

高压大容量柔直电容器热稳定试验等效方法研究

王婷婷¹, 王中奥^{2,3}, 姚成¹, 马志钦^{2,3}, 胡泰山¹, 廖梓豪^{2,3}, 刘刚¹, 李谦^{2,3}

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080; 3. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室, 广州 510080)

摘要: 柔直输电工程核心器件的柔直电容器的可靠性和寿命直接影响换流阀运行年限, 柔直电容器运行过程中需承受复杂的运行工况, 研究薄膜及电容器在全工况的等效试验方法, 用以评估柔直电容器长期耐久性性能十分重要。本文通过电热耦合仿真计算电容器单元稳态发热特性, 确定内部热点位置在整体中上区域电容器元件内部, 外壳热点位置在大面中上区域。提出用工频等效谐波热损耗的方法, 提出改进的电容器热稳定试验方法, 增加了陪试品及电容器内部的测温热电偶。通过加速老化试验明确电容器电容量、ESR 衰减规律, 确定电容器加速因子并提出了加速试验判据。

关键词: 柔性直流输电; 电容器; 热稳定性; 等效方法

Study on Equivalent Methods for Thermal Stability Test of High-voltage and High-capacity Flexible DC Capacitors

WANG Tingting¹, WANG Zhongao^{2,3}, YAO Cheng¹, MA Zhiqin^{2,3}, HU Taishan¹, LIAO Zihao^{2,3}, LIU Gang¹, LI Qian^{2,3}

(1. Electrical Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 3. Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability Enterprises, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The reliability and lifespan of flexible DC capacitors, the core components in flexible DC transmission projects, directly impact operational duration of the converter valves. The flexible DC capacitors in operation are subjected to complex operation conditions. Therefore, it is crucial to study the equivalent testing methods for films and capacitors under full working conditions to assess the long-term durability of the flexible DC capacitors. In this paper, the steady-state thermal characteristics of the capacitor unit are calculated through electro-thermal coupling simulation, identifying that the internal hotspot is located within the capacitor element in the upper-middle region of the unit, while the external hotspot is situated in the upper-middle area of the large surface. A method using power frequency equivalent harmonic thermal loss is proposed, along with an improved thermal stability test method for capacitors, which includes additional thermocouples for temperature measurement in both test samples and internal parts of the capacitors. Through accelerated aging tests, the decay of the capacitor's capacitance and ESR are clarified, the acceleration factor of the capacitor is determined, and the criteria for accelerated testing is proposed.

Keywords: flexible DC transmission; capacitor; thermal stability; equivalent method

0 引言

柔性直流输电技术在大规模可再生能源并网、大型城市供电和沿海岛屿联网等领域具有显著的

技术优势^[1-2]。随着电力需求的快速增长, 柔性直流输电技术正朝着高电压、大容量的方向发展^[3-4]。现有的柔性直流输电工程均采用基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的直流

输电系统^[5-6]。

高电压、大容量柔直电容器采用基于金属化技术的干式自愈式电容器,金属化薄膜电容器的自愈特性使其在高电压、高能量密度应用中具有显著优势。作为柔性直流输电系统的核心器件,柔直电容器的工作稳定性是系统可靠运行的关键。柔直电容器的运行过程中需承受复杂的运行工况,包含直流叠加纹波的稳态运行电压以及故障情况下的过电压及过电流^[7]。因此研究薄膜及电容器在全工况下的等效试验方法,用以评估柔直电容器长期耐久性能十分重要。

本文搭建电容器元件和整机仿真模型。研究正常工况下电容器的电、热应力,开展谐波电流作用下的热稳定试验等效方法研究,研究电容器连续运行下参数退化轨迹,提出电容器加速试验等效性判据,为柔直电容器寿命评估研究提供支撑。

1 柔直电容器电热耦合仿真

金属化膜电容器是由金属化膜卷绕而成^[8-9],取其轴向截面来看,电容器元件由2张金属化膜卷绕而成,卷绕层数可达上千层,每层均会发热,因此可以将电容器元件内部看成一种由金属层和绝缘介质组成的复合材料。金属化膜电容器的单元热过程主要包括电容器与铜排发热、内部热传导和表面散热3个部分^[7],其中,散热途径主要包括热对流和热辐射。电容器单元内部热过程见图1。

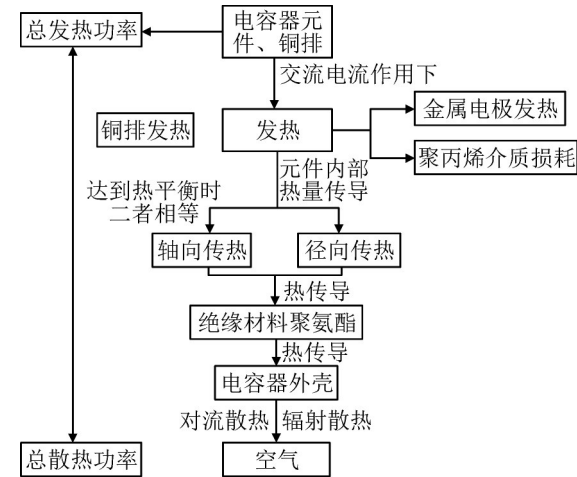


图1 金属化膜电容器单元热过程
Fig. 1 Thermal process of metallized film capacitor unit

电容器元件具体的热过程为:由电极和介质损耗产生热量,该热量沿元件轴向元件端部传导;热流沿元件径向向元件外侧面和元件芯轴传导^[10]。热量由电容器表面向灌封材料(聚氨酯)传导。热流由聚氨酯向电容器外壳传导。外壳通过空气对流

和热辐射向外部散热。当电容器机组内部总的发热功率与外壳总散热功率相等时,电容器整体达到热平衡状态,电容器单元温度分布保持稳定。

将110个电容器元件按照10×11的方式排布,每20个元件的一侧通过一根铜排相连接,每侧一共10组,得到电容器整机仿真模型。金属化膜电容器单元模型材料包括不锈钢(外壳),聚丙烯(BOPP膜),锌铝合金(金属电极),锌(喷金),聚碳酸酯(绝缘芯棒),聚氨酯(灌封料),铜(铜排),空气(轴芯空气),大地(混泥土)。电容器单元材料参数见表1。

表1 电容器单元材料参数
Table 1 Parameters of capacitor unit material

物质	材料	导热系数 (W/(m·K))	密度 (kg/m ³)	比热容 (J/(kg·K))
外壳	不锈钢	16.28	7 900	502.4
介质薄膜	聚丙烯	0.22	900	1 780
金属电极	铝	237	2 700	900
喷金	锌	121	7 140	388
绝缘芯棒	聚碳酸酯	0.19	1 200	1 172
灌封料	聚氨酯	0.56	1 485	1 705
铜排	铜	400	8 960	385
轴芯空气	空气	0.0242	1.225	1 006
混泥土	大地	1.28	1 950	210

对电容器整机进行热仿真,仿真施加频率50 Hz、有效值282.84 V的交流电压,仿真得到的电容器单元、电容器铜排和电容器外壳的温度分布如图2-4所示。对电容器单元的热仿真结果表明,最高温度为82.02℃,位于电容器元件内部,位置在整体中上区域。对电容器铜排的热仿真结果表明,最高温度为75.38℃,位于窄铜排的中上区域。对电容器外壳的热仿真结果表明,最高温度为73.75℃,位于大面中上区域。

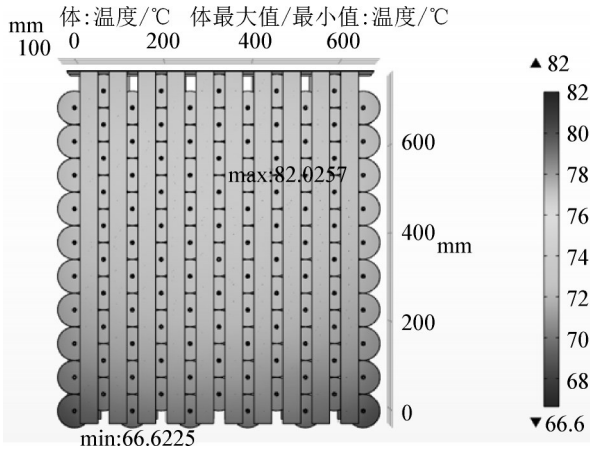


图2 电容器单元温度分布
Fig. 2 Temperature distribution of capacitor unit

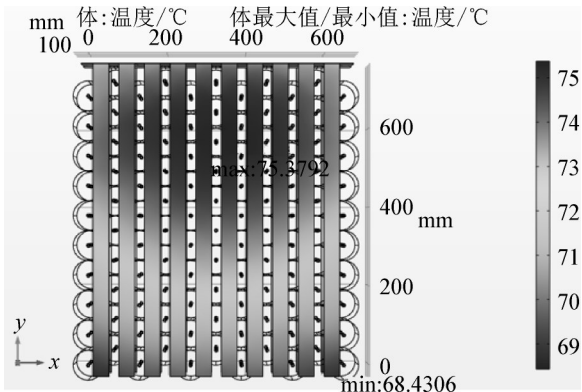


图3 电容器铜排温度分布
Fig. 3 Temperature distribution of copper bars of capacitor

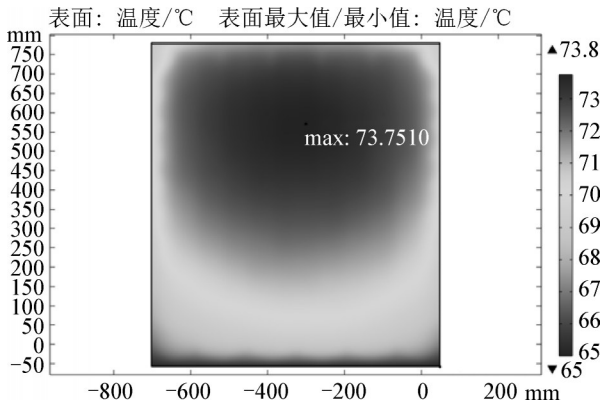


图4 电容器外壳温度分布
Fig. 4 Temperature distribution of capacitor housing

2 电容器热稳定试验等效方法

结合柔直电容器运行特性,柔直电容器工作在周期性不规则电压、电流下,这为电容器的试验带来一定困难,因此需开展多次谐波下电容器试验等效性研究。

对于任意波形的电流,可以通过傅里叶变换得到对应的频域分布为

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} i(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

特别地,对于周期为 T 的周期函数,可以采用离散傅里叶分解,将电流分解为多次谐波的叠加

$$i(t) = \frac{I_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2)$$

$$I_n = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t)e^{-j\omega_n t} dt \quad (3)$$

式中: n 为谐波次数; I_n 为 n 次谐波电流幅值; $\omega_n = 2\pi n/T$ 。对于单一电阻,第 n 次谐波的发热功率为

$$P_n = \frac{1}{2} I_n^2 R \quad (4)$$

如用 1 次谐波(工频)等效 n 次谐波电流的热效应,所需的 1 次谐波电流幅值 I_{1eq} 为

$$\frac{1}{2} I_{1eq}^2 R = \frac{1}{2} I_n^2 R, I_{1eq} = I_n \quad (5)$$

对于多次谐波叠加的电流,各次谐波的热效应相互独立累加,等效所需的 1 次谐波电流幅值 I_{1eq} 为

$$\frac{1}{2} I_{1eq}^2 R = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} I_n^2 R, I_{1eq} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (6)$$

可以看出,等效的 1 次谐波电流峰值的平方为各次谐波电流峰值的平方和。

对于电容器而言,损耗分为两个部分,介质损耗和电极等电阻产生的焦耳热损耗,其中第 n 次谐波产生的焦耳热损耗为

$$P_{jn} = \frac{1}{2} I_n^2 R_m \quad (7)$$

式中, R_m 为电容器电极、端部等部分的等效电阻。

第 n 次谐波产生的介质损耗为

$$P_{dn} = \frac{1}{2} \frac{I_n^2}{\omega_n C} \tan \delta \quad (8)$$

式中: C 为电容器容量; $\tan \delta$ 为电容器介质的损耗角正切。

如用 1 次谐波等效 n 次谐波电流的热效应,所需的 1 次谐波电流幅值 I_{1eq} 为

$$\frac{1}{2} I_n^2 R_m + \frac{1}{2} \frac{I_n^2}{\omega_n C} \tan \delta = \frac{1}{2} I_{1eq}^2 R_m + \frac{1}{2} \frac{I_{1eq}^2}{\omega_1 C} \tan \delta \quad (9)$$

$$I_{1eq} = I_n \sqrt{\frac{n\omega_1 R_m C + \tan \delta}{n\omega_1 R_m C + n \tan \delta}} = k_n I_n \quad (10)$$

式中, k_n 定义为 n 次谐波的损耗等效系数。

以一 20 μF 电容器元件为例,其参数见表 2。计算得到的 k_n 如表 3 所示。

表2 电容器元件参数 Table 2 Parameters of capacitor element			
ω_1	C	R_m	$\tan \delta$
314 rad/s	20 μF	40 m Ω	0.000 2

表3 谐波损耗等效系数 Table 3 Harmonic loss equivalence coefficient	
n	k_n
2	0.883
3	0.840
4	0.817
5	0.803

以某柔直工程为例,其柔直电容器电流谐波含量如表 4 所示。

表4 柔直电容器电流谐波含量 Table 4 Current harmonic content of flexible DC capacitor	
n	I_n/A
1	482.15
2	309.64
3	109.48
4	48.66
5	102.29

如直接按照电阻的形式用电流均方根等效,等效的1次谐波电流值为

$$I_{1eq} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = 594.27 \text{ A} \tag{11}$$

按照电容热效应等效的1次谐波电流值实际为

$$I_{1eq} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (k_n I_n)^2} = 569.15 \text{ A} \tag{12}$$

热稳定试验的目的在于确定电容器在过负荷条件下的温升特性及电气特性变化情况。而原试验方法对电容器电气参数的评估标准不适用于柔直电容器中,且存在单台电容器单元无法反映实际工况中的散热条件、是否可以完全反映电容器发热情况存疑等问题。本文对原有试验方案进行了改进,采用3台电容器同时进行试验,其中1台为被试品,2台为陪试品,并排放置,被试品放置在中间。在被试品内部布置热电偶,测量被试品内部热点温度,热电偶位置通过电容器单元热仿真报告确定。

3 电容器加速试验等效性研究

由于柔直电容器的寿命长达数十年,因此需要通过加速试验的方式验证其寿命^[14-19],搭建了电容器加速老化试验平台,用以研究电压和温度对电容器的寿命影响,最终获得电容器加速寿命模型和不同加速试验条件下的等效试验时间。

3.1 电容器加速老化试验回路

搭建了电容器加速老化试验平台,试验回路见图5。

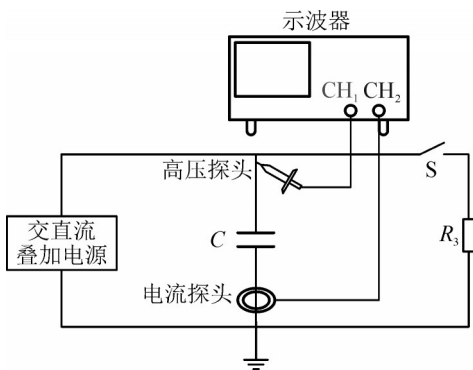


图5 加速老化试验回路
Fig. 5 Accelerated aging test circuit

图中,C为试品电容; R_3 为泄放电阻,2 k Ω ;S为接地棒。试验过程中测量电容器的电容量及ESR变化,电容量变化率 ΔC 定义为

$$\Delta C(t) = \left[\frac{C(t) - C_0}{C_0} \right] \times 100\% \tag{13}$$

式中: $C(t)$ 为老化试验进行 t 时间后的电容器元件

的电容量; C_0 为初始为进行老化试验时的电容量。

3.2 电容器加速老化试验结果

以3个电容器为对象进行了电容器加速老化试验,试验施加2.8 kV直流电压叠加800 V峰峰值的工频交流电压,电容量变化率随老化时间的变化曲线见图6,等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)变化率随电容量变化率的变化曲线见图7。

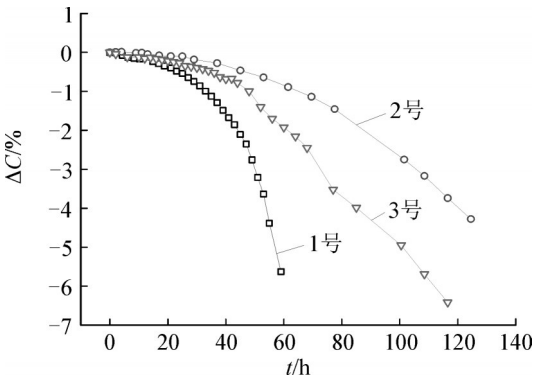


图6 电容量变化率随老化时间的变化曲线
Fig. 6 Variation curve of capacitance variation rate with aging time

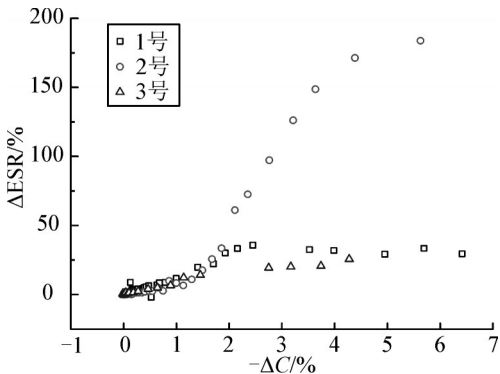


图7 ESR变化率随电容量变化率的变化曲线
Fig. 7 ESR variation rate with variation rate of capacitance

由图可以看出,在加速老化过程中,由于电容器损耗的增加等原因,电容器的电容量呈加速下降趋势,电容量衰减速率随老化时间逐渐增大,整体呈指数形式。电容器的ESR呈现先加速上升,后趋于饱和的趋势。

为确定电容器不同电压、温度下的加速因子,在不同电压、温度下进行电容器的加速老化试验,结果见表5和表6。

表5 不同温度电容器寿命
Table 5 Capacitor endurance at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均寿命/h	分散性/%
45	58.64	7.09
65	53.12	12.98
85	41.67	13.86
105	31.64	11.69

表6 不同电压电容器寿命
Table 6 Capacitor life at different voltages

电压/kV	平均寿命/h	分散性/%
3.4	134.44	6.39
3.6	53.12	12.98
3.8	27.89	10.15

由图表可以看出,随着试验温度及电压的增加,电容器寿命随之下降,目前通常认为的电容器寿命与电压满足逆幂律^[20-23],即电容器寿命满足以下公式

$$\lg U = \lg A - n \lg L \tag{14}$$

式中: A 为一常数; L 和 U 分别为电容器加速老化测试得到的寿命和测试电压, n 为电压加速因子。

温度加速通常采用 Arrhenius 模型^[24-25]。Arrhenius 模型原为描述化学反应速率的方程,通过一个温度相关的指数函数描述化学反应发生的概率或速率,后被广泛应用于器件失效的预测中。

$$\frac{L}{L_0} = e^{-\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \tag{15}$$

式中: L_0 和 U_0 分别为电容器的工作寿命和工作温度; L 和 T 分别为电容器加速老化测试得到的寿命以及测试温度; E_a 为失效对应的活化能; k_b 为玻尔兹曼常数。

通过对电容器温度、电压加速模型的拟合,确定电容器加速寿命模型的参数电压加速因子 $\alpha=2.36$,温度加速因子 $E_a/k_b=1\ 652\ \text{K}$,待预测寿命公式为

$$L_U = L_A \times \exp \left[1\ 652 \times \left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_A} \right) \right] \times \exp \left[2.36 \times \frac{(U_A - U_U)}{U_A} \right] \tag{16}$$

式中: L_U 为待预测寿命; L_A 为加速试验条件下加速寿命; T_U 为实际工作温度; T_A 为加速参考温度; U_U 为实际工作电压值; U_A 为加速参考电压值。

对于寿命为40年的柔直电容器,其工作温度最高为55℃,由电容器的运行特性可以确定,其正常运行电压峰值最高不超过2.2 kV,由此可以确定不同加速试验条件下的等效试验时间,结果见表7。

表7 不同试验条件下等效试验时间
Table 7 Equivalent test time under different test conditions

温度/℃	h		
	3.92 kV	4.2 kV	4.48 kV
65	4 505	3 336	2 470
75	3 914	2 899	2 147
85	3 428	2 539	1 880

4 结语

本文建立了电容器元件和整机仿真模型,提出了等效谐波热损耗方法,并对电容器进行了加速老化试验,结论如下:

1)通过电热耦合仿真计算了电容器单元稳态发热特性,确定内部热点位置在整体中上区域电容器元件内部,外壳热点位置在大面中上区域;

2)提出了用工频等效谐波热损耗的方法,提出改进的电容器热稳定试验方法,增加了陪试品及电容器内部的测温热电偶;

3)通过加速老化试验明确电容器电容量、ESR衰减规律,确定电容器加速因子并提出了加速试验判据。

参考文献

[1] 赵东生,周原,范亚洲,等. 输电线路在线监测设备供能技术研究综述[J]. 广东电力,2024,37(7):107-117.
ZHAO Dongsheng, ZHOU Yuan, FAN Yazhou, et al. Overview of energy supply technology for online monitoring equipment of transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(7): 107-117.

[2] SANDSTRÖM G Ö, TINGSTRÖM J. Management of radical innovation and environmental challenges: development of the dry capacitor at ABB[J]. European Journal of Innovation Management, 2008, 11(2): 182-198.

[3] TINGSTRÖM J, SWANSTRÖM L, KARLSSON R. Sustainability management in product development projects - the ABB experience[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14 (15/16): 1377-1385.

[4] WANG Huai, LISERRE M, BLAABJERG F. Toward reliable power electronics: challenges, design tools, and opportunities[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 17-26.

[5] KOLAR J W, ROUND S D. Analytical calculation of the RMS current stress on the DC-link capacitor of voltage-PWM converter systems[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(4): 535-543.

[6] TANG Yuan, CHEN Minjie, RAN Li. A compact MMC submodule structure with reduced capacitor size using the stacked switched capacitor architecture[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6920-6936.

[7] 朱一昕,楼顺凯,雷乔舒,等. 高压全膜电力电容器热学数值模拟及实验研究[J]. 广东电力,2023,36(4):57-63.
ZHU Yixin, LOU Shunkai, LEI Qiaoshu, et al. Numerical simulation and experimental study on high-voltage full-film power capacitor thermodynamics[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(4): 57-63.

[8] BELKO V O, EMELYANOV O A. Selfhealing in segment-

- ed metallized film capacitors: experimental and theoretical investigations for engineering design[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(2): 024509.
- [9] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: : experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159-169.
- [10] MONTANARI G C, FABIANI D. Searching for the factors which affect self-healing capacitor degradation under non-sinusoidal voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(3): 319-325.
- [11] NAGAO M, KIMURA T, MIZUNO Y, et al. Detection of joule heating before dielectric breakdown in polyethylene films[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(4): 715-722.
- [12] IEDA M, NAGAO M, HIKITA M. High-field conduction and breakdown in insulating polymers[J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 934-945.
- [13] MIN C. Temperature dependence of dielectric breakdown in polymers[D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 2008.
- [14] HIKITA M. Investigation of electrical breakdown of polymeric insulating materials using a technique of pre-breakdown current measurements[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1990, 23(12): 1515-1527.
- [15] BIRLE M, LEU C. Breakdown of polymer dielectrics at high direct and alternating voltages superimposed by high frequency high voltages[C]//2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). [S. l.]: IEEE, 2013: 656-661.
- [16] KHACHEN W, LAGHARI J R, SARJEANT W J. Dielectric breakdown of polypropylene under high frequency fields[C]//Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S. l.]: IEEE, 1992: 185-188.
- [17] KHACHEN W, LAGHARI J R. Polypropylene for high voltage high frequency airborne applications[C]//Conference Record of the 1990 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S. l.]: IEEE, 1990: 80-83.
- [18] 陈才明, 贾德星. 金属化电容器的腐蚀现象[J]. 电力电容器, 2004(4): 14-17.
- [19] 刘刚, 姚成, 贾磊. 温湿度联合作用下金属化膜电容器的寿命预测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 35-39.
- LIU Gang, YAO Cheng, JIA Lei. Life prediction of metallized film capacitor under the combined action of temperature and humidity[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 35-39.
- [20] 杨惠兰, 侯涛, 刘淳. 金属膜电容老化特性及寿命模型研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(8): 20-22.
- YANG Huilan, HOU Tao, LIU Zhun. Volume characteristics and life model of metal film capacitance[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2020, 10(8): 20-22.
- [21] 李征, 李化, 林福昌, 等. 高温高湿条件下薄膜电容器的寿命预测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 42-46.
- LI Zheng, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Lifetime prediction of film capacitors under high-temperature and high-humidity conditions[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 42-46.
- [22] 彭波, 徐梦蕾, 王荀, 等. 自愈式电容器加速电老化试验及寿命估计[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(31): 239-244.
- PENG Bo, XU Menglei, WANG Xun, et al. Accelerated electrical aging experiment of self-healing capacitor and its lifetime evaluation[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(31): 239-244.
- [23] BRINKMANN C. Corrosion phenomena on evaporated metal layers under electric stress[J]. Journal of Materials Science, 1986, 21(5): 1615-1624.
- 作者简介:**
- 王婷婷(1990—), 女, 高级工程师, 主要从事电工材料与高压电容器技术研究工作。E-mail: wangtingting@csg.cn。
- 王中奥(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事电力设备技术管理工作。E-mail: wangza@csg.cn。
- 姚成(1981—), 男, 正高级工程师, 长期从事高压电容器与电工材料研究工作。E-mail: yaocheng@csg.cn。
- 马志钦(1986—), 男, 正高级工程师, 主要从事高电压试验技术与变电一次设备管理工作。E-mail: mzhqcqu@163.com。
- 胡泰山(1990—), 男, 高级工程师, 长期从事高压电力装备与电工材料、绝缘配合技术研究工作。E-mail: huts@csg.cn。
- 廖梓豪(1997—), 男, 助理工程师, 主要从事高电压试验技术与变电一次设备管理工作。E-mail: 984150068@qq.com。
- 刘刚(1985—), 男, 正高级工程师, 长期从事高压电力装备与电工材料、电容器技术研究工作。E-mail: liugang@csg.cn。
- 李谦(1965—), 男, 正高级工程师, 主要从事过电压与绝缘配合、防雷接地技术研究工作。E-mail: gdliqian@126.com。