

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.01.021

金属化膜电容器的恒定湿热试验

王祥

(安徽铜峰电子股份有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 随着新能源汽车领域的兴起,电动汽车的发展趋势迅猛,金属化膜电容器以其独特优势在此领域的需求量越来越大。电动汽车的集成模块通常结构紧凑,但散热较差,使得金属化电容器在高温高湿度的恶劣环境下运行,因此如何提高金属化膜电容器的耐高温高湿性能逐渐成为一项重要的研究内容。本文主要介绍恒定湿热的相关概念和标准,研究金属化膜电容器在恒定湿热(双85)试验中电容量衰减反应机理,阐述加速老化使电容器在早期失效期暴露缺陷双85试验的目的。通过恒温恒湿箱对X2产品进行双85试验,解剖产品心子,呈现金属化膜内部金属层缺失情况,并作出相应分析,并提出了金属化膜电容器通过双85试验的建议,为提高电容器的耐高温湿热性能提供理论及试验依据。

关键词: 金属化膜; 电容器; 恒定湿热; 双85试验

Constant Damp Heat Test of Metallized Film Capacitor

WANG Xiang

(Anhui Tongfeng Electronics Co., Ltd., Anhui Tongling 244000, China)

Abstract: With the rise of new energy vehicles, the development trend of electric vehicles is rapid, and the demand of metallized film capacitor is more and more due to its unique advantage in this field. The integrated module of electric vehicles is generally compact in structure but weak in heat dissipation, which makes the metallized capacitor to operate in the high temperature and high humid environment. Therefore how to improve the high temperature and humid resistance performance of the metallized film capacitor becomes gradually an important study subject. In this paper, the related concepts and standards of constant humidity and heat are introduced, the capacitance attenuation reaction mechanism of metallized film capacitor in constant humidity and heat (double 85) test is studied and the purpose of double 85 test (accelerating aging to expose defects in the early failure stage of capacitor) is described. Double 85 test is carried out on X2 products by constant temperature and humidity chamber, and the core of the product is dissected to reveal the missing metal layer inside the metallized film and corresponding analysis is made. The suggestion of the metallized film capacitor passing double 85 test is proposed so to provide theoretical and test base for the capacitor in high damp and heat resistance.

Keywords: metallized film; capacitor; constant humidity and heat; double 85 test

0 引言

金属化膜电容器^[1-3]寿命长,自愈性能优异,可靠性高^[4-8],广泛应用于单相交流电动机启动与运行^[9-10]、照明灯具的变压器和电子镇流器的功率因数补偿和电力电子变换^[11](整流、逆变、斩波、变频变幅)电路等。随着新能源汽车领域的兴起,电动汽车的发展趋势迅猛^[12-17], HEV/EV 车载充电器

OBC 和车用直流变换器 DC/DC 模块大量使用抑制电源电磁干扰电容器^[18-19],金属化膜电容器以其特殊优势在此领域有着广泛的应用。电动汽车领域这些集成模块通常是结构紧凑,散热较差^[20-24],结合高湿度环境造就电容器的高温高湿度恶劣运行环境,金属化膜电容器(以下简称电容器)提高耐高温高湿能力逐渐成为客户期望的性能要求。

收稿日期:2023-03-30

1 恒定湿热试验

1.1 相关概念

相对湿度(relative humidity, RH):是指空气中水汽压与相同温度下饱和水汽压^[25]的百分比,即湿空气的绝对湿度与相同温度下可能达到的最大绝对湿度之比,也可表示为湿空气中水蒸气分压力与相同温度下水的饱和压力之比。相对湿度值是一个百分数,用 RH 表示,如最适宜人体的相对湿度为 40% RH~60%RH。数值越大,空气中的水分子含量越多。根据美国航空公司的统计报告显示,环境应力造成电子产品故障的比例:海拔高度占 2%、盐雾占 4%、沙尘占 6%、振动占 28%、温湿度占比高达 60%,所以温湿度对于电子产品的影响特别显著。高湿度可以加速电容器劣化^[26],对于塑料封装金属化膜电容器,劣化是由塑料吸收水汽或水汽沿引出端渗入引起的。

失效率 λ 表示元器件在单位时间内发生失效的概率,数值上等于单位时间内失效的元件数与工作元件总数的比值,单位为 FIT(也写成 Fit 或 fit),1FIT=1/(10⁹h)。例如将 10 000 只元件在特定工作条件下工作 10 000 小时出现了 100 只失效,则:

$$\lambda = \frac{100}{10\,000 \times 10\,000} = 1\,000\text{ FIT} \quad (1)$$

澡盆曲线(bathtub curve,失效率特性曲线):又称为浴缸曲线、微笑曲线,见图 1,显示产品在不同时期的失效率,主要包含早期期(早期失效期)、正常期(随机失效期)、损耗期(老化失效期)。

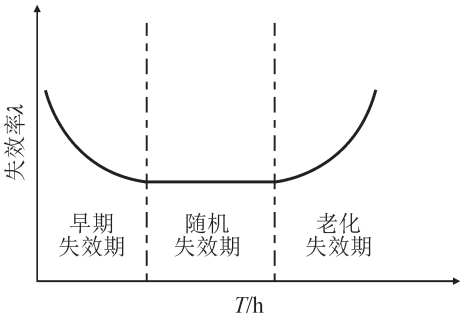


图1 澡盆曲线
Fig.1 Bathtub curve

元器件在各时期发生的原因主要如下:

早期失效期:生产不够完善、材料存在缺陷、环境不合适、设计不够完善;

随机失效期:外部震荡、误操作误使用、环境条件变化波动、抗压性能不良;

老化失效期:氧化、疲劳、性能退化、腐蚀。

老化:一词来源于化学,是指高分子材料在使用过程中,由于受到热、氧、水、光、微生物、化学介质等环境因素的综合作用,高分子材料的化学组成

和结构会发生一系列变化,物理性能也会相应变坏,如发硬、发粘、变脆、变色、失去强度等。电工电子产品老化是指在高温、负载等模拟恶劣工作条件下运行一定时间的过程,使元器件的缺陷、在焊接和装配等生产过程中存在的隐患提前暴露,保证出厂产品能通过早期失效期。

1.2 相关标准

国家标准《GB/T 6346.14-2015 电子设备用固定电容器 第 14 部分规范 抑制电磁干扰用固定电容器》^[18]4.12 规定,稳态湿热试验^[27],最严酷试验条件为:40±2℃/90~95%RH 温湿度下驻留 56 天;《GB/T 6346.1401-2015 电子设备用固定电容器第 14-1 部分:空白详细规范抑制电源电磁干扰用固定电容器评定水平 D》^[19]中 C2 分组试验条件规定:金属化膜电容器在稳态湿热时不施加电压。此标准的试验条件作为电容器耐湿热能力验证时较为宽松,部分缺陷产品也可通过早期失效期,不利于筛选耐高温湿热产品。

国家标准《GB/T 2343.50 电工电子产品环境试验第 2 部分:试验方法试验 Cy:恒定湿热主要用于元件的加速试验》^[26]对于元件耐湿热劣化效应提出的试验条件见表 1。

表1 试验Cy严酷等级
Table 1 Test Cy severity grade

温度/℃	相对湿度/%	持续时间/h			
		I	II	III	IV
85	85	168	504	1 000	2 000

IEC 60384-14:2016^[28]提出高湿热鲁棒性试验,并分为 3 个等级,具体试验条件见表 2。

表2 高湿热鲁棒性等级
Table 2 High humidity robustness grades

等级	温湿度	时间	电压
Grade(I)	40℃/93% RH	21 d	U_R
	85℃/85% RH	168 h	U_R
Grade(II)	40℃/93% RH	56 d	U_R
	85℃/85% RH	500 h	U_R
Grade(III)	60℃/93% RH	56 d	U_R
	85℃/85% RH	1 000 h	U_R

结合各标准试验条件,确定以 85℃/85% RH/ U_R /1 000 h 的试验条件作为抑制电磁干扰电容器的恒定湿热条件,该试验简称“双 85 试验”。双 85 试验模拟电容器的高温高湿工作环境,85℃ 高温下能使塑壳、环氧树脂等原材料的空隙增大,当空隙大于 3.4×10⁻¹⁰ m 以上,水分子就可穿过塑壳、树脂的防护,浸入电容器心子,同时根据“10℃ 规则”,温度每升高 10℃,电容器寿命减少一半,85℃ 高温加速寿

命老化^[29];85% RH 的高湿水汽渗入,将会引起聚合物材料解聚、聚合物结合能力下降、腐蚀、空洞、线焊点脱开、引线间漏电甚至短路、金属化层腐蚀断路等。

2 双85试验

本文就抑制电磁干扰用固定电容器(X₂系列:305VAC-0.1 μF±10%、305VAC-1.0 μF±10%)采用不同塑壳尺寸、不同方阻^[30-31](其他工艺一致)设计分6组制作样品,各组随机抽取10只产品进行双85试验。60只样品并联置于恒温恒湿箱(设定温湿度85℃/85% RH),施加额定电压运行1000h。样品标记信息:S₁-18×11×5 PBT 塑壳,5.6×14×1.5 高温锌铝膜(加厚区方阻 1~2.5 Ω/□,活动区方阻 10~14 Ω/□);S₂-18×11×5 PBT 塑壳,5.6×14×1.5 高温锌铝膜(加厚区方阻 2~4 Ω/□,活动区方阻 7~10 Ω/□);S₃-18×11×5 PBT 塑壳,5.6×14×1.5 高温锌铝膜(加厚区方阻 2~4 Ω/□,活动区方阻 10~14Ω/□);S₄-32×20×11 PBT 塑壳,6.8×26×2 高温锌铝膜(加厚区方

阻 1~2.5 Ω/□,活动区方阻 10~14 Ω/□);S₅-32×20×11 PBT 塑壳,6.8×26×2 高温锌铝膜(加厚区方阻 2~4 Ω/□,活动区方阻 7~10 Ω/□);S₆-32×20×11 PBT 塑壳,6.8×26×2 高温锌铝膜(加厚区方阻 2~4 Ω/□,活动区方阻 10~14 Ω/□)。试验前用电容测试仪记录1kHz下电容器电容量C₀,试验后同样在1kHz下记录电容量C₁,以电容量变化百分比ΔC/C作为主评价因子。

$$\Delta C/C = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\%$$

(2)

18×11×5 PBT 塑壳组(S₁~S₃)试验结果记录见表3;32×20×11 PBT 塑壳组(S₄~S₆)试验结果记录见表4。试验组S₇~S₈规格为305VAC-0.22 μF±10%,塑壳(18×13.5×7.5 PBT),5.8×14×1.5 高温锌铝膜(加厚区方阻 2~4 Ω/□,活动区方阻 7~10 Ω/□),S₇组常规镀膜,S₈组金属化膜经镀膜公司涂覆抗氧化油,试验结果记录如下表5。统计S₁~S₈组容量衰减最大值Max、容量衰减最小值Min、容量衰减平均值X、极差R和标准偏差S见表6。

表3 S₁~S₃试验结果
Table 3 Test results of S₁~S₃

S ₁ 组			S ₂ 组			S ₃ 组		
C ₀ /nF	C ₁ /nF	(ΔC/C)/%	C ₀ /nF	C ₁ /nF	(ΔC/C)/%	C ₀ /nF	C ₁ /nF	(ΔC/C)/%
99.12	74.66	-24.68	97.02	59.28	-38.90	96.94	81.28	-16.15
101.50	69.62	-31.41	100.03	83.28	-16.74	96.54	39.62	-58.96
98.38	78.93	-19.77	97.52	85.35	-12.48	97.06	84.12	-13.33
99.09	76.02	-23.28	97.23	83.02	-14.61	96.97	83.59	-13.80
100.02	84.39	-15.63	96.36	84.23	-12.59	100.71	79.38	-21.18
97.39	80.01	-17.85	99.33	84.26	-15.17	97.11	82.08	-15.48
97.61	74.82	-23.35	97.64	83.16	-14.83	97.36	82.42	-15.35
97.05	75.91	-21.78	99.05	70.07	-29.26	97.62	85.20	-12.72
98.11	81.10	-17.34	98.08	79.40	-19.05	96.25	63.05	-34.49
98.88	73.81	-25.35	96.51	82.71	-14.30	96.54	72.62	-24.78

表4 S₄~S₆试验结果
Table 4 Test results of S₄~S₆

S ₄ 组			S ₅ 组			S ₆ 组		
C ₀ /nF	C ₁ /nF	(ΔC/C)/%	C ₀ /nF	C ₁ /nF	(ΔC/C)/%	C ₀ /nF	C ₁ /nF	(ΔC/C)/%
964.90	931.30	-3.48	998.40	983.90	-1.45	993.40	971.30	-2.22
961.30	897.30	-6.66	996.70	980.00	-1.68	998.50	974.30	-2.42
976.90	947.80	-2.98	998.50	982.60	-1.59	999.60	893.90	-10.57
972.40	950.00	-2.30	993.60	981.30	-1.24	997.40	941.50	-5.60
979.90	940.30	-4.04	996.00	982.50	-1.36	1000.50	964.00	-3.65
964.30	926.00	-3.97	1002.00	988.60	-1.34	998.60	948.10	-5.06
965.20	935.60	-3.07	994.60	937.50	-5.74	997.20	938.60	-5.88
973.50	874.10	-10.21	996.50	958.80	-3.78	999.50	964.60	-3.49
981.10	955.70	-2.59	993.70	952.60	-4.14	1000.40	961.60	-3.88
971.90	938.50	-3.44	994.10	983.20	-1.10	999.70	963.20	-3.65

表5 S₇~S₈试验结果
Table 5 Test results of S₇~S₈

S ₇ 组(常规镀膜)			S ₈ 组(抗氧化油)		
C ₀ /nF	C _i /nF	(ΔC/C)/%	C ₀ /nF	C _i /nF	(ΔC/C)/%
212.23	202.51	-4.580	208.78	197.31	-5.494
212.64	199.80	-6.038	214.94	202.91	-5.597
207.06	195.48	-5.593	214.46	195.39	-8.892
214.30	202.97	-5.287	217.07	204.43	-5.823
212.78	202.31	-4.921	209.83	198.89	-5.214
208.20	197.68	-5.053	207.27	196.17	-5.355
211.77	199.71	-5.695	213.29	200.64	-5.931
211.86	200.61	-5.310	213.54	202.85	-5.006
212.24	196.60	-7.369	208.99	198.45	-5.043
218.75	192.30	-12.091	206.45	196.88	-4.636

表6 S₁~S₈统计结果
Table 6 Statistical results of S₁~S₈

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	%
Max	-31.41	-38.90	-58.96	-10.21	-5.74	-10.57	-12.09	-8.89	
Min	-15.63	-12.48	-12.72	-2.30	-1.10	-2.22	-4.58	-4.64	
X	-22.04	-18.79	-22.62	-4.27	-2.34	-4.64	-6.19	-5.70	
R	-15.78	-26.42	-46.24	-7.91	-4.64	-8.35	-7.51	-4.26	
S	4.65	8.58	14.44	2.41	1.61	2.41	2.21	1.19	

1)通过对比 S₁~S₆组试验数据可以发现,金属化膜活动区方阻 7~10 Ω/□ (S₂和 S₅)时容量衰减均值和标准偏差相对较小。由于加厚区宽度一般只有 4~6 mm,其活动区方阻(金属镀层厚度)影响了容量衰减程度。2)32×20×11 PBT 塑壳组(S₄~S₆)在双 85 试验中相较于 18×11×5 PBT 塑壳组(S₁~S₃)容量衰减较小,更容易通过双 85 试验。经过测量,18×11×5 PBT 塑壳组的塑壳最薄面厚度为 0.6~0.65 mm,产品心子上端环氧树脂理论计算厚度为 3.0~3.5 mm; 32×20×11 PBT 塑壳组的塑壳最薄面厚度为 0.95~1.00 mm,产品心子上端环氧树脂理论计算厚度为 3.5~4.0 mm。可知塑封材料厚度影响水汽渗入程度,进而影响电容器容量衰减程度。经查阅国内外金属化膜电容器同行的产品规格书,同规格产品,防潮系列产品外形尺寸稍大于标准性能产品,这与试验结果相一致。3)比较 S₇和 S₈组试验结果,S₈组涂覆抗氧化油的产品容量衰减均值和标准偏差都较小,一致性较好。

3 产品解剖分析

通过对容量衰减较为严重的 S₃组 2 号(-58.96%)、S₂组 1 号(-38.90%)电容进行解剖,将电容器心子由外层展开,外层金属化膜的金属层损失较为严重,见图 2,金属化膜呈现一种雾蒙蒙状态(雾状

膜),用 MJ-6080 XK 显微镜放大观察“雾状膜”金属层,见图 3。

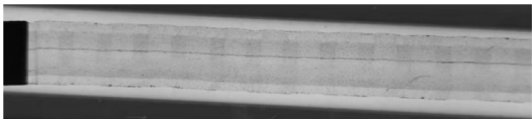


图2 雾状金属化膜
Fig. 2 Mist metallized film

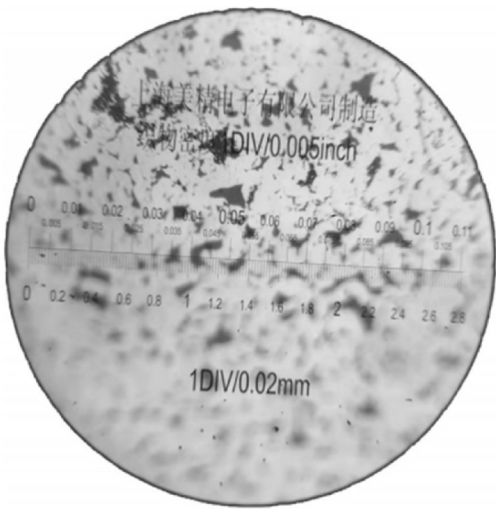


图3 雾状金属化膜显微镜放大
Fig. 3 Microscope magnification of mist metallized film

继续剖开至明显金属层与雾状膜交界区域见图 4。

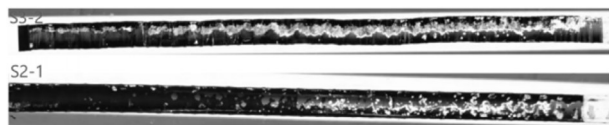


图4 交界区域
Fig. 4 Border area

继续剖开,观察内层膜金属层缺失见图5。

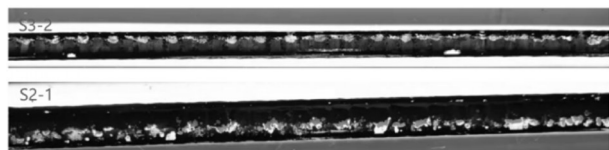


图5 内层膜金属层缺失
Fig. 5 Lack of metal layer of inner film

根据解剖结果图5显示,金属层开始消失是沿着“线状”区域由外层金属化膜向内层金属化膜渗入,且“线状”区域偏向一侧,与实际设计的金属化膜方阻加厚区和活动区交界处相一致,这是由于金属化膜方阻加厚区和活动区镀层的阶梯空隙中在85℃/85% RH条件下发生了气隙电离^[32]。锌铝金属化膜的镀层主要成分是锌(90%以上),气隙电离后金属层在305VAC的电压下,主要发生电化学反应^[33],阳极发生氧化反应如下式(3)。



在图5内层金属化膜“线状”缺失区域附近用显微镜取图,见图6,金属层开始氧化形成的不规则形状,与气隙局部放电^[34]能量爆发所形成的近似圆斑区域不同,金属层氧化和气隙电离是同时发生的,只是主次顺序不同,对于特定金属层区域,前期气隙电离为主,后期金属氧化为主;交流电压在正负半个周期内电容器极板交替发生金属层氧化,而气隙电离则发生在整个交流周期内。



图6 金属层氧化缺失
Fig. 6 Lack of oxidation in the metal layer

随着试验时间推进,金属层不断氧化缺失,形

成一个一个金属层“孤岛”,见图3,金属化膜也就变成了图2所示的雾状膜。

4 结语

本文主要介绍了恒定湿热试验涉及的相关概念及相关标准,随着电容器应用工况的复杂而确定的双85试验成为高性能电容器型式试验的重要环节;对双85试验不合格品进行解剖,推理水汽渗入电容器心子后的电容量衰减机理,并给出有利于电容器通过双85试验的以下建议:

1)在金属化膜表面涂覆抗氧化油。经试验验证,某镀膜公司提供的涂覆抗氧化油金属化膜在双85试验中容量衰减程度低,一致性好,可靠性高。抗氧化油能够隔绝氧气、水汽,阻碍金属层的氧化反应;

2)产品采用增大体积设计。本文试验表明,增大塑壳体积,增加塑壳厚度,增加塑封环氧厚度;增加外烧膜圈数,延缓水汽渗入金属层;

3)金属化膜活动区采用低方阻设计。金属层厚度越大,其氧化速度越慢,但不可过厚影响金属化膜耐压水平与自愈性能,应将低方阻控制在合理程度;

4)采用高温气密性较好的塑壳、树脂材料。原材料在85℃时吸水性指标的高低决定水汽的渗入量,从而影响金属层氧化速度;

5)改进塑封技术。提高塑壳与环氧树脂接触面、引线与环氧树脂接触面的气密性。

参考文献

- [1] SARJEANT W J, ZIRNHELD J, MACDOUGALL F W. Capacitors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(5): 1368-1392.
- [2] 陈永真. 电容器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 陈永真, 李锦. 电容器手册[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [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] 交流电动机电容器第1部分:总则性能、试验和额定值安全要求安装和运行导则:GB/T 3667.1-2016[S].2016.
AC motorcapacitors - Part 1: General - performance, testing and rating safety requirements guide for installation and operation:GB/T 3667.1-2016[S].2016.
- [10] 交流电动机电容器第2部分:电动机启动电容器:GB/T 3667.2-2016[S].2016.
AC motor capacitors - Part 2: Motor start capacitors:GB/T 3667.2-2016[S].2016.
- [11] 王兆安,刘进军.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [12] 张帅,刘一欣,张宇轩,等.电动汽车接入对配电网运行特性影响的综合评估方法[J].浙江电力,2022,41(3):1-10.
ZHANG Shuai, LIU Yixin, ZHANG Yuxuan, et al. A comprehensive assessment method for operational characteristics of distribution networks with the access of electric vehicles[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(3): 1-10.
- [13] 蒋玮,单沫文,邓一帆,等.虚拟电厂聚合电动汽车参与碳市场的优化调度策略[J].电力工程技术,2023,42(4):13-22.
JIANG Wei, SHAN Mowen, DENG Yifan, et al. Optimization strategy for aggregating electric vehicles through VPP to participate in the carbon market[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 13-22.
- [14] 王吉兴,余洋,米增强,等.考虑响应不确定性的电动汽车集群可调度容量评估方法[J].浙江电力,2022,41(5):1-7.
WANG Jixing, YU Yang, MI Zengqiang, et al. An estimation method for schedulable capability of aggregated electric vehicles considering response uncertainty[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(5): 1-7.
- [15] 范宏,李嘉晖,郭琦.考虑用户充电决策行为的电动汽车充电引导策略[J].电力工程技术,2023,42(4):23-30.
FAN Hong, LI Jiahui, GUO Qi. Electric vehicle charging guidance strategy considering user charging decision-making behavior[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 23-30.
- [16] 王华彪,李小勇.基于融合注意力机制改进双向长短时记忆网络在电动汽车充电负荷中的预测研究[J].电网与清洁能源,2022,38(6):104-112.
WANG Huabiao, LI Xiaoyong. Prediction of electric vehicle charging load based on integrating attention mechanism to improve BiLSTM[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 104-112.
- [17] 刘勇,李全优,戴朝华.电动汽车充电负荷时空分布建模研究综述[J].电测与仪表,2022,59(8):1-9.
LIU Yong, LI Quanyou, DAI Chaohua. Review on the spatiotemporal distribution modeling of electric vehicle charging load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8): 1-9.
- [18] 电子设备用固定电容器第14部分:分规范抑制电源电磁干扰用固定电容器:GB/T 6346.14-2015[S].2015.
Fixed capacitors for use in electronic equipment-Part 14: Sectional specification-fixed capacitors for electromagnetic interferencesuppression and connection to the supply mains:GB/T 6346.14-2015[S].2015.
- [19] 电子设备用固定电容器第14-1部分:空白详细规范抑制电源电磁干扰用固定电容器 评定水平 D:GB/T 6346.14-1-2015[S].2015.
Fixed capacitors for use in electronic equipment-Part 14-1: Blank detail specification-fixed capacitors for electromagnetic interference suppression and connection to the supply mains-assessment level D:GB/T 6346.14-1-2015[S].2015.
- [20] 李天宁,王浩国,董灵鹏,等.考虑居民小区充电负荷与成本的电动汽车有序充电策略[J].浙江电力,2022,41(5):9-13.
LI Tianning, WANG Haoguo, DONG Lingpeng, et al. Research on coordinated charging strategy considering load and cost of electric vehicles in a residential quarter[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(5): 9-13.
- [21] 查鹏程,甘雅丽,高海祐,等.电动汽车充电站接入配电网的电能质量评估[J].电测与仪表,2022,59(6):69-75.
ZHA Pengcheng, GAN Yali, GAO Haiyou, et al. Quality assessment of electric vehicle charging stations accessing distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 69-75.
- [22] 王呈轩,樊艳芳,李弘昌,等.直流微网供电的电动汽车无线充电站控制策略[J].电网与清洁能源,2022,38(10):126-134.
WANG Chengxuan, FAN Yanfang, LI Hongchang, et al.

- Research on the control strategy of electric vehicle wireless charging station powered by DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 126-134.
- [23] 王晞, 汪伟, 王海燕, 等. 计及用户电池损耗的电动汽车分布式两阶段调度策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 120-126.
- WANG Xi, WANG Wei, WANG Haiyan, et al. Distributed two-stage scheduling strategy of EV considering user battery consumption[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 120-126.
- [24] 闫威, 李南, 沈月秀, 等. 基于CNN-GAN与半监督回归的电动汽车充电负荷预测[J]. 浙江电力, 2023, 42(2): 83-89.
- YAN Wei, LI Nan, SHEN Yuexiu, et al. Electric vehicle charging load forecasting based on CNN-GAN and semi-supervised regression[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(2): 83-89.
- [25] 宋天佑, 徐家宁. 无机化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [26] 环境试验第2部分: 试验方法试验Cy: 恒定湿热主要用于元件的加速试验: GB/T 2423. 50-2012[S]. 2012.
- Environmental testing-Part 2: Test methods-test Cy: damp heat, steady state, accelerated test primarily intended for components: GB/T 2423. 50-2012[S]. 2012.
- [27] 电子设备用固定电容器第1部分: 总规范: GB/T 2693-2001[S]. 2001.
- Fixed capacitors for use in electronic equipment-Part 1: Generic specification: GB/T 2693-2001[S]. 2001.
- [28] Fixed capacitors for use in electronic equipment Part 14: Sectional specification fixed capacitors for electromagnetic interferencesuppression and connection to the supply mains: IEC 60384. 14-2016 [S]. 2016.
- [29] 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.
- [30] 电容器用金属化薄膜: GB/T 24123-2009 [S]. 2009.
- Metallized film for capacitors: GB/T 24123-2009 [S]. 2009.
- [31] 电气绝缘用薄膜第2部分: 试验方法: GB/T 13542-2009 [S]. 2009.
- Film for electrical insulation-Part 2: Methods of test: GB/T 13542-2009 [S]. 2009.
- [32] 王凯平. 金属化薄膜电容器气隙电离现象的讨论[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(10): 86-91.
- WANG Kaiping. Discussion of air ionization phenomenon within metallized film capacitors[J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37(10): 86-91.
- [33] 任素贞, 王旭珍. 物理化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
- [34] 高电压试验技术局部放电测量: GB/T 7354-2018 [S]. 2018.
- High-voltage test techniques-Partial discharge measurements: GB/T 7354-2018 [S]. 2018.
- 作者简介:
王祥(1993—), 男, 工程师, 研究方向为电容器研发设计。E-mail: 635683642@qq.com。