

# 干式电力变压器能效提升的技术路径与政策导向分析

周 芳

天津华能变压器有限公司 天津 301600

**摘要:** 在全球能源转型与“双碳”目标（碳达峰、碳中和）的双重驱动下，提升电力设备能效已成为实现绿色低碳发展的关键环节。作为中低压配电系统中的核心设备，干式电力变压器因其无油、防火、免维护等优势，在城市建筑、轨道交通、数据中心等场所得到广泛应用。然而，其运行过程中的空载损耗与负载损耗仍构成不可忽视的能源浪费。本文系统梳理了干式电力变压器能效提升的关键技术路径，包括材料与结构优化、智能感知与状态调控、数字孪生与全生命周期管理、系统级协同；深入剖析了国内外能效标准体系、财政激励政策与市场机制对产业发展的引导作用；最后，结合我国国情，提出了协同推进技术创新与政策完善的建议，旨在为构建高效、绿色、智能的配电系统提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 干式电力变压器；能效提升；非晶合金；硅钢片；政策导向；绿色制造

## 引言

电力变压器是电能传输与分配过程中不可或缺的枢纽设备，其自身能耗虽看似微小，但因数量庞大、常年连续运行，累积的能源损失极为可观。据统计，全球配电变压器的总损耗约占发电总量的2%–3%，在中国这一比例也相当显著。随着新型城镇化、新基建（如5G基站、数据中心、电动汽车充电桩）的迅猛发展，对安全、可靠、环保型配电设备的需求激增，干式电力变压器凭借其固有的安全性和环境友好性，市场渗透率持续攀升。然而，传统干式变压器在能效方面仍有较大提升空间。特别是在“十四五”规划明确提出单位GDP能耗降低13.5%、二氧化碳排放降低18%的约束性目标背景下，推动干式变压器向更高能效等级跃升，不仅是企业降本增效的内在需求，更是国家实现能源战略转型的必然选择。因此，系统研究干式电力变压器能效提升的技术可行路径，并厘清政策如何有效引导市场和技术发展方向，具有重要的理论价值与现实意义。

## 1 干式电力变压器能效现状与挑战

### 1.1 能效等级划分与现行标准

我国现行的干式电力变压器能效标准主要依据《电力变压器能效限定值及能效等级》（GB20052）。该标准于2024年完成最新修订（GB20052–2024），进一步加严了能效限值，并与国际IEC标准接轨。标准将三相干式配电变压器按额定容量划分为多个档位，分别设定空载损耗（ $P_0$ ）和负载损耗（ $P_k$ ）的限定值，并据此划分为三个能效等级：1级代表国际先进水平，损耗最低；2级代表国内高效水平，符合节能产品要求；3级则为市场准入门槛，即“能效限定值”。以常见的1000kVA干式变压器为

例，GB20052–2024规定1级能效空载损耗不超过1100W，2级为1250W，3级为1500W；负载损耗（75°C参考温度）1级不超过8500W，2级为9500W，3级为11000W。由此可见，从3级提升至1级，总损耗可降低约15%–20%，节能潜力巨大。

### 1.2 在运设备能效结构问题

尽管高效变压器技术日益成熟，但我国存量干式变压器能效结构仍不理想。据中国电器工业协会2025年调研数据显示，截至2024年底，全国在运干式变压器中，3级及以下能效产品占比仍高达60%以上，尤其在中小工业企业、老旧小区及部分公共设施中，高损耗设备长期服役现象普遍。这些设备年运行时间常超过7000小时，即使单台节电率不高，总量累积效应巨大。以佛山市为例，作为制造业大市，其工业用电量占全市总用电量超60%，配电系统能耗占比突出。某制造企业原使用3级能效干变，年耗电约12万kWh，若替换为1级智能干变，年节电量可达3.1万kWh，折合电费节约2.5万元（按0.8元/kWh计）。这一案例反映出存量设备更新对整体能效提升的战略意义。

### 1.3 技术与经济双重障碍

一方面，1级能效产品因采用优质硅钢片、低损耗导体及智能模块，初始成本较3级产品高出25%–35%，在电价偏低或负荷波动大的场景下，投资回收期常超6年，抑制用户更新意愿。另一方面，高性能材料如非晶合金虽可降低空载损耗，但其供应链集中、成本波动大、加工难度高，存在供应安全风险。同时，数据中心、充电桩等高谐波与冲击性负荷广泛接入，导致附加损耗增加、局部过热电和绝缘老化加速，传统基于正弦稳态的损耗模

型难以准确评估实际能效与寿命。加之运维模式滞后、能效监管不严，低效设备仍通过非正规渠道流通。因此，需构建涵盖政策激励、电价机制、全生命周期评价及适应新型负荷标准的协同体系，推动能效水平系统性跃升。

## 2 干式电力变压器能效提升的关键技术路径

### 2.1 材料与结构优化：降低本体损耗

干式变压器的本体损耗主要来源于铁芯的空载损耗和绕组的负载损耗，因此材料与结构的优化是能效提升的基础路径。在铁芯方面，采用高磁感取向硅钢片（HiB钢）或激光刻痕硅钢片可显著降低磁滞与涡流损耗。例如，新日铁JNEX系列或宝武钢铁B30AHG1200等产品，其铁损值（P<sub>1.7/50</sub>）可低至0.85W/kg，较普通硅钢片降低15%–20%。在绕组材料上，高纯度无氧铜（OFC）的应用不仅提升了导电性能，还通过优化截面设计减少了集肤效应与邻近效应带来的附加损耗。部分前沿研究甚至尝试引入石墨烯涂层铜线，以进一步降低交流电阻。与此同时，环氧树脂浇注工艺的改进也发挥了重要作用。真空压力凝胶（VPG）或自动凝胶（AG）工艺提升了绕组的致密性与散热均匀性，避免局部热点形成；而添加纳米氧化铝、氮化硼等导热填料，则有效提高了环氧体系的热导率，使温升降低3–5K，间接减少负载损耗，延长设备寿命。

### 2.2 智能感知与状态调控：实现动态能效管理

新一代干式变压器已超越传统“静态设备”的定位，逐步演变为具备感知、分析与调控能力的智能终端。通过集成光纤光栅测温（FBG）、高频电流互感器、振动传感器及局部放电检测模块，设备可对绕组热点温度、负载率、谐波畸变、机械松动等关键参数进行毫秒级实时采样。在此基础上，内置的边缘智能终端搭载轻量化AI模型（如LSTM或Transformer-based异常检测算法），能够实现过载预警、绝缘劣化评估与剩余寿命预测。更重要的是，这些感知数据可驱动动态运行策略优化。例如，基于实时负载曲线，系统可智能调节冷却风机启停时机与转速，避免设备在低负载区（此时效率最低）长时间运行，从而使其始终工作在高效区间。广东中鹏电气的智能干变产品便通过温度-负载耦合模型，在年均负载率60%的工况下，辅助功耗降低30%，整体能效提升约2.5%，充分体现了智能调控对能效提升的边际贡献。

### 2.3 数字孪生与全生命周期管理

数字孪生技术为干式变压器的能效管理提供了全新的系统性视角。通过构建物理设备的高保真虚拟映射，融合设计参数、运行数据、环境变量与历史维修记录，数字孪生平台能够在虚拟空间中模拟不同负载曲线下的

损耗分布，指导现场运行策略优化。同时，基于绝缘老化模型（如Montsinger方程），平台可提前3–6个月预警绕组寿命终点，实现从“事后维修”向“预测性维护”的转变，大幅降低突发故障风险。此外，数字孪生还可结合电网区域排放因子，量化设备全生命周期的碳足迹，为企业的ESG报告与绿色采购决策提供数据支撑。目前，金盘科技、顺特电气等头部企业已在其高端产品线部署数字孪生平台，并与华为云、阿里云合作开发SaaS化能效管理服务，标志着干变运维进入“数据驱动、模型赋能”的新阶段。

### 2.4 系统级协同：融入新型电力系统

在新型电力系统建设背景下，干式变压器的角色正从单一配电设备向“能源路由器”演进。一方面，其设计开始预留DC/DC或AC/DC变换器接口，支持分布式光伏、储能电池、电动汽车充电桩的即插即用，减少中间电能变换环节，从而降低系统整体损耗。另一方面，通过IEC 61850、MQTT等通信协议接入区域综合能源管理系统（IEMS），干变可参与削峰填谷、电压支撑等电网互动调度，提升系统灵活性。此外，模块化与可扩展设计理念的引入，使得设备容量可根据负荷增长按需扩容，有效避免“大马拉小车”造成的能效浪费。此类系统级创新已在深圳前海、苏州工业园等新型电力系统示范区落地应用，实测显示系统综合能效提升8%–12%，验证了干变在源-网-荷-储协同中的关键枢纽作用。

## 3 国内外能效提升的政策导向分析

### 3.1 国际主要政策体系与实践

欧美等发达经济体以强制性能效标准为核心推动变压器能效升级。欧盟通过(EU)2019/1783生态设计法规，设定分阶段最低能效指数（MEI），要求新上市配电变压器必须达标并取得CE认证。美国能源部（DOE）在10 CFR Part 431中明确各类配电变压器的最低能效限值（DOE 2016标准），禁止低效产品销售，并辅以“能源之星”自愿认证和税收激励。日、韩等国也普遍采用“标准+补贴”组合政策，形成成熟市场引导机制。

### 3.2 中国能效提升政策体系

中国构建了涵盖标准、财政、采购与理念引导的多维政策体系。GB20052-2020标准淘汰SCB10及以下干变，国家《变压器能效提升计划（2021–2023年）》提出2023年新增高效变压器占比超75%。财政方面，曾将高效变压器纳入“节能产品惠民工程”，部分地区提供所得税抵免、增值税返还，并探索绿色信贷与央行碳减排支持工具。政府强制公共机构采购1级或2级能效产品，并在雄安新区、粤港澳大湾区等重点区域打造非晶合金干变示

范工程。同时,推广全生命周期成本(LCC)理念,引导用户从关注初始价格转向长期运行效益。

### 3.3 国内外政策对比与启示

国际政策以高标准、动态更新和市场化机制见长,LCC已融入采购决策;中国政策工具更综合,但标准更新滞后、LCC应用尚浅、金融支持覆盖面有限。未来应建立能效标准动态评估机制,深化绿色金融与能效项目融合,并将LCC纳入招投标与审计制度,推动从“合规驱动”向“价值驱动”转型,构建可持续的能效提升长效机制。

## 4 未来政策建议

第一,加快存量高耗能设备的淘汰与替换进程。当前大量S9、SCB9等低效变压器仍在网运行,构成巨大的“隐性能耗”。建议国家层面设立专项更新改造基金,并对工商业用户更换1级能效干变给予30%以上的购置补贴或提供低息绿色贷款,同时将老旧变压器强制报废年限纳入《电力设备安全管理条例》,形成“激励+约束”双重机制。第二,构建覆盖全链条的绿色回收与资源化体系。尤其针对非晶合金等含有战略金属的材料,应明确生产者责任延伸制度,要求制造商建立逆向回收网络;支持建设区域性变压器拆解与材料再生中心,制定铁芯、铜绕组等核心部件的高值化再利用技术规范,降低原材料对外依存度,实现循环经济闭环。第三,深度参与并引领国际能效治理规则。依托“一带一路”倡议和全球发展倡议,推动中国GB20052能效标准与IEC、IEEE等国际标准互认;

鼓励龙头企业输出高效干变整体解决方案,在海外新能源电站、智慧城市项目中打造“中国能效样板”,提升我国在全球绿色电力装备领域的话语权与产业竞争力。

## 5 结语

干式电力变压器能效提升是系统工程,需技术创新与政策引导协同推进。技术上,材料与结构优化、智能感知与状态调控、数字孪生与全生命周期管理、系统级协同形成可行路径,未来随着多领域深度融合,将向“超高能效、极致安全、全面智能”演进。政策上,强制性能效标准、财政金融政策、政府采购及LCC理念普及营造了良好市场环境。未来政策应进一步强化,加快存量替换,出台激励政策淘汰高耗能老旧变压器;完善回收体系,建立规范体系形成非晶合金铁芯等闭环产业链;深化国际合作,参与国际能效标准制定与互认,推动技术和产品“走出去”。

## 参考文献

- [1]蔡定国,向勇,禰冠星,等.干式配电变压器能效标准应用问题探讨[J].变压器,2021,58(07):6-12.
- [2]赵海龙.干式配电变压器抗短路能力提升措施研究[J].电气时代,2025,(09):113-117.
- [3]梁陈龙,杨柳青,张翀,等.干式变压器热力耦合固化仿真及工艺制度优化[J].广东电力,2025,38(10):110-118.
- [4]幸潜.供电设备在线监测系统干式变压器设备状态评估模型分析与优化研究[J].人民公交,2025,(10):170-172.