

# Analysis of the Capacitance Rise Phenomenon in Power Transformer Power Frequency Withstand Voltage Test and the Countermeasures

Gang Wei Xiao Han

Beijing Creative Group Co., Ltd., Beijing, 101400, China

## Abstract

Power frequency AC withstand voltage testing remains the most direct and effective method for evaluating the main insulation strength of power transformers. However, the “capacitance rise phenomenon” caused by capacities load characteristics in tested transformers often results in applied insulation voltages exceeding the measured values from test power supplies, posing significant risks to test accuracy and equipment safety. This paper thoroughly analyzes the physical mechanisms of capacitance rise, establishes an equivalent circuit based on a centralized parameter model, and elucidates the voltage rise mechanism through vector analysis. Key influencing factors such as test frequency, transformer-to-ground capacitance, and short-circuit impedance are systematically discussed. Finally, through practical operational comparisons, the effectiveness and applicability of major countermeasures—including high-voltage side direct measurement, series resonance compensation, shunt reactor compensation, and computational correction—are evaluated. The study conclusively identifies high-voltage side direct measurement as the fundamental solution to eliminate capacitance rise errors, providing crucial guidance for standardizing testing procedures and ensuring reliable insulation evaluation.

## Keywords

power transformer; power frequency withstand voltage test; voltage rise phenomenon; high voltage measurement; insulation test

# 电力变压器工频耐压试验中的容升现象分析及应对措施研究

魏刚 韩啸

北京科锐集团股份有限公司, 中国·北京 101400

## 摘要

工频交流耐压试验是评估电力变压器主绝缘强度最直接、最有效的方法。然而, 由于被试变压器容性负载特性引发的“容升现象”, 易导致实际施加于绝缘上的电压高于试验电源测量电压, 严重威胁试验准确性与设备安全。本文深入剖析了容升现象的物理本质, 建立了基于集中参数模型的等效电路, 并通过向量分析提示了电压升高的产生机理。系统论述了试验频率、变压器对地电容及短路阻抗等关键影响因素。最后, 结合工况实践, 对比评估了高压侧直接测量、串联谐振补偿、并联电抗补偿及计算校正等主要应对措施的有效性与适用性, 明确指出高压侧直接测量是消除容升误差的根本方法, 对规范试验流程、确保绝缘评价可靠性具有重要指导意义。

## 关键词

电力变压器; 工频耐压试验; 容升现象; 高压测量; 绝缘试验

## 1 引言

电力变压器作为电网的核心设备, 其绝缘状态的完好性是系统安全稳定运行的根本保障。工频交流耐压试验, 即外施耐压试验, 是考核变压器主绝缘(绕组对地、绕组间及相间绝缘)电气强度、检验其能否承受长期运行电压及可能出现过电压的经典标准试验项目<sup>1, 2</sup>。该试验旨在模拟运行中的工频过电压情况, 对绝缘施加高于额定电压一定倍数的

工频高压, 持续规定时间, 以发现集中性绝缘缺陷。

在试验实践中, 一个长期存在且易被忽视的技术难题是“容升现象”。该现象表现为: 在试验电源侧(如试验变压器低压侧或测量绕组)读取的电压值, 低于实际施加在被试变压器高压端子与地之间的真实电压值。若未对此进行有效补偿或校正, 可能导致两种风险: 其一, 试验电压不足, 使绝缘未能承受标准规定的考核, 留下隐患; 其二, 更为严重的是, 为达到读数要求而无意中提升了输出电压, 致使变压器实际承受了高于标准的过电压, 造成绝缘损伤甚至击穿。因此, 深刻理解容升现象的机理, 并采取正确的测量与补偿措施, 是严格执行国家标准(如 GB/T 1094.3、DL/T

【作者简介】魏刚(1976-), 男, 中国新疆昌吉人, 本科, 工程师, 从事变压器质量管理、高电压试验技术研究。

474.4) 和国际标准 (如 IEC 60076.3), 保证试验有效性与设备安全性的关键前提。

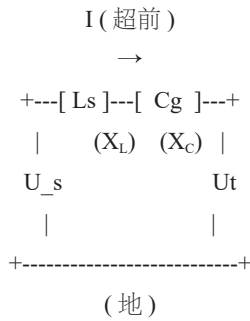
## 2 容升现象的物理本质与理论模型

### 2.1 物理本质

容升现象源于被变压器在工频试验电压下呈现的强容性负载特性。变压器绕组对铁心、油箱及地之间存在显著分布电容。在工频下, 该容抗远小于变压器绕组的漏感抗, 使得试验回路电流呈容性相位。该容性电流流过变压器自身的漏感抗时, 会在漏抗上产生一个与电源电压不同相位的附加压降, 此压降与电源电压的矢量和, 即为被试品两端承受的实际电压, 其数值高于电源电压。

### 2.2 等效电路与向量分析

为定量分析, 可将被试变压器在工频耐压试验下简化为一个集中参数的 L-C 串联等效电路<sup>4</sup>, 如下图所示:



图中:  $U_s$  为试验电源输出电压;  $L_s$ 、 $X_L$  为变压器等效漏感及感抗;  $C_g$ 、 $X_C$  为绕组对地分布电容及容抗;  $U_t$  为变压器高压端子对地实际电压;  $I$  为回路电流。

由于  $X_C \ll X_L$ , 电流  $I$  超前  $U_s$  的角度接近  $90^\circ$ 。漏感  $L_s$  上的压降  $U_L = I * X_L$ , 其相位超前电流  $190^\circ$ 。根据基尔霍夫电压定律, 有:

$$U_t = U_s + U_L$$

绘制向量图 (图 2) 可直观显示,  $U_t$  的幅值明显大于  $U_s$  的幅值, 其差值即为容升电压  $\Delta U = U_t - U_s$ 。定义容升系数  $K_c = U_t / U_s > 1$ 。

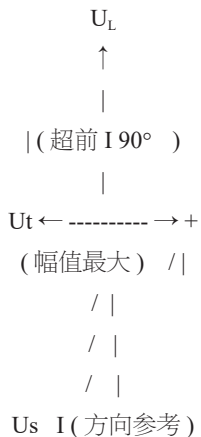


图 2 容升现象向量关系图

## 3 影响容升效应的关键因素

容升系数  $K_c$  的大小并非固定值, 主要取决于以下因素:

被试变压器的对地电容 ( $C_g$ ): 这是最直接的因素。电压等级越高、容量越大的变压器, 其绕组结构尺寸越大, 对地电容也越大 (可达数千皮法)。 $C_g$  增大导致容抗  $X_C$  减小, 在相同  $U_s$  下容性电流  $I$  增大, 从而使漏感压降  $U_L$  和容升效应加剧。

变压器的短路阻抗 (关联  $X_L$ ): 短路阻抗百分比是变压器的重要参数, 其电抗分量主要即为漏感抗  $X_L$ 。 $X_L$  值越大, 相同电流  $I$  下产生的压升  $U_L$  越大, 容升现象越显著。通常, 高阻抗变压器的容升问题更需关注。

试验电源频率 ( $f$ ): 频率  $f$  升高, 容抗  $X_C$  减小, 感抗  $X_L$  增大, 两者共同作用导致容性电流变化复杂, 但在工频附近, 容升效应通常随频率升高而增强。

试验回路连接阻抗: 从试验电源到被试变压器高压端子间的引线也存在电感。这部分杂散电感会与变压器漏感叠加, 进一步增大总的感性压降, 加剧容升。

## 4 工程应对措施与对比分析

为确保试验电压的准确施加, 必须采取有效措施来校正或消除容升效应。

### 4.1 高压侧直接测量法 (根本性解决)<sup>1、2、3</sup>

此方法是国际国内标准推荐的首选方法。其核心是使用经校准的高压分压器 (通常为高精度阻容分压器或电容分压器), 将其高压臂直接并联于被试变压器的高压端子与接地端之间。

原理: 分压器直接感知  $U_t$ , 其低压臂输出与  $U_t$  成确定比例关系的低电压信号, 由数字示波器或有效值仪表直接读取。此方法完全绕开了电源侧至被试品间的所有阻抗压降, 直接获取真实电压。

优点: 测量最准确、最可靠, 是评判试验电压是否达标的最终依据。

缺点: 需要配置高精度、高电压等级的分压器及测量系统。

### 4.2 串联谐振试验系统 (最优化补偿方案)

这是目前进行大中型变压器耐压试验的主流设备方案。

原理: 通过调节可调电抗器, 使其与被试变压器对地电容  $C_g$  在工频下发生串联谐振。谐振时, 回路总阻抗最小 (呈纯电阻性),  $U_s$  与  $U_t$  同相位, 且满足  $U_t = Q * U_s$  ( $Q$  为系统品质因数)。此时, 虽然电压被放大了  $Q$  倍, 但  $U_t$  与  $U_s$  之间具有确定、稳定的数值和相位关系, 且励磁变压器只需提供很小的容量。

优点: 本质上适应了容性负载, 电源容量要求大幅降低; 电压波形好; 在谐振点附近, 容升效应被明确量化且稳定, 结合高压侧测量, 安全性和经济性俱佳。

### 4.3 并联电抗补偿法

在试验回路中并联一个可调电抗器，使其产生的感性电流部分抵消变压器容性电流，从而减小回路总电流及在漏感上的压降。

优点：可有效降低容升系数。

缺点：补偿度调节复杂，且并联大容量高压电抗器成本高、体积大，现场应用不便。

### 4.4 计算校正法

通过理论估算或预先的低压测量，得到被试变压器的  $C_g$  和  $X_l$  参数，计算出容升系数  $K_c$ 。试验时，将电源侧测量值  $U_s$  乘以  $K_c$  作为  $U_t$  的估计值。

优点：简单，无需额外设备。

缺点：精度低，受参数估算误差、回路杂散参数影响大，仅适用于要求不高的初步试验或作为辅助参考，不能作为判定依据。

## 5 结论

容升现象是电力变压器工频耐压试验中固有的、不可忽视的技术问题，其本质是容性电流在回路感抗上导致的电压升高，可能致使变压器绝缘实际承受的电压高于试验设定值，带来过电压风险或误判。

容升效应的强弱主要由变压器的对地分布电容和短路

阻抗（漏感）决定，并受试验频率影响。高电压、大容量、高阻抗变压器此现象尤为显著。

为确保试验电压准确、可靠，必须采用高压侧直接测量作为电压判定的最终手段，这是杜绝容升误差的根本措施。

采用串联谐振试验系统进行工频耐压试验，不仅能高效、经济地产生高电压，其工作机理也天然适用于容性负载，与高压侧直接测量相结合，构成了现代大型变压器绝缘耐压试验最科学、安全的解决方案。

试验技术人员必须充分认识容升现象，在试验方案设计、设备选型和现场操作中严格执行标准规定，采用正确的测量与补偿方法，从而确保绝缘考核的有效性，为电力变压器的安全投运和稳定运行奠定坚实基础。

### 参考文献

- [1] IEC 60076-3: Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air.
- [2] GB/T 1094.3-2017 电力变压器 第3部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙.
- [3] DL/T 474.4-2018 现场绝缘试验实施导则 第4部分：交流耐压试验.
- [4] 张仁豫，陈昌渔，王昌长编著. 高电压试验技术（第3版），清华大学出版社，2009.9