

电力电气领域中电力变压器油循环冷却运行机理的分析

吴泽来

珠海电力工程监理有限责任公司，广东 珠海 519000

DOI:10.61369/WCEST.2025100008

摘要：电力变压器油循环冷却运行机理研究意义重大。文中阐述冷却系统构成与工作原理，分析冷却介质特性、多物理场耦合传热等机制，通过数值模拟、建立模型等方法探讨流动特性、热惯性等。还提及系统故障模式、优化策略，包括散热器翅片布局、新型冷却介质开发等，强调智能控制与监测技术的应用。

关键词：油循环冷却；运行机理；优化策略

Analysis of the Oil Circulation Cooling Operation Mechanism of Power Transformers in the Field of Power and Electrical Engineering

Wu Zelai

Zhuhai Electric Power Engineering Supervision Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract : The research on the operation mechanism of oil circulation cooling in power transformers is of great significance. The article elaborates on the composition and working principle of the cooling system, analyzes the characteristics of the cooling medium, the mechanisms of multi physics field coupled heat transfer, and explores flow characteristics, thermal inertia, etc. through numerical simulation, model establishment, and other methods. It also mentions system failure modes, optimization strategies, including radiator fin layout, development of new cooling media, etc., emphasizing the application of intelligent control and monitoring technology.

Keywords : oil circulation cooling; operating mechanism; optimization strategy

引言

《国家能源局关于推进电力安全生产隐患排查治理工作的通知（2024年发布）》强调了保障电力系统安全稳定运行的重要性。电力变压器油循环冷却系统作为电力运行的关键部分，其运行机理的研究意义重大。该系统由主循环系统、冷却介质等构成，涉及多物理场耦合传热、负载突变热惯性等复杂机制。通过CFD模拟、建立模型等方法分析其特性与故障模式，结合拓扑优化、新型冷却介质开发等技术提升性能。同时，模糊PID策略、数字孪生等技术实现智能调控与监测。研究此系统既贴合政策要求，也对保障电力电气系统稳定运行、推动技术进步至关重要。

一、电力变压器油循环冷却系统基本组成

油温等情况灵活调整冷却方式，以实现高效散热^[1]。

（一）主循环系统结构及工作原理

电力变压器油循环冷却系统的主循环系统主要由油泵、散热器以及冷却管路构成。油泵作为关键动力源，安装于靠近变压器油箱底部位置，通过机械驱动，为变压器油的循环提供动力，促使热油从油箱底部被抽出。散热器通常分布于变压器箱体四周，由多组散热片组成，具备较大散热面积。冷却管路连接油泵与散热器，形成封闭循环通道，保障变压器油顺畅流动。工作时，油泵将变压器内部因损耗产生热量而温度升高的热油抽出，通过冷却管路输送至散热器。在散热器中，热油与外界冷空气进行热交换，温度降低后，再经冷却管路回流至变压器油箱，完成循环冷却过程。此过程中，通过自然对流与强迫循环模式的切换机制，依据变压器负载及

在电力变压器油循环冷却系统中，冷却介质的物理化学特性至关重要。变压器油的粘度对其流动性能影响显著，它随温度呈现明显的依赖性。温度升高，粘度降低，油的流动性增强，有利于热量传递，但过低的粘度可能影响油膜强度。比热容方面，它反映了油吸收热量的能力，较大的比热容意味着在相同温度变化下能吸收更多热量，高效带走变压器产生的热量。而导热系数体现了油传导热量的效率，其数值与温度也存在关联。油品老化会改变这些特性，进而影响流动传热。老化使油中生成杂质，粘度增加，流动受阻，比热容和导热系数下降，降低冷却效率^[2]。因此，深入研究这些物理化学特性及其随温度的变化，以及老化的规律，对优化冷却系统性能意义重大。

二、油循环冷却过程传热与流动耦合特性

(一) 多物理场耦合传热机制

在电力变压器油循环冷却过程中，多物理场耦合传热机制十分关键。通过建立绕组 - 绝缘油 - 散热器多介质传热模型，能有效解析这一机制。其中，涡流损耗热源分布与油路流动存在协同作用机理。变压器运行时，绕组因电流产生涡流损耗进而生成热源，这部分热源分布并非均匀，而绝缘油的流动路径与速度会影响热量传递。同时，油路流动的湍流效应也不可忽视，它对局部换热系数有着显著影响。湍流能增强流体微团的混合，加大换热强度，使绝缘油与绕组、散热器之间的热量传递更高效。这种多物理场耦合传热机制，涵盖了热场与流场的相互作用，对深入理解电力变压器油循环冷却运行机理意义重大^[3]。

(二) 流动特性数值模拟分析

基于CFD方法构建三维流体动力学模型，对电力变压器油循环冷却过程的流动特性展开数值模拟分析。在该模拟中，着重探讨油路结构参数对压降分布的影响。管径大小的改变，会直接影响油液流动时的阻力，管径越小，油液流动阻力越大，相应的压降也就越大^[4]。而弯头角度同样不可忽视，不同的弯头角度会改变油液的流动方向，进而影响其流动的顺畅程度与压降情况。通过模拟分析，能够清晰揭示流速与温度场的空间关联特征。流速的变化会导致油液与变压器各部件间的热交换效率改变，进而影响温度场分布；而温度场的差异也会在一定程度上反作用于油液的流动特性，二者相互影响，通过数值模拟可深入了解这种复杂的关联关系，为变压器油循环冷却系统的优化提供理论依据。

三、油循环冷却系统动态响应特性

(一) 暂态过程热流耦合分析

1. 负载突变下的热惯性效应

在电力变压器油循环冷却系统中，负载突变时热惯性效应显著。当负载突然变化，变压器内部产生的热量迅速改变，但由于热惯性，油温并不会立刻随之改变，而是呈现滞后响应特性。这是因为油的比热容及热传导特性使得热量传递和温度变化存在一定延迟。例如在阶梯负荷变化时，油温的上升或下降并非瞬间完成。基于此，通过建立热流时间常数计算模型^[5]，可对这种热惯性效应进行量化分析。该模型综合考虑油的热物理参数、变压器结构及负载变化情况等因素，能够准确计算热流时间常数，进而深入了解油温在负载突变后的动态变化过程，为优化油循环冷却系统运行，保障电力变压器稳定可靠运行提供重要理论依据。

2. 油泵启停瞬态过程模拟

在油循环冷却系统动态响应特性的暂态过程热流耦合分析中，油泵启停瞬态过程模拟十分关键。油泵启停瞬间，油流状态会发生急剧变化，其惯性会对绕组热点温度产生显著影响^[6]。当油泵启动时，油流从静止到加速流动，由于惯性，油流不能立刻达到稳定流速，这期间绕组产生的热量无法及时被带走，导致热点温度升高。而油泵停止时，油流因惯性不会马上静止，仍会携

带部分热量，但随后热量积累，热点温度同样会有所上升。与此同时，在循环系统加速 / 减速阶段，即油泵启停过程中，压力会出现波动。启动时，压力逐渐上升，可能产生压力冲击；停止时，压力迅速下降，可能引发负压情况。通过模拟该瞬态过程，深入探究油流惯性与绕组热点温度的关系，以及压力波动特征，对掌握油循环冷却系统动态响应特性具有重要意义。

(二) 典型故障模式机理研究

1. 油路局部堵塞效应分析

在电力变压器油循环冷却系统中，油路局部堵塞是一种典型故障模式。油路局部堵塞会导致冷却油流的分布发生改变。量化不同堵塞程度对冷却效率的影响至关重要，当堵塞程度较轻时，冷却效率虽有下降但仍处于可接受范围；而随着堵塞程度加重，冷却效率将急剧降低。通过建立流量偏差与热点温升的数学关系^[7]，能深入剖析堵塞效应。流量偏差反映了因堵塞导致的各部位油流分配不均，热点温升则直观体现冷却效果的变化。此数学关系揭示了堵塞引发的油流异常与变压器关键部位温度升高之间的内在联系，有助于更精准地把握油路局部堵塞对油循环冷却系统动态响应特性的影响，为故障诊断与预防提供有力依据。

2. 油泵失效工况影响评估

在油循环冷却系统中，油泵失效是一种典型故障工况。当油泵失效时，强制循环中断，冷却系统需依靠自然对流模式维持冷却。研究强制循环中断时自然对流模式的启动阈值十分关键，因为这决定了冷却系统能否及时从强制循环平稳过渡到自然对流，确保变压器仍处于安全的运行温度范围。同时，评估辅助冷却系统的应急能力也不容忽视。辅助冷却系统在油泵失效工况下应迅速响应，弥补油泵失效带来的冷却能力损失。若辅助冷却系统应急能力不足，变压器温度将迅速上升，威胁其正常运行甚至导致故障。通过深入分析这些因素，可更全面了解油泵失效工况对油循环冷却系统的影响，为优化冷却系统设计、提升变压器运行可靠性提供有力依据^[8]。

四、优化设计与智能控制策略

(一) 热力性能优化设计

1. 油路拓扑结构优化

在电力变压器油循环冷却运行机理的研究中，针对油路拓扑结构优化，应用拓扑优化方法改进散热器翅片布局是提升热力性能的关键举措。传统的散热器翅片布局可能并非最优，难以充分发挥油循环冷却的效能。通过拓扑优化方法，能够依据变压器内部的热流分布以及流体动力学原理，对散热器翅片布局进行精准调整^[9]。此举旨在提高单位体积换热效率，让变压器油在流经散热器时，能更高效地将热量传递出去。优化后的翅片布局可以增加油与翅片的接触面积，或改善油的流动路径，使得热量交换更加充分，从而在有限的空间内实现更好的散热效果，有效提升电力变压器的整体热力性能，保障其稳定、高效运行。

2. 新型冷却介质开发

在电力变压器油循环冷却系统中，新型冷却介质开发至关重

要。研究纳米流体添加对变压器油传热性能的增强效应，纳米粒子具有高导热性，将其添加到变压器油中，可显著提升混合介质的导热系数，强化传热效率，有效降低变压器运行温度，保障其稳定运行^[10]。同时，评估纳米流体作为新型冷却介质的经济可行性也不容忽视。这不仅涉及纳米流体的制备成本，还包括其在延长变压器使用寿命、减少维护成本等方面带来的潜在收益。通过全面权衡成本与效益，确定纳米流体在变压器冷却中的应用价值，为电力变压器油循环冷却系统的热力性能优化提供坚实的新型冷却介质选择依据，推动电力电气领域的发展。

（二）智能控制算法研究

1. 变流量自适应控制

在电力电气领域电力变压器油循环冷却运行中，开发基于模糊 PID 的油泵转速调节策略，对实现能耗与冷却需求的动态平衡至关重要。此策略依据变压器实时温度、负载等参数，借助模糊逻辑系统对 PID 控制器参数进行动态调整。当变压器负载较轻、油温较低时，模糊 PID 算法自动降低油泵转速，减少不必要的能耗；而负载增加、油温升高时，及时提高油泵转速，确保冷却效果。通过这种自适应变流量控制，既能保障变压器在各种工况下的可靠冷却，又能精准调节油泵转速，避免能源浪费，达到高效节能的目的，为电力变压器的稳定、经济运行提供有力支撑。

2. 数字孪生技术应用

在电力电气领域中电力变压器油循环冷却运行机理的分析里，数字孪生技术应用有着关键意义。构建虚拟镜像系统实现冷却过程实时监测与预测性维护，该系统基于数字孪生技术，通过采集电力变压器运行中的油温、流量等各类物理数据，在虚拟空间构建与实际变压器油循环冷却系统高度相似的镜像。凭借此镜像，不仅能实时呈现冷却过程状态，工作人员可直观查看各部位运行情况，及时发现潜在异常；还能利用算法模拟不同工况，对未来运行状态进行预测性分析，提前规划维护方案，有效预防故障发生，确保电力变压器安全、稳定、高效运行，为电力系统可靠供电提供坚实保障。

（三）状态监测与故障预警

1. 多参数融合诊断技术

在电力变压器油循环冷却运行中，多参数融合诊断技术至关

重要。整合油温、流量、振动等多源信号，能全面反映变压器运行状态。油温可直观体现设备发热情况，流量影响散热效率，振动则能揭示内部机械部件的运行状况。基于 D-S 证据理论建立故障识别模型，该理论可有效处理不确定性信息，通过融合多源信号所提供的证据，提高故障识别的准确性和可靠性。不同传感器获取的信号存在一定不确定性和局限性，D-S 证据理论能够将这些信息合理融合，精确判断变压器是否存在故障以及故障类型，从而实现对电力变压器运行状态的精准监测与故障预警，保障其稳定、高效运行。

2. 大数据预测平台构建

构建大数据预测平台对于电力变压器油循环冷却系统至关重要。该平台需整合各类传感器数据，涵盖油温、油流速度、压力等关键参数。借助数据挖掘技术，对海量历史数据进行深度分析，挖掘数据间潜在关联，找出影响冷却系统运行状态的关键因素。通过机器学习算法，如神经网络、支持向量机等，构建精确的预测模型，实现对冷却系统未来运行状态的精准预测。依据预测结果，及时发现可能出现的故障隐患，提前发出故障预警，为运维人员提供充足时间制定应对策略，从而保障电力变压器油循环冷却系统的可靠运行，提高电力电气系统整体稳定性。

五、总结

电力变压器油循环冷却运行机理的研究对保障电力电气系统稳定运行意义重大。在复杂工况下，油循环冷却系统的传热流动规律较为复杂，其与变压器的运行状态紧密相关。系统优化设计与智能控制的关键技术创新点，如高效热交换结构设计、智能调控策略等，显著提升了冷却效率与可靠性。未来，新型冷却介质的工程应用有望进一步改善冷却效果，多能源耦合系统的集成优化能有效提高能源利用效率，数字孪生技术的深度开发则可实现对变压器运行状态的精准模拟与预测。通过对这些方向的深入研究，将推动电力变压器油循环冷却技术不断进步，更好地满足电力电气领域日益增长的需求。

参考文献

- [1] 张淏源. 电气化交通 - 配电网运行机理分析与协同优化 [D]. 辽宁工程技术大学, 2023.
- [2] 郭琦. 电力变压器冷却器智能控制系统的设计 [D]. 太原科技大学, 2023.
- [3] 马心怡. 油浸式电力变压器维修决策技术的研究 [D]. 长春工业大学, 2021.
- [4] 解宵. 面向电力变压器油色谱数据特征参量的研究 [D]. 西安理工大学, 2021.
- [5] 张克琪. 油浸式电力变压器数字孪生建模与仿真 [D]. 山东大学, 2023.
- [6] 陈振江, 何政宇, 周影, 王晓夫, 杨林清. 强迫油循环风冷电力变压器冷却系统改造分析 [J]. 电力设备管理, 2022.
- [7] 耿珊. 电力变压器油的化验技术分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(8): 179–180, 183.
- [8] 赵准. 电力系统电气设备的检修技术分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(16): 182–184.
- [9] 刘钦. 试论电力调控运行系统的优化策略 [J]. 科学与信息化, 2021(9): 80, 82.
- [10] 李洪洋. 电力变压器电气高压试验技术要点分析 [J]. 中国设备工程, 2022(8): 79–80.