

高压变频器调速系统稳定性优化与控制策略研究

杨燕燕 倪 力

河南安阳钢铁集团有限公司 河南 安阳 455004

摘 要: 随着工业自动化对调速系统性能要求的提升, 高压变频器调速系统在弱电网等复杂工况下的稳定性问题日益突出。本文分析高压变频器主电路拓扑结构、控制策略与系统动态响应的关系, 探讨弱电网条件下的稳定性挑战, 提出整流器控制算法改进、载波移相与分段PWM技术应用、系统参数整定与保护配置等优化路径, 并研究三级控制系统架构、矢量控制与直接转矩控制实现方案及数字化故障诊断体系, 为高压变频器调速系统稳定性提升提供技术参考。

关键词: 高压变频器; 调速系统; 稳定性优化; 控制策略

引言

高压变频器调速系统在电力、冶金、石化等领域承担电机驱动任务, 系统稳定性直接关系生产安全与设备寿命。当前高压变频器在弱电网接入、大功率输出等工况下频繁出现振荡、谐波超标等问题, 传统控制策略难以满足稳定性要求。系统稳定性受主电路拓扑、控制算法、电网强度等多因素耦合影响, 需从电路结构、控制策略、参数整定三个维度协同优化。本文对高压变频器调速系统的稳定性机理进行分析, 提出针对性优化措施与控制策略。

1 高压变频器调速系统的技术架构与稳定性机理

1.1 主电路拓扑结构对稳定性的影响

高压变频器主电路拓扑决定了系统输出波形质量与谐波含量, 直接作用于调速系统的运行稳定性。当前主流拓扑包括高-低-高结构、单元串联多电平结构、二极管钳位三电平结构、飞跨电容钳位结构及多管直接串联结构^[1]。高-低-高方案通过变压器实现电压变换, 利用成熟低压变频技术完成调速, 但两次变压过程产生较大损耗, 输出含有高次谐波与直流分量, 效率偏低, 占地面积大, 该方案已逐步退出市场。单元串联多电平拓扑采用多个低压PWM功率单元串联叠加实现高压输出, 每个功率单元独立完成整流、滤波与逆变, 输出波形接近正弦波, 谐波含量低, 输入功率因数高, 无需额外谐波滤波器。二极管钳位三电平结构通过钳位二极管将器件电压应力降至直流母线电压的一半, 输出相电压为三电平, 开关频率降低, 器件动态均压问题得以解决。飞跨电容钳位结构以电容替代钳位二极管, 开关状态选择更灵活, 电压合成自由度更高, 但电容体积庞大, 控制复杂度上升。多管直接串联结构将IGBT直接与高压串联, 摒弃输入输出变压器, 体积最小, 但需解决器件动态均压与dv/dt问题。

1.2 控制策略与系统动态响应的关系

控制策略是高压变频器调速系统稳定性的核心。上层控制策略包括恒压频比控制、矢量控制、直接转矩控制与滞环电流控制。恒压频比控制通过维持输出电压与频率比值恒定来保持电机磁通量稳定, 结构简单, 适用于调速范围要求不高的场景。矢量控制通过坐标变换将定子电流分解为磁通分量与转矩分量, 实现解耦控制, 动态响应速度快, 调速精度高, 可实现四象限运行。直接转矩控制直接对转矩与磁链进行控制, 省去坐标变换环节, 响应更快, 但转矩脉动较大。PWM控制策略包括SPWM、空间矢量SVPWM与分段PWM。SPWM通过脉冲宽度调制使输出波形逼近正弦波, 减少谐波。SVPWM利用电压空间矢量的组合, 直流电压利用率高于SPWM。分段PWM结合载波移相技术, 在级联型变频器中可有效降低共模电压与输出谐波。控制策略的选择需匹配主电路拓扑与负载特性, 策略之间的协调程度决定系统整体稳定裕度。

1.3 弱电网条件下的稳定性挑战

交流电网因存在电网阻抗与变压器漏感而呈现弱电网特性。高压变频器接入弱电网时, 整流器与电网之间的交互作用引发振荡风险。传统PI控制器参数设计复杂, 动态响应慢, 在弱电网下稳定裕度不足。有限集模型预测电流控制算法开关频率不固定, 控制精度受限。级联型中高压变频器的功率单元内三相PWM整流器在弱电网下易出现网侧相电压、相电流与直流电压振荡。系统稳定性取决于整流器控制算法与电网阻抗之间的匹配程度^[2]。阻抗模型分析表明, 控制器输出阻抗与电网阻抗的交点若落入不稳定区域, 系统将发生振荡。广义奈奎斯特判据可用于验证系统在弱电网下的稳定边界。

2 高压变频器调速系统稳定性优化路径

2.1 整流器控制算法的改进

整流器控制算法的性能直接决定系统在弱电网下的稳定表现。传统基于PI控制器的直接电流控制算法内环PI参数设计依赖经验,动态响应速度受限于控制器带宽,在电网阻抗波动时易失稳。模型预测电流控制算法通过建立系统数学模型,在每个控制周期内预测未来时刻的电流值,选取使代价函数最小的开关状态,实现快速电流跟踪。有限集模型预测电流控制算法开关频率不固定,导致输出谐波频谱分散,增加滤波难度。连续集模型预测电流控制算法在有限集基础上引入虚拟矢量,提升平均开关频率,降低网侧电流谐波含量,同时保持电流控制精度。两种模型预测控制算法与PI直接电流控制算法之间存在本质联系,模型预测算法可视为PI控制器的非线性扩展,在弱电网下具有更大的稳定裕度。硬件在环半实物实验平台验证了模型预测电流控制算法能抑制网侧相电压、相电流与直流电压振荡,提升弱电网下系统稳定性。

2.2 载波移相与分段PWM技术的应用

载波移相SPWM技术通过对各功率单元的载波施加相位偏移,使各单元输出谐波在相位上相互抵消,降低总输出谐波含量。在级联型高压变频器中,载波移相PWM控制策略配合分段PWM技术,可在输出谐波含量与共模电压两个维度实现优化。分段PWM控制策略根据级联型变频器的拓扑特点,将载波分为若干段,每段内采用不同的调制方式,在保证输出电压质量的同时降低开关损耗^[3]。该策略与载波移相PWM结合,通过仿真分析验证了其在输出谐波抑制方面的有效性。电压胞级联型高压变频器采用分段PWM控制策略,配合载波移相技术,在启动与过渡过程中表现出较好的稳定性。DSP与CPLD组合方案实现多路PWM信号生成,解决了专用PWM发生器无法满足多路信号需求的问题,载波频率与死区时间具有高度可调整性,并具备死区补偿功能。

2.3 系统参数整定与保护配置

参数整定是保障系统稳定运行的基础环节。速度基准、加减速时间、V/F曲线等参数需通过实验与计算确定。加减速时间设置需匹配负载惯性,风机类大惯量负载加速时间设为十至十五秒,小惯量设备设为五至八秒。V/F曲线根据负载类型选择,恒转矩负载选线性曲线,变转矩负载选平方减转矩曲线。跳频点设置用于避开机械共振频段。过载防护设置三重保险:过载因子设为额定电流的一定比例,启用电机过热保护,设定瞬时电流限幅。保护参数中,过流保护在对称故障时动作,负序电流保护在外部不对称故障时动作,内部不对称故障依据专门判据处理。参数设置不合理直接引发故障,切换过程中需先将风门关至合适位置,调节机构开度至适当比例后

再投入变频运行。

3 高压变频器调速系统控制策略

3.1 三级控制系统的架构设计

高压变频器微机控制系统采用上位机、主控机、前沿机三级架构。上位机负责人机交互与系统监控,主控机完成核心控制运算,前沿机执行功率器件驱动。主控机由DSP与单片机组成,DSP执行电机辨识、磁通观测、电流环与速度环控制,单片机负责与上位机通信及数据传递。前沿机由一片DSP与两片CPLD组成,DSP接收参考电压与频率生成PWM驱动信号,CPLD1发送PWM驱动脉冲,CPLD2检测功率单元运行状态并输出故障信息。三级系统通过双口RAM芯片实现数据交互,信息传递采用光纤通信,抗干扰能力强。前沿机中CPLD替代EPGA,在复杂状态机控制、定时器使用与地址译码方面具有优势,无需额外安装ROM。上位机通过工业以太网与主控机连接,接收输出电压、输出电流、直流母线电压、功率单元温度等参数,以曲线、柱状图形式展示,操作人员可设置运行参数、下达启停指令、查询故障记录^[4]。主控机DSP芯片完成矢量控制算法运算,采样周期设定在微秒级别,电流环响应时间控制在毫秒级别。单片机通过串口与上位机通信,上传运算结果并转发控制指令。双口RAM作为主控机与前沿机数据通道,DSP写入PWM占空比与开关状态指令,前沿机DSP读取数据生成驱动脉冲,传输延迟控制在纳秒级别。光纤通信消除电磁干扰对控制信号的影响,保障大功率开关器件频繁动作环境中的信号完整性。

3.2 矢量控制与直接转矩控制的实现

矢量控制通过坐标变换实现异步电动机解耦调速。三相定子电流经3/2变换转换为静止dq坐标系电流分量,再经转子磁场定向旋转变换得到旋转坐标系下的磁通电流分量与转矩电流分量。M-T坐标系定向于转子磁链并同速旋转,M轴沿转子总磁链方向,T轴垂直于磁链方向。给定转速与实际转速的差值通过调节转矩电流进行判断,闭环系统实现转速精确跟踪。矢量控制须执行电机辨识,静态辨识获取定子电阻、转子电阻、互感等参数,未做辨识将导致转矩计算偏差。辨识在系统上电后自动执行,向电机注入低频电压信号,采集电流响应后计算参数并存入主控机。M轴电流控制磁链幅值,T轴电流控制转矩输出,两个电流环独立运行,PI调节器参数根据辨识结果整定,转速环输出作为T轴电流给定。直接转矩控制省去坐标变换环节,直接对转矩与磁链进行滞环控制,响应速度快于矢量控制,但转矩与磁链脉动较大,需配合空间矢量调制改善输出波形。磁链观测器根据定子电压与

电流计算磁链幅值与角度,转矩计算器根据磁链与电流叉乘获得转矩值,磁链与转矩分别进入滞环比较器,输出结果直接决定逆变器开关状态。滞环带宽设定影响转矩脉动幅度与开关频率,带宽过小导致开关频率升高、损耗增加,带宽过大导致转矩脉动加剧、电流谐波含量上升。两种策略根据负载需求选用:风机水泵类负载采用矢量控制,起重提升类负载采用直接转矩控制。

3.3 数字化实现与故障诊断体系

高压变频器数字化实现采用DSP+CPLD+MCU组合方案。DSP负责高速控制运算,CPLD完成多路PWM信号生成与逻辑保护,MCU处理通信与显示任务。电压胞级联型高压变频器的数字化方案中,DSP获取信息通过主机传送,与CPLD合作完成分段式SPWM控制,载波频率与死区时间可调,具备死区补偿功能。主电路运行状态通过同步串口反馈至主控机,形成闭环监控。故障诊断体系覆盖过流、过压、过热、输出不平衡等故障类型。过流故障区分加速跳闸与恒速跳闸,前者延长加速时间,后者检查机械卡阻或绕组短路。过压故障在减速时触发需增加减速时间或加装制动电阻,运行中随机触发需检查电网电压波动。输出不平衡时检测IGBT导通压降与驱动电路光耦输出。预测性维护通过监控散热器温度与IGBT导通损耗变化趋势,在参数漂移前发出预警^[5]。系统在强电网与弱电网模拟环境下进行半实物实验对比,验证控制算法在不同电网强度下的稳定性能。故障诊断体系中,过流保护设置两级阈值:一级阈值为额定电流的一定倍数,持续时间超过设定值后触发降频运行;二级阈值更高,触发后立即封锁PWM输出。过压保护监测直流母线电压,电压超过设定上限时启动制动电阻消耗多余能量。过热保护在功率单元散热器与电机绕组设置温度传感器,温度超过限值时降额运行或停机。输出不平衡通过检测各功率单元输出电流差异判断,差异超过设定比例时封锁故障单元并保持系统降功率运行。预测性维护系统记

录IGBT导通压降变化数据,导通压降随运行时间增加而上升,上升速率超过阈值时提示更换器件。半实物实验平台中,通过可调阻抗模拟强电网与弱电网环境,在两种条件下分别运行控制算法,采集网侧电流波形与直流母线电压波动数据,对比分析算法的稳定性指标。实验数据表明,改进后的控制算法在弱电网条件下网侧电流总谐波畸变率降低,直流母线电压波动幅度减小,系统稳定裕度提升。

结语:

高压变频器调速系统稳定性优化需从拓扑结构、控制算法、参数整定三个层面协同推进。整流器控制算法改进解决了弱电网下的振荡问题,载波移相与分段PWM技术降低了输出谐波含量,三级控制系统架构与数字化方案保障了控制精度与响应速度。矢量控制与直接转矩控制的合理选用匹配了不同负载需求,故障诊断体系与预测性维护提升了系统运行可靠性。半实物实验验证了优化策略在弱电网条件下的有效性,系统稳定裕度得到提升。

参考文献:

- [1]周彬华.PLC与变频器协同控制策略在电机驱动系统中的应用研究[J].新潮电子,2025(3):175-177.
- [2]王宁.电气传动系统中变频器的智能化控制策略[J].张江科技评论,2025(11):40-42.
- [3]刘宏强.高压变频器驱动的电动机谐波抑制与效率优化[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026(2):034-037.
- [2]丁先之,邹佳璇.高压直流输电系统谐波抑制优化措施研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(9):113-116.
- [5]孟祥涛.高压变频器在煤矿电力系统中的优化设计与应用[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(7):016-019.