

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.06.004

谐波相位影响的电压幅值对高压并联电容器温升特性影响研究

祝令瑜, 孙启明, 沈柯宇

(西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049)

摘要:针对高压并联电容器在谐波环境下的运行工况,本文开展了谐波电压幅值对电容器热稳定温升特性的影响研究。通过搭建热稳定试验平台,在环境温度恒定为 30℃ 的条件下,对电容器施加基波叠加不同相位 3 次谐波的电压组合,保证电流有效值和谐波频率不变,通过谐波相位调整合成电压幅值,从而解耦电压对介质损耗的影响。采用卡尔曼滤波算法对温度测量数据进行滤波,基于温升变化率提取热稳定温升值。试验结果表明,在谐波相位为 180° 时合成电压幅值最大,电容器温升最高;在相位为 0° 时合成电压幅值最小,温升最低,验证了电压幅值对介质损耗和温升的影响。本研究为高压并联电容器在谐波环境下的热稳定性评估提供了理论依据与实验支撑。

关键词:高压并联电容器;谐波相位;电压幅值;介质损耗;热稳定温度

Research on the Influence of Voltage Amplitude Affected by Harmonic Phase on the Temperature Rise Characteristics of High Voltage Shunt Capacitors

ZHU Lingyu, SUN Qiming, SHEN Keyu

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: As for the the operation conditions of high-voltage shunt capacitors in harmonic environments, in this paper the influence of harmonic voltage amplitude on the thermal stability temperature rise characteristics of capacitors is studied. Through setting up thermal stability test platform and at the condition of constant ambient temperature at 30 ℃, a voltage combination of undamental waves superimposed with 3rd-order harmonics at different phases is applied to the capacitors. While maintaining constant current RMS value and harmonic frequency, the synthezized voltage amplitude is adjusted by varying the harmonic phases, thereby decoupling the influence of voltage on dielectric loss. The temperature measurement data is filtered by using a Kalman filter algorithm, and the thermal stability temperature rise value is extracted based on the temperature rise variation rate. The test result shows that in case of harmonic phase at 180°, the amplitude of synthezized voltage is maximum and the temperature rise of the capacitors is the highest. While in case of phase at 0°, the the amplitude of synthezized voltage is minimum and the temperature rise of the capacitors is the lowest. The findings confirm the influence of voltage amplitude on dielectric loss and temperature rise. The research in this paper provides both theoretical base and experimental support for assessing thermal stability performance of high-voltage shunt capacitors in harmonic conditions.

Keywords: power capacitor; harmonic phase; voltage amplitude; dielectric loss; thermal stability and temperature

0 引言

随着我国新型电力系统建设进程不断推进,

电力电子开关器件在电网中广泛应用,光伏、风电等新能源接入电网比例不断提高,电力系统中的谐波成分更加复杂,且谐波水平不断增加,对电力

收稿日期:2025-05-20

基金项目:国家电网公司总部科技项目(交流滤波电容器噪声控制新材料及应用深化研究,5500-202449134A-1-1-2N)。

设备的可靠运行造成严重威胁^[1-2]。高压并联电容器是电网中重要的无功补偿设备,起着提高功率因数、稳定系统电压重要作用,在电网中广泛应用。由于电网内谐波水平不断增加,高压并联电容器运行环境中也存在高比例谐波,导致设备运行过程中发热加剧,内部温度升高,电容器缺陷、故障率也逐步升高^[3-13]。因此,研究高压并联电容器在谐波环境下的温升特性对保证设备安全运行十分重要。

高压并联电容器通常采用聚丙烯薄膜作为介质^[14-15],研究显示,电容器介质材料工作在 80℃ 以上时,根据 Arrhenius 公式,内部温度每提高 8℃,电容器热寿命将缩短一半,同时介质材料的热老化严重时还会引起介质击穿,导致电容器损坏^[16-21]。李化等人研究了交流高压金属化膜电容器的温升特性,使用 COMSOL 对电容器整机进行建模,计算结果显示,应用于交流场合的金属化膜电容器,介质损耗发热功率大于金属电极发热功率。并探究了膜厚、膜宽和元件摆放方式对电容器温升的影响^[22-23]。然而,仿真过程中的假设条件会引入计算误差,不能准确获得电容器内部温升特性。吴永利等人分析了电力电容器损耗,比较了不同额定电压选取时工频和谐波工况下损耗的归算情况,并开展了不同谐波条件下电容器的热稳定试验,获得了工频叠加单次谐波电压下电容器温升特性^[24]。孙启明等人针对高压并联电容器在多谐波工况下的热稳定温度影响因素进行了研究,基于变电站实际运行数据进行测量分析获取电容器典型谐波工况,分别对电容器施加单频和典型谐波工况进行热稳定试验,结果表明,保持电流有效值 I 不变,当电压频率 f 升高时,在低频段,由于电压 U 降低,导致电容器介质损耗减小,热稳定温度下降;在中高频段,电容器介质损耗变化较小,由于趋肤效应导致电容器单元导体损耗增加,导致电容器单元热稳定温度升高^[25]。

现行标准对电容器的温升试验是在工频条件下开展的^[26-27],但实际工程中电容器通常运行在谐波环境下。现有研究重点探究了谐波工况下电容器的导体损耗,分析了谐波频次对电容器的温升影响规律,但对频率、电流和电压对电容器的影响并没有解耦。本文搭建了电容器样机热稳定试验测试平台,通过改变谐波相位保证电流和频率不变的情况下,研究电压对介质损耗的影响,进而获得电压对电容器温升特性的影响规律。

1 谐波环境下电容器发热分析

高压并联电容器由电容器心子、内熔丝、放电能

阻和汇流排等附件组成,电容器在谐波环境下的发热主要有两部分组成:电容器内部金属的导体发热和电介质的介质损耗发热^[28-29]。电容器内导体发热主要包括心子铝箔电极、内熔丝、放电电阻、内部汇流排及焊点在电流流过时的金属损耗发热,主要与电流有效值大小有关,导体发热功率 P_m 计算公式为

$$P_m = \sum I_n^2 R \quad (1)$$

式中: I_n 为 n 次谐波电流有效值; R 为电容器内部金属导体等效串联电阻。

电容器的介质损耗主要是由电介质在交变电场下引起的极化损耗产生,聚丙烯内部的极化类型主要分为电子位移极化、离子位移极化、偶极子极化以及空间电荷极化。其中,位移极化为无损极化,不消耗能量;偶极子极化发生在聚丙烯的非结晶区,在电容器承受的谐波频次内不受频率变化的影响;空间电荷极化是由电介质中被束缚的载流子有限制的迁移, Dissado-Hill QDC 模型电荷跳跃示意图见图 1。

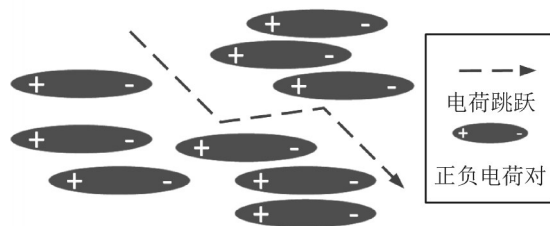


图1 Dissado-Hill QDC 模型电荷跳跃示意图
Fig. 1 Schematic diagram of charge hopping in the Dissado-Hill QDC model

由图 1 所示,其可以用 Dissado-Hill QDC 模型解释^[30-32],即:在电介质中,若正、负电荷之间的耦合作用不够强,则电荷可以在某些有限制的通道上较为自由的跳跃,其描述的是在低频段内电荷沿着某些有限制的路径通过电荷跳跃的形式进行运动。Dissado-Hill QDC 模型描述的低频弥散现象与电导过程不同,电导过程没有电荷储存,不会导致介质极化率实部 $\chi'(\omega)$ 发生变化。这种电荷跳跃机制受场强影响较大,当介质承受场强较高时,迁移电荷数量更多、电荷跳跃范围更大,其产生的能量损耗也对应增加。宏观上表现为电容器承受电压幅值越大,其介质损耗 P_d 越高。即

$$P_d = \sum U_n^2 \omega_n C \tan \delta \quad (2)$$

式中: U_n 为 n 次谐波电压有效值; ω_n 为 n 次谐波角频率; $\tan \delta = f(U_{amp})$ 为电压幅值的函数。

在保持谐波组合不变、电流有效值相等的条件下,通过改变谐波相位改变电压幅值,由上述分析可知,电容器仅介质损耗变化,通过测量电容器在不同情况下的温升特性,即可获得电压高压并联电容器温升特性的影响规律。

2 热稳定试验方案

本文以 BAM2.28-16.5-1W 电容器样机为测试对象,通过在电容器内部预埋 PT1000 热偶测试热稳定温度,热偶布置在电容器元件中间位置,使用多频合成电源对电容器施加额定电压 U_N 的基波,并叠加不同相位谐波含量为 20% 的 3 次谐波激励,每种工况下施加电流大于 48 h,并记录电容器全程热稳定温度数据,通过判断最后 6 h 内电容器温度变化是否小于 1 K 来确定电容器是否达到热稳定。工况加载条件如表 1 所示,在该条件下,电容器受容值、频率和电压电流有效值影响的导体损耗和介质损耗保持不变,因此可以排除频率、电流有效值的干扰,使电容器温升主要反映介质损耗随电压幅值的变化。

表 1 电容器热稳定试验加载条件
Table 1 Loading conditions for thermal stability test of capacitors

电压频次组合	3次谐波相位
1+3	0°
1+3	90°
1+3	180°

不同谐波相位情况下组合电压幅值变化情况如图 2 所示,由图 2 中可知,当 3 次谐波相位为 180° 时,合成电压幅值最大;3 次谐波相位为 0° 时,合成电压幅值最小,小于 U_N 基波下的电压幅值。

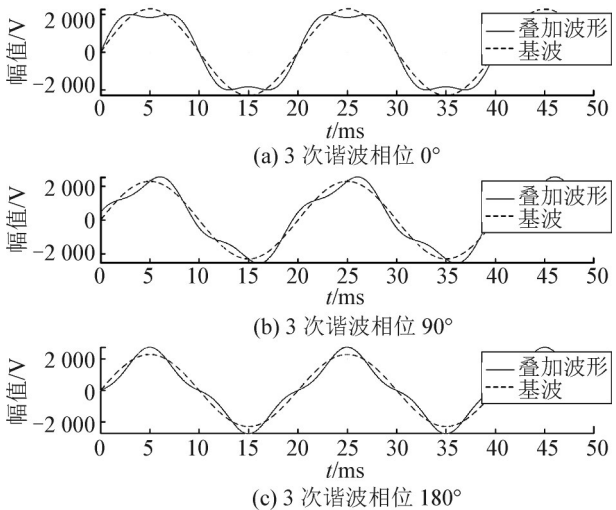


图 2 不同谐波相位合成电压波形与幅值
Fig. 2 Synthesized voltage waveforms and amplitudes under different harmonic phases

3 试验结果分析

为开展高压并联电容器热稳定特性测试,将待测电容器置于恒温箱内,环境温度设定为 30℃。在该条件下分别施加多种工况电压,并在电容器达到热稳定后,记录其长时间运行过程中的温度测量数据。为降低测试数据中的测量噪声,本文采用卡尔曼滤波算法对原始温度数据进行去噪处理,并根据温升变化率判定设备的热稳定温升值。不同工况下的温升曲线如图 3 所示。

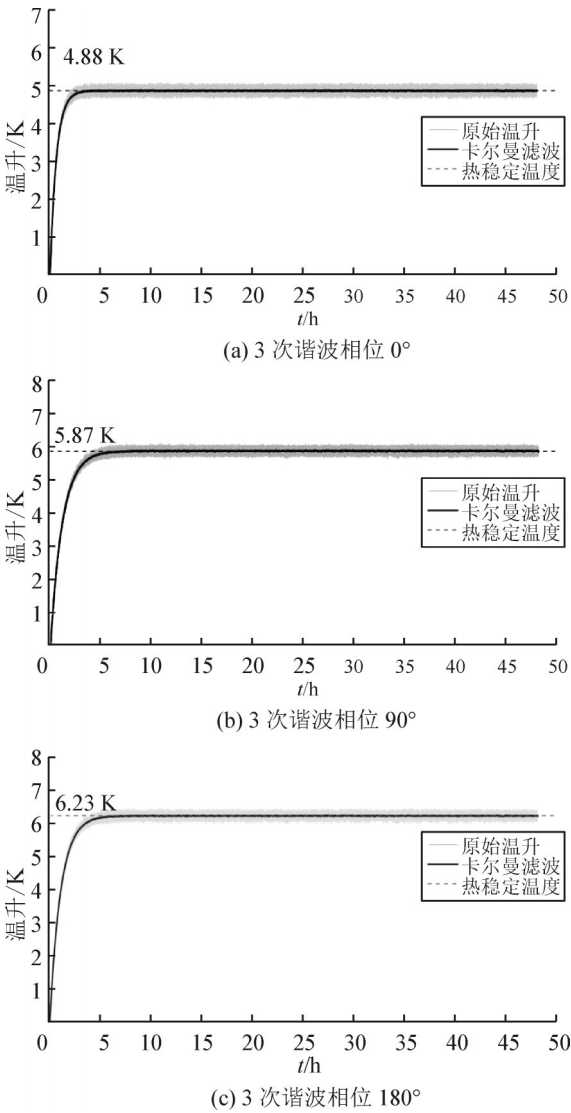


图 3 不同谐波相位下电容器热稳定温升
Fig. 3 Thermal stability temperature rise of capacitors under different harmonic phases

卡尔曼滤波是一种基于线性系统状态空间模型的递推估计算法,能够在存在高斯噪声的测量环境下实现对系统状态的最优估计。其核心思想是在每一时刻结合系统的预测值与观测值,利用协方差加权策略动态修正当前状态,从而有效抑制测量

噪声并保持对动态趋势的响应能力。在本文中,卡尔曼滤波被用于对温升时序数据进行实时去噪处理,以提高信号平滑性和热稳定判断的准确性。相较于简单滑动平均法,卡尔曼滤波在保留温升变化趋势的同时有效抑制了突发干扰,从而更适用于长时间监测中温升曲线的处理与热稳定温度的提取。在热稳定性评估方面,通过判断最后 6 h 内电容器温度变化是否大于 1 K 来判定热稳定状态,并根据卡尔曼滤波后温升数据提取稳态阶段的平均温升值,作为电容器热稳定温升值。

由图 3 可知,电容器在 3 次谐波相位为 180° 时温升最高,为 6.23 K,其次是谐波相位为 90° 时温升为 5.87 K,在谐波相位为 0° 时电容器温升最低,温升仅有 4.88 K,最高与最低温升差为 1.35 K。由图 2 可知,谐波相位为 180° 时同样是组合电压幅值最高的工况,与电容器温升结果规律匹配。为区分相位与测量误差对温升差异的影响,本文对每种相位工况在稳态阶段选取 N 组测量结果计算热稳定温升的均值与标准差,并据此估计测量不确定度,以此评估相位变化引起温升差异的显著性。取 $N=600$,传感器测量误差 $a=0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,B 类标准不确定度包含因子 $k_B=\sqrt{3}$,扩展不确定度覆盖因子 $k=2$,计算得到 3 种工况下不确定度 A 类标准不确定度 μ_A 、B 类标准不确定度 μ_B 、合成标准不确定度 μ_C 与扩展不确定度 U 分别如表 2 所示。在 20% 3 次谐波条件下,180°、90° 与 0° 3 种相位条件下的稳态温升差为分别为 0.36 K、0.99 K、1.35 K,均显著大于扩展不确定度,表明测量温升数据差异显著,非测量误差导致。

表 2 不同谐波相位下温升测量不确定度
Table 2 Measurement uncertainty of temperature rise under different harmonic phases

谐波相位	μ_A	μ_B	μ_C	U
0°	0.003 7	0.057 7	0.057 8	0.115 6
90°	0.004 8	0.057 7	0.057 9	0.115 8
180°	0.003 0	0.057 7	0.057 8	0.115 6

Dissado-Hill QDC 模型指出,聚丙烯介质中的空间电荷极化过程会受到外加场强(即电压幅值)的显著影响。尽管谐波电流的有效值保持恒定,但当谐波相位变化导致合成电压幅值不同,电介质承受电场强度亦随之改变,从而引起电荷跳跃范围和迁移电荷数量发生变化,导致介质损耗功率变化,并最终影响高压并联电容器热稳定温升。因此,实验中观察到的温升差异可由介质对场强响应的非线性行为予以解释。进一步地,Dissado-Hill QDC 模型

指出,低频条件下的介质极化与损耗并非简单的线性响应,而是由簇内弛豫与簇间电荷迁移的复合过程共同决定,其表现形式为对电场强度的幂律依赖。这意味着即便基波与谐波电流的有效值保持恒定,不同相位下合成电压波形的峰值与形状也会改变介质在高场区域的“驻留时间”,从而显著影响电荷相关的输运过程。换言之,相位差异通过调节瞬时电场来改变介质损耗水平,因此在有效值一致的前提下,仍会表现出明显的温升差异。

电容器样机的热平衡过程可近似表示为

$$\Delta T=R_{th}P_{loss} \tag{3}$$

式中: R_{th} 为电容器热源到外壳散热间的等效热阻,主要由样机的散热结构和对流换热条件决定; P_{loss} 为电容器等效热源功率,在电流有效值和谐波组合不变情况下,只随电压幅值变化。因此,在达到热平衡后,电容器温升与功率损耗之间保持线性关系,因此,介质损耗的变化会直接反映为温升的变化。

由于电容器样机内仅包含 3 个电容器元件,内部介质发热较少,且电容器样机的散热效率较高,因此内部温升比电容器在实际工程中的温升低,温升变化范围小,但可以对电压幅值对电容器介质损耗的影响进行解耦说明:保持谐波组合和电流有效值不变的情况下,电压幅值升高,电容器介质损耗越大,导致电容器的温升越高。

4 结语

本文通过热稳定试验研究了谐波电压幅值对高压并联电容器热稳定温升的影响规律。试验结果表明,在保持电流有效值和谐波频率不变的条件下,合成电压幅值随 3 次谐波的相位变化,从而引起电容器介质损耗和热稳定温升的变化,验证了电压幅值是影响电容器温升的重要因素。未来研究可考虑不同电容器结构参数对温升响应的耦合效应,并构建更精确的等效热模型,为电容器设计与温度场计算提供理论支持。

参考文献

[1] 舒印彪,陈国平,贺静波,等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学,2021,23(6):61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[2] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and pros-

- pects for constructing the new-type power system towards a Carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8):2806-2819.
- [3] 沈文琪. 温度、电压、谐波、涌流等对电容器寿命的影响[J]. 电力电容器, 2005, 26(2):6-8.
- [4] 沈文琪. 并联电容器的可靠性与温度的关系[J]. 电力电容器, 1987(4):14-21.
- [5] 谢化安, 黄德华, 曾江, 等. 东莞电网谐波对并联无功补偿电容器危害分析[J]. 高压电器, 2012, 48(12):6-11. XIE Hua-an, HUANG Dehua, ZENG Jiang, et al. Analysis of harmonic harm to the reactive power compensation capacitors in dongguan grid[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12):6-11.
- [6] 邓于可, 唐金叶, 卢金钊, 等. 特高压换流站交流滤波器电容器发热故障研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1):16-22. DENG Yuke, TANG Jinye, LU Jinzhao, et al. Study on heating failure of AC filter capacitor at UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):16-22.
- [7] 左强林, 雷乔舒, 严浩, 等. 浅议直流支撑电容器中的空间电荷问题[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1):23-28. ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, YAN Hao, et al. Discussion on space charge in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):23-28.
- [8] 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 Shuming, LI Qionglin, YU Xiaopeng, et al. Experimental research of harmonic intensity effect on capacitor loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):169-173.
- [9] 马维勇, 陈薪羽. 一起谐波放大对并联电容器损坏的案例分析[C]// 2017年电网节能与电能质量论文集. 贵阳: 陕西省电网节能与电能质量技术学会, 2017.
- [10] 左强林, 雷乔舒. 电容器不同介质结构直流和交流试验电压比值的理论研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1):29-34. ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Theoretical study on DC-AC test voltage ratio of different dielectric systems in capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):29-34.
- [11] 刘长春. 高压电容器在特定谐波条件下的温升研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [12] 董家读, 马献乐, 叶红权, 等. 10 kV 电容器谐波放大的分析与仿真[J]. 陕西电力, 2013, 41(11):86-89. DONG Jiadu, MA Xianle, YE Hongquan, et al. Analysis and simulation of harmonics amplification in 10 kV capacitor[J]. Smart Power, 2013, 41(11):86-89.
- [13] 刘生辉. 并联电力电容器过电压分析与仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [14] 湛海涯, 信建伟, 王忠辉. 电力电容器用聚丙烯薄膜微观结构对性能的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1):45-51. ZHAN Haiya, XIN Jianwei, WANG Zhonghui. Research on influence of micro structure of polypropylene film of power capacitor on its performance[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):45-51.
- [15] 钟少龙, 方立龙, 王昕劫, 等. 金属化薄膜电容器元件电-磁-热耦合特性仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3):51-60. ZHONG Shaolong, FANG Lilong, WANG Xinjie, et al. Simulation of electric-magnetic-thermal coupling characteristics of metallized film capacitor elements[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3):51-60.
- [16] 李琦, 李曼茜. 高温聚合物薄膜电容器介电材料评述与展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9):3105-3123. LI Qi, LI Manxi. High temperature polymer dielectrics for film capacitors: review and prospect[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9):3105-3123.
- [17] 叶润峰, 裴家耀, 郑明胜, 等. 高介电聚丙烯基纳米复合薄膜介电及储能性能抗老化特性[J]. 电工技术学报, 2020, 35(16):3529-3538. YE Runfeng, PEI Jiayao, ZHENG Mingsheng, et al. Anti-aging characteristics of dielectric and energy storage of high dielectric polypropylene based nanocomposite films[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16):3529-3538.
- [18] 刘宏博, 程璐, 徐哲, 等. 热老化对电容器用聚丙烯薄膜结构及电学性能的影响[J]. 绝缘材料, 2023, 56(2):96-103. LIU Hongbo, CHENG Lu, XU Zhe, et al. Influence of thermal ageing on structure and electrical properties of polypropylene film for capacitors[J]. Insulating Materials, 2023, 56(2):96-103.
- [19] 唐庆祝, 陈松, 郭德良, 等. 基于国产金属化膜的高储能密度脉冲电容器研制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1):52-58. TANG Qingzhu, CHEN Song, GUO Deliang, et al. Development of high energy storage density pulse capacitor based on localized metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):52-58.
- [20] 高煦轲, 常曦文, 全殿杰, 等. 基于分子动力学的聚丙烯电热应力老化特性分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1):88-94. GAO Xuke, CHANG Xiwen, TONG Dianjie, et al. Analysis of electrothermal stress aging characteristics of polypropylene

- based on molecular dynamics[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1):88-94.
- [21] 左强林, 葛昌晶, 雷乔舒. 卷绕工艺对直流支撑电容器圆元件膜层间压强的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1):66-71.
- ZUO Qianglin, GE Changjing, LEI Qiaoshu. Study on influence of winding process on inter-layer pressure of cylindrical element film in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):66-71.
- [22] 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.
- [23] 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 metallized film capacitors based on conjugate gradient method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9):4163-4170.
- [24] 吴永利, 国江, 冯春林, 等. 电力电容器在工频与谐波条件下的热稳定性能研究[J]. 高压电器, 2025, 61(1):136-144.
- WU Yongli, GUO Jiang, FENG Chunlin, et al. Research on thermal stability performance of power capacitor under power frequency and harmonic condition[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1):136-144.
- [25] 孙启明, 祝令瑜, 盖斌. 多谐波工况下高压并联电容器热稳定温度影响因素研究[J/OL]. 高压电器, 1-7[2025-05-16].
- SUN Qiming, ZHU Lingyu, GAI Bin. Research on the influence factors of thermal stability temperature of high voltage shunt capacitor under multi - harmonics condition[J/OL]. High Voltage Apparatus, 1-7[2025-05-16].
- [26] 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]. 2017.
- Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1:General :GB/T 11024. 1—2019[S]. 2017.
- [27] 高压并联电容器使用技术条件:DL/T 840—2024[S]. 2024.
- Technical specification of high-voltage shunt capacitors:DL/T 840—2024[S]. 2024.
- [28] 陈伟, 严飞, 王子建, 等. 特高压工程用并联电容器单元热稳定性[J]. 高电压技术, 2018, 44(6):1853-1860.
- CHEN Wei, YAN Fei, WANG Zijian, et al. Thermal stability performance of shunt capacitor unit for UHV project[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6):1853-1860.
- [29] LIANG Yanping, WANG Dongmei, GAO Lianlian, et al. Calculation of temperature field in power capacitor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5):2788-2794.
- [30] 梁曦东, 高岩峰, Dissado L A. Dissado-Hill模型在电介质介电响应分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21):6002-6011.
- LIANG Xidong, GAO Yanfeng, DISSADO L A. Application of the Dissado-Hill model in the analysis of dielectric response[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21):6002-6011.
- [31] DISSADO L A, HILL R M. Anomalous low-frequency dispersion near direct current conductivity in disordered low-dimensional materials[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics, 1984, 80(3):291-319.
- [32] DISSADO L A, HILL R M. A cluster approach to the structure of imperfect materials and their relaxation spectroscopy[J]. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1983, 390(1798):131-180.
- 作者简介:**
- 祝令瑜(1988—), 男, 教授, 主要从事滤波电容器振动机理与降噪措施、柔性直流输电 MMC 子模块状态监测技术、高压直流输电工程主设备状态评价等相关工作。
- 孙启明(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事新型电力系统中电容器电热特性及其失效风险评估等相关工作。E-mail: sunqiming@stu.xjtu.edu.cn。
- 沈柯宇(2003—), 男, 本科, 主要从事谐波工况下高压并联电容器发热特性等相关工作。