

直流支撑电容器圆元件的散热模型与仿真研究

左强林¹, 雷乔舒¹, 钟少龙², 张涌新², 党智敏²

(1. 无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177;

2. 清华大学电机系新型电力系统运行与控制全国重点实验室, 北京 100084)

摘要: 随着自愈干式金属化薄膜电容器应用范围的不断扩展,其散热方式与内部温升问题成为了重要的理论与工程问题。鉴于此,本文基于直流支撑电容器圆元件的发热规律,分析了电容器元件圆柱状整体均匀发热时发热体的热流分布。进一步,结合电热对偶原理,建立了圆元件热计算模型,并通过微分单元积分,得到了圆元件的热阻计算公式。最后,通过试验验证了圆元件的热计算模型的正确性,且提出了圆元件热计算的验证方法,为直流支撑电容器圆元件的发热提供理论与试验参考。

关键词: 直流支撑电容器; 干式电容器; 圆元件; 散热模型; 轴向散热; 径向散热

Study on Heat Dissipation Model and Simulation of Circular Element for DC-link Capacitor

ZUO Qianglin¹, LEI Qiaoshu¹, ZHONG Shaolong², ZHANG Yongxin², DANG Zhimin²

(1. Wuxi Sun King Power Capacitor Co., Ltd, Jiangsu Wuxi 214177, China; 2. State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the continuous expansion of application range of self-healing dry metallized film capacitor, its heat dissipation mode and internal temperature - rising have become important theoretical and engineering problems. In view of this, the heat flow distribution of heating body of overall heating and even heating of circular element of capacitor is analyzed on the basis of the heating rule of the circular element of the DC-link capacitor. Furthermore, the thermal calculation model of the circular element is set up in combination with the principle of electro-thermal duality, and the thermal resistance calculation formula of a circular element is obtained through the integration of the differential cells. Finally, the correctness of the thermal calculation model of circular element is verified through the test, and the verification method of thermal calculation of circular element is proposed, which will provide theoretical and test reference for the heating of circular element of DC-link capacitor.

Keywords: DC-link capacitor; dry type capacitor; circular element; model of heat dissipation; axial heat dissipation; radial heat dissipation

0 引言

自愈干式金属化薄膜电容器因储能密度高、体积小、对环境友好而得到广大用户的青睐,在电动汽车、电力机车、脉冲功率等领域得到快速的应用和发展^[1-8]。我国柔性直流输电技术的发展,为可用于柔直工程的自愈干式直流支撑电容器带来了新的契机,各大院校、各个电容器厂家和相关机构对于柔直用直流支撑电容器的研究如火如荼^[9-11],相关技术问题也得到了分析与探讨,如直流叠加交

流下的自愈性能问题^[12],温升分布不均匀问题^[13]等。

柔直用直流支撑电容器与传统的高压油浸式电容器有很大的区别,电容器内部的散热方式只有热传导散热,且柔直用直流支撑电容器的容量大,损耗高,电容器的内部温升情况以及变化规律是众多高校、制造厂家研究的关键技术问题^[14-16]。

柔直用直流支撑电容器在户内柔直环流塔中使用,而柔直换流塔的空间有限,导致柔直用直流支撑电容器的温升问题更为突出,用户对柔直用电容器内部温升也极为关注,这也造成了对电容器进

行热仿真的需求。热仿真的前提是建模,建模的前提是对电容器的内部结构和性能特别是元件有充分的了解。陈红晓等对金属化膜脉冲电容器放电过程进行了热仿真与分析^[17],但未针对内部元件进行详细建模分析;李化等对高压交流金属化膜电容器的温升特性进行了建模仿真和试验验证^[18-19],但交流和直流电场下的热传导性能大有不同,且运行工况也完全不一样。随着计算机技术和算法的快速发展,有限元方法在解决多物理场耦合问题中表现出明显的优势^[20],而多物理场耦合环境更加符合元件工作的实际状态。郭小凡等人^[21]通过电-热耦合得到了金属化膜电容器在多电平换流器工况下的温升特性,为设备的设计提供了有力的数值支撑。Yao 等人^[22]建立了聚丙烯薄膜电容热-化学腐蚀多场有限元模型,对不同工况下电容器寿命进行了预测分析。Huang 等人^[23]通过热-力耦合分析了多层陶瓷电容器的热应力分布。

目前国际上柔直用直流支撑电容器有两个技术方向,一个是扁元件,一个是圆元件。扁元件的热传导计算与传统的高压油浸式电容器类似,但和圆元件不太一样。本文研究对象是圆元件,研究问题包括圆元件的发热特性和热阻计算推导等。由于元件内部的温度目前没办法进行实测^[24],因此本文通过推导计算,得到圆元件的散热规律,通过试验验证,提出元件内部最热点温度的估算方法。最后采用电-热多物理场耦合有限元方法分析了损耗引起元件温度升高的分布情况,为研究柔性直流支撑式电容器整体发热分析奠定基础。

1 圆元件的散热问题研究

圆元件的散热问题比较复杂,首先元件本身整体是发热体,发热主要来自金属镀层和薄膜介质极化^[25],其次元件内部的热流密度是变化的,目前暂未有精确的计算公式。圆元件的散热由2部分组成,1)轴向散热,2)径向散热^[26],下面做具体分析。

1.1 轴向散热

圆元件发热量分布在元件的有效部分,考虑到膜的发热是均匀的,可以认为发热量与发热体的体积成正比。对于从元件中线零点0到元件端面 $L_y/2$ 之间任意处 z ,圆元件的轴向散热示意图见图1。

根据热工学原理^[22]和热电对偶原理^[22], dz 处的热阻 dR_z 为

$$dR_z = \frac{4}{\pi(D^2 - d^2)\lambda_z} dz \quad (1)$$

式中: D 为元件直径,m; d 为心棒直径,m; λ_z 为元件轴向导热系数,W/m·K。

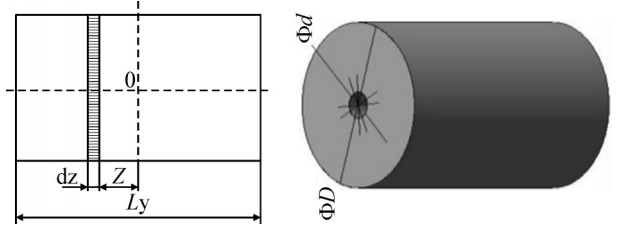


图1 圆元件的轴向散热示意图
Fig. 1 Axial heat dissipation schematic diagram of circular element

0到 z 处的发热量(也就是流经 dz 的热流)为

$$P_z = \frac{z}{L_y} P \quad (2)$$

dz 处的温升 $d\theta_z$ 应为 $dR_z P_z$,在 $0-L_y/2$ 内对 $d\theta_z$ 进行积分并化简,可以得到

$$\Delta T_z = \frac{L_y}{2\pi(D^2 - d^2)\lambda_z} P_y \quad (3)$$

$$R_{yz} = \Delta T_z / P_y = \frac{L_y}{2\pi(D^2 - d^2)\lambda_z} \quad (4)$$

式中: P 为元件发热量,W; L_y 为元件长度,m。

考虑到金属电极厚度很小且心棒和元件内外径比很小,则在工程上圆元件的截面积与金属化膜的厚度与厚度的乘积可以被认为是一样的,即 $S_{jy} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \approx \frac{\pi}{4}D^2 \approx 2L_m d_m$ 。另外根据导热系数的定义,金属化膜宽度方向的导热系数由聚丙烯薄膜和镀层两部分合成。考虑到元件有两个端面,两个端面到元件中心线的热阻是并联关系。式(4)可以改写成

$$R_{yz} = \frac{L_y}{4\pi D^2 \lambda_z} = \frac{L_y}{32L_m d_m \lambda_z} \quad (5)$$

$$\lambda_z = \lambda_{jb} d_{jb} / d_m + \lambda_m \quad (6)$$

式中: λ_m 、 λ_{jb} 分别为聚丙烯和镀层的导热系数,W/(m·K); d_m 、 d_{jb} 分别为聚丙烯薄膜和镀层的厚度,m; L_m 为金属化聚丙烯薄膜的有效长度,m。

如果按照热阻的定义,元件中心线到端面的热阻应为

$$R_{yz} = \frac{L_y/2}{\lambda_z \pi (D^2 - d^2)/4} / 2 = \frac{L_y}{\lambda_z \pi D^2} = \frac{L_y}{8\lambda_z L_m d_m} \quad (7)$$

对比式(7)与式(4)~(6)可以看出,按照元件分散性发热模型得到的热阻,只有直接按热阻定义得到的热阻的1/4,说明整体发热的热阻,不能按热阻定义来直接计算。

1.2 径向散热

对于圆元件,参考电缆的电阻计算模型,先假定元件的长度远大于直径。圆元件的径向散热见图2。

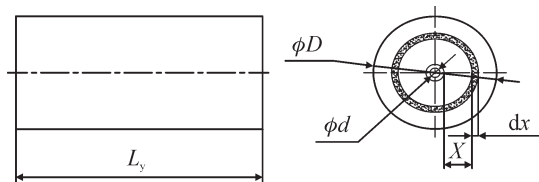


图2 圆元件径向散热示意

Fig. 2 Radial heat dissipation schematic diagram of circular element

圆元件发热量分布在元件的有效部分,考虑到膜的发热是均匀的,可以认为发热量与发热体的体积成正比。对于从心棒 r 到元件外径 R 之间任意处 x ,由热工学原理^[22]和电热对偶原理^[22], dx 处的热阻为

$$dR_x = \frac{dx}{2\pi x L_y \lambda_x} \quad (8)$$

式中: R_{yx} 为元件径向等效热阻, K/W ; λ_x 为元件径向导热系数, $W/m \cdot K$ 。

r 到 x 处的发热量(也就是流经 dx 的热流)为

$$P_{yx} = \frac{\pi(x^2 - r^2)}{\pi(R^2 - r^2)} P = \frac{x^2 - r^2}{R^2 - r^2} P_y \quad (9)$$

dx 处的温升 $d\theta_x$ 应为 $dR_x P_{yx}$, 在 $r-R$ 内对 $d\theta_x$ 进行积分并化简,可以得到

$$\Delta T_{yx} = \frac{P_y}{4\pi\lambda_x L_y} \left(1 - \frac{2d^2}{D^2 - d^2} \ln \frac{D}{d}\right) \quad (10)$$

式中, ΔT_{yx} 为元件径向温升, K 。

$$R_{yx} = \frac{\Delta T_{yx}}{P_y} = \frac{1}{4\pi\lambda_x L_y} \left(1 - \frac{2d^2}{D^2 - d^2} \ln \frac{D}{d}\right) = \frac{A}{4\pi\lambda_x L_y} \quad (11)$$

式中, $A = 1 - \frac{2d^2}{D^2 - d^2} \ln \frac{D}{d}$, 为与元件直径和心棒直径有关的常数。工程计算在某些条件下,可以取 $A = 1$ 。

元件径向热阻就是金属化膜的厚度方向热阻,由聚丙烯薄膜的热阻和镀层热阻串联组成。由于镀层厚度远小于薄膜的厚度,导热系数远大于薄膜的导热系数,元件的径向热阻可以看成就是聚丙烯薄膜的热阻,径向导热系数可以认为就是聚丙烯薄膜的导热系数,即 $\lambda_x \approx \lambda_m$ 。这样式(11)可以写成:

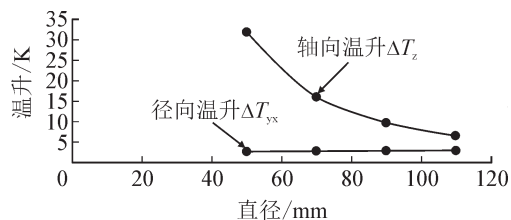
$$R_{yx} = \frac{A}{4\pi\lambda_m L_y} \quad (12)$$

实际上轴向和径向的散热是同时进行的,根据热电对偶原理^[22],元件的热流按热阻的反比例分配。计算公式为

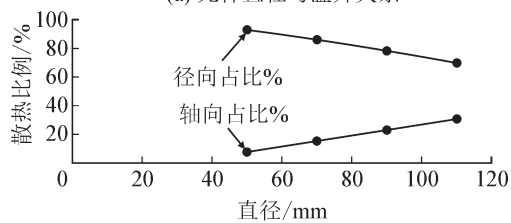
$$\eta_z = \frac{P_{yz}}{P_y} = \frac{R_{yx}}{R_{yz} + R_{yx}} = \frac{A\lambda_z D^2}{L_y^2 \lambda_m + A\lambda_z D^2} \quad (13)$$

$$\eta_x = \frac{P_{yx}}{P_y} = \frac{R_{yz}}{R_{yz} + R_{yx}} = \frac{L_y^2 \lambda_m}{L_y^2 \lambda_m + A\lambda_z D^2} \quad (14)$$

基于式(3)、(10),可以计算得到圆元件的散热及温升与元件尺寸的关系见图3-4。



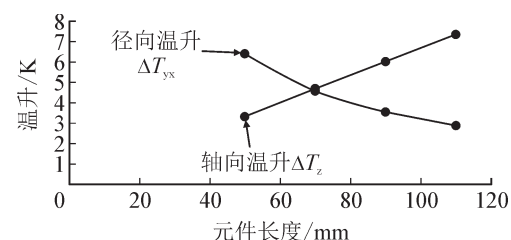
(a) 元件直径与温升关系



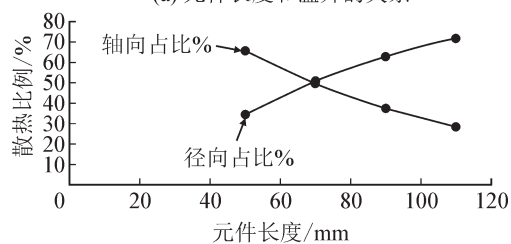
(b) 元件直径与散热关系

图3 元件直径与散热的关系

Fig. 3 Relationship between element diameter and heat dissipation



(a) 元件长度和温升的关系



(b) 元件长度与散热关系

图4 元件长度与散热的关系

Fig. 4 Relationship between element length and heat dissipation

从图3-4可以看出,元件的散热与元件的直径和长度有关,具体散热情况需要根据尺寸设计的具体情况确定。一般来说,元件的长径比越大,径向散热比例越大。

2 圆元件轴向散热和径向散热试验验证

2.1 元件散热模型

要对圆元件的散热进行验证,首先要建立圆元件的散热模型。根据前面的推导,圆元件的散热由径向散热和轴向散热2部分组成,且为并联的形

式。元件的热阻为

$$R_y = R_{yx} // R_{yz} = \frac{1}{1/R_{yx} + 1/R_{yz}} = \frac{AL_y}{4\pi(AD^2\lambda_z + L_y^2\lambda_m)}$$
 (14)

设介质的能量密度为 A_0 , 则有:

$$P_y = \frac{\pi}{4} A_0 D^2 L_y$$
 (15)

这样元件的温升为 $\Delta T_y = R_y P_y$ 。将式(14)-(15)代入并化简得

$$\Delta T_y = P_y \times R_y = \frac{A_0}{16\left(\frac{\lambda_z}{L_y^2} + \frac{\lambda_m}{AD^2}\right)} = \frac{1}{\frac{16}{A_0}\left(\frac{\lambda_z}{L_y^2} + \frac{\lambda_m}{AD^2}\right)}$$
 (16)

$$A_0 = 16\Delta T_y \left(\frac{\lambda_z}{L_y^2} + \frac{\lambda_m}{AD^2}\right)$$
 (17)

为考虑理论计算与验证结果的等效性, 等式右边考虑一个系数 k_0 , 这样式(16)、(17)可改写为:

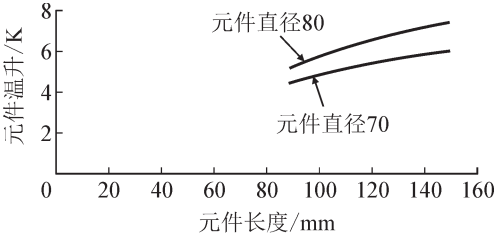
$$\Delta T_y = \frac{k_0}{\frac{16}{A_0}\left(\frac{\lambda_z}{L_y^2} + \frac{\lambda_m}{AD^2}\right)}$$
 (18)

$$A_0 = 16\Delta T_y \left(\frac{\lambda_z}{L_y^2} + \frac{\lambda_m}{AD^2}\right) / k_0$$
 (19)

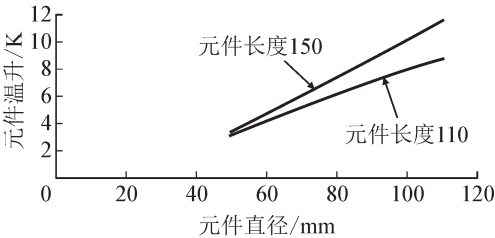
式中 A_0 与元件设计的损耗参数有关, 可以通过试验确定。其余同上。

从式(16)可以看出, 元件的长度越大, 温升越高, 元件的直径越大, 温升也越高。具体见图 5。

考虑到元件本身是均匀发热体, 元件中单位体积的发热量与 $\varepsilon E^2/2$ 成正比, 考虑到元件损耗为 $\tan \delta$, 式(16)可以改写为



(a) 元件长度与温升的关系



(b) 元件直径与温升的关系

图5 元件尺寸与温升的关系
Fig. 5 Relationship between element size and heat dissipation

$$\Delta T_y = \frac{\beta \varepsilon E^2 \tan \delta \times AD^2 L_y^2}{32(AD^2 \lambda_z + L_y^2 \lambda_m)} = \frac{\beta \varepsilon E^2 \tan \delta}{32(\lambda_z / L_y^2 + \lambda_m / AD^2)}$$
 (20)

$$\beta = \frac{32\Delta T_y (A\lambda_z / L_y^2 + \lambda_m / AD^2)}{\varepsilon E^2 \tan \delta}$$
 (21)

从式(20)可以看出, 圆元件的温升与元件的设计场强的平方成正比。对于金属化膜元件, 由于非金属镀层的留边和空白边宽度通常小于 5 mm, 没有镀层的薄膜表面积占比很小, 金属化膜发热体积与元件本身的体积可视为基本相等, β 可以视为 1, 元件温升试验表明, 系数 β 为 1.02 以内, 工程计算可以取 $\beta = 1$ 。

2.2 验证方案简介

下面为验证元件散热模型, 选取元件尺寸为 $\Phi 77 \times 103$ 的试品元件做对比试验。元件参数见表 1。

表1 试品元件的基本情况
Table 1 Basic situation of sample element

元件编号	元件尺寸	元件电容/ μF	元件损耗/%	元件电压(工频交流)/V	备注
1-1 [#] -1-4 [#]	$\Phi 77 \times 103$	83.0	0.03	510	不做绝热处理
1-5 [#] -1-6 [#]	$\Phi 77 \times 103$	81.5	0.03	510	径向做绝热处理
1-7 [#] -1-8 [#]	$\Phi 77 \times 103$	81.5	0.03	510	两个端面(轴向)做绝热处理

试验验证包括 3 个方面: 圆元件温升、圆元件径向和轴向散热比例以及式(19)的系数 A_1 、 k_0 的确定。为此, 试品元件做如下处理:

1) 4 个元件不做绝热处理, 元件编号为 1-1[#]-1-4[#]。见图 6。

2) 2 个元件在元件径向做绝热处理, 元件编号 1-5[#]-1-6[#], 见图 7(右边的两个元件, 只有轴向散热)。

3) 2 个元件在元件的两个端面(轴向)做绝热处理, 元件编号 1-7[#]-1-8[#], 见图 7(左边的 2 个元件, 只有径向中间部位散热)。



图6 正常试品元件
Fig. 6 Normal sample element



图7 做绝热处理的元件
Fig. 7 Element for adiabatic treatment

2.3 验证结果分析

2.3.1 试验验证结果

在环境温度为 65℃ 的条件下,对元件施加 510 V 工频交流电压进行温升试验,温升试验的稳定条件按照标准规定,在 6 h 内温度变化不超过 1 K。最终试验结果见表 2。

2.3.2 数据分析

从表 2 可以看出,利用电缆+分布式发热模型计算圆元件的温升是在工程上可行的,但需要考虑一个修正系数 k_0 。由于径向绝热很难做到完全的绝热,试验温升结果与计算结果偏差略大。

经过绝热处理的元件温升试验结果表明,圆元件的径向散热和轴向散热的计算推导基本正确,可以用于指导工程设计。对于验证试品,径向散热占 62.4%,轴向散热占 37.6%,与元件的长径比有关。需要注意的是,元件的散热模型与电容器的散热模型不是等同的,随着元件放置方式不同,散热模型也不一样。

表2 元件温升试验结果(环境温度 65℃)
Table 2 Temperature rise test results of element (Ambient temperature at 65℃)

项目	温升试验结果/K							
	1-1#	1-2# (不做绝热处理)	1-3#	1-4#	1-5# (径向绝热)	1-6# (轴向绝热)	1-7# (轴向绝热)	1-8# (轴向绝热)
试验温度/℃	69.8	68.9	70.1	70.3	74.8	73.7	73.4	74.3
试验温升/K	4.8	3.9	5.1	5.3	9.8	8.7	8.4	9.3
计算温升/K		4.4			10.77		8.34	
建议修正系数 k_0		1.05~1.2			0.85~1		1.03~1.15	

2.3.3 电-热多场耦合有限元仿真分析

进一步采用有限方法对元件温升试验进行了数值计算,构建了电-热多物理场耦合仿真模型,在电流场中计算出不同试验条件下元件内部的损耗大小,传入固体传热场中作为热源引起元件温度升高。元件表面通过对流方式向空气散热,环境温度为 65℃,而在径向和轴向绝热仿真中,对应表面设置为绝热边界条件。则在无绝热、径向绝热和轴向绝热 3 种条件下,元件的温度分布

见图 8。

由图 8 可知,对于无绝热、径向绝热和轴向绝热 3 种条件下,元件温度范围分别为 68.7~70.4℃、73.4~75.3℃ 和 71.6~74.4℃,与表 2 试验测量结果吻合,径向绝热条件下元件温度大于轴向绝热条件。此外,在无绝缘状态下(图 8(a)),元件内部温度并非均匀分布,而随空间位置的变化而改变,从心棒到外表面,元件温度先增大后降低,最高温度点分布约在径向 1/3 的位置。

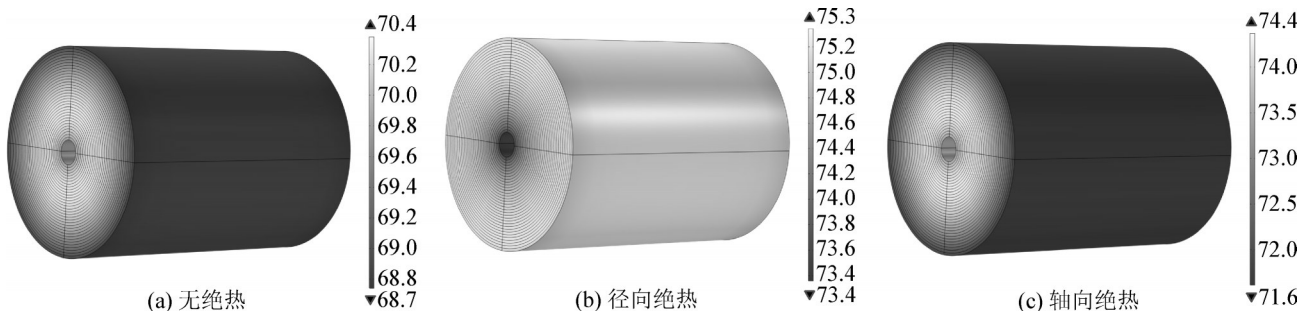


图8 不同条件下元件温度分布云图
Fig. 8 Temperature distribution cloud diagram of element under different conditions

3 结语

1)直流支撑电容器的圆元件散热模型,可以利用电缆模型+分布式发热模型进行工程设计计算。

2)试验验证表明,本文提出的圆元件散热模型在工程上是可行的,但需要考虑一个修正系数 k_0 ,根据径向和轴向分别考虑系数。

3)通过建立电-热耦合有限元仿真模型定量计算了元件内部的温度分布,与试验测量结果一致,有限元仿真模拟已经成为研究电容器元件内部多物理场耦合特性的有效手段。

4)本文的一些实测数据不具有普适性,只是提供一种研究方法。建议有兴趣的业内人士,进行更多的验证及仿真,完善金属化聚丙烯薄膜圆元件的散热模型。

参考文献

- [1] 李化,李智威,黄想,等.金属化膜电容器研究进展[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(2):1-4.
LI Hua, LI Zhiwei, HUANG Xiang, et al. Research progress on metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 1-4.
- [2] 赵亮,王喜亮,童克锋,等.金属化膜电容器可靠寿命预估方法[J].工业技术创新,2020,7(4):112-115.
ZHAO Liang, WANG Xiliang, TONG Kefeng, et al. Reliable life predicting method for metallized film capacitors[J]. Industrial Technology Innovation, 2020, 7(4): 112-115.
- [3] 何红庄.高压大容量长寿命脉冲电容器的研制[J].河南科技,2021,40(15):41-45.
HE Hongzhuang. Development of high-voltage, large-capacity and long-life pulse capacitors[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2021, 40(15): 41-45.
- [4] 王佳昕,李化,王哲豪,等.金属化膜电容器电极边缘电场畸变研究[J].高压电器,2022,58(3):29-36.
WANG Jiaxin, LI Hua, WANG Zhehao, et al. Research on electric field distortion at the edge of metallized film capacitor electrode[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 29-36.
- [5] 方田,李化,黄想,等.工频叠加谐波电压下温度对全膜电容器绝缘介质击穿特性的影响[J].高压电器,2022,58(9):142-148.
FANG Tian, LI Hua, HUANG Xiang, et al. Influence of temperature on the dielectric breakdown characteristics of foil-film capacitor under AC superimposed harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 142-148.
- [6] 周晨,张翔,刘磊,等.换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J].电力工程技术,2022,41(5):149-155.
ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 149-155.
- [7] 柴斌,史磊,韦鹏,等.油浸电容器元件损耗频率特性计算参数的修正[J].高压电器,2023,59(11):211-216.
CHAI Bin, SHI Lei, WEI Peng, et al. Correction on power loss characteristic calculation parameters of oil immersed capacitor elements[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 211-216.
- [8] 国江,马跃,林浩,等.特高压用大容量优比特性电容器内熔丝最小熔断能量试验研究[J].高压电器,2022,58(2):42-49.
GUO Jiang, MA Yue, LIN Hao, et al. Study on minimum fusing energy test of inner fuse for capacitor with large capacity and superior ratio in UHV application[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 42-49.
- [9] 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.
- [10] 查鲲鹏,曹均正,郑媚媚,等.计及金属化膜电容器失效的MMC换流阀组件可靠性评估[J].电力系统自动化,2019,43(4):86-93.
ZHA Kunpeng, CAO Junzheng, ZHENG Meimei, et al. Reliability evaluation of MMC converter valve module considering failure mode of metallized film capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 86-93.
- [11] 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.
- [12] 杜一鸣,潘亮,祝令瑜,等.金属化膜电容器交流和直流电压劣化特性分析[J].电力工程技术,2020,39(6):151-158.
DU Yiming, PAN Liang, ZHU Lingyu, et al. AC and DC voltage degradation characteristics of metallized film capacitors[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(6): 151-158.
- [13] 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.
- [14] 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, 2022(4): 53-57.
- [15] 孙晓武. 环境温度对直流支撑电容器温升影响的研究[J]. 电工电气, 2020(2): 51-53.
SUN Xiaowu. Study on influence of ambient temperature on temperature rise of DC link capacitor[J]. Electrotechnics Electric, 2020(2): 51-53.
- [16] 孙晓武. 直流支撑电容器温升影响因素研究[J]. 电气技术, 2020, 21(4): 76-79.
SUN Xiaowu. Study on the factors affecting the temperature rise of DC link capacitor[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(4): 76-79.
- [17] 陈红晓, 刘学孔, 孔米秋, 等. 基于ANSYS的金属化膜脉冲电容器放电过程热仿真与分析[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(12): 27-34.
CHEN Hongxiao, LIU Xuekong, KONG Miqu, et al. Thermal simulation and analysis of discharge process of metallized film pulse capacitor with ANSYS[J]. Electronic Components & Materials, 2020, 39(12): 27-34.
- [18] 李化, 陈麒任, 李浩原, 等. 交流高压金属化膜电容器温升特性和优化设计[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 1-8.
LI Hua, CHEN Qiren, LI Haoyuan, et al. Temperature rise characteristic and design optimization of AC high voltage metallized film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 1-8.
- [19] 尹婷, 严飞等. 高压自愈式电容器典型交流工况下温度场分析及优化设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3996-4004.
YIN Ting, YAN Fei, et al. Temperature field analysis and optimization design of high-voltage self-healing capacitor at typical operating conditions in power system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3996-4004.
- [20] 程书灿, 赵彦普, 张军飞, 等. 电力设备多物理场仿真技术及软件发展现状[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 121-137.
CHENG Shucan, ZHAO Yanpu, ZHANG Junfei, et al. State of the art of multiphysics simulation technology and software development for power equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 121-137.
- [21] 郭小凡, 查鲲鹏, 曹均正, 等. 金属化膜电容器在模块化多电平换流器工况下温升特性分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 14-20.
GUO Xiaofan, ZHA Kunpeng, CAO Junzheng, et al. Analysis of temperature rise characteristic of metallized film capacitor under operating conditions in modular multi-level converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 14-20.
- [22] YAO Ran, LI Hui, LAI Wei, et al. Lifetime analysis of metallized polypropylene capacitors in modular multilevel converter based on finite element method[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4248-4259.
- [23] HUANG Changwei, CHEN Benteng, KUN YEN C, et al. Finite element analysis and design of thermal-mechanical stresses in multilayer ceramic capacitors[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2013, 12(2): 451-460.
- [24] 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.
- [25] 李浩原, 尹婷, 严飞, 等. 金属化膜电容器极板发热计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 37-40.
LI Haoyuan, YIN Ting, YAN Fei, et al. Calculation for electrode heating of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 37-40.
- [26] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理[M]. 机械工业出版社, 1988.
- 作者简介:**
左强林(1967—), 男, 正高级工程师, 主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail: huazy@sunking-tech.com。
雷乔舒(1979—), 女, 高级工程师, 主要从事电力电容器设计制造工作。
钟少龙(1988—), 男, 博士, 研究方向为电力设备多物理场耦合仿真。
张涌新(1996—), 男, 博士生, 研究方向为薄膜电容器数据利用。
党智敏(1969—), 男, 教授, 研究方向为先进能源电工材料与器件。