

电气工程中电机与电气控制技术运用分析

周天琪

(天津国能津能热电有限公司, 天津 300171)

摘要 在现代工业体系中, 电机作为能量转换的核心装置, 其运行性能直接关系到生产效率与系统稳定性。电气控制技术则是实现电机高效、安全、精准运行的关键支撑。本文围绕电机与电气控制技术的协同应用展开系统性论述, 重点探讨继电器控制系统、可编程逻辑控制器(PLC)系统以及调速系统的结构特征与实际应用方式。通过对各类控制方法的技术路径进行梳理, 明确其在不同工况下的适用性与操作逻辑, 并从技术实现角度出发, 阐述各控制系统的组成原理与功能实现机制, 旨在为相关领域的工程实践提供理论参考。

关键词 电机; 电气控制; 继电器; PLC; 调速系统

中图分类号: TM3; TM92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.022

0 引言

电机是将电能转化为机械能的重要设备, 在工业、交通、建筑等多个领域得到广泛应用。伴随自动化水平的不断提升, 对电机运行状态的精确控制成为保障系统稳定性的关键环节。电气控制技术作为实现这一目标的主要手段, 经历了从传统继电器控制到现代可编程逻辑控制的发展过程。在此过程中, 调速技术也逐步由机械调节转向电子化、数字化控制。当前, 多种控制方式并存于不同应用场景, 各自具备特定的技术优势和适用条件。本文聚焦电机与电气控制技术的融合应用, 系统分析继电器控制、PLC控制及调速系统在实际工程中的技术实现路径, 以期厘清各类控制方式的功能边界与运行逻辑。

1 电机及电气控制概述

1.1 电机的基本构成与运行特性

电机由定子、转子、端盖、轴承等主要部件构成, 依据供电方式可分为直流电机与交流电机两大类。直流电机通过电刷与换向器实现电流方向切换, 从而维持转矩输出的连续性; 交流电机则依靠定子绕组产生的旋转磁场驱动转子旋转, 无需机械换向结构。两类电机在启动特性、调速能力、维护成本等方面存在显著差异。直流电机具备良好的启动转矩和宽范围调速能力, 适用于对动态响应要求较高的场合; 交流电机结构简单、可靠性高, 广泛应用于恒速或轻载调速场景。电机运行过程中, 需通过外部控制装置对其启停、正反转、转速等参数进行调节, 以满足工艺流程的具体需求。这种调节依赖于电气控制系统提供的逻辑判断与执行指令, 两者共同构成完整的机电一体化运行体系^[1]。

1.2 电气控制系统的功能定位

电气控制系统的核心任务是对电机的运行状态进行实时干预与管理, 确保其按照预设逻辑完成指定动作。该系统通常由输入单元、逻辑处理单元和输出执行单元三部分组成。输入单元负责采集现场信号, 如按钮、限位开关、传感器等的状态信息; 逻辑处理单元根据既定规则对输入信号进行判断, 并生成相应的控制指令; 输出执行单元则将指令转化为具体的电气动作, 如接触器吸合、继电器动作或变频器频率调整等。在传统控制模式下, 逻辑处理依赖硬接线继电器组合实现; 而在现代自动化系统中, 则普遍采用可编程逻辑控制器完成复杂逻辑运算。无论采用何种形式, 电气控制系统均需保证动作的准确性、时序的合理性以及故障状态下的安全性, 这是其实现工程价值的基本前提^[2]。

2 继电器控制系统及其应用

2.1 继电器控制系统的结构组成

继电器控制系统以电磁继电器、接触器、时间继电器、热继电器等元件为基础, 通过硬接线方式连接成完整的控制回路。主电路负责电机的电源供给, 通常由断路器、接触器主触点和热继电器热元件串联构成; 控制电路则由按钮、继电器线圈、辅助触点等组成, 用于实现启停、互锁、自锁等功能。当按下启动按钮时, 接触器线圈得电, 其主触点闭合使电机通电运行, 同时辅助常开触点闭合形成自锁回路, 维持接触器持续吸合状态。停止按钮则串联于控制回路中, 用于切断线圈电源, 实现电机停机。此类系统结构直观, 元件标准化程度高, 便于现场安装与故障排查。由于所有逻辑关系均由物理触点实现, 系统响应速度受限于继电器动作时间, 且难以实现复杂时序控制。

2.2 继电器控制在典型场景中的实现方式

1. 电机正反转控制的电气互锁实现。在电机转向切换需求的应用场景下，继电器控制方案借助于两组交流接触器分别接入不同相序的三相交流电源，完成正反转功能的实现。为避免双接触器同时动作引发主回路相间短路故障，系统引入电气互锁保护策略：在每个接触器线圈回路中串联设置另一接触器的常闭辅助触点。当正向运转接触器获电动作时，其常闭辅助触点立即断开，从而阻断反向接触器线圈回路供电，反之亦然。此设计确保任一时刻仅有一接触器处于工作状态。同时，为增强操作安全性，系统通常辅以机械互锁装置，即在手动操作机构层面增设物理限位装置，进一步提高误操作防护能力。此类控制方案具有逻辑架构清晰、元器件通用性良好等优势，广泛应用于起重机、输送设备等需频繁变换运行方向且控制逻辑固定的工业场景。鉴于其不依赖电子元件或软件程序的特性，该控制系统在强电磁干扰或极端温湿度环境中仍能维持稳定运行状态。

2. 多电机顺序启停的时间继电器控制。在多电机协同作业的生产线中，为防止电网电压突变或机械应力过载，继电保护系统普遍应用时间继电器进行有序的启停控制。具体操作机制为：首台电机启动后，其辅助常开触点接通，导致时间继电器线圈激活；经设定时间延迟，时间继电器的延时闭合触点激活，进而开启第二台电机的控制电路，使其进入启动状态。此后电机依次启动，形成逐级延时启动的时序逻辑。同样，停机操作亦可通过逆向顺序实现，以确保工艺安全。时间继电器可根据控制需求划分为通电延时和断电延时两种类型，并据此选取恰当型号。此方法摒弃了复杂的程序设计，仅需通过硬接线路径实现时序逻辑，适用于对启动电流较为敏感的水泵站、压缩机群及风机系统等。虽然该系统不支持动态调整延时参数，但在固定程序运行中展现出优异的可靠性和便捷的维护特性^[3]。

3. 热继电器在过载保护中的应用机制。热继电器作为继电保护系统的关键组件，在电机安全运行中承担着重要防护功能，其设计初衷在于规避电机因长期处于过载工况而引发的设备故障。该装置的核心构成元件为双层金属片结构，此结构通过将两种具有差异化热膨胀系数的金属材质复合压制而成。当电机的运行电流超越其额定值时，流经热继电器内部热敏元件的电流将导致双金属片因热效应而发生形变，当该形变量达到预设临界值时，会触发脱扣装置启动，进而断开串联于控制回路中的常闭触点，最终实现接触器线圈电路的切断，使电机停止运行。热继电器的工作特性表现出明显的热延迟效应，可对瞬时启动电流与

持续性过载电流进行有效区分，从而防止保护装置发生非必要动作。其整定电流值可根据电机的额定工作参数进行适应性调整，以满足不同负载条件下的运行需求。在电气接线实践中，热继电器通常部署于主电路中，其辅助触点则接入控制系统回路，负责保护信号的传输功能。该保护机制凭借其简洁的结构设计、经济性优势及符合电机热积累特性的响应特性，已成为各类低压电机控制系统中的标准化安全防护装置，形成了不可或缺的电气安全防线。

3 PLC 控制系统及其应用

3.1 PLC 的定义与工作原理

可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）是一种专为工业环境设计的数字运算电子装置，用于执行逻辑、顺序、定时、计数及算术运算等功能。其硬件结构主要包括中央处理器（CPU）、存储器、输入/输出接口模块及电源单元。PLC 通过扫描方式周期性地读取输入端口状态，执行用户程序中定义的逻辑指令，并将运算结果写入输出端口，驱动外部执行机构动作。整个扫描周期包括输入采样、程序执行和输出刷新三个阶段。在输入采样阶段，PLC 将所有输入信号的状态暂存于输入映像寄存器；程序执行阶段依据用户编写的梯形图或指令表对逻辑关系进行处理；输出刷新阶段则将处理结果更新至输出映像寄存器，并通过输出模块驱动接触器、电磁阀等负载。该工作模式确保了控制过程的确切性与时序一致性。

3.2 PLC 在工业自动化中的应用机制

在电机控制领域，PLC 通过替代传统继电器逻辑，实现了控制功能的软件化与模块化。用户可根据工艺需求编写控制程序，灵活配置电机的启停条件、运行顺序、故障处理策略等。例如：在多台电机联动控制系统中，PLC 可依据传感器反馈信号判断各设备状态，并按预设逻辑协调各电机的动作时序，避免机械干涉或能源浪费。在需要频繁修改控制逻辑的场合，仅需调整程序即可完成功能变更，无需重新布线。此外，PLC 支持与上位监控系统通信，可将电机运行参数上传至中央控制室，便于集中管理。其模块化设计允许根据控制点数扩展 I/O 模块，适应从小型单机到大型产线的不同规模需求。由于采用固态电子元件，PLC 系统响应速度快、寿命长，且具备较强的抗电磁干扰能力，适用于粉尘、振动、温湿度变化较大的工业现场。

4 调速系统及其应用

4.1 调速系统的基本概念与原理

调速系统是指通过改变电机输入参数以调节其转速的控制装置集合。其核心目标是在负载变化条件下

维持所需转速，或按工艺要求实现转速的动态调整。调速的本质在于改变电机的电磁转矩与负载转矩之间的平衡关系。对于直流电机，可通过调节电枢电压、励磁电流或电枢回路电阻实现调速；对于交流异步电机，则主要通过改变电源频率、电压或极对数来调整同步转速。调速系统通常包含给定单元、反馈检测单元、比较放大单元和执行单元。给定单元设定目标转速值，反馈单元实时采集实际转速并送入比较环节，偏差信号经放大后驱动执行机构调整电机输入参数，直至实际转速逼近设定值。该闭环结构有效提升了调速精度与动态响应能力^[4]。

4.2 直流电动机与交流电动机的调速方法

直流电动机的调速方法主要包括电枢电压调速、弱磁调速和电枢回路串电阻调速。电枢电压调速通过改变施加于电枢两端的电压实现平滑调速，调速范围宽且机械特性硬，适用于恒转矩负载；弱磁调速则通过减小励磁电流提高转速，适用于恒功率负载，但调速范围有限；电枢串电阻调速因能耗大、效率低，已逐渐被淘汰。交流异步电动机的调速方法中，变极调速通过改变定子绕组接线方式切换极对数，实现有级调速，结构简单但调速档位少；变转差率调速通过调节转子回路电阻或定子电压改变转差率，适用于小范围调速；变频调速则通过改变电源频率连续调节同步转速，兼具宽调速范围与高效率，已成为主流调速方式。两种电机的调速策略选择需综合考虑负载特性、调速精度、成本及维护便利性等因素^[5]。

4.3 变频器在调速系统中的应用机制

1. 变频器的基本结构与能量转换过程。变频装置主要由整流模块、直流链路部分（包含滤波系统）、逆变模块及控制模块四个核心构成要素组合而成，其功能在于实现工频交流电至可变频交流电能的转换过程。整流部分普遍采用由二极管或晶闸管构成的三相桥式拓扑结构，将输入的工频交流信号转化为脉动直流信号。直流链路环节通过高容值电解电容或电感元件对整流后的电压波形进行滤波与稳压处理，以确保直流母线电压的稳定性。逆变环节则采用绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等全控型功率半导体器件，根据控制指令产生高频脉冲信号，借助脉宽调制（PWM）技术合成为类正弦交流输出波形。该输出信号的频率及幅值均可实现精确调节，进而控制交流电机实现多转速运行。整体能量转换系统表现出高效率、低谐波畸变及快速动态响应等特性，构成了精确速度控制技术的重要基础支撑。

2. 变频器的控制功能与运行模式。变频装置集成多样化的控制策略，可根据实际负载条件及工艺需求灵活匹配适宜的工作模式。其中主流的控制技术涵盖

V/F调制、矢量调控以及直接转矩管理三种方法。V/F调制技术通过维持电压与频率间的恒定比例关系，主要应用于动态性能要求较低的恒定转矩或风机水泵类负载场景；矢量调控技术则借助坐标变换实现电机磁链与转矩分量的解耦控制，从而达到类似直流电机的独立调节效果，尤其适用于高精度转速或位置控制环境；直接转矩管理技术通过实时监测定子磁链和转矩偏差信号，直接调控逆变器开关状态，表现出快速的响应特性与较强的抗干扰能力。除此之外，该变频系统还具备软启动功能、多级速度预设、加减速率调整、过流过压保护及转矩限幅等辅助特性。

3. 变频器与外部控制系统的集成方式。在工业自动化系统中，变频器通常作为执行单元与上位控制器协同工作。其与可编程逻辑控制器（PLC）的集成主要通过硬接线 I/O 接口或数字通信协议实现。通过数字量输入端子，PLC 可发送启停、正反转等基本指令；模拟量输出端子则用于设定连续变化的速度参考值。更高级的集成方式采用 Modbus、PROFIBUS、EtherNet/IP 等工业通信协议，使变频器成为网络中的一个智能节点。在此模式下，PLC 不仅能下发运行参数，还可实时读取变频器的输出频率、电流、故障代码等状态信息，实现闭环监控与诊断。

5 结束语

电机与电气控制技术的协同应用构成了现代工业自动化的重要基础。继电器控制系统因其结构简单、可靠性高，在特定场合仍具实用价值；PLC 控制系统凭借程序灵活性与扩展能力，成为复杂逻辑控制的主流方案；调速系统则通过变频等技术手段，实现了对电机转速的精确调控。三者在不同层级上共同支撑着电机的高效、安全运行。技术的选择应基于具体工况需求，注重系统整体的协调性与稳定性。对各类控制方式的深入理解，有助于在工程实践中做出合理配置，确保机电系统长期可靠运行。

参考文献：

- [1] 孙宇. 永磁同步直线电机控制技术研究[J]. 防爆电机, 2024,59(04):56-59,80.
- [2] 石磊, 安琪宁. 智能控制技术在无刷直流电机控制系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024,41(07):186-187.
- [3] 杨结群. PLC技术在固定电机控制系统中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2024,53(04):89-91.
- [4] 邓雨佳. 电气自动化在电气工程中的应用探讨[J]. 通讯世界, 2024,31(03):96-98.
- [5] 沙燕. 电工电子技术在电气工程中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2024,53(01):113-115.