

电气自动化中变频器节能控制技术及优化策略研究

赵 丹 郭文刚

河南安阳钢铁集团有限责任公司 河南 安阳 455004

摘 要: 本文系统研究了电气自动化中变频器的节能控制技术及优化策略。基于电机拖动与流体力学原理,深入分析了变频调速在风机、水泵类负载中的节能机理,并对比了其相较于传统调流、液力耦合等调速方式的显著能耗优势。文章剖析了变频器自身损耗及选型、电机适配性、系统配置和运行工况等关键因素对节能效果的影响。针对这些影响因素,从控制算法、系统集成、运行维护及智能化预测性优化四个维度提出了综合性的节能优化策略,旨在提升变频调速系统的整体能效,为工业领域的节能降耗提供技术参考。

关键词: 变频器; 电气自动化; 节能控制; 调速系统; 优化策略

引言: 在电气自动化系统中,电机作为最主要的耗能设备,其能耗占工业总用电量的比重巨大。传统的调速方式如阀门节流存在严重的能量浪费问题,已难以满足当前绿色低碳与高效生产的需求。变频器凭借其优异的调速性能和显著的节能效果,已成为电机控制的核心技术。然而,变频系统的实际节能效率受设备自身、负载特性及运行环境等多重因素制约。因此,深入研究变频器的节能机理,分析影响节能效果的关键因素,并探索有效的优化策略,对于提升工业自动化系统的能源利用效率具有重要的现实意义。

1 变频调速系统节能机理分析

1.1 电机调速节能的理论基础

工业领域广泛应用的风机、水泵类负载属于平方转矩负载,其核心节能理论依托电机拖动原理与流体力学特性,为变频调速节能提供了坚实依据。此类负载的流量、压力、轴功率与电机转速存在固定数理关系,其中轴功率与转速三次方成正比,这也是变频调速可大幅降耗的核心原因。传统工业生产中,电机多采用工频恒速运行模式,设备始终保持额定转速工作,当生产所需负荷降低时,只能通过阀门、挡板节流方式调节介质流量,并未减少电机输入电能,大量电能转化为节流阻力热能与机械损耗,造成严重的能源浪费。变频调速技术通过电力电子器件变换供电频率与电压,实现电机转速的无级连续调节,可根据生产实际负荷精准匹配运行转速^[1]。该方式能够彻底摒弃节流调节的无效损耗,同时有效降低电机运行过程中的铁损、铜损和风磨损耗,解决工频轻载、空载工况下能效低下的问题,从电机运行本质上提升电能利用率,是工业电机节能改造的核心技术理论支撑。

1.2 变频调速与传统调速方式的能耗对比

工业电机传统调速方式主要包含节流调速、变极调

速、液力耦合器调速三类,普遍存在能耗高、适配性差等突出问题,与变频调速技术形成了明显的性能差距。节流调速是工业领域最常用的传统调节方式,其依靠截流阀等节流装置改变介质流量来实现流量调节,但电机始终处于工频满速运行状态,绝大部分电能被截流装置无效消耗,真正用于有效做功的能量占比极低,节能效果极差,仅适用于负荷基本稳定的简单工况。变极调速属于有级调速方式,档位数量有限且切换不连续,无法实现连续平滑的无级调速,难以适配动态变化的生产负荷,尤其在轻载运行时因档位匹配不当导致能耗浪费十分突出。液力耦合器则依靠液压传动实现调速,运行过程中存在持续的液压滑移与机械摩擦损耗,且调速范围越大,传动效率越低,整体运行能耗居高不下。相比之下,变频调速属于高效无级调速技术,从根本上消除了节流损耗与传动滑移损耗,系统综合传动效率可达95%以上。在工业常见的风机、水泵等变负荷工况中,变频调速相比节流调速可实现30%至50%的节能效果,相比液力耦合器调速可节能20%至35%,同时兼具调速精度高、运行稳定、响应快速等多重优势,是当前工业电机调速节能的最优技术方案。

1.3 变频器自身的能耗特性

变频器作为变频调速系统的核心电力电子设备,在运行过程中不可避免地存在固有能耗,其能耗特性直接决定了系统整体节能的上限。变频器损耗主要分为开关损耗、导通损耗与空载损耗三大类。开关损耗由IGBT等功率器件高频通断产生,开关频率越高,电压与电流交叠时长越久,损耗数值越大,是变频器最主要的能耗来源。导通损耗源于功率器件在导通状态下的内部阻抗损耗,其大小与运行电流、负载率呈正相关,负载越高,导通损耗越明显。空载损耗属于固定损耗,是变频器在

待机、空载运行时, 主控电路、散热风扇、检测模块持续工作所产生的基础能耗。变频器能耗具备极强的工况依赖性, 额定负载下自身损耗仅占系统总功率的3%至5%, 但在轻载低频工况下损耗占比会大幅攀升。同时, 设备老化、散热不良、谐波干扰等问题会进一步增加附加损耗, 因此深入掌握其能耗特性, 是优化系统整体能效的基础前提。

2 影响变频器节能效果的关键因素分析

2.1 变频器选型与参数设置的影响

变频器选型与参数设置是决定系统节能效果的前置关键因素, 选型不匹配、参数设置不合理, 会大幅削弱甚至抵消变频调速的节能优势。在选型层面, 容量匹配是核心关键, 选型过大会导致设备长期轻载运行, 空载损耗占比提升、功率因数下降, 产生大量无效能耗; 选型过小会引发过载限流、强制降频等问题, 无法满足生产调速需求, 还易引发设备故障^[2]。同时, 恒转矩、平方转矩等不同负载, 需匹配专用变频器, 通用变频器适配特殊负载时节能效果会大幅下降。在参数设置层面, V/F曲线、载波频率、加减速时间、休眠阈值等参数至关重要, 载波频率过高会增大开关损耗, 过低会诱发谐波损耗; V/F曲线配比失衡会造成电机过励磁或转矩不足, 增加运行损耗。精准的选型与科学的参数校准, 是保障变频系统最大化节能的基础条件。

2.2 电机本身的适应性影响

电机自身性能、结构特性与老化程度, 是制约变频节能效果的核心内在因素, 不同类型电机对变频调速工况的适配性差异极大。专用变频电机经过结构优化, 铁芯材质、绕组设计与散热系统均适配变频工况, 低频运行时损耗低、散热好、转速稳定性强, 可充分发挥变频调速的节能优势。而普通工频异步电机专为工频恒速工况设计, 低频变频运行时, 自带散热风扇转速随电机转速降低而下降, 散热能力大幅衰减, 极易出现电机温升超标问题。为保障设备运行安全, 生产中往往无法将电机调至最优节能转速, 直接限制了节能空间。此外, 老旧电机存在铁芯磁化性能衰退、绕组绝缘老化、机械磨损严重等问题, 固有运行损耗基数大, 变频调速仅能优化调速损耗, 无法消除设备本体缺陷带来的能耗浪费, 大幅降低整体节能效率。

2.3 外围设备与系统配置的影响

变频调速系统的节能效果并非仅由变频器与电机决定, 外围配套设备及整体系统配置的合理性, 对系统传输能效与最终节能收益影响深远。完整的变频系统配套设备包含电抗器、滤波器、传输电缆、接触器及管路、

传动机构等, 各类设备的适配状态直接影响能量传输效率。未配置滤波、抗干扰设备的系统, 电网谐波问题突出, 会引发电机、电缆的附加发热损耗, 降低电能利用率。传输电缆线径偏小、敷设距离过长, 会增大线路阻抗, 产生显著的压降与传输损耗, 在低频轻载工况下损耗占比会进一步升高。同时, 管路堵塞、传动卡顿、多设备联动失调、冗余设备未关停等配置问题, 会造成大量机械与介质无效损耗。多数企业仅改造变频器而忽略配套优化, 导致变频节能收益被各类附加损耗抵消, 难以达到预期节能目标。

2.4 运行工况的影响

实际生产的运行工况是决定变频系统节能空间的核心外部条件, 负荷波动规律、运行时长、启停模式及环境条件等因素, 都会直接改变变频调速的实际节能效果。对于风机、水泵等典型变负荷设备, 生产负荷随时段、工艺需求动态波动, 传统工频节流调节模式下能耗浪费十分巨大, 而变频调速可实时匹配负荷变化, 负荷波动越频繁、轻载运行时长占比越高, 节能收益越为显著。若设备长期处于满负荷恒定运行工况, 电机始终保持额定功率工作, 变频调速基本无调速优化空间, 节能效果微乎其微。同时, 设备频繁启停、短时间歇运行的工况, 会让变频器反复完成励磁、调速过程, 增加动态能耗, 从而降低整体节能效率^[3]。另外, 高温、粉尘、潮湿等恶劣工况会影响设备散热与运行性能, 增大设备运行损耗, 间接弱化变频调速系统的实际节能效果, 因此精准评估工况特征是制定节能方案的关键前提。

3 变频器节能控制的优化策略

3.1 控制算法层面的优化

控制算法是提升变频系统节能精度与动态能效的核心驱动力, 传统基础控制算法因适配性差、能耗优化能力不足, 已难以满足当前工业场景对精细化节能的迫切需求, 亟需通过算法迭代升级实现能效的全面提升。传统固定V/F控制算法参数固化、灵活性低, 无法有效适配动态负载变化, 在轻载工况下极易出现过励磁损耗, 造成无功电能的大量浪费; 而在重载工况下又常因电压频率配比失调导致转矩不足, 迫使电机长期处于低效运行区间, 整体能效表现偏低。通过优化自适应V/F算法, 可使系统根据实时负载转矩与转速自动调节电压频率配比, 精准匹配不同负载特性, 有效降低电机无功损耗与励磁损耗, 显著改善轻载与重载工况下的运行能效。矢量控制算法则可实现电机磁链与转矩的解耦控制, 大幅提升调速响应速度与控制精度, 尤其适配高精度、动态波动频繁的复杂工况, 有效减少动态运行过程中的能耗损失。

同时,引入最小功率损耗辨识算法,实时监测系统能耗参数,精准锁定各工况下的最优节能运行点,并搭配载波调制优化算法有效抑制谐波损耗,从算法根源全面提升变频系统的电能利用效率与综合节能水平。

3.2 系统集成层面的优化

系统集成层面优化打破了单一设备改造的局限,以全系统协同运行为核心,实现电能传输、动力输出、负载运行的全流程节能优化。首先需依据生产负载类型与工况特性,完成变频器、电机的精准选型匹配,替换老旧低效设备,并配套适配的电抗器与滤波器,有效抑制电网谐波,消除谐波引发的附加能耗与设备过热问题。其次,全面优化系统机械与介质传输结构,及时清理管路堵塞、修复传动卡顿与间隙磨损问题,降低机械摩擦损耗与介质传输损耗,最大化释放变频调速的节能潜力。同时,搭建多机组联动控制系统,实现多台变频设备的负荷均衡分配,规避单设备轻载、过载失衡运行造成的能耗浪费,确保各设备始终运行在高效区间。此外,规范电缆选型与敷设方案,减少线路传输压降与损耗,通过全方位的系统集成优化,实现整体能效的系统性提升与长期稳定运行。

3.3 运行维护与参数优化策略

常态化精细化运维与动态参数优化,是保障变频系统长期稳定高效节能的核心关键,可有效解决设备老化、参数漂移带来的能效衰减问题。日常运维工作中,需建立标准化定期巡检机制,及时清理变频器散热模块、电机表面的粉尘杂物,检查线路连接状态与机械部件磨损情况,避免因散热不良、线路接触不良引发的附加能耗与安全隐患。同时应摒弃参数固化的运行模式,根据季节变化、生产工艺调整、负荷波动等工况差异,动态校准加减速时间、载波频率、休眠阈值、转矩补偿等核心参数,确保设备始终运行在最佳能效区间。定期检测电机运行效率、系统功率因数与变频器损耗,及时修正长期运行产生的参数漂移问题。此外,需规范设备启停操作流程,杜绝频繁启停、超负荷运行等不良操作习惯,有效延缓设备老化速度,持续维持系统最优节能运行状

态,实现全生命周期能效最大化。

3.4 智能化与预测性能效优化

随着工业智能化技术的快速发展,变频节能控制正逐步从被动调节转向主动预测优化,大幅提升复杂工况下的节能精准度与响应效率。依托物联网、大数据技术搭建智能监测平台,实时采集变频系统的转速、负载率、能耗、温度等核心运行数据,构建设备专属能耗分析模型,精准识别高能耗运行工况与设备潜在缺陷^[4]。结合机器学习算法对生产负荷变化趋势进行深度预测,提前预判工况波动,实现变频器运行参数与转速的前置自适应调节,彻底解决传统滞后调节带来的能耗浪费问题。同时搭载智能休眠、动态减负等智能功能,使设备在轻载、待机状态下自动切换至节能运行模式,显著减少无效能耗。依托远程监控与智能故障预警功能,提前排查设备故障隐患,规避异常运行带来的能耗损耗,实现变频系统智能化、预测性的高效节能运行。

结束语

本研究系统探讨了变频器在电气自动化中的节能控制技术与优化路径。通过分析节能机理与影响因素,明确了从算法优化、系统集成到智能运维的综合优化方向。这些策略的实施能够显著提升变频调速系统的能效水平,实现深度节能。未来,随着宽禁带半导体、人工智能等技术的进一步融合,变频节能控制将向更高效率、更智能化的方向发展,为工业领域的可持续发展提供更强大的技术支撑。

参考文献

- [1]陈瑞岩.变频器调速技术在电气自动化控制中的实践研究[J].中国电子商情,2026,32(7):133-135.
- [2]安炜,赵毅,李晓龙.变频器在电气自动化设备中的节能控制技术应用分析[J].工程技术研究,2025,7(12):4-6.
- [3]陈春华.变频器调速技术在电气自动化控制中的应用研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(3):186-188.
- [4]刘涛.电气自动化中变频器调速技术的节能效应研究[J].自动化应用,2025,66(14):135-137,143.