

电气工程中的电机控制与调速技术研究

许 涛

山西焦化股份有限公司电气公司 山西 临汾 041600

摘要: 本文系统梳理了电机控制与调速技术的发展历程,重点分析了直流电机、异步电机(感应电机)和永磁同步电机三大主流电机类型的调速原理与控制策略。深入探讨了变频调速、矢量控制(VC)、直接转矩控制(DTC)等核心调速技术的理论基础、实现方法及优缺点。同时,本文还对模型预测控制(MPC)、自适应控制、模糊控制、神经网络控制等先进智能控制策略在电机调速领域的应用前景进行了展望。最后,结合“双碳”战略目标,论述了高效节能、高可靠性、智能化与网络化是未来电机控制与调速技术发展的主要趋势,旨在为相关领域的研究人员和工程技术人员提供有价值的参考。

关键词: 电机控制; 调速技术; 变频调速; 矢量控制; 直接转矩控制; 智能控制

引言

电机控制与调速技术研究始于19世纪末直流电机诞生时,早期依赖机械变速器或改变物理参数调速,效率低、精度差。20世纪中期,晶闸管等电力电子器件催生交流调速萌芽,但受限于控制理论与器件性能,交流电机调速性能不及直流电机。20世纪70年代,德国工程师提出矢量控制理论,解决了交流电机解耦控制难题,开启高性能交流调速新纪元。21世纪,全控型功率器件、高速数字信号处理器及现场可编程门阵列广泛应用,使复杂控制算法得以实时实现。同时,永磁材料技术进步推动永磁同步电机普及,其高效率、高功率密度特性使其成为高端领域首选。本文将从电机基本类型出发,阐述调速原理,剖析主流及前沿控制策略,并展望未来发展趋势。

1 主流电机类型及其调速原理

1.1 直流电机

直流电机因其结构简单、调速性能优良,在历史上曾长期占据主导地位。其调速原理基于电机的机械特性方程:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

其中, n 为转速, U 为电枢电压, I_a 为电枢电流, R_a 为电枢电阻, C_e 为电机常数, Φ 为每极磁通。根据该方程,直流电机主要有三种调速方法:(1)电枢电压调速:保持励磁磁通 Φ 不变,通过调节电枢电压 U 来改变转速。这种方法可以实现平滑无级调速,且在整个调速范围内具有较硬的机械特性,是应用最广泛的调速方式。(2)弱磁调速:保持电枢电压 U 为额定值,通过减小励磁电流来减弱磁通 Φ ,从而提高转速。这种方式适用于恒功率负载,但

存在最高转速限制。(3)电枢回路串电阻调速:在电枢回路中串联电阻,通过改变电阻值来调节转速。此方法简单,但能耗大、效率低,仅用于对调速性能要求不高的场合。尽管直流电机调速性能优越,但其机械换向器和电刷结构带来了维护困难、易产生火花、可靠性低等固有缺陷,限制了其在高速、高可靠性场合的应用。

1.2 异步电机

异步电机(又称感应电机)结构坚固、成本低廉、维护方便,是工业领域应用最广泛的电机类型。然而,其调速一度被认为是难题。异步电机的转速由同步转速 n_s 和 s 转差率共同决定:

$$n = (1 - s)n_s = \frac{60f_1}{p}$$

其中, f_1 为定子电源频率, p 为电机极对数。

由此可见,改变电机极对数 p 、转差率 s 或电源频率 f_1 均可实现调速。(1)变极调速:通过改变定子绕组的接线方式来改变极对数 p ,从而获得几种固定的转速。此方法简单可靠,但属于有级调速,应用范围有限。(2)转差率调速:包括转子串电阻调速(绕线式电机)、串级调速和电磁转差离合器调速等。这些方法大多效率不高,且调速范围有限。(3)变频调速(VVVF):这是目前异步电机最主流、最高效的调速方式。通过改变供给电机的电源频率 f_1 来调节同步转速 n_s ,进而改变电机转速。为了在调速过程中维持电机的磁通恒定,避免磁路饱和或转矩能力下降,必须同时协调地改变定子电压 U_1 ,即遵循 $U_1/f_1 = \text{const}$ 的控制规律(基频以下)。基频以上则采用弱磁升速控制。变频调速实现了宽范围、高效率、高精度的无级调速,是现代交流调速技术的核心。

1.3 永磁同步电机

永磁同步电机利用永磁体产生转子磁场,省去了励磁绕组,因而具有高效率、高功率因数、高转矩密度和体积小等显著优点。其转速严格与电源频率同步:

$$n = \frac{60f_1}{p}$$

因此,PMSM的调速完全依赖于变频控制。由于其转子磁场由永磁体固定,无法像异步电机那样通过调节励磁来控制,因此对控制系统的精度和动态响应要求更高^[1]。PMSM通常分为表面式(SPM)和内置式(IPM)两种。IPM电机因其凸极效应($L_d \neq L_q$)可以产生磁阻转矩,从而在弱磁区获得更宽的调速范围,被广泛应用于电动汽车驱动等领域。

2 核心电机控制与调速技术

2.1 变频调速技术(VVVF)

变频调速是所有现代交流调速系统的基石。其实现依赖于电力电子变频器,其核心是交-直-交结构,主要包括整流器、直流母线和逆变器三部分。整流器将工频交流电转换为直流电,逆变器再将直流电逆变为频率和电压均可调的交流电供给电机。早期的变频器多采用正弦脉宽调制(SPWM)技术,通过将正弦波与三角载波比较生成PWM信号来控制逆变器开关管的通断。虽然SPWM实现简单,但直流电压利用率不高^[2]。随后发展的空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术,通过合成期望的电压空间矢量,不仅提高了直流母线电压的利用率(理论上可提高15%),还能有效降低谐波含量,改善电机的运行性能,已成为现代变频器的标准调制策略。

2.2 矢量控制(VC)

矢量控制,也称磁场定向控制(FOC),是高性能交流调速的里程碑。其核心思想是模仿直流电机的控制方式。通过坐标变换(Clarke变换和Park变换),将三相静止坐标系(ABC)下的定子电流分解为两个相互垂直的直流分量:产生磁场的励磁电流分量(i_{d^*})和产生转矩的转矩电流分量(i_{q^*})。通过对这两个分量进行独立的PI调节,即可实现对电机磁链和转矩的解耦控制,从而获得类似直流电机一样优良的动态和静态性能。矢量控制的关键在于准确获取转子磁链的位置信息,这通常需要高精度的编码器或旋转变压器(有感控制)。为了降低成本和提高可靠性,无速度传感器矢量控制技术应运而生,它通过观测器(如滑模观测器、扩展卡尔曼滤波器等)从电机的电压、电流等可测信号中估算出转速和磁链位置,已成为当前研究和应用的热点。

2.3 直接转矩控制(DTC)

直接转矩控制由德国学者Depenbrock于1985年提出。

与矢量控制不同,DTC摒弃了复杂的坐标变换和电流闭环,直接在定子坐标系下对电机的磁链和转矩进行控制。DTC的核心是一个滞环比较器和一个开关表。系统实时计算电机的磁链幅值和电磁转矩,并将其与给定值进行比较。根据比较结果(磁链偏大/偏小,转矩偏大/偏小)以及当前定子磁链所在的空间扇区,直接从预设的开关表中选择最优的电压矢量施加到电机上。这种控制方式结构简单、鲁棒性强、动态响应极快(转矩响应时间可小于2ms)^[3]。然而,DTC也存在一些固有缺点,最主要的是在稳态时转矩和磁链存在较大的脉动,导致电机噪声较大。为了解决这一问题,学者们提出了多种改进方案,如基于空间矢量调制的DTC(DTC-SVM),它用SVM模块替代了传统的开关表,通过连续调节电压矢量的作用时间,有效降低了转矩脉动,但牺牲了一部分动态响应速度。

3 先进与智能控制策略

随着对电机系统性能要求的不断提高,传统的PI控制已难以满足复杂工况下的需求。为此,一系列先进的控制理论和智能算法被引入到电机控制领域。

3.1 模型预测控制(MPC)

模型预测控制是一种基于模型、滚动优化和反馈校正的先进控制方法。在电机控制中,MPC首先建立电机的精确数学模型,然后在每个控制周期内,预测未来一段时间内所有可能的开关状态(或电压矢量)对系统输出(如电流、转矩、磁链)的影响。通过定义一个包含跟踪误差和控制努力的代价函数,选择使该函数最小化的最优开关状态并立即执行。MPC的优势在于其概念直观、易于处理多变量约束(如电流限制、电压限制),并且天然地集成了调制环节。然而,其计算量巨大,对控制器的算力要求很高。随着硬件技术的发展,MPC在高性能伺服驱动和电动汽车电驱系统中的应用日益增多。

3.2 自适应控制与鲁棒控制

在实际应用中,电机参数(如定子电阻、转子电感)会随温度、磁饱和等因素发生变化,外部负载也可能存在扰动。自适应控制能够在线辨识这些参数的变化并实时调整控制器参数,以保证系统性能。鲁棒控制(如 H_∞ 控制、滑模控制)则致力于设计一个对参数摄动和外部干扰不敏感的控制,确保系统在不确定环境下的稳定性和性能^[4]。滑模控制(SMC)因其强鲁棒性和对匹配不确定性的完全抑制能力,在电机控制中备受瞩目。它通过设计一个滑模面,迫使系统状态在有限时间内到达该面并沿其滑动,从而实现给定轨迹的跟踪。但其固有的抖振问题需要通过边界层法、高阶滑模等技术加以抑制。

3.3 智能控制

人工智能技术的兴起为电机控制开辟了新途径。(1) 模糊控制: 不依赖于精确的数学模型, 而是利用专家经验构建模糊规则库, 特别适用于处理非线性、时变和模型不确定的系统。常被用作PI控制器的补充, 构成模糊自整定PI控制器。(2) 神经网络控制: 神经网络具有强大的非线性映射和自学习能力, 可用于构建电机的逆模型作为控制器, 或用于在线辨识电机参数和扰动, 为其他控制器提供补偿。(3) 遗传算法、粒子群优化等: 这些优化算法常被用于离线优化传统控制器(如PI、PID)的参数, 以获得全局最优的控制性能。尽管智能控制展现出巨大潜力, 但其“黑箱”特性、缺乏严格的稳定性证明以及对大量训练数据的依赖, 仍是其在工业界大规模应用的主要障碍。

4 发展趋势与挑战

面向未来, 电机控制与调速技术将在以下几个方向持续深化和发展:(1) 高效节能与绿色化: 在全球能源危机和“双碳”目标的驱动下, 进一步提升电机系统的整体效率是永恒的主题。这不仅要求开发更高效率的电机本体(如超高效IE4/IE5电机、新型拓扑结构电机), 也要求控制策略能最大限度地减少开关损耗、铜损和铁损。例如, 基于损耗模型的最优效率控制策略将成为研究重点。(2) 高可靠性与容错控制: 在航空航天、电动汽车、关键工业流程等安全攸关领域, 电机驱动系统的可靠性至关重要。容错电机(如多相电机)及其相应的容错控制策略, 能够在电机或逆变器发生部分故障时, 仍能降额运行, 保障系统安全。(3) 智能化与网络化: 随着工业4.0和物联网(IoT)的发展, 电机驱动器不再是孤立的执行单元, 而是智能工厂网络中的一个节点。未来的电机控制系统将深度融合状态监测、故障诊断、预测性维护等功能, 并通过工业互联网协议(如EtherCAT, PROFINET)实现与上位机和其他设备的无缝

通信与协同。(4) 宽调速范围与高动态性能: 特别是在电动汽车和高端数控机床领域, 要求驱动系统在极宽的速度范围内(从零速到上万转)都能提供平稳、精确的转矩控制, 并具备极快的动态响应能力。这推动了对无位置传感器控制、深度弱磁控制、以及前述先进控制算法(如MPC)的深入研究。(5) 集成化与小型化: 将电机、逆变器、控制器甚至减速器高度集成, 形成“机电一体化”驱动单元, 是降低成本、减小体积、提高功率密度的有效途径。这对热管理、电磁兼容(EMC)和控制算法的紧凑性提出了新的挑战。

5 结语

电机控制与调速技术是电气工程核心分支, 是多学科交叉融合成果的体现。从直流调压到模型预测控制, 技术飞跃拓展了电机应用边界, 提升了工业自动化与智能化水平。本文回顾了直流、异步、永磁同步电机调速原理, 剖析了变频调速、矢量控制、直接转矩控制三大核心技术内涵与特点, 并展望了模型预测、自适应及智能控制策略的应用前景。研究表明, 未来电机控制技术将向更高效、可靠、智能、集成方向发展, 以应对能源环境挑战和工业需求升级。新材料、新器件、新理论不断涌现, 电机控制与调速技术研究空间广阔。将先进控制理论与工程实践紧密结合, 解决实际应用痛点, 是科研工作者和工程师的共同使命。

参考文献

- [1]张汝通,吴宝江,张怡,等.永磁同步电机调速系统的滑模变结构控制[J].机械设计与制造,2025,(10):357-362.
- [2]王一帆.电气工程中电机与电气控制技术运用分析[J].通讯世界,2025,32(09):94-96.
- [3]朱子才.电气工程中的电机与电气控制技术及其应用[J].电站辅机,2025,46(02):103-105.
- [4]范帅,梅二召,秦亮.高效节能型电机驱动与智能调速电气控制系统设计[J].数字技术与应用,2025,43(08):229-231.