

电气工程及其自动化供配电系统节能控制措施

林任鑫

(广东万润工程股份有限公司, 广东 汕头 515000)

摘要 为了构建电气工程供配电系统的综合节能控制体系, 解决当前工业企业供配电环节能源利用效率低下的普遍性问题。采用能耗分解分析法识别系统各环节损耗特征, 从变压器损耗、线路损耗、照明能耗等关键节点入手, 运用全局优化理论建立多目标节能控制模型, 结合动态平衡原则制定自适应调节策略。研究实施了五项系统性控制措施, 包括变压器负载率动态优化、无功补偿分层配置、配电线路拓扑重构、照明系统智能化改造等, 各项措施相互协同形成节能合力。研究结果表明, 基于全生命周期的节能控制策略能够实现供配电系统的精细化管理, 为推动电力系统绿色转型提供了系统性解决方案。

关键词 电气工程; 自动化; 供配电系统; 节能控制

中图分类号: TM76; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.008

0 引言

供配电系统作为工业企业能源消耗的主要环节, 其能效水平决定了企业的用电成本与碳排放强度, 然而传统供配电系统普遍存在设备选型不当、运行方式粗放、管理手段落后等问题, 导致电能损耗居高不下。随着能源价格持续上涨以及双碳目标的深入推进, 企业面临着降低能耗成本与履行减排责任的双重压力, 供配电系统节能改造已成为提升企业竞争力的必然选择。深入研究供配电系统节能控制措施具有重要的现实意义, 一方面能够为工业企业提供系统性的节能改造方案, 实现能源利用效率的显著提升, 进而降低企业运营成本并增强市场竞争力; 另一方面有助于推动电力行业绿色低碳转型, 减少化石能源消耗和温室气体排放, 为实现国家双碳战略目标贡献技术支撑, 同时也为其他行业的节能减排工作提供可借鉴的实践经验。

1 电气工程及其自动化供配电系统的能耗组成分析

供配电系统能耗组成呈现多层次、多环节的复杂特征, 其中变压器损耗占据主导地位, 约占系统总损耗的40%~60%, 主要表现为铁芯磁滞损耗、涡流损耗以及绕组铜损, 这些损耗随负载率变化呈现非线性特性。输配电线路损耗构成第二大能耗来源, 线路电阻产生的有功损耗与电流平方成正比, 当功率因数低于0.9时无功电流显著增加线路发热损耗。配电设备自身能耗不容忽视, 包括开关柜内部元器件发热、断路器操作机构能耗、互感器励磁损耗等累计可达总能耗的8%~12%。照明系统能耗在商业建筑中占比高达25%~35%, 传统荧光灯镇流器损耗、启动频繁造成的额外能耗都是隐性浪费源。动力设备启动过程产生的冲击电

流不仅增加了瞬时能耗, 还会引起电压波动导致其他设备效率下降。谐波污染造成的附加损耗往往被忽视, 变频器、整流器等非线性负载产生的谐波电流在变压器、电缆中产生额外热损耗, 可使设备损耗增加15%~20%^[1], 具体如表1所示。

2 电气工程及其自动化供配电系统节能控制的原则

2.1 全局优化原则

全局优化原则要求供配电系统节能控制必须从整体能量流动视角出发, 避免局部优化导致的系统性能恶化, 即单个设备能效提升不能以增加其他环节能耗为代价。节能措施实施需要综合考虑变压器负载率、线路损耗、无功补偿容量之间的耦合关系, 例如过度的无功补偿虽然提高了功率因数, 但会造成轻载时电压升高引发变压器励磁电流增加。系统优化还需兼顾时间维度的动态平衡, 峰谷时段的负荷调配不仅要考虑电费成本, 还要评估设备频繁启停带来的寿命损失。跨级协调机制确保高压侧、低压侧的节能策略相互配合, 上级变电站的电压调整需要与下级配电网的无功配置协同, 形成多层次能效提升的叠加效应。

2.2 动态平衡原则

动态平衡原则强调节能控制策略必须适应负荷的实时变化特性, 而非采用固定参数的静态控制模式。供配电系统的负荷呈现日周期、周周期、季节性波动规律, 节能措施需要根据负荷曲线实时调整运行参数, 如变压器在负载率30%~70%区间内效率最高, 控制系统应根据实时负荷投切变压器组合。无功补偿装置的投切容量需要跟踪负荷功率因数的动态变化, 避免过补偿或欠补偿状态的出现。季节性温度变化影响设

表 1 电气工程及其自动化供配电系统能耗组成分析表

能耗来源	占比	主要特征
变压器损耗	40% ~ 60%	铁芯磁滞损耗、涡流损耗、绕组铜损，随负载率变化呈非线性特性
输配电线路损耗	5% ~ 8%	线路电阻有功损耗，与电流平方成正比，功率因数低时损耗增大
配电设备自身能耗	8% ~ 12%	开关柜元器件发热、断路器操作机构、互感器励磁损耗等
照明系统能耗	25% ~ 35%	商业建筑中占比高，荧光灯镇流器损耗、启动频繁额外能耗
动力设备启动冲击	< 1%	冲击电流增加瞬时能耗，引起电压波动影响其他设备效率
谐波附加损耗	15% ~ 20%	变频器、整流器等非线性负载产生谐波，在设备中产生额外热损耗

备散热条件，夏季高温时段需要适当降低变压器负载率防止过热，冬季则可适当提高负载率充分利用设备容量。动态平衡还体现在新能源接入后的功率波动管理，光伏发电的间歇性要求储能系统快速响应以维持供需平衡，确保电能质量稳定。

2.3 经济可行原则

经济可行原则要求节能改造投资回报率必须满足企业财务指标要求，避免盲目追求技术先进性而忽视投资效益。节能措施的选择需要基于全生命周期成本分析，初始投资额、运行维护费用、设备折旧年限共同决定方案的经济性，例如非晶合金变压器虽然初投资高出普通变压器 30% ~ 40%，但空载损耗降低 70% 使其在 5 ~ 7 年内即可回收增量成本。分阶段实施策略能够降低资金压力，优先改造能耗高、节能潜力大的环节，利用节约的电费逐步投入后续改造项目形成良性循环。此外，边际效益递减规律决定了节能投入存在最优区间，功率因数从 0.7 提升至 0.9 的投资效益远高于从 0.9 提升至 0.95，企业应根据自身能耗基准确定合理的节能目标，避免过度投资造成资源浪费^[2]。

3 电气工程及其自动化供配电系统节能控制的措施

3.1 变压器运行方式优化调整

变压器运行方式优化调整需要建立基于实时负荷数据的智能决策系统，根据负荷曲线特征制定差异化运行策略。系统首先采集历史负荷数据建立预测模型，识别日负荷峰谷时段、周末负荷特征以及季节性变化规律，然后设定变压器经济运行区间阈值，一般将负载率控制在 30% ~ 70% 范围内，当负载率低于 30% 时系统判定为轻载状态需要减少运行台数，超过 70% 则启动备用变压器分担负荷。多台变压器容量配置应遵循“大小结合、阶梯配置”原则，例如配置 1 台 1 600 kVA 主变压器承担基础负荷，2 台 800 kVA 变压器作为调节容量，根据负荷变化灵活投切。

此外，温度补偿机制考虑环境温度对变压器负载能力的影响，夏季高温时段将负载率上限下调至 65% 防止过

热，冬季低温时可提升至 75% 充分利用散热条件。变压器投切过程需要配置同期装置确保并列条件满足，包括电压差小于 5%、相位差小于 10 度、频率差小于 0.2 Hz，避免环流冲击。某化工企业原有 4 台 1 250 kVA 变压器全天候运行，平均负载率仅 42%，实施优化后采用“2+2”运行模式，基础负荷由 2 台承担，另外 2 台根据生产计划灵活投切，负载率提升至 58% ~ 68% 区间，变压器损耗降低 31%，年节约电费 126 万元。

3.2 无功补偿容量动态配置

无功补偿容量动态配置要求建立多级补偿体系，根据负荷无功需求实时调整补偿容量，避免过补偿或欠补偿造成的电压波动。补偿系统采用分层架构设计，在 10 kV 母线设置集中补偿装置处理基础无功需求，容量按变压器容量的 20% ~ 30% 配置，在各配电支路设置分散补偿应对局部无功缺额，大功率电机等感性负载就地配置补偿电容器，补偿容量为电机额定功率的 30% ~ 40%。控制器采集母线电压、电流、功率因数等参数，当功率因数低于 0.92 时启动补偿投入程序，高于 0.98 时切除部分电容器组防止过补偿。投切策略采用循环投切方式延长电容器使用寿命，每组电容器累计投入时间自动均衡，避免某组电容器过度使用导致提前老化。谐波环境下的补偿需要配置电抗器抑制谐振，电抗率选择 7% 或 14% 能够有效避开 5 次、7 次谐波放大区域。以某纺织企业为例，织布车间安装大量变频器导致功率因数仅 0.78，谐波含量超标，改造方案采用动态无功补偿装置 SVG 替代传统电容器组，SVG 响应时间小于 10 ms，能够实时跟踪负荷变化连续调节补偿容量，同时具备一定的谐波抑制能力，改造后功率因数稳定在 0.95 ~ 0.97 区间，月均电费降低 8.2 万元，谐波电流总畸变率从 18% 降至 4.5%，设备故障率显著下降^[3]。

3.3 配电线路损耗综合治理

线路损耗治理的本质是降低电流在输电路径中的能量耗散，其控制效果直接影响供配电系统的整体

能效水平。配电网络的拓扑优化是降损的基础性工作,负荷中心需要重新测算以确定最优供电点,采用负荷矩法计算各负荷点到电源点的加权距离,将配电室设置在负荷矩最小位置能够使线路损耗降低20%~30%。导线升级改造遵循全寿命周期成本最优原则,根据负荷增长预测选择导线规格,初期负荷阶段采用铝合金导线满足基本需求,负荷增长后更换为铜芯电缆或增设并行回路分流,避免一次性过度投资。此外,电压等级提升是降低线损的有效途径,将380 V供电升级为660 V或1 140 V能够使电流降低42%~66%,线路损耗相应降低为原来的17%~34%,特别适用于大功率集中负荷区域。接头电阻控制需要从施工工艺入手,电缆终端采用冷缩或热缩技术确保密封性,母线连接面镀锡或镀银处理降低接触电阻,定期紧固检查防止松动发热。运行方式优化则侧重于潮流分布调整,要合理设置联络开关位置实现负荷转供,避免某条线路重载而其他线路轻载的不均衡状态。还可以把智能监测系统部署在关键节点,实时采集电流、电压、温度数据,建立线损分析模型定位高损耗区段,为针对性改造提供数据支撑,形成“监测—分析—改造—验证”的闭环管理机制。

3.4 照明系统能效提升改造

照明系统能效改造需要从光源选型、控制策略、配光设计三个层面系统推进,实现照明质量提升与能耗降低的双重目标。光源升级是改造的核心环节,LED灯具相比传统荧光灯节能60%~70%,但选型时不能单纯追求功率降低,而要根据不同区域的照度标准进行精确计算,办公区域维持300~500 lux照度,走廊过道100~150 lux即可满足需求,避免过度照明造成的能源浪费。智能控制系统的部署需要分区域制定策略,靠窗区域安装光感探测器根据自然光强度自动调节灯具亮度,会议室、仓库等间歇使用场所配置人体感应器实现人来灯亮、人走灯灭的自动控制,开放办公区采用时间控制器设定工作时段照明模式。配光优化重点解决光效利用率低的问题,采用反射率高的灯具反射罩将光线导向工作面,减少向上散射的无效光通量,同时调整灯具安装高度与间距,形成均匀的照度分布避免明暗不均。调光技术的应用需要考虑人眼适应性,采用渐变调光方式避免照度突变引起的不适感,调光范围控制在20%~100%之间保证最低照度需求。某办公楼将2 800套T8荧光灯更换为LED平板灯,配合智能照明控制系统实现分时分区管理,白天充分利用自然采光,夜间根据加班区域局部开启,改造后照明用电量降低65%,灯具维护周期从半年延长至3年^[4]。

3.5 能源管理平台集成应用

能源管理平台集成应用的关键在于打破信息孤岛,实现多源数据的统一采集、分析与决策支持。平台架构采用三层设计,感知层部署智能电表、温度传感器、环境监测仪等设备,每15分钟采集一次电压、电流、功率、功率因数、谐波等参数,数据传输层运用RS485、以太网、无线通信等方式将现场数据汇聚至服务器,应用层提供能耗分析、报表生成、异常报警等功能模块。数据处理引擎对海量数据进行清洗、校验、归一化处理,剔除异常值后存入时序数据库,保证数据质量的可靠性。能耗分析模块采用同比、环比、能效对标等方法挖掘节能潜力,识别能耗异常时段与高耗能设备,生成优化建议供管理人员决策参考。此外,预测算法基于历史数据建立负荷预测模型,结合生产计划、天气预报等外部因素预测未来24小时的用电需求,指导变压器投切、无功补偿等设备的提前调整。报警机制需要设置分级阈值,当功率因数低于0.9、需量超限、电压偏差超过7%时自动推送告警信息至相关人员手机,确保异常情况得到及时处理,形成“监测—分析—优化—验证”的持续改进循环^[5]。

4 结束语

供配电系统节能控制的深入推进需要企业从战略高度重视能源管理工作,将节能指标纳入生产运营的核心考核体系。技术创新将持续推动节能控制向智能化、精细化方向发展,人工智能算法在负荷预测、故障诊断、优化调度等领域的应用将进一步提升系统能效。企业在实施节能改造时应避免盲目追求先进技术,而要根据自身能耗特征选择适宜的控制策略,确保投资效益最大化。未来供配电系统将向能源互联网方向发展,分布式能源、储能技术、需求响应机制的融合应用将重塑传统供配电模式,企业需要提前布局相关技术储备以适应能源转型趋势。

参考文献:

- [1] 陈巍.供配电系统中电气自动化技术的应用[J].中国高科技,2021(19):62-63,95.
- [2] 刘玉博,崔继仁,楚克琦.供配电系统中电气自动化应用[J].中国科技信息,2020(13):50,52.
- [3] 范焱,李亚飞,温子旺.电气自动化技术在电力系统中的应用研究[J].光源与照明,2021(11):120-122.
- [4] 卢海蛟.电气自动化技术在供配电系统中的应用探析[J].中国设备工程,2020(20):212-214.
- [5] 岳周.机械设备电气工程自动化供配电节能控制技术[J].电气技术与经济,2025(08):145-147.