

Study on the Cause of Air Porosity Defect in 35kV Dry-Type Transformer with Epoxy Cast Coil

Bowen Liu Gang Wei Xiao Han Tao Li

Beijing KERUI Group Co., Ltd., Beijing, 1014002, China

Abstract

This study systematically investigates and experiments on surface bubble defects in 35kV dry-type transformer high-voltage coils during vacuum casting and curing processes. Initial research involved detailed documentation of critical factors including bubble locations, operator behavior, and mold equipment, which preliminarily ruled out potential causes from casting tanks, curing furnaces, or mold release agent application. Through targeted observations and comparative experiments, the root cause was identified as the glass fiber cloth tape on the coil's outermost layer. Further experiments demonstrated that bubble formation is closely related to the spatial clearance between the coil and outer mold. When the glass fiber cloth tape region is compressed by the outer mold, bubbles generated during curing cannot be properly expelled, ultimately forming surface bubble pits. Based on these findings, the paper proposes process optimization measures and design improvements, including adjusting the wrapping method of the glass fiber cloth tape, optimizing the use of mesh fabric, and reserving sufficient process allowance during the design phase. These recommendations provide theoretical and practical foundations for fundamentally resolving such bubble defects.

Keywords

35kV dry-type transformer; bubble defect; glass cloth tape; mold pressure; process optimization; vacuum casting

35kV 干式变压器浇注线圈外壁气泡缺陷成因研究

刘博文 魏刚 韩啸 李涛

北京科锐集团股份有限公司, 中国·北京 1014002

摘要

本文针对35kV干式变压器高压线圈在真空浇注与固化过程中出现的表面气泡缺陷问题, 展开了一系列系统的调查与实验研究。研究初期, 通过对气泡位置、操作者、模具设备等关键因素的详细记录, 初步排除了浇注罐、固化炉等固化环境以及脱模剂涂抹工艺作为主要诱因的可能性。通过定向观察与对比实验, 将问题根源聚焦于线圈最外层的玻璃丝布带。进一步的实验表明, 气泡的形成与线圈和外模之间的空间裕度密切相关。当玻璃丝布带区域受到外模压迫时, 其在固化过程中产生的气泡无法顺利排出, 最终形成表面气泡坑。基于此结论, 本文提出了相应的工艺优化措施与设计改进建议, 包括调整玻璃丝布带的包扎方式、优化网格布的使用以及在设计阶段预留足够的工艺裕度, 为从根本上解决此类气泡缺陷提供了理论与实践依据。

关键词

35kV干式变压器; 气泡缺陷; 玻璃丝布带; 模具压迫; 工艺优化; 真空浇注

1 引言

35kV 干式变压器因其防火、环保、维护简便等优点, 在城市供电、轨道交通、高层建筑等领域得到了广泛应用。其核心部件之一的环氧浇注线圈对变压器的性能起着至关重要的作用, 直接决定了变压器的整体质量与寿命。真空压力浸渍 (VPI) 工艺是保证高压线圈绝缘性能的关键工序, 然而在生产过程中, 线圈表面时常出现气泡缺陷这些气泡不仅影响产品的外观质量, 更严重的是, 它们可能成为绝缘的薄弱点, 在长期电场和热应力的作用下引发局部放电, 甚至

导致绝缘击穿, 对变压器的安全稳定运行构成潜在威胁 [1]。

因此, 研究气泡缺陷的成因及防控措施对于提高 35kV 干式变压器的质量与可靠性具有重要意义。本研究详细记录了在不同浇注罐和固化炉中出模的线圈表面出现密集的气泡缺陷, 对气泡问题的成因进行系统性的排查与分析。该问题的分析过程与实验验证, 旨在定位根本原因并提出有效的解决方案, 同时对类似产品的工艺设计与质量控制具有重要的借鉴意义。

2 35kV 干式变压器环氧浇注线圈的结构与功能分析

2.1 35kV 干式变压器的工作原理

35kV 干式变压器通过电磁感应原理实现电压的升降转

【作者简介】刘博文 (2000-), 男, 中国河南周口人, 本科, 助理工程师, 从事变压器质量管理及数据分析研究。

换,广泛应用于电力输配电系统。其核心部件包括高低压绕组和铁心,在工作时,交流电流通过低压绕组产生交变磁场,进而在高压绕组中感应出电动势。为了确保变压器能够安全高效运行,绕组需具备良好的绝缘性与热稳定性。环氧浇注线圈作为绕组的关键组成部分,承担着电气隔离与热散发的功能,保证变压器能够在高压条件下稳定工作。

2.2 环氧浇注线圈在变压器中的作用

环氧浇注线圈作为 35kV 干式变压器的重要组成部分,主要作用为提供电气绝缘、热管理以及机械强度保障。通过将铜线绕组浇注以环氧树脂,可以有效地防止变压器在高电压下发生短路或击穿现象。环氧浇注还能够大幅度提高变压器的热传导效率,减少线圈温度升高的风险,延长变压器的使用寿命。其良好的耐潮湿与化学腐蚀能力,使得变压器能够适应不同的环境条件,确保电力系统的稳定运行 [2]。

3 气泡缺陷形成的初期记录与分析

3.1 气泡缺陷的统计

在气泡缺陷出现前期,6日内在不同的浇注罐、固化炉中累计记录了 18 只存在表面气泡缺陷的线圈。详细记录包括线圈编号、图号、操作者及气泡的具体位置。

3.2 初步分析发现

(1) 位置集中性:绝大多数气泡位于线圈的“端子板两侧的底部或中部”,呈现出明显的位置集中趋势。

(2) 视觉关联性:通过现场图片(如图 1 所示)观察,气泡坑绝大多数分布于包裹线圈的玻璃丝白布带周围,而仅使用网格布的区域则基本无气泡出现。

这一现象强烈暗示了气泡的形成与玻璃丝布带的存在有直接或间接的关联。



图 1

3.3 初步原因排查

为系统性定位问题,初步制定了从设备到材料的逐项排查方案。

3.3.1 浇注罐与固化炉排查

记录显示,出现气泡的线圈分布于不同的浇注罐和固化炉中。由于不同设备均出现了相同问题,可以判断该气泡缺陷并非由某一特定设备(如真空度不足、温控失灵)的系统性故障引起 [3]。因此,暂时降低对固化环境的怀疑。

3.3.2 脱模剂操作排查

为验证脱模剂涂抹不均或用量过多导致气泡缺陷形成的假设 [4],在第 4 日至第 6 日,通过三位不同的操作者观测脱模剂使用量,进行组模时的脱模剂擦拭工作。结果显示,三人操作的线圈在浇注固化成型后均出现了不同程度的气泡。鉴于操作人员变更并未改变气泡产生的结局,且现场观测脱模剂用量均匀适中,初步排除了脱模剂作为主要诱因的可能性。

4 深入分析与实验验证

4.1 假设提出

基于初步排查结果,研究焦点转移至玻璃丝布带上。提出了两种主要假设:

假设 A (脱模剂吸入):脱模剂受热凝聚下滑,被玻璃丝布带承接吸收,导致环氧树脂无法浸润该部位纤维,形成气泡。但此假设无法解释气泡为何多出现在玻璃丝布带下方,而非理论上,应首先接触滑落脱模剂的布带上方形成气泡缺陷或呈现玻璃丝布带裸漏,故该假设可能性较低。

假设 B (外模压迫):由于线圈尺寸或玻璃丝布带包扎工艺原因,线圈与外模之间的间隙过小。在合模后,外模直接压迫玻璃丝布带缠绕较厚的区域,使得该区域在树脂浸渍和固化过程中形成的气泡被“封堵”在压迫点,无法沿着预设的排气通道排出,最终形成气泡缺陷 [5]。此假设能较好地解释气泡位置与布带位置的对应关系。

4.2 试验设计与实施

为验证“外模压迫”假设,设计并执行了一系列对比实验。

4.2.1 玻璃丝布带位置调整实验

在第 7 日指令操作者在包扎最外层网格布时,使玻璃丝布带避开线圈最底部(距离 >5cm),并特意保留一只线圈 A 底部缠满玻璃丝布带作为对照。

成品结果显示大部分调整后的线圈,气泡位置确实从底部上移至中部有布带压迫的区域。对照线圈 A 底部则出现了气泡。此结果初步证实了布带位置与气泡位置的强相关性。

4.2.2 玻璃丝布带类型与分布实验

在第 9 日通过使用宽(40mm)、窄(20mm)两种玻璃丝布带,记录其分布密集度。

成品结果显示布带的宽度本身对气泡影响不大,但布带的叠加密集度是关键因素。在布带多层叠加、聚集缠绕的区域,无论玻璃丝布带的宽窄,气泡产生概率显著增高。这说明局部过厚的包缠是导致压迫加剧的主要原因。

4.2.3 网格布调整实验

在第 10 日对线圈 B 和线圈 C 两只线圈进行了网格布减薄处理。从原先高压线圈中下部网格布 4.0mm 厚,调整为 2.5mm 厚。

成品结果显示线圈 B 和线圈 C 在减薄处理的部位未出现气泡,但线圈其他受外模压迫的布带区域仍然出现了气

泡。这进一步将气泡缺陷成因锁定在“局部压迫”而非“整体包扎厚度”上。

4.2.4 线圈尺寸裕度验证实验

在第11日通过调整线圈D,绕制时的张力以及网格布,使得该线圈尺寸距离模具下限位板有足够的裕度。

成品结果该线圈出模后未出现任何气泡。这直接证明了线圈与外模之间存在足够空间裕度是避免气泡缺陷的关键。

5 试验结论

综合所有试验数据,可以得出结论:

本次35kV干式变压器高压线圈表面气泡缺陷的根本原因,是线圈最外层的玻璃丝带,特别是多层叠加的密集区域。在合模后受到外模的机械压迫,导致该区域在VPI过程中形成的气泡无法正常排出,最终被困在玻璃丝带下方,形成表面气泡缺陷。

5.1 其形成机理可概括为以下过程

合模压迫:线圈在进行模具组装时,外模对线圈施加压力,玻璃丝带聚集处因其可压缩性低,成为主要的受力点,使得该点与模具间的间隙不足以使得气泡上升。

气泡滞留:在树脂注入、真空破除及固化升温阶段,材料内部和树脂中残留的微量空气或低分子物会形成微小气泡。在非压迫区,这些气泡有足够的通道迁移并排出。

缺陷形成:在压迫点,气泡的排出通道被物理阻断。气泡在此聚集、合并,并随着树脂的固化而被固定下来,形成可见的表面气泡缺陷。

5.2 本研究也验证了此前尝试的几种改良方案的局限性

(一)调整布带宽度:效果不显著,因未改变压迫本质。

(二)增大绕制张力:可使线圈更紧实,略微增加内部裕度,但过度张力可能导致内部绝缘损伤,风险与收益并存。

(三)调整网格布尺寸/厚度:效果最为明显,因为它直接增大了线圈与外模之间的操作裕度,是解决压迫问题最直接的途径。

6 缺陷防控措施与改良方案

本研究通过严谨的“假设-验证”流程,成功定位了35kV干式变压器高压线圈气泡缺陷的成因并非传统认为的脱模剂或固化设备,而是由玻璃丝带受外模压迫导致气泡无法排出这一机械结构性问题。这一发现为生产工艺的精准改进指明了方向。

6.1 工艺优化

(1)规范包扎工艺:制定详细的玻璃丝带包扎作业指导书,明确规定布带应平铺、分散,严格避免在同一部位多层密集叠加,尤其需避开线圈易受模具压迫的区域。

(2)优化网格布使用:评估并标准化网格布的使用规格与层数,在保证绝缘强度的前提下,优先选用更薄的网格布或减少层数,以增大裕度。

6.2 设计改进

引入工艺裕度设计:产品设计部门在进行模具设计和线圈尺寸链计算时,须充分考虑所有外包绝缘材料(如玻璃丝带、网格布等)的实际厚度,并在图纸上明确标注关键部位的最小允许间隙,从源头上避免压迫风险[[6]]。

推动设计与工艺协同:建立早期制造参与(EMI)机制,让工艺人员在产品设计阶段就能介入,对可制造性提出意见。

6.3 质量控制

建立合模前检查制度:对关键型号线圈,在合模前使用专用塞规或间隙尺检查线圈与外模之间的间隙,确保符合最小裕度要求。

加强首件检验:对新批次或改型后的线圈,加强首件产品的解剖与无损检测,确认无内部及表面气泡缺陷后再进行批量生产。

7 结语

本研究通过对35kV干式变压器环氧浇注线圈表面气泡缺陷的系统性分析与实验验证,明确了该气泡缺陷产生的根本原因在于玻璃丝带区域受外模压迫导致气泡无法排出。这一结论突破了传统上将气泡归因于脱模剂或固化环境的认知局限,揭示了机械结构性因素在绝缘制造中的关键影响。

基于上述发现,本文从工艺规范、设计协同与质量控制三个层面提出了具体的优化措施,包括规范包扎工艺、优化网格布使用、引入工艺裕度设计以及建立合模前间隙检查制度等。这些措施具有较强的可操作性,为实际生产提供了明确的改进方向。

本研究不仅为解决同类气泡缺陷提供了理论依据与实践指南,也体现了从问题溯源到工艺优化的完整工程研究方法。同时,在生产过程中应更加注重工艺细节与质量管理,通过技术和管理手段的不断优化,确保环氧浇注线圈的绝缘性能和机械强度,进一步提高35kV干式变压器的安全性和使用寿命,为电力系统的稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李明,王磊.干式变压器高压线圈绝缘制造工艺与常见缺陷分析[J].绝缘材料,2020,53(8):78-82.
- [2] 王志刚,张志立,章建喜,赵晓冬,潘有龙.110kV环氧浇注干式电力变压器的研制浅析[J].变压器,2020,57(09):48-50+71.
- [3] 张伟,刘强.VPI工艺参数对环氧树脂浇注线圈气泡影响的研究[J].变压器,2019,56(4):35-39.
- [4] 赵建国.环氧树脂真空压力浸渍技术及其应用[M].北京:机械工业出版社,2017:115-120.
- [5] G. W. Lawson. Analysis and Prevention of Voids in Vacuum Pressure Impregnated Electrical Coils[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1895-1902.
- [6] 陈永红,郭伟.面向制造与装配的产品设计(DFMA)指南[M].上海:上海科学技术出版社,2021:65-70.