

[电容]

基于变频数字电源与动态无功反演算法的高压电容测试系统设计

文/林凯凯 渠敬河 刘通 刘柏良
山东送变电工程有限公司

高压设备入口电容测试方法中,传统仪器存在低频、低压以及不便携的状况,研制一种依靠电池供电的便携式入口电容测试仪。通过研究给出了三级变频数字电源架构、动态无功功率反演算法等创新性技术,攻克了宽频域高准确度测量的难题。系统设计包含电源模块、控制模块、测量模块以及人机交互单元,技术参数涉及量程范围、测试电压和频率范围等。

电力设备智能化发展对高压设备的电容参数测量提出了更高要求。在变电站中,主变压器的入口电容参数与系统中的谐振频率密切相关,错误的电容值有可能导致谐振过电压,进而威胁损害设备安全。准确的电容参数也是评估设备绝缘状态的重要依据。传统LCR测试仪由于其设计限制,在实际应用中难以满足这些需求。根据行业标准和实验数据,传统LCR测试仪通常工作在低频范围($<1\text{ kHz}$)和低电压($<1\text{ kV}$),无法直接应用于现场高压环境下的精确测量。

传统LCR测试仪的技术局限性主要体现在两个方面:频率范围和测试电压。从频率角度来看,传统LCR测试仪的工作频率范围一般低于 1 kHz ,而高压设备在高频条件下的特性往往更为关键。以高压电缆为例,在 200 Hz 以上的频率范围内表现出显著的非线性特征,这种特性对于评估其长期运行性能至关重要。传统测试仪无法覆盖这一频率范围,导致测量结果可能存在较大偏差。从电压角度来看,传统LCR测试仪的最大测试电压通常低于 1 kV ,而在实际高压设备测试中,需要施加更高的电压以模拟真实工况。因此,传统LCR测试仪在电压和频率方面的限制成为其在高压设备测试中的主要瓶颈。

为了有效解决传统LCR测试仪局限性,研究者们开始探索新的测试技术和方法。其中,基于变频数字电源和动态无功反演算法的设计方案逐渐受到关注。变频数字电源能够提供更宽的频率范围和更高的输出电压,从而克服传统LCR测试仪的频率和电压限制。动态无功反演算法通过实时分析电路中的无功功率变化,可以精确计算出设备的电容值。这种方法不仅提高测量准确度,还能够适应不同类型的高压设备。

在以往的研究基础上,本文基于三级变频数字电源架构和动态无功功率反演算法,引入了零电压开关技术和复合保护机制,设计了一种依托电池供电的便携式入口电容测试仪。该测试仪不仅能够覆盖更宽的频率范围和更高的测试电压,并且具有轻量化、高准确度和强适应性的特点。在某 500 kV 变电站进行现场对主变压器测量验证,测试仪实现了入口电容的快速测量,实测值误差仅为 1.06% ,且测试时间较传统方法缩短约 60% 。

系统总体设计

1. 系统架构

图1给出基于变频数字电源与动态无功反演算

法的高压电容测试系统的整体架构，该系统由电源模块、控制模块、测量模块以及人机交互单元组成。电源模块采用三级变频数字电源架构，包括DC/DC推挽变换、移相全桥逆变和高频升压变压器三部分；控制模块作为系统的中枢，以高性能ARM Cortex-M4处理器构建；测量模块以高准确度采样电路作为核心组件，主要包括电压采样和电流采样两个组成部分；人机交互单元是由触摸屏显示器、按键输入装置和状态指示灯构成。

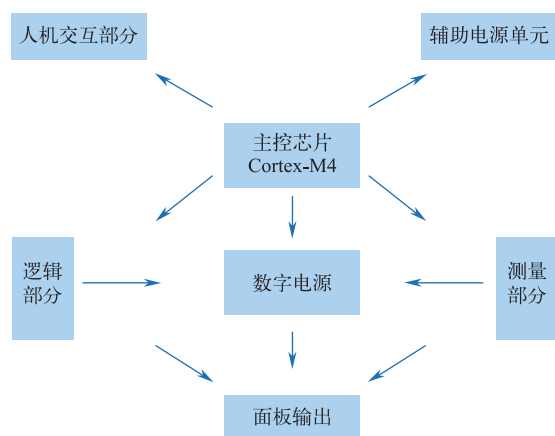


图1 高压电容测试系统整体架构

2. 技术参数

设计高压电容测试系统在技术参数方面涵盖量程范围、测试电压、频率范围、测量准确度、供电方式和尺寸等多个维度，以满足高压设备现场测试的需求。主要参数见表1。

表1 高压电容测试系统相关参数

主要参数	参数范围
量程范围	1 nF ~ 5 μ F
测试电压	0 ~ 5 kV, 步进准确度1 V
频率范围	100 Hz ~ 2 kHz
测量精度	电容值误差 $\pm 0.5\%$
供电方式	电池供电与外部直流输入双模式
尺寸大小	长宽高分别为400 mm $\times$ 300 mm $\times$ 200 mm

关键技术实现

1. 变频数字电源设计

在高压电容测试系统中，三级变换拓扑结构的设计是实现高准确度、高效能电源输出的核心部分。

1) 第一级采用DC/DC推挽变换技术，该电路通过两个开关管交替导通与关断，将输入的直流电

压进行初步转换和调节。推挽变换器具有较高的效率和较强的负载能力，在实际应用中能够有效减少磁芯损耗并提供功率密度。

2) 第二级采用移相全桥逆变技术，将第一级输出的直流电压转换为高频交流信号。通过精确控制四个IGBT或MOSFET开关器件的导通顺序及相位差，可以生成接近正弦波形的高频交流电压。

3) 第三级为高频升压变压器，负责将第二级产生的交流电压进一步提升至所需的高压水平。根据具体应用场景需求，设计中选用铁氧体材料作为磁芯，该材料在高频条件下表现出较低的磁滞损耗和涡流损耗特性。通过合理设计匝比，最终实现了从数百伏到数千伏的电压转换。

2. 信号采集与处理

(1) 高精度采样电路

在电压采样方面，采用分压器结构实现高压信号到适配范围的转换。通过串联电阻网络将输入高压信号按比例衰减至适合采集模块处理的范围。为确保分压比的稳定性，选用温度系数小于50 ppm/ $^{\circ}$ C的金属膜电阻，并通过精密匹配技术减少误差。

电流采样部分采用罗氏线圈（Rogowski Coil）作为核心元件，用于动态电流测量场景。积分电路采用高性能运算放大器AD8620构建，为增强抗干扰能力，在积分电路输入端增加共模抑制滤波器，选用CMRR大于90 dB的差分放大器进行信号调理。

(2) 数据处理

无功功率反演算法在本研究中设计用于动态分析测试系统的功率特性。首先利用快速傅里叶变换（FFT）对采样信号进行频谱分析，确定基波分量及谐波分量的幅值与相位关系。基于基波电压和电流的有效值及其相位差，计算出无功功率。电压电流测试原理如图2所示。

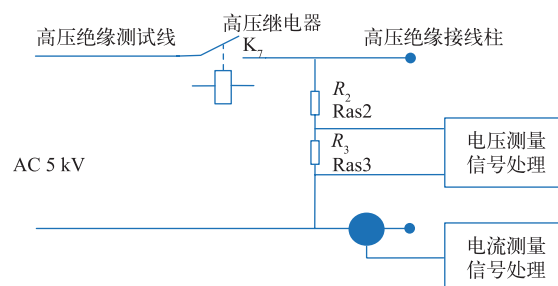


图2 电压电流测试原理

测量电压信号乘以分压比例得到输出电压，测量电流乘以电流互感器变比得到实际电流。高速数模转换将电压电流信号转换为相应的数据序列（每周波512点），首先对序列进行求均方根值处理得到相应的电压电流均方根值，两序列相乘得到有功数值，进而得到功率因数，无功功率。再从无功功率得到实际电容值。原理公式为

$$U = \sqrt{\sum_{k=1}^{512} u_k^2} \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{512} i_k^2} \quad (2)$$

$$P = \sum_{n=1}^{512} u_n i_n \quad (3)$$

$$S = U * I \quad (4)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5)$$

$$C = \frac{Q}{\omega V^2} \quad (6)$$

式中， S 为视在功率； Q 为无功功率； P 为有功功率； C 为电容值。

实验与验证

1. 测试平台搭建

测试平台由电源供应单元、信号调理电路以及数据采集系统等组成，为进一步验证测试平台的性能，确保测试结果的高精度和可靠性，采用Keysight 3458 A高精度万用表作为核心测量设备。为了适应高压环境下的电流和电压采样，选用Tektronix P5210 A型高压探头。实验选取多种标准电容器件作为参考样本，覆盖从1nF~1μF的不同容量范围，测试频率设定为工频50 Hz及其倍频点，实验结果表明，无论是在低容量还是高容量条件下，测量被误差控制在±0.1%以内。

2. 性能测试

(1) 频率响应测试

输入电压设定为5 kV，频率范围设置从100~200 Hz逐步扫描。根据实验数据，系统在整个频率范围内的测量偏差均小于±1%。这一结果表明，设计的测试仪能够在高频条件下保持较高的测量精度。

(2) 温升试验

对测试系统核心部件高频升压变压器满负载连续运行1 h进行红外热成像检测。试验过程中，变压器在5kV输出电压、额定功率条件下持续运

行，采用红外热成像仪对变压器外壳温度进行实时监测。试验结果显示，变压器外壳最高温度为63℃，内部热点温度为78℃，温升为25 K。符合H级绝缘材料的温升限值要求（<125 K），同时远低于A级绝缘材料的允许温升值（<60 K），表明设计中的散热结构和铁心选材具有显著优势。试验还分析了不同负载条件下的温升曲线。当负载从20%逐步增加至100%时，温升呈现线性增长趋势，且在超过80%负载后增速略有加快，但温升仍可控制在35 K以内，满足实际应用场景的需求。

3. 现场应用案例

为进一步验证本文所研制高压电容测试系统的现场实测精确度，以某500 kV变电站主变压器入口电容测试为例，进行入口电容测试。测试电压设定为5 kV，频率范围覆盖100 Hz至200 Hz。测试结果显示，实测值与标称值之间的偏差仅为1.06%。误差来源主要集中在两方面：一是系统内部的采样精度；二是外部环境因素的影响。通过采用复合保护机制和抗干扰设计，系统有效抑制了这些不利因素影响。

结论与展望

通过三级变频电源与动态无功反演算法的结合，本文设计的入口电容测试仪成功实现了高压宽频域下的高精度测量。

1) 在输入电压为5 kV的情况下，测试仪对不同频率点的电容值测量偏差始终控制在±1%以内，在一定条件下满足了高压设备现场测试的需求。

2) 测试仪在某500 kV变电站主变压器入口电容测试中表现出色，其实测值与参考值之间的误差仅为1.06%，远低于传统LCR测试仪的测量误差水平。测试时间较传统方法缩短了大约60%，显著提高了现场工作效率。

3) 测试仪满负载连续运行1 h情况下，最高温度为63℃，内部热点温度为78℃，温升为25 K，符合H级绝缘材料的温升限值要求（<125 K）。

当前设计的测试仪能够覆盖大多数常见的高压设备电容值范围，但在实际应用中，某些特殊场景可能需要更大的测量范围。因此，如何在保证测量准确度的同时实现更宽的量程范围，是未来需要重点解决的问题之一。EA

（收稿日期：2025-08-25）