

多谐波工况下高压并联电容器热稳定温度影响因素研究

孙启明¹, 祝令瑜¹, 盖 斌²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 谐波将引起高压并联电容器损耗增大, 导致设备发热严重, 影响高压并联电容器安全稳定运行。现有研究对电容器热稳定温度随谐波组合的影响规律研究较少, 且不能准确获得内部温度。通过对变电站内电容器运行数据进行测量分析, 获得电容器的实际运行工况中奇次谐波含量高。基于此, 为并联电容器施加多种奇次谐波, 以模拟实际运行工况, 采用恒电流法对高压并联电容器开展热稳定试验, 在被试电容器外部和内部分别安装温度传感器, 测量不同工况下电容器的外壳温度和心子温度。试验结果显示, 在单频次电流激励下, 热稳定温度随频率先降低后增加。对高压并联电容器的介质损耗和导体损耗进行分析, 掌握谐波频次及组合对电容器热点温度的影响规律。在低频段, 谐波频率升高会导致电压降低, 进而引起介质损耗降低, 电容器热稳定温度降低; 在中高频段, 介质损耗受频率影响较小, 频率升高将导致金属导体产生趋肤效应, 引起导体损耗增加, 导致电容器热稳定温度升高。研究结果可为电容器的温度场优化设计提供理论依据。

关键词: 高压并联电容器; 多谐波工况; 热稳定试验; 介质损耗; 趋肤效应

Research on the Influence Factors of Thermal Stability Temperature of High Voltage Shunt Capacitor Under Multi-harmonics Condition

SUN Qiming¹, ZHU Lingyu¹, GAI Bin²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Harmonic currents increase losses in high-voltage shunt capacitors, causing significant heating and compromising safe operation. Existing research offers limited insights into how harmonic combinations affect capacitor thermal stability and lacks precise methods for determining internal temperatures. Based on the observations, multiple odd harmonics were applied to the shunt capacitors to simulate actual operating condition, and thermal stability tests were conducted using a constant current method. Temperature sensors are installed on the outside and inside respectively to measure the shell temperature and core temperature under different working conditions. The experimental results indicated that under single-frequency current, the thermal stability temperature initially decreases and then increases as the frequency rises. By analyzing the dielectric and conductor losses of the high voltage shunt capacitors, the study elucidates the effects of harmonic frequencies and their combinations on the hot spot temperatures of the capacitors. At lower frequency ranges, an increase in harmonic frequency leads to a voltage drop, which reduces dielectric losses and, consequently, lowers the thermal stability temperature of the capacitors. In the medium-to-high frequency ranges, dielectric losses are less affected by frequency, but the increased frequency induces the skin effect in the metal conductors, resulting in higher conductor losses and a subsequent rise in the thermal stability temperature of the capacitors. These findings provide a theoretical foundation for optimizing the thermal field design of capacitors.

Key words: high voltage shunt capacitor; multiple harmonic condition; thermal stability test; dielectric losses; skin effect

0 引言

随着中国“以新能源为主体的新型电力系统”建设进展不断加快, 光伏、风电等新能源和非线

性负荷接入电力系统的比例不断提高, 高频次谐波在电力系统中快速增长且持续存在^[1-2]。谐波会使高压并联电容器损耗增大, 伴随谐波电流增加, 电容器内部温度进一步升高^[3]。高温将加速电容

器内聚丙烯介质老化,引起介质绝缘性能下降^[4],影响高压并联电容器使用寿命^[5-6]。因此,获取谐波对高压并联电容器内部热点温度的影响规律,对保证电容器的可靠运行十分重要。

目前,针对高压并联电容器内部热点的温度分析通常采用试验测量^[7-8]和数值分析^[9-11]两种方法。严玉婷等人以 334 kvar 的并联电容器为参照制作缩比模型,内外分别放置两个热电偶,分别在室温和烘箱加热条件下注入不同功率开展热稳定性试验,获得内外测点温度与环境温度和注入功率的关系^[7]。陈力等人针对普通并联电容器和添加防火介质的防火电容器的开展热稳定试验,研究了外壳散热面积和防火介质对并联电容器的温升影响^[8]。陈伟等人建立了特高压用并联电容器热稳定仿真模型,得到了电容器单元内部热点温度和位置,并改变电容器单元的放置方式、结构参数和环境温度等,进一步掌握了电容器单元热点温度的影响规律^[12]。王子建等人在 Fluent 15.0 建立了电容器温度场仿真模型,利用有限体积法对电容器单元的温度场进行了求解,获得了电容器单元的外壳温度分布和热点位置^[13]。ZHAOLIANG 等人构建了考虑频率响应的电容器等效串联模型,在 COMSOL Multiphysics 5.6 中建立了基于电热耦合的电容器热场等效仿真模型,分析了在不同谐波条件下电容器的发热特性,工频叠加不同频次谐波下,电容器温升基本相同,但其采用仿真计算,计算过程中进行了一定的简化处理^[14]。

综上所述,国内外对高压并联电容器单元的热点温度展开了相关研究,但主要针对工频条件下电容器的热稳定性做了研究,针对多谐波工况下高压并联电容器的热稳定温度分析研究较少,且仿真分析通常会进行简化,不能准确获得谐波对高压并联电容器的内部热点温度的影响规律。

文中分析了高压并联电容器实际运行工况,在多谐波工况下对高压并联电容器单元开展热稳定试验,获取谐波频率和不同组合对电容器单元的热稳定温度。通过对高压并联电容器的介质损耗和导体损耗进行分析,掌握谐波频率和组合对电容器发热的影响规律,为高压并联电容器的温度优化设计提供了理论依据。

1 高压并联电容器运行工况分析

特高压输电线路中无功功率波动较大,按照无功就地平衡的原则,高压变电站中通常会布置大量并联电容器进行无功补偿。在变电站中,高压并联电容器常与滤波电抗器串联共同配置在变电站主变压器的三绕组。某多能汇集的 110 kV 变电站示意图见图 1,主要包括主变压器、110 kV 母线、35 kV 母线和 10 kV 母线,高压并联电容器与串抗率 6% 的电抗器共同配置在主变三母线上,实现无功补偿。

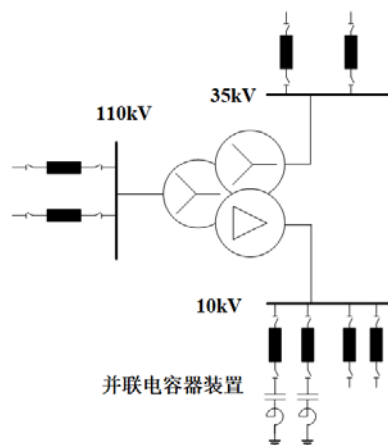


图 1 110 kV 变电站示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 110 kV substation

该变电站位于非线性源、荷汇集区,接入较多新能源和非线性负荷,10 kV 母线上谐波含量较高,并联电容器频繁出现故障。变电站 10 kV 母线实测电压谐波含量见图 2,取谐波电压含有率的 95% 概率值。可以发现,在高压并联电容器配置的 10 kV 母线上,5、7、11、13 次等奇次谐波含量较高。对电容器支路的奇次谐波电压进行测量,测量结果见图 3。高压并联电容器支路主要的谐波电压频次为 3、5、7、11、13、15、17 次,其中 5 次谐波含有量最高,谐波电压接近 7%。

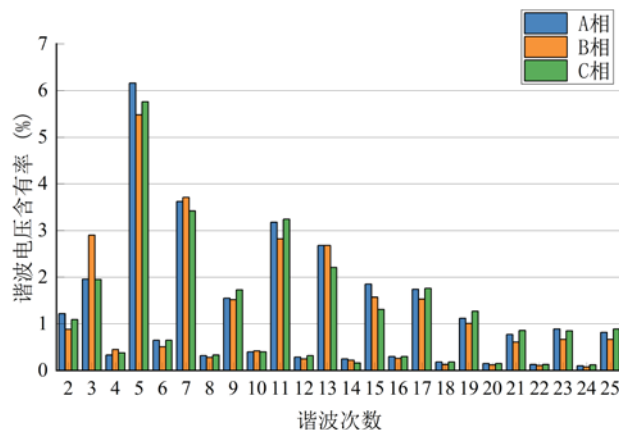


图 2 10 kV 母线谐波电压含有率

Fig. 2 Harmonic voltage content of 10 kV bus

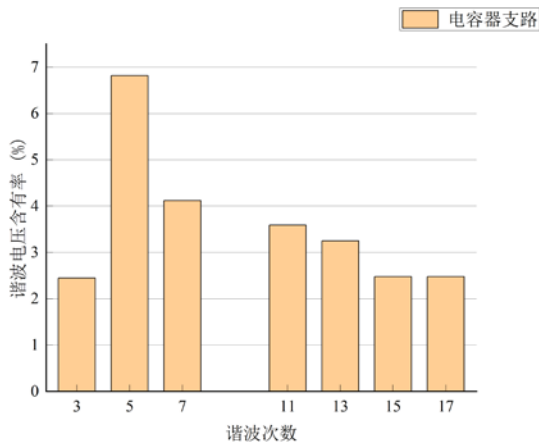


图3 电容器支路奇次谐波电压含有率

Fig. 3 Odd harmonic voltage content of capacitor branch

在交流电路中，施加在电容器上的电压电流满足

$$I = U\omega C \quad (1)$$

式(1)中： I 为流过电容器的电流； U 为电容承受电压； $\omega=2\pi f$ 为电压电流角频率； C 为电容器的容值。稳态导通情况下，电容器支路满足齐次性和叠加性，对同一电容器，当谐波电压不变时，谐波电流随谐波频次的增大而增大，电容器的高频谐波电流成分含量高。高频次谐波电流会在导体中产生集肤效应，引起电容器单元产生额外的损耗。综上分析，在后续热稳定性试验时，将在电容器单元施加奇次谐波，且需考虑高频谐波对电容器内部热点温度的影响，保证施加电流可以模拟实际运行工况。

2 高压并联电容器热稳定试验

2.1 试验方案

文中使用典型 BAM12/ $\sqrt{3}$ -334-1W 电容器单元作为试验对象，电容器额定参数见表 1。在电容器单元内部预埋 PT100 电阻式温度传感器，用以测量电容器内部热点温度，同时在电容器的外壳布置热电偶测量外部温度。温度测点分布见图 4，外部测点 1 和外部测点 2 分别位于电容器单元的侧面中心处和大面中心处，内部测点 1 和内部测点 2 分别位于心子的高度 2/3 处和心子高度的 1/2 处。

表 1 并联电容器单元电气参数

Table 1 Electrical parameters of shunt capacitor

电气参数	数值
额定电压/kV	12/ $\sqrt{3}$

额定电流/A	48.21
整机电容/ μF	22.15
元件电容/ μF	7.38
并联数 \times 串联数	9 \times 3

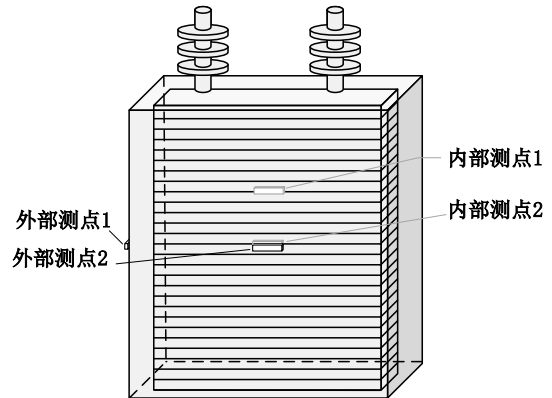


图 4 试验电容器单元测点分布图

Fig. 4 Temperature measuring point distribution of test capacitor unit

试验参考 GB/T 11024.1—2019《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》^[15]规定开展热稳定试验。将 3 台相同的单元放置在不强迫通风的高温试验箱中，3 台电容器并联连接，施加相同电压。被试电容器放置在两台陪试电容器之间，单元间距约 7.5 cm。试验电容器单元见图 5。采用恒电流法施加激励，给被试电容器施加有效值等于额定值的多频谐波电流，设置高温试验箱的环境温度为 40 °C，每种工况下施加电流 48 h，并在最后 6 h 内读取温度传感器的测量数据 4 次，保证 4 次测量的温度波动小于 1 °C，即认为达到热平衡状态。



图 5 试验电容器单元

Fig. 5 Test capacitor unit

2.2 试验电流计算

根据高压并联电容器的工况分析，将对被试高压并联电容器单元施加 3~25 次奇次谐波电流，为充分掌握谐波对电容器单元发热的影响规律，

进一步考虑 25~50 次高频谐波电流。为研究谐波频率对高压并联电容器单元的发热影响，首先对电容器分别施加有效值等于额定电流的基波和谐波电流；为研究谐波组合对高压并联电容器单元的发热影响，对电容器施加基波叠加单频谐波和基波叠加两种谐波的电流，总电流有效值等于额定电流。基波叠加谐波时，电流有效值 I 可由各次电流有效值计算

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h \in \{h_n\}} (I_h^2)} \quad (2)$$

式(2)中： I_1 为基波电流有效值； I_h 为谐波电流有效值。

当基波叠加单频谐波时

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_h^2} \quad (3)$$

设置基波电流有效值 $I_1=44.3$ A，则单频谐波有效值 $I_h=18.5$ A。

当基波叠加两种频次谐波时，

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_{h1}^2 + I_{h2}^2} \quad (4)$$

设置基波电流有效值 $I_1=44.3$ A，设置谐波电流有效值相等，则谐波有效值 $I_{h1}=I_{h2}=13.1$ A。被试电容器单元施加的多谐波电流频次及各频次电流有效值见表 2。

表 2 多谐波电流频次及有效值

Table 2 Frequency count and effective value of multiple harmonic currents

电流频次组合	基波电流有效值/A	谐波电流有效值/A
1	48.0	—
3	—	48.0
5	—	48.0
7	—	48.0
11	—	48.0
13	—	48.0
23	—	48.0
37	—	48.0
49	—	48.0
1+3	44.3	18.5
1+49	44.3	18.5
1+3+5	44.3	13.1
1+47+49	44.3	13.1

2.3 试验结果

根据表 2 所列谐波电流组合对被试电容器施加电流激励，内部测点和外部测点的热稳定温度见表 3。外部测点 1 为电容器外壳侧面的中点，外部测点 2 为电容器外壳大面的中点，因为侧面由电容器汇流母排，当通过大电流时，汇流母排发热，导致侧面温度高。从试验数据可以看出，

电容器单元外壳侧面热稳定温度稍高于外壳大面温度。内部测点 1 位于心子高度 2/3 处，内部测点 2 位于心子高度 1/2 处，均位于电容器心子侧，可以反映电容器单元心子的温度。根据表 3 试验数据，心子 1/2 高度处热稳定温度高于 2/3 高度处，叠加谐波的工况比单频谐波工况热点温度高，表明电容器单元在叠加谐波工况下发热更严重。

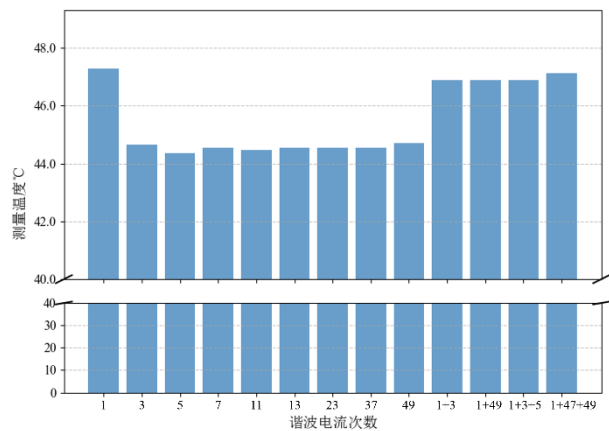
表 3 被试电容器单元热稳定试验数据

Table 3 Thermal stability test data of the capacitor under test

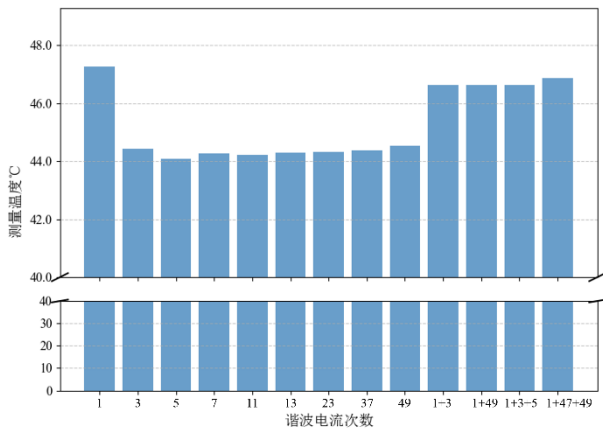
谐波组合	外部测点 1	外部测点 2	内部测点 1	内部测点 2
1	47.29	47.26	53.57	53.76
3	44.65	44.42	49.08	49.22
5	44.35	44.08	48.61	48.64
7	44.55	44.27	48.72	48.75
11	44.47	44.22	48.55	48.54
13	44.55	44.29	48.64	48.66
23	44.54	44.31	48.58	48.60
37	44.55	44.37	48.57	48.63
49	44.71	44.54	48.81	48.93
1+3	46.89	46.62	52.82	52.99
1+49	46.89	46.63	52.93	53.10
1+3+5	46.89	46.62	52.92	53.07
1+47+49	47.12	46.85	53.26	53.47

3 热稳定温度影响因素分析

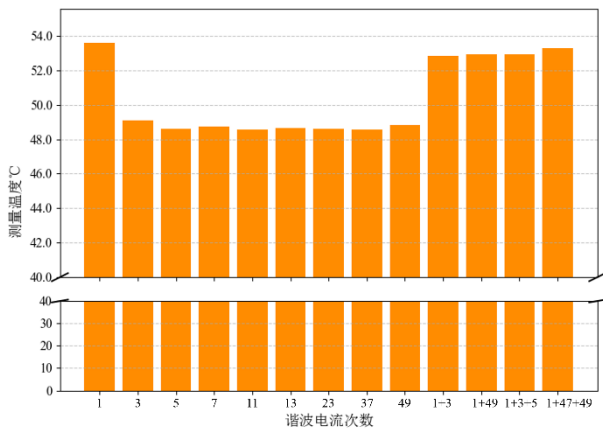
文中使用典型 BAM12/√3-334-1W 电容器单元作为试验对象开展多谐波组合工况下热稳定试验，并在被试电容器上布置温度传感器测量不同工况下热稳定温度，内外部各测点热稳定温度随谐波组合变化情况见图 6。



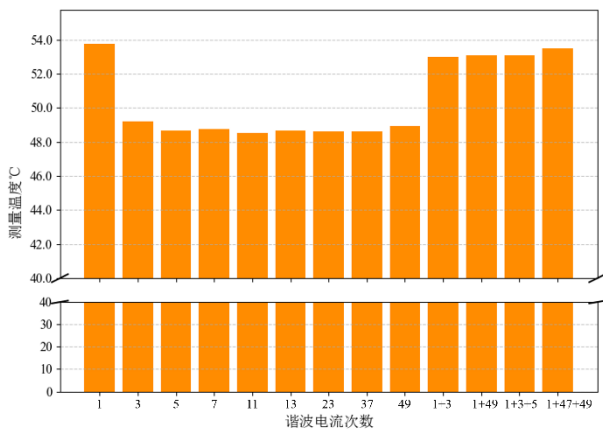
(a) 外部测点 1



(b) 外部测点 2



(c) 内部测点 1



(d) 内部测点 2

图 6 试验电容器单元测点分布图

Fig. 6 Temperature measuring point distribution of test capacitor unit

在单频电流激励下，测点温度随电流频率升高先下降再提高。在低频段，电容器热稳定温度随频率升高下降。如式(1)所示，当电容器电流有效值 I 不变时，当频率 f 升高，电容器承受的电压 U 降低，且与频率呈反比关系。介质损耗是电

介质在交流电场的作用，由于电介质极化和电导的滞后效应引起的损耗。电容器设备的介质损耗通常用介质损耗角正切值 $\tan\delta_0$ 表示，当电容器承受电压 U 时，介质损耗 P_d 为

$$P_d = U^2 \omega C \tan \delta_0 \quad (5)$$

式(5)中： $\omega=2\pi f$ 为角频率； C 为电容器的容值。在单频电流激励下，频率 f 升高，电容器的介质损耗减小，电容器心子发热减少，电容器热稳定温度下降。

在中高频段，电容器热稳定温度随频率升高而有小幅度升高。当导体中有交流电流通过时，导体内部的电流分布不均匀，集中分布在导体表面，这种现象称为趋肤效应。趋肤效应将导致导体等效电阻变大，损耗功率增加，趋肤深度 δ 计算公式为

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (6)$$

式(6)中： $\omega=2\pi f$ 为角频率； μ 为磁导率； σ 为电导率。频率 f 越高，趋肤深度 δ 越小，电流越集中分布在导体表面，导体损耗越大。由于趋肤效应带来的损耗功率越大，并且中高频段介质损耗变化影响较小，因此电容器热稳定温度升高。

4 结论

文中分析了高压并联电容器实际运行工况，针对 BAM12/ $\sqrt{3}$ -334-1W 电容器单元开展多谐波组合工况下热稳定试验，在被试电容器单元内部外部分别布置两个温度传感器，测量在不同谐波组合工况下外壳温度和心子温度，分别针对电容器介质损耗和导体损耗进行分析，得到以下结论：

1)通过对 110 kV 多能汇集换流站的 10 kV 母线电压和高压并联电容器支路电压进行测量分析，高压电容器承受奇次谐波含量较高，3~17 次谐波电压含有率均大于 2.3%，5 次谐波含有量最高，接近 7%。

2)对高压并联电容器单元开展多谐波工况下热稳定试验，由于汇流母排发热导致外壳侧面温度高于大面温度，电容器心子 1/2 高度处热稳定温度高于 2/3 高度处，且叠加谐波工况电容器单元热稳定温度高于单频谐波的热稳定温度。

3)采用恒电流法保证电容器施加电流有效值 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。

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] 汪颖,罗代军,肖先勇,等.IEEE ICHQP2018与电能质量发展方向[J].电力自动化设备,2019,39(4):197-203.
WANG Ying, LUO Daijun, XIAO Xianyong, et al. IEEE ICHQP2018 and development directions of power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 197-203.
- [3] 赵晨.谐波影响下电力电容器及其串联电抗器的多物理场研究[D].广州:华南理工大学,2021.
ZHAO Chen. Research on multiphysical fields of power capacitor and its series reactor under the influence of harmonics[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [4] 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 Manqian. High-temperature polymer dielectrics for film capacitors: Review and prospect[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3105-3123.
- [5] 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.
SHEN Wenqi. Influence of temperature, voltage, harmonic and inrush transient current on power capacitor life expectancy[J]. Power Capacitor, 2005, 26(2): 6-8.
- [6] KRECZANIK P, VENET P, HIJAZI A, et al. Study of supercapacitor aging and lifetime estimation according to voltage, temperature, and RMS current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4895-4902.
- [7] 严玉婷,倪学锋.全膜电容器热稳定试验研究[J].电力电容器,2003,17(3):34-37.
YAN Yuting, NI Xuefeng. Research on thermal stability test of all-film power capacitor[J]. Power Capacitor, 2003, 17(3): 34-37.
- [8] 陈力,熊易,雷晓燕,等.防火电容器热稳定性研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):96-101.
CHEN Li, XIONG Yi, LEI Xiaoyan, et al. Study on thermal stability of fireproof power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 96-101.
- [9] 刘文泽,蔡泽祥,黄松波,等.高压电力电容器内部最热点温度的计算模型[J].电力自动化设备,2009,29(7):82-84.
LIU Wenzhe, CAI Zexiang, HUANG Songbo, et al. Calculation model of HV power capacitor internal hot-spot temperature[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 82-84.
- [10] 倪学锋,王子建,林浩,等.特高压用并联电容器温度场仿真[J].高压电器,2016,52(2):107-114.
NI Xuefeng, WANG Zijian, LIN Hao, et al. Temperature field simulation of shunt power capacitor used to UHV engineering[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 107-114.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王子建,严飞,侯智剑,等.高压全膜电容器热稳定性试验条件下的温度场特性[J].电工技术学报,2016,31(17):207-216.
WANG ZI Jian, YAN Fei, HOU Zhijian, et al. Thermal field characteristics of high voltage film capacitors in thermal stability test[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 207-216.
- [14] XING Zhaoliang, GUO Shaowei, SUN Qiming, et al. Thermal field simulation of high voltage shunt capacitor

based on electrothermal coupling in harmonic environment[C]//2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). [S.l.]: IEEE, 2024: 5052-5057.

[15]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]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General: GB/T 11024.1—2019[S]. Beijing, China. China Standard Press, 2019.

孙启明(2000—), 男, 博士研究生, 研究方向为新型电力系统下电容器电热特性及其失效风险评估(E-mail: sunqiming@stu.xjtu.edu.cn)。

祝令瑜(1988—), 男, 博士, 教授, 研究方向为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(E-mail: zhuly1026@xjtu.edu.cn)。

盖 斌(1988—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力电容器及成套装置的检测和试验研究。