

金属化薄膜电容器元件电-磁-热耦合特性仿真研究

钟少龙^{1,2}, 方立龙³, 王昕劼¹, 王健涛¹, 黄磊¹, 党智敏^{1,2}

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

3. 广东意壳电子科技有限公司, 广东 佛山 528300)

摘要: 金属化薄膜电容器在新能源电力系统、脉冲功率和电动汽车等领域具有广泛应用。精确建立其结构与性能之间的构效关系, 对于揭示电容器在不同电磁环境下的响应机制及保障电磁能传输的质量至关重要。本文构建了金属化薄膜电容器元件的全尺寸电-磁-热多物理场耦合模型, 深入分析了元件几何结构与材料属性对电容器损耗及磁场特性影响的内在机制。通过电容器元件的温升试验, 对比分析了模型计算值与实验测量值, 结果表明二者在变化趋势及稳态温度上具有良好的 consistency, 验证了模型的准确性。基于该模型, 进一步对电容器元件的电气性能参数, 包括等效串联电阻(ESR)和等效串联电感(ESL)进行了数值预测, 并与实验结果进行了对比。研究结果为基于多物理场耦合的电力设备高效设计提供了重要的理论和方法指导。

关键词: 金属化薄膜电容器; 电-磁-热模型; 多物理场耦合仿真; 参数数值预测; 温升特性

Simulation of Electric-magnetic-thermal Coupling Characteristics of Metallized Film Capacitor Elements

ZHONG Shaolong^{1,2}, FANG Lilong³, WANG Xinjie¹, WANG Jiantao¹,
HUANG Lei¹, DANG Zhimin^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Power System Operation and Control, Beijing 100084, China;

3. EACO Capacitor Inc. Guangdong Foshan 528300, China)

Abstract: Metallized film capacitors are widely used in such fields as new energy power systems, pulse power applications and electric vehicles. Accurately setting up the precise relationship between its structure and performance is crucial for revealing the response mechanisms of capacitors in various electromagnetic environments and ensuring the quality of electromagnetic energy transmission. In this paper, a full-scale electro-magnetic-thermal multi-physics coupling model of the metallized film capacitor elements is constructed. The intrinsic mechanisms of the influence of component geometry and material properties on capacitor losses and magnetic characteristics are thoroughly analyzed. The calculated values of the model and the experimentally measurement values are compared and analyzed through the temperature rise test of the capacitor elements, showing that they have good consistency in both variation trends and steady-state temperatures and validating the accuracy of the model. Based on this model, the numerical predictions of the electrical performance parameters of the capacitor elements, including equivalent series resistance (ESR) and equivalent series inductance (ESL), are made further and compared with experimental results. The research result in this paper has provided significant theoretical and methodological guidance for the efficient design of power devices based on multi-physics coupling.

Keywords: metallized film capacitors; electro-magnetic-thermal model; multi-physics coupling simulation; parameters numerical prediction; temperature rising characteristic

0 引言

金属化薄膜电容器广泛应用于新能源发电(太阳能、风能)、柔性直流输电以及电动汽车控制系统,结合宽禁带半导体器件,可实现电流(AC/DC)的高效率转换,从而提升电能传输的效率和质量^[1-3]。作为核心器件^[4],金属化薄膜电容器具备优异的绝缘性能、低损耗特性及自愈能力^[5],在滤波、直流支撑和过电压缓冲中发挥关键作用,对于换流安全和电能质量保障至关重要^[6]。然而在实际应用中,金属化薄膜电容器需应对复杂的电、磁、热多重环境^[7-9]。例如直流支撑电容器在运行中承受高压直流偏置并叠加大纹波电流冲击,高频滤波电容器则需要通过 kHz 甚至 MHz 级别的高频电流^[10],这对薄膜电容器的性能响应特性提出了更加严格的要求。一方面,高电压和大电流引起的焦耳损耗和极化损耗会导致薄膜电容内部温度升高,进而加速绝缘材料和设备的老化速度^[11]。随着外界电流频率不断提高,电容器的电磁感应效应逐渐成为不能忽略的关键因素^[12],过高的内部电感会抑制电流变化,影响电容器的充放电性能及电流密度的空间分布。

等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)和等效串联电感(equivalent series inductance, ESL)通常用于描述电容器的热效应和磁效应,ESR 通过一个等效串联电阻来表征电容器内部电流的发热功率^[13-14],而 ESL 则描述电容器元件内部磁场分布对瞬时电流变化的影响程度^[15-16]。对于金属化薄膜电容器元件,其 ESR 和 ESL 与元件的内部结构和材料属性直接相关,Li 团队^[17]分析了端部喷涂电极及引线、接触电阻、金属电极、介质极化损耗对 ESR 影响规律。Husseini 等人^[18]制备了不同长度的金属化薄膜电容器元件,在保持相同电容值下 ESL 显示出明显差异。确立电容器元件结构与性能的关系,对于优化电容器结构设计、阐明影响性能参数关键因素,以及揭示电容器破坏和失效机制具有重要的应用价值。

随着计算机硬件水平和求解算法的不断发展,建立器件的电-磁-热多物理场耦合模型,并利用介观参数(如电场强度、热场和磁感应强度),可以有效建立器件微观结构与宏观性能的构效关系。多物理场仿真模拟已成为研究电力设备电-热^[19-20]及电-磁耦合效应^[21]的重要手段。袁发庭等人^[22]采用有限元法对变压器绕组的电磁-流热耦合过程进行了数值模拟研究。BELKO 等人^[23-24]考虑了金属化薄膜电容器安全膜自愈过程的电热耦合效应,揭示了影响自愈破坏的物理机制。相比于其他电力设备,

薄膜电容器在结构和模型构建方面更加复杂,薄膜电容器由厚度介于 2~10 μm 介质薄膜真空蒸镀一层纳米级厚度金属层^[25]卷绕而成,单个元件卷套层数可达数千层^[26],这种几何尺度数量级差异为仿真模型的精确构建带来了巨大的挑战。本文通过材料参数等效和边界条件的等效化,建立了金属化有机薄膜电容器的全尺寸多物理场耦合仿真模型。模型考虑了金属化薄膜金属电极方阻对电流密度和焦耳发热的影响^[27],计算了电容器元件在交流环境的温升,并于实验测量结果进行了比较,进一步结合解析公式计算了元件内部和外部的磁场分布,从而预测了元件的 ESR 和 ESL 值,有效提高金属化薄膜电容器元件结构设计效率。

1 研究方法

1.1 金属化薄膜电容器元件物理模型

本文研究的电容器元件由双向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP)卷绕而成,如图 1 所示。BOPP 薄膜厚度为 4.8 μm ,内芯棒直径为 9 mm,元件长度和外径分别为 115 mm 和 78 mm。元件内部和外表面分别缠绕一定层数纯 BOPP 基膜,以起到绝缘和隔离作用。



图1 金属化有机薄膜电容器元件
Fig. 1 Metallized organic film capacitor elements

薄膜表面通过真空蒸镀工艺覆盖了一层纳米级厚度的导电金属铝(Al)层,作为电容器电极,称为活动区。为了增强金属层与元件端部喷涂电极的结合强度及通流能力,在靠近端部电极的位置,采用了蒸镀锌(Zn)金属层,形成了铝层锌加厚结构,称为加厚区。电极采用单侧留边结构,如图 2 所示,电极端部加厚区和活动区电极方阻分别为 2.5 $\Omega/\square$ 和 40 $\Omega/\square$ 。

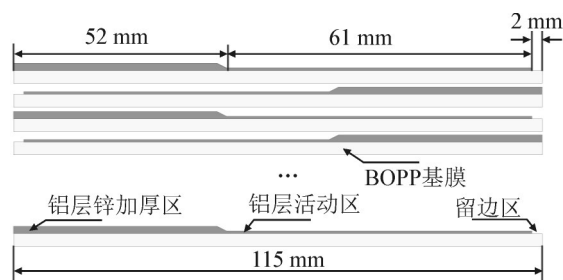


图2 金属化薄膜电极结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of metallized film electrode structure

在 COMSOL Multiphysics 软件中,构建了金属薄膜电容器元件的有限元分析几何模型,见图3。由于电极与薄膜的厚度存在数量级差异,电极厚度通常为几十纳米,而薄膜厚度则为微米量级。为解决这一问题,采用了表面边界等效法,根据不同方阻的金属电极所引发的通流和损耗特性来定义模型的表面性能参数,从而有效减少了模型所需的网格数量。

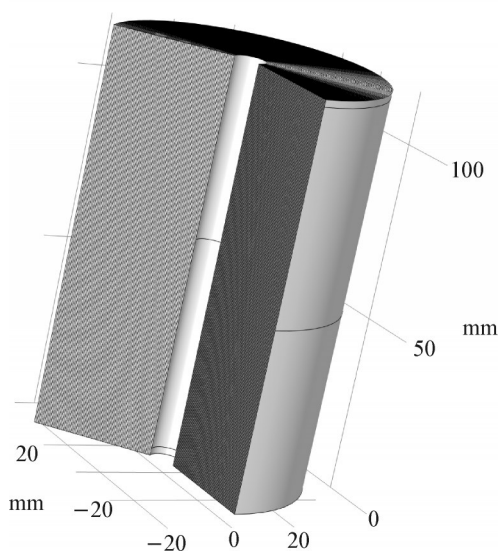


图3 金属化薄膜电容器元件有限元几何模型
Fig. 3 Finite element geometric model of metallized film capacitor elements

本研究中,电容器元件的薄膜卷绕层数达到了7 100层。虽然建立全尺寸仿真模型能够准确模拟元件内部的电流密度分布、损耗特性、磁场分布和传热特性,但这极大地增加了求解的计算量。为此,采用了局部等效方法,基于相邻层具有相近的物理场环境,将一定数量的薄膜层视为单一薄层,并通过等效材料属性来表征该薄层的整体损耗和传热特性。在本模型中,将71层聚丙烯薄膜等效为一个薄层,使整个元件由100层等效薄层构成。

1.2 电容器元件电-磁-热计算控制方程

1.2.1 电流场控制方程

在电容器元件温升试验中,元件两端施加特定

频率的交流信号,采用复矢量表示时谐电磁场,则元件内部电位满足泊松方程

$$\nabla(-\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \phi) = \rho \quad (1)$$

式中: ϕ 和 ρ 分别为空间电位和电荷分布; ε_0 和 ε_r 分别为真空介电常数和介质相对介电常数。进一步可计算出空间电场强度 $\vec{E}$ 和电位移矢量 $\vec{D}$ 为

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (2)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (3)$$

由全电流定律,交流环境下电容器元件内部的电流密度为

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} + j\omega \vec{D} \quad (4)$$

式中右边第二项为位移电流密度 $j\omega \vec{D}$, ω 为外施电场角频率大小。右边第一项为传导电流密度 $\gamma \vec{E}$, γ 为介质的电导率, $\vec{J}$ 满足电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (5)$$

电流通过薄膜金属电极会产生焦耳损耗,损耗功率体密度 p (W/m^3)

$$p = \vec{E} \cdot \vec{J} \quad (6)$$

通常采用方阻值 R_{sq} ($\Omega/\square$) 来表征金属镀层的导电特性,当通有电流密度为 $\vec{J}$ 时,金属电极损耗功率密度进一步可推导为

$$p_m = R_{sq} t \vec{J}^2 \quad (7)$$

式中: t 为金属镀层的厚度;而对于薄膜介质内部,存在由泄露电流带来的欧姆损耗以及介质松弛极化引起的极化损耗。通常采用等效复介电常数 $\tilde{\varepsilon}_e$ 和损耗角正切值 $\tan \delta$ 来表征介质内容的损耗大小

$$\tilde{\varepsilon}_e = \varepsilon' - j \left(\varepsilon'' + \frac{\gamma}{\omega} \right) \quad (8)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon'' + \frac{\gamma}{\omega}}{\varepsilon'} \quad (9)$$

式中: ε' 和 ε'' 分别为薄膜介质复介电常数的实部和虚部。进一步可计算得到介质内部单位体积的损耗功率为

$$p_d = \omega \varepsilon' \vec{E}^2 \tan \delta \quad (10)$$

根据实际电容器元件运行环境,在元件两端施加外部电压或电流值,采用有限元方法可计算获得元件内部的电位、电场、电流密度和损耗分布。

1.2.2 热传导控制方程

在电容器元件中,电流产生的焦耳损耗和极化损耗转化为热量导致元件局部温度增大,热量通过传到的方式向表面扩散,最终达到一个动态平衡状态,其中温度热传导满足方程

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_v = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

式中: T 为元件内部温度分布; k 为介质的热导率 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); q_v 为热源功率密度, 在电容器元件中包括式(6)和(7)中金属电极和薄膜介质内部产生的损耗功率密度; ρ 和 c_p 分别为材料的密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^3$) 和热容值 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)。

元件表面通过热传导、对流和辐射等方程将热量传出去^[28], 维持了电容器元件温度稳态, 其中传导和对流散热方程分别为

$$q'' = -k\nabla T S \quad (12)$$

$$q'' = h(T - T_\infty)S \quad (13)$$

式中: h 为表面对流换热系数, $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$; S 为热传导或热交换的面积, m^2 。

1.2.3 磁场控制方程

当电容器元件薄膜电极通有恒定电流时, 根据安培环路定律, 元件内部的矢量磁位 A 满足泊松方程

$$\nabla^2 A = -\mu_0 \mu_r J_c \quad (14)$$

式中: μ_0 和 μ_r 分别为真空磁导率和介质材料的相对磁导率; J_c 为电导电流密度, 公式为

$$J_c = \gamma E \quad (15)$$

进一步可以计算获得磁感应强度 B 和磁场强度 H 矢量

$$B = \nabla A \quad (16)$$

$$H = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} B \quad (17)$$

根据线圈电感的定义, 载有电流 I 的线圈, 其各匝交链的磁通总和成为自感磁链 Ψ , 在线性媒介中, 线圈的自感磁链与其励磁电流成正比, 该比值即为元件的自感 L

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (18)$$

通过计算元件内部的磁场能量 W_m 可以确定元件的电感大小

$$L = \frac{2W_m}{I^2} \quad (19)$$

对于电容器元件, 其内部磁场能量等于不同区域磁感应强度和磁场强度矢量点乘的积分

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V H B dV \quad (20)$$

联合式(19)和(20)即可获得薄膜电容器元件的等效串联电感。

1.3 电容器元件 ESR 和 ESL 测量原理

1.3.1 ESR 和 ESL

对于金属化薄膜电容器, 其等效电路模型如图 4 所示。

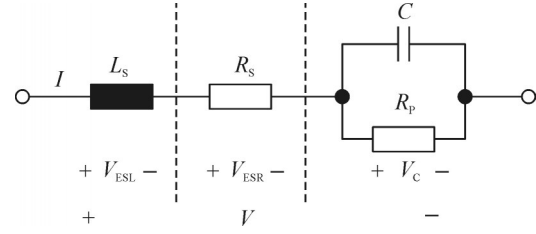


图4 薄膜电容器等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of film capacitor

图中 C 为电容器电容大小, 表征元件存储电荷的能力, R_s 为薄膜电容器等效串联电阻, 主要是由于端子引线、端部金属涂层以及薄膜表面金属电极自身电阻及接触电阻组成。在交流环境中, 电流通过 R_s 会产生显著的焦耳损耗, 导致电容器元件温度上升。 R_p 为电容器元件并联电阻, 表征介质薄膜泄露电流的大小, 对于双向拉伸聚丙烯薄膜电容器, PP 极高的电阻率产生的直流泄露电流很小, 可以忽略不计。元件内部的电流分布会诱导磁场空间分布, 产生了串联电感 L_s (ESL), 等效串联电感的大小与元件几何结构, 包括引线方式以及元件尺度直接相关。通常薄膜电容器元件的等效串联电感很小为 nH 数量级, 但在高频交流或者直流高频纹波应用环境中, 电感成为影响元件电场分布的一个重要因素。

对于如图 4 所示薄膜电容器的等效电路, 其等效阻抗 Z 大小为阻性和感性负载的矢量叠加, 阻抗大小为

$$Z = R_s + j \left[2\pi f(\text{ESL}) - \frac{1}{2\pi fC} \right] \quad (21)$$

$$|Z| = \sqrt{R_s^2 + \left(2\pi fL_s - \frac{1}{2\pi fC} \right)^2} \quad (22)$$

式中: f 为外施电源的频率大小, 由式(21)可以发现薄膜电容器的等效阻抗呈现显著的频率依赖性, 当频率较小时, 容性电抗大于感性电抗, 即

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} > X_L = 2\pi fL_s \quad (23)$$

但随着频率逐渐增大, 感性电抗成为显著因素。当容性电抗等于感性电抗时, 共振现象出现, 此时的频率为自然共振频率 f_{res}

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{CL_s}} \quad (24)$$

在共振频率下, 容性电抗与感性电抗相互抵消, 此时薄膜电容器的阻抗幅值达到最小值, 且等于元件的等效串联电阻。通过阻抗分析仪测量不同频率下元件的阻抗值, 进而获得元件的等效串联电感和等效串联电阻值。

1.3.2 元件温升试验

当施加电源频率远小于元件的共振频率下, 图 4 等效电路可以忽略等效电感的贡献, 此时元件等效

电路有电阻和电容串联而成,元件两段电压和电流相位将略小于 90° ,如图5所示。

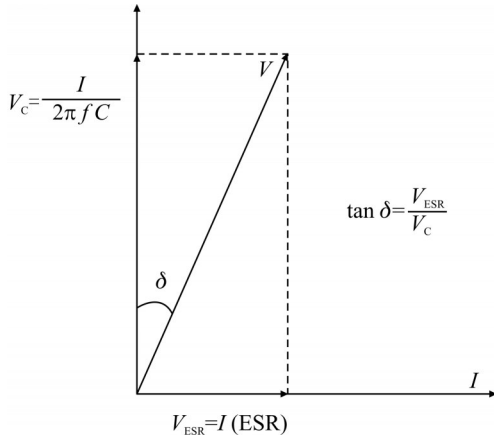


图5 元件电压和电流矢量图
Fig. 5 Vector diagram of voltage and current of capacitor elements

由损耗角正切值定义可知

$$\tan \delta = (\text{ESR})2\pi fC \quad (25)$$

损耗角正切值 $\tan \delta$ 表征元件的损耗特性,当元件通过大小为 I 的电流时,其损耗功率为

$$P = (\text{ESR})I^2 \quad (26)$$

当元件两端施加的电压为 V 时,其损耗功率为

$$P = (2\pi fC)^2 (\text{ESR})V^2 \quad (27)$$

通常采用元件温升试验来定性表征元件的损耗特性,在本研究中,元件两端施加有效值为 65 A 的交流电,使用安装在芯棒和元件表面的热电偶传感器来记录元件温度随时间的变化。传感器安装位置位于元件断面的 1/3 处,环境箱温度为 45°C ,温升试验测量平台示意图见图6。

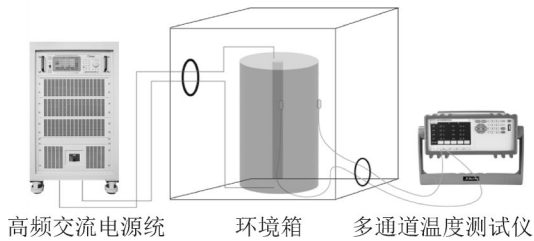


图6 薄膜电容器元件温升试验测量平台
Fig. 6 Temperature rise test platform for film capacitor elements

2 结果与讨论

2.1 金属化薄膜电容器元件电-热耦合仿真

为探究金属化薄膜电容器的损耗特性,本研究建立了电-热耦合仿真模型,计算了薄膜电极和介质中的焦耳损耗,并将其作为热源输入到固体传热物理模型中,从而分析了薄膜电容器元件在不同激励条件下的发热特性,金属化薄膜电容器电-热耦

合架构见图7。

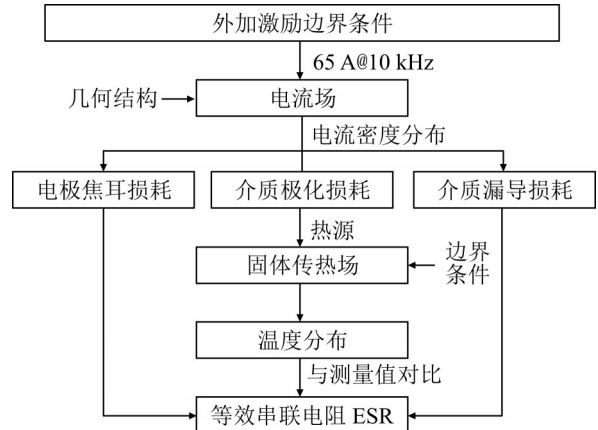
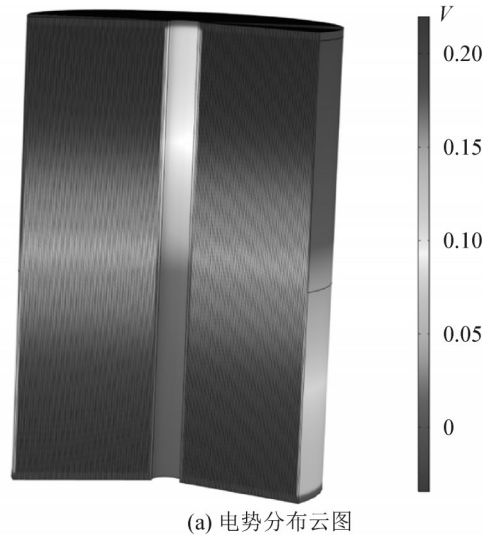
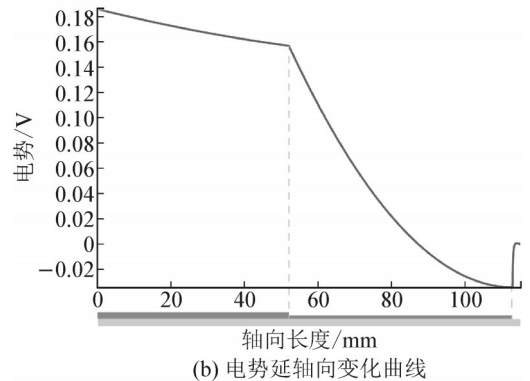


图7 金属化薄膜电容器电-热耦合架构
Fig. 7 Electrical-thermal coupling configuration of metallized film capacitor

当在电容器元件两端施加电流有效值为 65 A,频率为 10 kHz 的交流电时,元件内容的电势分布如图8所示。



(a) 电势分布云图



(b) 电势延轴向变化曲线

图8 金属化薄膜电容器薄膜电势分布
Fig. 8 Potential distribution of metallized film capacitor

元件内部的电势分布具有明显的梯度,且电势沿轴向从高电位(上面)向低电位(下面)逐渐过渡。在电极的加厚区,电导率较高,电流能够更为顺畅地通过该区域,导致电位下降较为缓慢,而在

活动区由于电导率较低,电势迅速下降,表现出较大的电场轴向梯度变化。在留白区端部电位发生突变现象主要是由于边缘效应的影响。

由于电势沿轴向存在梯度,表明薄膜电极在交流环境下会产生电流密度分布,电流的大小受电极材料和结构的影响。薄膜电极表面电流密度的分布见图9。

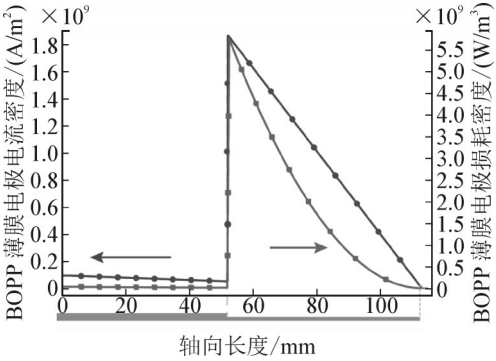


图9 金属化薄膜电容器薄膜电极表面电流密度和损耗密度分布

Fig. 9 Current density and loss density distribution on the surface of the metallized film capacitor film electrode

由图9可见,介质薄膜电极的面电流密度分布不均匀。在加厚区,由于导电性能较好,电流密度保持较低且平稳。而在电极活动区,电流密度迅速增加,达到峰值后迅速下降。这主要是由于该区域方阻较大,电极厚度减薄,导电性降低,导致电流集中,随后因微电容并联分流而逐渐下降。与电流密度密切相关,热功率密度在电流密度高峰区域也显著增加,表明该区域的焦耳热效应较强,热功率密度峰值与电流密度峰值一致。介质薄膜电极的电流密度和电极方阻共同决定了损耗密度。在加厚区,电极厚度增加,方阻减小,因而损耗密度较低;而在活动区,方阻较大,导致焦耳损耗密度增加,但随着向留边区过渡,电流密度和损耗密度呈指数规律下降。

整体来看,损耗密度在电极加厚区和活动区之间出现突变,导致元件轴线中部损耗密度达到峰值。电极和介质的损耗是元件内部发热的主要来源,进一步的计算了施加电场后不同时刻薄膜电容器元件的温度分布及变化规律见图10。金属化薄膜电容器薄膜温度分布计算与测量值对比见图11。

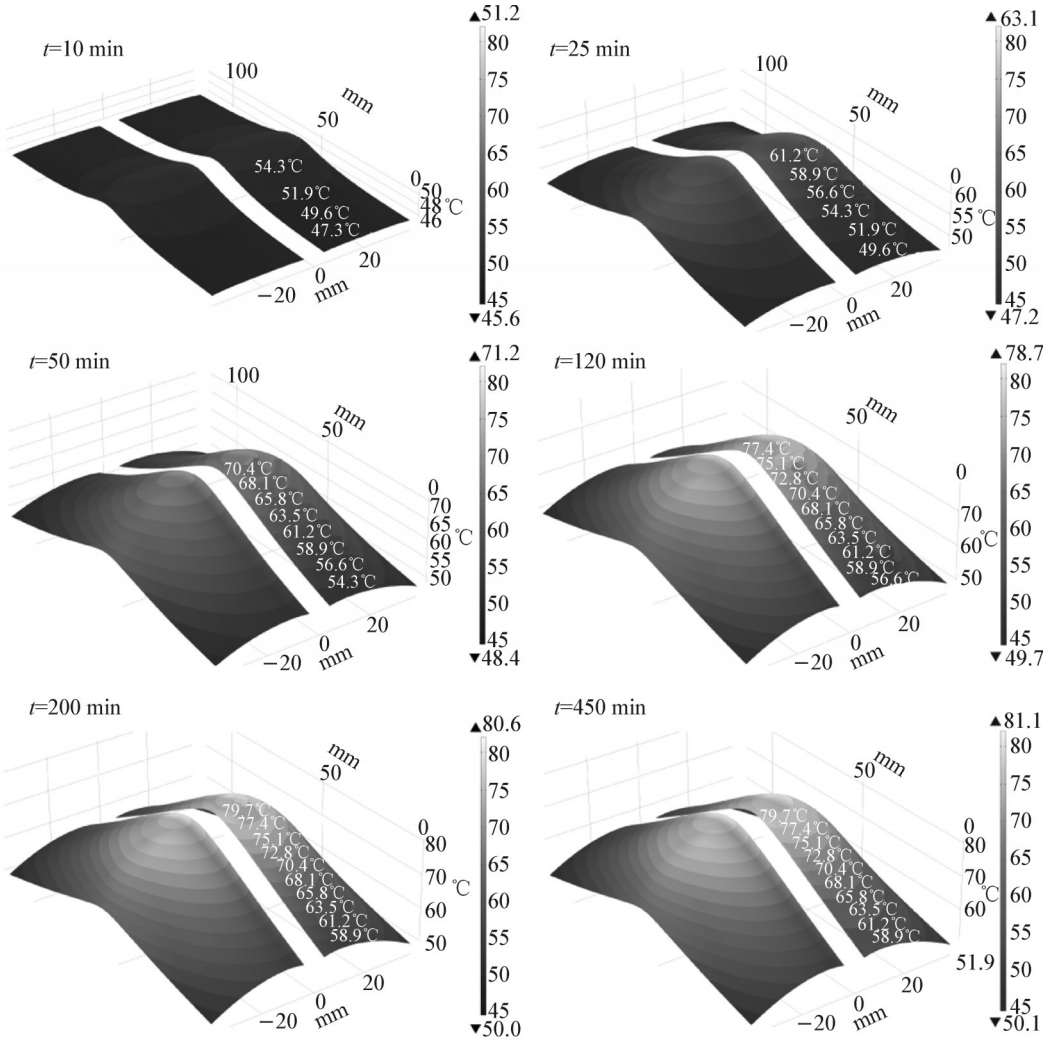


图10 不同时刻金属化薄膜电容器薄膜内部温度分布

Fig. 10 Temperature distribution inside the metallized film capacitor film at different times

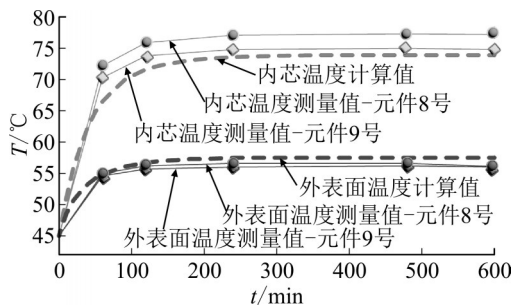


图11 金属化薄膜电容器薄膜温度分布计算与测量值对比
Fig. 11 Comparison of calculated and measured film temperature distribution of metallized film capacitors

图10展示了金属化薄膜电容器元件在不同时间点的内部截面温度分布云图, $t=0$ min时刻, 电容器内部温度为环境温度 45°C 。当电流通过薄膜电极时会产生焦耳损耗, 此外介质薄膜在交变电流的作用下也会发生电导和极化损耗, 这些因素共同构成了元件内部的热源, 引发了温度升高。如图9所示, 最大损耗密度位于元件的中部, 导致该位置的温度最高。随后, 热量沿元件的径向和轴向传递, 并通过元件表面的热对流或传导将热量释放到环境中, 最终达到稳态。在电容器元件靠近芯棒中心的位置观测到最高温度, 当 $t=5$ min、10 min、50 min、100 min、200 min、300 min 时, 元件芯棒中心最高温度分别为 51.2°C 、 55.3°C 、 71.2°C 、 77.6°C 、 80.6°C 、 81.1°C 。图11对元件的温度分布进行了数值计算与实验测量值的比较。在芯棒内表面和元件外表面, 数值计算与实验结果显示了完全一致的温度变化规律。在前100 min内, 温度急剧上升, 随后升温速率逐渐减缓, 最终达到动态平衡。在平衡状态下, 芯棒内表面的计算温度值为 73.9°C , 略低于测试值的 74.8°C (元件9号), 而元件外表面的计算温度值略高于测量值, 分别为 57.3°C 和 56.2°C (元件9号), 这一差异主要是由于电-热耦合模型在理想化条件下进行计算, 忽略了多种实际运行环境因素, 如电极电导率的温度依赖性, 边界的热传导率, 以及元件端部和引线的损耗等。随着模型中考虑更多的耦合条件, 计算值将更加接近实际测量值。整体而言, 通过温升试验证明了元件电-热耦合模型是研究元件损耗特性的有效方法。进一步计算得到该模型的等效串联电阻为 $2.02\text{ m}\Omega$, 而实测值为 $2.06\text{ m}\Omega$, 计算值和测量值具有良好的一致性。

2.2 金属化薄膜电容器元件电-磁耦合仿真

金属化薄膜电容器的结构差异导致元件内部电流密度分布的不同, 这些差异决定了内部磁场的分布特性及其变化规律。电容器两引线端子形成

的线圈所包围的磁通量与通过端子的电流之比定义了元件的电感值。在高频应用或脉冲充放电环境中, 理想情况下元件的电感应尽可能小, 以减少对电流变化的阻碍。如图1所示电容器元件引线端子和布线, 穿过线圈的磁通包括元件内部的内磁通以及元件外部维持的狭缝部分, 相应的等效电感也分为元件内部的内自感 L_i 和外部的自感 L_o 。通过建立电流场和恒定磁场的有限元模型, 我们可以测定电流为 I 时元件内部的磁场能量, 从而计算出元件的内自感值。依据电路模型, 将元件视为一个整体进行分析, 以计算出元件的外自感值。金属化薄膜电容器元件的等效电感计算框架见图12。

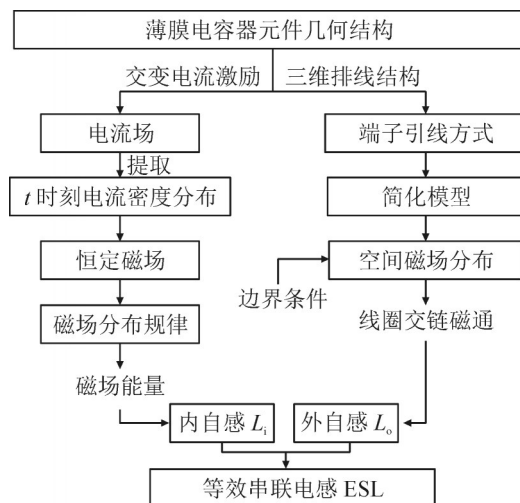


图12 金属化薄膜电容器电-磁耦合架构
Fig. 12 Electro-magnetic coupling architecture of metallized film capacitor

当在电容器两端施加幅值为 3.92 A 、频率为 1 000 Hz 的交流电时, 元件内部的电流密度分布规律见图9, 由此产生的内部磁场分布见图13。

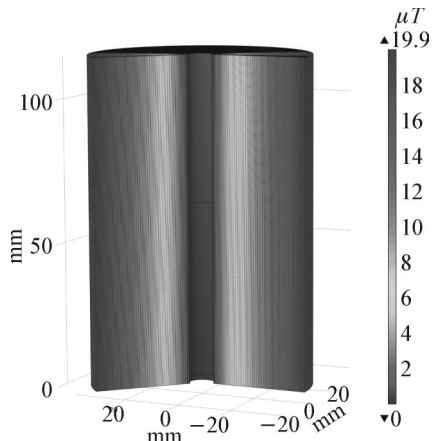


图13 金属化薄膜电容器元件内部磁感应强度分布云图
Fig. 13 Magnetic induction intensity distribution cloud diagram inside the metallized film capacitor elements

根据安培环路定理, 磁感应强度 B 沿闭合路径

的环路线积分与路径所包围的总电流成正比。而在金属化薄膜电容器中,沿径向闭合的圆周路径上包围的电流逐渐增大,因此磁感应强度 B 也持续增强,其最大值在元件外表面达到 $19.9\ \mu\text{T}$ 。磁场能量计算为不同区域的磁感应强度与磁场强度矢量点积的体积积分,结果为 $42.329\ \text{nJ}$ 。进而通过式(19)计算元件的内自感 $L_i=5.491\ 5\ \text{nH}$ 。对于元件的外部,通过线圈的磁通如图 14 所示。

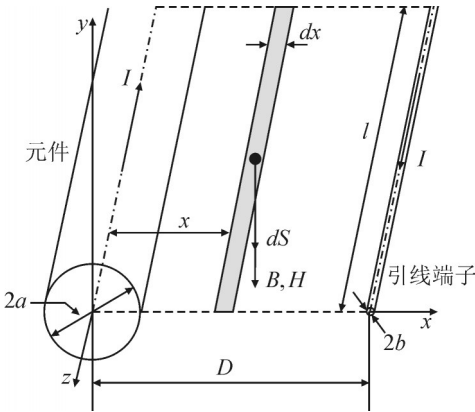


图 14 金属化薄膜电容器元件外自感计算示意图
Fig. 14 Schematic diagram of external self-inductance calculation of metallized film capacitor elements

图 14 中 $a=39\ \text{mm}$ 为薄膜电容器元件的半径, $D=42\ \text{mm}$ 为芯轴里引线端子的距离, $l=115\ \text{mm}$ 为元件的长度, $b=0.5\ \text{mm}$ 为引线端子的等效半径。由安培环路定律,在空隙距离芯轴 x 处的磁场强度为

$$H = \frac{I}{2\pi x} + \frac{I}{2\pi(D-x)} \quad (28)$$

其方向如图 14 所示。因此穿越面积元 $dS = ldx$ 的元磁通 $d\Phi = \mu_0 H l dx$, 则外磁链为

$$\Psi_0 = \int d\Phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \int_a^{D-b} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{D-x} \right) dx \quad (29)$$

由式(18)可知外自感

$$L_0 = \frac{\Psi_0}{I} \quad (30)$$

带入数据计算可得 $L_0=42.639\ 5\ \text{nH}$, 由此可知电容器元件的等效串联电感 $ESL=L_i+L_0=48.13\ \text{nH}$, 通过阻抗分析仪测量元件的等效串联电感为 $47.91\ \text{nH}$, 二者具有较好的一致性。

2.3 模型参数预测综合分析

本节分别建立了金属化薄膜电容器元件电-热耦合和电-磁耦合模型, 实现了元件等效串联电阻和等效串联电感 ESL 的数值预测。为了验证模型的有效性, 设计了温升试验和阻抗分析仪谐振测试, 并对模型计算值和试验测量值进行了全面比较, 参数对比见表 1。

表 1 金属化薄膜电容器元件性能参数对比表
Table 1 Comparison table of performance parameters of metallized film capacitor elements

性能参数	模型预测值	实验测量值	相对偏差/%
$C/\mu\text{F}$	433.09	412.74	4.93
$\tan\delta(10^{-4})@1\ 000\ \text{Hz}$	54.9	53.4	2.81
$T_{\text{in}}/^{\circ}\text{C}$	73.9	75.0	-1.47
$T_{\text{out}}/^{\circ}\text{C}$	57.3	56.2	1.96
ESR/ $\text{m}\Omega$	2.02	2.06	-1.94
ESL/ nH	48.13	47.91	0.46

根据表 1 中金属化薄膜电容器元件性能参数的对比, 可以看出模型预测值与实验测量值的相对偏差均在合理范围内, 说明仿真模型具有较高的准确性。具体来说, 电容值(C)偏差为 4.93%, 介质损耗角正切($\tan\delta$)在 $1\ 000\ \text{Hz}$ 时的偏差为 2.81%, 表明模型在电气性能预测上与实际情况接近。内部温度(T_{in})和外部温度(T_{out})的偏差分别为 -1.47% 和 1.96%, 说明模型对损耗分布的预测也较为准确。等效串联电阻(ESR)和等效串联电感(ESL)的偏差分别为 -1.94% 和 0.46%, 进一步表明仿真模型对电性能的预测较为可靠。总体来看, 仿真结果与实验结果具有良好的一致性, 验证了模型的有效性。

3 结语

本文构建了金属化薄膜电容器的电-热耦合和电-磁耦合多物理场模型, 并通过模型计算值与实验测量值的对比, 验证了模型在预测电容器关键性能参数方面的精度和可靠性。结果显示, 模型对等效串联电阻(ESR)和等效串联电感(ESL)的预测具有高度准确性: ESR 的预测值和实测值分别为 $2.02\ \text{m}\Omega$ 和 $2.06\ \text{m}\Omega$, ESL 的预测值和实测值分别为 $5.49\ \text{nH}$ 和 $5.50\ \text{nH}$ 。

电容器的介质材料与电极的几何结构对其性能产生直接影响, 尤其是在电流密度分布和内部磁场的动态响应方面。由于电容器存在电流分流效应, 介质薄膜电极的表面电流密度分布并不均匀。电极的方阻大小和电流密度分布共同决定了损耗功率的空间分布, 导致在元件轴线中部形成损耗面密度的峰值, 并使该区域的温度最高。在前 $100\ \text{min}$ 内, 温度迅速上升, 随后升温速率逐渐减缓, 最终达到热动态平衡。在平衡状态下, 计算得出的芯棒内表面温度为 $73.9\ ^{\circ}\text{C}$, 略低于实测值 $74.8\ ^{\circ}\text{C}$; 元件外表面的计算温度为 $57.3\ ^{\circ}\text{C}$, 略高于实测值 $56.2\ ^{\circ}\text{C}$, 表明模型对热传导过程的预测同样具有较高精度。对于电容器内部和外部的电磁特性, 电容器元

件的引线端子和布线中的磁通量包括元件内部的内磁通和元件外部的磁通,形成了相应的内自感和外自感。在建立的有限元模型中,当施加 3.92 A、频率为 1 000 Hz 的交流电时,计算得到的磁场能量为 42.33 nJ,内自感为 5.49 nH。通过电路模型进一步计算,得出外自感为 42.64 nH,从而得出元件的等效串联电感为 48.13 nH,验证了电磁模型在高频工况下的有效性。

综上所述,本文通过电-热和电-磁耦合模型,揭示了电容器内部的复杂物理场分布规律,包括电流密度、热损耗和磁场能量之间的相互影响机制。实现了电容器的 ESR 和 ESL 等参数的有效预测,为电容器结构设计优化,提高设备可靠性和性能提供了坚实的理论基础。

参考文献

- [1] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(1):1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebing, LI Weiwei, et al. The engineering application and development prospect of flexible HVDC technology, 2023, 47(1): 1-11.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社,2010.
- [3] PARIMALASUNDAR E, JAYANTHI R, SURESH K, et al. Investigation of efficient multilevel inverter for photovoltaic energy system and electric vehicle applications[J]. Electrical Engineering & Electromechanics, 2023(4): 47-51.
- [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] RITAMAKI M, RYTOLUTOTO I, LAHTI K. Performance metrics for a modern BOPP capacitor film[J]. Performance Metrics for a Modern BOPP Capacitor Film, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1229-1237.
- [6] 周洋. 柔性直流输电用电力电子电容器关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2018.
- [7] LI Hua, ZHANG Guohao, WANG Yucheng, et al. Dependence of polarization behaviors on electrical and thermal aging for pulse metallized polypropylene film capacitor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1553-1562.
- [8] MAKDESSI M, SARI A, VENET P. Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9/10): 1823-1827.
- [9] ZHAO Zheng, TENG Shangfu, LIU Shuo, et al. Non-uniform voltage distribution characteristics of metallized film capacitors in flexible HVDC projects[R]. Engineering Reports, 2024: 12844.
- [10] VALENTINE N, AZARIAN M H, PECHT M. Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 92(6): 123-135.
- [11] 宋家乐,张添胤,朱光宇,等. 热-应力老化作用对电容器用 BOPP 薄膜绝缘性能的影响[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(1):83-87.
SONG Jiale, ZHANG Tianyin, ZHU Guangyu, et al. Influence of thermal-stress aging on insulation performance of BOPP film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 83-87.
- [12] LIU Haoling, DU Boxue, XIAO Meng, et al. Effects of electro thermal ageing on dielectric performance of metallised biaxial orientation polypropylene film capacitors in strong magnetic fields[J]. High Voltage, 2024, 9(4): 1-9.
- [13] WANG Zijian, LU Yingjie, MA Yanfeng. Temperature rise of metallized film capacitors under AC and DC superimposed voltage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(12):3883-3891.
- [14] BARROS R C D, SOUSA R O D, AMORIM W C S, et al. On DC-link capacitor reliability in photovoltaic inverters with harmonic current compensation[C]// 2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP). Florianopolis, Brazil: IEEE,2023:1-7.
- [15] YI Chengqian, ZHANG Bo, LI Chaoran, et al. Transient current distribution among elements in metallized film capacitor for converter valves[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57:115502.
- [16] 王祥,徐佩,江龙祥,等. 薄膜电容器 ESL 研究分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2023,44(5):38-42.
WANG Xiang, XU Pei, JIANG Longxiang, et al. Study and analysis of ESL for film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 38-42.
- [17] LI Hua, HUANG Xiang, LI Zhiwei, et al. Modeling of ESR in metallized film capacitors and its implication on pulse handling capability[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55: 1046-1053.
- [18] HUSSEINI M H E, VENET P, MAJID A A, et al. Manufacturing technology effect on current pulse handling performance of metallized polypropylene film capacitors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36: 2295-2303.
- [19] 葛雪峰,姜佳宝,赵耀. 金属化膜电容器电热仿真分析[J]. 电气工程学报,2023,18(3):224-231.
GE Xuefeng, JIANG Jiabao, ZHAO Yao. Electrothermal simulation analysis of metallized film capacitor[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(3): 224-231.

- [20]左强林,雷乔舒,钟少龙,等.直流支撑电容器圆元件的散热模型与仿真研究[J].电力电容器与无功补偿, 2024,45(1):21-27.
- ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, ZHONG Shaolong, et al. Study on heat dissipation model and simulation of circular element for DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 21-27.
- [21]任卓翔,闫帅,陈志福,等.电工装备低频电磁仿真中若干关键问题研究现状及趋势[J].高电压技术, 2024, 50(3):905-923.
- REN Zhuoxiang, YAN Shuai, CHEN Zhifu, et al. State of the art and trend of several key issues in low frequency electromagnetic simulation of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 905-923.
- [22]袁发庭,杨文韬,韩毅凇,等.基于电磁-流热双向耦合的变压器绕组温升计算及结构参数优化[J].高电压技术, 2024,50(3):952-962.
- YUAN Fating, YANG Wentao, HAN Yilin, et al. Temperature rise calculation and structure optimization research of transformer winding based on electromagnetic-fluid-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 952-962.
- [23]BELKO V O, EMELYANOV O A, IVANOV I O, et al. Application of numerical simulation for metallized film capacitors electrodes design[J], IEEE Access, 2021 (9) : 80945-80952.
- [24]IVANOV I, VOLOSHIN K, KULBAKO K. Modeling of metallized film capacitors segmented electrodes electrodynamic destruction[C]// 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain: IEEE, 2020: 689-691.
- [25]DONG Qi, ZHONG Shaolong, FENG Qikun, et al. Preparation and properties of different dielectric films with Al metal electrode[J]. IET Nanodielectrics, 2022, 5(3-4): 125-131.
- [26]楼顺凯.基于电热场耦合的金属化薄膜电容器建模方法研究[D].无锡:江南大学,2023.
- [27]王流火,姚成,胡泰山,等.金属化膜电容器温升计算与优化[J].电力电容器与无功补偿, 2023, 44(6):67-72.
- WANG Lihuo, YAO Cheng, HU Taishan, et al. Calculation and optimization of temperature rise of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(6): 67-72.
- [28]李浩波,李化,张国豪,等.基于共轭梯度法的金属化薄膜电容器热点温度反演[J].高电压技术, 2024,50(9): 4163-4170.
- LI Haobo, LI Hua, ZHANG Guohao, et al. Hot-spot temperature inversion for DC-link capacitors based on conjugate gradient method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9):4163-4170.

作者简介:

钟少龙(1988—),男,助理研究员,主要从事电力设备多物理场耦合仿真和破坏机制研究。E-mail:slzhong@mail.tsinghua.edu.cn。

方立龙(1984—),男,技术总监,主要从事有机薄膜电容器设计与制备。E-mail:lilong.fang@eaco.com。

王昕劼(1999—),男,博士,主要从事聚丙烯薄膜结构性能耦合机制调控研究。E-mail:wxj21@mails.tsinghua.edu.cn。

党智敏(1969—),男,教授,主要从事先进能源电工材料与器件研究。E-mail:dangzm@tsinghua.edu.cn。