

双定子盘式永磁同步电机控制策略^{*}

宋建国, 苗世亮

(北京工业大学 数字社区教育部工程研究中心和城市轨道交通北京实验室, 北京 100124)

摘要: 对一种具有双定子的盘式永磁同步电机进行了讨论、分析与试验验证。双定子电机因其具有的高转矩密度、控制灵活等特点受到了越来越多的关注, 然而在实际应用中, 如何进行双定子的能量分配以使系统效率最优也成为了一个难点。因此, 提出一种基于 MAP 图的转矩分配策略, 并在以 TMS320F28335 为主控芯片的试验平台上对电机进行了试验验证。试验结果表明所提出的控制分配策略能有效地保证双定子电机系统高效运行。

关键词: 双定子盘式永磁同步电机; MAP 图; 能量分配; 高效

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)03-0034-07

Control Strategy of Double-Stator Disk Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

SONG Jianguo, MIAO Shiliang

(Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education and Beijing Laboratory for Urban Mass Transit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A disk permanent magnet synchronous motor with two stators was discussed, analyzed and verified by experiments. Double-stator motor had attracted more and more attention due to its high torque density, flexible control and other characteristics. However, in practical applications, in order to optimize the efficiency of the system, it was difficult to distribute the double-stator motor's energy. A torque allocation strategy based on MAP diagram was proposed, and experiments were carried out on the experimental platform with TMS320F28335 as the main control chip. The experimental results showed that the proposed control and allocation strategy could effectively ensure the efficient operation of the double-stator motor system.

Key words: double-stator disk permanent magnet synchronous motor; MAP diagram; energy distribution; high efficiency

0 引言

双定子中间转子盘式永磁同步电机(简称“双定子电机”)除了具有盘式电机结构紧凑、转矩密度高、散热性能好等特点, 还由于其双定子对称结构, 中间转子受到 2 个相互抵消的磁拉力, 从而具有结构更稳定、机械损耗更小的特性, 适用于高效、高转矩密度、高起动频率工业场所, 在电动汽车、轮船驱动、风力发电、心脏泵等方面都有广泛的应用^[1-2]。双定子电机 2 个定子都可以形成旋转磁场, 控制更加灵活, 高效区覆盖范围更广,

因此研究双定子电机持续、稳定、高效的控制策略有着重要的意义。

Yang 等^[3]设计了 1 台车用的直驱式双定子单转子轴向磁通永磁电机, 调速运行采用双定子串并联方式, 通过试验测得电机最高转速为 1 184 r/min, 最大转矩为 274 N·m, 全局效率可以达到 80%。Miura 等^[4]研制了一款应用于混合动力汽车的轴向磁通电机, 采用了双定子单转子无槽结构, 定子铁心使用了高性能的 SMC 材料, 永磁体使用价格低廉的铁氧体材料, 电机最大转矩密度可达 36 N·m/L。文献[3-4]介绍的电机虽然

^{*} 基金项目: 北京市教育委员会项目(040000546618016)

作者简介: 宋建国(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与电气传动等。

结构有所不同,但都是双定子轴向磁通电机,都具有高效、高转矩密度的特点。

双定子电机有 2 套定子绕组,可以看作 2 台电机联轴驱动。关于电机联轴驱动控制的研究,有基于 V/f 的脉宽调制(PWM)控制策略^[5]、平均控制策略^[6]、主从控制策略^[7]等。文献[8]对并行结构的双定子电机建立了数学模型,利用差分转矩与平均转矩相结合的方式分别控制 d 轴和 q 轴电流,达到单独控制的目的。文献[9]提出针对多电机系统建立虚拟总轴来进行控制的方法,既能够保留电机的同步特性又能够使主从单元解耦,避免了彼此的扰动影响。文献[10]采用交叉耦合控制算法,分析联轴电机逆变器的电压矢量,利用 U_d 和 U_q 来控制 2 台电机的转矩分量。

综上所述,尽管国内外的学者们对多电机系统的控制策略进行了一些研究,但对双定子电机的控制策略研究较少,尤其缺乏系统高效运行策略的研究,使得控制灵活、高效区范围广的双定子电机难以推广。

本文首先对双定子电机的结构与原理进行了分析;在此基础上,分析并讨论了如何控制双定子盘式电机,为保证 2 台电机的单独控制和耦合控制提供了理论与技术支持。在控制技术上,本文根据每个电机的 MAP 图信息制订双定子电机耦合控制策略,扩大电机高效区,提高了全局效率。最后,采用 TMS320F28335 为主控芯片搭建试验平台,对双定子电机进行了试验验证,试验结果表明,本文所提控制策略可以达到高效率控制的目的,实用性强。

1 双定子电机结构及运行原理

如图 1 所示,本文的研究对象是 1 台并行结构的轴向磁通双定子永磁同步电机(PMSM)。该电机由 2 个盘状定子与 1 个盘状转子构成,两定

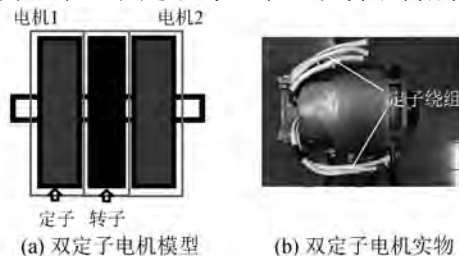


图 1 双定子盘式 PMSM 模型及实物

子并行放置于转子两侧。定子绕组经特殊设计,相互之间无明显耦合现象。当两定子绕组注入相序一致的三相对称电流时,可分别产生旋转磁场与转子永磁磁链相互作用,共同驱动转子旋转。为了方便说明,将双定子电机拆分为两个电机^[11],如图 1(a)所示,每个定子绕组与转子看作 1 台电机。由于 2 个定子绕组共同作用于同一转子,故双定子电机可等效为 2 台电机联轴驱动。

双定子电机设计参数:额定电压 380 V,极数 6,定子绕组 1 峰值功率 50 kW,绕组 2 峰值功率 35 kW。

2 控制策略

2.1 双定子电机数学模型

仿照传统 PMSM 的分析方法,双定子电机在 dq 参考坐标系下的数学模型可表示为^[12]

$$u_{d1} = R_{s1}i_{d1} + L_1 \frac{di_{d1}}{dt} - \omega L_1 i_{q1} \quad (1)$$

$$u_{q1} = R_{s1}i_{q1} + L_1 \frac{di_{q1}}{dt} + \omega L_1 i_{d1} + \omega \psi_{f1} \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{e1} - T_1 \quad (3)$$

$$T_{e1} = \frac{3}{2} p \psi_{f1} i_{q1} \quad (4)$$

$$u_{d2} = R_{s2}i_{d2} + L_2 \frac{di_{d2}}{dt} - \omega L_2 i_{q2} \quad (5)$$

$$u_{q2} = R_{s2}i_{q2} + L_2 \frac{di_{q2}}{dt} + \omega L_2 i_{d2} + \omega \psi_{f2} \quad (6)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{e2} - T_2 \quad (7)$$

$$T_{e2} = \frac{3}{2} p \psi_{f2} i_{q2} \quad (8)$$

式中:下标 1、2——电机 1、电机 2;

u_{d1} 、 u_{d2} 、 u_{q1} 、 u_{q2} —— d 轴和 q 轴电压;

R_{s1} 、 R_{s2} ——定子绕组电阻;

i_{d1} 、 i_{d2} 、 i_{q1} 、 i_{q2} —— d 轴和 q 轴电流;

L_1 、 L_2 ——定子绕组的电感;

ω ——转子转速;

ψ_{f1} 、 ψ_{f2} ——转子永磁磁链, $\psi_{f1} = \psi_{f2} = \psi_f$;

J ——电机转动惯量;

T_{e1} 、 T_{e2} ——电磁转矩;

T_1 、 T_2 ——负载转矩;

p ——极对数。

由于双定子电机绕组之间相互独立,并且两绕组电枢电流相序相同,因此电磁转矩可作叠加处理。为了方便分析,将两电机放在同一参考坐标系中分析。

$$u_d = u_{d1} + u_{d2} \quad (9)$$

$$u_q = u_{q1} + u_{q2} \quad (10)$$

$$T_e = T_{e1} + T_{e2} \quad (11)$$

$$T = T_1 + T_2 \quad (12)$$

结合式(9)~式(12),电机方程可以写成

$$u_d = R_{s1}i_{d1} + R_{s2}i_{d2} + L_1 \frac{di_{d1}}{dt} + L_2 \frac{di_{d2}}{dt} - \omega(L_1i_{q1} + L_2i_{q2}) \quad (13)$$

$$u_q = R_{s1}i_{q1} + R_{s2}i_{q2} + L_1 \frac{di_{q1}}{dt} + L_2 \frac{di_{q2}}{dt} + \omega(L_1i_{d1} + L_2i_{d2}) + \omega\psi_f \quad (14)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T \quad (15)$$

$$T_e = \frac{3}{2}p\psi_f(i_{q1} + i_{q2}) \quad (16)$$

电机对转速的控制实际上是通过控制转矩来实现的。从式(16)可以看出, dq 坐标系下双定子电机可以通过调节交轴电流来控制转矩和转速的输出,完成了转矩和磁通的解耦。

2.2 矢量控制

径向磁通 PMSM 中成熟的控制方法依然适用于本文所研究的双定子电机。由于系统可作拆分处理,以电机 1 为例分析其在矢量控制下的电流、电压运行轨迹。

PMSM 在基速以下运行时,最大转矩电流比(MTPA)控制可使系统效率最高。由式(4)可知,由于盘式电机的 d 、 q 轴电感基本相同,电磁转矩只包含励磁转矩而不存在磁阻转矩^[13],因此在基速以下采取 $i_d=0$ 控制时,可保证单位定子电流获得最大电磁转矩。

随着电机转速的升高,电枢电压逐渐达到极限值,电机的转速受到限制。要继续提高电机的转速,可以通过直轴电流产生反相磁势削弱转子的励磁磁通,达到弱磁扩速的目的^[14]。

电机在稳定运行时 d 轴和 q 轴电压可以表示为

$$\begin{cases} u_{d1} = R_{s1}i_{d1} + \omega L_1i_{q1} \\ u_{q1} = R_{s1}i_{q1} + \omega L_1i_{d1} + \omega\psi_f \end{cases} \quad (17)$$

因此,电压合成矢量:

$$U_{s1} = \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2} = \sqrt{(R_{s1}i_{d1} - \omega L_1i_{q1})^2 + (R_{s1}i_{q1} + \omega L_1i_{d1} + \omega\psi_f)^2} \quad (18)$$

由于电机在高速运行时,定子电阻上的压降可以忽略不计^[15],因此式(18)可以简化为

$$U_{s1} = \omega \sqrt{(L_1i_{q1})^2 + (L_1i_{d1} + \psi_f)^2} \quad (19)$$

电机的电流合成矢量:

$$i_{s1}^2 = i_{d1}^2 + i_{q1}^2 \quad (20)$$

在电机系统控制中,电机的端电压、端电流不能超过逆变器所能承受的最大电压 U_{smax} 、电流 I_{smax} 。结合式(19)~式(20),可得电机电压、电流极限方程为

$$\begin{cases} (L_1i_{q1})^2 + (L_1i_{d1} + \psi_f)^2 \leq \left(\frac{U_{smax}}{\omega}\right)^2 \\ i_{d1}^2 + i_{q1}^2 \leq I_{smax}^2 \end{cases} \quad (21)$$

根据式(21)建立电压极限圆与电流极限圆,则电机运行过程中电流、电压轨迹曲线如图 2 所示。

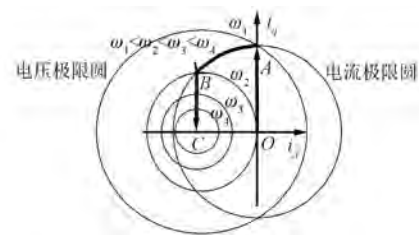


图 2 运行过程中电流、电压轨迹

基速以下,沿最大转矩电流比 OA 段运行;随着转速的升高,端电压超过逆变器所能承受的极限电压时,电机沿着最大转矩电流比 OA 和最大转矩电压比 BC 之间的曲线运行;转速继续升高,电机沿 BC 段运行。电机电流轨迹公式表示为

$$i_{d1} = -\frac{\psi_f}{L_1} + \sqrt{\left(\frac{U_{smax}}{L_1\omega}\right)^2 - i_{q1}^2} \quad (22)$$

2.3 转矩分配策略

传统的单电机系统若采用小功率电机驱动,难以满足偶尔的大扭矩需求;若采用大功率电机,又会使电机负荷率较低,导致系统效率过

低^[16-17]。本文采用的双定子电机驱动方式灵活,既能通过耦合工作达到大扭矩输出的要求,又能保证相同负载情况下负载率更高。

双定子电机可视作 2 台电机联轴驱动,属于多动力源系统。由于多动力源系统的驱动方式多样,因此驱动系统的分配方式对系统的经济性有着重要意义。传统多动力源系统一般采用比例分配方法,根据各子系统的驱动能力进行等比分配,但这种方式只考虑了系统的输出能力,忽视了系统效率的问题。本文提出一种基于 MAP 图的分配方式,可充分利用电机的高效区,提高系统的全局效率。

首先对双定子电机采用基于试验数据的经验建模方式。通过台架试验分别获取两电机的性能数据,包括不同转速点对应的峰值扭矩,对应转速、转矩点电机系统的电压、电流以及直流侧的电流等。

由于作为系统能量源的高压直流电在转化为三相交流电以及电机将三相电转化为机械功率的过程中存在着铜耗、铁耗、机械损耗及其他损耗^[18],因此从系统层面定义系统效率为输出功率 P_{out} 与输入功率 P_{in} 的比值:

$$\eta = P_{out} / P_{in} \quad (23)$$

基于电机系统的台架数据,计算效率:

$$\eta_i = P_{i-out} / P_{i-in} = (T_i \cdot n_i / 9\ 550) / (U_{Bat} \cdot I_i) \quad (24)$$

式中:下标 i ——第 i 台电机,取值 1、2;

η_i ——电机系统效率;

P_{i-out} ——电机输出功率;

P_{i-in} ——电机输入功率;

$U_{Bat} \setminus I_i$ ——直流母线电压和对应电流。

考虑电机系统台架试验数据的有限性,其只能反映电机系统效率的趋势。为了建立覆盖整个工作区域的效率图,对基于台架试验获得的数据进行插值处理,本文采用牛顿插值法^[19]。

基于试验数据及插值法建立的电机系统的外特性曲线及电机效率 MAP 图如图 3、图 4 所示。

从电机 MAP 图能够看出,电机的效率在其额定转速附近较高。电机 1 的高效区分布在 900 ~ 2 500 r/min,电机 2 的高效区分布在 2 000 ~ 3 000 r/min,部分错开,因此合理的能量分配能够提高双定子电机系统的整体效率。

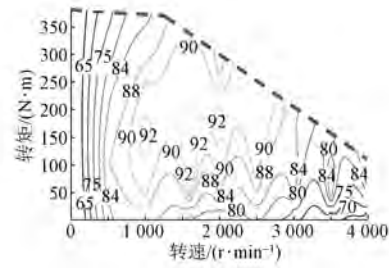


图 3 电机 1 外特性曲线及 MAP 图

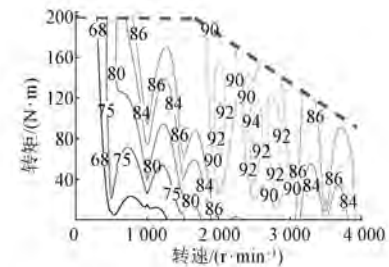


图 4 电机 2 外特性曲线及 MAP 图

建立并分析两电机的 MAP 图后,针对双定子电机的控制分配,定义控制分配系数 T_c ,用于表示两电机的控制分配关系。 T_c 定义为电机 1 输出功率与双定子电机系统输出功率的比值。两电机耦合输出转矩时,转速相同,功率分配与转矩分配意义相同:

$$T_c = T_1 / T = P_{1out} / P_{out} \quad (25)$$

对控制分配系数 T_c 进行分析。考虑 P_{out} 和 T 均不小于零,则双定子电机系统工作模式为:(1) $T_c = 1$,电机 1 单独工作;(2) $T_c = 0$,电机 2 单独工作;(3) $0 < T_c < 1$,电机 1、2 耦合作。

根据前文所提到的双定子电机的结构特点,有:

$$P_{out} = P_{out1} + P_{out2} \quad (26)$$

通过建立的电机 MAP 图可以获得电机的效率数据,进而计算双定子电机的总输入功率:

$$P_{in} = P_{1out} / \eta_1 + P_{2out} / \eta_2 = (T_c P_{out}) / \eta_1 + (P_{out} - T_c P_{out}) / \eta_2 \quad (27)$$

将式(27)代入式(23),可得系统耦合后的总效率为

$$\eta = P_{out} / [T_c P_{out} / \eta_1 + (P_{out} - T_c P_{out}) / \eta_2] = \eta_1 \eta_2 / (\eta_1 - T_c \eta_1 + T_c \eta_2) \quad (28)$$

为了使双定子电机系统效率最优,在不同转速下的最大耦合扭矩范围内,根据式(28)求取双

定子电机不同转矩输出情况下的最优转矩分配系数,进而建立双定子电机的 MAP 图和控制分配系数分布图如图 5、图 6 所示。

由图 5 可以看出,双定子电机耦合控制后,转矩范围变广,最大转矩达到 $570 \text{ N}\cdot\text{m}$,高效区域对比单电机输出时也更宽, $800 \sim 3\,000 \text{ r/min}$ 效率能够达到 90%,双定子电机耦合后既能够满足大转矩的要求,也可以通过选择电机工作方式使电机负载率较高,提高了系统的全局效率。

从图 6 的 T_e 分布情况可得,双定子电机系统的工作模式为: $0 \sim 1\,700 \text{ r/min}$, $250 \text{ N}\cdot\text{m}$ 以内由电机 1 单独驱动;在 $2\,000 \sim 4\,000 \text{ r/min}$ 的低转矩区域,由电机 2 单独驱动;其余区域由电机 1 和电机 2 耦合驱动。

根据双定子电机分配后的 MAP 图信息,建立转矩分配模块。最终完成的系统框图如图 7 所示。

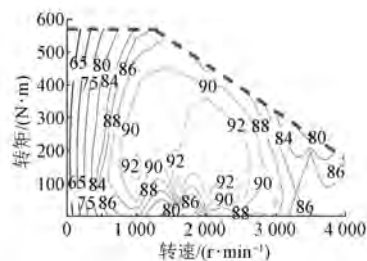


图 5 双定子电机外特性曲线及 MAP 图

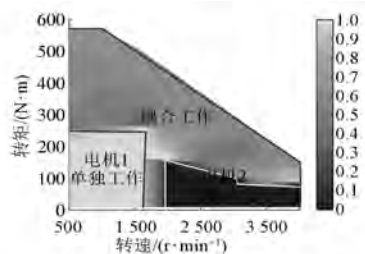


图 6 控制分配系数分布图

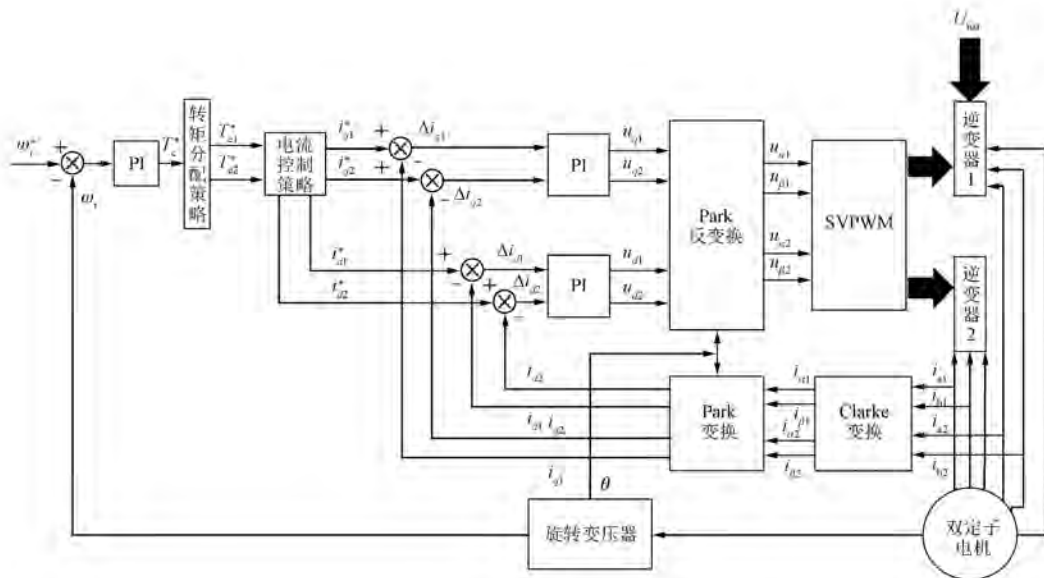


图 7 双定子盘式 PMSM 系统控制框图

在该试验装置中,双定子电机系统由 2 套逆变器装置供电,控制需求经转矩分配模块调配后,采用 $i_d=0$ 和弱磁控制的电流控制策略,完成对双定子电机系统的控制。

3 仿真与试验验证

根据上文分析,为了验证本文所提控制策略的有效性,针对双定子电机两绕组可分离控制的

特点,基于 MATLAB/Simulink 软件对单电机系统建立仿真模型^[20]。系统结构框图如图 8 所示。

系统采用转速-电流双闭环控制方案,转速环为外环,电流环为内环。根据模块化建模的方法,整个系统包括直流电源模块、电机模块、逆变器模块、SVPWM 模块、Clarke 变换模块、Park 变换及其反变换模块、交直流电流 PID 调节及转速 PI 调节模块、最大转矩电流比控制模块和弱磁模块。

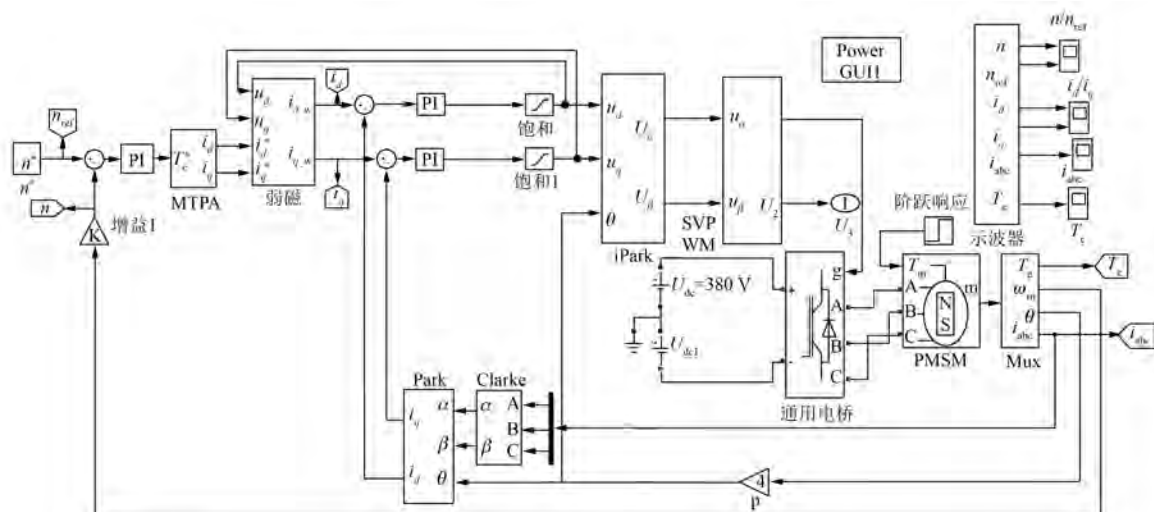


图 8 控制系统仿真模型

电流控制策略部分根据电压合成矢量与极限电压的比较进行最大转矩电流比控制和弱磁控制的切换。

根据搭建的单电机系统控制模型,仿真试验结果如图 9 所示。

芯片和 LEM 公司的 HAH1DR 400-S 电流传感器完成控制电路的搭建;选用 Infineon 的六合一绝缘栅双极型晶体管(IGBT)FS400R07A1E3 为功率开关管;选用国产即插即用型驱动 PSPC615-S-EV 为驱动模块,进行双定子电机的台架试验。试验平台如图 10 所示。

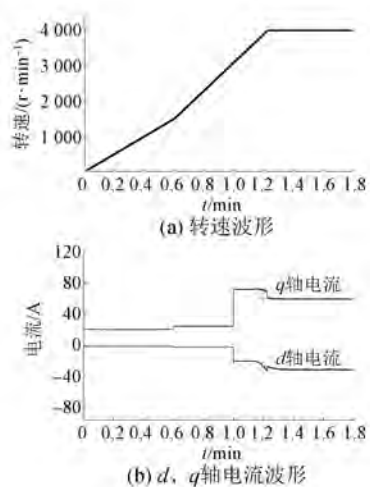


图9 系统仿真结果

图9(a)为从电机起动到加速至4 000 r/min的波形,可看出控制系统追踪良好,电机响应迅速。图9(b)为电机运行过程中的 d 、 q 轴电流波形,电机低速运行时 d 轴电流为零,1 500 r/min以后增加 d 轴电流分量,弱磁扩速,符合本文提出的电流控制策略。

基于前文的分析研究,以 TI 公司的 TMS320F28335 为主控芯片,配合 AD2S1210 解码

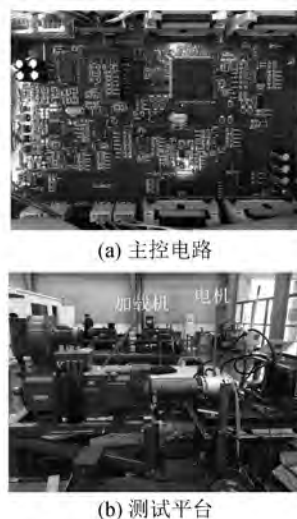


图 10 试验平台

图 10(a) 是主控电路实物图, 包括解码电路、信号采集电路、CAN 通信电路、保护电路等。图 10(b) 是双定子电机系统测试平台, 包括测功机、双定子电机、加载机等。

单定子系统的试验如前所述。双定子电机系统实验分两部分完成。第一部分进行双定子耦合

工作可行性的验证,分别试验定子 1 运行过程中起动定子 2、定子 2 运行过程中起动定子 1、两定子同时运行且输出相同转矩和输出不同转矩。相电流波形图如图 11 所示。

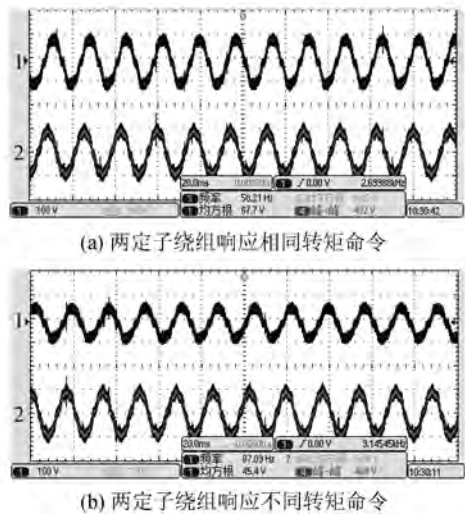


图 11 相电流波形图

图 11 (a) 为转速 900 r/min, 转矩命令 160 N·m, 两定子各响应二分之一转矩命令时的 U 相电流波形, 此时测功机显示转矩值为 158±1 N·m。定子 1 相电流有效值为 64.5 A, 定子 2 相电流有效值为 67.7 A, 证明两定子实际输出转矩基本相同。图 11(b) 为 1 300 r/min, 两定子响应不同转矩命令时的 U 相电流波形。该组试验证明了双定子可同时工作, 且相互间基本没有影响。

第二部分对基于 MAP 图的转矩分配策略进行验证, 对比对象为比例分配策略。比例分配策略根据两定子的输出能力各响应 3/5、2/5 转矩命令。以 1 500 r/min 为例, 表 1 所示为比例分配策略的部分效率, 表 2 所示为转矩分配策略的部分效率。试验数据表明, 基于 MAP 图的转矩分配策略全局效率高于比例分配策略。

表 1 比例分配策略效率表

耦合转矩/ (N·m)	定子 1 转矩/ (N·m)	定子 2 转矩/ (N·m)	效率/%
100	60	40	87.9
200	120	80	90.5
300	180	120	90.2
400	240	160	89.9

表 2 转矩分配策略效率表

耦合转矩/ (N·m)	定子 1 转矩/ (N·m)	定子 2 转矩/ (N·m)	效率/%
100	100	0	94.4
200	200	0	92.2
300	120	180	90.9
400	220	180	90.3

4 结 语

本文主要讨论了双定子盘式 PMSM 高效控制方法。推导了双定子盘式 PMSM 的数学模型, 分析了其在矢量控制下的电流、电压控制轨迹; 针对双定子的转矩分配问题, 提出了一种基于 MAP 的转矩分配策略, 使双定子电机能够以最优效率运行。在以 TMS320F28335 为主控器件的试验平台上对双定子电机进行了试验验证。试验结果表明, 所提转矩分配策略比传统分配策略效率更高, 具有良好的应用前景。

【参考文献】

[1] UPADHYAY P R, RAJAGOPAL K R, SINGH B. Design of a compact winding for an axial-flux permanent-magnet brushless DC motor used in an electric two-wheeler [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(4) : 2026.

[2] GIULII C F G, DONATO G D, CARICCHI F. Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6) : 2190.

[3] YANG Y P, LIANG J Y, XING X Y. Design and application of axial-flux permanent magnet wheel motors for an electric vehicle [C] // 23th AFRICON 2009, 2009.

[4] MIURA T, CHINO S, TAKEMOTO M, et al. A ferrite permanent magnet axial gap motor with segmented rotor structure for the next generation hybrid vehicle [C] // ICEM, 2010.

[5] MA J D, WU B, ZARGARI N R, et al. A space vector modulated CSI-based AC drive for multimotor applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(4) : 535.

(下转第 63 页)

- on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 188.
- [4] WANG L, HUO F, LI W, et al. Influence of metal screen materials on 3-D electromagnetic field and eddy current loss in the end region of turbogenerator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 49(2): 939.
- [5] 许家群, 龙凤, 邢伟. 汽轮交错磁极无刷直流发电机的励磁电流计算[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(8): 1168.
- [6] 马晓荷, 沈颂华. 基于 Magnet 的无刷交流励磁机瞬态特性仿真研究[J]. 微特电机, 2008, 36(8): 23.
- [7] 杨海波, 周光厚, 李建富, 等. 60 Hz 汽轮发电机励磁电流的分析与计算[J]. 东方电气评论, 2015, 29(1): 25.
- [8] 咸哲龙, 汪耕, 袁建华, 等. 1 000 MW 级核电 4 极发电机励磁电流的有限元计算[J]. 上海大中型电机, 2009(2): 18.
- [9] 马晓荷, 沈颂华. 交流励磁机的有限元多元化参数计算及瞬态仿真[J]. 微电机, 2010, 43(3): 32.
- [10] 梁艳萍, 陈建清, 黄浩. 转子磁路结构对汽轮发电机励磁电流和磁场分布的影响[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(4): 13.
- [11] 刘慧娟, 上官明珠, 张颖超, 等. Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [12] 马晓荷, 沈颂华. 基于 Maxwell 2D 的航空电源交流励磁机空载特性研究[J]. 微电机, 2009, 42(2): 40.

收稿日期: 2018-10-11

(上接第 40 页)

- [6] VERHILLE J N, BOUSCAYROL A, BARRE P J, et al. Torque tracking strategy for anti-slip control in railway traction systems with common supplies [C] // Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, 2004: 2738.
- [7] MATSUMOTO Y, OZAKI S, KAWAMURA A. A novel vector control of single-inverter multiple-induction-motors drives for Shinkansen traction system [C] // Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001: 608.
- [8] KELECY P M, LORENZ R D. Control methodology for single inverter, parallel connected dual induction motor drives for electric vehicles [C] // 25th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1994: 987.
- [9] 吴其华, 苏邦荃. 多电机同步控制系统[J]. 兵工自动化, 2003, 22(1): 20.
- [10] CHIASSON J, SETO D, SUN F P, et al. Independent control of two PM motors using a single inverter application to elevator doors [C] // Proceedings of the 2002 American Control Conference, 2002: 3093.
- [11] ZHANG F G, LIU G W, SHEN Y S, et al. Characteristic study on a novel PMSM with opposite-rotation dual rotors [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, 2007: 805.
- [12] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [13] 陈尔奎. 盘式永磁同步电动机的仿真研究[J]. 微电机, 2013, 46(10): 20.
- [14] 李春艳, 寇宝泉, 程树康. 永磁同步电动机弱磁扩速概况[J]. 微特电机, 2008, 36(1): 58.
- [15] 冯江华, 桂卫华, 许俊峰. 考虑参数变化的永磁同步电动机弱磁控制研究[J]. 微电机, 2008, 41(4): 20.
- [16] 江南. 浅析合理选用负荷率提高电机效率的途径[J]. 江苏冶金, 2008, 36(增刊): 81.
- [17] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 20(4): 82.
- [18] 高仕红, 李善奎. 考虑铁耗时永磁同步电机的数学模型及其仿真研究[J]. 微电机, 2007, 40(1): 45.
- [19] 顾宇华. 牛顿插值法在测量数据处理中的应用[J]. 电测与仪表, 1994(8): 21.
- [20] 高仕红, 熊云槐. 一种精确的永磁同步电机数学模型及仿真模型的研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2008, 26(3): 341.

收稿日期: 2018-10-11