

变电站变压器运行状态评估与节能优化技术探讨

吴佐青

天津泰达电子工程有限公司 天津 300450

摘要：随着电力需求的持续增长，变电站变压器作为电力系统的核心设备，其稳定运行和高效节能至关重要。基于此，本文深入探讨变电站变压器运行状态评估方法，通过对多种评估技术的分析，阐述其在实际应用中的优势与不足。同时，针对变压器节能优化技术展开研究，介绍从设备选型到运行管理等多方面的节能措施，旨在为提升变电站变压器运行的可靠性和经济性提供理论支持与实践指导，助力电力系统可持续发展。

关键词：变电站；变压器运行状态评估；节能优化技术

引言：在现代电力系统中，变电站变压器承担着电压变换、电能分配和传输的关键任务。其运行状态的优劣直接影响到电力供应的稳定性、可靠性以及电能质量。据统计，因变压器故障引发的停电事故，不仅会给工业生产带来巨大的经济损失，还会严重影响居民的正常生活。同时，随着能源危机和环保意识的增强，变压器的能耗问题也日益受到关注。变压器在运行过程中会产生铜损、铁损等多种损耗，这些损耗不仅浪费大量能源，还增加了发电成本和碳排放。因此，准确评估变电站变压器运行状态，并采取有效的节能优化技术，对于保障电力系统安全稳定运行、提高能源利用效率具有重要意义。

1 变电站变压器运行状态评估与节能优化技术的意义

在现代电力系统中，变电站变压器运行状态评估与节能优化技术具有不可替代的重要意义。从电力供应稳定性角度来看，变压器作为电力传输的核心枢纽，其运行状态直接影响电网安全。利用实时、精准的运行状态评估，能够及时发现变压器内部潜在的过热、放电等故障隐患，提前制定维修计划，避免突发故障导致的大面积停电事故^[1]。如，在工业生产中，一次变压器故障引发的停电可能导致生产线停滞，造成重大经济损失；在医疗、交通等关键领域，停电甚至会威胁生命安全和公共秩序，而科学的运行状态评估为电力系统稳定运行构筑起坚实防线。

在经济效益层面，运行状态评估与节能优化技术相辅相成。一方面，准确评估变压器状态可大幅度减少因故障维修产生的高额费用，延长设备使用寿命，降低运维成本；另一方面，节能优化技术通过降低铁芯损耗、绕组损耗以及优化无功补偿等方式，显著减少变压器运行过程中的能源浪费。据统计，采用新型节能变压器和优化运行管理策略后，部分变电站的变压器能耗可降低

10%-30%，此举为电力企业节省大量运营成本的同时，也间接减轻了用户的用电负担。除此之外，从能源环境角度出发，节能优化技术能够有效降低发电过程中煤炭、天然气等一次能源的消耗，减少二氧化碳、二氧化硫等污染物排放，助力实现“双碳”目标，推动电力行业向绿色低碳方向转型，对促进社会可持续发展具有重要的战略意义。

2 变电站变压器运行状态评估

2.1 油色谱分析

油色谱分析是基于变压器内部绝缘油的化学特性开展的检测技术。变压器在正常运行时，绝缘油能起到绝缘和散热作用；但当内部出现异常，如铁芯局部过热、绕组匝间短路等故障时，在热应力与电应力作用下，绝缘油会发生分解，产生氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等特征气体。不同故障类型引发的绝缘油分解程度和产物不同：低温过热故障（150℃-300℃）主要生成甲烷；高温过热（700℃以上）则会使乙烯含量显著增加；而局部放电产生的电弧高温，会促使绝缘油分解出乙炔。

具体检测过程中，工作人员需使用专业工具从变压器取油阀抽取油样，将样品转移至气相色谱仪进行分析。仪器通过色谱柱对混合气体进行分离，再利用检测器测定各气体组分的含量。通过对这些气体成分和含量的综合分析，结合国际电工委员会（IEC）标准及相关导则，能够判断变压器内部是否存在过热、放电等故障，以及故障的严重程度^[2]。不过，油色谱分析存在固有局限性。该检测通常采用离线方式，从取样到获取分析结果耗时较长，难以实时监测变压器状态；并且，分析过程需严格遵循操作规范，对检测人员的专业知识和操作技能要求较高。

2.2 局部放电检测

局部放电是变压器内部绝缘介质在高电场作用下，

局部区域发生的非贯穿性放电现象。这种放电虽不会立即导致绝缘击穿,但持续的局部放电会产生高温、带电粒子和电磁辐射,逐步侵蚀绝缘材料,降低其绝缘性能,最终可能引发绝缘击穿故障。

目前,常用的局部放电检测方法主要有电气检测法、超声波检测法和光检测法。电气检测法利用在变压器中性点、套管末屏等位置安装高频电流互感器(HFCT)或罗氏线圈,采集局部放电产生的脉冲电流信号,经过信号调理与分析,能够准确测量放电量,检测灵敏度较高。但问题是,变电站内复杂的电磁环境会对检测信号造成干扰,严重影响检测结果的准确性。超声波检测法则是利用安装在变压器外壳上的超声波传感器,接收局部放电产生的机械振动波信号。该方法对环境电磁干扰不敏感,可在运行状态下进行检测,但受超声波传播特性影响,检测灵敏度相对较低,且对故障的定位精度有限。光检测法借助光电传感器捕捉局部放电产生的紫外光或可见光信号,能够直观呈现放电位置和形态,但由于检测设备结构复杂,购置与维护成本较高,限制了其大规模应用。

2.3 温度监测

温度是反映变压器运行状态的关键参数之一。变压器在运行过程中,绕组电阻损耗、铁芯磁滞和涡流损耗会产生热量,使变压器温度升高。若变压器长期处于高温运行状态,绝缘材料会加速老化,机械和电气性能下降,进而缩短变压器的使用寿命。

温度监测主要利用在变压器绕组、油面等部位安装温度传感器,实时采集绕组温度和油温数据。常见的温度传感器包括热电偶、热电阻和光纤传感器等^[3]。当变压器油温超过预先设定的报警温度时,可能意味着变压器负载过重、冷却系统故障或内部存在过热性故障。比如,散热器风扇停转、散热片堵塞会导致散热效率下降,引起油温上升;而绕组内部接触不良、铁芯多点接地等故障则可能导致局部过热。温度监测具有操作简便、实时性强的特点,能够及时发现变压器的异常发热情况。但单一的温度监测存在局限性,无法准确判断故障的具体类型和严重程度,需要与油色谱分析、局部放电检测等其他评估方法结合使用,进行综合分析。

2.4 基于人工智能的评估方法

随着人工智能技术的快速发展,其在变压器运行状态评估领域的应用日益广泛。基于人工智能的评估方法通过收集变压器运行过程中的各类数据,如电压、电流、油温、油色谱数据、局部放电信号等,以及历史故障记录,利用神经网络、支持向量机、贝叶斯网络等算

法,对这些数据进行学习和分析,建立变压器运行状态评估模型。

这里以神经网络为例,其通过构建多层神经元结构,对输入的变压器运行数据进行非线性变换和特征提取,模拟人类专家的故障诊断思维过程,从而实现对变压器运行状态的准确评估和故障预测。该类方法具有强大的自学习能力,能够处理多维度、非线性的复杂数据,挖掘数据间潜在的关联关系,发现传统方法难以察觉的故障征兆。不过,基于人工智能的评估方法在实际应用中也面临诸多挑战。模型训练需要大量高质量的数据作为支撑,数据的完整性、准确性和一致性直接影响模型性能;并且,模型训练过程复杂,涉及参数调整、算法优化等工作,对技术人员的专业水平要求较高;另一方面,部分人工智能模型的决策过程难以解释,在实际应用中可能影响其可信度和接受度。

3 变电站变压器节能优化技术

3.1 节能优化的意义

在能源紧张和环保要求日益严格的背景下,变电站变压器节能优化具有重要的现实意义。具体表现如下:一是,降低变压器能耗可以减少发电所需的一次能源消耗,如煤炭、石油、天然气等,从而有效缓解能源短缺问题,促进能源可持续利用。二是,减少变压器能耗还能降低发电过程中产生的二氧化碳、二氧化硫等污染物排放,减轻环境污染,助力实现碳达峰、碳中和目标。三是,节能优化后的变压器能够大幅度降低电力企业的运营成本,进一步提高企业的经济效益和市场竞争能力。

3.2 节能优化技术原理

3.2.1 降低铁芯损耗

铁芯损耗是变压器损耗的重要组成部分,主要包括磁滞损耗和涡流损耗。降低铁芯损耗的原理是选用高磁导率的铁芯材料,如非晶合金、冷轧硅钢片等。高磁导率材料能够降低铁芯中的磁通密度,减少磁滞损耗。并且,可采用薄的铁芯材料和改进铁芯结构,如采用卷铁芯、斜接缝铁芯等,可以降低涡流损耗。

3.2.2 降低绕组损耗

绕组损耗主要是由于绕组电阻引起的,与绕组电流的平方成正比。降低绕组损耗的方法包括选用低电阻的导电材料,如铜材;优化绕组设计,减小绕组电阻;合理选择变压器容量,避免变压器长期处于轻载或过载运行状态,以降低绕组电流。另一方面,采用绕组换位技术可以使绕组中的电流分布更加均匀,能够进一步降低绕组损耗。

3.2.3 无功补偿

无功功率会增加变压器和输电线路的损耗,降低电力系统的功率因数。无功补偿的原理是应用在变压器低压侧或高压侧安装电容器、电抗器等无功补偿设备,向电力系统提供或吸收无功功率,提高功率因数,降低无功电流,从而减少变压器和输电线路的损耗。

3.3 节能变压器的选型与应用

3.3.1 节能变压器类型

目前,市场上常见的节能变压器类型有非晶合金铁芯变压器、立体卷铁芯变压器、高阻抗变压器等。非晶合金铁芯变压器具有低损耗、节能效果显著的特点,适用于对节能要求较高的场合,如居民小区、商业综合体等。立体卷铁芯变压器采用三相立体卷绕结构,具有结构紧凑、噪音低、损耗小等优点,在城市电网改造中得到广泛应用。高阻抗变压器通过增加绕组的电抗值,限制短路电流,降低绕组损耗,适用于短路电流较大的电力系统。

3.3.2 选型原则

在选择节能变压器时,需要综合考虑多个因素。首先,要根据变压器的使用场合和负载特性,确定合适的容量和电压等级^[4]。比如,对于负载变化较大的工业用户,应选择具有较强过载能力的变压器;对于对电压稳定性要求较高的场合,应选择电压调整率较小的变压器。其次,要对比不同类型节能变压器的性能参数和价格,选择性价比高的产品。同时,还要考虑变压器的可靠性、维护便利性等因素。

3.4 运行管理优化策略

3.4.1 优化负载分配

合理分配变压器的负载,避免变压器长期处于轻载或过载运行状态,是提高变压器运行效率的重要措施。可以通过对电力系统负荷进行实时监测和分析,采用负荷转移、调整用电时间等方式,优化变压器的负载分配。如,在白天用电高峰时段,将部分可调整的工业负载转移到夜间用电低谷时段,使变压器的负载率保持在合理范围内,降低变压器损耗。

3.4.2 智能运维系统应用

利用智能运维系统对变压器进行实时监测和管理,

能够及时发现变压器运行中的异常情况,采取相应的措施进行处理,以提高变压器的运行可靠性和节能效果。智能运维系统通过传感器采集变压器的运行数据,如温度、电流、电压、油位等,并利用物联网、大数据、人工智能等技术对数据进行分析和处理。当发现变压器运行参数异常时,系统能够及时发出报警信息,并提供故障诊断和处理建议。

3.4.3 定期维护与检修

定期对变压器进行维护和检修,能够及时发现并处理变压器存在的问题,保证变压器的正常运行,降低能耗。维护和检修工作包括对变压器外观进行检查,查看是否有渗漏油、部件损坏等情况;对变压器的电气参数进行测试,如绕组电阻、绝缘电阻、介质损耗因数等;对变压器的冷却系统、分接开关等部件进行维护和保养。

结语:变电站变压器运行状态评估与节能优化技术对于电力系统的稳定运行和可持续发展意义重大。通过油色谱分析、局部放电检测、温度监测以及基于人工智能的评估方法,能够全面、精准地掌握变压器运行状态,及时发现潜在故障隐患,为变压器的安全稳定运行提供有力保障。而在节能优化方面,从降低铁芯损耗、绕组损耗到无功补偿,再到节能变压器的合理选型以及运行管理的优化,多管齐下可有效降低变压器能耗,提高能源利用效率,减少环境污染,同时降低电力企业运营成本。

参考文献

- [1]吕明利,向巴平措,平措次仁.变电站变压器检修安全风险评估与预测技术研究[J].电力设备管理,2025,(01):226-228.
- [2]宋磊,成鲁钰,郎哲.基于5G通信的变电站主变压器运行状态在线监测方法[J].电气技术与经济,2024,(12):315-317.
- [3]王敏.主变压器状态评估与监测技术研究[J].电力系统自动化,2020,44(5):88-93.
- [4]刘艳.变电站主变压器状态检修应用分析[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(14):125-126.