配电变压器能效提升与降损技术探讨

尤　敏

国网华池县供电公司　甘肃　庆阳　745600

摘　要：配电变压器是配电网中数量最多、应用最广的一种电力设备，在整个电网系统中所消耗的能量也占据较大比例。“双碳”目标以及新型电力系统的提出使提高配电变压器能效、减少运行损失成为节能减碳的重要一环。本文对配电变压器损耗及其影响因素进行了总结归纳，并从材料革新、结构改进、运行控制以及管理措施等方面详细论述如何提高配电变压器能效、降低运行损失的有效方法和技术手段。具体介绍了非晶合金铁心、立体卷铁心、绕组换位导线、动态无功补偿、三相不平衡处理和智能化状态检测等技术的工作机理。研究发现要提高配电变压器能效必须同时关注设备自身性能提升和使用条件改善，“材料—设计—运行—管理”的全方位降低变压器能耗的方法才是最优解。希望本文可为配电网节能改造以及变压器选择起到一定指导作用。

关键词：配电变压器；节能降损；降损措施；非晶合金；三相不平衡

引言

随着社会电气化程度不断提高，配电变压器保有量以及负载日益增加，其能效问题日益突出。同时，国家也陆续出台《变压器能效提升计划（2021—2023 年）》以及 GB20052—2020《电力变压器能效限定值及能效等级》，明确配电变压器空载损耗、负载损耗的要求进一步提高，促使配电变压器能效等级迈向一级、二级甚至更高水平。但是，配电变压器能效提升并不是一项简单的技术问题，而是涉及到材料学、电磁学、制造工艺、运维、调度等多个方面的综合问题。一方面，采用新型软磁材料或立体卷铁芯来降低铁耗；另一方面，在运行上进行无功补偿、三相负荷平衡、合理选择负载率等也是可以起到一定节电作用。这二者必须结合起来才能达到最佳能效。目前，一些供电企业只注重购买高能效配电变压器，而对于已运行的低能效配电变压器进行改造或者优化调度使用考虑较少，从而影响整体节电效益。

1 配电变压器能效概述与损耗构成

1.1 能效评价指标

配电变压器能效主要以空载损耗、负载损耗、总损耗以及能效等级作为衡量标准。空载损耗（铁耗）是指变压器一次侧加上额定电压，而二次侧开路的情况下，由于交变磁场引起铁心中的磁滞损耗和涡流损耗总和，一般情况下几乎不受负载影响而恒定不变，是固定损耗；负载损耗（铜耗）是由于流经绕组产生热量造成损失，与负载电流大小有关并且与其平方成正比关系，是变动损耗；总损耗是两者之和，表示变压器在不同负载下电能转换能力；能效等级根据 GB20052—2020 分为一、二、三档，其中一档能效是最优，一般需要使用非晶合金或者高性能取向硅钢片等优质材料才能达到。另外，损耗比（负载损耗与空载损耗之比）、效率曲线等也是重要的参考依据，可以用来确定变压器最佳工作状态。由于配电变压器平均负载率大多位于 20%-60%，所以空载损耗在整个运行过程中占比较大，所以提高能效首先要从铁心中改善开始。

1.2 损耗构成及影响因素

配电变压器损耗的本质原因可以概括成三个方面：铁心损耗、绕组损耗以及杂散损耗。铁心损耗是由磁滞回线面积以及材料电阻率所决定，在工作磁通密度、交流频率以及硅钢片厚度一定的条件下进行调整，传统的冷轧取向硅钢片在磁通密度为 1.7T 时单位损耗大约为 0.8 ~ 1.0W/kg，而非晶合金带材可将其降低到 0.2W/kg 以下，差距较大。绕组损耗除了有直流电阻损耗之外还有由于漏磁通造成的涡流损耗以及环流损耗。如果绕组导线截面较大或者并联导线数量较多，则漏磁场会造成导线内电流分布不均从而造成额外损耗[1]。另外，杂散损耗主要是由于结构件（例如油箱、夹件、拉板等）中的涡流和磁滞引起，这与漏磁场分布、结构件材质及其位置有关，在实际应用中，三相不平衡负载会使绕组损耗和杂散损耗加大，因为负序和零序电流所产生的额外磁场叠加到主磁场上会引起局部热点以及损耗增加。谐波电流也会造成附加损耗而且高次谐波分量会加强集肤效应以及邻近效应，使得有效电阻增大。温度也是一个重要因素，绕组电阻随温度上升而增大，从而导致负载损

耗增加。所以提高效率不仅要减少额定状态下的损耗还要考虑非理想的工况对于损耗的影响。

2 能效提升技术路径

2.1 非晶合金铁心技术

非晶合金是用超急冷凝固法制备而成，原子排列为长程无序、短程有序结构，不存在晶格各向异性，因而具有很低的磁滞损耗。而且它的厚度只有 20-30μm，远远小于一般硅钢片的 0.23-0.35mm，因此涡流损耗很小。用非晶合金带材制作的配电变压器铁心，空载损耗比同等容量 S13 级硅钢片变压器要小很多，特别适合负载较小而年运行时间较长的农村电网或者城市电网中的配电变压器使用。但是非晶合金也有明显的缺点：第一，饱和磁通密度较低（约为 1.56T），造成相同容量时铁心截面增加，体积及质量增大；第二，硬度大、脆性大，在切削和叠装时容易断裂，对工艺要求较高；第三，磁致伸缩率大，工作时产生的噪音较大。为了克服这些问题，在近几年出现了铁基非晶合金改进配方以及纳米晶化方法，这样就可以在保留低损耗的基础上增大饱和磁感应强度并且增强其韧性。另外，如果采用卷绕式铁心代替传统的搭接式叠片，则可以在一定程度上减小由于铁心缝隙造成的附加损耗和磁阻损失。而在实际应用中，非晶合金变压器一般只用于那些年平均负载小时数较高并且对于空载损耗比较敏感的情况，还需要根据当地的电价以及负荷情况来判断是否合理。

2.2 高导磁硅钢片与立体卷铁心

对于一级能效要求硅钢片变压器，使用高导磁取向硅钢片（如 B18R065、B20R070 等）是最直接方法。这类材料通过减小磁畴尺寸、优化晶粒取向以及表面涂层应力涂层使得每公斤损耗小于 0.65W，而且其饱和磁密可以大于等于 1.9T，既保证较低损耗又具有较高功率密度。相比于普通硅钢片，在同等磁通密度条件下，高导磁率的硅钢片所需的励磁电流更少，从而减少空载损耗和空载电流。立体卷铁心也是一种有效手段[2]。它将三个心柱以等边三角形排列立体放置，用硅钢带一圈圈缠绕而成，没有横向缝隙，磁路沿着晶粒取向闭合，消除传统叠片铁心中角部以及边缘处磁通畸变及其引起的局部损耗，而且三相磁路是对称的，因此它的空载电流谐波分量很小，噪音比传统的低 5 到 10 分贝。立体卷铁心变压器还有良好的承受短路能力和较大的过载能力。但是由于卷制工艺要求较高，铁心退火和固化都需要严格控制温度，所以它的生产成本要比平面叠片铁心高，目前已经在 10kV 配电台区大范围应用，特别是对于那些对噪音及空间都有较高要求的城市配电间非常适用。

2.3 绕组优化与换位导线技术

绕组损耗的减少除使用具有较高电导率的铜材（例如无氧铜）之外，主要取决于导线排列以及换位方法的选择。传统的圆筒式绕组中，沿径向分布的漏磁场造成导线中的电流密度不一致，内部导线由于漏磁较小而电流集中，外部导线相反，造成额外的涡流损耗，而用换位导线（即由若干根绝缘漆包线经过特定换位编织而成的一种组合导线）可以使每根导线在总面积上所占的位置不同，以此来平衡漏磁回路，大大降低涡流损耗及环流损耗。另外，绕组层数、匝数分布以及静电环的存在与否都会影响到损耗，采用箔式绕组（尤其是对于低压侧而言）由于电流沿箔宽方向分布较为均匀，端部漏磁较弱，因此杂散损耗较小。适当加大绕组高度与直径的比例可以减小径向漏磁，进而降低横向涡流损耗。从绝缘的角度来说，使用 DMD 绝缘纸或者 Nomex 芳纶纸等耐高温的绝缘材料可以使绕组的工作温度提高，在相同的负载下可以减小导线截面积或者增大电流密度，但是也要考虑到电阻温度系数对于损耗的影响。综上所述，绕组的设计需要利用电磁场软件进行多种因素联合考虑，才能得到最小的整体损耗。

3 降损技术策略

3.1 无功补偿与三相不平衡治理

在变压器低压侧安装并联电容器组，按需投切以达到提高功率因数的目的，可以使功率因数由原来的 0.8 上升到 0.95 以上，相应地负载损耗下降约为（$1-0.8^2/0.95^2$）≈29%。现在智能化电容器以及静止无功发生器（SVG）可以做到连续无功补偿，快速响应，解决了传统电容器分段投切可能出现的过补偿或者欠补偿的问题。三相不平衡也是配电网中一种常见的损失因素，在三相电流不平衡的情况下，变压器铁芯会产生负序磁场而引起额外铁损，另外中性线上电流也会造成零序损耗，而且不平衡程度越大，则绕组铜损也越大[3]。解决方法有以下几种：在设计建设和布置时合理安排单相负荷使得每相所负担的负荷基本一致；在线路运行时利用智能换相开关在不断电的情况下把较重的那一相负荷转移到较轻的那一相上；对于有源配电网，可以通过电力电子型三相平衡设备向系统注入补偿电流来抵消不平衡部分。以上这些技术和台区智能终端所具有的数据采集与分析能力相结合就可以实现对三相不平衡的闭环控制。

3.2 经济运行区与负载调度

变压器损耗率随着负载率的变化而变化，“U”形曲线关系中有一个最小损耗率对应的最佳负载率（一般为

40%-60%）。如果负载率低于此范围，则固定损耗所占比例过大，效率较低；如果高于这个范围，则可变损耗快速增加，也不经济。因此对于多台并联运行的配电变压器可以采用智能化投切方式，根据实际负荷情况自动投切一定数量的变压器使投入台数尽量满足最佳负载率的要求。比如在晚上负荷较小的情况下自动切除一台变压器以防止“大马拉小车”。而对于单台变压器可以通过调节分接头来改变变压比进而改变工作的磁通密度从而减小空载损耗但是这种方法调整范围不大而且要考虑电压质量问题。更为有效的办法是采用有载调容方法，就是在变压器内部设有高低两档容量，在负荷较小时切换到低档容量上，这样空载损耗及短路阻抗都会发生变化总的损耗就会大幅减少。这种调容变压器适合负荷季节性强的农村地区使用。同时分布式电源的接入也为优化用电提供了新的可能，在负荷高峰时可以让分布式电源供电减少变压器过载次数以及相应的损耗。

3.3 智能监测与故障预警

降损需掌握变压器运行状态。通过在变压器上配置温度、电流电压、振动及油中溶解气体等传感器，结合边缘计算与云平台分析，可实时估算损耗并判断故障。利用空载损耗与电压平方成正比、负载损耗与电流平方成正比的关系，根据实时电压电流计算总损耗，若超出理想最小损耗阈值则报警。借助大数据与机器学习，可构建损耗预测模型，识别谐波过高、冷却异常或铁心多点接地等高损耗风险，提供维护建议或参数优化方案[4]。数字孪生技术融合三维模型与实测数据，预测不同工况下的损耗变化，辅助选择最优运行方式。智能监测不仅支撑精准降损，还延长设备寿命、减少非计划停运，间接降低整体能耗。目前国家电网与南方电网正积极推进配电台区智能化，将变压器能效监测接入互联网，实现“一台区一策略”。

4 结语

本文主要讨论配电变压器提高效率、减少损耗相关技术，从损耗机理出发，分别介绍了四个方面的重要手段：非晶合金、立体卷铁心有效降低空载损耗，换位导线以及绕组设计有效降低附加铜耗；无功补偿、三相不平衡处理以及合理安排负载有效改善工作条件；智能化监控有助于做出最优节电决策。各种方法都应考虑整个生命周期成本进行选择。在新的电力系统中，由于大量分布式电源、储能装置及电动汽车的接入给电网带来双向流动、电压变化以及谐波等问题，传统的降损方法已经不能满足要求，在此基础上提出了几个新思路：使用基于宽禁带半导体固态变压器（SST）进行高频高效转换；利用人工智能自适应能效控制器结合预测和调节；采用环保绝缘材料和低碳生产工艺减少全生命周期内的碳足迹。提高效率需要各方共同努力，在科研机构、企业界和政府之间形成合力，依靠科技进步和体制机制改革打造高效、绿色、安全的配电网。

参考文献

[1] 周孝信, 孙华东, 许晓慧. 新型电力系统背景下配电设备能效评估方法 [J]. 电力系统自动化,2023,47(2):1-10.

[2] 吴俊勇, 张明锐, 郝亮亮. 三相不平衡对配电变压器损耗影响的定量分析 [J]. 电力自动化设备,2022,42(9):145-151.

[3] 杨丽娟, 何怡刚, 罗安. 基于数字孪生的配电变压器状态感知与能效优化 [J]. 电工电能新技术,2023,42(6):68-76.

[4] 胡秦然, 高山, 杨胜春. 配电网变压器全寿命周期成本建模与敏感性分析 [J]. 电力建设,2021,42(3):89-97.