大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的谐波抑制与节能优化研究

申艳聪

（湖南科美达电气股份有限公司，湖南 岳阳 414000）

摘 要 连铸是钢铁生产核心工序，电磁搅拌直接影响铸坯结晶质量与生产效率，大功率变频器作为系统核心驱动单元，其运行稳定性与能效水平直接关系到生产全局。工业现场中连铸电磁搅拌系统配套大功率变频器易产生谐波，造成电网污染、设备老化以及额外能耗，难以满足钢铁行业绿色低碳发展要求。本文围绕谐波抑制与节能协同优化开展研究，剖析谐波产生机理、分布特征，梳理现有治理手段短板，研究适配连铸工况的谐波抑制方案，构建兼顾设备性能与能耗水平的综合优化策略，实现谐波治理与能效提升同步落地。

关键词 大功率变频器；连铸电磁搅拌系统；谐波抑制；节能优化；运行稳定性

中图分类号：TN773；TF777 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.027

0 引言

钢铁工业是国民经济重要支柱产业，连铸是钢铁生产关键工序，电磁搅拌技术直接决定铸坯内部组织与成品品质。随着钢铁企业向绿色低碳、高效生产方向转型，大功率变频器广泛应用于连铸电磁搅拌系统，电力电子器件非线性工作带来的谐波问题日渐凸显。谐波会劣化电网电能质量，加剧电气设备发热老化，干扰搅拌控制精度，诱发铸坯质量缺陷，还会带来额外能源损耗。传统谐波治理手段多侧重改善电能质量，较少兼顾系统节能需求，难以适配连铸现场负载动态波动、连续生产的复杂工况。

1 连铸电磁搅拌系统相关理论与技术基础

1.1 连铸电磁搅拌系统工作原理

连铸电磁搅拌系统由电磁搅拌器、大功率变频器、控制系统及检测装置构成，核心是通过电磁感应驱动钢液运动，改善铸坯结晶质量[1]。电磁搅拌器按安装位置分为结晶器搅拌、二冷区搅拌、末端搅拌等，工作时需精准调节磁场强度与搅拌速度。控制系统采集工艺参数向变频器发指令，变频器将工频交流电转换为适配交流电，控制搅拌速度与强度。该系统需适配连铸参数动态变化，变频器与搅拌装置的联动协调性直接影响铸坯质量与设备运行状态。

1.2 大功率变频器工作特性

大功率变频器基于电力电子变换技术实现能量转换与调速控制，由整流、滤波、逆变及控制单元构成。整流单元将工频交流电转为直流电，滤波单元做平滑处理，逆变单元将直流电转为可控交流电，控制单元调节逆变单元工作。连铸工况下其运行特性独特：输出参数动态性强，需适配参数变化；运行连续性要求高，需长时间稳定运行；受高温强磁场干扰，自身运行还会产生谐波[2]。

1.3 谐波产生机理与危害

谐波是频率为基波频率整数倍的周期性电量分量，对电力系统与用电设备有显著影响。大功率变频器运行中，功率开关器件（IGBT）的非线性通断特性会产生谐波；变频器整流、逆变环节的电流电压波形畸变，会进一步引入谐波干扰，其中整数次谐波影响尤为突出。谐波危害主要有：加剧电气设备附加损耗与发热，降低设备效率、缩短使用寿命；干扰控制系统正常工作，降低控制精度，影响铸坯结晶质量与产品性能；污染电网电能质量，影响同一电网内其他敏感设备稳定运行。

1.4 节能优化核心理论

工业设备节能原则是在保障性能满足需求的前提下降低能耗，针对大功率变频器驱动系统，节能围绕能量损耗分析与运行状态优化开展，核心理论包括负载匹配、调速节能与控制优化理论。负载匹配理论强调设备输出与负载需求精准匹配，连铸系统可调节变频器参数适配搅拌需求以降低能耗[3]。调速节能理论指出，电机转速与能耗呈非线性关系，优化调速方式、避免电机在低效转速区间运行可提升能效。控制优化

作者简介：申艳聪（1981-），男，本科，工程师，研究方向：电磁冶金及大功率电源。

理论通过改进控制算法，提升变频器控制精度与响应速度，减少参数波动带来的能量损耗，实现能耗与运行性能的动态平衡。这些理论为该系统的大功率变频器节能优化提供支撑。

2 大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的谐波问题分析

2.1 谐波分布特征

大功率变频器在连铸电磁搅拌系统产生的谐波，分布与变频器拓扑、控制方式及系统工况相关。频率分布上，整流环节产生5次、7次等低次整数谐波，幅值大、影响突出；逆变环节产生几十次至几百次高次谐波，幅值小但易干扰控制系统。谐波幅值变化与工况关联明显，连铸拉速、钢液温度变化改变搅拌负载，变频器输出功率与频率调整后，谐波幅值相应波动。负载在额定区间时幅值稳定，负载较轻或大幅波动时幅值上升、污染加剧。变频器参数设置也影响谐波分布与幅值，设置不当会增加高次谐波幅值、加剧波形畸变。

2.2 谐波对系统运行的影响机制

谐波对连铸电磁搅拌系统的影响涉及设备、控制、工艺多个层面。设备层面：谐波电流增加系统额外损耗，导致电机、变压器等核心设备运行温度异常升高，加速绝缘材料老化，降低绝缘性能，缩短设备使用寿命，提升故障概率；谐波还会引起电机电磁转矩脉动，加剧振动，产生噪声，影响设备稳定运行和工作环境，间接干扰控制精度，影响连铸工艺稳定性和铸坯质量。控制层面：谐波干扰使检测信号失真，输出参数波动，影响钢液搅拌效果，增加铸坯缺陷风险。工艺层面：谐波引发设备故障会中断连铸生产，造成生产损失，增加能耗与成本，还会影响周边设备，干扰生产秩序。

2.3 现有谐波抑制方案的局限性

当前工业谐波抑制方案在连铸电磁搅拌系统适配性不足。无源滤波方案成本低、结构简单，但滤波特性固定，无法适应工况变化，滤波精度有限，易谐振，在大功率场景效果不佳。

有源滤波方案能精准抑制谐波、响应快，但运行成本高，对环境要求严苛，在连铸现场稳定性难保障。混合滤波方案结合二者优势，但结构复杂、控制难，协同控制精度不足，易出现滤波效果问题。

此外，现有方案多针对单一频率或特定工况，缺乏全工况适配性，难以在不同情况下保持理想效果，且未充分考虑与节能协同，可能增加能耗，无法实现双重目标。

3 连铸电磁搅拌系统中大功率变频器的谐波抑制技术

3.1 谐波抑制技术方案设计原则

结合连铸电磁搅拌系统运行特性与工业需求，谐波抑制技术方案设计遵循三大原则。一是适配性原则，方案要适配连铸工况运行环境及变频器运行需求，确保不同工艺参数下稳定滤波。二是可靠性原则，连铸工艺要求连续，谐波抑制装置需长时间稳定运行、故障率低，有故障自诊断与应急处理能力，避免影响生产。三是经济性原则，方案在保障滤波效果时，合理控制成本，兼顾与节能优化协同，提升滤波效果与能效。

3.2 针对性谐波抑制技术路径

基于设计原则和系统谐波分布特征，提出三类谐波抑制技术路径。一是优化变频器拓扑结构，改进整流、逆变单元设计，如采用多重化整流技术减少低次谐波，逆变单元用优化PWM控制策略抑制高次谐波。二是采用混合滤波技术，结合无源与有源滤波优势构建装置，无源滤波单元抑制低次谐波，有源滤波单元针对高次及动态谐波精准补偿，设计参数使二者协同工作。三是改进谐波抑制控制算法，用自适应算法实时监测调整滤波参数，结合工艺参数建立预测模型，实现前瞻性补偿[4]。

3.3 谐波抑制方案的可行性验证思路

为验证方案可行性与有效性，采用理论推导与仿真模拟结合的方式。先理论推导，建立谐波数学模型，分析技术路径抑制效果，明确理论可行性；再构建仿真模型，模拟系统运行工况，植入方案，获取波形分析谐波变化，对比污染程度验证滤波效果，分析对系统稳定性和设备损耗的影响，评估适配性与可靠性，为工业应用提供理论支撑。

4 大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的节能优化策略

4.1 节能优化目标与约束条件

大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的节能优化核心目标是保障铸坯质量与系统稳定，降低能耗，提升效率，实现降本增效与绿色生产，确保关键性能指标满足工艺要求。

节能优化需兼顾三项约束：一是工艺约束，优化策略不得影响铸坯结晶质量，满足工艺参数要求，避免搅拌不足引发缺陷；二是设备约束，避免设备过载，保证运行参数安全，延长设备寿命；三是稳定性约束，适配负载动态变化，保证系统不同工况下稳定运行，避免故障。

4.2 基于运行参数的节能优化策略

核心是实时调节变频器输出参数，精准匹配负载与功率，降低无效能耗。结合负载特性建立参数优化模型，以工艺参数为输入，计算最优输出参数。

根据拉速、温度计算钢坯坯壳厚度，调整输出电压和频率，在保证搅拌效果的前提下减少坯壳涡流损耗；根据安装位置及搅拌钢种采用差异化调整策略，自适应调整参数模型，避免能耗增加；优化启停控制，采用软启动技术，减少电流冲击与能耗。

4.3 基于控制算法的节能优化改进

改进变频器控制算法，提升控制精度与能效，实现节能目标：采用改进型矢量控制算法替代传统 scalar 控制，精准控制磁场强度与推力，减少额外损耗，提升电机效率；引入自适应控制机制，实时识别负载与参数变化，动态调整控制参数，避免能耗增加。

探索模糊控制与 PID 控制结合的复合算法，优化 PID 参数调整能力，减少超调量与调节时间，稳定输出，降低能耗；调整开关频率，减少功率器件开关损耗，提升变频器能效。

4.4 节能优化策略的协同性分析

谐波抑制与节能优化存在协同关系，需协同分析保证优化策略整体性与有效性。谐波抑制可减少损耗、提升能效，为节能优化奠定基础；节能优化中的参数调整可能影响谐波，应避免单一优化加剧谐波污染。

实施时建立协同优化模型，以谐波含量和能耗指标为双重目标，运用多目标优化算法平衡二者关系，同步实现谐波抑制与节能目标，如优化变频器调制频率时需兼顾二者选择最优参数[5]。同时实时监测谐波与能耗数据，动态调整策略，维持协同平衡，防止单一优化影响系统整体性能。

5 谐波抑制与节能优化方案的综合适配性分析

5.1 方案适配性评估维度

建立多维度评估体系，评判整套方案工业适配水平，主要包含四个维度。技术适配性：评估方案对连铸复杂工况适应能力，考察和现场现有设备、控制系统的兼容集成能力。运行稳定性：评估改造之后系统长期运行表现，统计参数波动、故障发生情况，验证对连续生产的保障能力。经济成本：核算装置全生命周期成本，对比节能降损、谐波治理综合收益，分析投资回报水平。工业应用潜力：评估装置操作难度、维护工作量，考察在不同类型连铸电磁搅拌系统的推广能力，判断实际应用价值。

5.2 综合优化效果分析

结合理论与仿真结果对优化效果进行研判。谐波治理层面，该方案可以有效压低低次谐波幅值，抑制高次谐波，将波形畸变率控制在合理区间，削弱谐波带来的各类负面影响，减少设备发热损耗，降低故障发生概率。节能层面，运行参数优化与算法改进能够降低变频器和搅拌系统整体能耗，削减谐波损耗与无效输出损耗，完成性能与能耗协同优化。

5.3 方案优化与完善方向

针对方案尚存不足提出改进方向。技术层面，极端工况下方案适配能力仍可进一步提升，优化滤波参数与控制算法，增强复杂扰动工况适应能力；融合物联网、大数据技术，搭建谐波能耗在线监测预警体系，提升系统智能化水平。经济层面，优化滤波装置结构，选用高性价比元器件，压缩改造成本，提升方案推广价值。应用层面，推动方案和连铸工艺深度融合，针对不同企业设备、工艺现状提供定制化方案；开展小规模工业试验，积累现场实测数据，校验方案可靠性，为大规模工程应用打下基础。

6 结束语

结合连铸行业发展趋势，未来可以从四个方向继续深化研究：第一，开展现场工业试验，搭建实体试验平台，依托生产线实测数据校验方案实际效果，迭代优化控制逻辑；第二，扩大研究边界，把谐波抑制与节能优化拓展至整条连铸生产线，构建全流程治理与优化体系；第三，推进人工智能技术落地，搭建智能预测控制模型，实现系统自适应调节；第四，探索宽禁带半导体等新型器件在大功率变频器当中的应用，同步提升谐波抑制能力与能效水平。相关研究成果可为连铸行业技术进步提供支撑，助力钢铁工业高质量发展。

参考文献：

[1] 陈齐峰.基于谐波抑制技术的变压器电能质量优化方法研究 [J]. 电气技术与经济 ,2025(09):398-401.
[2] 韩霄.基于谐波提取的永磁同步电机谐波抑制与优化运行研究 [D]. 燕山 : 燕山大学 ,2025.
[3] 张建民,袁佑新,刘涛.变频器电力谐波的治理 [J]. 纺织器材 ,2023,50(S1):26-29,57.
[4] 陆雨琦.电气试验中变频电源谐波抑制技术研究及其效果评估 [J]. 流体测量与控制 ,2025,06(05):46-48,56.
[5] 卜锦峰,赵金星,蒋冬.复矢量电流调节器抑制高速永磁电机高次谐波 [J]. 计算机仿真 ,2024,41(06):354-358.