

# 永磁同步电机的高效控制策略

李晓宇 王银萍 林金源

浙江江宇电机有限公司 浙江 绍兴 312300

**摘要:** 永磁同步电机 (PMSM), 它具有高效以及可靠的特性, 在工业和交通领域有着广泛的应用, 高效控制策略对降低能耗以及提升性能具有重要价值。本文针对PMSM的数学模型、电磁损耗机理以及控制策略展开研究, 对最大转矩电流比 (MTPA)、最小损耗控制、弱磁控制以及能量回馈等优化方法进行分析, 并探讨矢量控制、电流解耦、转矩脉动抑制以及模型预测控制 (MPC) 在提升动态性能方面所起的作用。研究表明, 综合运用控制方法可提高PMSM的效率和适应性。

**关键词:** 永磁同步电机; 高效控制; 损耗最小化; 矢量控制; 智能控制

## 引言

永磁同步电机具有高功率密度、高效率以及良好的动态性能, 在工业自动化、电动汽车以及可再生能源系统重有着广泛的应用, 但是电机在运行时存在能量损耗、动态响应受限以及控制精度不足等情况, 对整体性能造成影响<sup>[1]</sup>。研究高效控制策略降低损耗、提升系统稳定性非常关键。本文通过构建PMSM的数学模型, 分析电磁损耗的来源以及控制优化的方法, 探讨最大转矩电流比、最小损耗控制以及弱磁控制策略的优势, 针对电机的动态性能优化, 研究矢量控制、电流解耦以及转矩脉动抑制方法, 并且结合智能控制策略, 提高电机的运行效率以及适应性, 为高效电驱动系统的应用提供理论方面的支持。

## 1 永磁同步电机高效控制的理论基础

### 1.1 永磁同步电机的数学模型

电机的数学建模根据定子电压方程、磁链方程以及转矩方程开展, d-q 轴数学模型可精准地描绘出其动态特性。定子电压方程采用 d 轴和 q 轴坐标系表示, 它充分考虑了电阻、电感以及磁链变化所产生的影响, 确切地反映出电机内部的电磁关系。磁链方程主要对定子绕组的感应磁链进行描述, 包括永磁体所提供的磁链以及定子绕组的反应磁链。电磁转矩方程则是用于计算电机输出转矩的, 其结果取决于磁链、电流以及电感参数等方面。当模型构建完成, 它可以分析在不同控制策略情况下的电机性能, 同时作为后续进行优化控制的理论依据。

### 1.2 电磁损耗分析与能耗模型

损耗主要源自铜损、铁损、机械损耗以及附加损耗, 不同类型损耗的分布状况决定了整体的能效情况。其中铜损是由定子电流所产生的焦耳效应引发的, 其大

小受到电流幅值以及绕组电阻的影响, 铁损包括磁滞损耗和涡流损耗两个方面, 它依赖于磁密的变化以及电机材料的特性, 机械损耗是由轴承摩擦和风阻造成的, 会对电机高速运行时的效率产生影响, 附加损耗则是由电流谐波以及寄生效应导致形成的, 针对损耗需要采用特殊的方法进行抑制。能耗模型的构建可对不同损耗在总能耗当中所占的比例进行量化, 如表1所示。深入分析各类损耗产生的影响, 可制定出更为优化的控制策略, 提升电机的运行效率。

表 1 永磁同步电机的损耗构成及影响因素

损耗类别	主要来源	影响因素	控制优化方式
铜损	定子绕组电流	电流幅值、电阻	降低电流、优化绕组参数
铁损	磁滞和涡流	频率、磁密、电机材料	选用低损耗材料、优化磁通密度
机械损耗	轴承摩擦、风阻	速度、轴承润滑	采用高效轴承、减少空气阻力
附加损耗	电流谐波、寄生效应	开关频率、绕组布置	降低谐波、优化PWM控制

### 1.3 转矩控制与电流解耦原理

转矩控制依靠对 d-q 轴分量进行合理调节实现电磁转矩的优化分配, 定子电流的 d 轴分量主要对磁链产生影响, q 轴分量则直接决定电磁转矩。解耦控制是提升电机动态性能的关键, 矢量控制策略借助坐标变换将三相电流转变为 d-q 轴电流, 让转矩控制变得更具线性。PI 调节器被用来保持 d 轴电流恒定, 调节 q 轴电流实现精确的转矩控制。合理的解耦控制能减少交叉耦合作用, 提升动态响应特性, 提高系统的稳定性<sup>[2]</sup>。

### 1.4 高效控制的评价指标

评价指标用于评估高效控制策略的好坏, 指标覆盖损耗、效率、动态性能以及稳定性等方面。能效比作为衡量输入功率与输出功率的指标, 可体现电机的能量

转换效率, 损耗水平对电机运行成本和散热需求产生影响, 降低损耗可提高长期运行的经济性, 动态性能指标包括转矩响应速度、电流跟随能力以及稳态误差, 对电机的负载适应能力造成影响。系统稳定性主要依据转矩波动、电流谐波以及温升水平评估, 优化控制策略时需综合考量这些因素, 实现高效可靠的运行状态。

## 2 永磁同步电机的损耗最小化控制策略

损耗最小化控制策略主要目的在于减少电机运行期间的能量损耗, 提升整体的能源利用效率, 通过对电磁参数的优化、控制策略的调整以及制动能量的回收, 可在多种工况下实现对损耗的有效控制。

### 2.1 最大转矩电流比控制 (MTPA)

最大转矩电流比控制会对d轴和q轴电流的比例进行优化, 在电机处于相同转矩输出条件时, 让电流消耗达到最小状态。定子电流的d轴分量被用于对磁链进行调节, q轴分量则和转矩有直接联系, 依靠对d-q轴电流分配展开优化, 可在不同负载情况下实现较低的铜损以及更高的效率。在解析求解MTPA控制轨迹时, 需要将电机参数纳入考量范围, 磁链、电感以及电阻等因素都要涉及, 并且在坐标变换后计算最优电流角度, MTPA控制能在从低速到中速的范围内有效地降低损耗, 维持较高的转矩输出能力, 提升整体的运行效率。

### 2.2 最小损耗控制 (Loss Minimization Control)

最小损耗控制是依据电机运行期间的能量消耗特性开展的, 借助对电流分布进行优化以及对磁链实施调节, 减少电机内部所产生的铜损和铁损。其中铜损与定子电流的平方呈现正比关系, 而铁损则和磁密以及频率存在关联, 控制策略需要对磁链与电流之间的配合关系进行平衡。基于损耗模型构建数学优化方程, 在不同工况下实时对d-q轴电流大小作出调整, 使总损耗达到最小化。此控制方法在轻载以及中等负载的情况下表现较为显著, 能够提高电机的整体能效, 并且在保持电磁转矩稳定的同时降低热损耗, 提升系统可靠性。

### 2.3 弱磁控制 (Field Weakening) 与高速扩展

弱磁控制技术的作用在于突破基于额定磁通密度所形成的速度限制, 让电机在高转速运行阶段依然可保持稳定的性能表现。当电机处于基速范围时, 借助q轴电流调节转矩, 而一旦进入高速区, d轴电流便会增加, 降低气隙磁通, 降低反电势, 最终提高电机的最高转速。矢量控制方式与弱磁策略相结合, 依靠对d轴电流大小进行合理调节, 在电机运行过程中减少铁损, 同时防止出现过电压问题。在扩展过程中, 对电压空间矢量的分布进行优化, 提升电流利用率, 并且在保证稳定性的前

提下扩大运行范围, 电机在高速区依然拥有较高的能量转换效率<sup>[3]</sup>。

## 2.4 能量回馈与制动能量回收

能量回馈和制动能量回收技术可提升电机整体效率, 在减速或者制动过程中, 将多余能量反馈到电网或者储能装置。电机处于发电状态时, 定子绕组产生的电动势驱动电流回落到系统, 实现能量再利用。变换单元运用双向变流器, 将回馈的电能调节到合适电压等级, 提高能量回收效率。制动时的能量回收可降低电阻的热损耗, 减少额外散热需求, 优化电机系统经济性, 让其在高频启停或频繁变速应用中有更好的能效表现。

## 3 永磁同步电机的动态性能优化控制策略

动态性能优化控制策略的目的在于提升电机的响应速度, 同时降低转矩波动, 提升系统稳定性。在工况快速变化的情况下, 电流解耦、矢量控制以及模型预测控制等方式能对电机的运行特性进行优化, 在动态调节过程中拥有更好的鲁棒性。

### 3.1 矢量控制 (FOC) 原理及优化

矢量控制方法借助变换手段, 将三相交流电机的控制难题转化成电机的调节方式, 提升控制的精准程度以及响应的灵敏能力。FOC运用d-q坐标系, d轴电流与磁链产生关联, q轴电流直接决定转矩大小, 实现对磁链和转矩的独立控制目的。优化FOC需要精确地获取转子位置信息, 并且凭借PI调节器对d-q轴电流进行调整, 减少超调状况并提升响应速度。改进方法包括采用无传感器估算技术优化转子角度计算, 降低对硬件的依赖程度, 提高系统在高动态环境下的适应能力, 促使电机在快速变载条件下保持稳定的输出性能。

### 3.2 dq坐标系下的电流解耦控制

电流解耦控制要消除d轴电流与q轴电流之间所存在的交叉影响, 保证电机可稳定地运行。电机处于d-q坐标系下时, 其电流耦合效应对动态响应特性产生影响, 使系统调节过程出现滞后或者超调等问题, 通过在控制环节当中引入前馈补偿项, 有效地降低d轴电流和q轴电流之间的相互作用影响, 让转矩控制变得更加精准。优化解耦控制策略时需要考虑电机参数变化所带来的影响, 利用在线参数辨识以及自适应调整补偿模型, 提升控制系统的鲁棒性, 使电机在复杂的运行环境下依然可维持精确的电流调节能力。

### 3.3 转矩脉动抑制及动态性能优化

转矩脉动的出现会对电机运行平稳性产生影响, 噪声与振动增多, 系统效率下降。转矩脉动的源头涉及电磁设计缺陷、PWM调制方式以及电流控制误差等方面,

抑制转矩脉动借助优化空间矢量脉宽调制策略,让电流波形更趋近理想正弦,降低换相过程中产生的不均匀力矩。采用补偿控制方法,依据实时计算转矩误差并施加修正电流指令,让输出转矩更为平滑,改进电流调节器带宽,提高动态响应速度,也能减少因电流滞后引发的转矩脉动,提高系统整体动态性能。

#### 3.4 基于模型预测控制(MPC)的动态控制

模型预测控制方法是依据电机的数学模型,借助实时优化控制输入的方式,提升系统的动态性能以及抗干扰能力。MPC运用滚动优化原理,在每个控制周期中计算未来多个步长的控制策略,选择出最优解作为当前时刻的控制指令,同时兼顾电流、磁链以及转矩的动态特性,并且依靠在线求解约束优化问题,实现高精度调节。对MPC进行优化需要构建高精度系统模型,还需要提高计算效率,减少实时运算所产生的时延问题,依靠引入自适应调整机制,能强化系统在不同工况下的适应性,让电机在复杂负载变化状况下仍然拥有优异的动态控制特性。

#### 4 永磁同步电机的智能控制策略

引入智能控制策略可提升永磁同步电机在复杂工况中的适应性以及控制精度,传统控制方法依靠精确数学模型,智能控制方法则借助数据驱动途径优化控制策略,降低对电机参数变化的敏感程度。

##### 4.1 模糊控制、自适应控制策略

模糊控制借助模糊逻辑规则实现电机参数的在线调节,系统在不确定性环境中保持稳定运行状态。此方法并非依赖精确的数学模型,而是依据专家经验与规则搭建模糊控制器,借助模糊推理实现d轴和q轴电流的优化调节。自适应控制是凭借实时对控制参数进行调整,使系统适应负载变化、环境因素影响以及电机参数漂移等各类问题。将模糊控制与自适应控制相结合,提升永磁同步电机在动态环境下的响应速度以及稳态精度,使其可以适应复杂的运行工况并提升整体控制性能。

##### 4.2 神经网络及人工智能控制方法

神经网络控制方法利用深度学习算法对电机控制模型展开训练,从众多运行数据中提取电机运行特性,依据输入状态预测最优控制指令,有效应对电机的非线性

问题,在复杂控制任务中呈现出良好的自学习能力。人工智能控制方法结合数据驱动策略,通过优化控制算法,提升电机运行效率与稳定性。智能控制方法的优化方向有减少计算量、提高实时性,并且结合传统控制方法,实现更精确的电流调节以及转矩控制,电机可在不同工况下自适应地调整运行参数,提升整体控制性能。

##### 4.3 无传感器控制(Sensorless Control)策略

无传感器控制策略通过观测器以及估算算法实现转子位置的检测,避免使用物理位置传感器,提升系统的可靠性以及成本效益。依据电机电感参数的估算凭借定子电流和电压信号计算转子磁链的变化,推算出转子位置信息,比如滑模观测器和扩展卡尔曼滤波等方法能够提升估算的精度,提高系统抗干扰的能力。对无传感器控制方法进行优化,需要提高低速时的估算精度,同时降低高频信号注入所产生的影响,让电机在不同的转速范围内实现精准的转子位置检测,保证系统稳定运行<sup>[4]</sup>。

#### 结论

本文围绕永磁同步电机的高效控制策略展开系统的研究工作,对其数学建模、电磁损耗机理以及优化控制方法进行深入分析。通过最大转矩电流比、最小损耗控制、弱磁控制以及能量回馈策略,降低电机损耗并且提高整体能效,矢量控制、电流解耦、转矩脉动抑制以及模型预测控制在动态性能优化方面有一定优势,智能控制方法如模糊控制、自适应控制以及神经网络控制,能够提高PMSM的适应性与鲁棒性。研究表明,将传统控制和智能优化策略相结合,可实现PMSM的高效稳定运行,为高性能电驱动系统提供可靠保障。

#### 参考文献

- [1]甘醇,曲荣海,石昊晨,倪镔.宽调速永磁同步电机全域高效运行控制策略综述[J].中国电机工程学报,2023,43(07):2496-2512.
- [2]尹海斌,李锦凡,张罕.内置式高效永磁同步电机结构优化[J].数字制造科学,2024,22(01):1-5.
- [3]王光晨,于冰,董小艳.内置式永磁同步电机高效区间研究[J].微电机,2022,55(08):38-41+91.
- [4]赵昌龄,计宝雷,孙宇.永磁同步电机高效控制策略[J].防爆电机,2024,59(05):25-28.