

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.01.007

直流支撑电容器电容介损测量方法研究

雷晓燕, 曹刚, 肖梁乐, 陈淑娇, 鲁洪吉

(中国电力科学研究有限公司, 武汉 430074)

摘要: 柔性直流换流阀用直流支撑电容器一般为多端子结构, 运行过程中电流较大, 现阶段参考传统双端子结构高压电力电容器的测量接线方式进行电容介损测量。柔性直流支撑电容器的电容量和损耗角正切值的准确评估, 直接影响着运行性能、安全可靠评估等方面。本文就现有电容介损测量中的一些问题进行分析, 提出更合理的测量建议。认为在开展大容量多端子电容器的电容介损时, 应采用多股铜线接线方式, 该结论对指导准确测量多端子电容器的电容介质损耗具有重要意义。

关键词: 直流支撑电容器; 电容测量; 介损测量; 接线方式; 测量方法

Influence of Ambient Temperature and Applied Voltage on the Temperature Rise and Temperature Distribution of Self-healing Power Capacitor

LEI Xiaoyan, CAO Gang, XIAO Liangle, CHEN Shujiao, LU Hongji

(China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: DC-link capacitors for VSC-HVDC converter valve is of generally multi-terminal structure, and has high current in operation. Currently, capacitance and $\tan \delta$ measurements for the capacitors are often performed by referring to the measurement connection methods used for traditional high-voltage power capacitors with two terminal structure. The accurate assessment of the capacitance and tangent of the loss angle ($\tan \delta$) of VSC-HVDC-link capacitors directly impacts such aspects as operational performance and safety reliability assessment. In this paper some issues in existing capacitance and $\tan \delta$ measurement methods are analyzed and more rational measurement recommendations are proposed. It is thought that in the development the capacitance and $\tan \delta$ of high power multiple terminal capacitor, the multi strand copper wire mode shall be adopted. The conclusion plays an important role in guiding accurate measurement of capacitance and $\tan \delta$ of multi-terminal capacitors.

Keywords: DC-link capacitor; capacitance measurement; $\tan \delta$ measurement; connection methods; measurement method

0 引言

直流支撑电容器作为柔性直流换流阀装备中的核心器件, 主要应用在柔性直流输电系统直流侧整流桥臂中, 作为储能元件, 起到电压支撑、谐波滤除等作用。特别是在高压大功率应用场景中, 如柔性直流输电、新能源发电并网、工业变频驱动等领域, 直流支撑电容器需要承受极高的电流应力和热应力。为了满足大电流通流能力的需求, 该类电容器通常采用多端子结构, 其正负极性两端往往各自设有多个并联的引出端子^[1-5]。

电容值(C)和介质损耗角正切值($\tan \delta$)是表征

直流支撑电容器性能的两个关键参数。电容量的稳定性直接关系到直流母线的电压纹波值和系统的动态响应特性; 而 $\tan \delta$ 则主要反映了电容器介质的功率损耗, 是衡量其绝缘性能和发热状况的重要指标。在国产化进程中^[6-7], 由于缺乏成熟的经验, 准确测量电容量和损耗角正切成为保障设备安全运行的前提。电容量的偏差可能影响配平并导致纹波电流异常波动, 而损耗角正切则综合反映了介质极化、漏导及金属接触电阻等损耗因素, 其大小直接影响电容器的温升特性与寿命。通过精确测量可有效识别工艺缺陷(如喷金接触不良或金属膜方阻异常等), 优化结构设计(如边缘加厚金属膜与低

方阻材料选择),从而为工程应用提供准确可靠的数据,确保电容器在复杂工况下长期稳定运行^[8-10]。

目前,对于此类多端子直流支撑电容器的电容和介损测量,行业内普遍参考或沿用传统两端子高压电力电容器的测量方法^[11]。该标准方法主要针对两端子或电流相对较小的电容器。然而,直流支撑电容器的多端子结构导致了其内部电流分布的复杂性,引线和端子本身存在的寄生电感和电阻会对测量结果产生不可忽视的影响^[11-20]。若简单地将其视为一个带多股引线分流的两端子元件进行测量,会因为测量接线方式、端子选择的不同,导致较大的测量误差,特别是对于介质损耗,从而无法真实反映电容器的真实参数,甚至可能掩盖产品潜在的缺陷或性能劣化^[21-25]。

鉴于此,针对柔性直流换流阀用直流支撑电容器的特殊结构,现有产品标准 NB/T 11388—2023《柔性直流输电换流阀用直流支撑电容器》^[15]和 DL/T 2633—2023《柔性直流换流器用直流电容器技术导则》^[16]中也未涉及对具体测量方法的要求。系统分析现有测量方法的适用性与局限性,探索能够准确评估其整体电容和介损的测量接线方案,具有重要的理论意义和工程价值。

本文旨在分析不同测量接线方式对测量结果的影响,通过理论分析与试验验证,探讨适用于多端子直流支撑电容器的准确、可靠的电容与介损测量方法,为产品的设计、性能验证及状态评估提供准确的数据支撑。

1 柔性直流支撑电容器结构特点

与常规两端子电容器不同,柔性直流换流阀用直流支撑电容器为满足近千安培级大电流通流能力、低等效串联电感(equivalent series inductance, ESL)和低等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)的要求,普遍采用多端子并联结构设计^[17]。这种独特的结构是其电气特性和后续测量方法分析的基础。

典型结构的直流支撑电容器如图1所示。其正、负极性两侧通常各自有4个或4个以上的接线端子,为控制流经单个端子的电流,通常端子数量随着电容的容值而增大。这些端子并非简单地连接至一个统一的电极板上,而是通过内部集成的多组并联电容元件实现电气连接。具体而言,电容器内部由数十至数百个独立的金属化膜电容元件通过串并联方式组成,原则是除正常大电流电容器连接要求外,还要求使等效串联电感和等效串联电阻尽可

能小。这些电容单元被均匀地连接到各个端子上,如图2所示,以确保电流在电容器内部能够均匀分布,从而承受极高的瞬时电流和连续纹波电流^[1,4]。

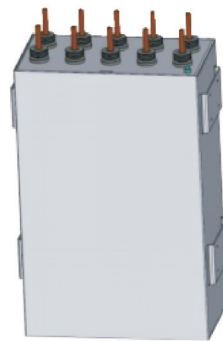


图1 典型结构的直流支撑电容器
Fig. 1 DC-link capacitor with typical structure

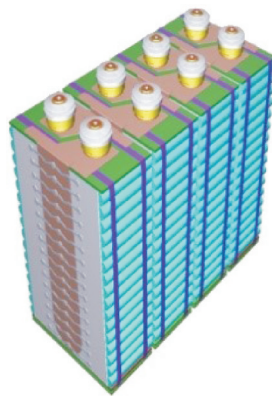


图2 直流支撑电容器内部结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the internal structure of DC-link capacitor

这种多端子结构在优化通流能力和降低寄生参数的同时,也带来了测量上的特殊性。当进行电量(C)和介质损耗因数($\tan\delta$)测量时,测量接线方式(即测量信号从哪对端子注入和引出)将直接决定被测回路所覆盖的内部电容单元范围以及所包含的寄生参数(如端子与内部汇流条的接触电阻与分布电感)。若测量方法选择不当,仅连接部分端子进行测量,则无法准确反映电容器整体的性能,从而导致测量结果出现偏差^[17-20]。

2 电容器的电容和介损测量方法

目前,在工程实践与标准检测中,基于高压电桥的电流比较原理是测量高压电容器容性参数最经典、应用最广泛的方法。

2.1 常用测量原理

现阶段常用的测量方法,其原理是电流矢量比较法。该方法的原理接线图如图3所示。图中: U

表示高压交流电源; C_n 表示高压标准电容器; C_x 表示被试电容器; CT 表示量程扩展器(高精度电流互感器); R_2 表示测量引线引入的等效电阻。

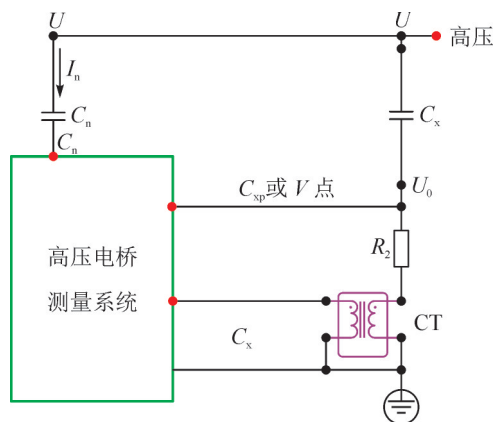


图3 高压电桥测量电容介损原理图
Fig. 3 Schematic diagram of capacitance and $\tan\delta$ measurement using a high-voltage bridge arm

其基本工作原理是:在施加高压电源 U 的情况下,标准电容器 C_n 与被试电容器 C_x 中分别流过电流 I_n 和 I_x 。由于 C_x 的介质存在损耗,其电流 I_x 将超前电源电压 U 一个略小于 90° 的角度($90^\circ - \delta$),其中 δ 即为介质损耗角。测量系统通过高精度电流互感器 CT 的采样,将这两个电流信号引入高压电桥测量系统中进行矢量比较,通过一定算法计算出被试品的电容值 C_x 和介质损耗角正切 $\tan\delta$ 。电容值 C_x :主要通过比较电流幅值获得, $C_x \propto (I_x/U) \approx (I_x/I_n) C_n$ 。介质损耗角正切 $\tan\delta$:以并联模型为例,主要通过检测 I_x 与其纯容性分量之间的夹角 δ 的正切值获得, $\tan\delta \approx (I_R/I_C)$,其中 I_R 为损耗电流分量, I_C 为电容电流分量。此方法通过将待测的 C_x 与已知的精密标准 C_n 进行对比,有效保证了测量的准确度。

2.2 测量中的关键点和影响因素

在图3所示的测量回路中,各元件的作用与影响至关重要。高压标准电容器 C_n :作为测量的基准,其电容值稳定、介损极低,其精度直接决定整个系统的精度。量程扩展器(高精度电流互感器):不仅实现了高压侧电流信号到低压侧测量回路的安全隔离,还通过变比扩展了仪器的测量量程。

从图3可见,实际测量中,不可避免的在试品 C_x 低压端至高压电桥间,测量引线会引入等效电阻 R_2 。此引线电阻会串联在测量回路中,当测量大容量电容器时,较大的测试电流会在此电阻上产生可观的正比于电流平方的电压降 U_0 。即 C_x 两端的电压是 $U - U_0$;而 C_n 两端的电压是 U ,显然标准电容两

端施加的电压与被试电容器两端施加的电压不同,这也是引起附加介损的原因(引线电阻引起的介损)。所以被测电容量 C_x 较大时,笔者引入低压端补偿电路以消除引线误差,如图3中 C_{sp} 端(有些测量系统也叫 V 点,下文分析中,统一称为 C_{sp} 端)与 C_n 低压端之间的电路。具体做法是在高压电桥测量系统内部设置补偿线路,以保证标准电容两端施加的电压与被试电容器两端施加的电压等效相同,此时测出的被试电容器的损耗值更接近真值,附加的引线误差被消除。

3 不同接线方式对柔性直流支撑电容器的电容介损测量结果影响

以8端子直流支撑电容器为例,现阶段通常采用图4所示的铜牌接线方式,引出2个电极,采用第2章的测量方法进行电容介损测量。实际测量过程中,笔者发现在不改变试品两端子以外的任何回路的情况下,仅调整标准电容器高压端与试品高压端之间引线夹或试品低压端与电桥的补偿端 C_{sp} 之间引线夹在铜排上的位置,测量结果会明显不同,测量结果见图5和图6。



图4 铜牌接线方式
Fig. 4 Wiring mode of copper busbar

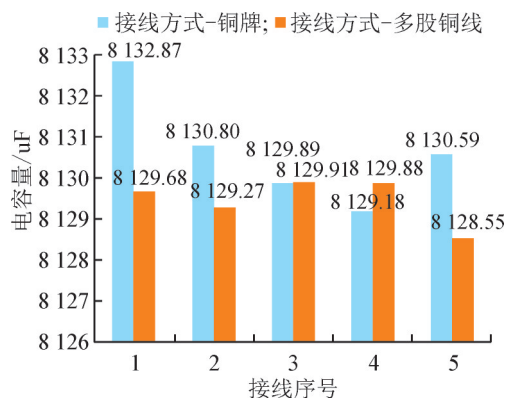


图5 不同接线方式下的电容量实测结果
Fig. 5 Capacitance measurement results under different wiring modes

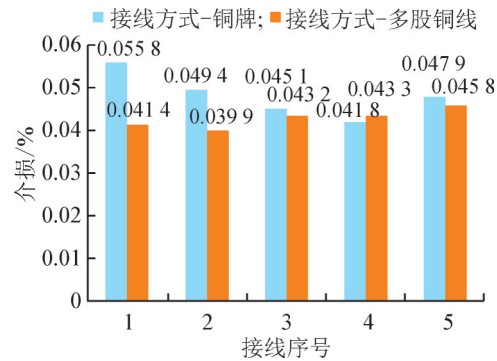


图6 不同接线方式下的介损实测结果
Fig. 6 Tanδ measurement results under different wiring modes

随着这一发现,笔者提出图7所示的多股铜线接线方式。将两种接线方式下,分别改变标准电容器高压端与试品高压端之间引线夹或试品低压端与电桥的补偿端 C_{sp} 之间引线夹在铜排上和在多股铜线的不同位置,如表1中显示的不同接线方式示意图。

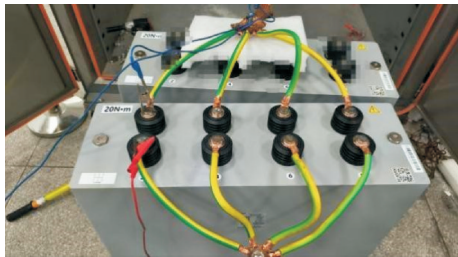


图7 多股铜线接线方式
Fig. 7 Stranded copper wiring mode

表1 不同接线方式实物图表
Table 1 Physical diagrams of different wiring modes

接线序号	1	2	3	4	5
接线方式-铜排					
接线方式-多股铜线					

为了便于分析,将表1中的10种不同接线方式用表2中的简化代号进行区分。

表2 不同接线方式简化代号
Table 2 Simplified codes for different wiring modes

接线序号	1	2	3	4	5
接线方式-铜排	A-H	B-G	C-F	D-E	A-E
接线方式-多股铜线	a-e	b-f	c-g	d-h	d-e

3.1 不同接线方式下电容、介损测量结果及偏差

笔者选取产品参数为2.8 kV、8 000 μF的直流支撑电容器作为测试对象,按照现行产品标准

DL/T 2633—2023《柔性直流换流器用直流电容器技术导则》中的方法要求,在280 V的交流电压下进行电容、介损测量,对应表1和表2接线序号下的电容测量,结果见图6,电容量相对偏差见表3;介损测量结果见图7,介损相对偏差率见表4。

表3 不同接线方式下的电容量偏差
Table 3 Capacitance deviation under different wiring modes

接线方式	铜排	多股铜线
偏差率= $(C_{max}-C_{min})/C_{min}$	0.045 4	0.016 7

表4 不同接线方式下的介损偏差率
Table 4 Tanδ deviation rate under different wiring modes

接线方式	铜排	多股铜线
偏差率= $(\tan\delta_{max}-\tan\delta_{min})/\tan\delta_{min}$	33.49	14.79

3.2 铜牌接线方式对电容介损测量结果的影响分析

将图4所示的铜牌接线方式等效为图8所示的等效测量电路。

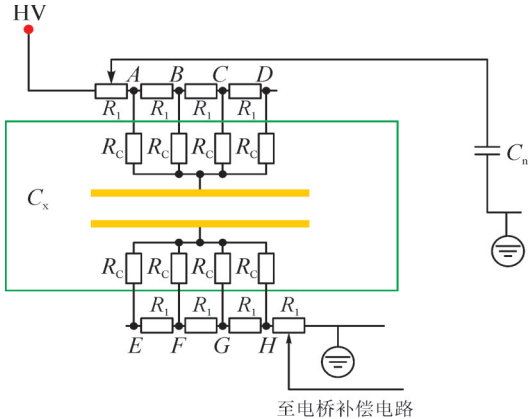


图8 铜牌接线方式下的等效测量电路
Fig. 8 Equivalent measurement circuit for the copper busbar wiring mode

当进行测试时,电流由高压的4个端子同时注入电容器,并在4个低压端子流出,但由于电容量很大(毫法级,容抗小),此时电容器内、外部的引线电阻是不可忽略的,如何获得被试电容器的真实介损,在测试过程中由电容器外部接线带来测量误差都应尽量消除。

以某常见高精度高压介损分析仪为例,如图8所示, R_l 表示电容器外部铜牌引入的等效电阻, R_c 表示电容器内部引线的等效电阻,实际测量的电容量和介损是从 C_n 的高压采样点到补偿取样点之间的电容及介损。假设分别从A、B、C、D这4个点上取电压加到标准电容器 C_n 上,这4个不同位置加到被试电容器上的电压是不同的,A、B、C、D依次是递

减的,在A点,则从A到D点的引线电阻被计入被试电容器,使测试结论中的介损偏大,而D点时,则有大部分的电容器内部的电阻未被计入被试电容器,导致实测的介损偏小。同理,对地消除引线补偿的引线分别加在H、G、F、E上,依次是由引线补偿不足到过度补偿。所以引到 C_n 上的高压线在A点、引到电桥补偿端的线接到H点,这时测得的损耗是最大的;引到 C_n 上的高压线在D点、引到电桥补偿端的线接到E点,这时测得的损耗是最小的。这两根测量引线在不同位置组合下测得的结果具有一定不确定性。有可能在某一组合位置刚好能测到相对准确结果,但具有一定随机性。所以这种接线方式下存在一定的测量误差。

3.3 多股铜线接线方式对电容介损测量结果的影响分析

将图7所示的多股铜线接线方式等效为图9所示的等效测量电路。

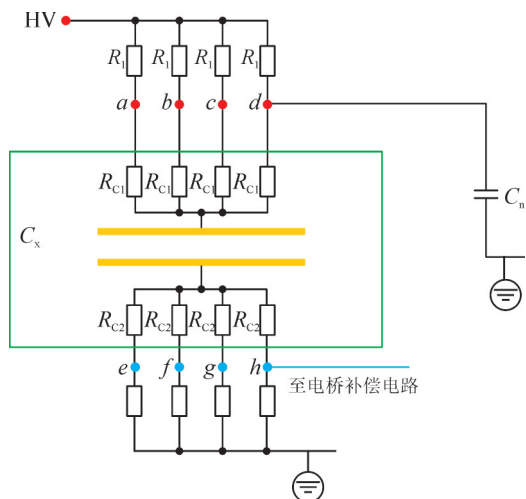


图9 多股铜线接线方式下的等效测量电路
Fig. 9 Equivalent measurement circuit for the wiring mode of stranded copper wires

如图9所示, R_1 、 R_2 表示电容器外部铜线引入的等效电阻, R_{Cl} 、 R_{Ch} 表示电容器内部引线的等效电阻,用4根等长的铜导线在高压线上取电,每段铜导线的电阻一致为 R_1 ,可以认为电容器内部各引线端子的电阻值相等为 R_{Cl} ,因此4个端子上的电流基本一致,各端子上的电压也基本一致,即a、b、c、d是等电位的,因此施加到标准电容器 C_n 上的高压可以在a、b、c、d上任意取。同理,用4根等长的电缆接到地线上,保证每段电缆的电阻一致 R_2 ,此时电容器内部各引线端子的电阻值也是一样为 R_{Ch} ,因此4个端子上的电流基本一致,各端子上的电压也基本一致,即e、f、g、h是等电位的,引到电桥补偿端的

线可以在e、f、g、h上任意取。综上所述,采用多股接线方式下的测量结果更准确,一致性好,与实际测量结果相符。

4 结语

通过对比不同测量接线方式下柔性直流支撑电容器的电容和介损测量结果,分析不同接线方式下测量结果产生偏差的原因,提出了更准确的测量方法,在开展大容量多端子电容器的电容介损时,应采用多股铜线接线方式,该结论对指导准确测量多端子电容器的电容介损具有重要作用。

参考文献

- [1] 贺满潮,魏玲艳,赵倩.换流阀用直流支撑电容器试验方法探讨[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(3):52-56.
HE Manchao, WEI Lingyan, ZHAO Qian. Discussion on test method of DC-link capacitor for converter valve[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 52-56.
- [2] 张国豪,李化,林福昌,等.金属化聚丙烯膜电容器自愈产气特性与保护技术[J].高压电器,2024,60(6):197-202.
ZHANG Guohao, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on self-healing gas generation characteristics and protection technology of metallized polypropylene film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 197-202.
- [3] 金龙峰.柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J].电力设备管理,2024(16):208-210.
JIN Longfeng. Research on DC support capacitor technology for VSC-HVDC transmission projects[J]. Electric Power Equipment Management, 2024(16): 208-210.
- [4] 党智敏.干式直流电容器全链条国产化关键技术探讨[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(1):1-14.
DANG Zhimin. Discussion on key technology for localization of full-chain of dry DC capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 1-14.
- [5] 黄云锴,储松潮,潘焱尧,等.柔性直流输电用电容器元件试制与试验分析[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(3):52-56,164.
HUANG Yunkai, CHU Songchao, PAN Yanyao, et al. Trial manufacture and test analysis of capacitor components for flexible DC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 52-56, 164.
- [6] 何晓靓,高琪,刘水平,等.大容量柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(4):81-85.
HE Xiaoliang, GAO Qi, LIU Shuiping, et al. Study on DC support capacitor technology for high power flexible DC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power

- Compensation, 2020, 41(4): 81-85.
- [7] 李维维,高琪,芦锋. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的开发探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(3): 95-98.
- LI Weiwei, GAO Qi, LU Feng. Discussion on the development of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 95-98.
- [8] 王振东. 金属化薄膜电容器损耗的工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [9] 陈才明. 金属化薄膜电容器损耗角正切的测量与评价[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1): 54-56.
- CHEN Caiming. Measurement and evaluation on $\tan\delta$ of metalized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1): 54-56.
- [10] 许然然. 柔性直流换流阀直流支撑电容器用聚丙烯薄膜绝缘失效及其抑制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [11] 郑琳子, 祝令瑜, 汲胜昌, 等. 柔性直流输电用金属化膜电容器多频介损在线获取方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 63-68.
- ZHENG Linzi, ZHU Lingyu, JI Shengchang, et al. Research on online acquisition method of multi-frequency dielectric loss for metallized film capacitors in VSC-HVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 63-68.
- [12] 邱昊, 高秀华, 邱林俊, 等. 直流支撑电容器工作温升特性研究及优化设计[J]. 电子元件与材料, 2023, 42(8): 969-974.
- QIU Hao, GAO Xiuhua, QIU Linjun, et al. Research and optimization on operating temperature rise of DC-link capacitor[J]. Electronic Components & Materials, 2023, 42(8): 969-974.
- [13] 孙明, 孙晓武, 李印达. 直流支撑电容器元件损耗角正切影响因素研究[J]. 电工电气, 2022(4): 53-57.
- SUN Ming, SUN Xiaowu, LI Yinda. Study on the factors affecting tangent of the loss angle of DC-link capacitor components[J]. Electrotechnics Electric (Jiangsu Electrical Apparatus), 2022(4): 53-57.
- [14] 标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器第1部分: 总则: GB/T 11024. 1—2019[S]. 2019.
- Shunt capacitors for AC power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General: GB/T 11024. 1—2019 [S]. 2019.
- [15] 柔性直流输电换流阀用直流支撑电容器: NB/T 11388—2023[S]. 2023.
- DC-link capacitors for VSC-HVDC converter valves: NB/T 11388—2023[S]. 2023.
- [16] 柔性直流换流器用直流电容器技术导则: DL/T 2633—2023[S]. 2023.
- Technical guide for DC capacitors of VSC-HVDC converters: DL/T 2633—2023[S]. 2023.
- [17] 盖斌, 陈炎, 赵晓军, 等. 直流支撑电容器杂散电感测量方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 77-82.
- GE Bin, CHEN Yan, ZHAO Xiaojun, et al. Study on stray inductance measurement method of DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 77-82.
- [18] 邓光昭, 黄葵, 王文宝. 直流支撑电容器交直流叠加试验回路搭建及参数选取探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 140-144.
- DENG Guangzhao, HUANG Kui, WANG Wenbao. Discussion on construction and parameter selection of AC/DC superimposed test circuit for DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 140-144.
- [19] 张伟涛. 金属化薄膜电容器电热耦合下温升特性研究及优化设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [20] 曹轩赫, 胡迪, 张楚岩, 等. 谐波环境下模块化多电平换流器子模块电容器的多场耦合分析及优化研究[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4367-4376.
- CAO Xuanhe, HU Di, ZHANG Chuyan, et al. Multifield coupling analysis and optimization research of modular multilevel converter submodular capacitors in harmonic environment[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4367-4376.
- [21] 张国豪, 李化, 黄子钦, 等. 交直流电压比例对金属化膜击穿特性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 55-60.
- ZHANG Guohao, LI Hua, HUANG Ziqin, et al. Study on the effect of AC/DC voltage ratio on breakdown characteristics of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 55-60.
- [22] 孙晓武, 李印达, 曹崇峰. 空气湿度对直流支撑电容器元件性能影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 51-56.
- SUN Xiaowu, LI Yinda, CAO Chongfeng. Study on the influence of air humidity on DC-link capacitor element[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 51-56.
- [23] 陈松, 李兆林. 电容器用金属化膜方阻及试验方法探讨[C]//陕西省电网节能与电能质量技术学会2018年学术交流会. 2018.
- [24] 安鸽, 张武. 柔性直流输电工程中用DC-Link电容器研究及应用[C]//陕西省电网节能与电能质量技术学会2017年学术交流会. 2017.
- [25] 余小木, 卢世明, 梁颖, 等. 柔性直流输电用大容量DC-LINK电容器关键技术问题探讨[C]//陕西省电网节能与

电能质量技术学会2015学术交流会2015.

作者简介:

雷晓燕(1985—),女,高级工程师,主要研究方向为电力电容器相关检测及科研。E-mail:leixiaoyan0415@163.com。

曹刚(1996—),男,工程师,主要研究方向为电力电容器相关检测及科研。

肖梁乐(1990—),女,高工,主要研究方向为电力电容器相关检测及科研。

陈淑娇(1998—),女,助工,主要研究方向为高压试验检测及科研。

鲁洪吉(1993—),男,大专,主要研究方向为电力电容器试验检测。

(上接第41页)

计算[J]. 变压器,2023,60(4):11-13.

NIU Qinglin, CAO Zhigang, WANG Zhongjie, et al. Calculation method of capacitance for dry-type smoothing reactor[J]. Transformer, 2023, 60(4): 11-13.

[32] 顾哲屹. 干式空心电抗器匝间绝缘材料老化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.

[33] 毛颖科, 张天枫, 朱正一, 等. ± 500 kV 直流换流阀用饱和电抗器温度场与电场仿真研究[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 128-135.

MAO Yingke, ZHANG Tianfeng, ZHU Zhengyi, et al. Simulation study on thermal and electric field of saturable reactor for ± 500 kV converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 128-135.

[34] 贾跟卯, 赵启承, 骆福权, 等. 直流换流站高通 HP3 型交流滤波器电抗器匝间故障监测及保护[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 136-143.

JIA Genmao, ZHAO Qicheng, LUO Fuquan, et al. Monitoring and protection on inter-turn short circuit fault for reactor of high pass 3rd-order AC filter in DC convert station[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 136-143.

作者简介:

任宝林(1994—),男,工程师,通信作者,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。

贺俊杰(1969—),男,高级工程师,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。

张建兴(1977—),男,高级工程师,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。

魏晓伟(1983—),男,高级工程师,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。

张潇(1993年—),男,工程师,主要从事超/特高压变电一次设备检修、故障分析诊断工作。E-mail: 15533266288@163.com。