

基于模型预测的多电机弱磁同步控制策略研究^{*}

李东亮, 缪仲翠, 王志浩, 张 靓

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 从工业场合下多电机系统高速运行的实际需求出发, 分析了传统多电机控制系统和传统弱磁控制系统的优缺点, 针对多电机高速运行时的弱磁特性进行了研究。模型预测控制(MPC)是一种基于被控对象模型的新型控制算法, 具有较强的鲁棒性和较好的控制性能。交叉耦合控制是一种在并行控制基础上对每个电机进行相应补偿的控制系统。将 MPC 应用到多电机控制系统中并对其进行改进使其具有弱磁控制能力; 对传统的交叉耦合控制策略进行改进。将二者结合提出了一种基于模型预测的多电机弱磁同步控制策略, 并以双电机系统为例。最后, 进行了仿真验证, 仿真试验结果表明, 基于模型预测的多电机弱磁同步控制策略, 可获得比传统双电机系统更好的跟随性能和同步性能。

关键词: 多电机转速同步; 交叉耦合控制; 模型预测控制; 弱磁控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)11-0007-06

Synchronous Flux Weakening Control Strategy of Multi-Motor System Based on Model Prediction^{*}

LI Dongliang, MIAO Zhongcui, WANG Zhihao, ZHANG Jing

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the actual demand for high-speed operation of multi-motor system in industrial occasions, the advantages and disadvantages of traditional multi-motor control system and traditional flux weakening control system were analyzed. The flux weakening characteristics of multi-motor system under the high-speed operation were discussed. Model predictive control (MPC) was a new control algorithm based on the controlled object model, which had strong robustness and better control performance. Cross-coupling control was a control system which compensated each motor on the basis of parallel control. MPC was applied to multi-motor control system and the ability of flux weakening control was improved. The traditional cross-coupling control strategy was also improved. A model prediction synchronous control strategy for multi-motor flux weakening control was proposed based on the combination of the two strategies. Taking the simulation of dual-motor system as an example, the simulation results show that the multi-motor flux weakening synchronous control strategy based on model prediction has better tracking performance and synchronous performance than the traditional control system.

Key words: multi-motor speed synchronization; cross-coupling control; model predictive control; flux weakening control

0 引 言

随着工业的快速发展, 多电机同步控制系统

开始广泛应用于现代工业生产中, 多电机系统性能直接影响着工业生产的质量^[1]。系统中多台电机之间的转速能否同步以及同步误差是评判多电

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61663022); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT_16R36)

作者简介: 李东亮(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

缪仲翠(1971—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机先进控制。

王志浩(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

机系统性能的重要指标。与此同时,在某些需要电机有较宽调速范围的场合,弱磁控制显得尤为重要^[2]。因此,对多电机同步控制系统进行弱磁调速的研究具有重要的意义。

目前常用的多电机同步方法分为机械同步和电同步。机械同步采用长轴等刚性部件将多台电机连接起来,以达到电机之间转速同步的要求,这种同步方式受到多台电机之间的距离、连接材料的抗扭转性能等因素影响,同步精度较低,传动系统复杂,且器件损耗较大。电同步传动不受以上因素的影响,因而应用较为广泛。电同步的实现又分为耦合控制和非耦合控制,其中耦合控制能使系统的同步性能达到较高的水平^[3]。

就弱磁控制而言,近年来电压闭环弱磁控制的方法受到了越来越多的关注^[4]。该控制方法是利用电压参考值和最大限值之间的偏差确定 d 轴电流,但该方法对参数不敏感,如何提高弱磁控制的控制性能仍需要研究。

基于以上分析,本文以双感应电机同步控制系统为研究对象,建立了感应电机数学模型。在此基础上,采用模型预测控制(MPC)算法与交叉耦合控制算法并对其进行改进,设计了基于模型预测的双电机弱磁同步控制系统,并通过仿真验证了该系统的可行性和有效性。

1 感应电机动态数学模型

在理想条件下,感应电机在两相静止状态下的状态方程可以表示为^[5]

$$\begin{cases} p\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\lambda(R_s L_r + R_r L_s) + j\omega_r & \lambda(R_r - jL_r \omega_r) \\ -R_s & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \lambda L_r \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1 \quad 0], \lambda = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2},$$

$$\mathbf{x} = [i_s \quad \psi_s]^T.$$

式中: p ——微分算子;

R_s, L_s ——电机定子电阻和电感;

R_r, L_r ——电机转子电阻和电感;

L_m ——互感;

ω_r ——电机转速;

$\mathbf{u}$ ——电压矢量矩阵;

i_s ——定子电流;

ψ_s ——定子磁链。

感应电机的转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p L_m \psi_s \otimes i_s \quad (2)$$

式中: n_p ——感应电机极对数。

2 单电机模型预测弱磁控制算法

2.1 传统弱磁控制算法

传统的弱磁控制算法以电压闭环弱磁控制算法为主。该算法的原理是将感应电机的定子电压与最大限制电压进行比较。若定子电压高于最大限制电压,则认为电机进入弱磁区运行,此时通过减小定子电流的方式使感应电机的定子电压降低,以满足电机的最大限制电压,从而使电机能够在弱磁区稳定运行且获得较高的转速^[4]。该控制算法虽然原理简单,但是因控制器采用传统的 PI 控制器,积分环节容易产生积分饱和现象,导致在电机运行的过程中控制器的控制效果大幅度降低,甚至导致系统不再稳定^[6]。针对上述问题本文采用 MPC 算法对传统的弱磁控制算法进行改进。

2.2 单电机模型预测弱磁控制算法

本文所提出的基于模型预测的弱磁控制算法的原理:以电机的额定转速为基准值,若电机转速上升至额定转速以上,判定电机进入弱磁区运行,此时通过 MPC 算法对电机的磁链和转矩进行控制,从而使感应电机的转速能够继续上升达到预期要求^[7]。对单电机而言,模型预测弱磁控制系统结构如图 1 所示,其中 $\omega, \omega^*, \omega_k$ 分别为额定转速、给定转速和感应电机输出的转速, S_a, S_b, S_c 是经过模型预测算法得到的输入逆变器的开关状态。

基于以上分析,综合考虑控制精度和计算量方面的要求,本文采用一阶欧拉离散法对感应电机的磁链与转矩方程进行离散化^[8]。

对式(1)与式(2)进行一阶欧拉离散后可以得到感应电机对应的预测模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + T_s [\mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k)] \\ T_e(k+1) = \frac{3}{2} n_p L_m \psi_s(k+1) \otimes i_s(k+1) \end{cases} \quad (3)$$

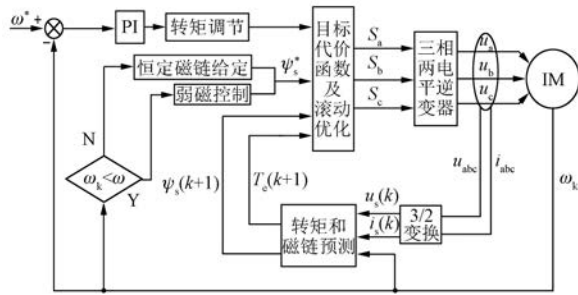


图1 模型预测弱磁控制框图

其中: $\psi_s^2(k+1) = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2(k+1) + \psi_{s\beta}^2(k+1)}$,
 $i_s^2(k+1) = \sqrt{i_{s\alpha}^2(k+1) + i_{s\beta}^2(k+1)}$ 。

在滚动优化模块,以磁链和电磁转矩的误差绝对值之和最小为控制目标,定义滚动优化的目标函数为

$$J = |T_e^* - T_e(k+1)| + k_\psi |\psi_s^* - \psi_s(k+1)| \quad (4)$$

式中: T_e^* 和 ψ_s^* ——电磁转矩和定子磁链的给定值;

k_ψ ——定子磁链的权重系数。

一般情况下 $k_\psi = T_n / \psi_{sn}$, 应用中还需要根据实际情况进行相应的调整。

感应电机在高速运行的过程中,为了满足电机运行条件,需要减小磁链。本文在传统的 $1/\omega$ 弱磁控制方法的基础上进行改进,使磁链和转矩均可以在全速度范围内具有较好的实时性能。本文中感应电机磁链:

$$\psi_s = \begin{cases} \psi_s^* & 0 \leq \omega_r \leq \omega^* \\ \psi_s^* \times \frac{\omega^*}{\omega_r} & \omega_r > \omega^* \end{cases} \quad (5)$$

在对磁链进行调整的同时,对电磁转矩也进行相应的调整。电磁转矩为

$$T_{e1} = T_e^* \times \frac{\omega^*}{\omega_r} \quad (6)$$

由于电磁转矩的给定方法发生了变化,对电磁转矩的最大值也进行了相应的限定,计算式如式(7)所示:

$$T_{e2} = \frac{3\sqrt{2}}{4} n_p L_m \psi_s^* i_{s\max} \quad (7)$$

结合式(6)和式(7),以及原 MPC 算法中转速闭环输出的电磁转矩 T_e^{PI} , 感应电机的电磁转矩为

$$T_e = \min\{T_{e1}, T_{e2}, T_e^{PI}\} \quad (8)$$

3 多电机同步控制策略

3.1 传统交叉耦合控制策略

传统的交叉耦合控制策略是在并行控制的基础上,对每台电机引入补偿环节,最显著的标志就是将每台电机输出转速的差值(即转速同步误差)作为补偿值反馈到相关的每台电机上。交叉耦合控制框图如图2所示^[9]。图2中 ω 为转速, T_L 为输入的负载扰动。

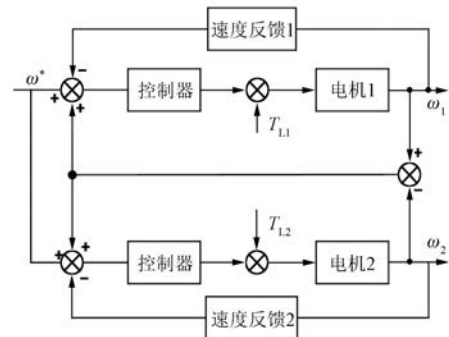


图2 交叉耦合控制框图

在交叉耦合系统中,每台电机之间均存在耦合关系。当其中一台电机的转速发生波动时,其余的电机均可以通过耦合关系以及单电机控制器对本台电机的转速做出相应的调整^[3],从而使多电机系统的同步误差维持在一个可接受的范围内,实现比非耦合控制系统更高的同步精度。

与单电机调速系统不同的是,多电机调速系统不仅要求每台电机的转速能够跟踪给定值,即每台电机的跟踪误差要小,而且还要每台电机的转速能够同步,即每台电机之间的转速同步误差要小。

3.2 交叉耦合控制策略的改进

传统的交叉耦合控制系统中交叉耦合控制器一般采用PI控制器。为了使控制系统具有较强的抗扰动性能和更好的控制性能,本文采用分数阶PI控制器代替原系统中的PI控制器。

根据文献[10-11]对分数阶积分进行分析。分数阶积分不仅继承了整数阶积分的优点,而且由于可调参数自由度增大,通过合理选择积分阶次,可增加控制系统的灵活性。分数阶PI的表达式为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \tag{9}$$

式中： K_p ——比例参数；
 $\frac{K_i}{s^\lambda}$ ——输入量的分数阶积分。

可见分数阶 PI 比整数阶 PI 多了一个可调参数 λ 。对不同阶次分数阶积分特性曲线进行分析,如图 3 所示,分数阶积分的阶次 λ 越小对应曲线输出段的斜率就越大,分数阶控制器越容易进入积分饱和状态,但是随着时间的推移分数阶控制器的偏差累加减小,比整数阶 PI 利于退饱和,可以提高控制系统运行时的效率和性能。

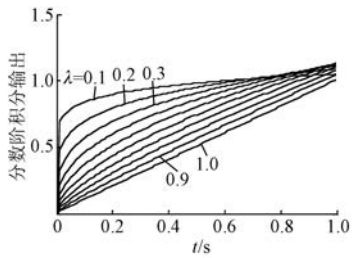


图 3 $s^{-\lambda}$ 特性

4 仿真分析

基于以上分析,本文提出将 MPC 算法应用于双电机弱磁同步控制系统中,用 MPC 取代传统单电机调速系统中的转速控制器,然后用分数阶 PI 控制器代替传统交叉耦合控制系统中的 PI 控制器。双电机模型预测弱磁控制算法结构框图如图 4 所示。

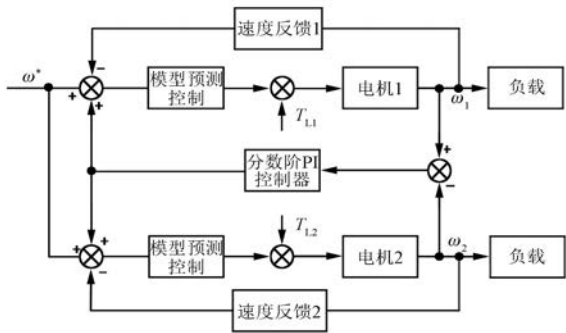


图 4 双电机模型预测弱磁控制算法结构框图

为了验证所提出的模型预测弱磁同步控制策略的有效性和可行性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台进行了仿真试验。2 台参数相同的感应电机

构成双电机交叉耦合控制系统,感应电机参数如表 1 所示。每台电机的转速由模型预测弱磁控制系统进行控制,2 台电机的转速同步误差由改进后的交叉耦合控制系统进行调节。直流母线电压 U_d 为 511 V,系统采样周期为 10 μ s,定子磁链的权重系数 k_ψ 取 95。

表 1 感应电机相关参数

参数名称	参数值
电压 U_N/V	380
定子电阻 R_s/Ω	1.85
转子电阻 R_r/Ω	2.658
定子绕组自感 L_s/H	0.294 1
转子绕组自感 L_r/H	0.289 8
互感 L_m/H	0.283 8
转动惯量 $J/(N\cdot m\cdot s^2)$	0.128 4
极对数 n_p	2
频率 f_N/Hz	50
额定转速/ $(r\cdot min^{-1})$	1 000

为了体现提出的基于模型预测的双电机弱磁控制策略的优越性,将本文的控制系统仿真结果与传统的电压闭环弱磁控制搭建的双电机弱磁控制仿真结果进行了对比。结果如图 5~图 7 所示,其中系统 1 为基于模型预测的双电机弱磁控制系统,系统 2 为传统电压闭环双电机弱磁控制。

仿真试验给定额定转速为 1 000 r/min,稳定运行至 0.4 s 时,使转速继续上升至 1 500 r/min。为了更能体现 2 种系统在运行过程中突加负载时的抗扰动能力,在稳定运行至 0.8 s 时给电机 1 施加 5 N·m 的阶跃负载。

由图 5 对比可得,系统 1 与系统 2 均可以稳定运行至弱磁区,即转速高于额定转速 1 000 r/min。但是,系统 1 完全可以达到要求的转速 1 500 r/min,系统的跟随误差几乎为零,而系统 2 则在转速到达 1 470 r/min 左右时就已停止上升,系统的跟随误差为 30 r/min 左右。由此可以得出,系统 1 的跟随性能明显优于系统 2。

由图 6 可得,系统 1 和系统 2 在未加负载时,均能够同步运行,其同步误差保持为 0。按照预先设定,在运行到 0.8 s 时,给系统中的电机 1 加入 5 N·m 的负载后,可以明显得出,系统 1 在加入负载后很快回到了稳定状态,且系统的同步误

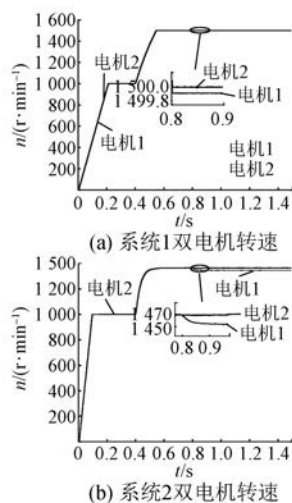


图5 2种双电机系统转速响应

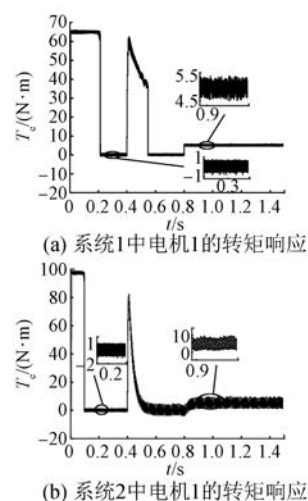


图7 2种系统中带负载电机的转矩响应

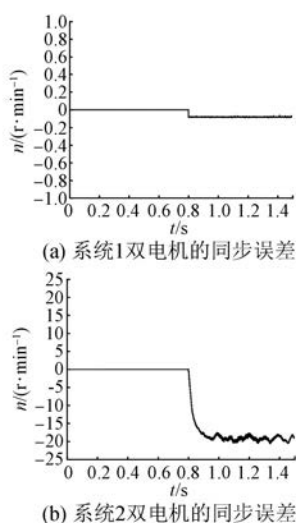


图6 2种双电机系统的转速误差

差仅为 0.15 r/min, 而系统 2 在加入负载后的 0.5 s 才进入稳定运行状态, 此后系统的同步误差达到了 20 r/min, 明显高于系统 1 的同步误差。由此可得, 系统 1 的同步性能明显优于系统 2。

分析图 7 可以得出, 系统 1 与系统 2 在转速达到 1 000 r/min 并稳定运行时, 转矩脉动几乎相同, 其大小为 $\pm 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。当转速继续上升至 1 500 r/min 并在加入负载后稳定运行时, 可以发现系统 1 的转矩脉动为 $\pm 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 而系统 2 的转矩脉动增大至 $\pm 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。转矩脉动的大小决定着电机输出转速的抖振大小, 从而影响系统的稳定性和能耗。由此可见, 系统 1 在进入弱磁状态运行

时具有更好的稳定性。

定子磁链响应与电流响应也从另一个方面决定着电机转矩输出的稳定性。由图 8 和图 9 可以看出, 系统 1 中电机 1 由非弱磁状态向弱磁状态过渡平稳且光滑。由电流响应的曲线也可以看出, 系统 1 在升速的过程中电流没有明显的波动, 在弱磁区加入负载后电流也十分平稳且光滑。

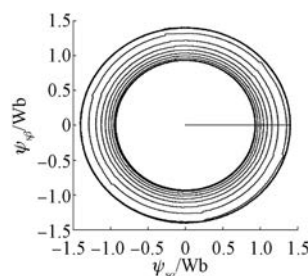


图8 系统1中电机1的定子磁链

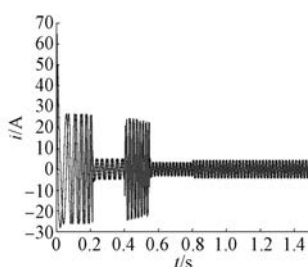


图9 系统1中电机1的定子电流响应

5 结 语

本文以双电机系统为例, 研究了多电机系统

的弱磁同步控制策略。针对传统多电机同步控制系统存在的同步性能差、传统弱磁控制系统跟随误差大及转矩脉动大等缺点,提出了基于模型预测的双电机弱磁同步控制系统。通过 MATLAB/Simulink 平台搭建了相应的仿真模型,并与传统的双电机同步控制系统进行比较分析。仿真结果表明,与传统的双电机弱磁控制系统相比,本文所提出的控制方法具有同步误差小、跟随性能好、转矩脉动小等优点,显示出了在双电机弱磁控制方面优良的控制效果。

【参考文献】

- [1] 史婷娜,辛雄,夏长亮.采用虚拟电机的改进偏差耦合多电机同步控制[J].中国电机工程学报,2017,37(23): 7004.
- [2] 韩天亮.基于分数阶滑模的矿用牵引电机调速控制研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- [3] 郭松.双永磁同步电机同步协调控制系统研究[D].镇江:江苏科技大学,2017.
- [4] CASADEI D, MENGONI M, SERRA G, et al. Field-weakening control schemes for high-speed drives based on induction motors: a comparison[C]//2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008.
- [5] 张永昌,杨海涛.异步电机无速度传感器模型预测控制[J].中国电机工程学报,2014,34(15): 2422.
- [6] BOZHKO S, DYMKO S, KOVBASA S, et al. Maximum torque-per-amp control for traction IM drives: theory and experimental results[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 181.
- [7] 余雨婷,滕青芳,柏建勇,等.基于弱磁升速的永磁同步电机模型预测控制[J].微特电机,2016,44(12): 44.
- [8] ZHANG Y, BAI Y, YANG H, et al. Low switching frequency model predictive control of three-level inverter-fed IM drives with speed-sensorless and field-weakening operations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4262.
- [9] 李杨.基于迭代学习的多电机同步控制系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [10] 缪仲翠,党建武,韩天亮.基于分数阶 $PI-\lambda$ 的矿用牵引交流电机速度控制[J].兰州交通大学学报,2017,36(6): 59.
- [11] 缪仲翠,党建武,巨梅,等.基于分数阶滑模观测的感应电机无速度传感器矢量控制[J].电机与控制学报,2018,22(5): 84.

收稿日期: 2019-08-01

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行人,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。