

三相控制变压器结构优化与节材降耗研究

段明翠 420105197608211621

摘要：在全球能源转型与制造业绿色发展的宏观背景下，电力装备制造业正面临提升能效、降低资源消耗与实现可持续发展的迫切需求。三相控制变压器作为工业自动化、电气控制系统中的关键电磁元件，其传统设计往往侧重于满足基本电气性能，而在材料利用效率、轻量化设计与全生命周期成本控制方面存在显著优化空间。本文聚焦于三相控制变压器的结构优化与节材降耗问题，系统阐述了通过多维度的技术创新实现资源节约与环境效益提升的路径。

关键词：三相控制变压器；结构优化；节材降耗；绕组设计；轻量化；高效材料；绿色制造

引言

变压器作为电能传输、分配与变换的核心设备，其能效水平与资源消耗对整个电力系统的经济性与环保性具有深远影响。在工业控制领域，三相控制变压器扮演着电压调节、电气隔离、抑制谐波等关键角色，广泛应用于机床、生产线、PLC 系统、测试设备及各种自动化装置中。尽管单台容量通常小于电力变压器，但其生产数量庞大，社会总持有量惊人。因此，对三相控制变压器进行持续的能效提升与材料节约，其累积的节能降耗效益和资源节约意义不容小觑。

一、三相控制变压器结构特点与节材潜力分析

1. 结构紧凑性与空间利用

三相控制变压器通常采用三相绕组共体的设计，这种结构使得变压器在有限的空间内能够实现三相电能的转换与分配。相较于单相变压器组合，其在空间占用上具有显著优势。然而，这种紧凑结构也对绕组的排列和绝缘设计提出了更高要求。通过优化绕组的绕制方式和绝缘材料的选择，可以在保证电气性能的前提下，进一步减小变压器的体积，从而降低材料的使用量。例如，采用新的绕组绕制工艺，能够使绕组排列更加紧密，减少绕组之间的空隙，提高空间利用率。

2. 磁路设计与铁芯材料

三相控制变压器的磁路设计是影响其性能和材料消耗的关键因素。合理的磁路设计能够使铁芯中的磁通分布更加均匀，减少磁滞和涡流损耗。目前，常用的铁芯材料有硅钢片等，传统的硅钢片铁芯虽然具有一定的导磁性能，但在损耗控制方面仍有提升空间。随着材料科学的发展，新型的非晶合金材料逐渐应用于变压器铁芯。非晶合金具有极低的铁损和高磁导率，能够有效降低变压器的空载损耗。

3. 散热结构与冷却方式

变压器在运行过程中会产生热量，有效的散热结构和冷却方式对于保证变压器的正常运行和延长使用寿命至关重要。传统的三相控制变压器多采用自然风冷或油浸风冷的冷却方式。自然风冷方式结构简单，但散热效率相对较低；油浸风冷方式虽然散热效果较好，但需要使用大量的变压器油和散热设备，增加了材料成本和维护难度。近年来，热管散热、水冷散热等新型散热技术逐渐涌现。热管散热热传导高效，能快速散热且无需大量冷却液；水冷散热通过循环水带走热量，效果更稳定。采用这些技术，可在保证散热效果的同时，优化结构，减少设备体积与材料用量。

二、基于铁心结构与材料创新的节材路径

1. 采用新型铁心材料

传统的硅钢片铁心在三相控制变压器中应用十分广泛，其制造工艺成熟、成本可控，但同时也存在不可忽视的能量损耗和材料浪费问题。这类铁心在交变磁场作用下会产生磁滞损耗和涡流损耗，导致整体效率下降，且在切割和叠装过程中容易产生边角料，造成材料利用

率较低。为了应对这些问题，可以考虑采用非晶合金等新型铁心材料作为替代方案。非晶合金具有高磁导率、低矫顽力和极低的铁心损耗特性，能够显著降低变压器在运行时的空载损耗和温升，同时因其制造工艺可直接成型，减少了加工过程中的材料浪费，有助于节约资源、降低生产成本，并提升整个电力系统的能源利用效率，符合当前绿色制造和可持续发展的节材目标。

2. 优化铁心结构设计

改进铁心的几何形状和尺寸设计是提升变压器性能的关键方向之一。例如，可采用阶梯式铁心结构，通过合理增加阶梯的级数并精细优化每一级的尺寸比例，能够有效缩小绕组与铁心之间的空气间隙，增强磁通传导的效率，显著提高磁路的耦合程度，从而减少漏磁现象，最终实现漏磁损耗的大幅降低。此外，可尝试采用平面型铁心结构，该结构设计简洁，制造工艺易实施。平面铁心能简化生产流程，减少冲压和剪裁环节，降低材料边角废料，提高材料利用率，节约原材料和制造成本。

3. 开发可回收利用的铁心结构

设计适合重复使用和高效回收的铁心结构，是提升变压器可持续性的关键环节。当变压器达到其使用寿命终点，或因技术更新而需要进行升级改造时，这种结构能够显著简化铁心的拆解与重新组装流程。例如，通过采用高度模块化的铁心设计方案，将整体结构划分为多个独立单元，各模块之间通过标准化、可拆卸的机械连接方式进行稳固结合。这种设计不仅有助于在回收过程中对不同材质部分进行快速识别与精细分类，还能大幅提升铁材、绝缘材料等组分的回收效率与再利用率。通过减少对新原材料的需求，有效降低对自然资源的开采压力，同时推动循环经济模式在电力行业的深入应用。

三、绕组设计与导体材料的优化策略

1. 优化绕组匝数与线径

根据变压器的具体使用要求和性能指标，精确计算并合理确定绕组的匝数和线径。通过优化匝数比，可以使变压器在不同负载条件下都能保持较高的效率，减少能量损耗。同时，选择合适的线径能够降低绕组的电阻，从而降低铜损耗。例如，对于低电压大电流的绕组，可以适当增加线径以减小电阻；对于高电压小电流的绕组，则可以在保证绝缘性能的前提下，选择较细的线径以节约导体材料。

2. 采用新型导体材料

积极探索和应用新型的导体材料来替代传统的铜或铝。一些新型合金材料具有良好的导电性和机械性能，且成本相对较低。例如，某些铝合金材料经过特殊处理后，其导电性接近纯铝，但强度和耐腐蚀性有显著提高。使用这些新型材料不仅可以降低成本，还能在一定程度上减轻变压器的重量。此外，一些超导材料在低温条件下具有零电阻的特性，如果能够在变压器绕组中应用超导材料，将极大地降低能量损耗，提高变压器的效率。

3. 改进绕组绕制工艺

优化绕组的绕制方式和排列结构，提高绕组的空间利用率。例如，采用多层绕组结构可以在有限的空间内增加绕组的匝数，提高变压器的变比。同时，合理安排绕组的层间绝缘和匝间绝缘，既能保证绝缘性能，又能减少绝缘材料的使用量。另外，采用自动化绕线设备可以提高绕线的精度和一致性，减少人为因素导致的绕线误差，提高生产效率和产品质量。在绕制过程中，还可以采用一些特殊的绕线技术，如螺旋绕线、交叉绕线等，以改善绕组的电气性能和散热性能。

结论

面对资源环境约束与产业升级的双重压力，对三相控制变压器实施以节材降耗为目标的结构优化，已从一项可选的成本控制措施，升华为一项必要的技术创新与可持续发展战略。本研究系统性地梳理了从铁心、绕组到绝缘结构等关键部件的优化路径，揭示出通过材料创

新、拓扑优化、多物理场精准设计与先进制造工艺的深度融合，完全可以在保障产品核心电气性能与可靠性的坚实基础上，实现显著的原材料节约与能效提升。

参考文献：

[1]低压三相电动机交流控制电源应采用控制变压器 [J]. 电世界, 2021, 62 (07): 56.

[2]谢炜,孙文华,陈谦,等. 低压三相电机交流控制电源应采用控制变压器 [J]. 建筑电气, 2021, 40 (05): 25-31.