

Research on Topology Design and Temperature Rise Characteristics of High-Efficiency Dry-Type Transformers for New Energy Grid Connection.

Dongjie Han¹ Cailing Shang¹ Dongqi Huo¹ Yihan Huo² Guangjun Jiang²

1. Baoding Tianwei Shunda Transformer Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071051, China
2. Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China

Abstract

Yang Guifei, as a highly legendary historical figure in ancient China, is a classic subject in ancient Chinese portrait paintings. This article takes the ancient paintings depicting Yang Guifei from various dynasties since the Tang Dynasty as the research object, comprehensively applying image analysis methods and literature research methods. It examines the visual presentation of Yang Guifei in the ancient paintings from two dimensions: appearance and clothing depiction, and events and scenes creation. It explores her image's trajectory through the changes of the times, from the realistic reverence in the Tang Dynasty, the satirical criticism in the Song and Yuan Dynasties, to the objective secularism in the Ming and Qing Dynasties. It also deeply analyzes the cultural connotations behind it, such as the symbolism of love and female destiny, and the reflection of politics and society. The research aims to restore the true and three-dimensional artistic image of Yang Guifei through the mutual verification of images and historical documents, revealing the imprint of the times behind the changes of her image, and providing a unique perspective for interpreting the development history of Chinese portrait paintings and traditional culture.

Keywords

ancient paintings; image changes; time imprints; cultural connotations

新能源并网用高效干式变压器拓扑设计与温升特性研究

韩冬杰¹ 尚彩玲¹ 霍东起¹ 霍一韩² 蒋光均²

1. 保定天威顺达变压器有限公司, 中国·河北保定 071051
2. 北京理工大学, 中国·北京 100081

摘要

风电、光伏等新能源并网系统具有间歇性、波动性、高谐波渗透的特点, 其运行工况极为复杂, 仅仅依靠于传统的干式变压器, 将极易出现拓扑结构适配性不足、内部损耗分布不均匀、宽负载区间运行效率偏低等问题, 使得并网装备的运行寿命受到严重影响。为切实解决上述问题, 需要编制一套兼顾低损耗、宽负载适配与强散热能力的高效干式变压器拓扑方案, 并建立电磁场、温度场与流体场耦合作用下的温升数值分析模型, 使干式变压器拓扑系统满足新能源并网复杂工况下长期稳定运行需求。本文通过对新能源并网用高效干式变压器拓扑系统创新设计的系统阐述, 分析高效干式变压器的温升特性, 旨在为新能源并网装备的高效、可靠运行提供理论借鉴与参考。

关键词

新能源并网; 干式变压器; 拓扑设计; 温升特性

1 引言

新能源并网干式变压器面临着拓扑结构与运行工况不匹配、损耗与温升相互制约、热点位置难以精准预判的问题, 这些问题得不到有效解决, 将直接影响绝缘系统寿命与整机运行可靠性。为此, 需要从新能源并网工况的内在技术要求出发, 建立高效拓扑选型与分析标准, 形成适配新能源工况

的完整拓扑方案。并通过构建温升数值计算模型, 揭示拓扑结构参数与温升特性之间的映射关系, 确保干式变压器的拓扑系统在经过优化设计以后, 与新能源并网的运行工况实现精准对接。

2 新能源并网用高效干式变压器拓扑设计需求

2.1 宽负载高效运行与能效合规性需求

新能源并网后, 使得干式变压器在全运行周期内负载率长期处于 20% ~ 120% 的宽幅波动区间, 其中轻载运行时段占比可超过 60%。而传统干式变压器拓扑结构多以额

【作者简介】韩冬杰 (1979-), 女, 中国河北秦皇岛人, 硕士, 高级工程师, 从事变压器设计研究。

定负载率为优化目标，在轻载区域空载损耗占比急剧上升，整体运行效率大幅下降。因此，干式变压器拓扑设计必须将宽负载区间效率恒定化、轻载区效率最优化作为核心需求，建立负载率与综合损耗之间的定量映射模型，实现全工作区间内能效指标的合规性与先进性统一。以10kV级1000kVA干式变压器为例，根据《电力变压器能效限定值及能效等级》（GB 20052-2024）的要求，该干式变压器需要达到一级能效的量化指标为：空载损耗 $P_0 \leq 1.8 \text{ W/kVA}$ ，额定负载损耗 $P_K \leq 12 \text{ W/kVA}$ 。为表征宽负载运行效率，采用变压器效率经典计算模型：

$$\eta(\beta) = \frac{\beta S_N \cos\varphi}{\beta S_N \cos\varphi + P_0 + \beta^2 P_K} \times 100\% \quad (1)$$

公式(1)中， β 代表变压器负载率， S_N 代表额定容量，代表负载功率因数。拓扑设计需保证在30%~100%主流负载区间内运行效率不低于98.5%，在20%轻载工况下效率不低于97.5%。拓扑系统的损耗温度修正系数应当《干式电力变压器技术参数和要求》（GB/T 10228-2023），设计过程中避免以单一额定工况为优化目标的局部最优思路，转而采用多目标、全负载区间协同优化策略，统筹空载损耗与负载损耗的配比关系，使拓扑结构在实现高能效的同时，具备与新能源波动工况相匹配的鲁棒性。

2.2 抗谐波与附加损耗抑制需求

新能源并网侧逆变器、变流器等电力电子装置会持续向电网注入5次、7次、11次及更高次谐波，系统公共连接点处电流总谐波畸变率通常处于8%~15%范围。高次谐波电流会在变压器绕组导线内部引发显著的集肤效应与邻近效应，使绕组交流电阻显著增大，进而激发出不可忽略的附加涡流损耗，这部分附加损耗在传统拓扑结构中可达到额定基波负载损耗的30%以上，直接加剧内部产热并破坏温度场均匀性。为此，抑制谐波附加损耗、提升拓扑结构对谐波工况的耐受能力尤为重要。为了达成这一目标，需要通过合理的绕组换位方式、导线截面优化、安匝平衡设计与绕组空间排布优化，削弱高次谐波下的漏磁耦合强度，降低集肤效应与邻近效应的影响程度，确保绕组整体在谐波扰动工况下仍保持稳定的电磁特性与热特性^[1]。

2.3 温升控制与绝缘寿命保障需求

决定整机温升水平的三个关键要素是拓扑结构从热源分布、热传导路径以及对流散热空间，根据变压器绝缘寿命

经典6°C法则：绕组热点温度每升高6K，有机绝缘体系的预期使用寿命将缩短一半。新能源并网变压器要求具备20年及以上连续服役寿命，因此，必须以严格的热点温升限值为约束，实现热源产生与热量耗散的动态平衡。首先，根据牛顿冷却定律与变压器稳态温升工程计算模型，构建总损耗与稳态温升的量化关系：

$$\Delta\theta = \frac{P_{\text{total}}}{K_t A} \quad (2)$$

公式(2)中， $\Delta\theta$ 为部件稳态温升， P_{total} 为该部件总损耗功率， K 为综合对流换热系数， A 为有效散热面积。依据干式电力变压器温升限值要求，F级绝缘体系下，绕组热点温升需控制在75K以内，绕组平均温升不超过60K，铁芯结构件温升不高于55K，且需满足在满负载叠加15%谐波的最严苛组合工况下温升仍不超限。

3 新能源并网用高效干式变压器拓扑设计思路

3.1 多目标拓扑选型与核心参数优化设计

针对干式变压器拓扑结构进行优化设计，首先需要遵循“多目标综合选型、分级适配、定量筛选”的原则，综合考量能效水平、谐波适配性、散热空间、机械强度、制造成本等多重指标，从现有成熟拓扑中筛选最优基础构型，并规避传统拓扑的固有缺陷。拓扑选型过程需建立量化评价体系，以一级能效达标能力、轻载效率保持率、谐波附加损耗增幅、散热流道适配度、抗短路强度为核心评价维度，通过权重赋值法完成拓扑优劣排序，最终确定适配新能源并网场景的基础拓扑形式，各类主流拓扑的核心性能量化对比如表1所示。

完成拓扑选型后，进入核心电磁参数定量优化阶段，参数设计以损耗最小化、磁场均匀化、电合理化为核心目标。铁芯作为电磁能量转换的核心部件，其磁密取值直接决定空载损耗大小，针对新能源轻载运行占比高的特征，冷轧取向硅钢片铁芯磁密严格控制在1.6~1.7T区间，非晶合金铁芯磁密限定在1.25~1.35T，避免磁密过高进入饱和区引发磁滞损耗与涡流损耗激增。同时，优化铁芯叠片工艺，将叠片系数提升至0.97~0.98，减小铁芯接缝处气隙，降低气隙附加损耗。绕组采用等安匝排布设计，严格将安匝不平衡度控制在 $\leq 3\%$ ，最大限度削弱漏磁场分布不均带来的附加损耗与局部过热问题^[2]。

表1 新能源并网干式变压器主流拓扑核心性能指标对比

拓扑结构类型	额定负载效率 (%)	20%轻载效率 (%)	15%THD下谐波附加损耗增幅	冷却流道适配性	国标 GB 20052-2024 能效等级	抗短路能力等级
传统同心圆筒式绕组拓扑	97.8	95.2	32%	较差，流道狭窄不均	二级能效	II级
轴向双分裂绕组拓扑	98.7	97.6	21%	良好，流道排布均匀	一级能效	III级
非晶合金铁芯一体化拓扑	99.1	98.2	26%	一般，铁芯体积受限散热差	一级能效	II级
分段换位式紧凑型拓扑	99.0	98.0	18%	优，流道贯通无死角	一级能效	III级

3.2 宽负载与谐波工况下损耗协同抑制设计

损耗协同抑制主要采用空载损耗与负载损耗双向抑制、基波损耗与谐波附加损耗统筹管控、全负载区间损耗均衡的设计思路，从铁芯结构、绕组构型、漏磁管控三个层面，削弱各类损耗。针对空载损耗抑制，从材料选型、结构优化、工艺改良三个维度协同发力，构建全方位空载损耗降低体系。材料层面优先选用 30Q120、27Q110 等高导磁低损耗冷轧取向硅钢片，或超微晶合金材料，其单位铁损较常规硅钢片降低 25% 以上，从源头减少磁滞损耗与涡流损耗。结构层面摒弃传统直缝铁芯，采用阶梯接缝 + 全斜接缝的叠片结构，将铁芯接缝处的磁阻降低 30% 左右，消除接缝处的局部饱和损耗，使空载损耗整体降低 18%~22%。工艺层面采用无绑扎、弹性夹紧结构，避免铁芯硅钢片因机械应力产生形变，防止应力引发的铁损增加，消除边角磁集中问题，进一步降低局部损耗。针对负载损耗抑制，采用多股换位导线或纸包扁线并联结构，大幅降低集肤效应与邻近效应的影响，有效减小绕组交流电阻，降低焦耳损耗。并优化绕组绝缘厚度，在保证绝缘性能的前提下，减小绕组占用空间，提升导线排布紧凑性，进一步降低负载损耗。

3.3 拓扑 - 散热一体化协同设计与温升管控

新能源并网高效干式变压器拓扑设计需要采用拓扑 - 散热一体化协同设计思路，将散热结构规划与电磁拓扑优化同步开展、深度融合，从拓扑布局层面优化热量产生、传导、对流的全路径，构建“低产热、快散热”的温升管控体系，结合国标温升限值要求，实现产热功率与散热能力的动态平衡，确保变压器在极端工况下温升仍符合标准要求。这一设计理念的关键通过电磁拓扑布局优化，打造贯通式、均匀化、无死角的散热流道系统，同时兼顾变压器结构紧凑性与户外安装需求。绕组设计采用轴向分段、径向分层的排布方式，预留宽度 8~10mm 的轴向与径向冷却流道，保证冷却气流可顺畅贯通绕组内部，流道截面积偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内，避免局部气流不畅导致的热点温升。铁芯设计需要优化铁芯柱与轭部的尺寸比例，增大铁芯与空气的接触面积，提升铁芯自身散热能力。整体布局采用立式紧凑型排布，替代传统卧式布局，将变压器有效散热面积提升 15%~20%，并优化外壳结构，开设百叶窗式通风口，配合底部送风、顶部排风的气流组织形式，形成定向对流散热通道，气流流速稳定控制在 1.5~2.0m/s，以强化对流换热效果。

4 新能源并网用高效干式变压器温升特性

4.1 稳态温升分布特性

干式变压器内部各部件稳态温升差异显著，绕组作为负载损耗与谐波附加损耗的核心产热部位，温升水平远高于铁芯、结构件与外壳，且绕组内部存在明显的温度梯度，是温升管控的核心区域。铁芯因空载损耗产热，温升处于中等水平，结构件与外壳温升最低，热量可快速通过对流散去。

这种差异化分布，是由各部件损耗密度、散热条件、绝缘包裹状态共同决定的。以 10kV/1000kVA 新能源并网 F 级绝缘干式变压器为例，该样机在环境温度 25℃、额定负载、无谐波注入的标准工况下，经第三方权威检测，绕组平均温升为 58K，绕组热点温升 72K，铁芯温升 52K，夹紧件等结构件温升 41K，外壳表面温升 33K，所有指标均远低于国标限值^[9]。

4.2 多因素耦合对温升特性的影响

新能源并网后的负载率、谐波含量、环境温度、冷却条件直接影响干式变压器的温升特性，不同因素对绕组热点温升、平均温升的影响幅度存在明显差异。其中，内部因素主要为变压器自身损耗与散热结构，损耗越大、散热能力越弱，温升越高。外部因素中的载率与谐波含量直接影响产热功率，环境温度与冷却条件直接影响散热效率，具体数据如表 2 所示。

表 2: 多因素耦合对新能源并网干式变压器绕组热点温升的影响

影响因素	因素变化幅度	绕组热点温升变化值(K)	温升变化率
负载率	从 50% 升至 120%	+30.2	1.27K/10% 负载率提升
谐波	THD 从 0 升至 15%	+12.8	0.85K/1%THD 提升
环境温度	从 25℃ 升至 45℃	+18.5	0.93K/1℃ 环境温升
冷却风量	从 100% 降至 60%	+21.3	5.3K/10% 风量下降

4.3 动态温升演化与绝缘寿命关联特性

动态温升不同于稳态温升，其变化过程不存在固定平衡状态，而是随负载、谐波、环境的实时变化持续波动，冷态启动时温升快速上升，负载降低时温升逐步回落，反复的温升升降会使绝缘材料产生热疲劳，直接影响变压器绝缘寿命。比如某地区光伏电站并网干式变压器，全天跟随光伏出力变化，负载率在 20%-100% 区间频繁波动，白天高负载、夜间轻载，动态温升呈现明显的周期性变化。冷态启动时，绕组热点温升从 0K 快速上升，前 30 分钟温升速率达 2.1K/min，120 分钟后进入准稳态。午后负载率升至 100% 且谐波 THD 达 12%，热点温升达到峰值 78K。傍晚负载率下降，温升逐步回落，夜间维持在 20K 左右的低温升状态。全天温升循环升降幅度达 58K，这种动态循环变化，使绝缘材料持续承受热胀冷缩应力，长期保持这种运行状态，将直接加速绝缘老化。

5 结语

通过对新能源并网用高效干式变压器拓扑设计思路与温升特性的分析发现：只有依托于国家现行的能效标准、温升限值标准与并网技术规范的要求，构建多目标、多物理场

协同的拓扑系统，才能实现电磁性能与热安全性能的统筹兼顾。因此，科学合理的拓扑结构，能够有效降低变压器全工况损耗、抑制谐波附加产热、改善内部温度场分布，使绕组热点温升稳定控制在国标限值以内，宽负载区间运行效率满足一级能效要求，进而为新能源并网场景下干式变压器的安全高效运行提供了坚实保障，这对电力系统的安全稳定运行具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 谭玲.新能源并网背景下电力设备的适应性改造研究[J].电力设备管理,2025,(20):162-164.
- [2] 张迪,王立秋.10.5kV电压等级并网的新能源电厂主变压器设置问题及分析[J].电子世界,2020,(08):157-158.
- [3] 董丽玲,马彬彬,宋红.新能源并网场景下35kV级油浸式变压器谐波耐受能力优化设计[J].中国机械,2025,(20):80-83.