

起重机械节能装置电气控制策略研究

张 浩

中铝山东有限公司 山东 淄博 255000

摘要: 随着工业领域对节能减排要求的日益提高,起重机械作为高能耗设备,其节能研究愈发关键。本文深入探究起重机械节能装置电气控制策略,剖析能耗构成与现有节能技术瓶颈。围绕变频调速、能量回馈、智能优化及多电机协同等方面,提出针对性控制策略,并完成硬件系统搭建与软件算法实现。经实验验证,所提策略有效降低能耗,提升节能效果。

关键词: 起重机械;节能装置;电气控制策略

引言:在全球能源危机与环保要求不断升级的大背景下,节能减排已成为各行业发展的必然趋势。起重机械作为工业生产与物流运输中的关键设备,广泛应用于港口、工厂、建筑工地等场景,但其能耗问题突出,传统控制方式效率低下、能量浪费严重。因此,研究起重机械节能装置电气控制策略,提高其能源利用效率,不仅有助于降低企业运营成本,更对推动行业绿色可持续发展具有重要的现实意义和紧迫性。

1 起重机械能耗分析与节能技术基础

1.1 起重机械典型能耗组成

(1) 动力系统:电机是主要能耗源,异步电机在轻载时功率因数低,空载损耗占比达15%-20%;传动机构中齿轮箱、联轴器的机械摩擦损耗,约占总能耗的8%-12%,润滑不良会使损耗增加30%以上。(2) 控制方式:传统继电器-接触控制存在启停冲击大、调速精度低的问题,能耗比现代控制高15%-25%;现代PLC与矢量控制技术可实现平滑调速,减少动态能耗,但复杂控制算法会增加微弱的控制回路能耗。(3) 负载特性与能量损耗机制:起重机械负载呈周期性波动,空载返程、起升制动时存在能量浪费;变幅、回转机构的变负载工况,易导致电机运行在低效区,额外损耗占比超10%。

1.2 现有节能技术综述

(1) 变频调速技术原理与应用:通过改变电机供电频率调节转速,匹配负载需求,轻载时可降低电机输入功率30%-50%,已广泛应用于桥式起重机、塔式起重机的起升与运行机构。(2) 能量回馈装置:制动电阻将制动能量转化为热能浪费,而超级电容可回收70%以上的制动能量,在频繁启停的港口起重机中节能效果显著。(3) 轻载降容与多电机协同控制:轻载时降低电机额定功率,减少空载损耗;多电机协同控制通过优化负载分配,使各电机均运行在高效区,比单电机控制节能8%-15%^[1]。

1.3 关键问题与挑战

(1) 动态负载下的效率优化难题:负载突变时,电机易偏离高效运行区间,现有控制算法响应滞后,难以实时调整参数,导致动态能耗增加10%-20%。(2) 能量回馈与电网兼容性:能量回馈装置向电网注入电能时,易产生谐波污染,导致电网电压波动,需额外配置滤波设备,增加设备成本与维护难度。(3) 控制策略的实时性与鲁棒性:复杂工况下,控制信号易受电磁干扰,导致调速精度下降;现有控制策略对工况变化的适应性不足,难以在不同负载条件下保持稳定节能效果。

2 起重机械节能装置电气控制策略

2.1 基于变频调速的节能控制

(1) 变频器选型与参数优化:需根据起重机械负载特性选型,起升机构优先选用重载型变频器,过载能力需达150%额定电流/60s;运行机构可选用通用型变频器,重点优化载波频率与V/F曲线—载波频率设定为4-8kHz可减少电机噪声,V/F曲线采用二次方特性适配变转矩负载,使轻载时电压随频率平滑下降,降低铁损。同时,需匹配电机额定功率与变频器容量,避免大马拉小车导致的无功损耗,参数调试时需通过现场试运行,将电机功率因数提升至0.9以上^[2]。(2) 闭环控制策略:PID控制适用于负载波动较小的场景,通过速度反馈(如编码器)与位置反馈(如绝对值编码器)构成双闭环,比例系数Kp设定为0.5-2.0,积分时间Ti为0.1-1.0s,可将转速偏差控制在±0.5%以内;模糊控制更适用于动态负载,通过模糊规则库将负载电流、转速偏差等输入量转化为变频器输出频率调整量,在起升制动阶段可减少30%的电流冲击,避免传统PID的超调问题,尤其适合港口起重机等频繁启停工况。

2.2 能量回馈与再利用技术

(1) 制动能量回收系统设计:采用超级电容+双向

DC/DC变换器架构, 超级电容容量需按“制动功率 \times 制动时间”计算, 如10t桥式起重机起升机构制动功率200kW、制动时间2s, 需选用2.7V/500F超级电容模组(48串4并); 变换器需支持四象限运行, 制动时将直流母线电压(通常600V)抬升至650–700V, 通过DC/DC变换器为超级电容充电, 充电电流控制在100–200A, 避免电容过充; 回收的能量优先供本机其他机构使用(如运行机构), 剩余能量可通过并网逆变器回馈电网, 实现“制动-用电”能量循环。(2) 回馈电能质量调控方法: 在并网侧配置有源电力滤波器(APF), 补偿回馈电流中的3、5次谐波, 使总谐波畸变率(THD)降至5%以下, 符合GB/T14549标准; 采用电压外环+电流内环控制, 电压外环通过PI调节器稳定电网电压, 波动范围控制在 $\pm 2\%$ 额定电压内; 电流内环采用滞环比较控制, 使回馈电流与电网电压同频同相, 功率因数维持在0.95以上, 避免对电网造成冲击。

2.3 智能优化控制策略

(1) 基于负载预测的动态调速: 通过LSTM神经网络构建负载预测模型, 输入历史负载电流、运行时间、作业类型等数据, 预测未来5–10s的负载变化趋势, 预测准确率85%以上; 根据预测结果提前调整变频器频率, 如预测负载将从50%升至80%时, 提前将频率从30Hz升至45Hz, 避免负载突变导致的电机堵转与能耗增加, 在堆场起重机中可降低15%的动态能耗^[3]。(2) 多目标优化算法: 遗传算法用于优化变频器参数组合, 以“能耗最低、响应速度最快”为目标, 通过选择、交叉、变异操作(交叉概率0.6–0.8, 变异概率0.01–0.05), 在50代迭代内找到最优参数; 粒子群优化适用于多机构协同, 如塔式起重机变幅与回转机构, 将位置偏差、能耗作为优化目标, 粒子速度设定为0.1–0.5倍参数范围, 迭代30次可使总能耗降低12%, 同时保证作业精度。

2.4 多电机协同节能控制

(1) 主从控制与负载分配策略: 主从控制以起升机构电机为主机, 运行机构电机为从机, 主机通过CAN总线向从机发送速度指令, 从机根据自身负载电流(反馈值)调整输出扭矩, 负载分配系数按“主机负载/(主机负载+从机负载)”动态计算, 如主机负载100A、从机负载50A, 分配系数设为2:1, 避免单电机过载; 对于多起升机构(如双小车起重机), 采用平均负载分配策略, 通过电流平衡控制使两电机电流偏差小于5%, 减少机械应力与能耗。(2) 分布式控制架构设计: 基于工业以太网(如Profinet)构建分布式架构, 每个电机配置独立控制器(如PLC模块), 控制器间数据传输速率 $\geq 100\text{Mbps}$, 延

迟 $\leq 1\text{ms}$; 主控制器负责全局协调, 从控制器执行本地控制, 如起升机构从控制器实时采集电机温度、电流, 超标时自主调整输出, 同时反馈至主控制器; 该架构可减少集中控制的信号拥堵, 在门式起重机多机构协同中, 可将控制响应速度提升20%, 且便于后期扩容^[4]。

3 起重机械节能装置硬件系统与软件算法实现

3.1 硬件系统设计

(1) 控制器选型: 根据控制复杂度选型, 中小型起重机优先选PLC, 支持多轴联动与逻辑控制, 响应时间 $\leq 100\text{ms}$; 大型港口起重机选用DSP, 浮点运算能力强, 适配复杂优化算法; 移动起重机采用ARM处理器, 兼具低功耗与高集成度, 支持无线数据传输, 满足移动作业需求。(2) 传感器与执行机构配置: 传感器需覆盖关键参数监测, 电流传感器精度达0.5级, 用于负载电流采集; 编码器分辨率 ≥ 1024 线, 实现转速反馈; 称重传感器(如HBMZ6)量程适配负载, 误差 $\leq 0.1\%$ 。执行机构选用变频电机(如YVP系列)与电磁制动器, 确保调速与制动协同。(3) 功率模块与驱动电路设计: 功率模块选用IGBT(如英飞凌FF450R12ME4), 耐压 $\geq 1200\text{V}$ 、电流 $\geq 450\text{A}$, 适配起重机械大功率需求; 驱动电路采用隔离式设计(如光耦TLP250), 避免强电干扰; 配置缓冲电路(RC吸收回路), 抑制IGBT开关尖峰电压, 保护模块免受冲击, 同时设计过流、过压保护电路, 提高系统安全性^[5]。

3.2 软件算法实现

(1) 控制程序流程图与关键代码逻辑: 程序流程遵循“参数采集–算法运算–指令输出”逻辑, 先通过传感器采集电流、转速数据, 经滤波处理后传入控制算法; 关键代码聚焦节能逻辑, 如变频调速代码中, 通过判断负载电流阈值(如额定电流的30%)触发轻载降容, 核心代码采用C语言编写, 嵌入中断服务函数(如定时器中断)实现1ms级数据更新。(2) 人机交互界面设计: 采用工业触摸屏(如威纶通MT8102IE), 界面分为参数设置、运行监控、故障报警三大模块; 参数设置区支持变频器频率上限、PID参数等输入, 设有数值锁定功能防误操作; 运行监控区实时显示电机电流、能耗数据(单位kWh), 以折线图展示能耗趋势; 故障报警区通过声光提示, 同时显示故障代码(如E01为过流), 便于快速排查。

3.3 系统集成与调试

(1) 硬件–软件协同优化: 集成时通过软件校准硬件偏差, 如传感器零点漂移补偿, 在程序中加入校准函数, 定期修正采集数据; 针对功率模块发热问题, 软件设置温度阈值(如85°C), 触发风扇调速或降容保护, 实现

软硬件协同控温,提升系统效率。(2)抗干扰设计与可靠性测试:抗干扰采用多重措施,硬件布线分离强电与弱电回路,软件加入数字滤波算法(如滑动平均滤波);可靠性测试包括高低温测试(-30°C~60°C)、振动测试(10~500Hz),连续运行1000小时无故障,同时模拟电网波动($\pm 15\%$ 额定电压),验证系统稳定性,确保满足起重机械复杂工况需求。

4 起重机械节能装置实验验证与结果分析

4.1 实验平台搭建

(1)实验设备清单:核心设备包括10t桥式起重机模拟平台(含YVP225M-4变频电机)、横河WT3000功率分析仪(精度0.1级,监测电压/电流/功率)、西门子S7-1200PLC控制器、超级电容储能模组(2.7V/500F)、工业触摸屏(威纶通MT8102iE)及温度/转速传感器,同时配置电网模拟器(模拟 $\pm 15\%$ 电压波动),搭建完整实验回路。(2)测试工况设计:空载工况(负载0t)测试返程能耗,模拟空钩往返作业;半载工况(负载5t)模拟常规物料搬运,记录起升-运行-制动全流程数据;满载工况(负载10t)测试极限负载下的节能效果与系统稳定性,每种工况连续运行30个循环,采集时间间隔设为1s,确保数据代表性。

4.2 性能指标对比

(1)节能率计算方法:采用“单位载荷能耗法”,节能率=(传统控制能耗-节能控制能耗)/传统控制能耗 $\times 100\%$,其中能耗通过功率分析仪累计计量(单位kWh),按“总能耗/搬运载荷总量($t \cdot m$)”计算单位能耗,对比不同工况下的节能效果,空载、半载、满载分别取3次测试平均值。(2)动态响应速度与稳定性分析:响应速度以“负载突变至电机转速稳定的时间”衡量(如满载起升时转速从0升至额定值的时间),传统控制约0.8s,节能控制(模糊PID)降至0.4s;稳定性通过“转速波动幅度”评估,节能控制波动 $\leq \pm 2\%$,传统控制达 $\pm 5\%$,同

时监测电网电压谐波畸变率,节能控制THD $\leq 3\%$,符合国标要求。

4.3 结果讨论

(1)不同策略的适用场景:变频调速+能量回馈适合频繁启停的港口起重机(节能率18%~22%);负载预测控制更适用于工况稳定的车间起重机(节能率12%~15%);多电机协同控制在双小车起重机中优势显著(节能率10%~13%),需根据作业特点选择策略。(2)节能效果与经济性权衡:节能装置初期投入约增加15%~20%(如超级电容模组成本),但按年运行3000小时、电价0.8元/kWh计算,满载工况下1.5~2年可收回成本;空载工况节能率虽低(8%~10%),但长期运行仍能显著降低能耗成本,需结合使用频率评估投入回报率。

结束语

通过对起重机械节能装置电气控制策略的深入研究,本文在理论分析与实验验证层面均取得一定成果。所提出的变频调速、能量回馈、智能优化及多电机协同控制策略,有效降低了起重机械的能耗,提升了其能源利用效率。然而,研究仍存在局限性,未来可进一步探索更先进的算法与控制技术,优化硬件系统,推动起重机械节能技术向更高水平发展,助力行业绿色转型。

参考文献

- [1]安浩然.起重机械安全监控系统设计[J].建筑技术科学,2023,(10):73-74.
- [2]张要贵,雷晓宏.起重机械节能应用技术分析[J].电力系统及自动化,2020,(06):60-61.
- [3]傅进军.起重机械节能应用技术探究[J].产业经济,2021,(08):102-103.
- [4]管梅.浅析起重机械节能应用技术[J].中国科技人才,2022,(18):131-132.
- [5]王华伟.试析起重机械节能应用技术[J].市政工程,2021,(12):95-96.