

变电站主变过载运行风险及应对策略研究

王江伟

青铜峡铝业有限公司宁东铝业分公司 宁夏 银川 751400

【摘要】：电力负荷持续增长与新能源高比例接入使主变压器频繁承受过载运行压力。过载引发绕组温升加剧，加速绝缘油与固体绝缘材料老化，诱发局部放电、机械疲劳甚至击穿故障，同时降低能效、恶化电能质量，并威胁系统稳定性。应对措施包括：部署基于光纤测温、油色谱与边缘计算的智能监测系统，实现热点温度滚动预测与分级预警；依托 ADMS/EMS 平台优化跨站负荷分配，结合储能与分布式电源实施源-网-荷-储协同调控；推行差异化状态检修，建立全生命周期健康档案；对老旧设备实施冷却系统升级、绝缘强化及容量扩容；并制定轻、中、重三级过载应急规程，嵌入调度系统实现自动响应，提升极端工况下主变安全运行能力。

【关键词】：主变压器；过载运行；风险分析；应对策略；电力系统

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.075

引言

随着我国电力负荷持续攀升与新能源大规模接入，变电站主变压器频繁面临短时乃至持续性过载运行的挑战。主变作为电网能量传输的核心枢纽，其安全稳定直接关乎整个电力系统的可靠性。然而，过载不仅会加速绝缘老化、引发设备过热，还可能诱发连锁故障，造成大面积停电事故。如何在保障供电连续性的同时，有效识别、预警并管控主变过载风险，已成为当前电网运维亟需破解的关键课题。本文立足于实际运行痛点，融合智能感知、数字孪生、柔性调控等前沿技术，系统探讨主变过载运行的风险演化机理与多维度应对策略，旨在为主设备安全运行提供理论支撑与实践路径，推动电力系统向更智能、更具韧性的方向发展。

1 变电站主变过载运行的主要风险

1.1 设备过载引发的故障风险

主变压器在过载运行期间，由于承受超出额定负荷的电流，内部温度显著上升，造成设备过热。这种过度加热会加速绝缘材料的老化，尤其是绝缘油温度升高时，可能引发绝缘油的化学性质变化，进一步导致绝缘击穿，造成电气故障。过载状态下的长时间运行，也会增加主变压器的机械应力，使得金属部分发生疲劳，甚至导致电器元件的失效。若未及时采取有效的监控与维修措施，可能引发严重的火灾或爆炸事故，影响整个变电站的安全稳定运行。

1.2 对电力系统稳定性的影响

作为电力系统的核心设备，主变压器的稳定运行至关重要。过载运行不仅使得主变压器的性能下降，还可能导致设备的失效，从而引发变电站停运^[1]。一旦发生故障，系统的电力供应将受到影响，可能引发大范围的电力中断，导致下游负荷无法得到正常供电，甚至造成电网不稳定或系统崩溃。长时间的过载运行会使变电站的其他设备加速老化，增加整体维护难度，甚至会导致系统整体可靠性下降。

1.3 运营效率的降低

在过载运行的状态下，主变压器的能量转换效率会明显下降。超负荷时，电力传输过程中将产生更多的热量，导致更多的能量损耗。由于温度过高，主变的内部损耗增加，设备的工作效率低下，进而影响电力输出质量。过载情况下，电压波动与频率不稳定的现象可能频繁发生，这不仅影响供电质量，还导致终端设备工作不稳定。设备效率低下还意味着需要更频繁的维护和更高的维修成本，直接影响变电站的经济效益和长期运行效率。

2 应对主变压器过载运行风险的策略

2.1 构建智能化实时监测与预警系统

为精准掌控主变压器在高负荷工况下的运行状态，亟需部署覆盖全面、响应迅速的智能化监测体系。该系统以高精度光纤测温、高频电流传感器、特高频局部放电检测装置及在线油色谱分析仪为基础，实现对绕组热点温度、顶层油温、负载电流谐波、乙炔等特征气体浓度等关键参量的毫秒级采集。所有数据通过工业物联网平台汇聚至边缘计算节点，在本地完成噪声滤除、趋势拟合与异常初判，大幅降低主站通信负担并提升响应速度。当任一参数逼近动态阈值（如考虑环境温度修正后的热限值），系统立即启动分级告警：现场触发声光提示，运维人员同步接收移动端推送，调度中心大屏自动弹出设备健康状态图谱。更进一步，融合近 30 天历史负荷曲线、冷却系统启停记录及未来 24 小时气温预报，采用长短期记忆网络（LSTM）等时序预测模型，滚动推演主变热点温度演化路径，提前 2~4 小时预判过载风险窗口。该预警信息可直接嵌入调度操作票系统，辅助生成负荷转移或冷却增强建议，真正实现由“事后处置”向“事前防控”的转变，为主变安全运行构筑第一道智能防线。

2.2 优化负荷分配与动态调度机制

在保障供电可靠性的前提下，通过精细化、智能化的调度

手段实现主变负载均衡,是缓解过载风险的关键举措。依托高级配电管理系统(ADMS)和能量管理系统(EMS),可对区域电网内多站负荷数据进行分钟级采集与拓扑分析,实时识别主变负载率异常升高或热态趋势恶化的节点。一旦发现潜在过载风险,系统可自动计算最优负荷转移路径,通过远程控制联络开关或分段开关,将部分馈线负荷灵活切换至邻近轻载变电站,实现跨站资源协同。对于配置双主变及以上容量冗余的站点,应部署基于负载预测的智能投切逻辑,在负荷爬升前预判高峰时段,提前投入备用主变,形成并列运行模式,有效降低单台设备热应力。在高比例分布式光伏、风电接入的区域,还需建立源-网-储协调机制:利用储能装置在午间光伏大发或夜间低谷时段充电,在傍晚负荷尖峰时段放电,削减主变峰值负载;同时,通过逆变器无功支撑与有功限发策略,抑制新能源出力波动对主变造成的冲击。该机制不仅提升现有设备利用效率,也为构建弹性、自适应的现代配电网奠定运行基础。

2.3 实施差异化运维与预防性维护策略

针对不同服役年限、负载历史及健康状况的主变压器,应制定差异化的运维方案。对长期处于高负载率运行的设备,缩短红外测温、油色谱分析及绕组变形检测的周期,重点监控绝缘老化趋势与内部热点发展情况^[2]。引入基于状态的维修(CBM)理念,结合设备健康指数评估结果,动态调整检修计划,避免“一刀切”式的定期检修造成资源浪费或隐患遗漏。对于已出现轻微过热、油质劣化或局部放电迹象的主变,及时安排带电检测或停电消缺,防止小缺陷演变为重大故障。同时,建立主变全生命周期档案,记录历次过载事件的时间、持续时长、最高负载率及后续影响,为后续风险评估和寿命预测提供数据支撑。

2.4 推进设备技术改造与容量提升工程

针对长期处于重载或过载状态、且调度优化空间有限的老旧主变压器,单纯依赖运行管控已难以保障安全裕度,亟需通过硬件升级实现本质性提升。技术改造应聚焦材料、结构与冷却系统的协同优化:采用高导磁低损耗的非晶合金或高牌号硅钢片降低空载与负载损耗;将传统自然油循环冷却方式升级为强油风冷(OFAF)或强迫油导向循环(ODAF),显著提升散热效率;同步增强绕组绝缘结构,如使用Nomex纸或改性环氧树脂,提高热稳定性和电气强度,使设备具备在1.3~1.5倍额定负荷下安全运行数小时的能力。对于负荷增长迅猛区域,应结合电网规划开展增容替换,选用更高容量等级的主变,并校核配套开关设备、母线及保护定值的匹配性。在新建工程中,推行“适度超前”设计理念,依据区域经济发展与用电预测模型,预留10%~20%的容量裕度,并采用双主变互备、分段母线等灵活接线方式,提升极端负荷或单设备故障下的供电韧性。此类工程措施从源头增强设备承载能力,是应对结构性过载问题的根本路径。

2.5 强化过载运行期间的应急响应与协同处置

在主变已进入过载运行状态但尚未达到跳闸阈值时,需启动专项应急响应流程。调度端应立即通知运维班组加强现场巡视,重点检查散热器运行状况、油位油温变化及有无异常声响或气味;同时,限制非必要负荷接入,优先保障重要用户供电。若过载持续时间较长,应组织专家团队进行风险会商,评估是否采取临时限电、转移负荷或启动备用电源等措施。各相关单位(调度、运维、检修、客服)之间需建立高效的信息共享与指令传达机制,确保在最短时间内形成处置合力,最大限度压缩故障响应时间,防止过载状态恶化为设备损毁或系统事故。

3 保障电力系统稳定性的综合措施

3.1 主变压器热稳定性与绝缘劣化机制分析

主变压器在过载运行状态下,其内部热场分布发生显著变化,绕组与铁芯区域温度迅速升高,超出设计允许的温升限值。高温环境会加速固体绝缘材料(如纸、板)和液体绝缘介质(如矿物绝缘油)的老化进程。尤其在热点温度超过120°C时,纤维素绝缘材料的聚合度急剧下降,机械强度减弱,导致绕组结构松动甚至变形。同时,绝缘油在高温下易发生氧化反应,生成酸性物质和沉淀物,降低其介电性能,并可能堵塞冷却油道,进一步恶化散热条件。此外,局部放电活动在高温高电场耦合作用下更易诱发,形成恶性循环,最终引发匝间短路或对地击穿^[3]。因此,深入理解过载条件下主变内部热-电-化学多物理场耦合机制,是评估其短期耐受能力与长期健康状态的基础。

3.2 基于数字孪生的主变状态感知与风险预测

随着数字孪生技术在电力系统中的应用深化,可构建主变压器高保真虚拟模型,实时映射其物理实体的运行状态。该模型融合设备铭牌参数、三维结构数据、材料特性及在线监测信息,通过有限元仿真计算内部温度场、电磁场与流体场分布,精准识别潜在热点位置。结合边缘侧采集的油温、负载电流、振动频谱及溶解气体组分(如H₂、CH₄、C₂H₂等),利用深度神经网络对故障前兆特征进行模式识别,实现从“阈值告警”向“趋势预警”的跃升。在此基础上,引入时间序列预测算法(如LSTM或Transformer),综合考虑未来负荷曲线、环境温度及历史过载记录,动态输出主变剩余安全运行时间窗口,为主动调控提供量化依据。

3.3 多源协同的负荷柔性调控体系构建

面对主变过载风险,传统被动限电方式已难以满足现代电网对供电连续性与运行经济性的要求。需构建涵盖源、网、荷、储多维度的柔性调控体系,实现负荷资源的精准调用与动态平衡。依托配电网自动化主站与AMI系统,可实时获取用户侧用电行为数据,结合负荷类型、响应速度及调节潜力,建立可调度资源库。当主变负载率逼近安全阈值时,系统自动激活分级响应策略:优先调用签约用户的可中断负荷,协调工业园区调

整生产班次,引导大型商业综合体优化中央空调运行时段;同时,调度虚拟电厂聚合的分布式储能、电动汽车充电桩及屋顶光伏逆变器,形成分钟级功率支撑。在物理层面,通过智能软开关(SOP)动态调节馈线间潮流分布,或利用固态变压器(SST)实现不同电压等级间的灵活功率互济,有效缓解局部重载。该体系不仅为主变提供“软着陆”式的负荷缓冲空间,还显著提升配电网在高渗透率新能源接入背景下的自适应与自愈能力,推动电力系统向高效、弹性、低碳方向演进。

3.4 主变过载能力评估与寿命折损量化方法

标准热模型虽为主变短期过载能力提供了理论依据,但在实际运行中,受设备老化、环境温度、冷却系统状态及历史负载波动等多重因素影响,其真实热响应特性往往偏离理想假设。为提升评估精度,需构建融合在线监测数据与物理机理的动态评估体系。通过实时采集绕组热点温度、顶层油温、负载电流及冷却装置运行状态,反演主变热路参数,如热阻与热容,动态校正 IEC 热模型中的固定系数。在此基础上,引入基于 Arrhenius 反应动力学的老化模型,将不同温度-时间组合下的运行工况转换为标准参考温度下的等效老化小时数(EHL),实现对绝缘寿命损耗的精确累积计算。该量化结果可纳入设备健康指数体系,当年度老化速率超过安全阈值(如2%绝缘寿命损耗/年),即自动触发预警,并作为制定检修、轮换或退役决策的核心依据。此方法不仅弥补了传统静态评估的不足,更为主变在高负荷条件下的科学调度与风险预控提供可量化的技术支撑,有效避免因寿命透支导致的突发性故障,保障电网长期可靠运行。

参考文献:

- [1] 罗永盛,杨坤,马仲松,尹时运,王宗普,黄显仙,普剑辉,郭磊.变压器过载风险研判及寿命损失评估技术研究与应用[J].云南电力技术,2025,53(3):58-64.
- [2] 罗威,谢明磊,邓军.大型主变压器运行环境对绝缘材料老化速率的影响[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(3):187-190.
- [3] 周伟东.关于风电场主变压器故障异常原因及控制措施探究[J].仪器仪表用户,2025,32(3):96-98.

3.5 极端场景下的主变应急运行规程完善

在迎峰度夏、极寒天气或重大政治经济活动保电期间,区域负荷常出现短时尖峰,主变压器易陷入持续过载状态。为应对这类极端运行场景,需建立科学、可操作的分级应急规程。依据过载程度划分为轻度(1.1-1.2倍)、中度(1.2-1.35倍)和重度(>1.35倍)三级响应机制,分别规定最长允许运行时长、红外测温与油色谱检测频次、强制冷却措施启动条件及非关键负荷切除顺序。规程应嵌入调度自动化系统,实现自动触发与流程引导。同时,强化跨部门协同,与气象预警平台对接获取温度趋势,联动地方政府协调重要用户错峰,提前调配移动变电站或应急发电车至高风险站点。通过每年至少一次的全要素反事故演练,验证从监测告警、指令下达、现场处置到负荷恢复的全链条响应能力,确保在真实过载事件中快速控制风险边界,既防止设备热累积损伤,又最大限度维持供电可靠性,为主变安全穿越极端工况提供制度与技术双重保障。

4 结语

主变压器作为电力系统的关键枢纽,其在过载运行状态下的安全性和可靠性直接关系到电网整体稳定。通过深入剖析热-电-化学耦合机制、构建数字孪生驱动的状态感知体系、完善柔性负荷调控与寿命量化评估方法,并健全极端工况下的应急响应规程,可系统性提升主变应对高负荷挑战的能力。未来,随着人工智能、物联网与新型储能技术的深度融合,主变运行管理将向更智能、更精准、更具韧性的方向演进。持续推动设备数字化升级、运维策略动态优化与多源资源协同调度,是保障新型电力系统安全高效运行的重要路径。