

永磁同步电机无传感器控制方法研究

贾伟 150222198710043215

摘要

永磁同步电机因功率密度高、效率优异等特性，在工业驱动、新能源汽车等领域得到广泛应用。传统矢量控制依赖转子位置传感器获取转速与位置信息，不仅增加了系统硬件成本，还降低了设备在高温、强电磁干扰等恶劣环境下的运行可靠性。本文围绕永磁同步电机无传感器控制方法展开研究，梳理了当前主流的无传感器控制技术分类，分析不同方法的适用场景与技术局限性，并对未来发展方向进行展望，为永磁同步电机无传感器控制的工程应用提供参考。

关键词：永磁同步电机；无传感器控制；转子位置估计；状态观测

一、引言

随着电力电子技术与永磁材料制造工艺的快速发展，永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）凭借体积小、损耗低、转矩脉动小等优势，逐步取代传统异步电机成为高性能运动控制领域的首选方案。在永磁同步电机的闭环矢量控制系统中，准确的转子位置与转速信息是实现磁场定向控制、转矩精确调节的核心前提。传统方案通过安装光电编码器、旋转变压器等机械位置传感器获取位置信息，但传感器的存在不仅增加了电机轴向体积与系统成本，其线路连接也容易受到环境干扰，在冶金、深海探测、航空航天等恶劣工况下，传感器故障会直接导致整个控制系统瘫痪。因此，无传感器控制技术通过算法估算转子位置与转速，取消机械位置传感器，成为近年来永磁同步电机控制领域的研究热点。

二、永磁同步电机无传感器控制方法分类

当前永磁同步电机无传感器控制方法按照工作原理与适用转速范围，大致可以分为两类：一类是适用于零低速运行区间的高频信号注入法，另一类是适用于中高速运行区间的模型基观测法。

2.1 高频信号注入法

高频信号注入法的核心原理是利用永磁同步电机本身的结构凸极性，即 d 、 q 轴电感存在差异，向电机定子绕组注入高频电压或电流信号，通过检测提取感

应信号中的凸极效应相关分量，进而解算出转子的位置信息。该方法不依赖电机的基频数学模型，不受电机参数变化影响，因此在零转速与低速运行工况下仍能保持较高的估计精度。根据注入信号形式的不同，高频信号注入法又可以分为旋转高频电压注入法与脉振高频电压注入法。旋转高频注入法主要适用于内置式永磁同步电机，其固有凸极性明显，位置估计精度较高，但会产生较大的转矩脉动，影响系统运行平稳性；脉振高频注入法多用于表面贴装式永磁同步电机，通过在估计的 d 轴注入高频信号，能够有效降低转矩脉动，但信号滤波环节会带来一定的相位延迟，影响动态响应性能。整体来看，高频信号注入法解决了零低速工况下的位置估计难题，但存在信号处理复杂、额外损耗较大的问题，在高速工况下，高频注入的信噪比较低，位置估计误差会显著增大。

2.2 模型基观测法

模型基观测法以永磁同步电机的基频数学模型为基础，通过构建状态观测器对反电动势或者磁链进行观测，进而从观测结果中提取转子位置与转速信息，这类方法在中高速运行区间具有较好的估计精度与动态性能。当前应用较为广泛的模型基观测法主要包括扩展卡尔曼滤波法、模型参考自适应法、滑模观测法三种。

扩展卡尔曼滤波法是一种非线性随机估计算法，能够处理系统噪声与测量噪声，在电机参数存在扰动的前提下仍能保持较好的估计精度，适合多变量非线性的永磁同步电机系统。但该方法需要进行多次矩阵运算，对控制器的运算能力要求较高，参数整定过程也较为复杂，限制了其在低成本工控场景中的应用。

模型参考自适应法以永磁同步电机本体作为参考模型，将包含待估计转速的可调模型作为辨识模型，通过设计自适应律调整可调模型的参数，使得可调模型的输出跟踪参考模型的输出，进而得到估计的转速与位置信息。该方法结构简单，实现难度较低，但其估计精度高度依赖参考模型的参数准确性，当电机运行温度升高导致定子电阻、永磁体磁链发生变化时，估计误差会明显增大，因此需要结合参数辨识算法对模型参数进行在线修正，才能保证系统稳定性。

滑模观测法属于变结构控制方法，其核心思想是让系统状态沿着预设的滑模面运动，对参数扰动与外部干扰具有较强的鲁棒性，动态响应速度快，非常适合永磁同步电机这种强耦合非线性系统。传统滑模观测法存在固有的抖振问题，会导致位置估计结果存在波纹，影响控制精度，近年来研究者通过引入高阶滑模、连续趋近律等方法对抖振问题进行抑制，进一步提升了滑模观测法的实用性能，是当前中高速无传感器控制领域应用最广泛的方法之一。

三、现有方法存在的问题与发展方向

当前永磁同步电机无传感器控制技术已经取得了较多研究成果,但仍存在一些问题:首先,全转速区间的位置估计精度难以保证,高频注入法在高速区性能不佳,模型基法在零低速区存在估计失效问题,如何实现两种方法的平滑切换,保证全转速范围内位置估计的连续性与准确性,是工程应用需要解决的核心问题;其次,电机参数变化对模型基法的影响依然存在,永磁体退磁、定子绕组温升都会导致模型参数偏移,进而增大位置估计误差;此外,在低载波比、极低速等极端工况下,现有方法的估计精度与动态性能仍有较大提升空间。

针对上述问题,未来永磁同步电机无传感器控制的发展方向主要集中在三个方面:一是多方法融合控制,通过将高频注入法与模型基法结合,发挥不同方法在对应转速区间的优势,设计平滑切换机制实现全转速范围的高性能无传感器控制;二是参数在线辨识技术与无传感器控制的结合,通过算法对定子电阻、永磁体磁链等关键参数进行在线辨识与修正,降低参数偏移对位置估计精度的影响,提升系统鲁棒性;三是人工智能技术的应用,基于神经网络、强化学习的无传感器控制方法不需要依赖精确的电机数学模型,能够自适应调整估计参数,应对复杂工况下的参数变化与干扰,为永磁同步电机无传感器控制提供了新的研究思路。

四、结论

永磁同步电机无传感器控制技术能够降低系统成本,提升恶劣工况下的运行可靠性,是高性能电机驱动领域的重要研究方向。不同类型的无传感器控制方法各有优劣,高频信号注入法适合零低速工况,模型基观测法在中高速区间具有明显优势,工程应用中需要根据实际工况选择合适的控制方法。随着智能控制理论与芯片技术的发展,全转速范围、强鲁棒性的无传感器控制技术将会逐步成熟,进一步推动永磁同步电机在更多领域的应用。

参考文献

- [1] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 机械工业出版社, 2003.
- [2] 王成元, 夏加宽, 孙宣标. 电机现代控制技术[M]. 机械工业出版社, 2006.
- [3] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. 永磁同步电机无传感器控制技术研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 1-10.
- [4] 刘计龙, 肖飞, 沈学栓, 等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J].

电工技术学报, 2018, 33(8): 1693-1706.