

中频电热电容器模拟运行特性研究

陈 勇, 吴建辉, 童卫根, 官志娟

(杭州欧能电气有限公司, 杭州 311602)

摘要:中频电热电容器标准中电气试验出厂项目规定用工频或直流进行, 实际运行是在中频电压下, 不能完全准确检测出产品在中频下运行的可靠性。用模拟中频运行试验可经济有效地验证相关产品参数, 指导产品开发及设计。本文利用模拟试验平台, 模拟产品在中频下试验运行。试验结果表明: 工频 50Hz 测试, 不一定能准确反映中频下介质损耗、铝箔及引线电阻涡流损耗叠加对电容器性能的不良影响。研究结论可为中频电热电容器出厂检测、产品设计及产品验证提供帮助。

关键词:中频电热电容器; 出厂试验; 模拟运行; 温升特性

Research on Simulated Operating Characteristics of Medium-Frequency Induction Heating Capacitors

Chen Yong, Wu Jianhui, Tong Weigen, Guan Zhijuan

(Hangzhou Ouneng Electric Co., Ltd., Hangzhou 311602, China)

Abstract: According to the existing standards for electrical factory tests of medium-frequency Induction heating capacitors, the tests are carried out under power frequency or direct current conditions. However, the capacitors actually operate under medium-frequency voltage, so routine factory tests cannot accurately evaluate the operation reliability of products under medium-frequency conditions. The simulated medium-frequency operation test can verify relevant product parameters economically and effectively, and guide product development and design. In this paper, a simulated test platform is built to carry out the operation test of capacitors under medium-frequency conditions. The test results show that the test at 50Hz power frequency cannot accurately reflect the adverse effects on capacitor performance caused by the superposition of dielectric loss, eddy current loss of aluminum foil and lead resistance. The conclusions of this research can provide technical support for factory inspection, structural design and performance verification of medium-frequency heating capacitors.

Key words: medium-frequency induction heating capacitor; routine factory test; simulated operation; temperature rise characteristic

0 引言

中频电热电容器制造行业, 产品出厂检验依据 GB/T 3984.1-2004《感应加热装置用电力电容器》。在工频试验电压下进行电容量、损耗、工频耐压等常规项目检测^[1-2], 不能完全准确检测出产品在中频下运行的可靠性。按标准进行型式试验, 投资成本高, 试验周期长。本文引入模拟运行平台, 期望用一种经济有效的试验方式, 部分替代“型式试验”, 以对产品开发及验证起某种指导作用。

工频试验参数与电容器现场中频服役工况存在明显差异: 中频运行时集肤效应、引线电导损耗、介质发热特性远大于工频条件下, 通过工频出厂检验无法真实反映中频工况诱发的局部过热、绝缘劣化等隐性故障隐患, 致使部分工频测试合格产品投入运行后出现温升超标、早期失效等问题^[3]。

现行电容器出厂试验标准以工频为测试条件, 行业内中频工况模拟试验方案、运行特性的系统性研究较为匮乏。鉴此, 本文开展中频电热电容器模拟运行相关研究, 通过搭建模拟试验回路、结合仿真分析复现实际工况, 弥补工频出厂试验与现场应用之间的数据断层, 对完善产品优化产品结构具有实用价值。

1 工频出厂试验与中频现场工况差异化

1.1 电容器损耗差异: 电热电容器工频 50Hz 出厂试验测量的电容器损耗测试频率低, 流过样品的电流小, 测量的损耗值一般都很小, 但在实际现场使用中电容器损耗随工作频率(数百~数千 Hz)成倍提升, 损耗远大于工频测试值;

1.2 导电部件电导损耗: 电热电容器铝箔极板、引线铜排截面积大, 中频集肤+邻近效应突出, 铝箔端部、焊接点接触损耗发热显著, 工频试验电导损耗几乎检测不出^[4];

1.3 工况扰动: 现场谐波、设备频繁启停、瞬时过压, 在工频试验中都无法反应出来。

2 聚丙烯全膜电热电容器典型失效形式

2.1 内部铝箔端部过热烧蚀

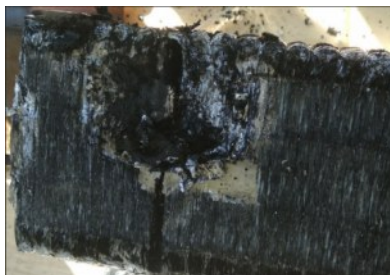


图1 铝箔端部过热烧蚀图

Fig.1 Overheating ablation at the ends of aluminum foil

成因:锡焊连接电导损耗集中在铝箔引出部位,工频试验无明显发热情况,焊接不良的电容器,投入中频运行后端部持续严重发热,周边聚丙烯薄膜受热炭化。

2.2 聚丙烯薄膜受热老化起皱、分层



图2 聚丙烯薄膜受热老化起皱、分层图

Fig.2 Wrinkling and delamination of polypropylene film due to thermal aging

成因:全膜依靠油液导热,内部热量堆积后PP薄膜高温软化收缩、层间分离,绝缘性能下降,逐步发展为局部击穿^[5]。

2.3 局部放电产生气体、壳体鼓胀渗油



图3 局部放电产气、壳体鼓胀渗油图

Fig.3 Gas generation and oil leakage due to partial discharge

成因:高频持续发热使介质绝缘能力下降,局部放电产生气体,壳内压力上升,外壳变形、密封焊缝渗漏,多为长期中频满载运行所致,工频短时试验无法检测该故障隐患。

2.4 元件内部局部击穿短路



图4 元件内部局部击穿短路图

Fig.4 Local breakdown and short circuit inside the component

成因:温升+谐波过压双重作用,薄膜绝缘受损、极板短路,电容器鼓肚报废,该缺陷在工频试验时或全部合格,装机后才能暴露出来^[6]。

2.5 由失效案例引出研究必要性

从多台故障聚丙烯全膜电热电容器解剖结果可见:产品出厂全部通过现行工频标准试验,但中频工况下陆续发生各类热失效、绝缘失效,直接印证单一工频检验存在漏洞,需开展中频模拟运行试验,复现现场工况、预判产品缺陷。

3 中频电热电容器模拟运行试验系统搭建

3.1 试验系统总体组成

本课题利用现有可调中频变频电源、可调空心电抗器、多通道数据采集软硬件、测温元件搭建等效中频谐振模拟试验回路,模拟中频炉现场谐振带负载工况,整套系统由四部分构成:中频电源、谐振负载单元、被测电容器、数据采集单元。

3.1.1 中频电源

三相380V工业用电经KGPS系列中频电源将工频50Hz交流电转变成150~1000Hz的中频交流,通过GR2-500KVA中频升压变压器将电压升电容器所需的额定电压,负载为被试的电容器,及与其并联的大功率空芯电抗器构成谐振回路。调整空芯电抗器的电感量,以达到电容器所要求的额定频率。

3.1.2 负载模拟单元:可调电抗器

通过改变电抗电感量,匹配被测电容器容值,构建LC谐振回路,精准复刻工业中频设备谐振运行、负荷增减的真实工作状态;调节电抗大小,即可模拟设备空载、半载、满载不同工况^[7-9]。

3.1.3 试样

样品一:库存故障产品同型号规格同批次备品;

型号RFM1.6-2000-0.5S 额定电压1600V 额定容量2000kvar 额定频率500Hz

A组产品编号230400127、230400126、230400236

样品二:同型号规格新产品;

型号RFM1.6-2000-0.5S 额定电压1600V 额定容量2000kvar 额定频率500Hz

B组产品编号240500321、240500625、240500323

3.1.4 数据采集单元

软件实时连续存储:运行频率、端电压、回路工作电流、壳体/芯子温度,全程自动记录试验全过程时序数据,为定量分析提供原始数据^[10-11]。

3.2 试验主回路原理

3.2.1 采用LC并联谐振试验回路:可调中频电源→被测电容器→可调电抗器构成闭合谐振回路。

3.2.2 调节电源输出频率+电抗器电感,使回路落在目标谐振点,和现场中频电源-感应线圈谐振工作模式

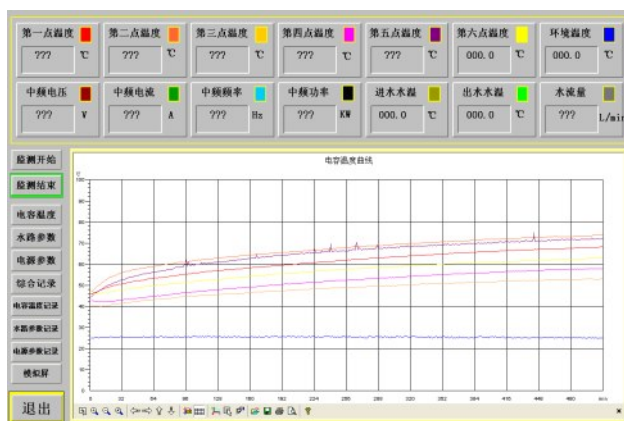


图5 数据采集测控软件界面图

Fig.5 Data Acquisition and Control Software Interface Diagram

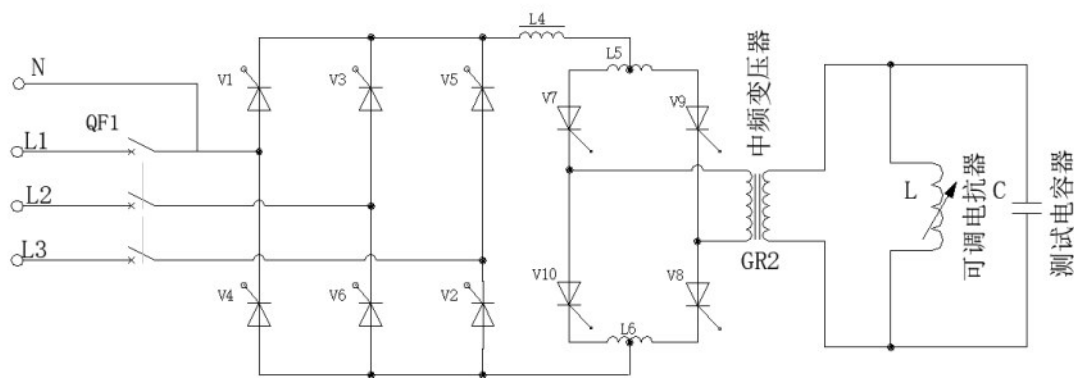


图6 试验电路主回路原理图

Fig.6 Schematic Diagram of the Main Test Circuit

一致；

3.2.3 设定输出电压、电抗值，模拟现场负荷突变、谐波扰动、长时间连续满载工况^[12]。

3.3 试验项目设计(故障解剖同款备品和同型号电容器新品对照试验)

核心对照逻辑：A组为型号 RFM1.6-2000-0.5S 解剖故障电容器备品(样品一)3台。B组为同型号电容器新品(样品二)3台，出厂试验合格，再做中频模拟运行试验，对比两组数据差异。

3.3.1 试验1:额定中频谐振满载模拟试验(模拟现场正常连续运行)，对经过出厂试验的两组同规格型号聚丙烯全膜油浸中频电热电容器，A组为故障解剖同款备品(样品一)，B组为同型号电容器新品(样品二)，试验时采用可调中频电源，调整电源电压为1600V，调整空芯电抗器抽头，设定中频频率500Hz，(按产品常用工况)；. 调整电抗器使回路谐振，电容器带额定负荷连续运行 $\geq 8h$ ；记录中频模拟运行下两组电容器的温升数据，进行对比分析。

3.3.2 试验2:对经过试验1模拟运行后的两组电容器，再次按标准出厂试验，记录关键数据，如电容值，电容器损耗等，进行对比分析。

4 试验数据整理与工况对比分析说明

根据软件导出原始数据(Excel格式时序数据)，整理成数据表、折线图：

4.1 电容器中频模拟运行温升对比

在产品额定工作中频(500Hz)、同等标称容量、等效负荷条件下：

1. 同型号解剖故障电容器备品A组(样品一)实际温升明显高于 同型号电容器新品B组(样品二)；

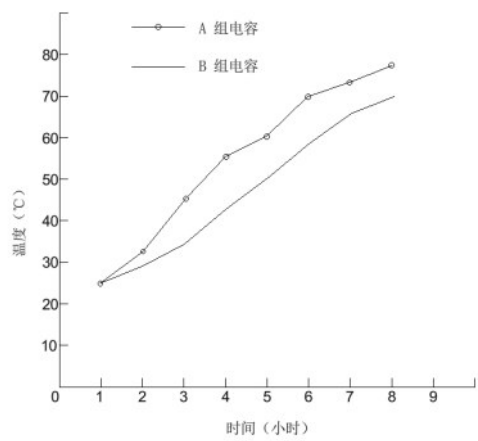


图 7 电容器中频运行温升曲线图(环境温度 22℃)

Fig.7 Temperature Rise Curve of Capacitor Under Medium-Frequency Operation

2. 铝箔极板、引出端头受集肤与邻近效应及大电流影响,电容器损耗激增,实际有功损耗远大于工频测试值;

3. 连续满载运行过程中,A 组(样品一)芯部温升明显高于 B 组(样品二)。

4.2 电容值、电容器损耗数据(按出厂试验标准测试)

表 1 电容器模拟运行前后电容、损耗数据:

Table 1 Capacitance and loss data of the capacitor before and after simulated operation:

试验状态	电容器编号	电容值	损耗值
模拟运行前	A 组-230400127	248.8uF	0.00035
模拟运行后	A 组-230400127	248.9uF	0.00041
模拟运行前	A 组-230400126	248.6uF	0.00034
模拟运行后	A 组-230400126	248.9uF	0.00042
模拟运行前	A 组-230400236	249.2uF	0.00035
模拟运行后	A 组-230400236	249.1uF	0.00040
模拟运行前	B 组-240500321	248.7uF	0.00035
模拟运行后	B 组-240500321	248.9uF	0.00037
模拟运行前	B 组-240500625	248.8uF	0.00035
模拟运行后	B 组-240500625	248.9uF	0.00036
模拟运行前	B 组-240500323	248.9uF	0.00035
模拟运行后	B 组-240500323	248.9uF	0.00035

中频模拟运行后出厂试验电容值数据对比:A 组电容值和 B 组电容值在中频模拟运行前和中频模拟运行后基本无变化。

中频模拟运行前后电容损耗值数据对比:A 组电容损耗值在中频模拟运行后升高(15%)。B 组电容损耗值在中频模拟运行后基本无变化^[13]。

4.3 结合解剖照片分析失效机理

对照第二章故障解剖实拍图片与本次试验异常样品拆解结果:

- 1. 铝箔端部烧损:焊接引出部位持续高温烧蚀铝箔、碳化周边聚丙烯膜,出厂检测无法预判;
- 2. 薄膜分层起皱:内部积热造成聚丙烯高温软化分层,绝缘强度下降,逐步诱发局部场强放电;
- 3. 局部放电产生气体,壳内压力上升,最终出现壳体鼓胀、密封渗漏。

实测温升数据直观证明:工频合格≠中频运行可靠^[14-18]。

4.4 中频电热电容器出厂试验优化方案

1. 增设简易中频抽检试验:在原有工频出厂检验基础上,抽取批次样品在自建中频模拟平台开展短时谐振带负载试验,监测温升,提前筛除隐患产品;

2. 细化中频工况考核指标:参考实测数据,制定对应频率下温升限值、损耗管控标准,替代单一工频判定依据;

3. 产品结构改进建议:针对铝箔端头高热故障,优化汇流焊接结构、加宽引出连接面积,降低大电流电导损耗。

4. 根据电容器产品的型号规格的变化增多,如电压 0.75-6.0KV,容量 360-8000KVAR,频率 150-40000HZ 范围扩大,可考虑配置 IGBT 串联谐振试验平台,以满足多规格电容器的中频模拟运行试验需求^[19]。

5 结语

1. 中频电热电容器出厂试验不能完全准确反应运行时的产品参数情况。中频模拟运行试验对新产品开发定型都有重要参考作用,可作为中频电容器开发设计、生产制造的重要辅助手段。2. 采用可调中频电源+可调电抗器搭建模拟 LC 谐振模拟回路,可模拟场实际工况,配合数据采集软件实现全参数监测,是低成本可行的产品考核验证方案之一

3. 对于具备试验条件的,可抽样进行模拟运行试验,提高产品运行的可靠性。

参考文献:

- [1] 卢有盟,李兆林.全膜电力电容器及其发展[J]. 电力电容器 LU Youmeng, LI ZhaoLin. Development of all-film power capacitor[J]. Power Capacitor,2002(4):1-4
- [2] 刘兵. 电力电容器技术现状及发展趋势[J]. 电力设备,2007 8(6):104-107 .LIU Bing.Current Status and Development Trends of Power Capacitor Technology [J]. Electrical Equipment 2007 8(6):104-107 .
- [3] 感应加热装置用电力电容器.GB/T3984.[S].2004
- [4] 邱小波.薄膜电容器引脚焊接位置的改进对损耗性能的影响[J]. 电子工业专用设备 2018(4):70-73 .QIU Xiaobo. Film capacitor solder position improvement and its effect on dissipation factor[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2018(4):70-73 .
- [5] 宋家乐,张添胤,朱光宇,等.热-应力老化作用对电容器用 BOPP 薄膜绝缘性能的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024,45(1):83-87.
SONG Jiale, ZHANG Tianyin, ZHU Guangyu, et al. Influence of thermal-stress aging on insulation performance of BOPP film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 83-87.
- [6] 马勇,范忠,张照辉,等.江苏电力电容器缺陷统计分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(3):16-20.
MA Yong, FAN Zhong, ZHANG Zhaohui, et al. Statistical analysis of capacitor defects in Jiangsu electric power company [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2018,39(3):16-20.
- [7] 鲁延辉,中频炉研究[J]. 现代商贸工业,2010(19):367-320.
LU YAN HUI, Research on Medium Frequency Induction Furnaces [J]. Modern Business Trade Industry, 2010(19): 367-320.
- [8] 电压型变频多台中频无心感应炉成套装置,GB/T10067.32—2013,[S].2013
- [9] 中频无心感应炉,GB/T30839.31—2014[S],2014
- [10] 林远骥,陈隆道.电力电容器介质损耗在线监测研究[J]. 电器与能效管理技术 2015(14):13-16 LIN Yuanji, CHEN Longdao. Research of online monitoring of power capacitor dielectric loss[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(14): 13-16.
- [11] 潘佩明.电力电容器安全运行分析与在线监测技术研究 [D]. 北京:华北电力大学,2015.
PAN Peiming. Research on Safe Operation Analysis and Online Monitoring Technology of Power Capacitors [D]. Beijing: North China Electric Power University,2015.
- [12] 黄家善,电力电子技术[M],第2版,北京:机械工业出版社,2009.
HUANG Jiashan,Power Electronics Technology[M]. Beijing: China Machine Press,2009

- [13] 付红星,谢永。浅析全膜电容器电容控制[J]. 电力电容器与无功补偿 2013,34(2):44-48. FU Hongxing, XIE Yong. Analysis of capacitance control for all-film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(2):44-48。
- [14] 侯杰,谢远伟。电力电容器损坏原因与抑制措施研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2010,31(5):55-57。 HOU Jie, XIE Yuanwei. Study on damage causes of power capacitor and preventive measures [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(5):55-57.
- [15] 严璋。电力电容器绝缘老化的新诊断方法[J]. 电力电容器, 1992(4):9-11。 YAN Zhang. A New Diagnostic Method for Insulation Aging of Power Capacitors [J]. Power Capacitor, 1992(4):9-11。
- [16] 高晓林,袁奥琪,阮群。提高全膜电容器使用环境温度的尝试[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(2):34-37。 GAO Xiaolin, YUAN Aoqi, RUAN Qun. Attempt on increasing operating ambient temperature of all-film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(2):34-37
- [17] 贺安国,水冷式中频电热电容器的新型设计[J]. 山西机械,2000:99-103. HE AN GUO, A Novel Design of Water-Cooled Medium-Frequency Electric Heating Capacitors[J]. Shanxi Machinery, 2000: 99-103.
- [18] 陈胜文,中频电热电容器损坏的原因分析[J]. 电工技术,2013(9):69-70. CHEN SHEN WEN, Analysis of the Causes of Failure in Medium-Frequency Electric Heating Capacitors[J]. Electrical Engineering Technology, 2013(9):69-70.
- [19] 郭国扬,顾涵铮,周雪娇,高频电路原理[M],杭州:浙江大学出版社,2006. WU Guoyang, GU Hanzheng, ZHOU Xuejiao, Principles of High-Frequency Circuits[M], Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006