

新能源并网背景下水电站主变压器过载能力提升技术研究

王若越

重庆大唐国际彭水水电开发有限公司 重庆 409600

摘要：新能源并网运行使电力系统电源结构发生显著变化，波动性、间歇性的新能源电力注入导致水电站主变压器面临更为复杂的负载波动工况，过载问题频发，严重威胁电力系统安全稳定运行。本文以新能源并网背景为切入点，聚焦水电站主变压器过载能力提升核心需求，重点探讨过载能力的有效控制策略与改善技术路径。通过分析新能源并网对主变压器运行工况的影响，从主动控制、被动防护、运行优化三个维度构建过载能力提升体系，阐述各技术的作用机制与应用逻辑。研究结果可为新能源并网场景下水电站主变压器安全稳定运行提供技术参考，助力提升电力系统整体承载能力。

关键词：新能源并网；水电站；主变压器；过载能力

引言

随着全球能源转型进程加快，风能、太阳能等新能源发电技术得到广泛推广应用，大量新能源电站并入电网运行。新能源电力的波动性与间歇性特征，打破了传统电力系统的功率平衡状态，导致水电站主变压器的负载呈现剧烈波动、随机突变等特点，过载运行概率大幅提升。主变压器作为水电站电能传输与变换的核心设备，其过载能力直接决定电力系统的安全稳定水平与供电可靠性。若过载问题得不到有效解决，易引发设备过热、绝缘老化甚至故障跳闸等问题，造成大面积停电事故。研究新能源并网场景下水电站主变压器过载能力的有效控制与改善技术，具有重要的理论价值与工程意义。本文以此为核心理念展开探讨，提出针对性的技术路径与控制方案。

一、新能源并网对水电站主变压器运行工况的影响

（一）运行负载特性的改变

传统电力系统中，水电站主变压器的负载主要由常规负荷决定，变化相对平稳，具有可预测性。新能源并网后，风能、太阳能等新能源发电功率受自然条件影响显著，呈现出强烈的波动性与间歇性。风速突变、云层遮挡等因素会导致新能源发电功率在短时间内出现大幅波动，这种波动通过电网传递至水电站主变压器，使其负载从平稳状态转为动态波动状态。新能源并网比例的提升，使得电网对水电站的调峰填谷需求进一步增加，主变压器需要频繁在不同负载区间切换，甚至在短时间内承受超出额定容量的负载冲击，加剧了过载风险。

（二）过载成因的多元化

新能源并网背景下，水电站主变压器的过载成因不再局限于传统的负荷增长过快，而是呈现出多元化特征。一方面，新能源发电功率的随机性波动可能导致区域电网功率失衡，大量功率瞬间涌入水电站侧，造成主变压器短时过载；另一方面，为适应新能源消纳需求，水电站的运行方式需频繁调整，机组启停、负荷切换等操作会产生冲击电流，叠加正常负荷后易引发过载。新能源并网带来的电压波动、谐波污染等问题，会影响主变压器的运行效率，导致其内部损耗增加，间接降低了其抗过载能力，进一步提升了过载发生的概率。

（三）对过载控制与改善的新要求

传统的主变压器过载控制手段多基于固定的负载阈值进行保护，响应速度较慢，难以适应新能源并网后负载快速波动的工况。新能源并网背景下，对主变压器过载能力的控制与改善提出了更高要求：一是需具备快速响应能力，能够实时监测负载变化并及时采取控制措施；二是需具备自适应调节能力，可根据新能源功率波动规律动态调整控制策略；三是需兼顾安全性与经济性，在提升过载能力的同时，避免过度投入导致成本增加。

二、水电站主变压器过载能力的有效控制策略

（一）基于实时监测的主动控制策略

实时监测是实现主变压器过载主动控制的基础，通过构建全维度的监测体系，可实时掌握主变压器的运行状态与负载变化趋势，为控制策略的制定提供数据支撑。监测内容应涵盖负载电流、电压、绕组温度、油温和绝

缘状态等关键参数，结合新能源发电功率预测数据，实现对过载风险的提前预判。基于监测数据，采用模糊控制、PID控制等智能控制算法，构建过载主动控制模型。当监测到负载接近额定容量阈值时，系统自动启动预警机制；当出现过载趋势时，通过调节水电站机组出力、调整无功补偿装置等方式，快速降低主变压器的负载水平，避免过载发生。可引入电网调度协同机制，将主变压器的运行状态纳入区域电网调度体系，通过全网功率平衡调节，从源头上控制过载风险^[1]。

（二）基于负载转移的协同控制策略

负载转移是解决主变压器过载的有效手段，通过构建多变压器协同运行体系，实现负载的合理分配，提升整体抗过载能力。在水电站内部，可采用多台主变压器并联运行模式，通过安装负载均衡装置，实时监测各变压器的负载分布情况，当某一台变压器出现过载趋势时，自动将部分负载转移至负载率较低的变压器上，实现负载均衡分配。加强水电站与周边电网的协同联动，当水电站内部变压器无法满足负载转移需求时，通过区域电网的功率调度，将部分负载转移至其他电站或电网分区，降低水电站主变压器的负载压力。负载转移过程中，需重点关注切换过程的稳定性，避免产生冲击电流对变压器造成二次损伤，可采用软切换技术实现负载的平稳转移。

（三）基于保护阈值优化的自适应控制策略

传统的主变压器保护阈值多为固定值，难以适应新能源并网后负载波动的工况，通过优化保护阈值，构建自适应保护机制，可提升过载控制的灵活性与有效性。基于主变压器的温升特性、绝缘寿命损耗规律以及新能源功率波动特征，采用动态阈值设定方法，根据实时负载变化趋势与运行环境参数，动态调整过载保护阈值。在新能源功率波动较小的平稳工况下，可适当降低保护阈值，提升保护灵敏度；在新能源功率波动剧烈的工况下，可在确保设备安全的前提下，适当提高保护阈值，避免因频繁触发保护导致系统运行不稳定。引入绝缘寿命损耗评估模型，将过载时长、过载程度与绝缘寿命损耗相关联，当过载导致的绝缘寿命损耗达到设定阈值时，及时启动保护措施，实现安全性与经济性的平衡。

三、水电站主变压器过载能力的改善技术路径

（一）基于设备升级的本体改善技术

主变压器的本体性能是决定其过载能力的核心因素，通过设备升级改造，可从根本上提升其抗过载能力。在绕组设计方面，采用耐高温、低损耗的绕组材料，优化

绕组结构，提升绕组的散热性能与机械强度，降低过载时的温升速度；在铁芯设计方面，选用高磁导率的铁芯材料，减少铁芯损耗，提升能量转换效率，间接提升过载能力；在绝缘材料方面，采用耐老化、耐高温的绝缘材料，延长绝缘寿命，提升设备在过载工况下的绝缘可靠性。可对主变压器的冷却系统进行升级改造，采用强迫油循环风冷、强迫油循环水冷等高效冷却方式，提升冷却系统的散热效率，降低过载时的设备温度，避免因过热导致绝缘老化或设备故障。

（二）基于辅助装置的外部改善技术

引入辅助装置是提升主变压器过载能力的重要补充，通过外部装置的协同作用，可有效缓解过载带来的不利影响。无功补偿装置是常用的辅助装置之一，通过安装并联电容器、静止无功发生器等设备，可有效补偿系统无功功率，降低主变压器的视在功率，减少有功功率损耗，从而提升其过载能力。可安装串联电抗器，限制短路电流与冲击电流，避免因电流突变导致主变压器过载。引入温度监测与冷却控制辅助装置，实时监测主变压器的绕组温度与油温，当温度超过设定阈值时，自动启动冷却系统的增强模式，提升散热效果，控制温度上升速度，为过载运行提供一定的缓冲时间。辅助装置的选型需结合主变压器的额定参数与运行工况，确保其与主体设备匹配性良好。

（三）基于运行优化的管理改善技术

合理的运行管理策略可有效提升主变压器的过载能力，通过优化运行方式、加强维护管理，降低过载风险。在运行方式优化方面，结合新能源功率预测数据与负荷预测数据，制定科学的机组启停与负荷调整方案，避免主变压器在高峰负荷时段长时间满负荷运行，为过载预留一定的裕度。合理安排主变压器的检修周期，避免在负荷高峰期进行检修，确保设备在关键时段的正常运行。在维护管理方面，加强对主变压器的日常维护与定期检修，及时发现并处理设备存在的隐患，如绝缘老化、接触不良等问题，提升设备的健康水平。建立完善的过载应急处理机制，当发生过载时，能够快速启动应急响应，采取有效的处置措施，降低过载造成的损失^[2]。

（四）基于数字孪生的智能优化改善技术

在新能源并网带来的复杂运行工况下，传统改善技术难以实现主变压器过载状态的精准预判与动态优化，基于数字孪生的智能优化技术为过载能力提升提供了全新路径。数字孪生技术通过构建主变压器的虚拟映射模

型,实现物理实体与虚拟模型的实时数据交互与同步,可全面模拟主变压器在不同负载工况下的运行状态,为过载能力改善提供精准的技术支撑。

数字孪生模型的构建需整合主变压器的设计参数、运行历史数据、实时监测数据以及新能源并网工况数据,采用多物理场耦合仿真技术,精准刻画主变压器的电磁、热、力学等多场耦合特性。通过该模型,可模拟不同过载程度、不同新能源功率波动场景下主变压器的温升分布、绝缘状态变化规律,提前预判过载风险点,为改善技术的精准实施提供依据。在进行设备升级改造前,可通过数字孪生模型模拟不同绕组材料、冷却系统方案下主变压器的过载耐受能力,对比分析各方案的改善效果,优化选择最优技术方案,降低改造试错成本。

基于数字孪生模型的智能优化控制可实现过载改善的动态自适应调节。通过实时采集主变压器的运行数据与新能源功率数据,驱动虚拟模型进行实时仿真运算,预测未来一段时间内的负载变化趋势与过载可能性。根据预测结果,自动生成最优的改善策略,如提前调整冷却系统运行状态、优化无功补偿装置投入容量等,实现过载能力的主动改善。数字孪生模型可对改善技术的实施效果进行实时评估,通过虚拟仿真验证改善策略的有效性,若发现改善效果未达预期,可及时调整策略参数,确保改善技术的精准落地。数字孪生技术还可与大数据分析、人工智能算法相结合,挖掘主变压器过载运行的内在规律,持续优化改善技术方案,提升过载能力提升的长效性与稳定性。

四、过载控制与改善技术的协同应用体系

(一) 体系构建原则

新能源并网背景下,水电站主变压器过载能力的提升需依托控制策略与改善技术的协同作用,构建“监测-控制-改善-反馈”的闭环协同应用体系。体系构建应遵循系统性原则,综合考虑新能源波动特性、主变压器运行状态、电网调度需求等多方面因素,确保各技术手段相互配合、协同发力;遵循经济性原则,在满足过载能力提升需求的前提下,合理选择技术方案,控制设备升级与运维成本;遵循可靠性原则,确保协同体系运行稳定,能够在复杂工况下有效发挥作用。

(二) 协同运行机制

协同应用体系以实时监测系统为核心,通过数据传

输网络将监测数据同步至控制中心与改善技术执行单元。控制中心基于监测数据,结合新能源功率预测结果,制定针对性的控制策略,向改善技术执行单元发送指令,启动相应的改善措施。当监测到主变压器出现轻微过载时,首先通过负载转移控制策略调整负载分布;若过载趋势未得到缓解,则启动冷却系统增强模式,提升散热效果;若过载程度较大,需同时调整机组出力与电网调度,实现过载的快速控制。数字孪生技术可作为协同体系的重要支撑,通过虚拟仿真模拟各控制与改善措施的协同作用效果,优化策略执行时序与参数,提升协同运行效率。系统实时反馈控制与改善效果,根据反馈结果动态调整策略,形成闭环管理。协同体系需具备自我诊断能力,能够及时发现控制与改善技术存在的问题,并自动优化调整,确保体系运行的有效性^[3]。

结语

新能源并网背景下,水电站主变压器过载问题成为制约电力系统安全稳定运行的关键因素,提升其过载能力需从控制策略与改善技术两方面协同发力。本文提出的基于实时监测的主动控制、负载转移的协同控制、保护阈值优化的自适应控制策略,以及基于设备升级、辅助装置引入、运行优化、数字孪生智能优化的改善技术路径,可有效提升主变压器的过载能力。随着新能源并网比例的进一步提升,需加强智能控制算法与先进材料技术、数字孪生技术的深度融合应用,构建更加高效、自适应的过载能力提升体系。应注重控制与改善技术的协同优化,实现安全性、经济性与可靠性的统一,为新能源电力的高效消纳与电力系统的稳定运行提供保障。

参考文献

- [1]李秀优.电网规划中的新能源电力接入问题与对策研究[J].安家,2022(5):0025-0027.
- [2]黄菁雯,杜志叶,徐箭,等.计及新能源出力和谐波的变压器热点温度修正模型[J].电力系统自动化,2025,49(16):132-141.
- [3]鹿浩.大容量新能源发电变压器绕组结构的优化与冷却系统的改进[J].中国战略新兴产业,2025(21):63-65.