

面向低碳目标的电气自动化系统 节能优化路径研究

何飘芸

(浙江大尧建设有限公司, 浙江 金华 322000)

摘要 在低碳发展目标持续强化的背景下, 电气自动化系统的能耗水平已成为工业领域节能减排的重要约束因素。本文围绕电气自动化系统运行过程中存在的能效偏低与负载匹配不足等问题, 以低碳目标为导向, 对系统能耗特性进行梳理, 并从设备选型、运行控制与系统协同等层面探讨节能优化思路。在此基础上, 结合典型工业应用场景, 对节能优化措施实施前后的能效变化进行对比分析, 验证相关路径在降低能耗与改善运行效率方面的可行性, 以为工业领域低碳运行提供技术参考。结果表明, 面向低碳目标构建系统化的节能优化路径, 有助于提高电气自动化系统的整体能效水平。

关键词 电气自动化系统; 低碳目标; 能效优化; 节能运行

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.024

0 引言

电气自动化工程中的电力消费涉及电能发、输、供、配等各个方面, 且目前依然是过多地依靠火力发电机组进行生产, 无形中增加了我国的碳排放量, 造成的环境问题也越来越严重。近几年, 世界上多个国家已经率先提出了碳达峰以及碳中和的“双碳”目标, 我国也积极响应号召将其作为长期坚持的战略。如何做好电气自动化工程的节能工作是大众越来越关心的问题。因而探索电气自动化系统的节能运行思路, 对于缓解能源消耗压力、推动工程领域绿色转型具有现实意义。

1 面向低碳目标的电气自动化系统能耗特性分析

1.1 电气自动化系统能耗构成与运行特征

电气自动化系统的能耗结构一般由驱动执行单元、供配电环节以及控制与辅助装置共同构成, 其中驱动系统占据电力消耗的主体位置, 尤以电机及其传动链条最为显著。在实际运行中, 电机本体的铜损、铁损与机械损耗相互叠加, 当工艺负载呈现波动或长期偏离额定工况时, 电机往往运行于低效率区间, 无效能耗随之累积, 供配电环节同样不容忽视, 变压器在低负载或非经济运行区间内, 铁损占比明显上升, 而母线、电缆在大电流或功率因数偏低条件下, 其压降与线路热损会在连续运行中被不断放大, 同时无功功率需求

增加将抬高系统电流水平, 间接加剧供电设备的附加损耗。从运行特征看, 电气自动化系统普遍存在工况离散与负载漂移现象, 设备在轻载、频繁启停或待机状态下仍保持较高基础功耗, 此外变频器、整流及电力电子装置的大量应用虽改善了调速性能, 却引入一定比例的谐波电流, 降低电能质量, 进一步诱发附加损耗与容量冗余, 使系统整体能效呈现结构性下降趋势^[1]。

1.2 低碳目标约束下的能效评价重点

面向低碳目标开展能效评价时, 若仅依据用电量进行判断, 往往难以揭示系统运行中的结构性问题, 更适宜将能源消耗与产出水平、运行工况与电能质量进行联动刻画。评价过程可围绕单位产量电耗、单位运行小时能耗及关键设备负载率等指标展开, 同时将功率因数、谐波畸变率、电压偏差等电能质量参数纳入约束, 以识别无功功率需求与谐波电流引起的隐性增耗。针对电机系统, 应结合效率特性曲线与实际负载分布情况, 判断其是否长期处于低效率区间, 并重点评估变频运行条件下的系统整体效率, 而非孤立考察电机本体性能; 对于工艺运行环节, 还可引入峰谷电量占比、最大需量及负荷波动系数等指标, 分析负荷调度是否存在“高峰硬扛、低谷空转”的非经济运行状态, 从而将低碳约束转化为可量化、可追溯的能效评价依据。

作者简介: 何飘芸 (1981-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电气系统及其自动化。

1.3 自动化系统运行中的主要能耗问题

现场能耗水平偏高通常并非由单一因素触发，而是设备选型、控制策略与运行组织相互叠加后的综合结果。在设备层面，“大马拉小车”现象较为普遍，电机及减速机构往往依据极端工况放大配置，致使其在多数运行时段处于轻载区间，效率显著下滑，供配电环节为追求运行可靠性而过度预留容量，使变压器长期低负载运行，铁损比例上升并伴随无功功率需求增加；在控制层面，定速运行配合节流、旁通等传统调节方式在风机、水泵等场景中仍被广泛采用，系统依靠压差消耗实现流量调节，电能被持续转化为无效损失，粗放的启停逻辑还易引发冲击电流与频繁再加速损耗；在管理层面，能耗数据采集多停留在总量统计，缺乏对关键回路与典型工况的分项计量和负荷画像分析，异常能耗难以及时识别，设备待机、空转及跨班次低效运行便在无形中被固化为常态^[2]。

2 面向低碳目标的电气自动化系统节能优化路径

2.1 高效电气设备支撑下的节能优化方式

面向低碳目标的设备层优化应从“损耗源头”入手，以电机、变压器与功率补偿装置为优先对象完成能效重构。电机侧更倾向于以高效等级电机替代普通机型，并结合负载谱重新校核容量，使电机在常用工况落入高效率区间，对频繁启停或存在再生能量的工况，可匹配具备制动能量回馈能力的驱动器，降低制动电阻消耗；变压器侧应依据实际最大需量与负荷波动重算配置容量，防止长期低负载导致铁损占比过高，并优先采用低损耗变压器与合理分段运行方式，使其运行点更接近经济区间^[3]。供配电回路可依托降低线路压降与接触电阻来压缩热损，采用低阻抗母线、缩短不必要的迂回走线，并对高电流支路实施温升监测以提前识别接点劣化，同时功率因数治理宜采用分层补偿与动态投切方案，低压侧按负荷分组配置电容器组并配合投切控制器，必要时引入有源滤波或静止无功发生装置削减谐波与无功电流，减少电流放大效应对线路与变压器的附加损耗，从设备配置层面为系统节能打下可持续的能效底座。

2.2 变频调速技术引导的运行能效提升

变频调速的节能价值并不止于“降速”，关键在于将转速调节与负载需求实时匹配，减少节流、旁通等以压差消耗实现调节的无效功，针对风机、水泵等平方转矩负载，可在满足工艺下限的前提下，将流量或压力设定由固定值改为随工况自适应的目标量，并

依靠闭环控制使转速随需求变化而连续调整，从而在低需求阶段显著降低轴功率输出^[4]。为避免低速区间效率劣化，应同步优化电机参数与变频器控制方式，常用做法是采用矢量控制或直接转矩控制提升低频力矩能力，并对电机磁链进行适配以减少轻载励磁损耗；在多泵并联场景，还需综合考虑单台泵效率曲线与系统曲线，依托“变频主泵+工频辅泵”的组合策略实现分段投运，防止所有泵同时低效运行。变频器选型与工程实施环节需关注谐波与电磁兼容问题，凭借配置输入电抗器、滤波器或采用多脉波整流降低电流畸变，并合理设置载波频率与加减速时间以兼顾损耗与动态性能，对长电缆与高惯量负载，应配置输出滤波与制动单元，减少过电压与制动能量浪费，使变频调速成为低碳运行下“按需供能”的核心抓手。

2.3 智能控制策略驱动的系统能效改善

在自动化系统中，能效往往受控制策略的“细节品质”影响显著，智能控制的关键目标是把能耗从被动结果变为可控变量。对具有明显时变特性的工况，可在传统PID基础上引入自整定与增益调度机制，根据负载、温度、压力等关键变量在线调整控制参数，减少过冲与振荡带来的重复调节能耗；对存在多变量耦合的过程控制对象，可采用模型预测控制对未来短时段负荷进行滚动优化，依托约束条件限定能耗与工艺指标的权衡区间，使控制输出更贴近经济运行点^[5]。设备群控场景中，智能控制更强调启停决策与运行排序，比如空压站可依据气量预测与管网压力波动，动态选择基载机与调节机，结合最小运行时间与启停次数约束，降低频繁启停造成的能量损失与设备磨损；能耗异常识别可依托电参量与工艺量的关联模型开展，利用功率、转速、阀位、产量等变量构建特征向量，凭借阈值与趋势联合判别发现空转、泄漏、堵塞或机械阻力升高等隐患，并将告警与控制策略联动，促使系统在异常初期即回到低耗状态。该类策略落地通常需要在PLC或DCS侧实现数据采集与实时计算，并与上位监控系统协同，形成可解释、可追溯的节能控制闭环。

2.4 系统协同运行条件下的综合节能优化

系统级协同的重点在于打通“设备能效最优”与“系统能效最优”之间的差距，凭借工序、设备群与供配电的联动调度压缩结构性浪费，对于多工序生产线，应建立以节拍与产量为约束的负荷编排机制，将高耗能单元的运行窗口与电价、峰谷时段、供能条件相匹配，减少尖峰时段的最大需量并降低容量冗余，同时对同

类设备实施负荷均衡,避免个别设备长期高负载导致效率下降与故障率上升,供配电侧可结合能耗分项计量建立回路级能效看板,识别关键回路的功率因数与谐波贡献度,动态调整补偿与滤波投切顺序,使无功与谐波治理与生产节拍同步。对具有热工或储能特性的系统,可利用蓄冷、蓄热或气罐缓冲能力平滑负荷波动,将短周期的峰值需求转化为可控的储放过程,从而降低驱动设备的频繁调节损耗,协同优化还需要统一的控制边界与权限划分,通常由上位能效管理模块给出目标值与调度指令,现场控制层负责执行与反馈,形成跨层闭环。依靠此种运行组织方式,节能不再依赖单点改造,而是以系统整体的能效约束驱动设备、控制与供配电协同进入更经济的运行区间。

3 电气自动化系统节能优化路径的应用分析

3.1 典型工业电气自动化系统运行场景

为验证节能优化思路在工程实践中的适用性,选取某工业园区循环水泵与空压系统构成的电气自动化单元作为研究对象。该系统长期承担生产冷却、设备驱动及辅助工艺供能任务,运行时间连续且负载受工况影响显著,系统由多台异步电机驱动的水泵与螺杆式空压机组成,原有运行方式以工频定速为主,依托阀门调节与卸载控制满足用能需求^[6]。现场测试结果显示,系统日内负载波动幅度约为 40%,但设备长期保持额定转速运行,水泵平均负载率不足 60%,空压机在低需求时段频繁进入卸载状态,单位产出能耗明显偏高,同时供配电侧功率因数维持在 0.82~0.86 之间,谐波电流使部分馈线电流有效值放大,线路与变压器附加损耗随之增加,该类运行特征为多层级节能优化措施的实施提供了现实条件。

3.2 节能优化路径实施效果对比分析

围绕上述运行特征,对系统在设备配置、运行控制与调度方式等方面进行协同优化,水泵系统依靠引入变频闭环控制,使转速随压力需求动态调整,低负载时段转速下降约 20%~35%,阀门节流调节基本退出运行;空压系统采用分工明确的运行策略,使基载设备稳定运行,调节设备随气量需求变化平滑跟随,从而显著提高单机加载率。改造后运行数据表明,水泵系统年均耗电下降约 22%,空压系统单位产气耗电由 0.118 kW·h/m³ 降至 0.096 kW·h/m³。与此同时,凭借动态无功补偿与谐波治理,系统功率因数稳定在 0.95 以上,馈线电流下降约 10%,供配电侧附加损耗得到有效抑制。结合运行参数与能耗指标的变化情况可以看

出,节能效果主要来源于无效功率输出的削减以及电能质量改善所带来的系统性降耗。

3.3 面向低碳目标的节能效果综合评价

在统一运行对象与数据口径的基础上,对节能成效进行低碳导向评价更具工程意义。统计结果显示,该自动化单元年综合节电量约为 32 万 kW·h,按照目前电力排放因子折算,年均可减少二氧化碳排放约 260 吨,同时系统最大需量下降约 12%,在降低容量冗余的同时,为后续负荷增长预留了运行空间;从运行品质角度看,关键工艺参数波动幅度较优化前降低约 15%,设备启停次数明显减少,机械与电气故障风险同步下降。综合分析表明,在同一应用场景内,依托多层级节能措施的协同实施,系统不但实现了显著的能耗与碳排放削减,也在运行稳定性与可持续性方面获得了同步改善,体现出节能优化路径在工程层面的实际可行性。

4 结束语

围绕低碳目标下的工业用能需求,本文从系统运行特性出发,对电气自动化系统在设备配置、运行控制与系统协同等层面的节能优化思路进行了工程化探讨,并依托典型应用场景验证了相关措施在降低能耗与碳排放方面的实际成效。实践表明,将节能目标融入自动化系统的运行组织与控制策略,有助于实现能效与稳定性的同步改善,后续研究可进一步结合多源运行数据与智能算法,对能耗预测、调度优化及碳排放精细化管理展开深入探索,以推动电气自动化系统向更高水平的低碳运行发展。

参考文献:

- [1] 杨建强. 电气自动化工程中的节能设计技术浅析[J]. 中国设备工程, 2023(S1):148-150.
- [2] 张似玉. 基于电气工程自动化技术的供配电节能控制方法[J]. 光源与照明, 2023(05):222-224.
- [3] 彭万里. 建筑机械设备电气工程自动化的供配电节能控制探讨[J]. 中国设备工程, 2023(01):227-229.
- [4] 陶仁海. 电气工程及其自动化供配电系统节能控制分析[J]. 科技创新与应用, 2022,12(36):189-192.
- [5] 李良. 电气自动化中的信息技术与节能措施[J]. 集成电路应用, 2022,39(08):152-153.
- [6] 孙国君. 电气自动化工程中节能设计技术应用研究[J]. 电气时代, 2022(05):67-69.