

内置式永磁同步电动机弱磁调速优化控制

闫娜云, 宗 剑

(上海应用技术大学 电气与电子工程学院, 上海 201418)

摘 要: 从永磁同步电机(PMSM)的矢量控制出发,提出了一种 PMSM 弱磁优化控制方法。内置式永磁同步电机(IPMSM)相对表贴式永磁同步电机弱磁能力强,调速范围宽,以 IPMSM 为对象,对弱磁调速进行了仿真与优化。PMSM 在基速以下采用最大转矩电流比的恒转矩控制,减小了电机损耗,提高了逆变器的效率,在基速以上采用恒功率调速。直轴电流去磁调速结合交轴电流去磁调速的弱磁控制方式,提高了 PMSM 的功率因数,扩展了调速范围。针对弱磁环节转速的波动问题,在传统 PI 控制上做出改进,提出了模糊自整定 PI 的控制方式,提高了 PMSM 弱磁调速的性能。在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,验证了该控制方法的可行性。

关键词: 永磁同步电机; 矢量控制; 弱磁调速; 模糊自整定 PI

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)10-0024-05

Optimized Flux-Weakening Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

YAN Nayun, ZONG Jian

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Based on the vector control of permanent magnet synchronous motor (PMSM), an optimized flux-weakening control method of PMSM was proposed. The interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) had a relatively wider speed adjustment range than the surface-mount PMSM. Taking IPMSM applied as the object, we carried out simulation and optimization of the flux-weakening speed control. PMSM used the maximum-torque-per-ampere constant-torque control below the base speed to reduce the motor loss and improve the efficiency of the inverter. Above the base speed, PMSM adopted constant-power speed control. The combination of cross-axis current control and direct-axis current control in the flux-weakening control method could improve the PMSM power factor and extend the speed adjustment range. Aiming at the fluctuation of the weak ring speed, the fuzzy self-tuning PI control method was proposed based the traditional PI control. The simulation model was established in MATLAB/Simulink, and the feasibility of the control method was verified.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); vector control; flux-weakening speed control; fuzzy self-tuning PI

0 引 言

永 磁 同 步 电 机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 作为一种高效的驱动系统,在电动汽车行业得到广泛应用。钕铁硼等剩磁高、矫顽力大的稀土永磁材料的使用提高了

PMSM 的各项性能,促进了 PMSM 的发展^[1]。PMSM 具有功率密度高、损耗小、效率高、转矩惯量大、振动噪声小等优点,受到国内外电动汽车界的高度重视,成为最具竞争力的电动车电驱动系统中的主流电机。

由于永磁体磁链恒定的限制,PMSM 的弱磁

作者简介: 闫娜云(1992—),女,硕士研究生,研究方向为电力传动。

宗 剑(1973—),男,博士,副教授,研究方向为电机控制、新能源转换与控制。

调速比其他电机复杂,此外电动汽车用 PMSM 要求在恒转矩区具有输出恒定转矩的特点,能够平稳、快速地跟踪输入指令,并且要求对位置、转矩脉动等因素的控制精度高,保证电动汽车的启动和爬坡等功能;在恒功率区,要求具备很宽的速度范围,保证电动汽车的加速等功能^[2]。因此,驱动系统需有较好的动态响应能力以及较宽的弱磁调速范围。本文以内置式永磁同步电机 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 为对象,结合了弱磁调速和模糊自整定 PI 控制,使电机调速性能和稳定性进一步提高。

1 PMSM 控制原理

1.1 PMSM 数学模型

PMSM 在按转子磁链定向的 dq 坐标系下的数学模型如下^[3]。

电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q ——定子电压的 d, q 轴分量;

R_s ——定子电阻;

ω_r ——电角速度;

i_d, i_q ——定子电流的 d, q 轴分量;

L_d, L_q ——定子电感的 d, q 轴分量;

ψ_f ——永磁体磁链。

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ_d, ψ_q ——定子磁链的 d, q 轴分量。

转矩方程

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (3)$$

式中: p ——电机的极对数。

对于 IPMSM, $L_d < L_q$, 电磁转矩由励磁转矩和磁阻转矩组成。传统的 $i_d = 0$ 控制忽略了磁阻转矩,且不能用于弱磁调速。

1.2 电压极限椭圆和电流极限圆

逆变器向 PMSM 提供的最大电压受到直流侧电压和逆变器转换效率的影响,满足一定的约束条件。

对定子电压有 $u_s = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$ 。

结合 PMSM 数学模型,有:

$$(L_d i_d + \psi_f)^2 + (L_q i_q)^2 \leq \left(\frac{u_{smax}}{\omega_r} \right)^2 \quad (4)$$

式中: u_{smax} —— u_s 允许达到的极限值。

同样,逆变器输出电流的能力也受其容量的限制,电动机定子电流也有一个极限值,即

$$i_d^2 + i_q^2 \leq i_{smax}^2 \quad (5)$$

式中: i_{smax} ——定子电流最大值。一般设定 i_{smax} 等于额定值。

式(3)和式(4)构成了电压极限椭圆和电流极限圆,如图 1 所示^[4]。

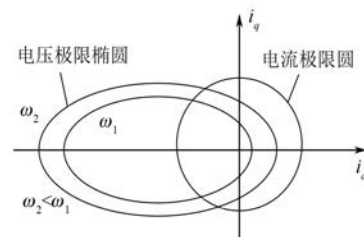


图 1 电压极限椭圆和电流极限圆

因为定子电流矢量 i_s 既要满足电流极限方程,又要满足电压极限方程,所以 i_s 要落在电压极限椭圆和电流极限圆的共同范围内^[5]。

1.3 最大转矩电流比

对于 IPMSM,当运行在恒转矩状态下时,恒转矩曲线上任意一点对应着一对 i_d 和 i_q ,每对 i_d 和 i_q 构成的定子电流矢量都能产生相同大小的电磁转矩,其中存在一个定子电流矢量幅值最小,将满足条件的点连接起来,其对应的曲线称为最大转矩电流比 (Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 曲线^[6]。

根据 PMSM 数学模型有:

$$\begin{cases} I_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \\ T_e = \frac{3}{2} P_m [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \end{cases} \quad (6)$$

构造辅助函数为

$$G = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} - \lambda \left\{ T_e - \frac{3}{2} P_m [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \right\} \quad (7)$$

由此可得 MTPA 情况下,即相同电磁转矩时幅值最小的 i_d, i_q 电流满足的方程为

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 4(L_d - L_q)i_q^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (8)$$

PMSM 在 MTPA 曲线上恒转矩运行时,定子电流幅值最小,有利于减小电机运行中的铜耗,提高逆变器的效率,降低能量损耗。

2 弱磁控制策略

对于 PMSM 而言,其转子磁场由具有高磁能积的永磁材料产生,因此,与转子采用电励磁的电机相比,转子磁场无法直接削弱。通常 PMSM 弱磁是通过调节定子电流的幅值与相角来实现的。其本质是增加电机的直轴去磁电流分量 i_d ,以反向抵消永磁体产生的磁场,从而削弱电机气隙磁场来等效直接减弱励磁磁场,达到弱磁控制的目的,或者通过减少交轴去磁电流分量 i_q 来减弱磁场^[7]。由图 2 可知,结合两种方式弱磁效果更好。

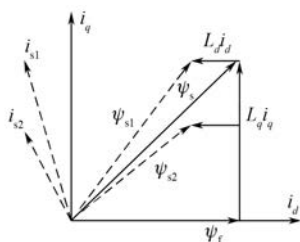


图2 弱磁控制方式矢量图

弱磁控制的方式有多种,对于不同的 PMSM 采用的弱磁方式也有所不同。本文采用电流调节器法进行弱磁控制,用电机角频率实际值和给定值之间的差值调制出定子交轴电流,而定子直轴电流则由 MTPA 方案来决定。在原来双闭环结构的基础上多加一个弱磁环,将给定电压与直流端电压间的差值作为调节量来控制去磁电流的给定,通过控制直轴去磁电流进行深度弱磁控制。在运行过程中,通过定子实时电压与逆变器最大电压的比较来控制恒转矩区域向弱磁区域切换。

具体控制过程可以分为 3 个区域,如图 3 所示。

恒转矩区。在 MTPA 曲线上,按 MTPA 控制,不同转速下,OA 曲线的任一点上都是恒转矩的。

弱磁 I 区。逆变器交流输出侧电压达到其最大值后会引电流内环调节器的饱和,可以通过增加直轴的去磁电流分量,使电动机定子电流轨

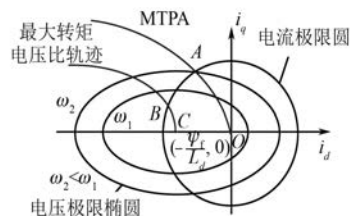


图3 弱磁控制轨迹

迹沿 AB 运行,电机转速随之增加。控制方式为

$$\begin{cases} \text{如果 } \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq u_{\max}, & \text{则 } \Delta i_d = 0 \\ \text{如果 } \sqrt{u_d^2 + u_q^2} > u_{\max}, & \text{则 } \Delta i_d = 0 \end{cases} \quad (9)$$

基于 i_d 的负向电流补偿控制如图 4 所示。

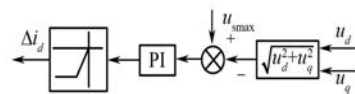


图4 基于 i_d 的负向电流补偿控制

弱磁 II 区。当电动机到达 C 点坐标对应的位置时可继续调节交轴电流分量来进行弱磁。

3 模糊自整定 PI

传统的 PI 控制受电机参数变化和负载扰动等不确定因素影响较大,且 PI 参数固定,抗干扰能力差,导致控制品质下降。因此,采用高性能模糊自适应 PI 控制,以提高系统的控制性能^[8]。

模糊自整定 PI 通过模糊推理,对 PI 参数进行在线调整。通过对转速偏差值以及输入转速偏差值变化率的判断,用模糊控制规则来在线整定 PI 调节器的 K_p 、 K_i ,从而使控制系统在不牺牲快速响应能力和动态跟踪性能的前提下具有较高的抗扰动能力和一定的自适应能力。

现定义转速偏差 e ,偏差变化率 $ec(k)$,PI 参数调整量 ΔK_p 、 ΔK_i ,各含 7 个模糊子集 {NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZE(零),PS(正小),PM(正中),PB(正大)},连续性论域均为 $[-6, 6]$ 。

模糊 PI 参数计算公式为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \end{cases} \quad (10)$$

引入量化因子 K_e 、 K_{ec} , e 乘以量化因子 K_e , ec 乘以 K_{ec} 输入二维模糊控制器中,输出 PI 控制器

的增量 ΔK_p 、 ΔK_i 来调整 PI 控制器的原始值 K_{p0} 、 K_{i0} 。为计算方便, e 、 ec 、 ΔK_p 、 ΔK_i 均采用三角形隶属函数^[9], 如图 5 所示。

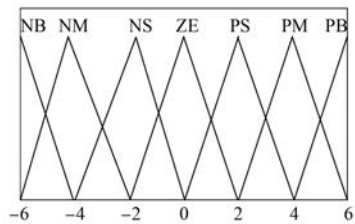


图 5 e 、 ec 、 ΔK_p 、 ΔK_i 隶属函数

根据工程实践总结, PI 参数调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 的控制规则表如表 1 和表 2 所示。

表 1 ΔK_p 模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	NS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PB	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

将以下列形式表示的 49 条推理语句输入到模糊控制器 Mamdani 中。

If (e is NB) and (ec is NB) then K_p is PB, K_i is NB

在运行中, 不同的输入, 将得到不同的模糊输出量。但是这些推理语句对应输出 ΔK_p 、 ΔK_i 的模糊输出量, 不能直接去控制系统, 必须进行解模糊处理。利用重心法进行去模糊化, 得到真正 ΔK_p 、 ΔK_i 精确输出值, 然后实现 PI 参数自整定。模糊控制原理框图如图 6 所示。

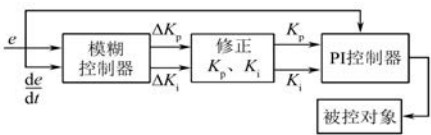


图 6 模糊控制原理框图

三相 PMSM 控制框图如图 7 所示。

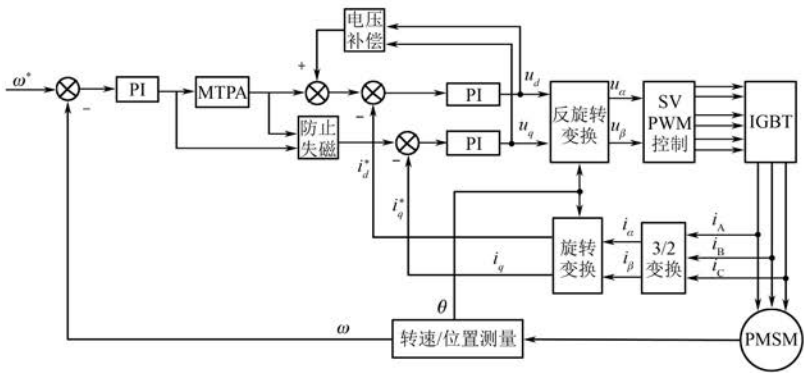


图 7 三相 PMSM 控制框图

4 MATLAB 仿真结果与分析

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真模型, 其中电机参数设置: 极对数 $p=4$, 定子直轴电感 $L_d=5.25$ mH, 交轴电感 $L_q=12$ mH, 定子电阻 $R=0.95$ Ω , 磁链 $\psi_f=0.1827$ Wb, 转动惯量 $J=$

$0.0003 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 阻尼系数 $B=0.008 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{[10]}$, 额定转速 2000 r/s 。仿真条件设置: 直流侧电压 $U_{dc}=311 \text{ V}$ 。

恒功率弱磁区转速在 $2000\sim5000 \text{ r/s}$ 之间。先取 3000 r/s , 在 0.2 s 突加负载 10 N , 传统 PI 控制情况下弱磁调速的仿真结果如图 8 所示。

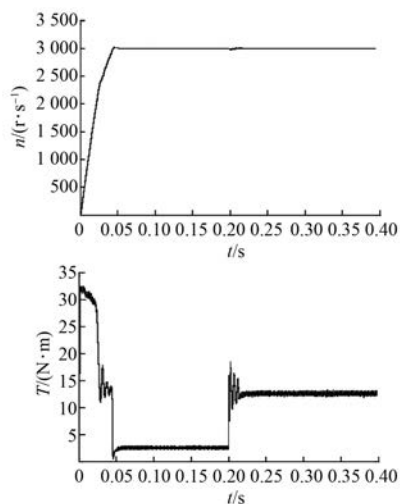


图8 无模糊自整定 PI 弱磁仿真转速和转矩

由仿真结果可知,0.05 s 之前恒转矩过渡到恒功率,弱磁调速能够跟踪给定速度,在 0.2 s 突加负载时转矩波动较大,影响电机性能。

在模糊自整定 PI 情况下,弱磁控制的仿真结果如图 9 所示。

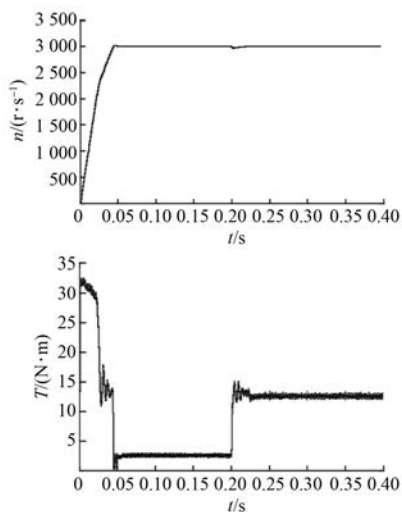


图9 有模糊自整定 PI 弱磁仿真转速和转矩

由图 9 可知,电机转速能够跟踪给定转速。在 0.2 s 突加负载时转矩仍然有波动,但是由于模糊 PI 控制的作用,相比传统 PI,转矩波动有所减小,提高了电机的调速性能。

5 结 语

本文针对 IPMSM 的调速原理进行分析,提出 PMSM 的恒转矩和恒功率分区域调速,指出在额定转速以下使用最大转矩电流比的方式可以提高 PMSM 的转矩利用率,在额定转速以上进行弱磁控制可以提高调速范围。针对传统 PI 控制的转矩波动问题,提出模糊自整定 PI 对弱磁控制进行了优化,并通过仿真试验进行了验证。仿真结果表明:模糊自整定 PI 使永磁电机在弱磁区域的调速性能有所提高。

【参考文献】

- [1] 石敏. 永磁同步电机高性能弱磁控制策略的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- [2] 刘微. 永磁同步电机弱磁控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [3] 袁登科, 徐延东, 李秀涛. 永磁同步电机变频调速系统及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [4] 王成元, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [5] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [6] 石敏, 冯江华, 许俊峰, 等. 提高永磁同步电机在深度弱磁控制区稳定性的控制研究[J]. 机车电传动, 2015(1): 22-25.
- [7] 沈辉. 电动汽车牵引电机无位置传感器弱磁控制技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [8] 卞延庆, 庄海, 张颖杰. 基于模糊 PI 的永磁同步电机矢量控制研究[J]. 微电机, 2015, 48(11): 62-66.
- [9] 顾华利, 张开如, 狄东照, 等. 基于模糊自整定 PI 永磁同步电机矢量系统的研究[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(5): 14-18.
- [10] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.

收稿日期: 2018-04-25