

基于智能控制的高性能永磁同步电机控制策略

胡 伟*

(杭州智元研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘 要 永磁同步电机是一种高性能的交流电机, 在电动汽车、轨道交通、工业机器人以及船舶推进等领域发挥着至关重要的作用。相较于直流电机, 永磁同步电机需要由三相逆变器进行控制, 更加需要性能优越的控制策略。近年来, 随着控制理论不断发展, 以模糊控制、预测控制以及神经网络控制为代表的智能控制理论受到了越来越广泛的关注。相较于传统的基于比例积分控制器的双闭环矢量控制策略, 应用智能控制理论的矢量控制策略通常可以取得更好的控制效果。本文提出了一种基于模糊控制的永磁同步电机双闭环矢量控制策略, 相较于传统的控制方法具有更高的动态响应能力。

关键词 永磁同步电机; 比例积分; 双闭环; 智能控制

中图分类号: TM31

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)10-0025-03

1 研究背景

永磁同步电机是一种使用永磁体替代励磁系统提供磁场的高性能交流电机, 无需电刷和集电环等励磁供电装置, 具有可靠性高、效率高、功率密度高、结构简单以及调速性能好等优点^[1]。近年来, 随着材料科学以及相关制造加工工艺的大力发展, 具有高磁能积、高矫顽力、高剩磁密度以及线性退磁曲线等杰出磁性能的稀土永磁材料被广泛用于永磁同步电机的生产制造中, 一定程度上促进了产业的发展^[2]。在正常的工作条件下, 经过充磁的永磁材料可以在空间内提供较为稳定的恒定磁场, 永磁同步电机不需要额外的励磁功率, 具有较高的功率因数, 相比于同规格的感应电机, 可以使用容量更小的变频器与之配合, 从而达到节约成本、产品轻量化的优化目标^[3]。在电机的驱动控制过程中, 永磁同步电机作为被控对象, 具有非线性和高耦合程度等复杂的特性。通常情况下, 电机驱动器将三相电通入电机的定子绕组, 这部分装置在电机的实际运行过程中处于相对静止的状态^[4], 基于定子视角建立的电压方程具有时变的电感参数矩阵, 电感参数随时间的脉动是由转子与定子间相对旋转造成磁路磁阻的改变而导致的, 具有时变参数的电压微分方程不易求解^[5]。作为目前永磁同步电机驱动控制系统使用频率最高的控制方法, 矢量控制以坐标变换为基础, 对同步旋转坐标系中的电机直、交轴电流进行解耦控制, 实现对电机输出转矩的精细控制, 以

达到类似他励式直流电动机励磁控制和转矩控制解耦的驱动控制效果, 具有良好的稳态、动态驱动控制特性^[6]。由于杰出的控制性能, 智能控制理论在近年来受到了学术界和工业界的广泛关注与研究^[7]。模糊控制理论通过模糊化、建立规则和反模糊化实现控制^[8], 对模型参数依赖性低^[9]。模糊自整定比例积分控制器将传统比例积分控制器与模糊控制理论有机结合, 使用简便灵活, 具有良好的控制效果^[10]。

本文基于智能控制中的模糊控制理论, 提出了一种具有控制参数自优化功能的永磁同步电机双闭环矢量控制策略, 相较于传统的控制方法具有更强的动态响应及抗干扰能力。

2 永磁同步电机矢量控制设计

2.1 永磁同步电机矢量控制系统

永磁同步电机的矢量控制过程在 d-q 同步旋转坐标系中实现, 这里建立对应坐标系下的电机数学模型。按照电动机惯例规定电枢电压、电流的正方向。

d-q 坐标系中的电枢电感矩阵 L_{dq} 如式 (1) 所示。

$$L_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: L_d, L_q ——d-q 坐标系中直轴电感和交轴电感。

d-q 坐标系中的磁链方程如式 (2) 所示。

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = L_{dq} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ψ_d, ψ_q ——d-q 坐标系中等效虚拟绕组所交

*本文通讯作者, E-mail: cughuwei@163.com。

的磁链; i_d , i_q ——d-q 坐标系中直轴电流和交轴电流;
 Ψ_f ——永磁磁链。

d-q 坐标系中的电压方程如式 (3) 所示。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: u_d , u_q ——d-q 坐标系中电枢电压的轴向分量。

可以推导出 d-q 坐标系中永磁同步电机的电磁转矩方程, 如式 (4) 所示。

$$T_e = \frac{3}{2} P_n i_q \left[i_d (L_d - L_q) + \Psi_f \right] \quad (4)$$

式中: T_e ——永磁同步电机输出的电磁转矩; P_n ——永磁同步电机转子磁极对数。

在经典的电气传动系统中, 永磁同步电机输出电磁转矩拖动负载, 并且需要克服轴系的滑动摩擦阻转矩。根据动力学原理, 可提出系统的运动方程。

永磁同步电机驱动的拓扑结构为三相桥式逆变器。 $i_d=0$ 控制是一种基础的矢量控制策略, 在电流环令电机的直轴电流参考值恒定为零, 交轴电流参考值由速度外环控制。这种控制策略适用于所有的永磁同步电机, 并可以达到良好的控制效果。3 相逆变器能够真正实现的空间电压矢量为 8 种, 其中有 2 种为零矢量, 不能产生空间作用力, 因此, 剩下的 6 种状态的组合调制, 是构成空间旋转电压矢量的基本分量。一般说来, 当给定空间电压矢量确定后, 可以采用多种不同的基本电压矢量调制合成, 根据研究发现, 采用相邻的电压矢量合成具有最大的利用空间, 故以下分析均采用相邻电压矢量作考量。8 种电压矢量将平面划分为 6 个扇区。所有的输出电压均可以由这 8 种电压矢量合成。零电压矢量作为关断时的状态表示, 有 2 种不同的选择, 对逆变器的谐波和损耗有不同程度的影响。

2.2 矢量控制系统参数设计

为了实现矢量控制的良好控制效果, 需要对控制系统的参数进行设计。按典型一型系统根据最优性能指标可计算得出电流环比例积分控制器的参数。通过速度环期望的频带带宽以及期望的相位裕度可计算得到速度环控制器的参数, 如式 (5) 所示。

$$\begin{cases} K_{ps} = \frac{\beta J}{1.5 P_n \Psi_f} \\ K_{is} = \beta K_{ps} \end{cases} \quad (5)$$

式中: β ——带宽; T_s ——开关周期; K_{ps} , K_{is} ——速度环控制参数; J ——转动惯量。

3 矢量控制模糊控制调节器设计

针对永磁同步电机矢量控制系统多种工作环境下转速需求和负载转矩变化情况复杂, 采用模糊控制理

论对永磁同步电机矢量控制系统中用作转速环调节器的传统 PI 控制器进行改进, 利用模糊控制器实时调整 PI 控制器的比例增益, 以期望永磁同步电机系统具有更好的静态及动态响应性能。模糊控制理论是一种应用广泛的智能控制策略, 其核心思想是将实际工程经验进行变量化表述, 从而不需要精确的被控对象数学模型即可实现优异的控制效果。模糊控制器有一输入、二输入和三输入等结构, 通常情况下, 具有更多输入变量的模糊控制器能够实现更好的动静态控制效果, 但与此同时, 作为代价, 具有更多输入变量的模糊控制器通常结构更加复杂, 计算量大。按照模糊控制理论设计模糊控制器的域与隶属度函数以及相应的模糊控制规则, 采用两输入单输出的模糊控制架构。构建模糊控制器选择的输入分别为电机转速指令与电机实际转速之间的误差以及该误差的变化趋势, 输入变量的范围均被规范至 -1 到 1 之间, 输出变量的范围被规范至 0 到 1 之间。在此基础上, 对模糊控制器的输入及输出的隶属度函数进行设计, 其中 E 代表转速误差, dE 代表转速误差的变化趋势, Y 代表所设计模糊控制器的输出。在控制过程中, 首先将转速误差 E 和转速误差的变化趋势 dE 输入到所设计的模糊控制器中。然后对转速误差及其变化趋势进行模糊化, 即将变量的实际范围调整到模糊论域, 此时所输入的变量已经转化为模糊变量。接下来通过根据实际工程经验及相应规则调整制定的模糊控制集对模糊控制器计算得到的模糊变量进行去模糊化。最后将计算得到的实际控制变量输出, 在速度环的控制器中, 这一输出控制变量通常被用作交轴电流参考指令值, 也可用作电机的输出转矩指令, 以实现 MTPA 最大转矩电流控制。根据控制目标及其他相关条件建立模糊控制规则表, 如表 1 所示。用于表示模糊控制器输入量和输出量大小程度的模糊控制器语言变量一般情况下可用词集 { 负大, 负小, 零, 正小, 正大 } 进行表示, 其对应的英文表示方式是 {NB, NS, Z, PS, PB}。

表 1 模糊控制规则表

U		dE				
		NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	PB	PB	PS	PS	Z
	NS	PB	PS	PS	Z	PS
E	ZE	PS	PS	Z	PS	PS
	PS	PS	Z	PS	PS	PB
	PB	Z	PS	PS	PB	PB

在对比例积分控制器的比例增益进行实时修正时,无论速度误差为正值或为负值,为了提高电机的动态响应能力,均可在原整定的参数的基础上适当增加比例系数的值。故输出只有正值。设计好域和隶属度函数后,将模糊推理的控制规则进行设置,得到模糊控制规则的图形化表示如图 1 所示。去模糊化策略采用重心法。

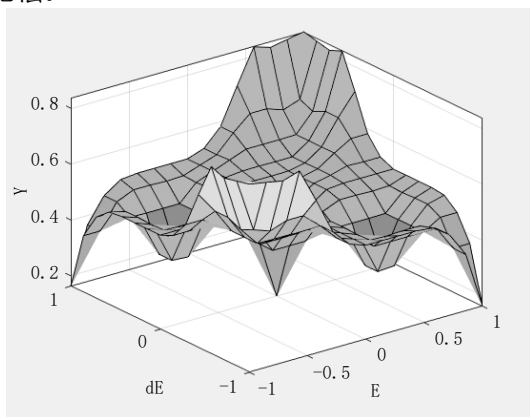


图 1 模糊控制规则的图形化表示

4 仿真结果

将速度环比例积分控制器替换为实时调整比例增益的比例积分控制器进行仿真,永磁同步的电机转速仿真波形如图 2 所示。

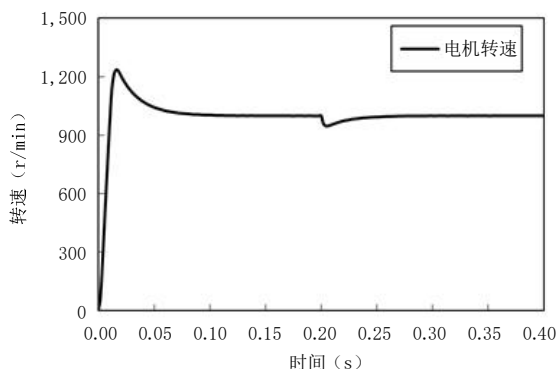


图 2 永磁同步电机转速仿真结果

0.2 s 时刻速度环使用传统比例积分控制器和实时调整比例增益的比例积分控制器的矢量控制系统所对应的转速降落如图 3 所示。可见,在同样的加载工况下,速度环调节器使用模糊比例积分的矢量控制系统具有更小的转速降落,整体转速恢复能力与传统比例积分控制器相持平,具有更好的控制效果。但作为代价,使用模糊控制器增大了控制系统的计算量。

5 总结与展望

本文针对永磁同步电机矢量控制系统的工作过程中转速需求和负载转矩变化情况复杂,采用模糊控

制理论对永磁同步电机矢量控制系统中转速环的传统比例积分控制器进行改进,利用模糊控制器实时调整 PI 控制器的比例增益,并应用于永磁同步电机双闭环矢量控制策略。从仿真结果中可以看出,所提出的智能控制策略相较于传统的控制方法具有更好的动态响应能力及抗干扰能力。

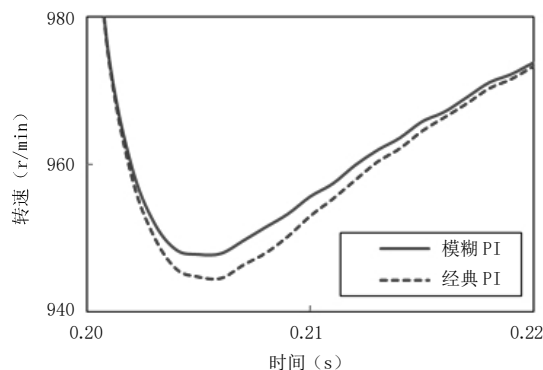


图 3 转速降落对比结果

参考文献:

- [1] 阳辉,伊禹名,付方圆,等.零序电流励磁型电机驱动拓扑及控制技术研究现状与展望[J].电工技术学报,2024(07):1-16.
- [2] 王新健.基于EKF的轮毂电机无传感器矢量控制系统研究[J].农业装备与车辆工程,2024,62(07):106-108.
- [3] 肖芳,谢元宇,王明辉,等.基于改进型ADRC的PMSM无位置传感器控制[J].电机与控制学报,2024,28(04):50-60.
- [4] 曹伟长,单文桃,吕冬喜,等.插入式永磁同步电主轴无传感器弱磁控制技术研究[J].机床与液压,2024,52(06):31-37.
- [5] 郭浩,宋俊材,陆思良.多通道电流信号深度特征融合的开关磁阻电机故障诊断研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(07):211-219.
- [6] 陈云龙,杨家强,张翔.一种计及总损耗功率估计与转速前馈补偿的飞轮储能系统放电控制策略[J].中国电机工程学报,2020,40(07):2358-2368.
- [7] 周立,李京明,刘一鸣.基于ISTSMC和改进EKFSMO的PMSM无传感器矢量控制[J].电气工程学报,2024,19(01):177-186.
- [8] 赵鹏展,郭鹏远,黄贵川.模糊自整定PID的液压马达驱动机床主轴速度控制研究[J].机械设计与制造,2024(03):111-114.
- [9] 鄢霞,何勇,张庆铭,等.基于SAC的永磁同步电机智能控制算法[J].组合机床与自动化加工技术,2023(09):86-91.
- [10] 周建鹏.基于智能控制工程在机械电子工程中的应用探讨[J].中国设备工程,2024(09):40-42.