

双电机同步连轴转矩均衡控制策略

严东超, 尹厚军, 王传秀

(空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038)

摘要 针对 2 台无刷直流电机同步连轴存在强制同速、转矩耦合以及参数漂移等问题,提出一种基于模糊控制的转矩均衡控制策略。构造速度和转矩双闭环均衡控制系统,同时满足系统的速度给定跟踪与转矩均衡控制。在速度控制环,给定转速与无刷直流电机反馈转速的转速差经过转速调节器,得到统一的转矩指令;2 台电机反馈转矩与给定转矩分别进行比较,转矩差进入转矩调节器,构成 2 个转矩闭环,快速跟随转矩指令。在 Matlab/Simulink 环境下,建立双电机同步连轴转矩均衡控制系统仿真模型,仿真对比了电机在参数一致和异常 2 种状况下直接转矩控制和模糊控制 2 种方案的结果,验证了所提控制策略的有效性。

关键词 同步连轴;直接转矩控制;模糊控制;转矩均衡

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.008

中图分类号 TM921.48 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0033-04

Torque Balance Control in Fixed Join Two-motor System

YAN Dongchao, YIN Houjun, WANG Chuanxiu

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Considering mandatory synchronization, torque coupling and parameter drifting among two brushless DC motors with synchronous shafts, a novel two-motor torque balance control scheme based on fuzzy control is presented. A double loop-closed control of speed control and torque balance is realized simultaneously with meeting the speed control and power balance control system, in which torque servo master-slave control method is used. In speed control loop, the result of comparing given speed and the feedback speed of brushless DC motor gets access to the speed regulator to obtain the unified torque command. The other result of comparing the given speed and the torque feedback of brushless DC motors comes into the torque regulator to constitute two torque closed loops to rapidly follow the unified torque command. In Matlab/Simulink environment, the model of two motors torque balance control is built and a simulation of the working state of motors is conducted in normal and abnormal electrical parameters. The simulation result shows that the proposed scheme is valid.

Key words: synchronous shaft; direct torque control; fuzzy control; torque balance

利用 2 台电机同步连轴拖动同一大型负载,有利于缩短过渡过程、减小转动惯量、降低能量损耗,

收稿日期:2014-12-19

基金项目:航空科学基金资助项目(20110896009)

作者简介:严东超(1960—),男,江苏无锡人,教授,主要从事航空电气系统研究.E-mail:yhj120021@126.com

引用格式: 严东超,尹厚军,王传秀.双电机同步连轴转矩均衡控制策略[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):33-36. YAN Dongchao, YIN Houjun, WANG Chuanxiu. Torque Balance Control in Fixed Join Two-motor System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 33-36.

有效提高系统的动态性能^[1-2]。直接转矩控制(DTC)是一种高动态性能控制方法。转子参数变化不影响磁链的计算,采用转矩和磁链双位置控制方法,定子磁链作为被控量;在改变负载或加减速的过程中,获得快速的转矩响应^[3-4]。

随着控制技术的发展,在一般电机控制系统基础上,加上一个模糊控制环节,利用模糊控制来选择逆变器的开关状态,不仅能改善系统性能,而且可以克服容差的影响^[5]。目前采用的直接转矩控制方法一定程度上解决了转矩不平衡的问题。但是系统的容差和响应速度在要求较高的场合未能有效解决。

1 双电机同步连轴拖动系统

在工程应用中,2台电机即使型号一致,由于制造原因,参数不可能完全相同,且运行过程中,电机参数也会发生漂移,造成2台同步连轴电机承担的负载大小不一,严重时电机会过热甚至烧损。

图1中,两电机 M_1 、 M_2 同步连轴,测量的实际转速与给定转速进行比较,转速差经过转速调节单元输出两电机的转矩指令,构成速度控制环。两电机将转矩指令与计算所得电机实际转矩相比较,经过直接转矩控制器、三相逆变器,进行转矩的均衡调节,构成2台电动机转矩均衡控制环。

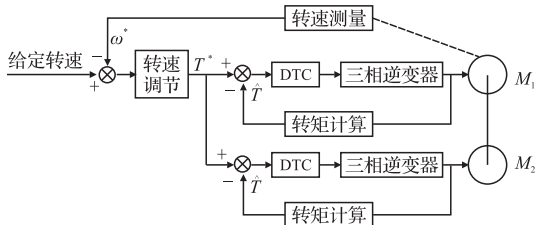


图1 双电机同步连轴转矩平衡控制原理

Fig.1 Torque balance control of synchronous shafts two-motor system

1.1 无刷直流电机数学模型

设定子三相完全对称;永磁体的磁导率与空气的磁导率相同;假设磁路不饱和,不计磁滞和涡流损耗,每相绕组的自感为常数,直接利用电机本身的相变量来建立无刷直流电机的数学模型,则无刷直流电机定子三相绕组的电压平衡方程为:

$$\begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{pmatrix} p \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{pmatrix} + U_n \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$U_n = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} - \frac{E_A + E_B + E_C}{3} \quad (2)$$

式中: U_A 、 U_B 、 U_C 为定子三相绕组的相电压; I_A 、 I_B 、 I_C 为定子三相绕组相电流; R_s 为定子三相绕组电阻; M 为定子三相绕组之间互感; L_s 为定子三相绕组自感; U_n 为中性点电压; p 是微分算子; E_A 、 E_B 、 E_C 为定子三相绕组相电势。

在三相对称的星形绕组电动机中根据基尔霍夫定理存在 $I_A + I_B + I_C = 0$,因此又有 $MI_A + MI_B + MI_C = 0$,所以式(1)可化简为:

$$\begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} + U_n \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{pmatrix} p \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{pmatrix} \quad (3)$$

可得无刷直流电机的电磁转矩方程为:

$$T_e = (E_A I_A + E_B I_B + E_C I_C) / \omega \quad (4)$$

式中: T_e 为电磁转矩负载; ω 为转子角速度。

无刷直流电机机械方程为:

$$d\omega/dt = (T_e - T_L - B\omega) / J \quad (5)$$

式中: J 为转动惯量; T_L 为载荷转矩; B 为粘滞摩擦系数。

1.2 转速和转矩的均衡控制

在转速测量的基础上,双电机同步连轴转速均衡控制环由转速测量单元、PI控制单元、三相逆变器电路等构成,见图2。

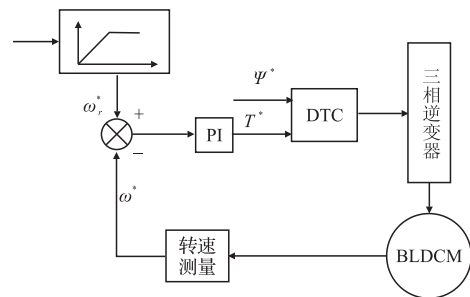


图2 速度控制环

Fig.2 Speed control loop

ω_{ref} 为给定转速,由速度曲线设置单元,按给定斜率计算出转速指令连续曲线:

$$\omega_r^* = \begin{cases} \omega_r^* + k_\omega \Delta t, & \omega_r^* \neq \omega_{ref} \\ \omega_{ref}, & \omega_r^* = \omega_{ref} \end{cases} \quad (6)$$

式中:由给定转速和转速指令的大小关系决定设定斜率 k_ω 的正负符号;采样间隔时间是 Δt 。转速测量值 ω^* 与转速指令 ω_r^* 比较后,经速度 PI 控制器算出电机的转矩指令 T^* 。

直接转矩控制系统需要定子磁链和转矩的反

馈,利用动态数学模型来计算电磁转矩和定子磁链。

忽略交、直间的互感,以 $d-q$ 为坐标系内表示无刷直流电机定子绕组产生的电磁转矩:

$$T_e = \frac{3p}{4} \left(\frac{dL_d}{d\theta_e} i_{sd} + \frac{d\psi_{rd}}{d\theta_e} - \psi_{sq} \right) i_{sd} + \frac{3p}{4} \left(\frac{dL_q}{d\theta_e} i_{sq} + \frac{d\psi_{rq}}{d\theta_e} + \psi_{sd} \right) i_{sq} \quad (7)$$

式中: $\psi_{sd} = L_d i_{sd} + \psi_{rd}$; $\psi_{sq} = L_q i_{sq} + \psi_{rq}$; θ_e 为转子电角度; p 是电机的极对数; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为 d 、 q 轴的定子电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 、 ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 分别为转子、定子的 d 、 q 轴磁链。

由于无刷直流电机的转子为永磁体, L_d 、 L_q 在 $d-q$ 坐标系下相等且为常量,令 $L_d = L_q = L_s$ 则电磁转矩的公式表示为:

$$T_e = \frac{3p}{4} \left[\left(\frac{d\psi_{rd}}{d\theta_e} - \psi_{rq} \right) i_{sd} + \left(\frac{d\psi_{rq}}{d\theta_e} + \psi_{rd} \right) i_{sq} \right] \quad (8)$$

将 $d-q$ 坐标系下的电磁转矩公式转化至 $\alpha-\beta$ 坐标系下,得到的电磁转矩表达式为:

$$T_e = \frac{3p}{4} \left(\frac{d\psi_{ra}}{d\theta_e} i_{sa} + \frac{d\psi_{r\beta}}{d\theta_e} i_{s\beta} \right) \quad (9)$$

式中: $\psi_{ra} = \psi_{rd} \cos\theta_e - \psi_{rq} \sin\theta_e$; $\psi_{r\beta} = \psi_{rd} \sin\theta_e + \psi_{rq} \cos\theta_e$ 。

通过控制定子电流、电压来控制定子磁链,它们的关系为:

$$\dot{\psi}_{ra} = \int (u_{sa} - R i_{sa}) dt \quad (10)$$

$$\dot{\psi}_{r\beta} = \int (u_{s\beta} - R i_{s\beta}) dt \quad (11)$$

式中: R 为定子的电阻。并由此得到定子磁链的值和角位置:

$$\psi = \sqrt{\psi_{sa}^2 + \psi_{s\beta}^2} \quad (12) \quad \theta = \arctg(\psi_{s\beta}/\psi_{sa}) \quad (13)$$

BLDCM-DTC 的控制原理见图 3。

由以上分析可知,通过控制电机的定子磁链的旋转速度及幅值可以进一步控制电磁转矩。这种基于定子磁链的直接转矩控制方法,省掉了复杂的电机数学模型处理和坐标变换。

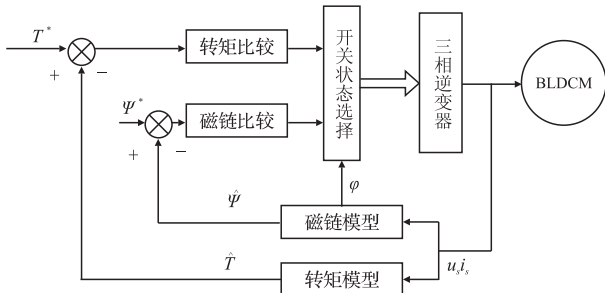


图 3 基于定子磁链控制的直接转矩控制系统

Fig.3 Direct torque control based stator flux

1.3 模糊控制

采用模糊控制器取代 DTC 中的控制器,将转矩误差 E_T 、磁链误差 E_ψ 和 θ 作为模糊控制器的输入,逆变器的开关状态作为输出。模糊化的过程中,将模糊变量 E_T 和 E_ψ 分别取负(N)、零(Z)、正(P)3 个模糊量,主要目的为控制转矩。 θ 为平面上平均分配的 6 个区间,如图 4 为磁链与转矩的隶属度函数^[6]。

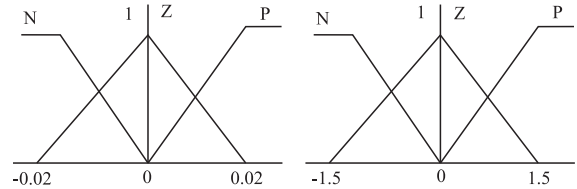


图 4 磁链的隶属度函数和转矩的隶属度函数

Fig.4 Subordinate function of flux and torque

BLDCM-DTC 通过控制电机端子上的电压来实现定子磁链的控制,而加载到电机上的端电压和逆变器的通断有关^[7-8]。根据桥臂的开关状态,得到 6 个非零矢量 $U_1(100001)$ 、 $U_2(001001)$ 、 $U_3(011000)$ 、 $U_4(010010)$ 、 $U_5(000110)$ 、 $U_6(100100)$ 和 2 个零矢量 $U_0(000000)$ 、 $U_7(111111)$,每个非零矢量间隔 60° 。表 1 为模糊控制器控制规则表。采用 Mamdani 算法进行推理,采用 Max-Min 的解模糊化方法。

表 1 模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy control rule

T	ψ	1	2	3	4	5	6
N	N	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
	Z	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
	P	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4
Z	N	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	Z	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
	P	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3
P	N	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	Z	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
	P	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3

2 仿真分析

在仿真实验中 2 台电机参数一致,转矩与转速响应非常及时,双电机的输出转矩差极小。由于实际工程应用,电机参数不可能一致,因此重点仿真分析参数不一致的情况。

假设某拖动系统由 2 台无刷直流电机通过同步连轴组成,且转动惯量为 $0.089 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,负载转矩 $T_L = 50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。其电气参数如下:

电机 M_1 、 M_2 的参数设置为:额定电压 460 V ,额定功率 2.5 kW ,极对数 $p = 2$,定子 $R_s = 0.426$

Ω , 转子 $R_r = 0.814 \Omega$, $L_s = 0.006 \text{ H}$ 。设置参数不一致的情况, 将 M_2 的定子电阻变为 $R_s = 0.852 \Omega$ 。

当参数不一致采用直接转矩控制时, 仿真结果见图 5。

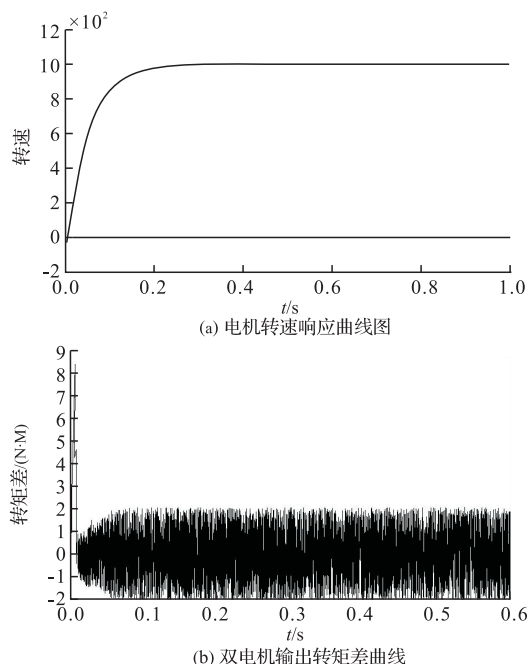


图 5 直接转矩控制

Fig.5 Direct torque control

当参数不一致采用模糊控制策略时, 电机转速响应曲线与参数一致时几乎相同。双电机输出转矩差曲线, 仿真结果见图 6。

从图 5~6 曲线可知, 在双电机参数不同的情况下, 直接转矩与模糊控制 2 种方案都能使得转矩得到平衡, 2 台电机的转矩响应都很及时。图 5(b)、图 6 中, 通过双电机的输出转矩差曲线对比可以看出, 在同样参数不一致条件下, 使用模糊控制的方案对转矩的均衡控制更加有效。

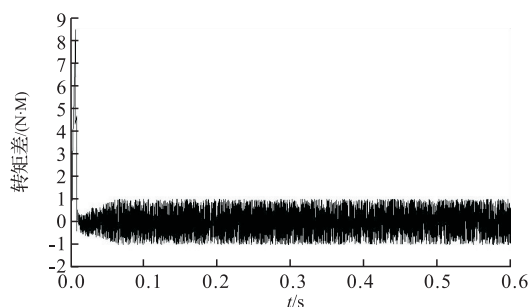


图 6 模糊控制下的双电机输出转矩差曲线

Fig.6 Two-motor output torque subtracting curve of fuzzy control

3 结论

本文针对双电机同步连轴转矩不均衡的问题,

提出了一种基于模糊控制的转矩均衡控制策略。在参数一致和异常 2 种状况下直接转矩控制和模糊控制 2 种方案的结果仿真结果表明, 所提方案不仅可以有效解决双电机同步连轴强制耦合导致转矩不均衡的问题, 相对直接转矩控制性能更加优越。

参考文献(References):

- [1] Francisco J, Perez-Pinal, Ciro Nunez, et al. Comparison of Multi-motor Synchronization Techniques[C]//The 30th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea, 2004:1670-1675.
- [2] 李志勇. 硬轴联结多电机功率平衡控制方法[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 398-401.
LI Zhiyong. Power Balance Control in Fixed Joint Multi-motor System[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(3): 398-401.
- [3] Zhiyong L, Jie T. A Novel Approach of Fixed Joint Multi-motor Power Balance Control, ICEMS 2008:1567-1570.
- [4] 阮毅, 陈维钧. 运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007:208-15.
RUAN Yi, CHEN Weijun. Motion Control System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007:208-215. (in Chinese)
- [5] Zhou Hongfu. Architecture on Clamping Motors Synchronized Controller in Injection Mould Machine[C]// Control & Automation, IEEE Inter Conf. 2007:2178-2182.
- [6] 孟令瑞, 张雷, 侯春杰. 无刷直流电机直接转矩自适应模糊控制器的设计[J]. 微电机, 2013, 46(11):33-37.
MENG Lingrui, ZHANG Lei, HOU Chunjie. Brushless DC Motor Direct Torque Adaptive Fuzzy Control Design[J]. Electric Mini-Motor, 2013, 46(11): 33-37. (in Chinese)
- [7] 赵向阳, 葛文韬. 无刷直流电动机转子退磁故障的检测方法[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(2):50-55.
ZHAO Xiangyang, GE Wentao. Detection of Rotor Demagnetization Fault on Brushless DC Motor[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(2):50-55. (in Chinese)
- [8] 罗亚琴, 孙建忠, 刘然. 基于转矩跟随主从控制策略的多电机同步控制[J]. 电机技术, 2011, 6:8-11.
GUO Yaqin, SUN Jianzhong, LIU Ran. Synchronization Control in Multi-motor System Based on the Torque Following Master and Slave Control Strategy[J]. Motor Technology, 2011, 6:8-11. (in Chinese)

(编辑:徐敏)