

直流支撑电容器在高海拔下的散热问题研究

左强林¹, 倪琰¹, 韩旭²

(1. 嘉善赛晶电容器有限公司, 浙江 嘉善 314112; 2. 无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177)

摘要: 本文根据电容器在不同大气压强下,其温度升高或降低吸收或释放的热量相同的原理,得到电容器外壳散热系数与稳态时间的乘积在不同海拔下相等的关系,设计了不同海拔下,电容器升温 and 降温的验证实验;根据实验数据计算,得到了在 5 000 m 海拔下,电容器升温过程中对周围空气的散热系数,比在常压下减小了 28%;在降温过程中的散热系数,比在常压下减小了 25%;本文推导得到了在常压下和高海拔下,电容器最热点温升差值与其外壳的温升差值相等的结论。实验数据表明,上述结论是正确的。在 5 000 m 海拔的对应大气压强下,电容器的外壳温升和最热点温升均升高了 2.8 K;实验结果还表明,气压越低,电容器的温度稳定时间越长。

关键词: 高海拔; 直流支撑电容器; 散热系数; 温度稳定时间; 热阻

Research on Heat Dissipation of DC-link Capacitors at High Altitudes

ZUO Qianglin¹, NI Yan¹, HAN Xu²

(1. Jiashan Sinking Power Electronic Capacitor Co., Ltd., Zhejiang Jiashan 314112, China;

2. Wuxi Sinking Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China)

Abstract: Based on the principle that the amount of heat absorbed or released by a capacitor due to temperature rise or fall is identical under different atmospheric pressures, this paper establishes that the heat dissipation coefficient of the capacitor case and the steady-state time remains constant across varying altitudes. Accordingly, a verification experiment is designed to measure the heating and cooling processes of the capacitor at different altitudes. According to the experimental data, the heat dissipation coefficient of the capacitor to the surrounding air during the temperature rise process is obtained at altitude of 5 000 m, which is decreased by 28% compared to that at normal pressure. The heat dissipation coefficient during the temperature drop process is decreased by 25% compared to that at normal pressure. The conclusion through derivation in this paper that the difference in temperature rise of the hottest point of the capacitor and the temperature rise of the container is equal under normal pressure and high altitude, is obtained. The experimental data confirm that the above conclusion is valid. At the atmospheric pressure corresponding to an altitude of 5 000 m, both the capacitor case temperature rises and the hot-spot temperature rise is increased by 2.8 K. The experimental results also indicate that the lower the ambient pressure, the longer the time required for the capacitor to reach thermal stability.

Keywords: high altitude; DC-link capacitor; coefficient of heat dissipation; temperature stability time; thermal resistance

0 引言

柔性直流输电以其占地面积小、适用电源点分散和运维成本低等优点倍受青睐^[1-3]。近年来,随着

电力电子技术的不断进步,柔性直流输电技术也得到了长足的发展,柔性直流输电工程的应用越来越广泛。柔直技术不断向纵深推进,从厦门柔直的±320 kV 真双极接地到渝鄂联网的±420 kV 背靠背,

收稿日期:2026-06-25; 修回日期:2026-08-03

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

Project Supported by the National Key R & D Program of China(2021YFB2401504)。

到张北±500 kV 四端环网绿色能源供电工程^[4],到乌东德和白江的±800 kV 混合直流工程,再到甘浙±800 kV 双 800 特高压柔性直流输电工程,电压等级稳步推进。另一方面,藏电外送的需要,考虑到西藏电网的孱弱,柔性直流输电走向高海拔也势在必行。根据藏粤特高压柔直工程的初步规划,其送出端的昌都站,海拔达到 4 300 m,柔性直流输电在高海拔下的应用已经走向前台。高海拔对电力设备^[5-9]的影响包括绝缘水平^[10-13]、局部放电^[13-14]、污秽^[9,13]和散热^[13]等。高海拔对干式直流电容器^[15-16]的影响更为突出。文献表明^[18-20],海拔每增加 1 000 m,温升加剧会使实际容量降低 3%~5%。由于热和温度是制约直流支撑电容器(以下简称电容器)的关键影响因素,电容器在高海拔环境下的加热和冷却问题,是高海拔干式电容器的核心问题。然而关于电容器在高海拔下的散热问题,目前没有看到相关研究成果发表。随着藏粤工程的推进,电容器在高海拔下的应用已经进入工程应用阶段。

电容器在高海拔地区的散热问题,包括以下三个方面:1)电容器外壳对周围空气的散热系数的影响;2)电容器内部最热点温升的影响;3)对电容器热平衡时间的影响。

1 海拔对电容器散热影响分析

1.1 电容器在升温时的散热分析

文献表明^[21-22],电容器及其元件对周围空气的散热系数,在升温 and 降温方面是不一样的,具有升温快而降温慢的特点。所以对高海拔下电容器的散热分析也从升温 and 降温两个方面进行。根据文献^[12],不同海拔对应的平均大气压强如表 1 所示。

表 1 海拔与平均大气压强的对应关系
Table 1 Correspondence between altitude and average atmospheric pressure

海拔/m	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
平均大气压强 b/kPa	90	79.5	70.1	61.7	54
年平均最高温度 $\theta/^\circ\text{C}$	20	15	10	5	3

从表 1 可以看到,海拔与大气压强基本上是线性关系,已知大气压强或已知海拔,在工程应用上都可以采用线性插入的办法得到对应的海拔或大气压强。

在将电容器从某个温度加热到另外一个温度的过程中,达到热平衡后,电容器吸收的热量公式为

$$Q_1 = cm\Delta T_1 = P_1 t_1 \quad (1)$$

$$Q_2 = cm\Delta T_2 = P_2 t_2 \quad (2)$$

根据文献^[23], $\Delta T_1 = \frac{P_1}{k_1 S}$, 即: $P_1 = \Delta T_1 k_1 S$ 。代入

式(1)-(2)可以得到:

$$Q_1 = cm\Delta T_1 = \Delta T_1 k_1 S t_1 \quad (3)$$

$$Q_2 = cm\Delta T_2 = \Delta T_2 k_2 S t_2 \quad (4)$$

对于同一台电容器,不管在什么气压下加热到同一个温度,达到平衡状态后,吸收的热量都是一样的。则有: $Q_1 = Q_2$ 。代入式(3)-(4)可以得到: $\Delta T_1 k_1 S t_1 = \Delta T_2 k_2 S t_2$ 。即:

$$k_2 = \frac{\Delta T_1 t_1 k_1}{\Delta T_2 t_2} \quad (5)$$

假设 $\Delta T_1 \approx \Delta T_2$, 式(5)可以简化为

$$k_2 = \frac{\Delta T_1 t_1 k_1}{\Delta T_2 t_2} \approx \frac{t_1 k_1}{t_2} \quad (6)$$

1.2 电容器在降温时的散热分析

上一节分析计算了电容器在升温过程中的散热系数和热稳定时间,本节主要分析计算电容器在降温过程中的散热系数。研究表明^[21-22],电容器和元件在降温过程和升温过程,表面对周围空气的散热系数是不一样的,在高海拔下,电容器的散热系数变化幅度在降温过程和升温过程也可能不一样。电容器在降温过程中释放的热量公式为

$$Q_3 = cm\Delta T_3 = k_3 S \Delta T_3 t_3 \quad (7)$$

$$Q_4 = cm\Delta T_4 = k_4 S \Delta T_4 t_4 \quad (8)$$

对于同一台电容器,在温度差一样的情况下,不管在什么气压下,其释放的能量都是一样的,即 $Q_3 = Q_4$ 。由式(7)-(8)可以得到:

$$k_4 = \frac{\Delta T_3 t_3 k_3}{\Delta T_4 t_4} \approx \frac{t_3 k_3}{t_4} \quad (9)$$

式(1)-(9)中各字母的意义如表 2 所示。

2 实验验证

2.1 试品概况及验证方案

根据第 1 章的分析,可以基本确定试验验证方案。在同一环境下,在不同大气压强下对同一台电容器进行加热和冷却试验,通过记录加热时间和温升,获得加热时长和实际温升的关系,把常压下的经验数据作为已知,从而得到低气压下的散热系数。为了模拟高海拔,试验需要在真空罐内进行。

本文用于测试的试品为 2.8 kV、8 mF 的典型电容器,分别为试品 A、B、C。试验在真空罐内进行,试品概况如表 3 所示。表 3 中,电容器的复合比热容和热时间常数,是根据文献^[21]计算得到的在常压下的数据。3 台试品在真空罐里放置的情况如图 1 所示。

表2 公式中各符号的意义
Table 2 The meanings of each symbol in the formula

符号	意义	符号	意义
Q_1	常压下电容器吸收的热量	ΔT_1	常压下电容器的稳态温升,K
Q_2	海拔5000m时电容器吸收的热量	ΔT_2	海拔5 000 m时电容器的稳态温升,K
Q_3	常压下电容器释放的热量	ΔT_3	常压下电容器的稳态温度降低温升,K
Q_4	海拔5000m时电容器释放的热量	ΔT_4	海拔5 000 m时电容器的稳态温度降低,K
k_1	常压下电容器外壳表面的升温散热系数,W/m·K	Δt_1	常压下电容器温度升高到目标值所需要的稳态的时间,h
k_2	海拔5000m下电容器外壳表面的升温散热系数,W/m·K	Δt_2	海拔5 000 m下电容器温度升高到目标值所需要的时间,h
k_3	常压下电容器外壳表面的降温散热系数,W/m·K	Δt_3	常压下电容器温度降到目标值所需要的时间,h
k_4	海拔5 000 m下电容器外壳表面的降温散热系数,W/m·K	Δt_4	海拔5 000 m下电容器温度降到目标值所需要的时间,h
c	电容器的复合比热容	S	电容器外壳表面的散热面积
m	电容器的平均质量,kg	$P_1、P_2$	分别为电容器吸收和释放的热功率,W

表3 试品概况
Table 3 Overview of test samples

试品 代号	外形 尺寸/mm	重量/ kg	复合比热容/ [kJ/(kg·K)]	热时间常数 τ /h
试品 A	105×17.5×56	143	1.41	13.1
试品 B	80×17.5×76	140	1.38	13.6
试品 C	85×15×79	138	1.34	13.7



图1 试品在真空罐内的放置情况示意
Fig. 1 Schematic illustration of the placement of the test samples in the vacuum tank

2.2 测试结果

在真空罐内,在常压下,将试品 A、B、C 从 40℃ 左右,加热到 80℃ 左右,再从 80℃ 左右冷却到 40℃ 左右,每隔 30 min 记录电容器的心子温度,得到的温度-时间曲线如图 2 所示。将真空罐内气压抽真空到 5 000 m 海拔对应的气压 54 kPa,重复上述操作,得到的温度-时间曲线也对比汇列于如图 2。

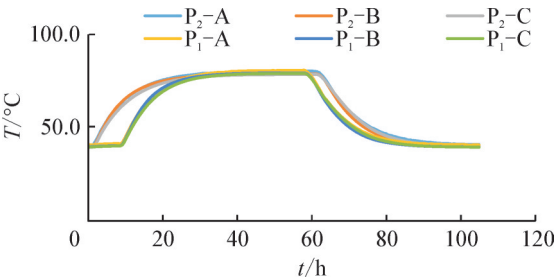


图2 常压和高海拔下心子温度与加热或冷却时间的关系
Fig. 2 Relationship between the temperature of core and heating or cooling time at normal pressure and high altitude

从图 2 可以看出,3 种产品升温曲线基本重合,降温的曲线也基本重合,说明 3 种产品的热时间常数相差不大,这与表 3 的数据对应。

根据第 1 章的分析,加热和冷却的起点和终点是确定相关参数的核心。加热和冷却的起点的选取原则是心子温度开始出现明显变化,加热和冷却终点的选取原则,是心子温度基本稳定。为了便于确定加热和冷却的起点和终点,本文把 3 种试品的升降温曲线分开。常压下试品 A、B、C 的加热和冷却测试数据如图 3 所示,5 000 m 海拔下试品 A、B、C 的加热和冷却测试数据如图 4 所示。根据图 3-4, 3 种试品的加热起点、加热终点以及冷却起点、冷却终点及其对应的温度和时间数据汇列于表 4。

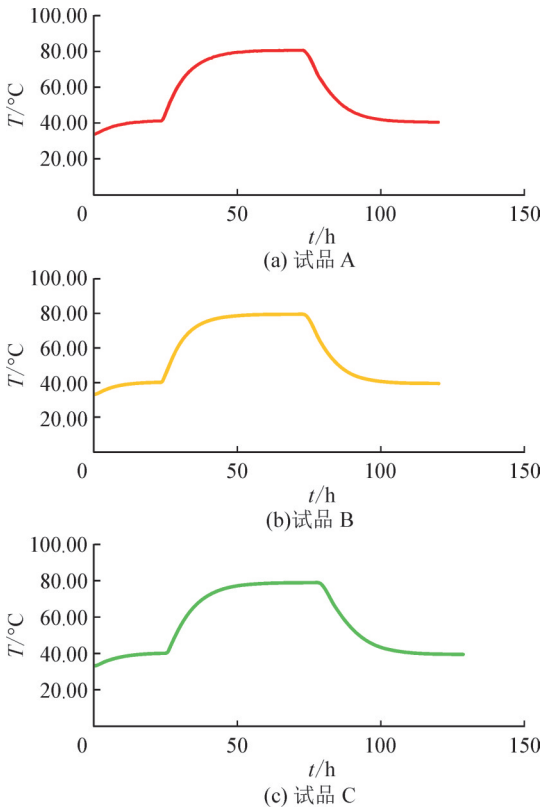


图3 常压下试品的最热点温度与时间的关系
Fig. 3 Relationship between the highest temperature of the test sample and time under normal pressure

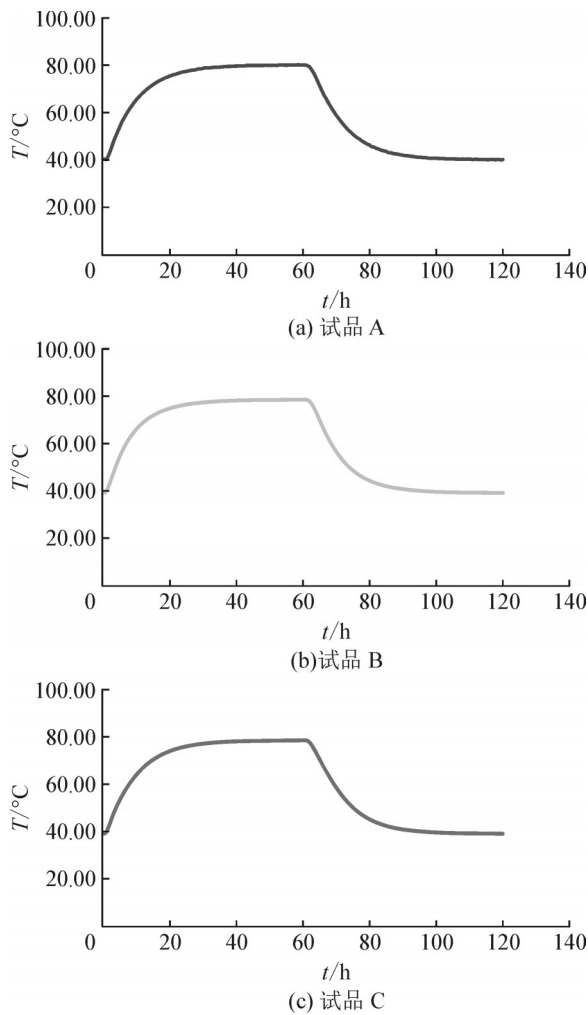


图4 高海拔下电容器最热点温度与加热时间的关系
Fig. 4 Relationship between the hottest temperature of the capacitor at high altitudes and the heating time

从表4可以看出,在常压 P_1 下,加热快和散热慢与文献^[21]得到的结论是一致的;但在低气压 P_2 下,升温时间都比降温时间长,这与本文1.1引用的文献^[21]结论不一致。这个差异长达5 h,占比为12%。笔者认为,主要原因是文献^[21]的试验中,电容器的升温过程是在带电情况下得到的,在降温过程是在不带电的情况下得到的,而本文的实验数据,不管是在升温过程还是降温过程,都是在电容器不带电情况下得到的。根据文献^[21],电容器元件带电情况下的热阻采用的是均布模型,其热阻较小;而不带电情况下,电容器元件的热阻模型是集中模型,其热阻较大,两者的差异是导致这个结果差异的主要原因。

2.3 散热系数计算

根据文献^[21],在常压下电容器外壳对周围空气的散热系数可以取:加热散热系数 $k_1 = 1.2 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$,冷却散热系数 $k_3 = 1.1 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 。将表4的数据代入式(6)–(8),得到表5所示的结果。

从表5可以看到,在加热时,5 000 m海拔下,电容器对周围空气的散热系数从常压下的 $1.2 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 减小到 $0.86 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$,平均降低了28%,数据一致性很好;在平均大气压强为54 kPa的高海拔地区,电容器的冷却散热系数从 $1.1 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 减小到 $0.82 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$,平均减小了25%,数据一致性很好。

表4 常压下和高海拔下试品的加热和冷却相关数据

Table 4 Data related to heating and cooling of the test samples under normal pressure and high altitude conditions

试品		P ₁ -A	P ₁ -B	P ₁ -C	P ₂ -A	P ₂ -B	P ₂ -C
加热起点	时间/h	8.5	8.5	8.5	1.5	1.5	1.5
	温度/°C	41.2	40.2	40.1	41.7	40.5	40.1
加热终点	时间/h	38.0	38.0	38.0	43.0	43.0	43.0
	温度/°C	80.0	78.7	78.4	80.0	78.5	78.3
时间差/h		29.5	29.5	29.5	41.5	41.5	41.5
温升/K		38.8	38.5	38.3	38.3	38.0	38.2
冷却起点	时间/h	58.5	58.5	58.5	61.0	61.0	61.0
	温度/°C	80.1	78.9	78.7	80.1	78.8	78.5
冷却终点	时间/h	89.0	89.0	89.0	101.5	101.5	101.5
	温度/°C	41.2	40.0	40.1	40.8	39.7	39.6
时间差/h		30.5	30.5	30.5	36.5	36.5	36.5
温升/K		39.9	38.9	38.6	39.1	38.9	39.6
k_2 或 $k_4/10^{-3}$		0.864	0.866	0.857	0.820	0.824	0.822

表5 常压和高海拔下电容器的加热和冷却的散热系数
Table 5 Thermal coefficients of heat and cooling of capacitors under normal pressure and high altitude conditions

平均大气压	常压下		5 000 m海拔54 kPa					
	加热 k_1	冷却 k_3	加热			冷却		
散热系数	1.2	1.1	试品 A	试品 B	试品 C	试品 A	试品 B	试品 C
			0.864	0.866	0.857	0.820	0.824	0.822
散热系数平均值/ 10^{-3}	—	—	$k_2=0.86(-28\%)$			$k_4=0.82(-25\%)$		
变化幅度/%	1.00	1.00	-28.0	-27.8	-28.6	-25.5	-25.1	-25.3
偏差/%	—	—	-0.22	-0.39	+0.61	+0.24	-0.29	+0.05

2.4 高海拔下电容器的温升及稳定时间计算

2.4.1 温升计算

前面通过实验得到了常压和5 000 m海拔下电容器外壳对空气的散热系数,目的是用来确定在高海拔下电容器的内部最热点温升。以下仅以升温为例推导分析电容器在高海拔下的温升和稳定时间变化,冷却情况可以参考推导。

根据文献^[21],电容器最热点温升公式为

$$\Delta T_{1m} = P_1 R_1 = P_1 (R_{11} + R_2) = P_1 R_{11} \left(1 + \frac{R_2}{R_{11}} \right) \quad (10)$$

式中: ΔT_{1m} 为升温时电容器的最热点温升,K; P_1 为电容器的损耗功率,W; R_1 为电容器的总热阻,K/W; ΔT_{1k} 为电容器外壳的平均温升,K; $R_{11} = \frac{1}{k_1 S}$ 为电容器外壳的耗散热阻,K/W; R_2 为电容器内部的传导热阻,k/W。

根据文献^[23], $\Delta T_{1k} = \frac{P_1}{k_1 S}$,代入式(10)可以得到:

$$\Delta T_{1m} = \Delta T_{1k} \left(1 + \frac{R_2}{R_{11}} \right) = \Delta T_{1k} (1 + \alpha) = \beta_1 \Delta T_{1k} \quad (11)$$

式中: $\alpha = \frac{R_2}{R_{11}}$; $\beta_1 = 1 + \alpha$ 。

同理,在高海拔下,电容器心子最热点温升计算公式为

$$\Delta T_{2m} = \Delta T_{2k} \left(1 + \frac{R_2}{R_{12}} \right) = \beta_2 \Delta T_{2k} \quad (12)$$

式中: ΔT_{2m} 为高海拔下电容器最热点温升,K; $\Delta T_{2k} = \frac{P_1}{k_2 S}$ 为高海拔下电容器的外壳温升,K。其中 k_2 为电容器外壳在高海拔下的散热系数,W/(cm²·K); $\beta_2 = 1 + \frac{R_2}{R_{12}} = 1 + R_2 k_2 S = 1 + \frac{k_2}{k_1} \alpha$ 。

考虑到 $\Delta T_{2k} = \frac{P_1}{k_2 S} = \frac{k_1}{k_2} \frac{P_1}{k_1 S} = \frac{k_1}{k_2} \Delta T_{1k}$,这样可以得到高海拔地区电容器外壳温升的差值 ΔT_k 为

$$\Delta T_k = \Delta T_{2k} - \Delta T_{1k} = \frac{k_1 - k_2}{k_2} \Delta T_{1k} = \frac{a}{1 - a} \Delta T_{1k} \quad (13)$$

式中, $a = \frac{k_1 - k_2}{k_1}$,为高海拔地区电容器外壳的散热系数与海拔1 000 m及以下的散热系数的减小幅度。令 $\eta = \frac{a}{1 - a}$,则有

$$\frac{\Delta T_k}{\Delta T_{1k}} = \eta = \frac{a}{1 - a} \quad (14)$$

从式(14)可以看出,高海拔地区电容器外壳温升差值,与其散热系数的减小幅度成正比,与常压下电容器外壳温升成正比。

从式(12)-(13)可以得到电容器在高低海拔下最热点温升差值 ΔT_m 计算公式为

$$\Delta T_m = \Delta T_{2m} - \Delta T_{1m} = \beta_2 \Delta T_{2k} - \beta_1 \Delta T_{1k} \quad (15)$$

将 β_1 、 β_2 代入式(15)化简后可以得到:

$$\Delta T_m = (1 + \frac{k_2}{k_1} \alpha) \frac{k_1}{k_2} \Delta T_{1k} - (1 + \alpha) \Delta T_{1k} = \Delta T_k \quad (16)$$

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_{1k}} = \frac{\Delta T_k}{\Delta T_{1k}} = \eta = \frac{a}{1 - a} \quad (17)$$

对比式(13)和式(16)可以看到,电容器在常压下和在5 000 m海拔下最热点温升与其外壳的温升差值是一样的。这也容易理解,由于电容器内部的传导热阻不变,电容器的有功损耗即热流不变,电容器心子与外壳间的温升不变,其心子最热点温升增加值实际上就是其外壳的温升增加值。

将 $k_1 = 1.2 \times 10^{-3}$ W/(cm²·K), $k_2 = 0.86 \times 10^{-3}$ W/(cm²·K)代入式(11)-(16),可以得到表6的计算结果。表6中,已知 $\beta_1 = 3.0$, $\alpha = 2.0$, $\Delta T_{1k} = 7$ K。

表6 电容器外壳和心子最热点温升计算结果
Table 6 Calculated temperature rise results for the capacitor case and the hot-spot of the core

参数	ΔT_{2k} /K	ΔT_k /K	β_2	ΔT_{1m} /K	ΔT_{2m} /K	ΔT_m /K
计算值	9.8	2.8	2.44	21.0	23.8	2.8

从表6可以看出,对于在海拔为1 000 m及以下地区,外壳温升为 $\Delta T_{1k} = 7$ K 的电容器,在海拔5 000 m的地区运行时,电容器外壳温升增加到9.8 K,增加了2.8 K;同时,电容器最热点温升,同比

也增加了 2.8 K。这个结果与前面的理论分析是一样的。

2.4.2 热稳定时间计算

根据式(6)可以得到:

$$\frac{k_2}{k_1} \approx \frac{t_1}{t_2} \quad (18)$$

从式(18)可以看出,电容器在海拔低于 1 000 m 地区的温度稳定时间与在高海拔地区的温度稳定时间之比等于其散热系数的反比。考虑到 $a = \frac{k_1 - k_2}{k_1}$, 可以得到: $\frac{k_2}{k_1} = 1 - a$ 。代入式(18)可以得到:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{1}{1-a} t_1 - t_1 = \frac{a}{1-a} t_1 \quad (19)$$

$$\frac{\Delta t}{t_1} = \eta = \frac{a}{1-a} \quad (20)$$

式(19)–(20)中, Δt 为高海拔下热稳定时间与常压下热稳定的时间差。

通过式(20)可以计算得到,电容器外壳表面的散热系数在高海拔下下降 $a=28\%$,则电容器在海拔 5 000 m 地区的温度稳定时间会增加 $\eta=39\%$ 。也就是说,海拔越高,电容器的温度稳定时间越长。

式(14)电容器外壳温度差、式(17)电容器最热点温度差和(20)电容器稳态时间差的百分比的百分比都是 $\eta = \frac{a}{1-a}$, 其计算结果如图 5 所示。

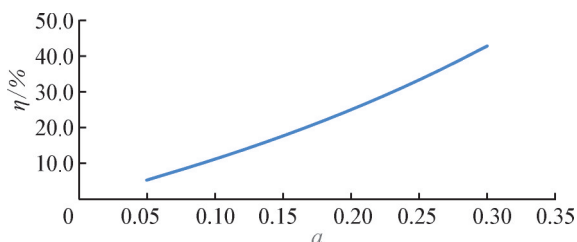


图5 η 与 a 的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between η and a

从图 5 可以看出,随着电容器运行海拔增加,电容器外壳对周围空气的散热系数减小,电容器运行在高海拔地区的壳温和最热点温升非线性增加,电容器达到热稳态的时间变长,其变化规律与电容器运行温升的变化规律一致。

需要注意的是,本文的验证是在电容器不带电的情况下进行的,根据文献^[24]的分析,直流支撑电容器圆元件的散热模型,元件在带电和不带电的情况下,元件的散热模型和热阻是有区别的。电容器带电情况下,元件的热阻小一半左右,这对于本文研究的热平衡时间的影响有多大,还需要进一步研究。

3 结语

1)通过不同海拔下,电容器升温 and 降温的验证实验,可以得到电容器升温 and 降温到稳态的时间,从而得到高海拔下电容器外壳表面的散热系数。

2)根据实验数据计算,在 5 000 m 海拔下,电容器升温时对周围空气的散热系数从 $1.2 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 减小到 $0.86 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$,减小了 28%;电容器的降温散热系数从 $1.1 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 减小到 $0.82 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$,减小了 25%。

3)理论推导表明,在高海拔下,电容器心子最热点温升增加量和其外壳最高温升的增加量相等。实验表明,在对应海拔 5 000 m 的大气压强条件下,实验电容器的最热点温升和外壳温升均增加了 2.8 K。

4)海拔越高,电容器温度稳定的时间越长。电容器在海拔 5 000 m 地区,外壳表面的散热系数下降 28%;温度稳定时间比在海拔 1 000 m 及以下地区增加了 39%。

参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统(第2版)[M]. 机械工业出版社, 2017.
- [2] 赵畹君. 高压直流输电工程技术(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [3] 吴美娟. 柔性直流输电技术发展现状及技术研究[J]. 山东工业技术, 2014(23): 22-24.
- [4] 雷晓燕, 曹刚, 肖梁乐, 等. 直流支撑电容器电容介损测量方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(1): 50-56.
LEI Xiaoyan, CAO Gang, XIAO Liangle, et al. Influence of ambient temperature and applied voltage on the temperature rise and temperature distribution of self-healing power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1): 50-56.
- [5] 吴跃山. 浅析高海拔对电器开关设备性能影响[J]. 电力讯息, 2016(9): 11-12.
- [6] 王平, 肖智勇. 高海拔正极性操作波下放电起始时延特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 857-864.
WANG Ping, XIAO Zhiyong. Characteristics of discharge initiation delay under high altitude positive operating wave [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 857-864.
- [7] 绝缘配合 第1部分: 定义、原则和规则: GB/T 311. 1—2012[S]. 2012.
Insulation coordination—Part 1: Definitions, principles and rules: GB/T 311. 1—2012[S]. 2012.
- [8] Insulation coordination—Part 1: Definitions, principles and rulers IEC 60071—1: 2006[S]. 2006.

- [9] Classification of environmental conditions—Part 2—3: Environmental conditions appearing in nature—Air pressure.: IEC 60721—2—3[S].
- [10] 绝缘配合—第1部分 定义,原则和规则 GB 311. 1—1997[S]. 1997.
Insulation coordination—Part 1: Definitions, principles and rulers: GB 311. 1—1997. [S]. 1997.
- [11] Insulation co-ordination—Part 1: Definitions, principles and rules: IEC60071—1:1993[S]. 1993.
- [12] 高原型电力电容器: GB/T 6915—1985[S].
High prototype power capacitor: GB/T 6915—1985[S]. 1985.
- [13] 左强林,邓光昭. 青藏直流工程直流滤波电容器研制的技术问题研究[J]. 高压电器, 2013, . 49(4):71-75.
ZUO Qianglin, DENG Guangzhao. Study on the technical problems of DC filter for qianghai-tibet DC project[J]. High Voltage Apparatus, 2013, . 49(4):71-75.
- [14] 左强林. 电容器内部的负压[J]. 电力电容器技术, 1988 (2):29-30.
- [15] 孙翠平,关素娇,李晓军,等. 青藏换流站电容器成套装置外绝缘的设计总结[C]//2012年输变电年会论文集, 2012.
- [16] 黄云锴,储松潮. 电力电子电容器高海拔和超高海拔应用的研究[J]. 安徽科技, 2019(10):26-28.
- [17] 高电压试验技术 第1部分:一般定义及试验要求: GB/T 16927. 1—2011[S]. 2011.
High-voltage test techniques—Part 1: General definitions and test requirements: GB/T 16927. 1—2011[S]. 2011.
- [18] 环境试验—第2部分:试验—试验方法:低气压: GB/T 2423. 21—2025[S]. 2025.
Environmental testing—Part 2—13: Tests—Test M: Low air pressure: GB/T 2423. 21—2025[S]. 2025.
- [19] Environmental testing—Part 2—13: Tests M: Low air pressure: IEC 60068—2—13:2021[S]. 2021.
- [20] IEEE Standard for Shunt Power Capacitors: IEEE Std 18—2012[S]. 2012.
- [21] 张茅山,左强林,倪琰,等. 直流支撑电容器的热时间常数计算与验证[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(1): 66-71.
ZHANG Maoshan, ZUO Qianglin, NI Yan, et al. Calculation and verification of thermal time constants of DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1):66-71.
- [22] ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Calculation and verification of thermal time constant of circular element of DC-link capacitor[J]. IET Nanodielectrics, 2026, 8(1):e70015
- [23] 沈鸿. 电机工程手册(试用版)第五卷,第29篇. 机械工业出版社, 2019.
- [24] 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):121-127.
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):121-127.

作者简介:

左强林(1967—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail:zuoql@sumcing-tech.com。