反向并联二极管、IGBT 驱动器、快速旁路开关、高位取能电源、功率模块控制板(power module controller,PMC)、直流电容器、均压电阻、叠层母排、IGBT 驱动到控制板光纤以及内部电气连接接线,水冷板及连接水管等。子模块及主要部件的详细技术参数见表 2,三维结构模型见图 6。

表2 子模块及主要部件技术参数

Table 2 Technical parameters of sub modular and main components

名称	指标	技术参数
子模块	额定直流运行电压/V	2 100
	额定交流电流/A	≥1 200
	电压波动	<±10%,偏差<1%
	开关频率/Hz	≥100
IGBT	工作电压/V	≥2 260
	标称电流/A	3 000,电流裕度≥1.5 倍
反向并联二极管	反向阻断电压/V	4 500
	标称电流/A	4 600
直流电容器	额定电压/V	2 800
	电容量/mF	9
	杂散电感/nH	<65
	额定电压/V	3 600
旁路开关	额定电流/A	1 600
	主触点响应时间/ms	<5,无弹跳
	辅助触点响应时间/ms	<10

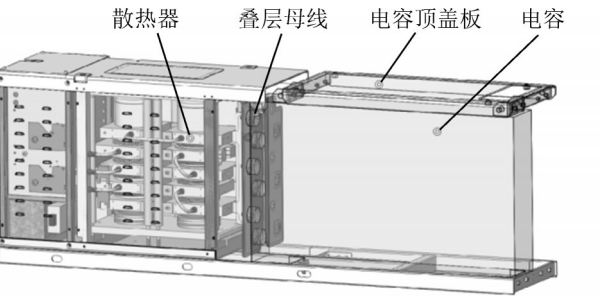


图6 子模块三维结构模型

Fig. 6 3D structural model of sub modular

考虑到该验证平台需要针对不同型号规格的柔性直流输电用直流电容器开展运行试验,子模块与电容器端子连接用叠层母排采用了较为特殊的设计,在保证固有电感满足要求的前提下,将叠层母排的形状由常规的“1”或“Z”形改为“C”型。这种叠层母排留出的空间方便端子拆装操作,易于布置传感器进行电压、电流等参数的测量。另外,电容器的端子的数量和结构也不受限制,换装电容器时仅需同时更换适配的叠层母排,提高了工作效率。

4 试验回路的安装和运行

试验回路的两个阀段由5个子模块级联而成,支撑框架同时预留2个空位,便于后期扩展。其他的附属部件包括连接母排、绝缘子、绝缘梁、水管及光缆槽等,其三维结构模型见图7。

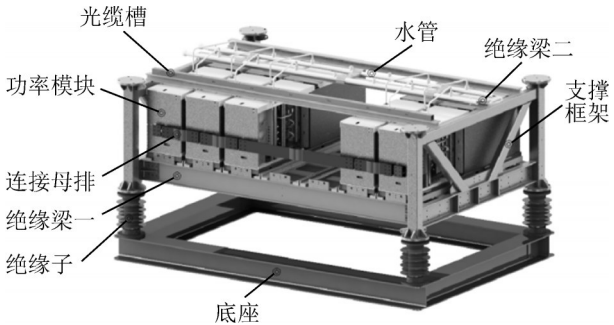


图7 阀段三维结构模型

Fig. 7 3D structural model of valve section

已在生产厂家安装完成的阀段在试验室就位后,整体安装工作并不复杂,主要是两个阀段之间、阀段与负载电抗器之间的母排连接,两个阀段与高压充电柜之间、陪试阀段的一个子模块与补能电源之间的电气连接,以及冷却水回路的连接。

上述安装工作结束并检查确认后,进行带电调试。阀段从较低电压逐步加至额定电压,之后升值1.1倍额定电压的过负荷状态并运行10 s。

为验证和比较之前仿真分析5个子模块串联和4个子模块串联时验证平台的工作情况,调试时除记录阀段正常运行的电压电流波形外,特意将两个阀段中的各一个子模块闭锁,记录阀段间的电压和阀段上的电流。图8和图9分别对应5个子模块串联和4个子模块串联时波形,其中上面的曲线为电流波形,下面的曲线为电压波形。

对比图8和图3(a)、图4(a)的波形可以看出,5个子模块串联时实际运行的电压和电流波形与仿真结果较为接近,波形整体平滑稳定,没有明显的异常出现。然而,对比图9和图3(b)、图4(b)的波形则会发现,4个子模块串联时的波形与仿真结果

差异较大,实际运行时电流波形在峰值位置存在明显的抖动,电压波形也有较大的波动。这一差异初步分析是由于子模块串联数较少,虽然仿真分析理论上阀段可以正常换流,波形虽有畸变但相对稳定;而实际运行时,因开关过于频繁,换流阀难以建立起稳定的工作状态,不但导致电流波形畸变严重,而且出现电压波形抖动的情况。问题的具体原因将在之后的工作中加以研究。

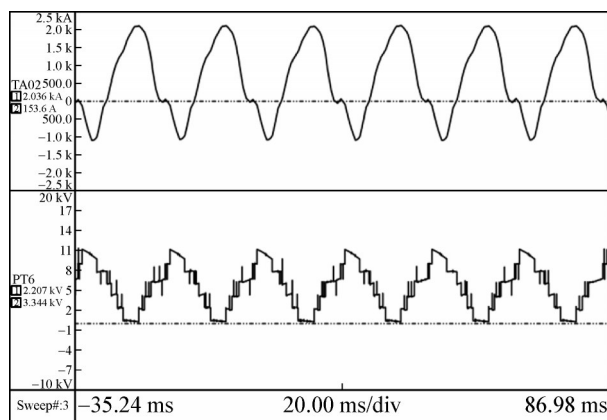


图8 5个子模块串联时阀段工作波形

Fig. 8 Working waveform of valve section of sub modular connected in 5 series

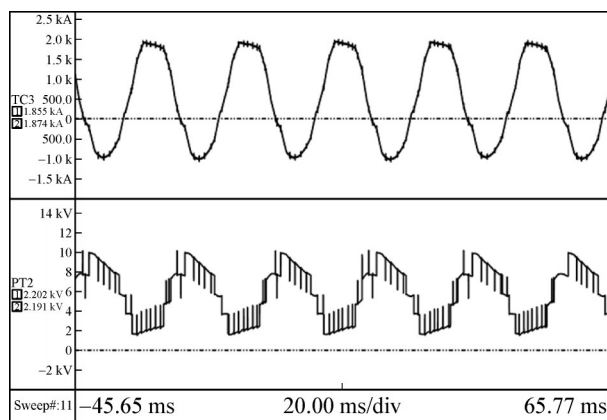


图9 4个子模块串联时阀段工作波形

Fig. 9 Working waveform of valve section of sub modular connected in 4 series

后续,笔者将用不同厂家生产的产品替换被试阀段中的5台干式直流电容器,按照阀段电流峰值2 kA的水平连续运行一定的时间,并通过电压、电流、温度、振动等传感器或测量设备实时监测电容器的运行状态。运行试验结束后,测量对比试验前后电容器电容值、介电损耗、泄漏电流、局部放电等数据的变化,分析上述监测参数对电容器性能的影响。

5 结语

1)采用陪试阀段与被试阀段对拖运行的拓扑,

可以满足柔性直流输电用干式直流电容器阀组级工况试验回路构建的要求。

2)在满足经济性和实用性要求下,为保证工况验证试验回路的正常工作,对拖回路的各阀段至少需要5个子模块串联。

3)考虑到该试验回路需要针对不同型号规格的电容器开展运行试验研究,叠层母排采用了特殊的设计,方便参数测量和电容器更换。

参考文献

- [1] 杨建明,张庆武,王杨正,等. 特高压直流输电线路电压突变量保护优化[J]. 电力工程技术,2022,41(3):102-109.
YANG Jianming, ZHANG Qingwu, WANG Yangzheng, et al. Optimization of voltage differential protection for UHVDC transmission line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 102-109.
- [2] 黄冬冬,李江涛,何双,等. 用于特高压换流变压器宽频特性测量的脉冲发生器设计[J]. 高压电器,2022,58(7):191-198.
HUANG Dongdong, LI Jiangtao, HE Shuang, et al. Design of pulse generator for measurement of broadband characteristics of UHV converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 191-198.
- [3] 吴晓刚,唐家俊,吴新华,等. “双碳”目标下虚拟电厂关键技术与建设现状[J]. 浙江电力,2022,41(10):64-71.
WU Xiaogang, TANG Jiajun, WU Xinhua, et al. Key technologies and present situation of virtual power plant under dual-carbon goals[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(10): 64-71.
- [4] 李发永,刘光辉,于海宁,等. 低频加热装置在特高压产品现场安装及检修中的应用[J]. 变压器,2023,60(5):71-75.
LI Fayong, LIU Guanghui, YU Haining, et al. Application of low frequency heating device in field installation and maintenance of UHV products[J]. Transformer, 2023, 60(5): 71-75.
- [5] 刘刚,汤亮亮,徐霞,等. 特高压直接地极土壤电阻率测量方法研究[J]. 电瓷避雷器,2023(4):77-83.
LIU Gang, TANG Liangliang, XU Xia, et al. Soil resistivity measurement method of UHVDC grounding electrode[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4): 77-83.
- [6] 吴继岩,张怀垠,马鑫,等. 双碳量约束下主动配电网网架规划方法设计[J]. 电网与清洁能源,2022,38(4):117-123.
WU Jiyang, ZHANG Huaiyin, MA Xin, et al. Design of active distribution network planning method under double carbon constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 117-123.
- [7] 严伟,郑毅,张广泰,等. 特高压换流站可控消能装置均压环优化设计[J]. 电瓷避雷器,2023(4):205-212.
YAN Wei, ZHENG Yi, ZHANG Guangtai, et al. Optimization for grading rings of UHVDC controllable energy ab-

- sorption device[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4): 205-212.
- [8] 杨晓雷, 韩中杰, 叶琳, 等. 考虑 VSC-HVDC 作用的 LCC-HVDC 系统短路比实用计算[J]. 浙江电力, 2023, 42(1): 31-38.
- YANG Xiaolei, HAN Zhongjie, YE Lin, et al. Practical calculation of SCR of LCC-HVDC considering the role of VSC-HVDC[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1): 31-38.
- [9] 周小光, 资慧, 金田, 等. 双碳目标下电网异址双活调控中心负载均衡控制方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 107-115.
- ZHOU Xiaoguang, ZI Hui, JIN Tian, et al. Load balancing control method for remote active-active control centers of power grid with carbon peak and neutrality targets[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 107-115.
- [10] 唐文虎, 林泽康, 辛妍丽, 等. 基于 RF-BiLSTM 的柔直阀冷入阀水温预测及冷却能力评估[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 102-111.
- TANG Wenhui, LIN Zekang, XIN Yanli, et al. Prediction of valve inlet water temperature and cooling evaluation of VSC-HVDC convert valve cooling system based on random forest and bi-directional long short-term memory[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 102-111.
- [11] 辛锐, 姜丹, 郑焕坤, 等. 基于双碳目标的大数据能源调度博弈管理算法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 55-65.
- XIN Rui, JIANG Dan, ZHENG Huankun, et al. Research on big data energy dispatching game management algorithm based on double carbon goals[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 55-65.
- [12] 唐溢, 李保宏, 曾蕊, 等. 柔性直流对交流系统短路电流影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 40-47.
- TANG Yi, LI Baohong, ZENG Rui, et al. Influence of VSC-HVDC on short-circuit current of AC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 40-47.
- [13] 蒋正威, 周自强, 吉斌, 等. 基于区块链的调控运行关键技术研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(1): 110-117.
- JIANG Zhengwei, ZHOU Ziqiang, JI Bin, et al. Research on key technologies for regulation and operation based on blockchain[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(1): 110-117.
- [14] 王柯, 卢宇, 董云龙, 等. 柔直系统适时切换的故障穿越方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 83-90.
- WANG Ke, LU Yu, DONG Yunlong, et al. A timely switch fault ride-through method for VSC-HVDC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 83-90.
- [15] 刘峰, 舒恺, 钱凯, 等. 直流微网 DC/DC 变换器的虚拟直流电机控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 31-39.
- LIU Feng, SHU Kai, QIAN Kai, et al. Research on control strategy of virtual dc machines for DC/DC converter in DC microgrid [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 31-39.
- [16] 王磊, 万磊, 殷幼军, 等. ± 500 kV 混合直流受端 VSC 换流站的雷电侵入波过电压研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 82-89.
- WANG Lei, WAN Lei, YIN Youjun, et al. Overvoltage of lightning intruding waves of ± 500 kV VSC converter station in hybrid HVDC system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 82-89.
- [17] 唐振, 谷应科, 曾祥君, 等. ± 800 kV 特高压换流变异常产气故障分析及处理[J]. 变压器, 2023, 60(6): 54-58.
- TANG Zhen, GU Yingke, ZENG Xiangjun, et al. Analysis and treatment of abnormal gas production fault in ± 800 kV UHV converter transformer[J]. Transformer, 2023, 60(6): 54-58.
- [18] 矫真, 王兆军, 李骁, 等. 新能源汽车充电桩浪涌侵入波防护分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 103-106.
- JIAO Zhen, WANG Zhaojun, LI Xiao, et al. Lightning surge protection for the new energy vehicle charging station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 103-106.
- [19] 段昊, 程林, 罗传仙, 等. 特高压换流变压器局放传输特性仿真研究[J]. 变压器, 2023, 60(7): 45-50.
- DUAN Hao, CHENG Lin, LUO Chuanxian, et al. Simulation study on partial discharge transmission characteristics of UHV converter transformer[J]. Transformer, 2023, 60(7): 45-50.
- [20] 梁利辉, 赵志刚, 闫敏, 等. 榆横-潍坊 1 000 kV 特高压交流输电线路检修接地方案研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 36-43.
- LIANG Lihui, ZHAO Zhigang, YAN Min, et al. Research on grounding scheme of 1 000 kV UHV AC transmission line in yuheng-weifang during maintenance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 36-43.

作者简介:

盖斌(1988—),男,高级工程师,主要从事电力电容器及成套装置的检测和试验研究工作。

贾华(1975—),男,正高级工程师,主要从事电容器的设计、工艺、试验研究和行业管理工作。

张腾(1985—),男,高级工程师,主要从事电力电子产品的检测和试验研究工作。

徐子萌(1987—),男,高级工程师,主要从事电力电子产品的检测和试验研究工作。

吴云翼(1980—),男,正高级工程师,主要研究方向为储能系统与控制。

易承乾(1996—),男,博士研究生,主要从事高电压与绝缘、多物理场仿真等技术研究。

陈炎(1998—),男,助理工程师,主要从事电力电容器产品检测和试验研究工作。

张波(1976—),男,教授,主要从事高电压工程数值计算、智能电网电磁环境和电磁兼容、输变电装备智能检测和数字孪生技术研究。