

变压器节能运行技术与效率提升研究

关欣欣

国网河南省电力公司临颖县供电公司, 河南 临颖 462600

[摘要] 电力能源作为当前能源结构的重要组成部分, 对于社会节能化发展具有深远影响, 通过采用电力节能技术, 能够推动我国能源消耗结构全面创新。在电力变压器设计过程中, 虽然已经应用多项现代化技术, 很大程度上提高了电力变压器运行效率, 但是随之也增加了电力能源的消耗。本论文研究变压器节能运行与效率提升策略, 剖析变压器能耗产生机理, 探讨运行优化策略, 阐述智能化运维应用, 为变压器节能高效运行提供参考, 助力电网降损增效与绿色低碳发展。

[关键词] 变压器; 节能运行; 效率提升; 损耗控制; 智能运维

DOI: 10.33142/hst.v9i1.18983

中图分类号: TM715

文献标识码: A

Research on Energy-saving Operation Technology and Efficiency Improvement of Transformers

GUAN Xinxin

Linying County Power Supply Company of State Grid He'nan Electric Power Company, Linying, He'nan, 462600, China

Abstract: As an important component of the current energy structure, electric energy has a profound impact on the development of social energy conservation. By adopting electric energy conservation technologies, it can promote comprehensive innovation in Chinese energy consumption structure. In the design process of power transformers, although multiple modern technologies have been applied to greatly improve the operating efficiency of power transformers, it has also increased the consumption of electrical energy. This paper studies the energy-saving operation and efficiency improvement strategies of transformers, analyzes the mechanism of transformer energy consumption, explores operation optimization strategies, elaborates on the application of intelligent operation and maintenance, provides reference for energy-saving and efficient operation of transformers, and helps reduce losses, increase efficiency and promote green and low-carbon development of the power grid.

Keywords: transformer; energy-saving operation; efficiency improvement; loss control; intelligent operations

引言

基于统计数据表明, 在当前电力系统运行中, 变压器自身能耗占据发电总量的 3%~10%左右, 所以变压器具有很大节能空间和潜能^[1]。将节能技术应用于变压器设计中, 主要目的是降低变压器运行产生的电力能源浪费, 在保证变压器运行效率的基础上, 能够提高电力能源利用率, 同时还能够保障电力系统运行安全^[2,3]。但从当前实际情况来看, 变压器中所应用的节能技术较少, 尚未形成完善的节能技术体系, 因此, 如何通过技术创新实现变压器全生命周期的节能运行, 成为提升能源利用效率、推动绿色电力发展的核心研究方向。

1 变压器运行损耗影响因素分析

1.1 变压器的结构类型

传统的变压器几乎都是采用高压绕组和低压绕组制成, 利用电磁感应原理实现高压与低压之间的电压转换与

电能传递^[4]。新结构的出现, 不能简单地将变压器的运行损耗仅划分为有功功率损耗和无功功率损耗这两类, 而是必须要针对具体的结构进行分析。

1.2 变压器的材料类型

变压器的材料主要是指用于制作铁芯和绕组的材料, 从过去普通的铁质铁芯, 发展到目前非晶合金铁芯变压器、三相油浸卷铁芯变压器等新式材料变压器, 由于新型材料的应用^[5], 使得现在的变压器的导磁率相较于过去传统变压器有了大幅提升, 因此其运行损耗取决于材料的导磁率等属性。

1.3 变压器的负载类型

变压器连接不同类型的负载, 对于变压器在实际运行过程中的损耗有一定影响, 这主要是因为电网中的负载类型包括感性负载、非感性负载以及其他类型的负载^[6], 不同类型的负载会影响到变压器在电能转换和配电传输过

程中的效率，从而对变压器运行的损耗产生影响。

1.4 电网的输电状况

变压器作为电力电能转换传输的关键环节，必然会参与电网的并网连接和运行，电网电压的状况也会对变压器的运行损耗产生一定影响，比如电网输电电压采用超高压进行传输，其变压器的运行损耗相对就会小一些，电力转换的效率相对就较高^[7]。

2 变压器本体节能核心技术

2.1 材料革新技术

2.1.1 非晶合金铁芯技术

非晶合金是经快速凝固技术（冷却速度达 10^6°C/s ）制成的原子无序排列金属材料（如 Metglas 2605SA1），其非晶体结构可以使磁滞损耗仅为传统硅钢片的 20%~30%，涡流的损耗大幅度降低，铁损的总体下降^[8]。采用该铁芯的变压器（如 SH15 型、110kV 级）空载损耗比 S13 型的硅钢变压器降低超一半，达到 GB 20052—2024 标准 1 级的能效。目前，非晶合金铁芯已覆盖 35kV 及以下电压等级，110kV 产品在实际中得到了广泛的应用，通过结构的优化可以有效解决机械脆性的相关问题。

2.1.2 高导磁硅钢片技术

高导磁硅钢片经成分优化（降碳、硫至 0.002% 以下）、精准轧制（多辊冷轧）与退火处理（高温等温退火），磁导率提升超 30%、铁损大降，是传统硅钢片升级品及高电压大容量变压器核心铁芯材料，不同铁芯材料损耗特性对比见表 1：

由表可知，非晶合金材料降损耗最优，超薄取向硅钢片次之，高导磁硅钢片性价比有优势，可依场景选。超薄取向硅钢片核心技术是薄规格轧制与应力控制，0.20mm 级产品用“异步轧制+连续退火”工艺，降低应力对磁性能影响，磁感性能升至 1.93T，易磁化组织超 95%，突破行业难题。

2.1.3 绕组材料优化

绕组材料的优化核心是提升导电性能、创新导体结构、优化截面设计，以降电阻的损耗与附加损耗，既能

平衡成本，又可提高运行的效率。传统绕组主要采用的是纯度超 99.95% 的电解铜导线，当前的技术突破主要有三点：一是采用高纯度铜材可以有效的降低电阻率以及负载的损耗，尤其适用于大容量的高电压变压器；二是不断创新导体的结构，主要是采用铜箔绕组以此来替代圆导线，从而降低涡流的损耗，缩小绕组的体积，配合冷却系统可以有效提升散热的效果^[9]；三是研发新型复合导体，如铜-铝复合导体，可以大大降低成本，适用于中低压配的变压器。

2.2 结构优化技术

2.2.1 立体卷铁芯技术

传统叠片式铁芯存在磁阻大、三相磁路不对称、空载损耗高等问题。立体卷铁芯技术采用连续卷制工艺，消除铁芯接缝，实现三相磁路完全对称，降低磁阻，减少空载损耗和电流，同时降低噪音水平。立体卷铁芯技术与非晶合金材料协同应用是本体节能核心方向之一：非晶合金低铁损与立体卷铁芯低磁阻优势叠加，大幅降低空载损耗；优化铁芯支撑结构可提升抗短路能力，解决非晶合金铁芯机械脆性应用限制。该技术已广泛应用于 35kV 及以下配电变压器，在新能源电站、工业园区等对能效与噪音要求高的场景具有较高优势。

2.2.2 绕组结构优化

绕组结构优化通过改进排列、采用新工艺与绝缘结构，精准控制漏磁与附加损耗。核心技术有：分布式绕组排列，降低漏磁通量与附加损耗，适用于大容量电力变压器；换位导线绕组应用，降低大容量变压器附加损耗，某变压器采用后负载损耗降低；绝缘结构协同优化，采用新型材料缩小间距、提升填充系数，增强绝缘，降低体积与损耗。铜箔绕组是中低压变压器绕组结构优化重要方向，具有导电截面积大等显著优点，相较于传统圆导线绕组，其负载损耗下降^[10]。油浸式变压器中，铜箔绕组与强迫油循环冷却系统配合，提升散热能力，保障高负载运行；干式变压器中，铜箔绕组与环氧浇注工艺结合，提升机械强度，适用于振动大的工业场景。

表 1 不同铁芯材料损耗特性对比

铁芯材料类型	典型牌号/规格	铁损值 (W/kg)	相对损耗降低幅度 (对比常规硅钢片)	适用电压等级	核心技术优势
· 常规硅钢片	35W300	1.2~1.5	0%	全电压等级通用	成本低、工艺成熟
高导磁硅钢片	27ZH100	≤0.98	15%~20%	10kV~110kV	性价比高、机械强度优
超薄取向硅钢片	0.20mm	≤0.60	28%~40%	35kV~220kV	铁损极低、磁感性能优异
非晶合金	Metglas	0.2~0.3	70%~80%	10kV~35kV 为主, 110kV 逐步应用	铁损最低、节能效果显著

2.2.3 冷却系统优化

冷却系统性能影响变压器运行温度,温度升高会使绕组电阻增大、负载损耗增加,优化冷却系统可降低运行温度、负载损耗,延长绝缘材料寿命,提升设备可靠性。冷却系统优化分被动冷却升级与主动智能调控:被动冷却升级方面,优化散热器结构(用波纹式替代平板式)可提升散热效率;强迫油循环冷却比自然冷却散热效率高,允许额定容量提升,适用于大容量、高负载变压器。

智能冷却系统是冷却技术的发展趋势,构建“多测点测温-智能算法调控-自适应运行”闭环体系,实现散热效率与辅助功耗平衡。监测层面用多种传感器监测温度;调控层面基于温度差值与负载率数据,用PID算法自动调节冷却风机转速或油泵运行状态,轻载低温时降低转速或关停部分油泵,重载高温时满负荷运行。例如,10kV/1600kVA箱式升压变压器采用双风扇自动启停温控系统,确保绕组温升及效率达标,降低年辅助功耗。此外,全密封波纹油箱设计可避免绝缘油氧化,延长换油周期,节省单次维护成本,减少绝缘损耗。

3 变压器运行优化策略

3.1 负载率动态监测与调控

负载率动态监测与调控是经济运行区管控核心手段,构建“全参数感知-实时分析-闭环调控”体系。监测环节,用多维度设备构建立体网络:电气参数用高精度传感器(0.2S级),采样频率 $\geq 10\text{Hz}$;工况辅助配温感修正模型。数据通过工业以太网或5G边缘网关传输至调控终端,预处理后用改进型加权平均算法算实时负载率,结合历史数据建模预判变化。

3.2 有载调压开关(OLTC)的精准调控与协同应用

有载调压开关(OLTC)能在变压器带负载运行时,依负载率与电压变化自动切换档位、调整变比,确保输出电压稳定,优化运行工况、提升效率。轻载时,调整档位可降低铁芯磁通密度,减少空载损耗;负载波动大时,能实时适配负载变化,避免损耗增加^[1]。OLTC是经济运行区动态调控核心执行部件,优势在于带负载无间断调压,通过调整变比改变铁芯磁通密度,动态优化损耗分布。其节能调控基于负载率与损耗特性协同优化:轻载时下调分接头档位,降低磁通密度与空载损耗,维持输出电压合格;重载时上调档位提升输出电压,减少铜损;负载波动频繁时,与SVG协同形成复合调控模式,避免损耗反弹。OLTC广泛应用于35kV及以上电力变压器,在新能源发电侧与工业负荷中心,可应对负载与电压波动,提升运行经济性与稳定性,但需定期维护。

从技术选型与运维看,OLTC要根据变压器电压等级、负载特性匹配类型:中低压变压器多用机械式,适用于负荷波动平缓场景;高压变压器采用真空式,适配冲击负载场景。现代OLTC配备智能控制器,可接入在线监测系统,自动选最优档位,调控响应时间大幅缩短。运维重点是切换机构润滑与接触电阻监测,定期开展机械特性检测与接触电阻测量,避免局部过热损耗。

3.3 多台变压器并联运行的智能协同优化

变电站、工业厂房等大容量供电场景常采用多台变压器并联运行,要依据总负载变化合理选择投入运行的变压器台数与容量组合,使总损耗最小,构建“负载预测-动态投切-损耗均衡”协同机制,精准匹配运行台数与负载需求,避免部分变压器长期轻载或过载。并联运行优化要满足“电气兼容性”与“能效最优性”,先保障电气条件(电压比一致、短路电压偏差 $\leq 10\%$ 、接线组别相同),再优化负载分配降总损耗。台变压器并联总损耗是各台损耗之和,可建数学模型求最优组合,如两台同容量变压器并联,同时总损耗最小。

3.4 无功补偿与谐波治理的深度协同优化

无功功率过剩和谐波污染是变压器低效运行的隐性因素:无功功率增大励磁电流,提升铁芯和绕组损耗;谐波电流引发集肤与邻近效应,使附加损耗激增,并加剧磁滞损耗。因此,无功补偿与谐波治理是运行优化核心,需构建“精准补偿+靶向治理”协同体系,与负载调控深度融合。变压器低压侧配置并联电容器组、SVG等无功补偿设备,可提升功率因数至0.95以上,降低负载损耗;新能源侧用SVG动态补偿,稳定功率因数。工业中变频器等设备产生大量谐波,增加变压器损耗。安装APF、无源滤波装置等可抑制谐波、减少损耗,其中无源滤波成本低,适用于固定谐波;APF实时跟踪谐波,治理效果好,适用于复杂场景。

4 智能化运维技术在变压器节能中的应用

智能化运维技术助变压器从“事后修”转“事前防”,减少停电损失、保障高效运行,是提升节能水平的重要支撑。变压器在线监测系统部署多类型传感器,实时采集电气、机械、热力学参数,由多参数监测、数据传输、智能分析层构成。借助于计算机实现的变压器节能运行控制系统,选择了当前主流的C/S模式作为控制系统的运行开发模式。C/S模式,也称之为客户端/服务器模式,只需要借助于客户端或者安装有专门开发的软件程序的电脑,就能够实现对整个变压器运行系统的智能监测与控制。C/S模式的最大优势在于简化了数据库服务器的负荷压力,提高了控制系统的功能性

和控制性,极大增强了控制系统可靠性。

5 结论

随着电力系统的逐步市场化,尤其是在我国加入到WTO之后,电力系统的垄断地位逐渐被打破,这势必要求电力部门、电力系统不断提高变压器运行的经济效益,在这样的背景下,本文系统研究变压器节能运行与效率提升策略,结论如下:变压器节能水平受材料性能、结构设计、运行工况等多因素影响,控制系统对变压器运行过程中参数进行监测,基于实际情况加强技术改进,如立体卷铁芯、优化绕组结构等措施能够减少负载损耗与附加损耗,通过高导磁硅钢片、非晶合金铁芯材料可降空载损耗。通过这些方式,能够达到动态调节变压器负载率、动态控制变压器运行能耗的目的。今后开展变压器节能改造方面的深入研究,同时建议专线用户企业尤其是高耗能企业,应大力推广使用新型节能变压器。

[参考文献]

- [1]罗建民.浅谈 10kV 配电变压器节能降耗技术措施[J].科技资讯,2011(25):142.
- [2]韩子磊.节能技术在建筑电气设计中的应用[J].智能建筑电气技术,2008,2(6):84-87.
- [3]张媛.大型电力变压器设计中的节能技术应用[J].集成电路应用,2021,38(1):152-153.
- [4]陈飞.10kV 配电变压器节能降耗技术分析[J].中国高新技术企业,2015(26):80-81.
- [5]弓耀波.节能技术在电力变压器设计中的应用[J].新型工业化,2022,12(7):192-195.
- [6]李明德,王恺,罗继平.低压配电变压器节能关键技术研究[J].现代电子技术,2013,36(20):156-158.
- [7]赵佳悦,宋晓蛟,梁启煜,刘志刚.探讨电力系统中节能技术的应用研究[J].能源与环境,2021(3):37-38.
- [8]王子龙.基于合同能源管理的变压器节能决策支持系统研究[D].浙江:浙江大学,2013.
- [9]黄荣鑫.控制变压器的优化设计及其节能运行的研究[D].江苏:扬州大学,2017.
- [10]章异辉,刘衡.论直流开关电源节能降耗的工程措施[J].通信电源技术,2008,25(5):51-53.
- [11]韩富春,吴变桃.负荷调整与变压器的节电运行[J].电力系统及其自动化学报,2002,14(4):69-71.

作者简介:关欣欣(1998.4—),女,中共党员,电气工程师,电气试验专业高级工,郑州航空工业管理学院电气工程及其自动化专业本科毕业,现就职于国网河南省电力公司临颍县供电公司,任电气试验班副班长。