

节能设计在电气工程及其自动化中的应用

魏巍

天津市少年儿童活动中心 天津 300091

摘要：电气工程及其自动化是现代工业与城市运行的基础支撑，但其能源消耗在终端用电中占比突出。在全球能源转型与碳减排目标驱动下，将节能设计理念系统嵌入电气工程的规划、实施与运行环节，已成为行业发展的必由之路。本文从电气工程节能设计的必要性出发，系统梳理了变压器选型与经济运行、无功补偿与功率因数优化、变频调速技术应用、照明系统节能设计以及可再生能源接入等关键技术路径。研究表明，节能设计需从设备选型、系统优化和运行管理三个层面协同推进，方可实现经济效益与环境效益的统一。

关键词：节能设计；电气工程；自动化；功率因数；变频调速

引言：电气工程及其自动化是国民经济各领域电气化运行的核心支撑，从电力系统输配到工业驱动控制，从建筑供配电到交通电气化，其应用渗透至社会生产生活的方方面面。然而，电气设备在运行过程中伴随大量电能损耗，以电动机、变压器、照明系统为代表的主要用电设备，其能耗在工业总用电量中占比超过 70%。随着国家“双碳”目标的深入推进和能源价格持续走高，节能设计已从“锦上添花”转变为“刚性需求”。本文将从设备选型、系统架构和运行策略三个层面，系统探讨节能设计在电气工程及其自动化中的具体应用路径。

1 电气工程节能设计的必要性与基本原则

1.1 电气能耗现状与节能潜力

电能是我国终端能源消费的重要组成部分，而电气工程及其自动化系统是电能消耗的主要载体。据统计，我国电动机系统年耗电量约占全社会用电量的 60%，变压器损耗占发电量的 5%—8%，照明用电约占全社会用电量的 12%—15%。这意味着，电气工程领域的任何一个环节的能效提升，都将产生可观的节电效益。以电动机系统为例，若全国电动机系统平均运行效率提升 5 个百分点，年节电量可达 2000 亿千瓦时以上，相当于减少标准煤消耗近 7000 万吨。变压器方面，推广使用 SCBH15 型非晶合金变压器替代传统 S11 型变压器，空载损耗可降低 60%—70%。节能潜力客观存在，但将这些潜力转化为实际节能量，需要从设计源头入手，将节能理念嵌入系统规划与设备选型之中。

1.2 节能设计的基本原则

一是全生命周期成本最优原则。不应仅关注初始投资，而应统筹设备采购、安装运行、维护检修及报废处

置的全生命周期成本，以长期运行成本与初始投资之和最小化为决策依据。二是系统优化原则。电气系统是相互关联的整体，需从系统角度统筹协调各环节能效匹配——如变压器容量与负荷特性匹配、无功补偿与谐波治理协同、电源与负荷的时空平衡等。三是技术经济合理原则。节能措施应兼顾先进性与经济性，选择投资回收期合理的技术方案，确保节能措施本身具有经济可行性。四是动态适应性原则。随着负荷特性、电价政策和新能源接入条件变化，设计方案应预留调整空间，具备应对变化的弹性^[1]。

2 电气工程中节能设计的技术路径

2.1 变压器选型与经济运行

变压器的损耗包括空载损耗（铁损）和负载损耗（铜损）两部分。空载损耗主要由铁芯材质决定，与负载大小无关；负载损耗则与负载率的平方成正比。传统 S11 型变压器的空载损耗较高，而采用非晶合金铁芯的新型变压器（如 SCBH15 型）可将空载损耗降低 60%—70%，在年运行时间较长的场合具有显著节电效果。变压器经济运行的核心在于使变压器运行在损耗最低的负载率区间。一般而言，变压器综合损耗率最低的负载率在 40%—60% 之间。对于长期轻载或长期过载运行的变压器，应通过容量调整或并列运行策略予以优化。在装有两台及以上变压器的变电所，应根据实际负荷情况灵活调整运行台数，使运行中的变压器尽量处于经济负载区间，减少不必要的空载损耗。

2.2 无功补偿与功率因数优化

无功功率不直接做功，但会占用电气设备的容量、增加线路和变压器的损耗。功率因数是衡量无功功率

消耗程度的重要指标。当功率因数偏低时,线路电流增大,导线发热损耗增加,变压器铜损上升,电压质量下降。提高功率因数的基本手段是安装无功补偿装置。在工程设计中,应根据负荷性质和变化规律合理配置无功补偿容量。对于稳定运行的负荷,可采用固定补偿电容器组;对于冲击性负荷或变化较大的负荷,应采用自动投切的动态补偿装置。近年来,静止无功发生器(SVG)等新型补偿设备因其响应速度快、补偿精度高而受到重视。补偿后的功率因数一般应达到 0.92 以上。需注意补偿容量并非越大越好,过补偿会导致系统电压升高和设备过压风险,设计时应以实际负荷需求和系统电压稳定为约束条件,通过潮流计算确定最优补偿容量和分组方案^[2]。

2.3 变频调速技术在电机驱动中的应用

传统驱动方式中,风机、水泵等设备采用阀门或挡板调节流量,电机始终在额定转速下运行,大量能量消耗在节流过程中。变频调速通过改变电机供电频率来调节转速,使输出功率与负载需求精确匹配,彻底改变了“以额定功率供应、以节流方式消耗”的低效模式。风机和水泵类负载的轴功率与转速三次方成正比——转速降低 10%,功率约下降 27%;转速降低 20%,功率下降约 49%。采用变频调速后,平均节电率可达 20%—40%。工程设计中应用变频调速需注意:选用合适的变频器容量和类型,考虑谐波影响并配置必要滤波器,长期低频运行时应关注电机散热条件。变频调速不仅适用于新建项目,也是存量电机系统节能改造的重要手段。

2.4 照明系统节能设计

照明系统在工业与民用建筑中的能耗占比不容忽视。照明节能设计应从光源选择、灯具效率和控制方式三个维度统筹考虑。光源选择方面,LED 光源已全面取代传统荧光灯和金卤灯成为主流。LED 的发光效率已达到 150—200lm/W,远超荧光灯(60—90lm/W)和金卤灯(70—100lm/W),且寿命长达 3 万—5 万小时,综合优势明显。在照度设计层面,应严格按照国家标准《建筑照明设计标准》(GB 50034)规定的照度值进行设计,避免过度照明造成浪费。对于高大厂房和仓库等空间,宜采用高天棚 LED 灯具配合智能感应控制,实现“人来灯亮、人走灯暗”。控制方式方面,智能照明控制系统通过时间控制、照度感应和人体存在感应等多重策略,可实现按需照明。在自然采光良好的区域,应采用光敏传感器自动调节灯具输出或关闭部分灯具。此外,直流照明系统因省去整流环节的损耗,在特定场合也开始得到应用,设计时应根据项目条件综合评估其适用性。

2.5 可再生能源接入与系统协同

分布式光伏发电是电气工程中可再生能源接入的主要形式。将光伏系统与建筑供配电系统结合,可实现负荷绿色供电,减少长距离输电损耗。工业厂房和大型公共建筑屋顶是建设分布式光伏电站的主要场景,所发电量可就地消纳。工程设计中需重点关注:光伏阵列倾角和方位角选择以最大化发电量为目标,同时兼顾屋顶承重和阴影遮挡;逆变器选型应与光伏组件电气参数匹配,具备低电压穿越和谐波抑制功能;并网接口设计应符合电网技术要求,确保电能质量和运行安全。光伏与储能的结合是前沿方向,储能系统可在光伏发电高峰期储电、用电高峰期放电,实现“削峰填谷”,提升可再生能源利用率和系统经济性。随着储能成本持续下降,光储一体化设计将逐步成为电气节能设计的重要组成部分^[3]。

3 节能设计与自动化系统的融合

3.1 能源管理系统(EMS)的架构与功能

节能设计的效果最终需要通过运行管理来落实和持续优化,能源管理系统(EMS)正是连接设计与运行的桥梁。EMS 通过对电能消耗数据的实时采集、监控和分析,使能源消耗从“黑箱”变为“透明”,为节能决策提供数据支撑。典型的 EMS 架构包括数据采集层、网络传输层和应用管理层三个层次。数据采集层通过智能电表、电力质量分析仪等终端设备,实时获取各用电回路的电压、电流、功率、功率因数、电能质量等参数;网络传输层确保数据安全可靠地传送至管理中心;应用管理层则实现数据的存储、展示、分析和优化控制。在功能层面,EMS 应具备能耗监测与统计、能效分析与诊断、节能优化与控制以及碳排放核算等核心模块。通过 EMS 平台,运行管理人员可实时掌握各环节的能耗状况和能效水平,及时发现异常用电行为,并基于历史数据分析识别节能潜力。

3.2 基于 PLC 的节能控制策略

可编程逻辑控制器(PLC)作为自动化系统的核心控制单元,是实现设备级节能控制的重要工具。在暖通空调系统中,PLC 可根据室内外温度、湿度、CO₂ 浓度等参数,自动调节冷水机组、水泵和风机的运行状态,使系统始终运行在最佳能效区间。在空压机站控制中,PLC 可根据管网压力变化,自动启停空压机并调节其加载/卸载状态,避免多台空压机同时空载运行造成的能源浪费。在污水处理等工艺过程中,PLC 可根据进水流量和水质变化,调节曝气风机和回流泵的转速,实现精确供氧和节能运行。节能控制策略的设计应基于对工

艺流程的深入理解和对设备特性的准确掌握。控制逻辑的编程应在满足工艺要求的前提下,尽量降低设备运行能耗。控制参数应根据季节变化和设备老化进行定期校准,确保控制策略长期有效。

3.3 数据驱动的能耗优化与预测维护

随着传感技术和数据分析手段的快速发展,电气系统的节能管理正从“被动响应”走向“主动预判”。基于历史运行数据和机器学习算法,可建立设备能耗预测模型,提前识别能效退化趋势,在设备效率明显下降之前安排维护,避免低效运行带来的隐性浪费——这种模式被称为“预测维护”,其节电效益往往高于事后维修。在负荷预测方面,利用时间序列分析和深度学习算法,可对次日或未来数小时的电力负荷进行较为准确的预测,据此优化变压器运行方式和储能充放电策略,实现能源的精细化管理。在故障诊断方面,通过分析电流、电压波形中的谐波分量和暂态特征,可识别电气设备的早期异常——如轴承磨损、绝缘老化等,避免故障发生时的非正常运行损耗。数据驱动的能耗优化使节能从“静态设计”扩展为“动态优化”,在设备全寿命周期内持续挖掘节能潜力。

4 节能设计的经济效益与实施策略

4.1 典型节能措施的投入产出分析

节能设计的经济可行性是工程决策的重要依据。以变频调速改造为例,一台额定功率为110kW的风机,年运行时间6000小时,平均负载率80%。改造前采用风门调节,电机输入功率约为90kW;改造后采用变频调速,输入功率降至约50kW,节电功率40kW。按电价0.7元/kWh计算,年节电费约16.8万元。变频器及配套设备投资约8万元,投资回收期约6个月,全生命周期(按10年计)净收益超过150万元。无功补偿方面,将功率因数从0.78提升至0.92,对一条长期运行电流为500A的线路而言,线路损耗可降低约30%,同时还可获得电力公司的功率因数奖励电费,投资回收期一般不超过1年。变压器节能方面,以非晶合金变压器替代S11型变压器,虽然初始投资高出约30%—40%,但在年运行8760小时的连续运行工况下,2—3年即可收回增量投资。上述分析表明,节能设计的投入产出比通常较为可

观,是值得推广的“投资型”技术措施。

4.2 节能设计实施的关键路径

节能设计的系统实施需要遵循科学的路径和方法。在规划设计阶段,应将节能目标纳入设计任务书,作为约束性指标而非参考性建议。可行性研究阶段应开展能耗预测和节能潜力分析,明确主要用能环节和可采用的节能技术路线。初步设计阶段应进行多方案比选,以全生命周期成本为评价指标,确定最优技术方案。施工图设计阶段应细化节能措施的实施细节,确保设备参数、控制系统逻辑和安装方式满足节能要求^[4]。在项目投运后,应建立能耗监测系统,对实际节能效果进行跟踪验证。当实际运行能耗偏离设计预期时,应及时分析原因并采取纠正措施。节能设计是一个“目标设定—方案设计—实施落地—运行验证—持续改进”的闭环过程,而非一次性活动。设计人员应具备系统思维,将节能理念贯穿于项目全生命周期的每个环节。

结束语

节能设计在电气工程及其自动化的应用已从一项可选技术手段,演变为行业发展的必然要求。本文从变压器经济运行、无功补偿、变频调速、照明优化、可再生能源接入以及和自动化系统深度融合等多个维度,系统阐述了节能设计的技术路径。随着能源互联网、人工智能和新型储能技术的持续突破,电气工程的节能设计将向更加智能化、精细化和系统化方向发展。将节能理念内化为电气工程设计的核心准则,既是行业从业者的技术责任,也是推动全社会绿色低碳转型的重要力量。

参考文献

- [1] 李建伟,白宇.节能设计在电气工程及其自动化中的应用分析[J].模型世界,2024(13):65-67.
- [2] 王忠武.浅谈电气工程自动化及其节能设计的应用[J].中国设备工程,2023(23):215-217.
- [3] 曲志强.电气工程自动化及其节能设计的应用[J].中国高新科技,2022(7):74-75.
- [4] 段智文.电气工程及其自动化的节能设计分析[J].通信电源技术,2023,40(12):7-9.