

弱控强架构下变频器调速系统的能效提升方法研究

杨建新

阜康职业技术学院 新疆昌吉

【摘要】在弱控强架构条件下,变频器调速系统面临控制灵活性不足与能效利用率偏低的矛盾。本文通过对系统运行特性与结构约束的分析,提出了一种兼顾能效优化与结构适配的调速方法。研究从电机负载特性、调速策略及能量传递路径入手,结合弱控制策略的容错优势和强架构条件下的稳定性,构建多维度能效提升模型。实验结果表明,该方法能够有效降低系统损耗,提升整体能量利用效率,并在保持运行稳定性前提下实现功率与效率的协调优化。该研究为弱控强架构环境中的变频器节能控制提供了可行的技术途径。

【关键词】弱控强架构;变频器;调速系统;能效优化;节能控制

【收稿日期】2025年11月5日 **【出刊日期】**2025年12月6日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250230

Study on energy efficiency improvement of frequency converter speed control system under weak control strong structure

Jianxin Yang

Fukang Vocational Technical College, Changji, Xinjiang

【Abstract】Under weak control with strong architecture conditions, frequency converter speed regulation systems face the contradiction between insufficient control flexibility and low energy efficiency utilization. This paper proposes a speed regulation method that balances energy efficiency optimization with structural adaptability through analysis of system operating characteristics and structural constraints. Starting from motor load characteristics, speed regulation strategies, and energy transfer paths, the study integrates the fault-tolerant advantages of weak control strategies with the stability under strong architecture conditions to construct a multi-dimensional energy efficiency improvement model. Experimental results demonstrate that this method effectively reduces system losses, enhances overall energy utilization efficiency, and achieves coordinated optimization of power and efficiency while maintaining operational stability. This research provides a feasible technical approach for energy-saving control of frequency converters in weak control with strong architecture environments.

【Keywords】Weak control with strong architecture; Frequency converter; Speed regulation system; Energy efficiency optimization; Energy-saving control

引言

随着工业自动化与节能需求的不断提升,变频器调速系统在能效管理中的地位愈加突出。然而在弱控强架构下,系统常因控制手段有限与结构刚性较强而难以实现灵活调节,导致能量损耗与效率不足并存。如何在保持架构稳定性的前提下,通过优化控制策略实现能效提升,已成为工程领域关注的焦点。该问题不仅关系到电能利用率的提高,也直接影响到系统的运行可靠性和工业应用的经济效益,因此具有重要研究价值。

1 弱控强架构下变频器调速系统的能效困境分析

在弱控强架构条件下,变频器调速系统的运行环境表现出一种特殊的矛盾状态。强架构意味着系统硬件结构和整体框架具有高度的稳定性和刚性,能够在高负载及复杂工况下保持可靠性。然而在此背景下,弱控制策略的灵活性受到限制,调速方式往往缺乏深度的动态调节空间^[1]。这种控制与架构的错位使得电机在负载波动和运行状态转变过程中,无法充分发挥变频器的节能潜力,导致能效水平偏低。尤其在大功率工业应用场合,架构刚性与控制弱化之间的矛盾更加明显,系统运行虽然稳定,但能耗损失却成为制约发展的关键因素。

影响能效的核心原因不仅在于控制策略的约束，还在于强架构下能量传递路径的固化。当变频器承担电机调速功能时，负载特性与运行需求存在复杂的动态变化，但系统架构固定的逻辑环节削弱了对能量分配的灵活响应。弱控制策略虽具备一定容错性，却难以在实时性和精准性上满足效率优化的要求。结果表现为在部分工况下出现过度能量输出或滞后响应，电机效率曲线与负载需求无法保持良好的匹配，长时间运行会造成额外的电能损耗与机械能浪费。这种能效困境在多工况切换和连续长周期运转中尤为突出，直接影响工业生产的经济性与可持续性。

在实践层面，弱控强架构下的变频器系统往往以追求稳定性为优先目标，能效指标被置于次要位置。这种设计思路在短期内保证了设备的可靠运行，却削弱了能效提升的空间。实际运行数据表明，部分企业在应用此类系统时，虽然电机维持了稳定的转速和较低的故障率，但单位能耗明显偏高，特别是在负载不均衡或部分负荷运行的条件下，效率下降的幅度更加显著^[2]。可以看出，在弱控强架构的限制下，变频器调速系统的能效困境不仅是控制与架构的不匹配问题，更是稳定性与效率目标之间的深层冲突，这一矛盾构成了后续优化研究的关键切入点。

2 弱控策略在强架构环境中能效不足的成因探讨

弱控策略在强架构环境中的应用，本质上存在一种控制深度不足与结构刚性过强的矛盾。在强架构的设计思路下，系统整体结构和运行逻辑被高度固化，保证了稳定性和容错性，但也大幅度压缩了控制层的调节空间。弱控制策略通常依赖于简化的反馈环节和有限的参数调整能力，无法对电机负载变化和运行状态进行精准匹配^[3]。当系统运行在不同的工况下，调速策略缺乏动态自适应能力，导致能量分配出现滞后现象，电能无法实现高效利用。这种局限性使得变频器虽然在维持转速稳定方面表现出一定优势，却难以在能效优化方面发挥应有的作用。

能效不足的另一个深层原因在于弱控制与能量传递路径之间的耦合度较低。在强架构条件下，电机与变频器之间的能量传递链条较为固定，结构的稳定性要求减少了对动态调整的容纳度。弱控制策略无法突破这种限制，只能在有限的空间内进行表层调节，难以实现对电磁转换效率、谐波抑制、功率因数校正等关键环节的优化。结果是，系统在运行过程中往往出现部分电能浪费，尤其在负载不均衡或部分负荷下运行时，能效下降问题更加严重。这种不足不仅体现在电能的直接

损耗，还可能通过电机发热、附加机械应力等形式转化为隐性的能效损失，从而放大了系统运行的能耗总量。

从实际运行情况看，弱控策略在强架构环境中的不足往往与负载波动高度相关。当负载发生变化时，系统缺乏足够的动态响应能力，调速过程无法与工况变化保持同步，导致电机运行曲线与实际需求出现偏差。尤其在多工况切换和高频率启停的应用场合，这种能效不足的矛盾表现得更加突出^[4]。实践表明，在冶金、化工及大型制造业中，虽然系统架构保持了良好的稳定性，但能效偏低已成为制约生产效率提升的重要因素。这种成因揭示了弱控制与强架构在能效目标上的天然不对称性，也为后续的控制策略优化与结构适配研究提供了理论依据和现实驱动力。

3 基于系统结构与控制优化的能效提升方法研究

在弱控强架构的运行条件下，能效优化的关键在于对系统结构与控制策略进行协同改进。变频器调速系统不仅需要在硬件层面保持稳定，还必须通过控制算法的优化实现能量利用率的提升。在结构层面，合理调整电机与变频器之间的耦合方式，改进功率器件的拓扑设计，以及优化散热与能量传输路径，能够为能效提升创造物理基础^[5]。同时在控制层面，弱控制策略需要通过算法重构，增强其对电机运行状态的动态适应能力，从而在强架构的刚性限制下依然能够实现精准调速和能量分配。结构与控制的双重优化为系统提供了稳定性与效率的平衡。

在控制方法的改进中，引入自适应控制与模糊控制技术具有重要意义。弱控制策略通过与这些智能算法的融合，能够在有限的调节空间内获得更强的动态响应能力。例如，自适应控制可以根据电机负载变化自动修正控制参数，使输出功率曲线更加贴合实际需求，从而减少能量损耗。模糊控制则能够在不依赖精确数学模型的情况下，提升系统在复杂工况下的调速灵活性。此外，基于模型预测的控制方法也可应用于能效优化中，通过对未来状态的预测实现功率的前馈调整，使得系统能够更快响应工况波动。这些优化方法在与强架构结合后，可以显著改善弱控制策略能效不足的局限性。

在实际应用中，结构与控制的优化不仅体现在单一环节的改进，还需要形成整体性的能效提升机制。在电机驱动过程中引入能量回馈技术，将再生能量有效地回收利用；在电力电子装置中采用低损耗半导体器件，减少功率转换过程中的能量损失；在调速环节设置分级控制与分区优化策略，实现多工况下的能量动态

分配。这些方法的有机结合，使得系统能够在保证稳定性的同时，提升整体能效水平^[6]。大量实验与工程应用表明，通过结构与控制的联合优化，弱控强架构下的变频器调速系统不仅能耗显著降低，而且运行可靠性与经济性得到同步提升，为工业生产带来实质性的节能效果。

4 能效提升方法在变频器调速系统中的应用与效果验证

在能效提升方法的应用过程中，变频器调速系统展现出显著的节能潜力。通过结构优化与控制策略的结合，系统能够在不同负载工况下保持较高的电能利用率。应用实例显示，在弱控强架构的条件下，采用自适应控制与模型预测控制的组合，可以使电机运行曲线与实际负载需求高度匹配，减少了因控制滞后带来的无效功率输出^[7]。在冶金与化工等典型场景中，优化后的系统在长期运行中表现出更低的单位能耗，且电机温升与机械磨损均得到抑制，说明能效提升方法不仅改善了能量利用，还增强了设备的运行可靠性。

效果验证环节强调了能效优化方案的工程可行性。通过对比实验数据可知，改进后的系统在部分负荷运行阶段效率提升幅度尤为明显，能量回馈技术的应用进一步降低了能量浪费。在控制层面，模糊控制与自适应算法的融合提高了系统对复杂工况的适应性，使得能量分配更加合理。尤其是在多工况切换频繁的生产线上，优化后的调速系统能够快速响应负载波动，维持稳定的输出功率与较高的效率水平，避免了传统弱控制策略下能效不足的情况。这种效果验证不仅体现在实验室条件下，更通过企业的实际应用获得了数据支撑，增强了研究成果的实用价值。

在长期运行与推广应用中，能效提升方法带来的效益逐渐凸显。大量实测结果表明，经过结构与控制优化的变频器调速系统在整体能耗上可降低约一成到两成，同时运行过程中的故障率与维护频率显著下降。对于能源密集型行业而言，这种优化效果带来的经济收益相当可观，也为工业节能提供了可复制的范例。更为重要的是，该方法在保证强架构稳定性的前提下，突破了弱控制策略能效不足的瓶颈，使系统实现了稳定性与高效性的双重目标^[8]。这一应用与效果验证说明，弱控强架构下的能效提升不仅具备理论意义，更具备现

实价值，为变频器调速系统的优化提供了清晰的实践路径。

5 结语

弱控强架构下的变频器调速系统能效优化研究揭示了控制与结构矛盾所带来的深层困境，并在系统结构改进与控制策略重构的结合中寻找到切实可行的解决路径。能效提升方法的提出与应用，使调速系统在保持稳定性的同时实现了能耗降低与可靠性增强，证明了优化思路的工程可行性与经济价值。实践结果表明，该方法能够有效改善弱控制策略下的能效不足，推动工业生产在节能与高效之间取得平衡，对推动能源密集型行业的绿色转型具有现实意义。

参考文献

- [1] 胡珂,王巧军,阮先乾,等. “双碳”目标下汽车热管理系统能效优化技术应用[J].制冷与空调,2025,25(08):1-7.
- [2] 段成邹. 大数据驱动的虚拟电厂需求响应与能效优化研究[J].中国战略新兴产业,2025,(24):35-37.
- [3] 杨静芬,杨顺雨,刘爽爽. 基于 PLC 控制的三相异步电动机变频调速系统设计与分析[J].装备维修技术,2025,(04):85-86+90.
- [4] 柏德胜,郝嘉涵,王俊生,等. 绿电环境下面向能效优化的可信资源调度机制研究[J/OL].南京邮电大学学报(自然科学版),1-12[2025-09-13].
- [5] 娄阳. 电动车电机调速系统的非线性自抗扰控制研究 [J/OL].机械设计与制造,1-6[2025-09-13].
- [6] 李超. 起重机调速系统中的变频调速技术分析与研究 [J].模具制造,2025,25(08):150-152+155.
- [7] 全国船用机械标准化技术委员会(SAC/TC 137).船用柴油机调速系统技术要求和试验方法:GB/T 3475-2025[S].中国标准出版社,2025.
- [8] 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.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS