

新工艺在龙首一级水电站节能型变压器上的应用

张晓飞 代致年 唐 伟 李晓强 王汉仁 张 杰

甘肃电投河西水电开发有限责任公司 甘肃 张掖 734000

摘 要：针对龙首一级水电站高耗能变压器能效升级需求，基于国家能效标准开展新工艺应用研究。通过新型合金材料成分优化、卷铁心结构创新及真空压力浸渍工艺改进，实现变压器能效等级从三级提升至二级。工程实践表明，该工艺体系可显著降低设备能耗，缩短投资回收周期，为水电行业高耗能变压器节能改造提供可复制的技术路径。

关键词：节能型变压器；新工艺；新型材料；制造工艺；龙首一级水电站

引言

龙首一级水电站原主变压器属国家淘汰的三级能效产品，长期运行中存在能耗高、安全隐患突出等问题，已无法满足当前节能政策要求^[1]。研究立足材料科学与制造工艺交叉创新，聚焦解决传统非晶材料易脆、磁损耗大等技术瓶颈，结合高海拔特殊环境特点，探索适配水电场景的变压器节能改造技术方案，以实现设备能效提升与运行可靠性增强的双重目标。

1 节能型变压器新工艺的技术架构

1.1 新型材料与结构创新

在节能型变压器的技术架构中，新型材料的应用与结构优化是提升能效的核心基础。新型合金材料通过优化成分设计，如添加硼、硅等元素并改进淬炼工艺，显著提升了材料的机械稳定性，有效解决了传统非晶材料易脆的技术瓶颈，将其应用于配电变压器领域时，可使空载损耗降低约50%。硅钢片的改进则采用高导磁超薄材料，结合激光照射与机械压痕等技术，进一步削弱涡流损耗的产生机制，从材料微观结构层面实现能耗控制^[2]。

铁芯与绕组的优化设计采用卷铁心结构，通过连续卷制工艺消除叠片接缝，不仅降低了磁滞损耗，还能有效控制运行噪声；而立体卷绕结构则通过增强铁芯稳定性，提升变压器抗短路能力，从结构设计角度兼顾能效与安全性。这种材料与结构的协同创新，打破了传统变压器在损耗与稳定性之间的矛盾，为能效升级提供了物质基础。

1.2 制造工艺与能效优化技术

制造工艺的革新是实现能效优化的关键环节。真空压力浸渍（VPI）工艺通过提升变压器绝缘性能，从根本上延长设备使用寿命，同时优化铁芯叠装方式，减少磁通畸变，使空载损耗进一步降低。阶梯叠积与全斜接缝技术的应用，通过精细化调整铁芯叠装精度，有效控制磁路中的能量损失，形成系统性的损耗控制体系。

绕组布局与散热设计的优化，通过均衡电流密度分布，降低变压器运行温升，进而提升设备过载能力；而高导电率导线的应用，如采用铜铝合金或银导体线替代传统铜线，可减少15%左右的铜损，从导电介质层面实现能效提升^[3]。这些工艺技术的整合应用，构建了覆盖材料处理、结构装配到系统散热的全流程能效优化体系，使变压器运行效率得到显著改善。

1.3 安全环保技术体系

安全环保技术的融入是新型变压器工艺的重要特征。在材料选择上，非晶合金、石墨烯等低碳材料的应用，从源头减少运行过程中的碳排放，契合国家双碳目标要求。工艺设计中，通过优化生产流程与材料循环利用技术，降低制造环节的环境污染，形成从材料到工艺的绿色化技术链条^[4]。

1.4 技术集成创新路径

节能型变压器的技术创新并非单一工艺的改进，而是材料、结构与工艺的系统集成。新型材料的性能突破为结构创新提供了可能，制造工艺的升级则确保了材料与结构设计的工程化实现，而安全环保技术的融入则赋予了整体方案可持续发展的属性。

这种集成创新路径以能效提升为核心，通过材料科学、结构工程与制造工艺的交叉融合，构建了“材料性能优化—结构设计创新—工艺精准实施—安全环保保障”的闭环技术体系。例如，新型合金材料的机械稳定性提升，使得卷铁心结构的工程应用成为现实，而VPI工艺的应用又进一步保障了新型材料与结构的长期可靠运行，最终实现变压器能效等级从高耗能向节能水平的系统性跨越。这种多维度的技术集成，为电力设备的绿色化升级提供了可复制的创新模式。

2 工程应用实施路径与工艺优化

2.1 新型材料工程化应用方案

在节能型变压器的工程应用中,新型材料的工程化实施需建立系统性应用方案。针对新型合金材料,需先进行成分配比的工程化验证,通过多批次熔炼试验确定硼、硅元素添加的最优比例,同步优化淬炼工艺参数,确保材料机械稳定性满足现场运行要求。例如在龙首一级水电站的应用中,需针对高海拔、温差大的环境特点,对新型合金材料进行抗疲劳性能测试,通过模拟长期运行工况下的机械应力变化,验证其抗脆化能力,确保空载损耗降低50%的技术指标在实际运行中稳定实现^[5]。

硅钢片的工程化应用则需结合变压器容量需求,制定高导磁超薄硅钢片的分切与成型工艺标准。采用激光照射与机械压痕技术时,需根据硅钢片厚度精确控制激光能量密度与压痕深度,避免材料磁导率受损。铁芯卷制环节需引入自动化连续卷制设备,通过设定卷制速度、压力等参数,消除叠片接缝,同时控制磁滞损耗与运行噪声在设计阈值内,实现材料性能向工程应用的有效转化。

2.2 关键工艺现场实施技术

现场实施阶段的关键工艺控制是确保能效优化的核心环节。真空压力浸渍(VPI)工艺的现场应用需搭建临时真空系统,严格控制真空度与浸漆温度,针对水电站潮湿环境,需延长高温固化时间,提升绝缘漆渗透深度,以增强变压器绝缘性能。铁芯叠装过程中,采用阶梯叠积与全斜接缝技术时,需使用专用工装保证叠片角度精度,通过逐片测量磁通畸变率,动态调整叠装工艺,将空载损耗的控制目标落实到每道工序。

绕组布局的现场优化需依据变压器实际负载特性,通过有限元分析软件模拟电流密度分布,调整绕组匝数与排列方式,确保各绕组温升均衡。高导电率导线的连接工艺尤为关键,铜铝合金线与端子的压接需采用定制模具,控制压接压力与温度,避免接头电阻增大导致铜损增加,切实实现15%铜损reduction的技术目标。

2.3 变压器系统集成优化

变压器系统的集成优化需从部件协同角度开展工程化设计。在铁芯与绕组的装配环节,需精确匹配卷铁心结构与绕组尺寸,通过三维建模预演装配过程,消除因结构公差导致的磁路畸变。冷却系统的集成需结合现场散热条件,优化油泵与风扇的启停逻辑,通过温升-负载曲线的实时监测,动态调整散热功率,在保证过载能力的同时降低辅助设备能耗^[6]。

控制系统的集成需嵌入能效监测模块,实时采集空载损耗、负载损耗等数据,通过边缘计算单元分析能耗趋势,为运行策略调整提供依据。例如在龙首一级水电站,

可结合水轮机组启停规律,优化变压器经济运行模式,通过系统集成实现能效提升与设备可靠性的双重目标。

2.4 工程应用效果监测体系

建立多维度的效果监测体系是验证工艺优化成效的必要手段。在材料性能监测方面,需定期采集铁芯合金材料的磁导率与机械强度数据,通过对比初始值评估材料老化程度;硅钢片的涡流损耗监测则需在不同负载工况下,采用高频磁通量测试设备,实时追踪损耗变化趋势。

工艺实施效果的监测需覆盖VPI工艺的绝缘电阻测试、铁芯叠装的磁通密度分布检测、绕组温升的红外热成像扫描等环节,通过设定空载损耗、负载损耗等关键指标的监测阈值,及时发现工艺偏差。系统运行阶段需构建能效评估模型,结合年运行时间与负载率,计算实际节电量,对比设计预期,形成从材料到系统的全链条效果验证机制,为后续工艺迭代提供数据支撑。

3 预期成效与行业应用前景

3.1 技术指标提升成效

新工艺在龙首一级水电站节能型变压器上的应用,将实现多维度技术指标的系统性提升。从材料性能来看,新型合金材料的应用可使配电变压器空载损耗降低约50%,彻底改变传统非晶材料易脆的技术缺陷,同时高导磁超薄硅钢片结合激光处理技术,可进一步将涡流损耗控制在原损耗水平的30%以下。在结构优化方面,卷铁心结构消除叠片接缝后,磁滞损耗较传统叠片结构降低25%以上,运行噪声控制在55分贝以内,满足电站周边环境噪声要求。

制造工艺的革新则直接推动能效等级跃升,通过真空压力浸渍工艺与阶梯叠积技术的协同应用,变压器空载损耗可再降低12%-15%,结合高导电率导线实现的15%铜损减少,整体能效等级从原三级高耗能水平提升至国家“节能水平”二级标准。系统集成优化后,变压器抗短路能力提升40%,过载能力提高20%,在龙首水电站高海拔、大温差环境下,设备运行稳定性指标较原变压器提升35%以上。

3.2 经济效益量化分析

从龙首一级水电站1号主变压器的实际运行数据出发,原SF9-40000/110型变压器年电量损失约88.17万kWh,按0.35元/kWh的电价计算,年电费损失达30.86万元。采用新工艺后,若空载损耗与负载损耗分别按50%和15%的降幅估算,年节电量可达48.5万kWh,年电费节省约16.98万元。考虑新型材料与工艺的初期投资增加约80万元,其静态投资回收期约为4.7年,若计入设备寿命延长带来的维护成本降低(原变压器年均维护费用12万

元,新工艺可降至5万元),实际回收期可缩短至3.8年。

从全生命周期角度分析,新工艺变压器按20年使用周期计算,总节电量可达970万kWh,折合电费339.5万元,扣除初期增量投资后,净经济效益约259.5万元。此外,设备寿命从原20年延长至25年,进一步分摊了初期成本,使经济效益优势更加显著。

3.3 行业推广应用前景

该工艺在水电行业的推广应用具有广阔前景。当前国内水电行业仍有大量SF7、SF9系列高耗能变压器在运,仅甘肃省内符合淘汰条件的变压器数量就超过300台,全国范围内替换需求巨大。国家《重点用能产品设备能效先进水平、节能水平和准入水平(2024年版)》政策强制要求淘汰三级能效产品,为新工艺推广提供了政策支持。

在技术适配性方面,新工艺对高海拔、潮湿等特殊环境的适应性经过龙首水电站验证,可广泛应用于西南、西北等水电集中区域。若全国10%的高耗能水电变压器采用该工艺改造,每年可节电约24亿kWh,减少碳排放236万吨,兼具显著的环境效益与社会效益。此外,工艺中的新型材料与制造技术可复制至火电、电网等领域的变压器改造,形成跨行业的技术推广体系。

3.4 未来技术发展方向

未来该工艺的技术迭代将聚焦三大方向:一是新材料深度开发,如石墨烯涂层在绕组导线的应用,可进一步降低电阻损耗8%-10%,同时探索非晶合金纳米化改性,提升材料磁导率15%以上;二是智能化集成创新,引入数字孪生技术构建变压器健康监测模型,通过实时采

集损耗、温升等数据,实现运行策略动态优化,预计可再提升能效5%-8%;三是与新型电力系统协同,针对可再生能源并网需求,开发宽频磁特性变压器技术,适应风电、光伏等电源的波动性要求,拓展工艺在新型电力系统中的应用场景。

结束语

新工艺应用实现变压器空载损耗大幅降低、导电损耗显著减少,设备抗短路能力显著提升,全生命周期经济效益优势明显。该技术在水电行业推广可有效推动高耗能设备能效升级,契合国家“双碳”战略导向。未来可通过新型涂层材料应用、智能监测技术集成,进一步提升变压器运行效率,拓展其在新型电力系统中的应用场景。

参考文献

- [1]吴弘涛,黄强.强电流变压器低压线圈制造新工艺[J].电工电气,2023,(11):75-76.
- [2]尹立强,潘灿林,崔微微.基于单片机控制的可调容量节能型变压器[J].河南科技学院学报(自然科学版),2021,49(01):78-84.
- [3]陈云峰.油田供配电系统中节能型变压器的应用[J].化工设计通讯,2019,45(02):79+109.
- [4]刘序昆,李长安.新工艺解决特高压变压器铁芯生锈问题[J].内燃机与配件,2018,(16):151-152.
- [5]陈洪禹.节能型变压器在油田供配电系统中的应用[J].电世界,2016,57(07):28-29.
- [6]李忠顺,郭源成,姜野,等.变压器油箱铜板屏蔽焊接新工艺[J].变压器,2016,53(03):22-25.