

烧结工艺主抽电机变频器返电技术

张康宁

中冶南方冶金科技公司 湖北 武汉 430000

摘要: 针对烧结主抽电机变频调速运行中再生电能浪费、能耗偏高的问题, 本文研究高压变频器返电技术的工作原理与系统构成, 优化设计共母线拓扑结构与双闭环精准控制策略, 配套完善谐波治理与多重安全保护机制。工程实践表明, 该系统综合返电效率达95.2%, 年回收电量 $2.45 \times 10^6 \text{ kWh}$, 节能与环保效益显著, 可有效解决烧结工况下再生能源低效损耗难题, 具备极高的工业推广价值。

关键词: 烧结工艺; 主抽电机变频器; 返电技术

引言: 烧结主抽风机长期处于变速、变负荷运行状态, 调速过程中产生大量再生电能, 传统能耗制动方式仅能通过电阻耗散能量, 存在能源浪费、设备发热严重、运维成本高等诸多弊端。为提升冶金烧结系统能源利用率, 降低生产能耗与运维成本, 本文开展主抽电机变频器返电技术研究。通过剖析返电机理, 优化系统拓扑与控制策略, 搭建安全稳定的能量回馈系统, 为烧结行业节能改造提供可靠的技术支撑。

1 烧结工艺主抽电机变频器返电技术原理与系统构成

1.1 烧结主抽风机运行工况与再生电能产生机理

(1) 烧结主抽电机变速运行、负压调节工况特征。烧结主抽风机根据料层厚度与风量需求, 常处于变速运行状态, 通过调节转速维持风箱负压稳定。该工况下电机转矩与转速频繁变化, 为再生电能产生提供运行基础。(2) 风机惯性运行下电机发电状态转换原理。当变频器输出频率降低或风机因系统惯性转速高于同步转速时, 电机转子磁场切割定子绕组方向反转, 定子绕组感应电动势相位超前于电压, 电机由电动状态转换至发电状态, 机械动能转化为电能回馈至变频器直流母线^[1]。

(3) 再生电能的产生条件与能量特性分析。再生电能产生条件是电机实际转速超过变频器给定频率对应的同步转速, 且直流母线电压上升至整流输出电压以上。该能量具有间歇性、电压波动大、谐波含量高的特点, 需经滤波稳压后方可并网回馈。

1.2 变频器返电核心工作原理

(1) 高压变频器能量回馈基本工作机制。回馈型变频器采用IGBT功率器件构成有源前端, 当检测到直流母线电压超过阈值时, 控制IGBT导通, 将直流电能逆变为与电网同频同相的交流电, 实现能量反向输送。(2) 直流母线电压稳压与能量反向输送原理。通过电压外环、电流内环双闭环控制, 实时调节逆变器输出电压幅值与

相位, 维持直流母线电压在设定范围内, 确保能量反向输送时母线不过压、不欠压, 运行平稳。(3) 并网回馈的电能转换与滤波稳压原理。逆变输出的PWM波经LCL滤波电路滤除高次谐波, 再经工频变压器隔离升压后并网, 同时利用电网电压定向矢量控制实现功率因数校正与并网电流正弦化。

1.3 返电系统整体结构与核心设备

(1) 主抽电机变频回馈系统整体拓扑结构。系统由进线断路器、回馈型变频器、输出滤波器、升压变压器、并网断路器及控制单元构成, 主回路采用交-直-交拓扑, 能量可双向流动。(2) 回馈型变频器、断路器、滤波装置核心配置。回馈型变频器选用带能量回馈功能的高压单元, 断路器配备欠压脱扣与过流保护, 滤波装置由LCL滤波器与RC吸收回路组成, 确保并网电能质量达标。(3) 工频与变频回馈模式切换联锁结构。设置机械联锁与电气联锁双重保护, 确保变频回馈与工频运行状态互斥, 通过PLC采集断路器状态、母线电压等信号, 实现模式切换的安全闭锁与故障自动投切。

2 烧结工艺主抽电机变频器返电系统优化设计与关键技术

2.1 返电系统拓扑方案优化设计

(1) 传统能耗制动与回馈制动方案对比分析。传统能耗制动通过制动单元将再生电能消耗在电阻上, 结构简单但能量利用率低, 且电阻发热严重, 需配置大功率散热装置, 适用于小功率、短时制动场合。回馈制动则将再生电能逆变回馈至电网, 能量利用率高, 长期运行经济性显著, 但控制复杂、并网谐波需治理。针对烧结主抽电机功率大、运行时间长、频繁调速的特点, 回馈制动方案在节能效益与系统综合性能上明显优于能耗制动, 是主抽风机返电改造的优选方向。(2) 适配烧结工况的共母线回馈拓扑设计。烧结系统中多台主抽风

机变频器共用一段直流母线, 每台变频器整流单元统一供电, 逆变单元独立驱动电机。当某台风机处于发电状态时, 再生电能通过公共直流母线供给其他电动状态变频器, 实现能量内部消纳, 剩余电能再经统一回馈单元并网。该拓扑结构减少了回馈单元数量, 降低了设备投资, 同时提高了能量交换效率, 适配烧结多机组交替调速、发电与电动工况并存的运行特征^[2]。(3) 多机组并联返电系统布局优化方案。多台回馈单元并联接入公共并网点, 采用N+1冗余配置, 当主回馈单元故障时备用单元自动投入。布局上采用分布式变频器就地安装、集中式回馈柜统一并网的架构, 缩短变频器至电机的电缆长度, 减少线路损耗与电压降。同时优化各回馈单元载波相位, 通过交错并联技术降低并网电流总谐波畸变率, 提高系统整体运行可靠性。

2.2 返电控制策略优化

(1) 基于烧结负压稳定的变频调速回馈控制逻辑。返电控制以维持烧结负压稳定为优先目标, 变频器依据风箱负压设定值与反馈值偏差调节电机转速, 回馈单元仅当直流母线电压超过回馈启动阈值时自动投入。控制逻辑设置回馈死区, 避免母线电压小幅波动引起回馈单元频繁投切, 确保负压调节过程不因回馈动作而受扰动。同时将负压变化率引入前馈控制, 提前调节转速给定值, 抑制负压超调。(2) 直流母线电压精准闭环控制策略。采用电压外环、电流内环双闭环PI控制结构, 电压环输出作为电流环给定, 电流环调节回馈电流大小与方向。引入负载电流前馈补偿, 动态修正电压环输出, 增强系统对负载突变的响应能力。母线电压给定值设定在整流输出电压的1.05~1.10倍之间, 兼顾回馈启动灵敏度与母线安全裕度。同时设置电压变化率限制环节, 防止回馈电流突增导致并网冲击^[3]。(3) 工况波动下返电功率自适应调节算法。针对烧结机布料不均、风量波动等工况扰动, 设计基于母线电压变化率的回馈功率自适应调节算法。检测母线电压变化速率与方向, 动态调整回馈电流给定值, 使回馈功率跟随发电功率变化。当检测到连续多个工频周期内回馈功率波动超过设定范围时, 自动平滑调整回馈系数, 避免功率振荡。算法同时监测电网电压相位与幅值, 确保回馈功率变化过程中并网电流始终与电网同步。

2.3 系统抗干扰与安全保护技术

(1) 电网谐波抑制与电能质量优化技术。回馈并网侧采用LCL型滤波器配合有源阻尼控制, 有效衰减开关频率附近谐波分量。在此基础上增加高通滤波器支路, 滤除高次谐波残留。控制算法中嵌入重复控制补偿环

节, 针对工频整数倍特征谐波进行定点抑制, 使并网电流总谐波畸变率控制在5%以内, 功率因数不低于0.95, 满足电网并网电能质量要求^[4]。(2) 过压、过流、并网异常故障保护机制。直流母线过压保护采用三级动作策略: 一级动作降低回馈功率设定值, 二级动作切除部分回馈单元, 三级动作封锁全部IGBT脉冲并投入制动电阻短时泄放能量。过流保护设置快速比较器, 响应时间小于2 μ s, 动作后封锁驱动脉冲。并网异常保护设置电网过欠压、过欠频、相序检测、孤岛检测等多重判据, 任一条件触发即断开并网断路器并发出告警信号。(3) 烧结停机、设备故障下返电系统联锁保护。当烧结机联锁停机信号触发时, 返电系统立即关闭回馈功能, 同时变频器按设定减速率控制电机减速停车, 再生能量由制动单元短时处理。主抽电机故障、变频器重故障、并网断路器跳闸等条件下, 返电系统接收联锁信号后执行三级解列: 一级封锁回馈逆变脉冲, 二级断开并网接触器, 三级闭合直流母线短接电阻实现能量快速泄放, 确保返电系统与主工艺系统安全隔离。

3 工程应用效果与节能效益分析

3.1 工程应用实施方案

(1) 现场设备改造与系统安装调试方案。现场改造涵盖原变频器直流接口扩展、回馈单元柜体安装、并网变压器与滤波柜就位、控制及动力电缆敷设等环节, 施工前完成停电申报与安全交底, 高压作业严格遵循电气安全规程。调试按先单机后联调顺序执行, 依次完成回馈单元空载电压输出检验、阻性负载下回馈电流精度校验及与主抽变频器的能量双向流动联调。(2) 变频返电系统参数整定与调试流程。核心参数整定包括直流母线电压回馈启动阈值、电压环与电流环PI参数、滤波器阻尼系数及并网锁相环响应带宽。调试流程依次为控制电上电检查、直流母线预充电、回馈单元软启动并网、逐步升功率至额定值并核验各保护动作值, 每项调整均记录波形以确保动态响应达标。(3) 新旧系统切换与试运行保障措施。切换采取分步投运策略, 单台回馈单元带单台风机连续运行72小时无异常后再逐台增投。试运行期间专人值守, 实时监控母线电压、回馈电流、功率因数及IGBT温度等参数, 制定应急方案, 异常时自动切回能耗制动保障生产连续。

3.2 系统运行性能测试分析

(1) 设备运行稳定性与工况适配性测试。在烧结机不同料层厚度、不同台车速度工况下连续监测72小时, 记录回馈单元启动次数、回馈功率分布、母线电压波动范围。测试结果表明, 回馈单元在风机减速段、风门调

节过渡段均能可靠启动,母线电压波动控制在 $\pm 3\%$ 额定值以内,未出现误动作或拒动作现象,适配烧结多工况运行需求。(2)并网电能质量、谐波指标检测分析。并网点连续监测数据显示,并网电流总谐波畸变率均值为3.2%,各次谐波含有率满足GB/T14549标准,功率因数稳定在0.96~0.98之间,滤波装置对5次、7次、11次特征谐波抑制效果显著,电流波形正弦度良好。(3)不同生产负荷下返电效率对比测试。在60%、80%、100%三种负荷工况下实测,额定功率附近返电效率最高达96.5%,低负荷工况因变压器励磁损耗占比增大效率降至93.8%,综合加权平均返电效率为95.2%,显著优于能耗制动方式^[5]。

3.3 节能与经济效益分析

(1)改造前后系统能耗数据对比分析。改造前年均制动消耗电量约 2.8×10^6 kWh,返电系统投运后再生电能回馈率达91.3%,扣除系统自身损耗,有效回收电量约 2.45×10^6 kWh/年,综合节能率约6.8%,节能效果突出。

(2)年度节电效益与设备运维成本优化分析。按工业电价0.62元/kWh计,年节电收益约151.9万元;同时取消大功率制动电阻,年减少更换维护费约12万元,减少散热空调用电约5.2万元/年,扣除返电系统年维护费8万元,综合年度净收益约161.1万元,静态投资回收期约1.8年。(3)技术应用的环保价值与行业推广效益。年节电 2.45×10^6 kWh折算标准煤约980吨/年,减排CO₂约2440吨/年,环保效益可观。该技术在烧结主抽风机上的成功实践,为冶金行业高压变频调速设备再生能量回收提供了可复制方案,具备良好行业推广前景。

3.4 现存问题与优化改进方向

(1)实际运行中返电系统存在的短板问题。运行中发现:低负荷工况因变压器励磁损耗偏高导致返电效率下降;烧结突发大幅减料时回馈功率跟踪存在约200ms滞后,致母线电压短时冲高;多机组同时回馈时并网点谐波叠加,总谐波畸变率较单机上升约0.8个百分点。(2)复杂烧结工况下的技术优化改进方案。针对低负荷效率

问题,拟增设变压器旁路接触器,低负荷时切换为低压直并方式;针对功率跟踪滞后,引入给料量前馈信号至回馈控制器,提前修正功率给定;针对谐波叠加,优化各机组载波相位差,采用载波移相调制策略抵消部分谐波。(3)未来智能化、高效化返电技术发展方向。发展方向包括:基于数字孪生构建虚拟仿真平台,实现策略离线优化与故障预判;引入人工智能分类识别烧结工况,自适应选择最优回馈模式;研发高压大容量SiC基回馈单元,进一步提升效率;探索回馈电能与储能协同调控,实现再生电能灵活存储与峰谷套利,提升系统综合经济效益。

结束语

本文优化的变频器返电系统可高效回收烧结主抽电机再生电能,大幅提升能源利用率,有效改善并网电能质量,实现显著的经济与环保双重效益。同时梳理了系统低负荷效率偏低、功率跟踪滞后等现存问题,并给出针对性改进方案。后续可结合人工智能与数字孪生技术优化控制策略,融合储能技术拓展应用场景,推动烧结节能技术向智能化、高效化方向发展。

参考文献

- [1]王磊,孙晓峰,张健.烧结主抽风机高压变频能量回馈系统改造与返电特性分析[J].冶金自动化,2024,48(03):76-81.
- [2]刘军,陈世伟.汽电双驱模式下烧结主抽风机变频反送电技术应用[J].节能技术,2025,43(02):156-161.
- [3]赵文超.大型烧结主抽同步电机高压变频回馈节能改造研究[J].电工技术,2024,25(12):132-134.
- [4]周海涛,吴志峰.钢铁烧结主抽风机变频能量回收系统谐波抑制与稳定控制[J].电力电容器与无功补偿,2023,44(05):102-107.
- [5]杨鑫.烧结主抽风机余热耦合变频返电节能技术实践[J].冶金能源,2024,43(06):45-49.