

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.03.002

引用格式:张正,杜林,陈伟根,等.电容器宽频等效模型与损耗分析[J].重庆大学学报,2026,49(3):13-24.



电容器宽频等效模型与损耗分析

张正¹,杜林¹,陈伟根¹,惠世贤²

(1. 重庆大学输变电装备技术全国重点实验室,重庆 400044;

2. 云南电网有限责任公司文山供电局,云南文山 663000)

摘要:电力电容器承担着无功补偿、滤波、载波和高频保护的功能,实际施加在电力电容器上的电压含有大量谐波成分,导致电容器的损耗特性更为复杂。为了获取谐波电压下电容器的有功损耗规律,结合电容器实际结构,提出基于扩展 Debye 模型的电容器宽频分布式等效模型,推导电容器极板电压、电流解析表达式,分析极板电压、电流分布特性,考虑极板损耗与介质损耗,开展有功损耗分布研究,研究表明:谐波电压使流经电容器极板的电流幅值增大,在极板上呈现非线性分布;随着电压频率提升,电容器有功损耗显著提升,且在高频段,极板损耗在总有功损耗中占据绝对主导地位;提出通过增加电压输入点、均匀极板电流分布的方法,可有效降低电容器有功损耗。

关键词:电力电容器;谐波;等效模型;有功损耗

中图分类号:TM855

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)03-013-12

Wideband modeling and loss analysis of power capacitors under harmonic voltages

ZHANG Zheng¹, DU Lin¹, CHEN Weigen¹, HUI Shixian²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Wenshan Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Wenshan, Yunnan 663000, P. R. China)

Abstract: Power capacitors are widely used for reactive power compensation, harmonic filtering, carrier transmission, and high-frequency protection in power systems. In practical operating conditions, the voltage applied to power capacitors contains significant harmonic components, resulting in complex loss characteristics. To accurately characterize the active power losses of capacitors under harmonic voltages, a wideband distributed equivalent model based on the extended Debye model is proposed, taking into account the actual physical structure of the capacitor. Analytical expressions for the voltage and current distributions on the capacitor plates are derived, and their spatial characteristics are systematically analyzed. By considering both electrode (plate) losses and dielectric losses, the distribution of active power loss within the capacitor is investigated, and the corresponding rules are summarized. The results indicate that harmonic voltages increase the amplitude of the current flowing on the capacitor plates, leading to a nonlinear current distribution. Moreover, as the voltage

收稿日期:2024-02-04

作者简介:张正(1999—),男,硕士研究生,主要从事电力电容器在线状态监测研究,(E-mail)norzz@sina.com。

通信作者:杜林,男,博士,教授,(E-mail)dulin@cqu.edu.cn。

frequency increases, the active power loss of the capacitor rises significantly, and in the high-frequency range, the plate losses become the dominant contributors to the total active power loss. Based on these findings, a loss reduction strategy is proposed, in which the number of voltage input points is increased to promote a more uniform electrode current distribution, thereby effectively reducing the active power loss of the capacitor.

Keywords: power capacitor; harmonic voltage; wideband equivalent model; active power loss

在电网能源转型背景下,随着新能源并网比例提高、超/特高压直流换流站大量建设,电力电子设备在电网中的占比持续提升,非线性器件与负载使电网设备承载电压更为复杂^[1]。与传统的纯工频正弦电压不同的是,在这类复杂波形中,除工频基波外,通常还存在频谱分布广和谐波分量含有率较高等问题,给设备的绝缘状态分析与评估带来新的挑战。

电力电容器是电力系统中的重要电力设备,承担着无功补偿、交直流滤波等功能^[2],其常见的内部结构由多个电容芯子呈串联、并联或串并联方式排布。电力电容器运行在更为复杂的工况下,故障率显著提高^[3],其运行状态直接影响了电力系统的稳定性。因此,保证电力电容器安全稳定运行显得至关重要。

电容器的有功损耗对于电容器的温度与介质老化程度起关键性作用,从而影响着电容器的绝缘状态。电容器在运行中产生的有功损耗主要分为介质损耗、内熔丝损耗、导线和极板损耗^[4]。谐波电压对电容器绝缘介质损耗具有增强效应^[5],电容器极板上流经的电流在增大的同时,其不均匀程度也在增大,从而极板损耗也随之增大。损耗将体现为介质的热效应,其增大则会引起温度上升^[6],不均匀的损耗分布带来温度场的不均匀变化,影响着电容器介质的绝缘状态,严重情况下可能造成绝缘性能的降低,甚至导致设备的损坏^[7]。易承乾等^[8]对单个电容器元件开展宽频下的阻抗特性研究,发现高频段电容器内部不同位置电流分布不同。柴斌等^[9]对高压滤波电容器元件建立了理论模型,得到了电容器元件的损耗角正切和电容量均随着频率的增加先减小后增加的结论。Wang等^[10]对交直流叠加电压下的金属化薄膜电容器研究发现,随频率增大,导体损耗显著增加。刘书铭等^[11]通过串联电抗率不同的电抗器,使电容器承受不同畸变率、有效值和峰值的电压,测量电容器容值及介质损耗的变化。Matsumori等^[12]则对电容器在PWM逆变器激励下的非线性损耗特性作出了分析。

目前对电容器损耗的已有研究,多采取单一RC并联模型^[13],忽略了谐波电压下的电容器的宽频响应特性,或采用整体等效的方法进行分析,将极板上的电流视为线性分布^[14-15],忽略了电容器内部电压电流分布特性对损耗计算带来的影响。因此,文中主要针对谐波电压作用下的电力电容器建立分布式宽频等效模型并推导损耗规律,并就此模型提出了降低电容器损耗的方法。

1 电容器宽频等效模型

在交变电压作用下,流经电容器两接线端的传导电流使正负电荷在电容器两侧极板上聚集,极板电荷量也周期性变化形成极板电流;而电容器绝缘介质(如油浸绝缘纸或膜)受电容器极板上的周期性变化的电场影响,其中的分子或原子中的正负电荷发生周期性偏移,形成位移电流。因此,电容器有功损耗主要由极板损耗和介质损耗构成。电容器结构与电气参数示意图如图1所示。

1)极板损耗:电流流经极板产生有功损耗。由于谐波电压提供高频率并增大了极板电流的幅值,极板损耗也随之增大。

2)介质损耗:由介质中的电导损耗和有损极化导致的极化损耗组成。在谐波电压的影响下,介质损耗也随之增大,施加在电容器上的电压富含多次谐波分量,多频率的谐波带来不同的有损极化过程。

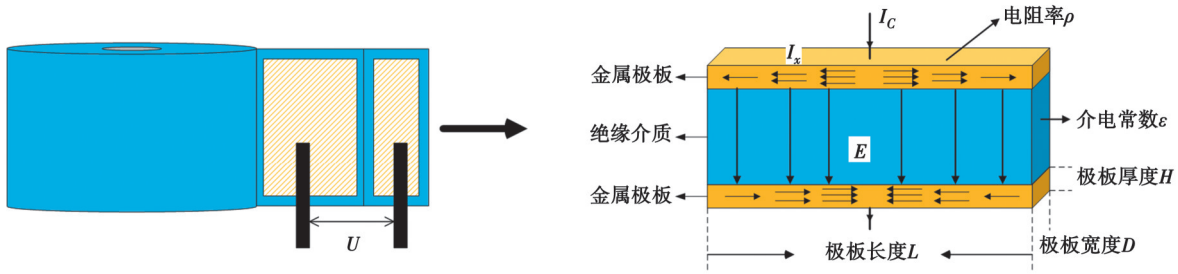


图 1 电容器结构与电气参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of power capacitor structure and parameter

1.1 电介质宽频特性的扩展 Debye 模型

电力电容器按介质材料类型可分为油纸绝缘电容器、金属膜电容器等^[16],常见的电容器介质为油纸复合材料和聚丙烯,金属化薄膜电容器因其高可靠性在近年得到广泛应用^[16-17]。原始 Debye 模型通过单一的 RC 结构描述电介质的有损极化过程。但电容器电介质的微观介电过程十分复杂,在谐波电压的作用下,其内部存在拥有不同弛豫时间的有损极化过程。为此,拓展 Debye 模型通过并联多条阻容支路来表征多个极化过程,更好地体现了复合电介质在宽频下介电特性,同时考虑了电介质的无损极化过程和电导^[18]。在拓展 Debye 模型中, C_0 代表电容器体现出的几何电容量, R_0 表示绝缘电阻,表征电介质的电导过程,多条阻容串联支路代表不同松弛时间的多种弛豫极化,拓展 Debye 模型如图 2 所示。

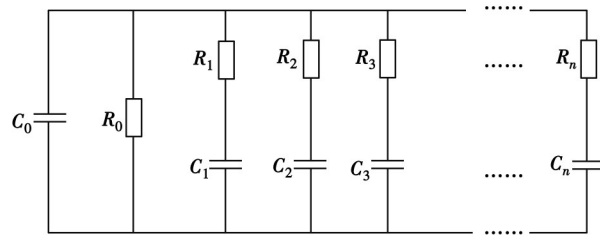


图 2 扩展 Debye 模型

Fig. 2 Extended Debye model

1.2 电容器宽频等效模型

扩展 Debye 模型可以反映多频段下电容器的极化过程,在此基础上,为了准确获取在谐波电压下的电容器极板上电压电流分布特性,在考虑极板电阻均匀分布的情况下,采取分布参数电路方法分析电容器,因上下极板的电压电流分布情况相同,将上下极板的电阻与电感集成,建立等效模型如图 3 所示。

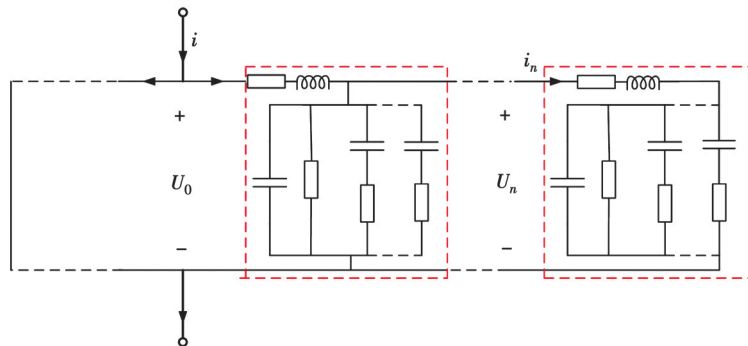


图 3 电容器等效模型

Fig. 3 Capacitor equivalent model

对图3中电容器等效模型进行微分化处理,如图4所示,并根据微分结构,进行电压电流分布推导。

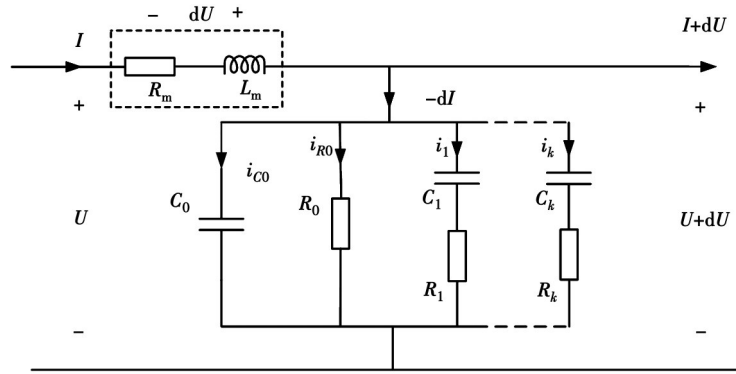


图4 电容器等效模型微分段

Fig. 4 Differential segment of capacitor equivalent model

图中: R_m 为单位长度的极板电阻; L_m 为单位长度的极板电感; C_0 代表单位长度上具有一定结构的绝缘主体和无损极化所体现出的几何电容量; R_0 为单位长度的绝缘电阻。单位长度下, k 由极化电容 C_k ,极化损耗电阻 R_k 组成极化损耗支路。

1.3 谐波电压下电容器电压、电流分布特性分析

对于电容器分布式宽频等效模型的分析,需要从微分段入手,根据电路结构得到有关极板电压电流的微分方程,再进一步推导得到整个电容器的电压电流分布特性。

定义参数: Z 反映了单位长度上电容器介质的总导纳,由主电容、绝缘电阻和极化支路共同组成, $Z = R_m + j\omega L_m$, G 反映了单位长度上电容器介质的总导纳,由主电容、绝缘电阻和极化支路共同组成, $G = j\omega C_0 + \frac{1}{R_0} + \sum_{i=1}^k \frac{j\omega C_i}{j\omega C_i R_i + 1}$, x 代表计算位置。

由电容器等效模型微分段电路结构可得:

$$d\dot{U} = \dot{I}Zdx, \quad (1)$$

$$d\dot{I} = \dot{U}Gdx. \quad (2)$$

将式(1)、式(2)两端再次对 x 微分得到:

$$\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} = Z \frac{d\dot{I}}{dx}, \quad (3)$$

$$\frac{d^2\dot{I}}{dx^2} = G \frac{d\dot{U}}{dx}. \quad (4)$$

将式(1)和式(2)代入式(3)和式(4),并化简可得到 \dot{U}, \dot{I} 关于 x 的微分方程:

$$\frac{d^2\dot{U}}{dx^2} = ZG\dot{U}, \quad (5)$$

$$\frac{d^2\dot{I}}{dx^2} = ZG\dot{I}. \quad (6)$$

求解式(5)和式(6)并代入边界条件 $x=0$ 时, $\dot{U} = \dot{U}_0$, $x=l$ 时, $\dot{I} = 0$,可得到 \dot{U}, \dot{I} 的解析表达式为

$$\begin{cases} \dot{I}_x = A_2 \dot{U}_0 \sqrt{\frac{G}{Z}} e^{-\sqrt{ZG}x} - A_1 \dot{U}_0 \sqrt{\frac{G}{Z}} e^{\sqrt{ZG}x}, & 0 < x < l; \\ \dot{U}_x = A_1 \dot{U}_0 e^{\sqrt{ZG}x} + A_2 \dot{U}_0 e^{-\sqrt{ZG}x}, & 0 < x < l; \\ A_1 = \frac{1}{1 + e^{2\sqrt{ZG}l}}, A_2 = \frac{e^{2\sqrt{ZG}l}}{1 + e^{2\sqrt{ZG}l}}, & 0 < x < l. \end{cases} \quad (7)$$

式(7)反映了在电容器极板长度为 l ,同时电压信号由电容器一端输入时,电容器极板上的电压电流分布

情况的解析表达式。在实际情况下,电压输入信号多由极板中间位置注入,此时可将电容器一分为二,分别计算信号注入点两侧的电压电流分布。

1.4 谐波电压下电容器损耗计算

电容器型元件损耗主要由极板损耗和介质损耗构成,在谐波电压的影响下,电容器内部的电压电流分布情况会发生变化,极板损耗和介质损耗也会随之增大。在计算损耗时,根据上文推导得出的电压电流分布公式,可计算得到电压由单侧输入时各个位置的总损耗、极板损耗和介质损耗。取在电容器极板上的点 x ,计算其所在位置的损耗密度与到电容器极板末端的损耗($0 < x_1 < l$),计算表达式如下:

极板损耗密度与有功损耗表达式为

$$\begin{cases} p_m = I_x^2 \cdot R_m, \\ P_m = \int_x^l I_x^2 \cdot R_m dx. \end{cases} \quad (8)$$

介质损耗密度与损耗表达式为

$$\begin{cases} p_d = \frac{\dot{U}_x}{R_0} + \dot{U}_x \cdot \operatorname{Re} \left[\dot{U}_x \cdot \sum_{i=1}^k \frac{j\omega C_i}{j\omega C_i R_i + 1} \right], \\ P_d = \int_x^l \frac{\dot{U}_x}{R_0} + \dot{U}_x \cdot \operatorname{Re} \left[\dot{U}_x \cdot \sum_{i=1}^k \frac{j\omega C_i}{j\omega C_i R_i + 1} \right] dx. \end{cases} \quad (9)$$

总有功损耗表达式为

$$P = \dot{U}_x \dot{I}_x \cos\varphi_x. \quad (10)$$

1.5 多频电压下损耗计算

对于富含多次谐波的复杂电压,在完成谐波分解后,复杂电压的时域波形可表示为

$$U(t) = \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n e^{j\omega_n t + \varphi_n} \right], \quad (11)$$

式中: U_n 为谐波第 n 次谐波的有效值; ω_0 为基波角频率; φ_n 为第 n 次谐波的初相位。基于电容器等效模型的宽频特性,在非正弦周期电压下产生的介质损耗即为各次谐波下介质损耗的叠加,根据各次谐波的电压大小及频率,代入文中的损耗计算公式,即可得到电容元件在复杂电压下的损耗。

2 谐波电压下电容器电压电流分布与损耗计算

以金属膜类电容器芯子为计算对象,极板材质为铝箔,介质材质为聚丙烯,根据推导出的电容器电压电流分布公式和损耗计算公式,对谐波电压影响下的电容器宽频损耗特性进行计算分析。

2.1 等效模型电路参数获取与设置

电容器等效模型中单位长度上的电路参数获取是计算前的必要准备,即极板电阻 R_m 、极板电感 L_m 、几何电容 C_0 、绝缘电阻 R_0 、极化损耗电阻 R_k 和 k 条极化支路包含的极化电容 C_k 。

单位长度的极板电阻,极板电感可直接由总极板电阻 R_{mT} 、电感 L_{mT} 计算得到

$$R_m = 2 \times \frac{R_{mT}}{l}, \quad L_m = 2 \times \frac{L_{mT}}{l}. \quad (12)$$

在获取电容器介质参数时,可以测得整体介质的介电谱,文中采用了DIRANA介电响应分析仪,对电容器试样进行了介电响应测试,电容器芯子宽度为0.14 m,铝箔极板厚度为4 μm ,使用直径为8 cm、厚度为2 cm的铜电极夹在电容器试样两侧,通过加厚极板消除极板电阻给介电谱测试带来的影响,如图5所示。

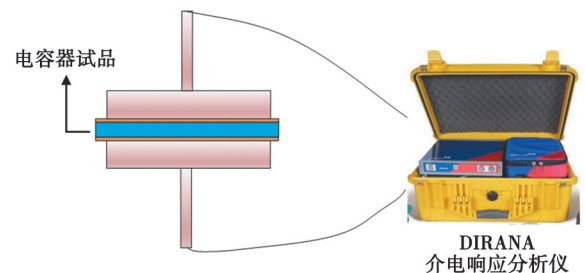


图5 介电响应测量平台

Fig. 5 Dielectric response measurement platform

通过上述测试平台,测试得到的介电谱数据如图6所示。

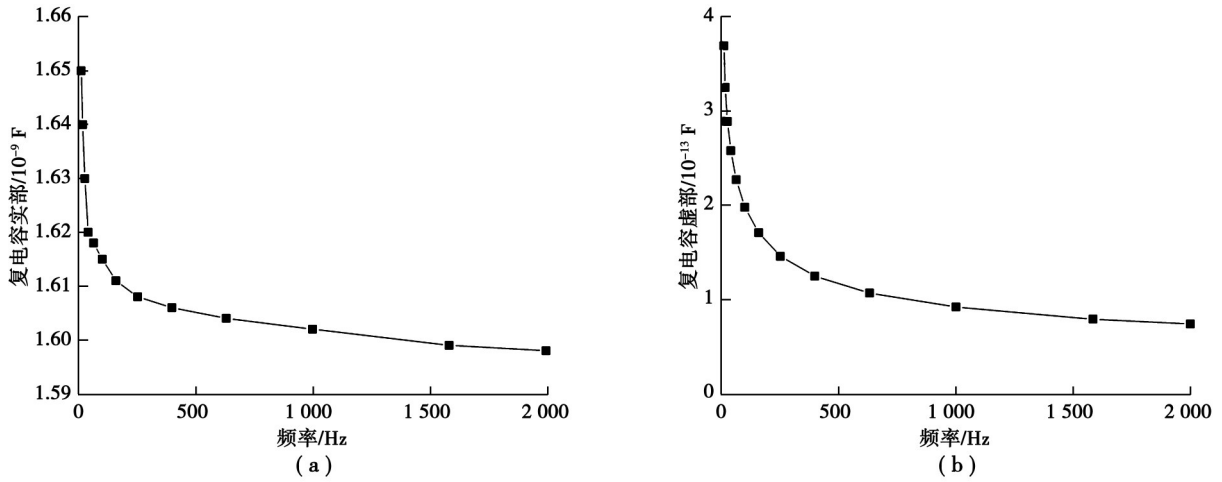


图6 复电容测试结果

Fig. 6 Results of complex capacitance

所测得的介电谱数据反映了以8 cm为直径的圆形电容器介质的介电特征,需要将其数据向长度为1 m、宽度为0.14 m的电容器介质进行归算,从而得到单位长度的电容器介质参数。

$$j\omega C^* = \frac{1}{Z} = j\omega C + \frac{1}{R}, \quad (13)$$

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi kd}, R = \rho \frac{L}{S}. \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可知,电容器介质的复电容实部与虚部在介质宽度、厚度与材质不变的前提下,与面积成正比,可以将图6中的介电谱数据归算后得到的介电谱数据如图7所示。

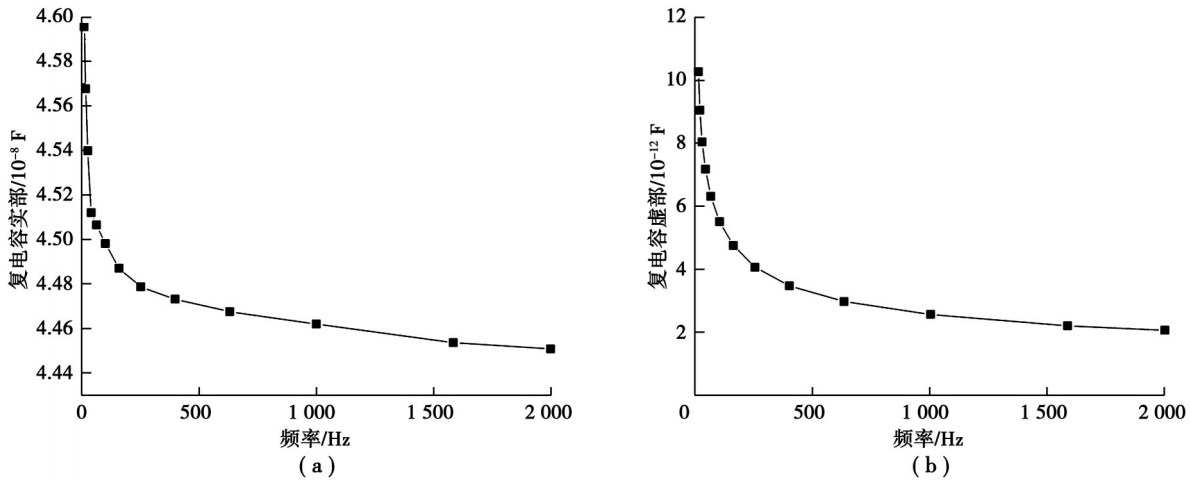


图7 单位长度复电容计算结果

Fig. 7 Results of complex capacitance per meter

经过计算,将极化支路数选为3条,便可在较高精度下得到其宽频特性,通过对得到的介电谱数据进行极化支路数为3的参数辨识^[9],通过对获取到的介电谱数据进行计算,同时测得极板电阻、电感参数,得到电容器电路参数见表1所示。

表 1 电容器分布式参数
Table 1 Distributed parameter for capacitor

电路参数	数值	电路参数	数值
极板电阻 R_m/Ω	0.12	阻容支路 1 电容 C_1/F	9.19×10^{-12}
极板电阻 L_m/H	1×10^{-9}	阻容支路 2 电阻 R_2/Ω	1.77×10^8
主电容 C_0/F	4.49789×10^{-8}	阻容支路 2 电容 C_2/F	4.73×10^{-12}
绝缘电阻 R_0/Ω	2.17×10^9	阻容支路 3 电阻 R_3/Ω	3.646×10^7
阻容支路 1 电阻 R_1/Ω	5.76×10^8	阻容支路 3 电容 C_3/F	2.96×10^{-12}

2.2 极板电压电流分布特性计算与分析

基于上述电容器等效模型开展,施加电压幅值为 5 kV,通过改变施加电压的频率,极板上的电压、电流分布情况如图 8 所示。

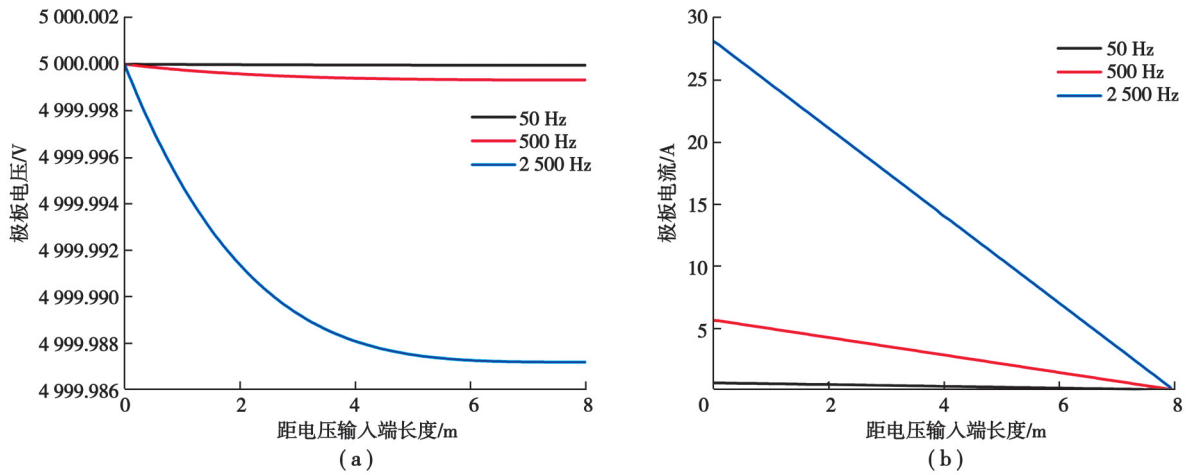


图 8 不同电压频率下的极板电压、电流分布

Fig. 8 Distribution of plate voltage and current at different voltage frequencies

由图 8 可知,极板电流在电压注入处达到最大值,并在极板末端衰减至 0。随着电压频率的增大,极板上的电流数值也随之增大,极板最大电流由 50 Hz 下的 0.565 A 增大到 2 500 Hz 下的 28.226 A,在施加电压不变,仅改变电压频率的前提下,极板最大电流增大了近 50 倍。图 9 描述了在电容器极板长度不同的情况下极板最大电流与最大压降的变化。由图 9 可知,极板最大电流与极板长度呈现线性关系,极板长度越长,极板最大电流越大。同时,极板上的电压分布同样受注入电压的频率影响,随着电压频率的增大,极板上的电压压降也随之增大;同时,随着极板长度的增加,极板上的电压压降也随之增加。

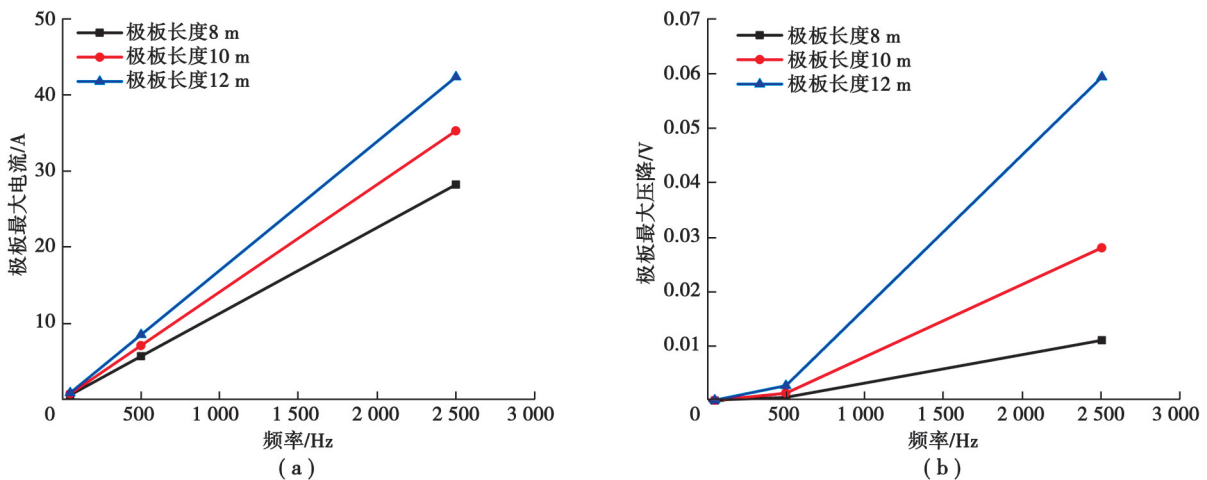


图 9 不同频率、不同极板长度下的极板最大电流和最大压降

Fig. 9 Maximum current and voltage drop at different frequencies and plate lengths

电力电容器在电力系统中运行时,也会承受脉冲电压和雷电压的影响,其电压波形在一定时间维度下可视为高频谐波电压的叠加复合,其频率范围可上升至兆赫兹。分别计算 5 kV 电压频率为 50、 2.5×10^6 、 5×10^6 Hz 下的极板电流分布,并以各自极板最大电流 0.558、12 577.42、16 155.224 A 进行标定,得到极板电流标么值分布如图 10 所示。在超高频率下,极板电流数值迅速增大的同时,其在极板上的分布也呈现出了明显的非线性,且电流分布的不均匀度随频率加大而显著提升。

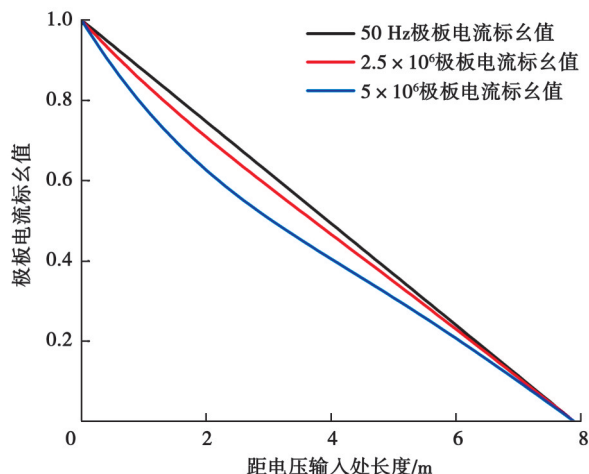


图 10 多频率下极板电流标么值

Fig. 10 Plate current p.u. under different frequencies

2.3 电容器有功损耗计算与分析

极板损耗与介质损耗与极板上电压电流分布密切相关,其损耗数值与损耗比例受谐波电压频率的影响。在幅值为 5 kV,频率为 500 Hz 电压输入下,对极板长度为 8 m 的电容器芯子进行计算,损耗功率随极板长度的累积和损耗功率密度如图 11 所示。

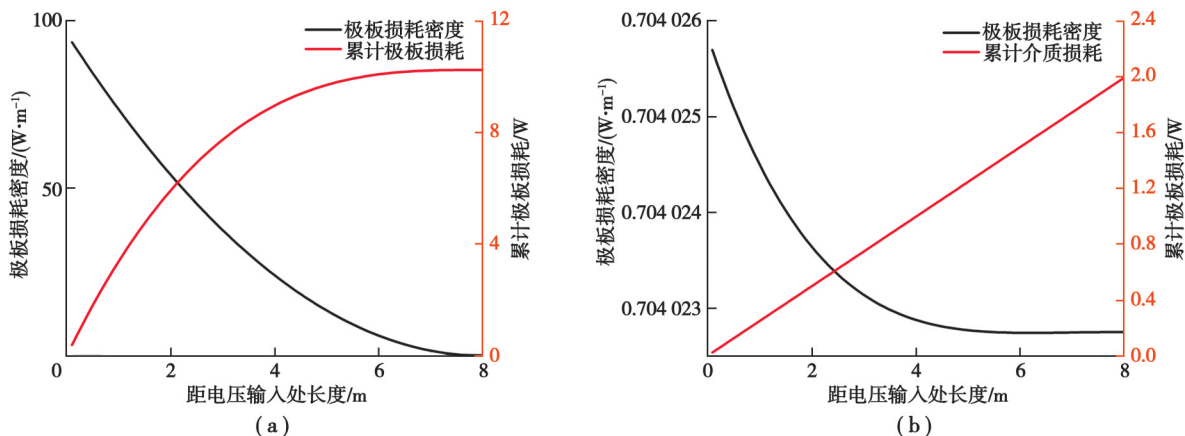


图 11 谐波电压(500 Hz)下的各损耗与损耗密度

Fig. 11 Losses and loss densities under harmonic voltage (500 Hz)

由图 11 可分析得出,在 500 Hz 的谐波电压下,电容器的有功损耗由极板损耗主导,极板损耗占总有功损耗的 83%。极板有功损耗与极板电流的平方正相关,随着距电压输入端距离增加,极板上电流数值降低,极板有功损耗密度也急剧下降。反之,介质损耗主要由极板电压决定,在 500 Hz 电压下,极板电压变化不明显,因此介质损耗密度变化微弱,介质损耗基本随极板长度呈线性分布。

在不同频率下,计算极板长度为 8 m 的情况下,极板有功损耗和介质有功损耗的总值,如图 12 所示。由图 12 可知,极板有功损耗和介质有功损耗均随频率的增加而增加,但随着频率增大,极板有功损耗增加率也

随之增加,而介质有功损耗增加率则随之减少,因此,电压频率越高,极板损耗变化越剧烈,介质损耗则增长缓慢。

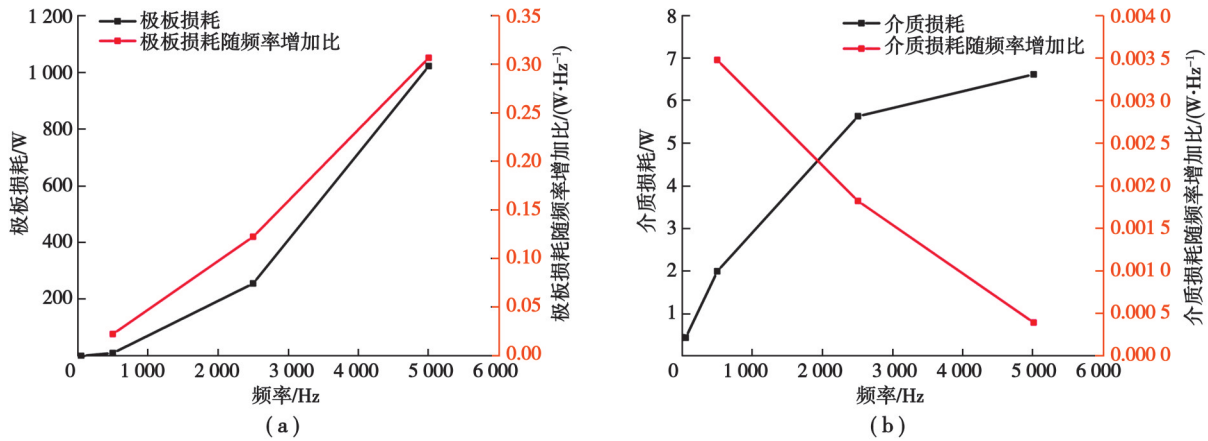


图 12 多频率谐波电压下的极板损耗和介质损耗对比

Fig. 12 Comparison between plate loss and dielectric loss under multi frequency harmonic voltage

图 13 为介质损耗和极板损耗所占总功损耗的比例随频率的变化。由图可知,在工频 50 Hz 电压作用下,介质损耗占主导地位,随着频率增大,极板损耗所占比例也随之增大,并在高频段超过介质损耗所占比例,成为主导电容器损耗的主要因素。

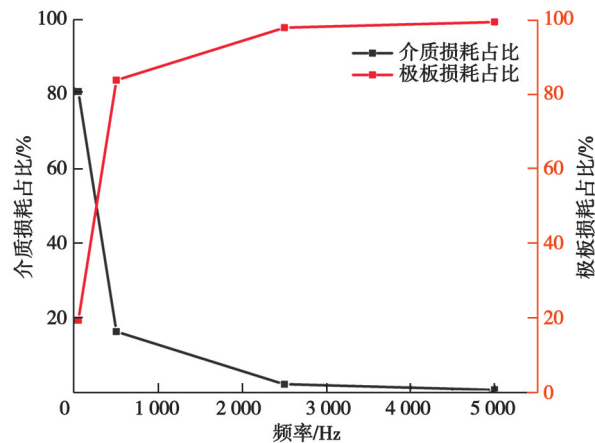


图 13 各损耗占总功损耗比例

Fig. 13 Proportion of each loss component in the total active power loss

3 电容器有功损耗降低措施

在考虑电容器的有功损耗的过程中,计算损耗的同时也要考虑如何降低损耗。电容器极板损耗分布主要受极板电流分布影响,因此,通过添加 1 个电压源的输入点可以改善极板电流分布,降低极板电流幅值,达到降低电容器损耗的目的。在 2 个电压源的几何中点位置,电流为零,极板上的电流电压分布情况也发生了改变,如图 14 所示。

为了与文中的分析保持一致,将电容器极板长度设置为 8 m,设定注入电压幅值为 5 kV,使用电压注入位置

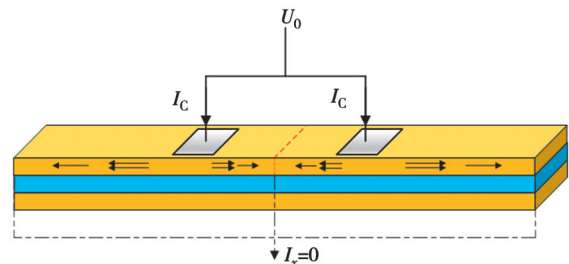


图 14 电压双端输入示意图

Fig. 14 Schematic diagram of power capacitor structure

为1、5 m处,以及2、6 m处来分别代表两电压注入位置对称与不对称的情况,以分析电压电流的分布趋势。电压电流分布情况如图15所示。

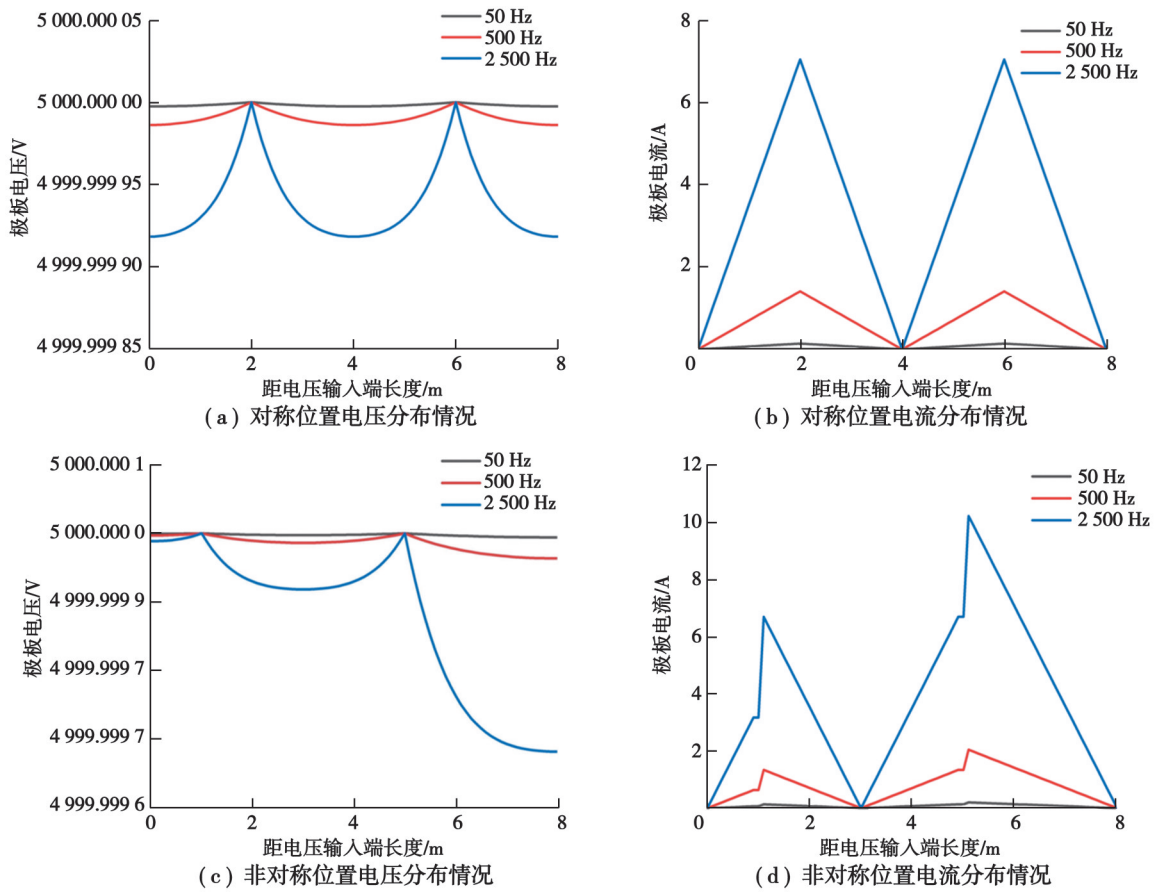


图15 双端输入下电压电流在不同频率下的分布特性

Fig. 15 Voltage and current distribution characteristics under dual input at different frequencies

由电压电流分布特性可知,通过增加1个电压注入点,可以显著减少电容器极板电流和极板电压压降,进一步计算出多种双端输入(对称,非对称)情况下的总损耗与单端输入的总损耗比较如图16所示。

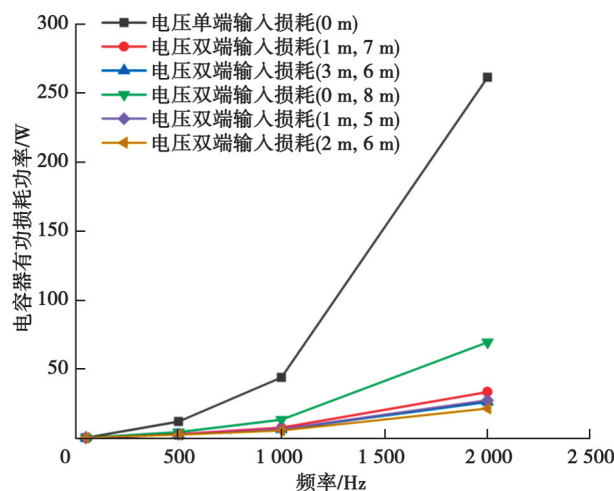


图16 不同输入方式的总损耗

Fig. 16 Total loss of different input methods

通过增加一个电压注入点,可以显著减少电容器的有功损耗,且将2个输入位置放置于对称位置时的损耗值低于非对称位置,且当2个电压输入位置分别位于极板长度1/4、3/4处(即2、6 m)时,达到相对于单端输入最大的有功损耗衰减。随着频率的增加,采取双端输入的电容器损耗相较于单端输入的减少比例也随之增加,即在谐波电压影响下,双端输入的方法对于降低电容器损耗的效果将更加显著,图17为电压注入点位于2、6 m时,损耗减少比例随频率变化趋势。

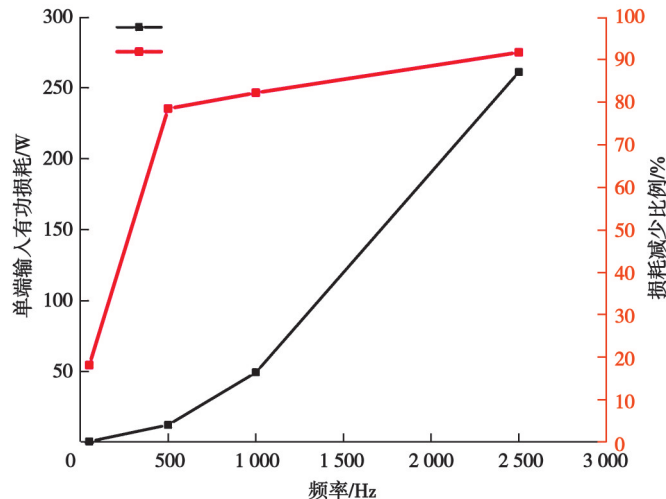


图17 随频率增加电容器损耗减少比例变化

Fig. 17 Variation in the proportion of capacitor loss reduction with increasing frequency

4 结论

文中通过建立电力电容器宽频等效模型,分析了谐波电压作用下电容器极板上的电压电流分布特性,并讨论了介质有功损耗与极板损耗随谐波电压频率,分析结果如下:

1)极板上的电压与电流分布均受谐波电压频率影响,极板电流的变化更为显著,其最大值在谐波影响下较工频最高可提升50倍,使得极板上的电流分布更为不均匀,并在极高频电压下呈现出非线性特征。

2)谐波电压作用下的介质损耗与极板损耗均有显著提升,且随着谐波电压的频率增大,极板损耗占总损耗的比例持续增大,并逐渐占据主导地位。

3)可以通过增加一个电压注入点的方式改善谐波电压影响下极板电流的不均匀程度,从而可以降低电容器的有功损耗,高频段可降低90%以上。

参考文献

- [1] 邵振国,许昊铂,肖颂勇,等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
Shao Z G, Xu H B, Xiao S Y, et al. Harmonic problems in a new energy power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187. (in Chinese)
- [2] 房金兰. HVDC输电工程中各种电容器的用途和技术特点[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4): 6-12, 21.
Fang J L. Applications and technical characteristics of various capacitors for HVDC power transmission projects[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4): 6-12, 21. (in Chinese)
- [3] 张照辉,徐江涛,刘子全,等. 一起特高压换流站交流滤波电容器故障分析与思考[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 47-52.
Zhang Z H, Xu J T, Liu Z Q, et al. Fault analysis and consideration on AC filter capacitor at UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 47-52. (in Chinese)
- [4] 王振河,陈天,咸日常,等. 电力电容器常见故障分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 42-46.
Wang Z H, Chen T, Xian R C, et al. Analysis of common faults and preventive measures for power capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 42-46. (in Chinese)

- [5] 王威望, 李睿喆, 何杰峰, 等. 快速陡脉冲重复电场下高频变压器绝缘介质损耗与冲击能量积聚特性[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1206-1216.
Wang W W, Li R Z, He J F, et al. Dielectric loss and impact energy accumulation of high frequency transformer insulation under rapidly repetitive pulsed voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1206-1216. (in Chinese)
- [6] 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 X H, Hu D, Zhang C Y, 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. (in Chinese)
- [7] 程璐, 李志元, 王镜然, 等. 高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8955-8965.
Cheng L, Li Z Y, Wang J R, et al. Mechanism study on the failure of metallized film capacitor under HVDC field superimposed harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8955-8965. (in Chinese)
- [8] 易承乾, 李超然, 张波, 等. 金属化膜电容元件宽频特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 164-168.
Yi C Q, Li C R, Zhang B, et al. Study on broadband characterization of metallized film capacitor element[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 164-168. (in Chinese)
- [9] 柴斌, 史磊, 吴鹏, 等. 高压滤波电容器元件损耗的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 43-47.
Chai B, Shi L, Wu P, et al. Research on power loss of high voltage filter capacitor elements[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 43-47. (in Chinese)
- [10] Wang Z J, Lu Y J, Ma Y F. Temperature rise of metallized film capacitors under AC and DC superimposed voltage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(12): 3883-3891.
- [11] 刘书铭, 李琼林, 余晓鹏, 等. 谐波强度对电容器损耗影响的试验研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 169-173.
Liu S M, Li Q L, Yu X P, et al. Experimental research of harmonic intensity effect on capacitor loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 169-173. (in Chinese)
- [12] Matsumori H, Kosaka T, Matsui N, et al. Loss evaluation of aluminum electrolytic capacitor under power electronics converter excitation[C]//2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). March 15-19, 2020, New Orleans, LA, USA. IEEE, 2020: 2666-2670.
- [13] Liu Y, Wang H, Huang M, et al. Simplified power loss model for aluminum electrolytic capacitors in single-phase inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4452-4456.
- [14] 李长云, 刘超群, 于永进. 重频大电流下金属化膜脉冲电容器温升累积效应研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 2068-2076.
Li C Y, Liu C Q, Yu Y J. Study on cumulative effect of temperature rise of metallized film pulse capacitor under repeated frequency and high current[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 2068-2076. (in Chinese)
- [15] 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 L H, Yao C, Hu T S, et al. Calculation and optimization of temperature rise of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(6): 67-72. (in Chinese)
- [16] Zhang Y X, Feng Q K, Zhong S L, et al. Digital twin accelerating development of metallized film capacitor: Key issues, framework design and prospects[J]. Energy Reports, 2021, 7: 7704-7715.
- [17] Gnonhou O G, Velazquez-Salazar A, David É, et al. Review of technologies and materials used in high-voltage film capacitors[J]. Polymers, 2021, 13(5): 766.
- [18] 杜林, 冉鹏蔓, 蔚超, 等. 基于扩展德拜模型的油纸绝缘受潮频域特征量研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3051-3058.
Du L, Ran L M, Wei C, et al. Study on frequency domain characteristics of moisture in oil-paper insulation based on extended Debye model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3051-3058. (in Chinese)
- [19] 杜林, 杨峰, 蔚超, 等. 基于频域介电谱的油纸绝缘宽频等效模型参数辨识研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1158-1166.
Du L, Yang F, Wei C, et al. Parameter identification of the wide-band model of oil-impregnated paper insulation using frequency domain spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1158-1166. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)