

对转永磁同步电机直接转矩控制方法

罗德荣, 邹勇波[†], 黄守道, 成双银, 孔永强

(湖南大学 国家电能变换与控制技术研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要: 文章主要研究一种新型盘式结构, 单定子、双转子对转永磁同步电机的直接转矩控制方法。首先, 分析并建立了双转子对转电机的数学模型; 其次, 在一个逆变器不能同时直接控制两边转矩的情况下, 根据两边转子位置差和电磁转矩与转矩角的关系, 分时控制电机转矩波动较大一边转矩, 来保证电机在不平衡负载时两边转子同步; 最后, 通过试验控制一台额定转速500 r/min, 额定功率1.2 kW的盘式对转电机, 验证了方法的可行性, 并且电机运行稳定可靠。

关键词: 盘式对转电机; 直接转矩控制; 不平衡负载; 分时控制

中图分类号: TM351 文献标识码: A

Direct torque control method for permanent magnet synchronous motor with contra-rotating rotors

LUO De-rong, ZOU Yong-bo[†], HUANG Shou-dao, CHENG Shuang-yin, KONG Yong-qiang

(National Engineering Research Center of Energy Conversion and Control, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: We investigate the torque control method for a new motor which is of disc structure, with one stator but two permanent magnet rotors located in the left and right sides of the stator. Firstly, the mathematic model of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) with contra-rotating rotors is developed. Secondly, when a single inverter can not used to control the torques on both sides simultaneously, the control is applied only to the side with more significant torque ripples, with the control time determined by the positions of two rotors and the relationship between the electromagnetic torque and torque angle. In this way, we achieve the time-sharing control of torques. This method is tested on a disc contra-rotating PMSM with 1.2 kW power rating and 500 r/min speed rating. Experimental results show a desirable performance of this control approach, and the controlled system runs stably and reliably.

Key words: contra-rotating PMSM; direct torque control; unbalanced load; time-sharing control

1 引言(Introduction)

中小型水下航行器一般要求在航行过程中保持必要的姿态, 不能有侧滚(翻滚)和打转现象发生, 所以大都采用对转螺旋桨推进系统^[1]。

目前国内外水下航行器所采用的电驱动双螺旋桨装置主要有3种: 一般是由两台独立的常规交流或直流电机拖动两个螺旋桨旋转, 这种驱动方式原理比较简单, 但传动系统成本较高, 且笨重^[2]; 或者由一台常规交流或直流电机加行星减速器传动系统拖动双螺旋桨旋转, 其机械传动部分比较复杂, 且机械传动效率较低^[3]; 或者采用本文关注的双转子电机直接驱动^[4]。

国内外对双转子电机及其控制系统所做的主要研究有: 美国学者提出的中间定子, 内外双转子同向旋

转的双转子电机(RFPM)^[5-6], 此电机虽然实现了双机械端口, 但是双转子同向旋转, 对螺旋桨驱动并无益处, 但其电磁模型对本文有指导意义; 浙江大学等研究了双转子式永磁无刷直流电动机, 并对其本体和控制进行建模仿真^[7-9], 此电机实现了双转子对转, 并且在两边负载不平衡时也可以实现其转矩控制, 但是电机结构较复杂; 沈阳工业大学张凤阁教授等对径向磁场、中间定子、内外双转子对转电机进行了研究, 对电机模型和电磁原理进行了分析, 并制作了样机, 但是该电机的内、外转子结构不对称, 导致电磁设计困难, 两个转子转矩输出不平衡, 在实际控制电机在负载波动情况下运行时较困难^[10-12]; 海军工程大学谢顺依教授等也对双转子电机进行了研究, 并提出了多种控制方法, 并进行了仿真^[13-15], 但是在实际控制中仍然有

收稿日期: 2014-05-27; 录用日期: 2014-12-19.

[†]通信作者, E-mail: yongbo.1990@163.com.

国防装备预先研究教育支撑技术项目(62501040203), 湖南省研究生科研创新项目(CX2012B128)资助。

Supported by Defense Advanced Research Projects Support by the Ministry of Education (62501040203), and Scientific Research Innovation Project of The Graduate Student of Hunan Province (CX2012B128).

些许问题需要解决.

本文试验的新型盘式电机属于一种轴向磁场永磁同步电机, 电机定子绕组经过特殊绕线方式使得当电机通入一组三相对称电流时, 电枢绕组在定子左、右两侧产生的与左、右转子相交链的旋转方向相反的磁场, 因此能够产生方向相反的电磁转矩, 进而实现电机的双转子对转^[16], 此电机已由作者研制并申请专利.

在电机控制方面, 由于电机只有一个电端口, 一套定子绕组, 在电机受负载扰动情况下, 使得同时控制两边转子同步较困难. 文章参考普通永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)直接转矩控制方法^[17-18], 分别估计两边转矩, 利用两个旋转变压器实时反馈两个转子的角度, 计算两边转矩失步时转矩角, 根据转矩角与转矩的关系合理选择一边转子控制其转矩, 同时使另一边转矩可以在电磁转矩的作用下跟随, 并逐渐保持同步. 这样, 通过分时选择控制一边转矩, 就可以使电机左、右转子在失步情况下快速恢复同步, 又可以满足其同步调速等控制要求.

对于水下航行器而言其推进系统无疑是其非常重要的一部分, 相信经过多年的发展, 文章关注的盘式对转电机及其驱动系统有望成为水下航行器, 舰船等的推进动力系统的一个发展方向.

2 新型盘式对转电机的理论分析(Analysis of the motor theory)

2.1 电机的结构与电磁矢量关系(The relationship between structure and electromagnetic vector motor)

本文研究的新盘式对转电机总体结构图如图1所示: 电机采用一种盘式结构, 一套盘式定子在中, 两边为左、右两个盘式转子, 一套三相的绕组按特殊的环形绕法绕制在盘形定子上, 三相绕组中的其中两相绕组在盘形定子内外两侧的嵌放位置相互交换, 因此内外两侧绕组相序相反, 这使得当通入一组三相对称电流时, 电枢绕组在定子左、右两侧产生分别与左、右转子磁链相交链的旋转方向相反的旋转磁场.

由于电机只有一个电端口, 通入的三相电流可以形成左、右两个旋转磁场, 在分析电机电磁矢量关系时, 为方便设计控制方法, 可以将电机分为左、右两个普通永磁同步电机, 虽然两电动机转速方向相反, 但两转子旋转方向分别和其电枢磁场方向相同, 而两个电枢是由同一组电流供电, 在矢量图上可认为两电机转子磁链旋转方向相同, 如图2所示.

图2中, $\psi_s, \psi_{f1}, \psi_{f2}$ 分别为定子、左转子、右转子磁链矢量, δ_1, δ_2 为两转子负载角, θ_1, θ_2 为转矩角, $\omega_s, \omega_{r1}, \omega_{r2}$ 为定子和左、右转子磁链旋转角速度, i_s 为定子电流矢量, ρ 是定子磁链矢量在静止ABC轴系中的空间相位角.

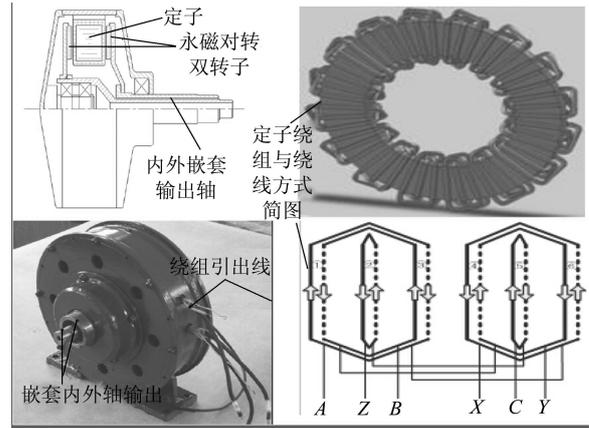


图 1 新型盘式对转电机总体结构与定子绕组示意
Fig. 1 The schematic diagram of the disc contra-rotating PMSM's overall structure and stator winding

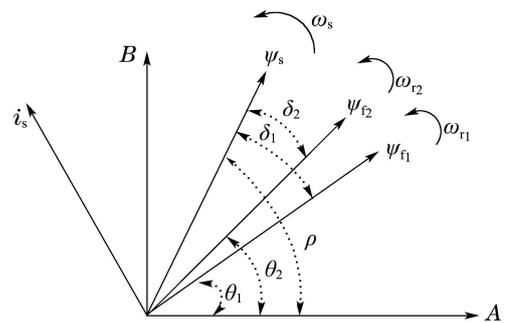


图 2 新型盘式对转电机矢量图
Fig. 2 The vector diagram of the new disc contra-rotating PMSM

2.2 电机的数学模型(The mathematical model of the motor)

由于在盘式电机定子绕组的绕线方式可知, 通三相交流电后, 盘式定子的两侧可以产生一对转速相等、方向相反的旋转磁场, 将电动机等效分解为左、右串联的两个参数相同的永磁同步电机. 根据对转永磁同步电机的工作原理, 建立对转电机电压方程、转矩方程和运动方程, 这样为对转电机的仿真建模, 设计控制算法奠定了基础.

首先在两个串联等效电机 $d1-q1$ 和 $d2-q2$ 坐标系下, 分别建立的电压回路方程

$$\begin{cases} U_{d1} = R_s i_{d1} + L \frac{di_{d1}}{dt} - \omega_1 L i_{q1}, \\ U_{q1} = R_s i_{q1} + L \frac{di_{q1}}{dt} - \omega_1 (L i_{d1} + \psi_{f1}), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{d2} = R_s i_{d2} + L \frac{di_{d2}}{dt} - \omega_2 L i_{q2}, \\ U_{q2} = R_s i_{q2} + L \frac{di_{q2}}{dt} - \omega_2 (L i_{d2} + \psi_{f2}). \end{cases} \quad (2)$$

两电机电磁转矩方程

$$\begin{cases} T_{e1} = \frac{3}{2} [\rho \psi_{f1} i_{q1} + (L_{d1} - L_{q1}) i_{d1} i_{q1}], \\ T_{e2} = \frac{3}{2} [\rho \psi_{f2} i_{q2} + (L_{d2} - L_{q2}) i_{d2} i_{q2}]. \end{cases} \quad (3)$$

两电机运动方程

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\omega_1 = \frac{1}{J_1}(T_{e1} - T_{L1}), \\ \frac{d}{dt}\omega_2 = \frac{1}{J_2}(T_{e2} - T_{L2}), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\theta_1 = \omega_1, \\ \frac{d}{dt}\theta_2 = \omega_2. \end{cases} \quad (5)$$

由电机定子绕组串联绕线方式可知在对转电机 d - q 轴坐标系下:

$$\begin{cases} i_{d1} = i_{d2} = i_d, \\ i_{q1} = i_{q2} = i_q, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_d = u_{d1} + u_{d2}, \\ u_q = u_{q1} + u_{q2}. \end{cases} \quad (7)$$

设定电机理想模型

$$\begin{cases} L_{d1} = L_{q1} = L_{d2} = L_{q2} = L, \\ \psi_{f1} = \psi_{f2} = \psi_f. \end{cases} \quad (8)$$

由式(1)–(8)可得对转电机电压方程

$$\begin{cases} u_d = 2R_s i_d + 2L \frac{di_d}{dt} - Li_q(\omega_1 + \omega_2), \\ u_q = 2R_s i_q + 2L \frac{di_q}{dt} + Li_d(\omega_1 + \omega_2) + \psi_f(\omega_1 + \omega_2). \end{cases} \quad (9)$$

由式(3), 且 $L_{d1} = L_{q1}$ 可知对转电机两边电磁转矩

$$T_{e1} = T_{e2} = 2/3 p \psi_f i_q. \quad (10)$$

以上各式中: $U_{d1}, U_{q1}, U_{d2}, U_{q2}, U_d, U_q, i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}, i_d, i_q$ 分别为等效串联两个电机 $d1$ - $q1$ 和 $d2$ - $q2$ 坐标系以及对转电机 d - q 坐标系下电压和电流, R_s 为定子绕组电阻, $L_{d1}, L_{d2}, L_{q1}, L_{q2}$ 分别为左、右转子在 d, q 轴的电感, $\omega_1, \omega_2, \theta_1, \theta_2, T_{e1}, T_{e2}, \psi_{f1}, \psi_{f2}, J_1, J_2, F_1, F_2$ 分别为左、右转子机械角速度、旋转角度、电磁转矩、负载转矩、永磁磁链、转动惯量。

3 盘式对转电机直接转矩控制策略(Direct torque control method for PMSM with contra-rotating rotors)

由理论分析可知, 电机在负载平衡的情况下, 可等效为左、右两个相同的永磁同步电机。这种情况下, 因为设计电机旋转速度相同, 电机只需要在启动的过程保证两边转子角度相同, 电机运行过程中, 两边转子角度一致, 则可在通入一个三相电流的情况下, 控制一边转子角度即可同时控制两边转速一致。在电机加不平衡负载时, 电机两边转子角度不同, 如若只控制一边转子, 则另一边处于失控状态, 电机另一边就会失步, 此时便需要控制两边转子。

在永磁同步电机的各种控制方法中, 直接转矩控制可以实现转矩的直接控制, 并且转矩响应快, 所以

这里借鉴直接转矩思想控制本对转电机。直接转矩控制主要由磁链滞环和转矩滞环控制选择逆变器输出电压矢量来控制电机。

双转子盘式对转电机只有一个电输入端口, 而需要输出两个机械转矩, 所以同时控制两边转子角度困难较大, 而分时控制两边转子却较容易实现。这样在估算出两边转矩和磁链后, 需要合理选择需要控制的一边转矩及其控制时间, 使另在该段时间内不控的一边转矩能在电磁转矩的作用下跟随, 并逐步保持同步。

首先, 由电机的数学模型, 可以分别估计两等效电机的电压、磁链和转矩。然后, 据式(10)可知, 当控制 ψ_f, ψ_s 不变, 则 $0 < \delta_{sf} < \pi/2$ 范围内, 电机转矩与转矩角 δ_{sf} 成正比。由图2给出的电机两转子不同步时的电机矢量图, 在转子1落后转子2的时间段, 选择控制转子2保持同步转速, 则由式(11)可知, 转子1电磁转矩较大, 在控制转子2的时间内, 转子1可以在电磁转矩的作用下, 逐步跟随转子2并最终保持同步。同理在转子2落后于转子1的时间段, 即可选择控制转子1。这样, 根据两转子位置, 在不同的时间段, 合理控制一边的转矩, 就可以分时控制电机两边转矩, 实现电机的防失步转矩控制:

$$t_e = p_0 \frac{1}{L_s} \psi_f \psi_s \sin \delta_{sf}. \quad (11)$$

本文控制方法原理框图如图3所示。

图3的原理框图可以看出本文控制方法主要包含5个模块, 每个模块的设计原理如下:

1) 启动定向模块。由于电机每次停止后两个转子位置随机, 而本转矩控制方法需控制两转子角度差小于 $\pi/2$ 才可以正常启动, 这一模块就是借鉴普通PMSM矢量控制中磁场定向的方法, 在启动时, 使两边转子位置重合, 即保证启动时转子位置同步。

2) 左、右电机电压估计模块。通过电流传感器检测电机三相电流后, 经过坐标变换, 由式(1)–(2)即可估算出左、右电机电压。

3) 左、右电机磁链估计模块。在估算出左、右电机电压后即可由式(12)–(14)分别估计出左、右定子磁链 $|\psi_{s1}|, |\psi_{s2}|$ 和磁链角 ρ_1, ρ_2 :

$$\begin{cases} \psi_d = \int (u_d - R_d i_d) dt, \\ \psi_q = \int (u_q - R_q i_q) dt, \end{cases} \quad (12)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2}, \quad (13)$$

$$\rho = \arcsin \frac{\psi_q}{|\psi_s|}. \quad (14)$$

4) 左、右电机转矩估计模块。磁链估计完成后, 由下式可分别估计出电磁转矩 T_1, T_2 :

$$T = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d). \quad (15)$$

5) 转矩和磁链滞环控制器。本系统为左、右转子

转速实时闭环控制系统, 左、右转子转速反馈和转速给定比较后经PI调节输出为转矩给定 T_1^* 和 T_2^* , 分别与估计的转矩比较, 同时给定的磁链和估计磁链比较, 然后设定合适的滞环差, 控制输出 ΔT_1 , ΔT_2 和 $\Delta \Psi$.

6) 转矩控制选择模块. 根据两边转子位置合理选择需要控制的一边转子来控制其转矩.

7) 矢量选择表. 选择了需要控制的一边转矩后,

即可选择合适的磁链滞环和转矩滞环, 然后通过矢量选择表选择控制逆变器输出的开关电压矢量. 矢量选择的原则和普通PMSM直接转矩控制矢量选择原则相同, 既通过两个滞环控制选择输出电压矢量来保证定子磁链矢量运行在一定范围内.

8) 逆变器. 根据选择的矢量控制逆变器输出, 从而控制电机.

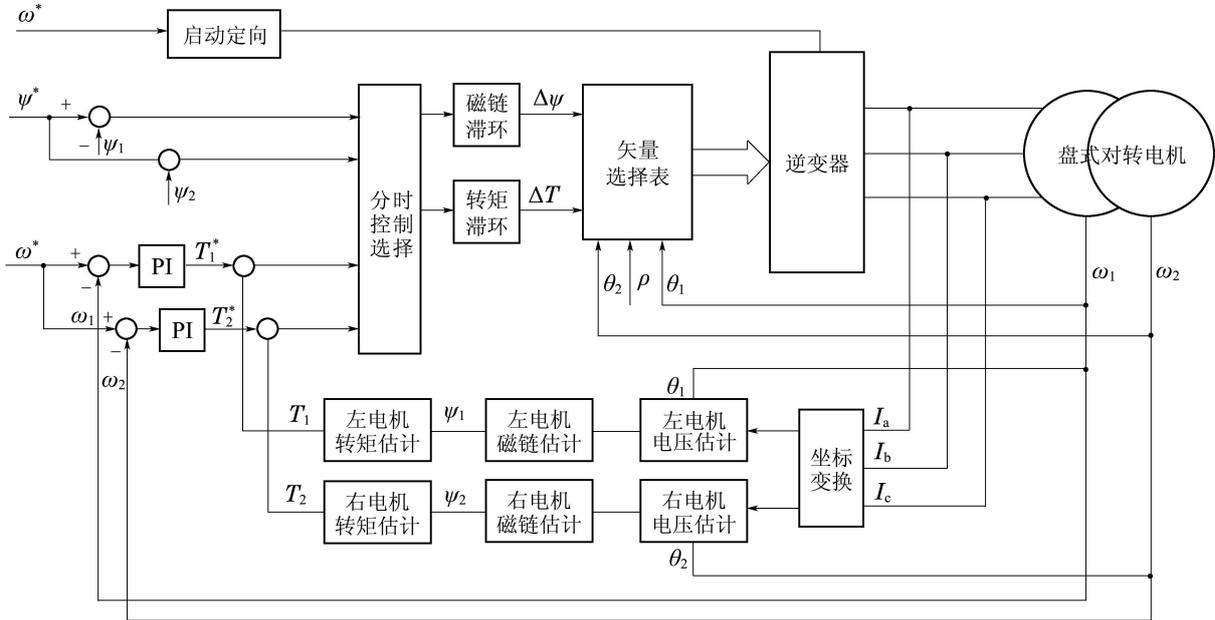


图 3 盘式对转电机防失步控制方法原理框图

Fig. 3 The principle diagram of a control method of preventing disc contra-rotating PMSM from out of step

4 控制系统实验及其结果分析(Control system experiment and result analysis)

本文对转电机防失步控制方法在作者所在课题组研制的一台1.2kW盘式对转永磁推进电机(如图4所示)完成控制试验, 由于对转螺旋桨用单边出轴电机无法完成加载试验, 试验电机选用定子结构和电机参数均相同, 只是机械上设计为两边出轴的对转永磁同步电机, 两电机设计参数如表1所示.

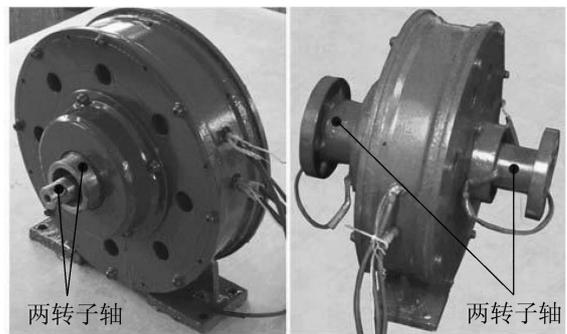
表 1 试验用盘式对转电机参数

Table 1 The parameters of disc contra-rotating PMSM

参数	数值
直流母线电压	300VDC
额定功率	1.2 kW
定子电阻	$2 \times 1.05 \Omega$
额定转速与转向	内轴500 r/min, 从轴伸端看为逆时针 外轴500 r/min, 从轴伸端看为顺时针
额定单边转矩	11 N · m
d, q轴电感	$2 \times 1.253 \text{ mH}$

图4为试验样机, 其中: (a)为模拟螺旋桨系统样

机, 为单边出轴, 难以实现加载试验; (b)为定子和永磁转子等设计参数与(a)相同, 只是在机修出轴上, 将一个轴调至另一侧的试验样机, 这样就便于加载电机安装. 电机控制系统试验台如图5所示.



(a) 单边出轴 (b) 两边出轴

图 4 试验用双转子对转永磁同步电机

Fig. 4 Prototype machines

图5为本控制系统实验装置台, 主要包括: 一台盘式对转电机、两台左、右两边加载电机及其控制柜、对转电机变频控制器、对转电机信息实时监视显示触摸屏等. 试验选用DSP28335为主控芯片, 主控板包含AD采样、过流保护、DA输出等基本电路.

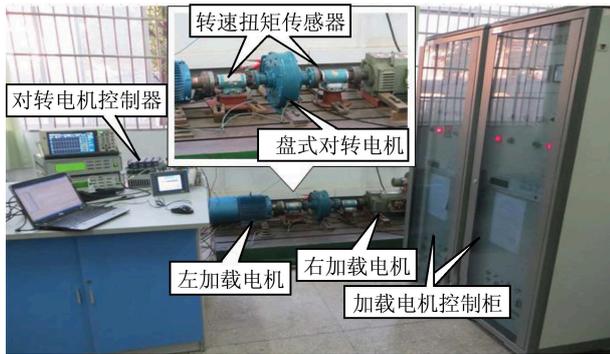


图5 双转子盘式对转电机加载试验台

Fig. 5 The loading test bench of disc contra-rotating PMSM

电机在启动前, 由于两转子位置一般不在同一角度, 若两转子角度差大于 $\pi/2$, 电机无法应用本控制方法启动, 在设计本文控制算法实现的过程中, 则需要依据矢量控制的原理, 先将电机定向, 使两转子位置同步. 图6可以看出, 电机在启动时会使两转子定向到同一位置, 然后启动, 启动过程中会出现微小的位置差, 但仍可以逐步保持同步, 最终响应转速给定.

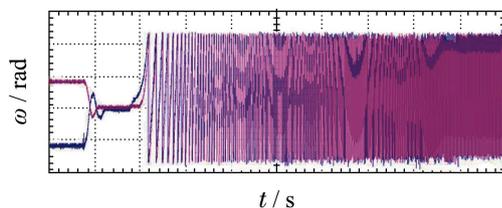


图6 电机磁场定向过程中两边转子位置图

Fig. 6 The waveform of the two rotor position when motor work on field orienting

普通PMSM运行中, 逆变器输出的PWM波在滤波后基波保持三相对称是电机正常运行的基本条件. 图7是对转电机空载运行于500 r/min的额定转速下的电流波形, 可以看出在空载下, 电机电流三相对称, 纹波电流较小.

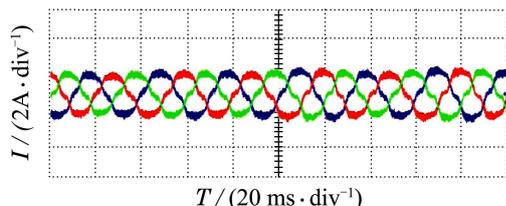


图7 电机额定转速下空载电流波形

Fig. 7 The waveform of no-load current when motor work on rated speed

图8是电机在加负载运行时的电流波形, 和图7的空载电流波形比较可以看出, 在电机两边转子受不平衡负载时, 电机三相电流出现波动, 并且纹波

增加, 其中图8波形两边最大值稍高既是由于波形波动, 而在抓波过程中出现的偶然现象. 分析认为波形波动的主要原因在于对转电机反电动势包含两边永磁转子磁链在定子绕组中感应出的电动势, 所以当电机运行与不平衡负载时, 由于两边转子不是一直处于同步状态, 其在定子中感应出的反电动势也一直变化, 最终导致电流波动较大. 然而, 在不平衡负载下, 电流虽然波动较大, 但仍可保持三相对称, 波动也在允许范围, 电机可以正常稳定运行.

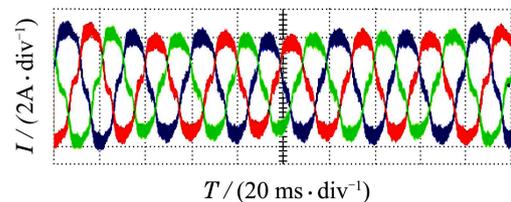


图8 电机额定转速下两边加不平衡负载(左边7 N·m, 右边11 N·m)时电机电流波形

Fig. 8 The waveform of current when motor work on rated speed and unbalanced load

双转子对转电机转矩分时控制时, 需要根据电机角度选择应该控制的一边转矩及其控制时间. 这就需要通过旋转变压器实时反馈电机位置, 当电机出现位置差时选择需要控制的一边转子转矩, 使电机能恢复同步. 图9是电机左、右转子位置图, 可以看出, 在 t_1 时, 两边转子位置不同步, 这时选择控制一边转子, 另一边转子会逐渐跟上, 直到时间 t_2 时保持同步, 则电机在 $t_1 - t_2$ 时间段选择控制一边转矩, 在 $t_2 - t_3$ 时间段保持同步, 这样电机两边转子不会因为负载不平衡而导致一边不可控.

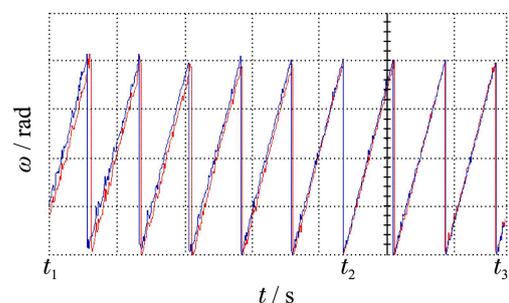


图9 电机额定转速下两边加不平衡负载(左边7 N·m, 右边11 N·m)时电机两转子位置变化图

Fig. 9 The waveform of the two rotor position when motor work on rated speed and unbalanced load

图10-11为电机分别加不平衡负载和额定平衡负载时电机转矩与转速波形, 可以看出电机由空载启动过程中, 由于机械耦合会出现负载波动, 而在电机稳定运行在额定转速后, 缓慢加负载至要求值的过程中, 两边转速未出现明显波动, 基本一直保

持同步异向旋转. 同时图11中, 在不平衡负载情况下转矩波动较大, 这主要是由于在不平衡负载情况下, 由于电机需要根据两边转子位置差来分时选择控制一边转矩, 而另一边转矩处于跟随状态. 最后, 在两种负载运行下, 电机转速波动均在允许范围, 说明了直接转矩控制方法可行.

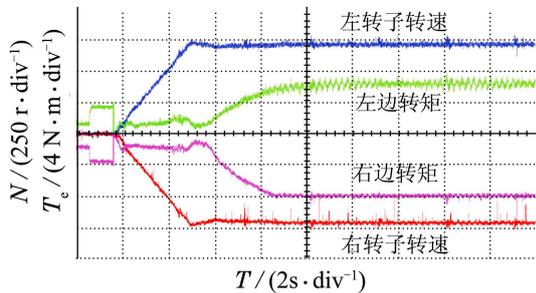


图10 电机额定转速下两边加不平衡负载(左边 $7\text{N}\cdot\text{m}$, 右边 $11\text{N}\cdot\text{m}$)时转矩与转速波形

Fig. 10 The waveform of torque and speed when motor work on rated speed and unbalanced load

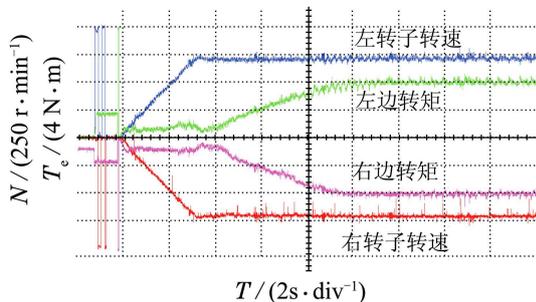


图11 电机额定转速下两边加平衡负载(左边 $10\text{N}\cdot\text{m}$, 右边 $10\text{N}\cdot\text{m}$)时转矩与转速波形

Fig. 11 The waveform of torque and speed when motor work on rated speed and unbalanced load

5 结论(Conclusion)

文章对盘式对转电机的驱动系统进行了研究分析, 针对电机只有一个电端口, 而输出两个机械转矩时容易失步的问题, 在普通PMSM转矩控制策略的基础上, 加入控制选择模块, 根据两转子位置信息选择需要控制的一边转矩, 是另一边能跟随控制的一边转子, 从而实现电机左、右转子转矩的分时控制. 通过试验表明该控制方法满足了电机在小不平衡负载下保持同步的控制要求, 转矩响应较快.

参考文献(References):

- [1] 端木义宁. 对转螺旋桨及应用[J]. 航海技术, 1997, (5): 48–50. (DUANMU Yiling. Contra rotating propellers and application [J]. *Marine Technology*, 1997, (5): 48–50.)
- [2] 张进军, 钱志博, 杨杰, 等. 对转涡轮用于水下航行器的初步研究[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(4): 84–89.

- (ZHANG Jinjun, QIAN Zhibo, YANG Jie, et al. Preliminary study of counter-rotating turbines used on underwater vehicles [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2006, 18(4): 84–89.)
- [3] 蒋国际. 鱼雷差动驱动系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. (JIANG Guoji. *Research of torpedo differential propulsion system* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.)
- [4] SHARKH S M A, LAI S H, TURNOCK S R. Structurally integrated brushless PM motor for miniature propeller thrusters [J]. *IEEE Proceedings—Electric Power Applications*, 2004, 151(5): 513–519.
- [5] METIN A, HUANG S, LIPO T A. Design, analysis, and control of a hybridfield-controlled axial-flux permanent-magnet motor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(1): 78–87.
- [6] HUANG S, AYDIN M, LIPO T A. Torus concept machines: pre-prototyping design assessment for two major topologies [C] //36th Annual Meeting of the Industry-Application-Society (IAS). IL, Chicago: IEEE, 2000: 1619–1625.
- [7] 张式勤, 邱建琪, 储俊杰, 等. 双转子永磁无刷直流电动机的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 180–185. (ZHANG Shiqin, QIU Jianqi, CHU Junjie, et al. Modeling and simulation of dual-rotor permanentmagnet brushlessdc [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(12): 180–185.)
- [8] 储俊杰. 双转子永磁无刷直流电动机的仿真研究与控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. (CHU Junjie. *Modeling and control of dual-rotor permanentmagnet brushlessdc* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.)
- [9] 史朝晖, 刘玉庆, 张式勤, 等. 双转子永磁无刷直流电动机的建模与仿真[J]. 微电机, 2004, 37(1): 10–12. (SHI Chaohui, LIU Yuqing, ZHANG Shiqin, et al. Modeling and simulation of dual-rotor permanentmagnet brushlessdc [J]. *Micromotors Servo Technique*, 2004, 37(1): 10–12.)
- [10] 张凤阁, 陈进华, 刘光伟, 等. 面贴式异向旋转双转子永磁电机的磁场解析计算[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 28–36. (ZHANG Fengge, CHEN Jinhua, LIU Guangwei, et al. Analytical solution of magnetic field for surface-mounted permanent magnet machines with anti-rotation dual rotors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(12): 28–36.)
- [11] 陈进华. 异向旋转双转子永磁电机研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012. (CHEN Jinhua. *Research on counter-rotating dual rotors permanent-magnet machine* [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.)
- [12] 张凤阁, 刘光伟, 陈进华. 异向旋转双机械口永磁电机磁路建模与场分析[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6): 804–810. (ZHANG Fengge, LIU Guangwei, CHEN Jinhua. Magnetic circuit modeling and field analysis for opposite-rotation dual mechanical ports PM machine [J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(6): 804–810.)
- [13] 徐海珠, 谢顺依, 张林森, 等. 双转子PMSM无传感器复合控制方法研究[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(7): 12–16. (XU Haizhu, XIE Shunyi, ZHANG Linsen, et al. Investigation of hybrid sensorless control approach for dual-rotor PMSM [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(7): 12–16.)
- [14] 徐海珠, 谢顺依, 连军强, 等. 对转鱼雷永磁同步推进电机直接转矩控制系统设计[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(1): 51–55. (XU Haizhu, XIE Shunyi, LIAN Junqiang, et al. A direct torque control system of counter-rotating pmsm for torpedo propulsion [J]. *Torpedo Technology*, 2012, 20(1): 51–55.)
- [15] 徐海珠, 谢顺依, 张林森, 等. 对转永磁同步推进电动机的矢量控制[J]. 微特电机, 2011, (10): 55–57. (XU Haizhu, XIE Shunyi, ZHANG Linsen, et al. Vector control for

- anti-rotary pmsm for propulsion [J]. *Micromotors*, 2011, (10): 55 – 57.)
- [16] QUANG D N, SATOSHI U. Modeling and control of salient-pole permanent magnet axial-gap self-bearing motor [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(3): 518 – 526.
- [17] 孙丹. 高性能永磁同步电机直接转矩控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
(SUN Dan. *High performance direct torque control for PMSM* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.)
- [18] ANDRZEJ S, MAREK K, ADAM R, et al. A comparison of properties of direct torque and flux control methods (DTC-SVM, DTC-d, DTC-2x2, DTFC-3A) [C] // *The International Conference on Computer as a Tool*. POLAND, Warsaw: IEEE, 2007, 9(12): 1733 – 1739.

作者简介:

罗德荣 (1968–), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向电力电子技术应用及电机控制系统, E-mail: hldr@sina.com;

邹勇波 (1990–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术应用及电机控制系统, E-mail: yongbo_1990@163.com;

黄守道 (1962–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力推进与伺服传动技术, E-mail: shoudaohuang@tom.com;

成双银 (1980–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电机设计与电机控制系统, E-mail: 77913864@qq.com;

孔永强 (1988–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电机控制系统, E-mail: 529524015@qq.com.