

变电站运行能效优化控制策略研究

李君游 史林鹏 陆万杰

国网新疆电力有限公司哈密供电公司 新疆 哈密 839000

摘要：变电站作为电力系统中电能传输与变换的关键节点，其运行能效水平直接影响整个电网的经济性与可靠性。面对日益增长的能源需求与碳减排压力，提升变电站运行能效已成为电力行业转型升级的重要课题。本文在分析变电站主要能耗构成与影响因素的基础上，系统探讨了面向能效提升的优化控制策略，包括变压器经济运行调度、无功电压综合控制、冷却系统智能调节以及站用电精细管理等关键技术路径。研究表明，构建多维信息融合的能效优化管控体系，实现设备级、站域级与系统级能效协调控制，是提升变电站运行能效的有效方向。本文提出的控制策略框架可为智能变电站能效管理提供理论参考。

关键词：变电站；运行能效；优化控制；变压器调度；无功电压控制

引言

在“双碳”目标驱动下，电力系统正经历深刻变革，节能降耗与提质增效成为电网运行的核心诉求。变电站作为电力网络中的重要枢纽环节，承担着电压变换、功率分配与系统保护等多重职能，其运行过程中的能量损耗不可忽视。据统计，变电站自身损耗约占系统总损耗的相当比例，其中变压器损耗、无功补偿装置损耗及站用辅助设备能耗构成主要部分。在确保供电安全性与可靠性的前提下，最大限度地降低变电站运行能耗、提升能源利用效率，对于促进电力系统低碳转型具有重要意义。近年来，随着智能电网技术的快速发展，数字化测量、通信网络、自动控制与人工智能等先进技术在变电站领域得到广泛应用，为能效优化控制提供了坚实的技术支撑。与此同时，大量新能源接入和负荷结构变化使变电站运行工况日趋复杂，传统以经验规则为基础的运行方式已难以适应精细化能效管理要求。因此，亟需从系统层面研究变电站运行能效优化控制策略，统筹协调各能耗环节，形成适应新形势下的高效运行模式。

1 变电站运行能效的影响因素分析

1.1 变电站能耗构成与特性

变电站运行能耗可分为两大类：一是主设备的电能损耗，包括变压器铁耗与铜耗、无功补偿装置损耗、限流电抗器损耗等；二是辅助系统能耗，涵盖冷却系统、照明设备、通风空调、直流电源及二次设备等站用电负荷。其中变压器损耗通常占总能耗的70%以上，是能效优化的首要对象。变压器铁耗近似与电压平方成正比，在运行电压基本稳定的条件下近乎恒定；而铜耗随负载电流平方变化，具有较强的波动性，在重载时段尤

为显著。无功补偿装置（如并联电容器、电抗器、静止无功发生器）的损耗与无功输出密切相关，其投切策略直接影响系统无功分布及网络损耗。站用电系统虽单设备功率不大，但设备种类多、运行时间长，累积能耗不容忽视，且其用能特性与主设备运行状态及环境条件存在关联。

1.2 影响能效的关键因素

变电站运行能效受多重因素交互影响，可归纳为以下几方面。运行工况因素。负荷水平及其时序特性直接决定变压器铜耗大小与变化规律。负荷率偏离经济运行区间时，变压器单位供电量的损耗显著增加。功率因数偏低意味着无功潮流增大，不仅增加线路损耗，也加重变压器与开关设备的无功负担。设备性能与状态因素。变压器、无功补偿装置等主设备的固有性能参数（如空载损耗、负载损耗、短路阻抗等）是能效水平的硬件基础。此外，设备老化、绝缘劣化、触头氧化等因素会导致附加损耗逐步上升，使能效随时间呈衰减趋势。控制策略因素。变电站运行方式安排（如主变压器投切组合、有载调压分接头档位、无功补偿容量配置等）能否随工况变化动态优化，直接决定了实际运行能效的优劣^[1]。静态或粗放的控制逻辑难以适应负荷与电网条件的时变特征，易造成长期偏离最优运行点。环境条件因素。环境温度影响变压器散热效率与绕组直流电阻，进而改变负载损耗值；冷却介质的温度与流速也直接影响冷却系统启停频率与运行功率。

2 变电站运行能效优化控制策略

2.1 变压器经济运行调度策略

对于配置两台及以上变压器的变电站，需根据实时负荷水平与变压器的损耗特性曲线，动态决策投运台数

与负载分配比例。具体而言，每台变压器在给定负载率下存在对应的综合损耗值，通过比较单台运行与多台并列运行的总损耗曲线，可确定不同负荷区段下的最优运行方式。当总负荷低于某一门槛值时，单台变压器带全部负荷的综合损耗反而小于两台分摊负荷时的损耗之和，此时应切换为单台运行并关闭另一台变压器；当负荷超过该门槛值时，应投入多台变压器运行。该门槛值由变压器的空载损耗、短路损耗及额定容量等参数共同决定。在实际运行中，变压器的投切决策还需考虑以下约束条件：单台变压器不过载、不超出其安全运行容量；并列运行变压器之间负载分配均衡，避免出现一台重载另一台轻载的情形；投切操作次数受限，需设置动作延时与死区，防止负载频繁波动引起不必要的开关操作。此外，对于配置三台及以上变压器的变电站，可进一步引入轮换运行机制，均衡各变压器累计运行时间，延缓绝缘老化，实现能效与资产寿命的联合优化。

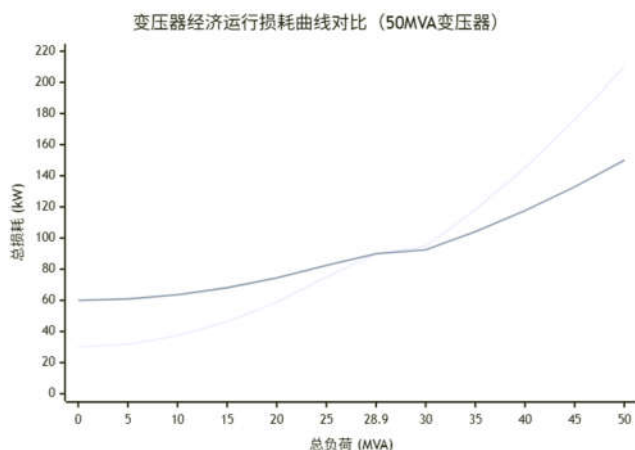


图1：变压器经济运行损耗曲线对比

（深线双台、浅线单台）

当总负荷低于 28.85 MVA 时，单台运行的总损耗明显低于两台并列运行，此时应切换为单台运行，退出另一台变压器以降低空载损耗。当总负荷超过该临界值后，两台并列运行的总损耗更低，因为负载损耗被两台分摊，增长更平缓。曲线交点即为经济运行切换门槛，完全由空载损耗与短路损耗的比值决定。

2.2 无功电压综合优化控制策略

无功电压优化控制的基本思想是：在满足电压合格率与设备安全约束的前提下，通过协调控制有载调压变压器分接头、无功补偿设备（电容器、电抗器）及动态无功源（如静止无功发生器），使系统无功潮流趋于合理，降低因无功远距离传输而产生的附加损耗。从变电站层面看，无功电压控制需处理两类目标之间的平衡：

一是维持母线电压在合格范围内，保障供电质量；二是实现无功功率分层分区平衡，尽可能减少通过主变压器交换的无功功率，降低因此引起的额外铜耗。两者之间可能存在冲突，例如单纯抬高高压侧母线电压可能导致无功倒送或变压器无功损耗增加^[2]。为此，应采用多目标协调优化方法，以电压合格为首要约束，以网损最小化为优化目标，构建无功电压综合优化模型。在控制策略实现上，可采用九区图控制法及其改进方案，根据电压与无功功率的偏差方向，制定电容器投切与变压器调压的协调动作逻辑，避免两者频繁交替动作。更优的方案是引入自适应调整机制，根据负荷变化趋势预测未来一段时间内的电压无功需求，提前进行控制动作安排，使变电站始终运行在电压合格且无功基本平衡的状态。

2.3 冷却系统智能控制策略

大型电力变压器通常采用强迫油循环风冷或强迫油循环水冷方式散热，冷却系统运行功率可达数十千瓦级，其能耗在站用电中占比较高。传统冷却控制多采用基于绕组温度或顶层油温的启停方式，控制逻辑简单但存在冷却容量与散热需求不匹配的问题，尤其在轻载或低温季节，过度冷却造成不必要的电能浪费。智能冷却控制策略的核心在于建立变压器热特性模型，实时计算绕组热点温度与顶层油温，并以此为依据动态调节冷却装置运行台数与转速。该策略既能保证变压器温升不超过绝缘耐受极限，又能最大限度减少冷却系统冗余运行时间，实现冷却能耗的按需供给。基于动态热模型的智能冷却控制相较于传统温控方式，冷却系统年耗电量可降低，尤其在过渡季节和夜间轻载时段效果更为显著。同时，合理的冷却控制还有助于减缓变压器绝缘热老化速率，具有能效与可靠性的双重增益。

2.4 站用电精细化管理策略

站用电系统虽然单设备功率不大，但涵盖照明、空调、除湿机、通信电源、开关柜加热器、直流充电机等大量辅助设备，累积年用电量相当可观。精细化管理从“感知—分析—控制”三个环节入手，实现站用电能耗的系统性管控。在感知层面，对主要站用电分支回路加装智能电表，实现各类型用电负荷的分项计量与在线监测，解决传统站用电“总量清楚、分项模糊”的管理盲区。在分析层面，基于历史运行数据识别各类设备的用能规律与基准值，建立异常能耗预警模型，及时发现能效异常事件（如加热器长期通电、空调温度设置过低等）^[3]。在控制层面，按照“保障必需、减少冗余”原则，对照明回路实施时控或光感控制，对空调与除湿设备实施温湿度联合设定值优化，对开关柜加热器实施基

于凝露风险判断的智能投退。此外,对于配置储能系统的智能变电站,可进一步探索站用储能与主系统之间的能量互动,利用储能系统进行峰谷套利或作为应急电源,从更广阔的视角优化变电站的综合能源利用效率。

3 多元策略协同与能效管控体系

3.1 策略间的耦合关系与协同必要性

前述各项控制策略从不同维度切入变电站能效优化,各有侧重,但彼此之间存在耦合关系。例如,变压器经济运行调度改变主变压器运行台数,会影响站内无功电压特性,进而改变无功补偿的需求与投入方案;冷却系统控制策略调整后,变压器温升特性变化,可能略微改变绕组直流电阻值,从而影响负载损耗的精确计算。这些耦合关系决定了能效优化不能采用各策略孤立运行的模式,而需要构建协同管控体系。

3.2 协同管控体系总体架构

协同管控体系的核心架构可概括为“一个平台、两个维度、三层优化”。一个平台指基于变电站一体化监控系统构建的能效管理信息平台,汇集来自保护测控装置、智能电表、环境传感器、在线监测装置等各类数据源的信息,实现数据融合与态势感知。两个维度指“安全约束”与“能效优化”两个维度,任何控制决策必须首先满足安全运行边界条件,在此基础上追求能效最优。三层优化包括:设备级优化(单设备参数整定与运行状态调节)、站域级优化(站内多设备协调配合与运行方式决策)以及系统级优化(考虑电网调度需求与新能源消纳的站网互动)。

3.3 多时间尺度协调控制机制

由于各优化策略的响应速度和调节周期差异显著,协同管控还需在时间维度上进行合理分解。本文提出“长期规划—短期优化—实时调整”的多时间尺度协调机制。长期规划以季度或年度为单位,根据变电站历史负荷特性、季节性气温变化及检修计划,制定典型运行方式模板,包括各季节推荐的主变压器投运数量、无功补偿配置基准、冷却系统运行策略概略等^[4]。短期优化以日或小时为单位,基于次日负荷预测曲线和天气预报信息,滚动优化未来24小时内的变压器组合方案、电压控制曲线及冷却系统启停计划,形成预定的控制指令序列。实时调整以分钟或秒为单位,依据实际测量值与预测值的偏差,通过在线反馈校正对预定指令进行微调,同时应对突发扰动或异常工况。三个时间尺度通过周期滚动与逐级修正相互衔接,既保证了控制的全局前瞻性,又兼顾了响应实时性。

3.4 关键支撑技术与实施路径

协同管控体系的有效运行依赖于若干关键技术的支撑。首先是高精度负荷预测与状态估计技术,需结合人工智能算法(如长短期记忆网络、时序卷积网络)对变电站负荷、新能源出力及环境参数进行短时与超短时预测,为优化决策提供可靠的输入边界。其次是多目标优化求解技术,需开发适用于混合整数非线性规划的高效求解算法,或引入智能优化算法(如粒子群、遗传算法)处理离散与连续变量共存的优化问题。第三是数字孪生技术,通过构建变电站高保真仿真模型,在虚拟空间中预演控制策略的效果,评估能效提升潜力与安全风险,从而辅助实际控制决策。在实施路径上,建议采用“分步建设、逐步集成”的策略,先完成各单项策略的智能化改造,再逐步打通数据接口与控制系统,最终实现全站能效管控平台的统一集成。

4 结语

变电站运行能效优化是一项涉及多设备、多约束、多时间尺度的复杂系统工程。本文从能耗构成分析入手,系统阐述了变压器经济运行调度、无功电压综合控制、冷却系统智能调节及站用电精细化管理四类关键优化策略,并在此基础上提出了多元策略协同运行的能效管控体系架构,明确了策略耦合关系、总体框架、多时间尺度协调机制及关键支撑技术。研究表明,脱离单一设备视角、转向系统级协同优化,是提升变电站运行能效的有效路径。当前,人工智能、数字孪生等新兴技术方兴未艾,为变电站能效优化开辟了新的可能。如何将数据驱动方法与物理机理模型深度融合,实现运行能效的精准感知与智能决策,是未来研究的重要方向。同时,在新型电力系统建设背景下,变电站功能定位正从传统的电力变换节点向综合能源枢纽演进,其能效内涵也将从单纯的电能损耗最小化拓展为多能源系统的综合效率最优,相关控制理论与技术体系有待进一步突破与完善。

参考文献

- [1] 张建华,王振宇,李志强.基于负荷预测的变电站变压器经济运行策略研究[J].电力系统自动化,2023,47(5):112-119.
- [2] 陈思远,刘昊,赵明辉.考虑动态热特性的油浸式变压器冷却系统优化控制[J].高电压技术,2024,50(2):678-686.
- [3] 王海燕,周晓东,吴剑锋.智能变电站无功电压协调控制方法综述[J].电网技术,2022,46(8):3045-3055.
- [4] 刘志刚,孙丽华,陈玉峰.变电站站用电能耗监测与节能管理技术[J].电力自动化设备,2023,43(11):89-95.