

柔性直流输电换流阀用直流支撑电容器温升研究

李建涛, 宁小波, 王会超, 李少辉, 李天勇, 李明昊

(来恩伟业(鹤壁)电子科技有限责任公司, 河南 鹤壁 458030)

摘要: 温升性能对电容器至关重要, 温升的高低直接影响电容器的寿命。为了降低柔性直流输电换流阀用直流支撑电容器(简称柔直电容器)的温升, 研究了影响柔直电容器温升的因素及规律。通过对试验数据的分析, 得出影响电容器温升的因素繁多, 几乎涵盖了电容器的方方面面。降低柔直电容器温升应从多方面进行改进和优化, 材料方面, 建议选取低损耗的 PP 介质, 导体选用电阻率低的紫铜, 在保证极壳绝缘性能的前提下选择尽可能大导热系数的聚氨酯。设计方面, 建议金属化膜低方阻区宽度占薄膜总幅宽的 20%~30%为宜, 单个心子不宜过大, 控制其直径在 68~78 mm 为宜, 铜带电流密度建议选择 $\leq 1.5 \text{ A/mm}^2$ 。工艺方面, 建议卷绕间洁净度至少 10 000 级, 喷金气压选择应 0.3 MPa~0.4 MPa 之间为宜, 焊接建议采用恒温自动化焊接, 灌注建议采用真空度低于 100 Pa 的真空灌注为宜。试验方面, 尽量采取接近实际运行的状态进行试验, 以消除影响温升试验结果的干扰因素, 得到尽可能准确的试验结果。

关键词: 柔直电容器; 温升; 寿命; 电流密度; 材料; 工艺; 设计; 试验

Research on Temperature Rise Charactersitics of DC-link Capacitor for VSC-HVDC Converter Valve

LI Jiantao, NING Xiaobo, WANG Huichao, LI Shaohui, LI Tianyong, LI Minghao

(Lion Great Exploit(Hebi) Electronic Technology Co., Ltd., Henan Hebi 458030, China)

Abstract: Temperature rise performance is crucial for capacitors, as the level of temperature rise directly affects their service life. In order to reduce the temperature rise of DC-link capacitor for VSC-HVDC converter valves (referred to as VSC HVDC capacitor), the influencing factors and their regularities affecting the temperature rise of such capacitors are investigated. It is found through analysis of experimental data that numerous factors influence capacitor temperature rise, covering almost every aspect of the capacitors. To reduce the temperature rise of VSC HVDC capacitors, improvements and optimizations shall be carried out in multiple aspects. In terms of materials, it is recommended to select PP dielectric with low loss, choose copper with low resistivity for the conductors, and, on the premise of ensuring the insulation performance between the electrode and the case, select polyurethane with as high thermal conductivity as possible. In terms of design, it is recommended that the width of the low-sheet-resistance zone of the metallized film account for 20% to 30% of the total film width. The individual winding core shall not be excessively large, with its diameter being preferably controlled within the range of 68 to 78 mm. The current density of the copper strip is suggested to be no more than 1.5 A/mm^2 . In terms of processing, the cleanliness of the winding workshop shall be at least Class 10 000, the spraying pressure shall be controlled between 0.3 MPa and 0.4 MPa. The constant-temperature automated welding is recommended for soldering, and vacuum impregnation with a vacuum level below 100 Pa is preferred for the filling process. In terms of testing, the tests shall be conducted under conditions as close as possible to actual operating conditions, so as to eliminate interfering factors that may affect the temperature rise test results and to obtain the most accurate possible test results.

Keywords: VSC HVDC capacitors; temperature rise; life time; current density; material; process; design; testing

0 引言

柔性直流输电采用可关断功率半导体器件,基于电压源换流器原理,相比常规直流输电技术,具有谐波含量低、占地面积小、有功/无功独立控制、不依赖电网支撑等显著优点,是各国竞相发展的新一代直流输电技术^[1]。

柔性直流输电设备中有两大关键器件,IGBT和柔直电容器。这类电容器容量较大,达到毫法级;有效电流较大,单只达到数百安培甚至上千安培;寿命要求较长,达到三十甚至四十年^[2]。虽然在前期有工程应用,但研究并不深入。目前对于柔直电容器的关键性能研究集中在热性能、寿命、局放等几个方向,各电容厂家及高校课题组在每个方向都有不同程度的研究。笔者认为在电容器的众多性能中,热性能尤为重要^[3],它首先影响的是耐压能力,因为聚丙烯薄膜的耐压能力随着温度的升高会有一定程度的降低;其次它使介质加速老化^[4-6],影响电容器的寿命,因为温度影响聚丙烯材料的老化速度,老化使电容器的绝缘能力降低,进而表现为寿命缩短。

对电容器进行热仿真^[7]是进行热性能研究的一个普遍且便利的工具,仿真能够较快计算出电容器的温升、热点温度及位置等参数,辅助优化设计方案,但热仿真除了自身有不准确的特点需要根据试验结果修正以外,它对于工艺的波动性和材料的稳定性却无能为力。本文系笔者在柔直电容器的设计、制造、试验过程中对各种影响温升因素和影响规律进行的总结。

1 材料影响

1.1 主介质材料

常见的金属化薄膜材料有双向拉伸聚丙烯(BOPP)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚苯乙烯(PS)、聚碳酸酯(PC)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚苯硫醚(PPS)、聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)等,不同介质材料的性能对比见表1。

介质损耗是电介质单位时间内消耗的能量,即引起电介质发热的能量,因此在实际应用中选用低介质损耗的材料作为介质,能有效降低介质的发热^[7-8]。金属化的双向拉伸聚丙烯(BOPP)薄膜因其极低的介电损耗(0.02%)和高击穿场强(720 MV/m)^[9]成为目前工业化应用最广泛的电容器薄膜介质^[10]。柔直电容器工作电路中存在高达数百安有效电流,一般选用低介质损耗的介质材料。

表1 不同介质材料的性能对比表
Table 1 Performance comparison of different dielectric materials

材料名称	简称	介质损耗/%	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$
聚丙烯	PP	< 0.02	$10^{14} \sim 10^{16}$
聚四氟乙烯	PTFE	< 0.02	$10^{17} \sim 10^{20}$
聚苯乙烯	PS	0.03 ~ 0.04	$10^{17} \sim 10^{19}$
聚碳酸酯	PC	0.1 ~ 0.3	$10^{17} \sim 10^{20}$
聚对苯二甲酸乙二醇酯	PET	0.2 ~ 0.5	$10^{17} \sim 10^{20}$
聚苯硫醚	PPS	0.06	$10^{17} \sim 10^{19}$
聚萘二甲酸乙二醇酯	PEN	0.1 ~ 0.5	$10^{17} \sim 10^{20}$

1.2 导体材料

由于柔直电容器一般由多个元件并联组成,数量多达几十甚至上百,元件之间需要通过导线连接;其次,整个心组还要与端子连接引出,以方便安装;所以,心子之间的连接,以及心组和端子之间就需要用导体连接起来,从而形成整体的电容器单元。虽然通常导体材料电阻率均极低,但因为电容器心组复杂,所用导体组合起来构成的欧姆电阻也不可忽视。这部分发热也是整体发热中的一部分,所以选用电阻率低的导体材料也是柔直电容器降低温升的一项措施。

电力设备中的常用导体材料有铜、铝等。其中铜以 $0.0168 \mu\Omega \cdot \text{m}$ 的超低电阻率,以及适当的性价比成为柔直电容器导体材料的最佳选择。

1.3 填充材料

柔直电容器通常为干式结构,其内部填充材料为树脂。心子发热传递给树脂^[11],树脂通过热传导方式传递到外壳,然后外壳通过热辐射方式将热量散到环境中去。

那么作为热量传递过程中的重要一环,树脂的导热系数对温升影响也不容忽视。针对同一种设计的电容,采用不同导热系数的树脂进行温升的试验,得出不同导热系数树脂对温升的影响曲线见图1。

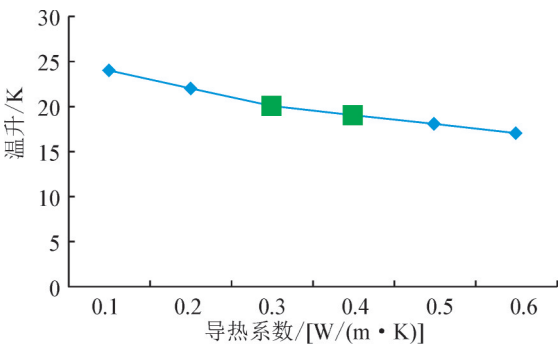


图1 不同导热系数树脂对温升的影响
Fig. 1 Influence of resin with different thermal conductivities on temperature rise

2 设计影响

2.1 薄膜方阻结构设计

金属化膜方阻设计对温升的影响表现在过流能力方面^[12]。过流能力强既可以表述为同等温升条件下通过的电流值大,也可以表述为同等电流条件下温升低。

方阻对于金属化薄膜电容器的过流能力和过压能力影响很大。方阻越大,自愈性能好,过压能力强,过流能力差;方阻越小,自愈性能差,过压能力差,过流能力强^[13]。柔直电容器不仅耐压要求高,场强达到230 V/ μm 以上,而且过流要求也高,单只电容数百甚至上千安。所以,在方阻设计上,既要考虑过压能力,又要考虑过流能力。阶梯式方阻膜,高方阻区域保留了其自愈性能,保证了耐压能力;低方阻区域加强了过流能力;两层薄膜叠层卷绕,其中一层高方阻对应的是另一层的低方阻区。此结构兼顾了耐压能力和耐流能力,使得柔直电容器的综合性能达到了一个契合点。那么低方阻区的宽度占幅宽的比例仍是一个需要确定的因素,经过试验对比,趋势见图2所示。

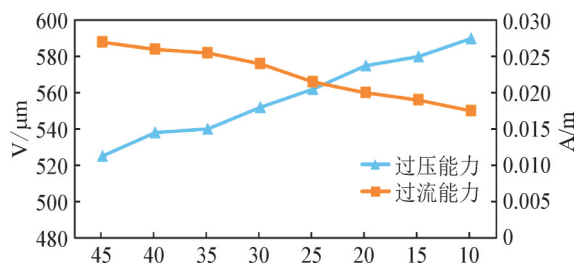


图2 低阻区占幅宽比例与耐压耐流能力关系图
Fig. 2 Relationship between the proportion of the low-resistance zone to the total film width and the voltage-withstanding and current-carrying capabilities

2.2 薄膜分切形式设计

薄膜的边缘分切形式有3种:直分切、加厚边波浪分切、留边波浪分切。波浪分切的目的是增大喷金层和薄膜边缘的接触面积,从而降低喷金层的接触电阻,提高过流能力,降低温升。其基本原理见图3~4所示。

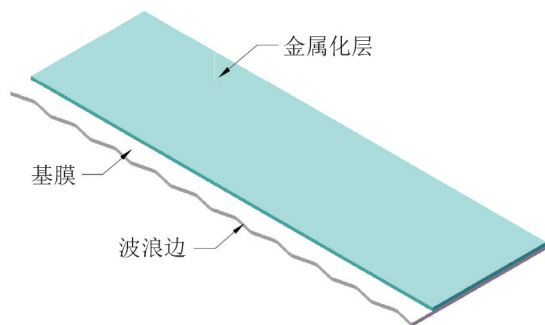


图3 波浪分切
Fig. 3 Wave-pattern slitting

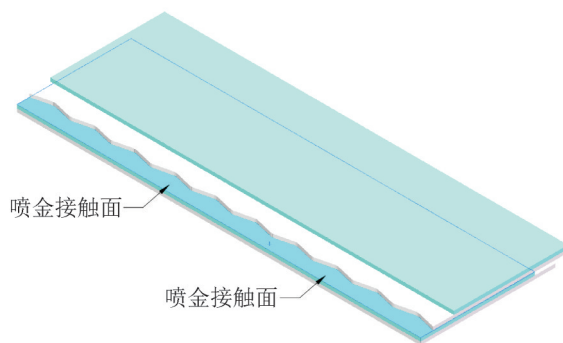


图4 波浪分切喷金面图
Fig. 4 Diagram of the metallization spraying surface with wave-pattern slitting.

通过试验对比,留边波浪分切膜所制成的电容器,其等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)值更小,温升更低,对比见图5所示。

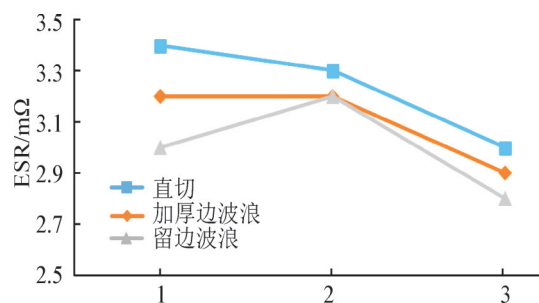


图5 不同分切形式电容器ESR值对比
Fig. 5 Comparison of ESR values of capacitors with different slitting patterns

2.3 电容器心子设计

由于柔直电容器电容量较大,达到毫法级别,甚至十几个毫法,所以电容器单元均是由多个心子组合而成,那么组合的可能性就有无数种。单个心子电容量大,总的心子数量就少;单个心子电容量小,总的心子数量就多。

单个心子容量大,其直径必然大,心子内部所产生的热量不易向外传导给填充料;另外因为心子数量少,单个心子分配的电流值就比较大,就需要采用横截面积更大的导线,不利于焊接,或者焊接接触电阻大,均不利于电容器的温升。相反,因为考虑工艺操作的便捷和效率,也不能设计过小容量的心子。举例,通过对相同规格(2.8 kV、5.5 mF)电容设计并76和并54两种不同心子形式,同等电流和环境温度条件下后者的温升高于前者2.1℃。

2.4 心组结构设计

聚丙烯的导热系数为0.283 W/(m·K)^[14],铝的导热系数为237 W/(m·K)^[15],相差将近1000倍,所以电容器心子在工作过程中所产生的热量更容易沿着镀层的方向向外传导。金属化薄膜电容器的心子

结构,以及基膜聚丙烯材质和镀层金属铝材质决定了其导热最快的方向是心子的径向方向,即指向喷金面。柔直电容器单元一般为矩形体,一定会有两个最大侧面,即最大散热面。将心子导热最快的方向与电容器的最大散热面垂直进行设计的话,在电容器内部传热速度最快,传热路径最短,外部散热面积最大,故散热效率最高。不同心组结构对温升的影响见图6所示。

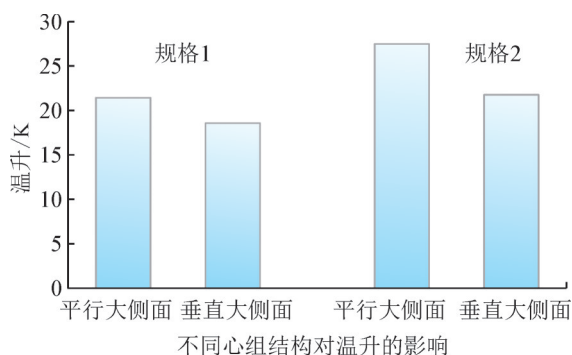


图6 不同心组结构对温升的影响
Fig. 6 Influence of various core structures on temperature rise

2.5 铜带连接方式设计

铜带作为电容器的连接导体,其自身电阻也是构成整体电容器等效串联电阻的一部分,而等效串联电阻是电容器发热的直接因素,所以降低这部分电阻也是降低电容器温升的一项措施。设计不同的铜带对心子进行连接,目的是寻找降低导体部分电阻的最佳方案。通过试验的方法,采用不同电流密度的铜带设计,对温升的影响规律如图7所示。

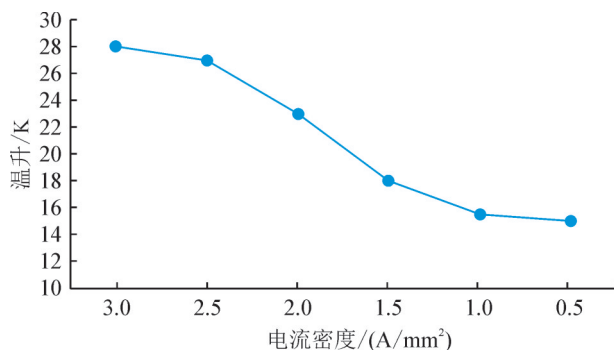


图7 不同电流密度对温升的影响
Fig. 7 Influence of various current densities on temperature rise

3 工艺影响

3.1 卷绕工艺

柔直电容器发热产生的原因其中之一是电场中存在杂质,由此产生了损耗,表现为ESR值增大,

从而发热就会大,相同条件下温升就会高。

对于金属化电容器来说,避免电场中存在杂质,除了要求原材料薄膜保持洁净以外,还有在卷绕工艺过程中进行,应保持卷绕间的洁净度。一般金属化膜电容器的卷绕间洁净度要求达到10 000级。

3.2 喷金工艺

喷金工艺对温升的影响主要表现在喷金层与薄膜之间的接触电阻的大小,此部分也是构成整体电容器ESR的一部分。喷金工艺的好坏决定了喷金层与薄膜之间结合程度的好坏,进而影响接触电阻的大小,在金属化电容器上表现为心子的损耗角正切值和ESR值。常规影响喷金质量好坏的因素有气压、风速、枪距等,均属于设备参数。

3.3 焊接工艺

焊接工艺对温升的影响主要表现在焊点接触电阻的大小,此部分也是构成整体电容器ESR的一部分。类似于喷金工艺,焊接工艺的好坏决定了引线的心子之间连接程度的好坏,影响接触电阻的大小,表现为心组的损耗角正切值和ESR值。而影响焊接质量好坏的因素有焊接温度、时间。如果采取人工焊接,此项工艺比较依赖于焊接操作工的熟练程度,是众多工艺中比较难以控制的一环。但如果采用设备自动化焊接,例如激光焊接,则能够很好保证焊点的质量,以及焊点的一致性。

3.4 灌注工艺

灌注工艺对温升的影响主要体现在散热方面。电容器内部心组 and 外壳之间除了有绝缘膜以外,还需注入灌注料对心组、绝缘膜进行固定,也对心组起密封保护作用。灌注料是将心组所产生的热传递到外壳,然后再散到环境中的重要媒介。灌注工艺控制良好,则传热模式稳定;若控制不好,会有残留气泡滞留在灌封料中,气体的导热系数远低于灌封料,那么从心组到外壳之间就不仅有树脂、绝缘膜,还有气体介质,传热模式变得复杂,传热效率降低。

3.5 外表处理工艺

在电容器运行过程中,当自身温度高于环境温度时,就会将自身的热量传递到环境当中,此时影响热量传递效率的因素就是外壳表面的发射率,它代表电容器将自身热量向外散发的本领,发射率越大向外散热就越快,越容易,温升就会越低。

抛光的不锈钢表面发射率仅有0.04,而氧化后其表面发射率达到0.86以上^[10];而油漆的本身表面

发射率则更高,达到 0.95 以上。目前电容器的外表处理工艺有拉丝抛光、喷砂、氧化、喷漆等,拉丝抛光和喷砂仅对不锈钢的表面进行了处理,未增加别的物质,就改变了表面发射率;氧化和喷漆则是将不锈钢表面增加了一种物质而改变了电容器的表面发射率。对不同外观处理方式的产品进行实际试验对比,结果见图 8-9 所示。

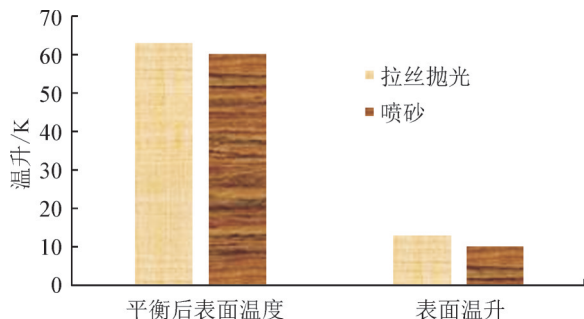


图8 拉丝抛光和喷砂对温升的影响
(被试品电容量 2.1 mF, 试验电流 385 A)

Fig. 8 Influence of wire drawing, polishing and sand blasting on temperature rise (Capacitance of test sample: 2.1 mF, test current: 385 A)

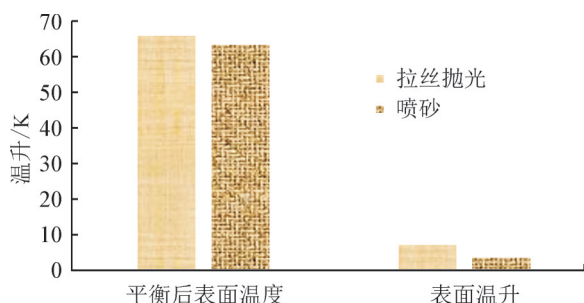


图9 拉丝抛光和喷漆对温升的影响
(被试品电容量 9 mF, 试验电流 825 A)

Fig. 9 Influence of wire drawing, polishing and painting on temperature rise (Capacitance of test sample: 9 mF, test current: 825 A)

4 试验方法对温升试验结果的影响

4.1 电源纹波频率

目前标准中对电源种类并未硬性规定,仅规定了 $1.21P_{\max}^{[17]}$ 。早期试验时由于没有专门针对柔直电容器的国家标准或者行标,所以参照了 GB/T 17702 中的方法,采用的多为单工频交流,即对于电容器仅加工频交流,使得电流达到 $1.1I_{\max}$ 即可。目前采用较多的是直流叠加工频交流,即先将电容器加上 $1.1U_{\text{NDC}}$ 母线直流电压,然后叠加工频纹波,使得电流达到 $1.1I_{\max}$ 。笔者试验了直流叠加高频交流的方法,即直流电压叠加高频(500 Hz)的方法,发现纹波频率对于温升影响明显,高频下温升明显升高。如图 10 所示。

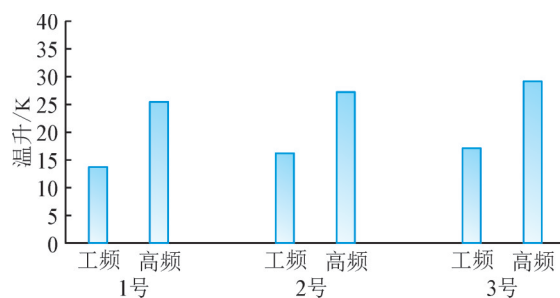


图10 纹波频率对温升的影响

Fig. 10 Influence of ripple frequency on temperature rise

4.2 试品间距

柔直电容器温升试验采用 3 台电容器单元同时进行试验,并按换流阀实际安装方式摆放电容器试品,电容器单元之间的距离根据在功率模块中的距离确定,其中旁边两台为陪试电容器。

对同一组柔直电容器进行了相同试验温度、相同电流、相同频率、相同母线电压,不同间距条件下的温升试验,结果见图 11 所示。

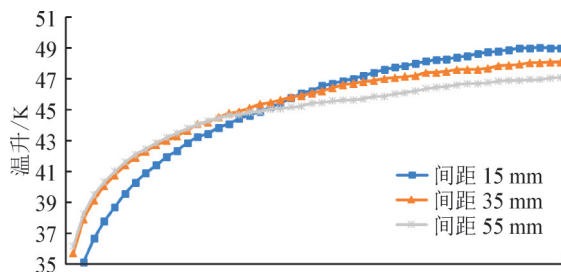


图11 试品间距对温升的影响

Fig. 11 Influence of sample spacing on temperature rise

5 结语

通过对上述各试验数据的分析,得出结论:影响电容器温升的因素繁多,几乎涵盖了电容器的方方面面。材料、设计、工艺均对电容器温升有相应影响,如果要想达到低温升的目的,应从多个方面进行改进和优化。

1)材料方面:建议选取低损耗的 PP 介质,导体选用电阻率低的紫铜,在保证极壳绝缘性能的前提下选择尽可能大导热系数的聚氨酯。

2)设计方面:建议金属化膜低方阻区宽度占薄膜总幅宽的 20%~30%为宜;单个心子不宜过大,控制其直径在 68~78 mm 为宜;铜带电流密度建议选择 $\leq 1.5 \text{ A/mm}^2$ 。

3)工艺方面:建议卷绕间洁净度至少 10 000 级;喷金气压选择应 0.3 MPa~0.4 MPa 之间为宜;焊接建议采用恒温自动化焊接;灌注建议采用真空度低于 100 Pa 的真空灌注为宜。

4)试验方面:建议试验人员尽量采取接近实际运行的状态进行试验,以消除影响温升试验结果的干扰因素,得到尽可能准确的试验结果。

参考文献

- [1] 饶宏. 柔性直流输电[M]. 北京:科学出版社,2022.
- [2] 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.
- [3] 沈文琪. 电力电容器箱壳的相对尺寸对其温升的影响[J]. 电力电容器与无功补偿,2005,28(4):32-33.
SHEN Wenqi. The influence of the relative dimension of the tank of power capacitor on its temperature rise[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2005, 28(4):32-33.
- [4] 杜伯学,冉昭玉,刘浩梁,等. 干式直流电容器聚丙烯薄膜绝缘性能及其改进方法研究进展[J]. 电工技术学报,2023,38(5):1363-1374.
DU Baixue, RAN Zhaoyu, LIU Haoliang, et al. Research progress of dielectric properties and improvement methods of polypropylene film for dry-type capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5):1363-1374.
- [5] 刘泳斌,曹均正,黄金魁,等. 金属化膜电容器可靠性研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(1):53-58.
LIU Yongbin, CAO Junzheng, HUANG Jinkui, et al. Study development on the reliability of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1):53-58.
- [6] 严飞,李化,陈伟,等. 金属化安全膜结构设计方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4):7-11.
YAN Fei, LI Hua, CHEN Wei, et al. Study on structure design method of metallized safety film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):7-11.
- [7] 岳国华,杜志叶,孟圣淳,等. 基于电热耦合的干式直流电容器温升分布不均匀特性分析及优化[J]. 高电压技术,2022,48(12):4915-4924.
YUE Guohua, DU Zhiye, MENG Shengchun, et al. Analysis and optimization of non-uniform temperature rise distribution of dry-type DC capacitor based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12):4915-4924.
- [8] 金维芳. 电介质物理学[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [9] NASH J L. Biaxially oriented polypropylene film in power Capacitors[J]. Polymer Engineering & Science, 1988, 28(13):862-870.
- [10] HO J, JOW T R. High field conduction in biaxially oriented polypropylene at elevated temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3):990-995.
- [11] 陈耀红. 高储能密度金属化膜电容器应用性能及其影响因素研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [12] 陈温良. 金属化电力电容器的热计算问题[J]. 电力电容器,2003(z1):53-57.
CHEN Wenliang. Thermal calculation of metallized power capacitor[J]. Power Capacitor, 2003(z1):53-57.
- [13] 李化,章妙,林福昌,等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J]. 电工技术学报,2012,27(9):218-223.
LI Hua, ZHANG Miao, LIN Fuchang, et al. Study on theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9):218-223.
- [14] 麦堪成,蔡泽伟. Al_2O_3 /聚丙烯复合材料的导热性能研究[J]. 塑料,2006,35(3):30-33.
MAI Kancheng, CAI Zewei. Thermal conductivities of Alumina filled polypropylene composites[J]. Plastics, 2006, 35(3):30-33.
- [15] 郑峰. 常用金属材料手册[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [16] 胡轶嵩,姜葳,罗发,等. 高温氧化对304不锈钢红外发射率影响研究[J]. 西北工业大学学报,2020,38(1):225-229.
HU Yisong, JIANG Wei, LUO Fa, et al. Effect of high temperature oxidation on infrared irradiation of stainless steel 304[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(1):225-229.
- [17] 柔性直流输电换流阀用直流电容器:NB/T 11388—2023[S]. 2023.
DC-link capacitors of converter valves for high-voltage direct current power transmission using voltage sourced converters:NB/T 11388—2023[S]. 2023.

作者简介:

李建涛(1980—),男,高级工程师,主要从事薄膜电容器设计、试验、制造、品控等方面的工作。E-mail:lijiantao@lnwyhb.com。