大型电动机串自耦变启动控制逻辑应用与研究

许行军
新疆广汇煤炭清洁炼化有限责任公司　新疆　哈密　839000

摘　要：大型电动机直接启动会产生数倍额定电流的冲击电流，易造成电网压降、设备损耗等问题，自耦变压器降压启动是大型电机平稳启动的主流技术。本文围绕大型电动机串自耦变启动技术，阐述其技术原理与特性，系统分析核心控制逻辑、运行流程、联锁保护及现场应用要点，探究技术应用中的常见问题与优化策略，总结控制逻辑的工程应用价值，为工业大型电机安全、稳定、高效启动运行提供技术参考。

关键词：大型电动机；自耦变压器；启动控制逻辑；应用

引言

工业生产中大型高压、大功率电动机是给排水、冶金、化工等行业的核心动力设备，直接启动产生的强电流冲击会严重影响电网稳定性与设备使用寿命。自耦变串接降压启动凭借启动电流小、转矩可调、适配性强的优势，广泛应用于大型电机启动场景。控制逻辑作为启动系统的核心，直接决定电机启动安全性与平稳性。本文结合工业现场应用实际，系统研究串自耦变启动技术与控制逻辑，优化工程应用方案。

1 大型电动机串自耦变启动技术概述

大型电动机串自耦变启动技术是工业领域应用广泛且技术成熟的大型高压大功率电动机降压启动方式，该技术的核心运行原理为电动机启动初始阶段，将自耦变压器串联接入设备主供电回路，利用自耦变压器多档位抽头结构降低电机定子绕组的输入启动电压，从根源上抑制电机启动瞬间产生的超大冲击电流，解决大功率电机直接启动带来的各类运行隐患。在电机启动过程中，随着输入电能持续供给，电机转速逐步提升并趋近额定运行转速，回路工作电流趋于平稳稳定后，控制系统自动切除串联在主回路中的自耦变压器，使电动机直接接入额定工作电压，进入全压常态化运行状态。相较于传统星三角启动、常规软启动等电机启动方式，串自耦变启动技术不局限于电机定子绕组的接线形式，可适配各类高压大型电动机，同时可通过65%、80%等不同规格抽头，精准调节电机启动电压与启动转矩，能够匹配大功率、高启动负载、重载启动的复杂工业电机运行工况。整套启动控制系统主要由自耦变压器、高低压控制接触器、时间继电器、电气保护装置及配套控制回路构成，设备组成结构简单，整体运行稳定性与可靠性较高，日常检修、维护及运维成本较低。实际运行数据表明，该启动方式可将电网侧电机启动电流控制在直接启动电流的30%-50%，有效削弱电机启动瞬间对电网的冲击，避免电网电压大幅骤降、供电系统继电保护装置误动作、电机绕组短时过热老化、设备机械结构冲击磨损等常见问题，能够满足冶金、化工、电力、矿山等行业高压大功率工业电动机的严苛启动与运行要求，适配重载、高频启动、电网容量有限的工业生产场景，是目前工业领域大型重载电动机启动作业中通用性强、实用性高的优选技术方案。

2 大型电动机串自耦变启动控制逻辑应用

2.1 基础启停控制逻辑与运行流程

大型电动机串自耦变启动基础控制逻辑包含降压启动、延时切换、全压运行、停机复位四个核心阶段，依托电气元件时序配合完成自动化控制。设备处于待机状态时，主运行接触器与启动接触器保持断开，系统完成回路、元件、故障自检且无异常后，进入待命工作状态。系统接收启动指令后，启动接触器优先闭合，自耦变压器接入电机主回路，电机以降压方式启动，降低启动冲击电流[1]。同时控制回路内置时间继电器同步启动计时，延时参数根据电机额定功率、设备负载工况设定，大功率电机常规延时区间为8至15秒。延时过程中，电机转速持续上升，主回路定子启动电流逐步下降，当电流与转速达到系统预设切换阈值，时间继电器触点动作。控制系统执行分步切换逻辑，先断开启动接触器，切除自耦变压器启动回路，再闭合主运行接触器，电机转入工频全压运行模式。设备接收停机指令后，主运行接触器断开，电机断电停止运转，所有控制元件、继电装置全部复位，完成一次完整启停循环。系统设置固定时序优先级，锁定各动作执行顺序，防止接触器无序动作，保证电机启动及运行流程稳定可控。

2.2 电气联锁与互锁控制逻辑

电气联锁与互锁控制是大型电机自耦变启动系统的核

心安全逻辑，主要用于规避双接触器同时吸合引发的电源短路、自耦变压器过载烧毁、电机启动故障等电气问题。该控制逻辑分为硬件互锁和软件时序联锁两部分，同时搭配多项辅助联锁保护，保障设备稳定运行。硬件层面，系统为启动接触器与主运行接触器设置电气互锁结构，将两类接触器的常闭辅助触点交叉接入对方的控制回路，当任意一个接触器得电吸合时，可直接切断另一接触器的控制回路，使其无法得电动作，从硬件层面杜绝两相、三相短路事故的发生。软件层面，系统设置固定的时序联锁逻辑，明确降压启动优先、全压运行后的工作顺序，在系统未完成降压启动延时、电机转速未达到额定标准的情况下，持续闭锁运行接触器回路，禁止合闸操作，避免提前切换、故障切换等违规操作[2]。此外，系统配备启停联锁保护，电机运行过程中自动屏蔽启动指令，禁止设备重复启动，防止频繁启动造成电机绕组、变压器及线路元器件损坏。系统还集成柜门联锁与负载压力联锁辅助逻辑，设备防护柜门未闭合、负载运行参数异常时，启动程序直接锁定，无法触发启动动作，全面保障设备启动与运行的安全性和稳定性。

2.3 故障检测与保护控制逻辑

大型电机自耦变启动系统配置全套故障检测与保护控制逻辑，可针对启动及运行过程中的短路、过载、欠压、缺相、变压器过热等故障实现实时监测、精准判定、快速保护。主回路发生短路故障时，系统短路保护装置瞬时响应，快速切断设备总供电电源，同时控制系统锁定当前故障代码，禁止设备二次启动，防止故障扩散引发电气烧毁、线路起火等安全事故。电机启动过程出现过载问题时，回路电流继电器持续采集工作电流，若启动延时结束后，回路电流仍未回落至额定区间，系统判定启动失败，自动断开启动回路，终止启动流程，并触发声光故障报警信号。针对电网运行异常工况，系统电压检测模块实时采集三相电网电压参数，电网欠压、三相缺相、电压失衡等问题出现时，系统直接闭锁启动程序，避免电机低压运行过载烧毁。系统增设自耦变压器过热保护，实时采集变压器温度数据，温度超出额定阈值时，立即切断变压器工作回路，终止启动动作。所有故障数据、报警信息可实时上传至工控系统，为运维人员故障排查、设备检修、参数调整提供数据支撑。

2.4 就地与远程协同控制逻辑

大型电机自耦变启动控制系统配置就地手动、远程自动双控制模式，两种模式相互配合，适配设备调试、检修、日常生产运行等不同工况需求。就地手动控制模式依托现场控制柜操作按钮实现设备启停，模式开启后，控制系统自动屏蔽所有远程控制指令，仅响应本地操作信号，主要应用于设备出厂调试、停机检修、现场应急处置等场景，保障本地操作的唯一性与安全性。远程自动控制模式依托PLC及上位工控系统实现自动化运行，控制系统可接收远程启停指令，同步采集电网运行状态、设备实时工况、生产流程参数，依据预设逻辑自动完成电机降压启动、延时切换、全压运行、停机复位等全流程动作，同时实时上传设备运行电流、工作电压、设备温度、故障状态等核心数据。双控制模式设置逻辑互锁，两种模式无法同时启用，模式切换需满足设备待机、无故障报警、主回路断开等前置条件，避免多指令冲突引发设备误动作。系统设置分级操作权限，生产运行过程中远程自动模式优先锁定就地手动模式，防止人为误操作干扰生产线稳定运行，保障工业生产流程连续可靠。

3 大型电动机串自耦变启动控制逻辑优化

3.1 传统控制逻辑存在的缺陷

大型电动机串自耦变传统启动控制采用继电器接触器控制方式，依靠固定延时参数完成启动与运行回路切换，工业应用适配性较差。固定延时参数为人工预设定值，无法跟随设备负载变化、电网电压偏差、设备老化等现场工况动态调整。电机轻载启动工况下，固定延时设置过长，自耦变长时间处于工作状态，会出现持续过载发热问题，加速设备绝缘老化。电机重载启动工况下，固定延时设置不足，电机未完成升压稳流就完成回路切换，会产生较大的电网冲击电流，损伤电机与配电设备[3]。传统控制体系保护功能有限，仅配置基础过流、短路保护功能，无法识别启动阶段谐波异常、电网瞬时电压波动、轻微持续过载等故障状态，存在故障漏报、误报问题。设备联锁控制程序结构简单，未设置抗干扰机制，工业现场电磁信号会干扰接触器动作时序，造成设备启动失败、回路误切换等问题。同时系统无数据采集与工况分析功能，不具备故障预判和参数自适应调节能力，设备运维依赖人工经验，整体运维效率偏低。

3.2 基于PLC的智能化控制逻辑优化

针对传统自耦变启动控制逻辑的短板，采用PLC可编程控制器重构设备控制逻辑，实现控制流程智能化升级。系统取消传统固定延时切换模式，搭建电流、转速双阈值判断体系，通过PLC实时采集电机启动阶段的运行电流、转子转速核心参数，以电流稳定回落、转速达到额定标准作为回路切换判定条件，适配不同负载工况的启动需求。依托PLC可编程特性，优化设备联锁与时序控制逻辑，增加现场信号滤波与数据校验程序，屏蔽工

业电磁干扰对控制信号的影响，规避接触器误动作、时序错乱问题。系统拓展设备保护维度，新增电网谐波监测、电压暂降保护、启动次数限制、故障超时重启闭锁等控制逻辑，覆盖电机启动、运行全周期故障场景。控制程序采用模块化设计，将启停控制、联锁保护、信号通讯、故障检测功能拆分独立模块，各模块协同运行且互不干扰。模块化结构可直接实现程序局部调试、修改与升级，无需整体改动控制系统，有效提升控制体系的稳定性、灵活性，降低设备程序维护难度。

3.3 闭环无冲击切换控制逻辑优化

传统自耦变启动控制为开环切换模式，回路切换过程存在短暂断电间隙，会引发电流突变、电机转矩波动、电网电压闪烁等问题，影响设备与电网稳定运行。优化设计闭环无冲击切换控制逻辑，调整接触器动作时序，实现启动回路与运行回路无缝切换，消除切换过程的电流、电压冲击。优化核心为更改传统先分后合的切换方式，采用先合后分的闭环控制逻辑。启动流程完成后，系统先闭合主运行接触器，使电机接入全压电网实现额定电压供电，间隔预设短时时序后，再断开启动接触器与自耦变降压回路，全程保持电机持续带电运行，无断电停顿。控制系统增设电压、电流闭环监测单元，实时采集切换阶段的电网与设备运行参数。根据电网电压波动、负载变化动态微调切换间隔时序，适配现场工况变化。该控制逻辑可彻底消除回路切换产生的冲击扰动，降低电机运行机械应力，减少电网电压波动，延长电机、接触器、自耦变等设备使用寿命，满足高精度、高稳定性的工业生产运行要求。

3.4 控制逻辑的运维适配性优化

结合工业现场设备运维工作需求，对电机启动控制逻辑进行适配性优化，提升设备故障处置效率与日常运维便捷性。优化设备故障诊断逻辑，建立标准化分级故障研判机制，将设备故障划分为启动故障、运行故障、回路故障、设备元件故障四大类别。控制系统通过实时数据比对、回路信号检测，精准定位故障点位，同步匹配对应故障成因与标准化处置方案，缩短人工故障排查与检修时长。设备新增上电自检逻辑，设备待机上电后，自动完成回路通断检测、控制元件状态校验、电网电压电流参数核查，提前排查隐性故障，避免设备带故障启动。优化设备启停记忆与故障复位逻辑，设备因故障停机后，系统自动锁定故障状态，锁定状态未解除前设备无法重启，防止故障重复触发、扩大故障范围[4]。系统增加运行数据存储与趋势分析功能，完整记录电机每次启动的电压、电流、时序等核心参数，形成设备运行数据台账，为设备定期检修、控制参数优化、工况数据分析提供数据支撑，实现设备被动故障维修向主动预判运维的转变。

结束语

大型电动机串自耦变启动技术凭借优异的降压限流性能，成为工业大功率电机启动的核心技术，控制逻辑的合理性与稳定性直接决定设备启动质量与电网运行安全。通过梳理基础启停、联锁保护、故障防控、远近协同的全套控制逻辑，剖析传统控制模式的短板，完成智能化、无冲击、高适配性的逻辑优化，有效解决了传统启动过程中电流冲击大、工况适配差、故障率高的问题。优化后的控制逻辑适配复杂工业工况，设备运行稳定性与运维效率显著提升，可为各类工业大型电机启动控制系统的设计、改造与应用提供可靠技术支撑。

参考文献：

[1]刘冲,史振利,杨世强,等.大型同步电动机变频启动电气系统调试常见问题及防范措施[J].电工技术,2023(1):141-144.

[2]李喜文,韩高翔,张田歌.大型同步电动机高压降补固态软起动装置的应用[J].矿山机械,2022,50(1):44-48.

[3]张秀印.串联控制在重大型机床上的应用[J].金属加工（冷加工）,2021(6):42-45.

[4]刘冲,史振利,杨世强,等.大型同步电动机变频启动电气系统调试常见问题及防范措施[J].电工技术,2023,(1):141-144