

对旋风机用对转永磁同步电机 双转子同步技术*

张林森¹, 胡平², 宁小玲¹

(1. 海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 矿井风机性能直接影响着煤矿的安全生产, 为了保证双转子对转永磁同步电机(CDPMSM)维持等速, 研究了对旋风机用 CDPMSM 的同步技术。通过特殊的永磁材料和双转子尺寸配合方法, 保证稳态时 2 个转子的同步。分析了定子耦合磁场的变化特点, 引入定子铁心法向磁阻和切向磁阻, 建立了基于并联磁路的等效磁网络模型。建立了偏差耦合控制系统, 保证双转子动态同步能力。研究结果表明, 该电机在不对称负载时能保持较好的转速同步能力。

关键词: 双转子对转永磁同步电机; 转子同步技术; 等效磁网络模型; 有限元分析

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)01-0061-07

doi: 10.12177/emca.2020.179

Dual-Rotor Synchronization Technique of Contra-Rotating PMSM Used in Counter-Rotating Fan*

ZHANG Linsen¹, HU Ping², NING Xiaoling¹

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering,
Wuhan 430033, China)

Abstract: The performance of mine fans directly influences the production safety of the coal mine. In order to maintain the same speed of the two rotors of contra-rotating dual-rotor permanent magnet synchronous motor (CDPMSM), the dual-rotor synchronization technology of the CDPMSM for the counter-rotating fan is studied. Through the special permanent magnet material selection and the dual-rotor size matching method, the synchronization of the two rotors in steady state is ensured. The characteristics of the stator coupling magnetic field are analyzed. The model of equivalent magnetic network based on parallel magnetic circuit is established by introducing stator core normal direction reluctance and tangential direction reluctance. A deviation coupling control system is established to ensure the dynamic synchronization capability of the two rotors. The research results show that the CDPMSM can maintain good speed synchronization ability under asymmetric load.

Key words: contra-rotating dual-rotor permanent magnet synchronous motor (CDPMSM); rotor synchronization technique; equivalent magnetic network model; finite element analysis

收稿日期: 2020-08-16; 收到修改稿日期: 2020-11-20

* 基金项目: 十三五国防预研基金项目(3020601010501)

作者简介: 张林森(1982—), 博士, 讲师, 研究方向为兵器电力推进技术。

宁小玲(1982—), 博士, 讲师, 研究方向为电子技术及水下信息传输技术。(通信作者)

0 引言

矿井风机为矿井排出有害气体和矿尘,具有“矿井肺脏”之称,其性能直接影响着煤矿的安全生产能力^[1]。双转子对转永磁同步电机(CDPMSM)具有2个机械输出端口,可直接驱动双叶轮对旋式通风机,调速范围宽、可靠性高、效率高、振动小^[2],在矿井风机中具有广阔的应用前景。

文献[3]将CDPMSM分解为内电机和外电机(定子内侧绕组和内转子构成内电机,定子外侧绕组和外转子构成外电机),讨论了其工作原理和电磁模型。文献[4]研究了双转子PMSM的绕组电感、齿槽转矩和感应电动势等电机参数的变化规律。文献[5-6]对双转子永磁发电机进行了仿真和控制策略研究。但CDPMSM内外电机的电枢串联而永磁转子内外嵌套,双转子的转矩不等引起的转差,导致二者在电枢上的反电动势不同相和电流畸变。文献[7]通过行星齿轮对双转子进行转速同步,但是又破坏了双转子电机和负载之间的功率匹配。

本文分析了CDPMSM双转子不同步的原因,采用特殊的永磁体结构和双转子尺寸配合方法,使双转子稳态时转矩相等,直接驱动对旋式风机双叶轮;采用等效磁网络模型法回避了串联磁路和并联磁路问题,探讨了具有普遍意义的CDPMSM分析方法;通过建立偏差耦合控制系统来保证双转子动态同步能力。

1 CDPMSM 结构和工作原理

CDPMSM由一个定子和内外2个永磁转子组成^[8-9],通过单端同心双轴输出机械功率。外转子的内表面和内转子的外表面均安装永磁体,如图1所示。定子内外两侧统一开槽,电枢由一套绕组按照螺线管方式绕制而成,定子内外两层电枢绕组的相序相反,因而通入一组对称的三相交流电,即可在两层气隙中分别产生等速而异向旋转的磁场^[10-11],缩短了绕组端部,提高了效率。定子内外气隙均得到利用,使功率密度大幅提升。

从CDPMSM的结构特点可知,电机总体上可以看成内电机和外电机2个单元电机串联而成,内外电机的电枢串联,电流相等。根据电机工作

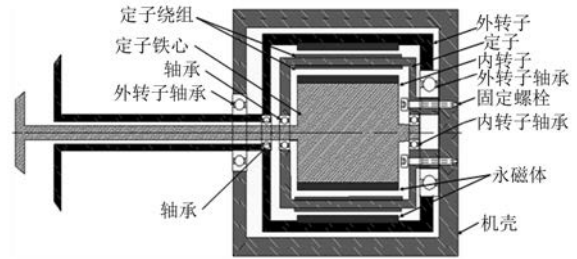


图1 CDPMSM 结构

原理,可得内电机和外电机的电磁关系:

$$\frac{T_{e1}}{T_{e2}} = \frac{B_1 l_{ef} I R_1}{B_2 l_{ef} I R_2} = \frac{B_1 R_1}{B_2 R_2} \quad (1)$$

式中: T_{e1} 、 T_{e2} 分别内单元电机产生的电磁转矩; B_1 、 B_2 分别为内、外单元电机气隙磁感应强度; l_{ef} 为电机电枢的有效长度; I 为电机电枢电流; R_1 为内转子半径; R_2 为外转子半径。

2 CDPMSM 转子协同设计

由式(1)可知,合理选择贴于内、外2个转子表面的永磁磁钢材质,并优选2个转子的直径,可以使CDPMSM内、外2个转子上输出的电磁转矩大小相同但方向相反。假设CDPMSM内外2个转子具有相同的阻尼系数和转动惯量,则可以实现内外转子反向旋转,且转速自同步。

本文涉及的CDPMSM采用混合式永磁体结构,内、外转子极弧系数相等时,内转子极弧宽度较小,使用性能较强的钕铁硼永磁材料可提供较高的磁通。外转子极弧宽度较大时,采用铁氧体永磁材料即可提供足够的磁通。由于内、外转子采用不同的永磁材料,二者尺寸选择也不同。在理想状况下,当永磁体的磁化方向长度接近气隙长度时最经济。但是由于漏磁的存在,为了保证足够的气隙磁密,采用磁性能较差的铁氧体时,永磁体厚度与气隙长度之比要求在3~6之间,而采用磁性能较强的钕铁硼永磁体时,比值可取2。为了保证磁通路径的合理,初始设计时应使内、外转子的极弧系数相等,最后通过性能校核进行调整,以保证内、外电机反电动势波形的一致性。

为了保证内、外电机空载气隙磁通相等,初始设计时外电机所需的定子轭部径向厚度与内电机相等,内电机定子轭部的轴向长度和外电机也相等。电磁负荷选取方面,内电机磁负荷应尽量取得高一些,外电机的磁负荷取得稍低些,以保证

内、外电机的反电动势相等。

内电机和外电机气隙直径的选取分别按式(2)、式(3)初步确定:

$$D_{si} = \sqrt[3]{\frac{6.1 \times 10^4 P'}{\alpha'_{p1} K_{dp} A_1 B_{\delta 1} \lambda n}} \quad (2)$$

式中: P' 为内电机的计算功率; K_{dp} 为绕组系数; α'_{p1} 为内电机的计算极弧系数; A_1 、 $B_{\delta 1}$ 为内电机的电负荷和磁负荷; λ 为与内转子磁阻有关的系数; n 为内转子的额定转速。

$$D_{so} = \sqrt{\frac{8\sqrt{2} p t_b A_2 B_{\delta 2}}{10^3 \omega_b \rho_{Fe}}} \quad (3)$$

式中: p 为极对数; t_b 为电机起动时间; A_2 、 $B_{\delta 2}$ 为外电机的电负荷和磁负荷; ω_b 为电机在 t_b 时刻的转折转速; ρ_{Fe} 为定子铁心的质量密度。

采用等效磁网络方法完成 CDPMSM 的初始设计, 采用场路耦合时步有限元方法完成整个电机的性能计算以及双转子的同步性能校核。场路耦合时步有限元法将电机的电磁场方程、外电路方程、机械运动方程联合求解, 可以考虑到 CDPMSM 中定子的共磁路和磁阻变化, 精确计算电机的参数和性能, 实现电机双转子转矩的同步要求。CDPMSM 电磁设计流程如图 2 所示。

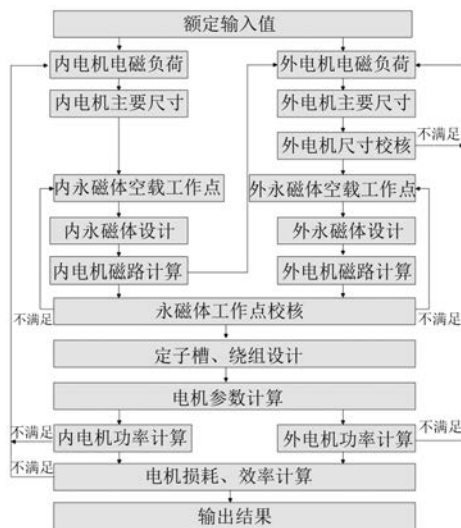


图 2 CDPMSM 的电磁设计流程

3 等效磁网络模型

3.1 磁路状态及其变化特点

根据 CDPMSM 双气隙的结构特点, 其磁场可分为 3 个部分: 内转子气隙磁场、电枢耦合磁场和

外转子气隙磁场。如果内外 2 个转子的磁钢呈反方向对准状态, 这时两者产生的法向磁通在电枢铁心处发生弯折, 全部切向流经电枢轭, 此时电机的切向磁通获得最大值, 法向磁通的大小为零, 这种状态称之为并联磁路, 其磁路拓扑如图 3(a) 所示。随着内、外转子反方向旋转, 永磁磁钢的反向对准部分面积变小, 两者产生的法向磁通流经电枢铁心时路径发生弯曲并斜穿电枢轭, 此时法向磁通变大, 切向磁通减小, 这种状态称之为混联磁路, 其磁路拓扑如图 3(b) 所示。2 个转子继续旋转, 当内外 2 个转子永磁磁钢处于同方向对准状态, 两者的法向磁通在电枢铁心内部正好无缝延续, 这时候法向磁通最大, 而切向磁通大小为零, 这种状态称之为串联磁路, 其磁路拓扑如图 3(c) 所示。

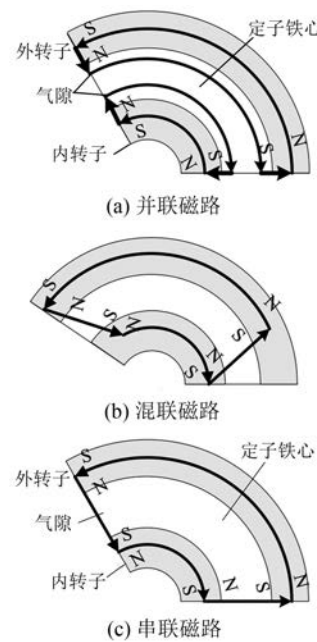


图 3 CDPMSM 的磁路状态

显然, 内外转子等速异向旋转, 内转子磁场和外转子磁场不改变, 但定子铁心磁路随转子相对转动, 磁路状态会以并联磁路、混联磁路、串联磁路、混联磁路、并联磁路……的交替形式出现。

3.2 等效磁网络模型

根据上文得到的 3 种磁路, 省略漏磁路后, 分别建立对应电机磁网络模型, 如图 4 所示。

图 4 中, 用字母 i 、 o 来分别代表内转子和外转子; $R_{gx}(x=i, o)$ 表示气隙磁阻; $F_{mx}(x=i, o)$ 表示永磁磁钢的磁势; $R_{m}(x=i, o)$ 表示永磁磁钢的内

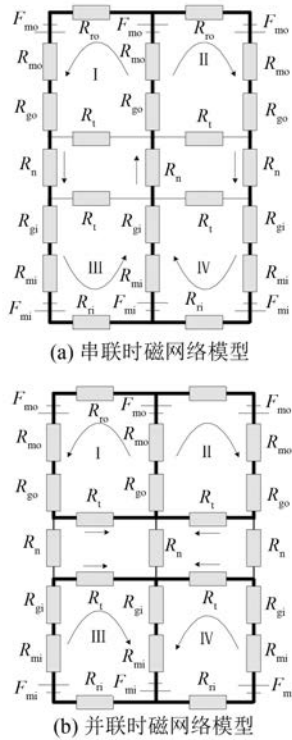


图4 磁网络模型拓扑

磁阻; $R_{ix} (x=i, o)$ 表示转子轭的磁阻。根据上文分析, 将定子铁心磁阻分为切向磁阻 R_t 和法向磁阻 R_n 。 R_t 表征定子同侧相邻磁极在铁心中形成切向磁路的磁阻。 R_n 表征定子两侧相邻磁极在铁心中形成法向磁路的磁阻。

3.3 磁网络模型的处理

CDPMSM 运行时, 2 个转子等速反向旋转, 电枢铁心磁场变化频繁, 但铁心磁阻的大小相对于空气的磁阻来说要小很多, 分析时完全能够忽略。根据前面的分析可以得出, 上述 3 种磁路状态中, 只有在并联磁路状态下, 内、外 2 个单元电机所有的磁通均切向穿过电枢铁心, 内、外 2 个转子的磁通不发生耦合。因此可以得出以下论断: 鉴于磁通分布的上述特点, 电机的电枢轭部设计时必须以并联状态的磁路为重点来进行分析。内单元电机进行平展后的结构如图 5 所示。

令 φ_r 是每块磁钢的内禀磁通, φ_m 是实际能提供的磁通, R_{mm} 是相邻永磁体之间的漏磁磁阻, R_{mi} 是内转子磁钢的内磁阻, R_{mr} 是每块磁钢与转子轭之间产生的漏磁磁阻, Φ_g 是 CDPMSM 的每极气隙磁通, R_{gi} 是 CDPMSM 每极气隙的磁阻, R_t 是 CDPMSM 电枢铁心的切向磁阻。根据上述分

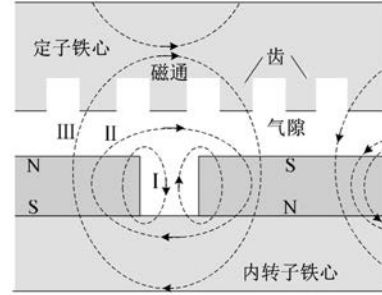


图5 内单元电机的线性拓扑

析建立 CDPMSM 内电机的等效磁路模型, 如图 6 所示。

为了便于分析, 对图 6 所示的内单元电机等效磁路模型做进一步的合理简化。因为电枢铁心和内转子铁心均为磁的良好导体, 所以内转子的铁心磁阻 R_{ri} 和电枢铁心的切向磁阻 R_t 的数值远小于气隙磁阻 R_{gi} 的数值, 均可以忽略不计。而且此时在图 6 中的 2 个磁源在磁路连接关系上属于串联关系, R_{mm} 、 R_{mi} 和 R_{mr} 与磁源在磁路连接关系上均为并联关系, 记 R_m 为总的并联磁阻, 那么有:

$$R_m = \frac{R_{mi}}{1 + \eta + \lambda} \quad (4)$$

其中: $\eta = R_{mi}/R_{mr}$; $\lambda = R_{mi}/R_{mm}$ 。

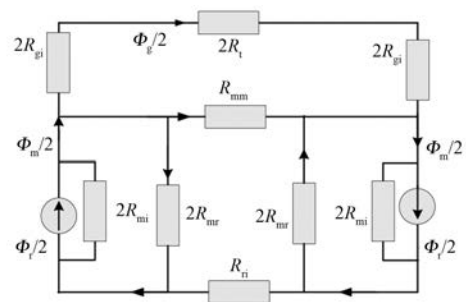


图6 内电机的等效磁网络模型

4 电磁场计算

4.1 气隙磁密计算

对磁通进行分解, 可得每极气隙磁通和气隙磁感应强度分别为

$$\Phi_m = \frac{1 + (4R_{gi}/R_{mi})(\eta + \lambda)}{1 + (4R_{gi}/R_{mi})(1 + \eta + \lambda)} \Phi_r \quad (5)$$

$$\Phi_g = \frac{R_m \Phi_r}{R_m + 4R_{gi}} = \frac{1}{1 + (4R_{gi}/R_{mi})(1 + \eta + \lambda)} \Phi_r \quad (6)$$

每极永磁体向外磁路提供的磁密和气隙磁密分别为

$$B_m = \frac{1 + (4R_{gi}/R_{mi})(\eta + \lambda)}{1 + (4R_{gi}/R_{mi})(1 + \eta + \lambda)} B_r \quad (7)$$

$$B_g = \frac{R_m B_r}{R_m + 4R_{gi}} = \frac{1}{1 + (4R_{gi}/R_{mi})(1 + \eta + \lambda)} B_r \quad (8)$$

4.2 铁心磁阻计算

电枢铁心法向磁阻 R_n 与切向磁阻 R_t 均与 CDPMSM 2 个转子的相对位置密切相关。为了便于分析,令内、外单元电机磁路处于串联状态时作为电机运行的初始位置,当 2 个转子相向旋转一定角度(机械角)后,内、外 2 个转子的磁场在电枢铁心轭部的磁场分布情况如图 7 所示。

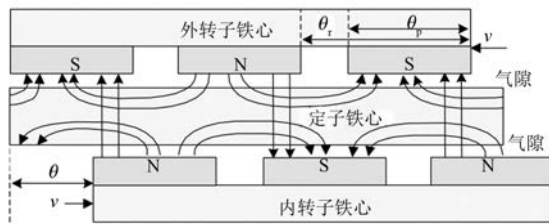


图 7 内外转子相对旋 θ 角时铁心磁路

根据磁路欧姆定律,可得定子铁心法向磁阻和切向磁阻的最值:

$$R_n = \frac{h_s}{\mu_0 \mu_{fe} l_{ef} r_s \theta_p} \quad (9)$$

$$R_t = \frac{\pi r_s \theta_p}{\mu_0 \mu_{fe} l_{ef} h_s / 2} \quad (10)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_{fe} 为定子轭的相对磁导率; h_s 为电枢铁心轭部的厚度; r_s 为电枢轭的计算半径; θ_p 为永磁磁钢宽度。

定子铁心内部磁通的周期变化规律接近正弦波形式,若 CDPMSM 的极数为 $2p$,则其电枢铁心的总磁阻 R_s 可以利用法向磁阻 R_n 及切向磁阻 R_t 按照式(11)进行合成:

$$R_s = R_n \cos(3\theta/2) + R_t \sin(3\theta/2) \quad (11)$$

5 仿真和试验

以 1 台 6 极 CDPMSM 为仿真对象,该电机主要尺寸:内转子内径为 75 mm;内转子外径为 121 mm;外转子内径为 240 mm;外转子外径为 280 mm;定子内外圆壁分别均匀开有 36 个槽;内

外永磁体极弧系数均为 0.75;内转子采用钕铁硼永磁体 ($B_r = 1.33 \text{ T}, \mu_r = 1.043 \ 42$);外转子采用铁氧体永磁体 ($B_r = 0.42 \text{ T}, \mu_r = 1.070 \ 22$)。假设定子表面为零矢量等磁位面,忽略集肤效应和磁滞效应^[11],采用场路结合时步有限元方法对其进行磁场分析。

5.1 有限元仿真

通过有限元分析(FEM)可以得到 2 个转子相向旋转一周过程中,电机铁心的法向磁感应强度 B_n 和切向磁感应强度 B_t 的 FEM 结果如图 8 所示。

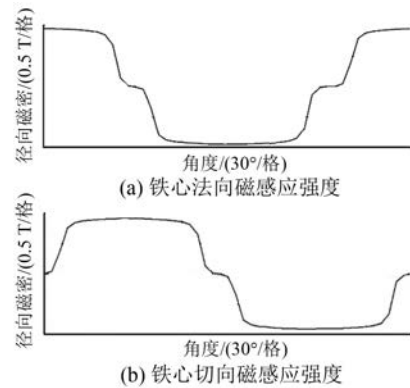


图 8 电机铁心磁感应强度

从图 8 可以看出,在初始位置处法向磁感应强度 $B_n \approx 0.93 \text{ T}$ 且为最大值,切向磁感应强度 $B_t = 0$ 。由于内转子上相邻 2 个钕铁硼永磁磁钢的空隙为 15° ,并且和外转子的铁氧体永磁磁钢对准。当内、外 2 个转子相向转过的机械角度 $\leq 7.5^\circ$ 时,因为磁路状态为混联磁路,所以只有少量磁通切向通过电枢铁心,则切向磁感应强度 B_t 虽然有所增加,但增幅较小,法向磁感应强度 B_n 则基本维持不变。如果电枢的齿槽宽度相同,此时铁心中法向磁路宽度通常是电枢齿部磁路宽度的 2 倍,因此电枢铁心中的磁感应强度幅值只有电枢齿部的约 50%,即铁心法向磁路始终处于不饱和状态。

从图 8 还可以看出,在本文所用电机的电枢铁心和转子铁心均采用 DW310-35 型硅钢片叠压而成,因此对比图 8(a)和图 8(b)可以进一步发现,电枢铁心的磁感应强度的切向幅值约为其法向幅值的 2 倍。因为电机齿槽宽度基本相等,铁心法向磁路的宽度为齿部磁路宽度的 2 倍,磁密最大值只有齿部的 1/2,所以铁心法向磁路一般不饱和。铁心切向磁密和齿部最大值均设计为接

近饱和值,定子和转子铁心采用同一种材料,即铁心法向磁密最大值和齿中相等,因而铁心切向磁密的最大值为法向磁密 2 倍左右。这样可以保证磁路并联时铁心切向磁路不饱和,同时减小铁耗和增大功率密度。

在空载状态下,以电机串联磁路为初始位置,双转子相向旋转 240° 范围内,对气隙中心处进行磁场分析可得到内外气隙磁密波形,如图 9 所示。

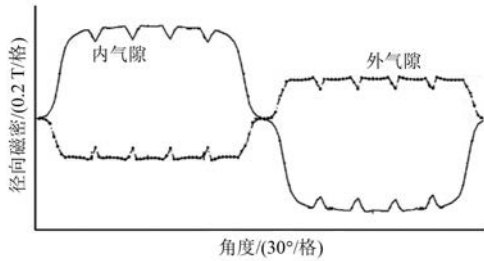


图 9 气隙磁感应强度曲线

从图 9 可以看出,在 CDPMSM 内、外 2 个转子的初始位置和相向转过 120° 这 2 个位置,内转子永磁磁钢间的空隙正好与外转子永磁磁钢间的空隙对准,因此这 2 个位置点的气隙磁感应强度基本为零,当内外 2 个单元电机反向转过 7.5° 后,内、外单元电机的永磁磁钢间的空隙完全错开,这时候 CDPMSM 气隙中的磁密值迅速增加。

5.2 试验分析

采用相同的参考转速,对双转子设计了交叉耦合同步控制系统,分别进行转矩调节,当电流控制器输入在某范围内时,根据输入值进行电流调节,当输入值超出某范围,根据设定进行调节,如图 10 所示。这样风场紊乱时,双转子转速跟随给定,迅速恢复相等。

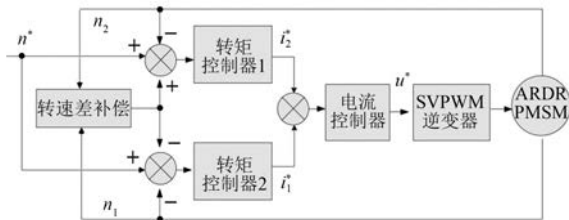


图 10 双转子交叉耦合控制系统

采用 2 台规格相同的永磁发电机分别接在双转子永磁电机的 2 个轴上,发电机外接 2 个功率不同的三相对称电阻,得到 CDPMSM 转速和转速差值曲线如图 11 和图 12 所示。

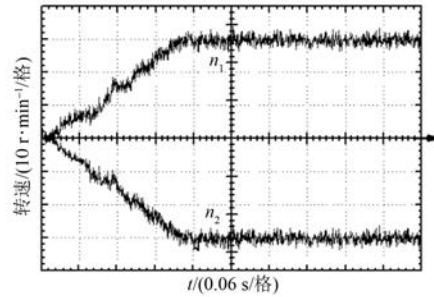


图 11 CDPMSM 转速响应

从图 12 可以看出,电机刚启动时,2 个转子转速差较大,但在交叉耦合控制策略的作用下,0.25 s 后转速差降低到 1 r/min,整个过程转速差不超过额定转速的 1%,证明该电机具有良好的转速同步能力。

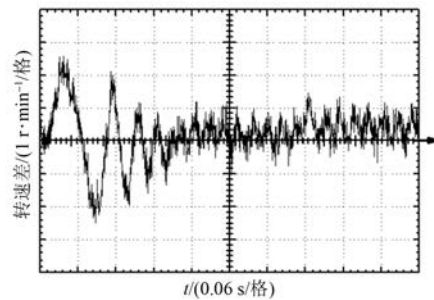


图 12 CDPMSM 转速差值

试验过程中 CDPMSM 的相电压和相电流如图 13 所示。图 13 中,电机功率因数约为 0.9,转速同步响应有一定延迟,电流和电压波形有一些畸变。

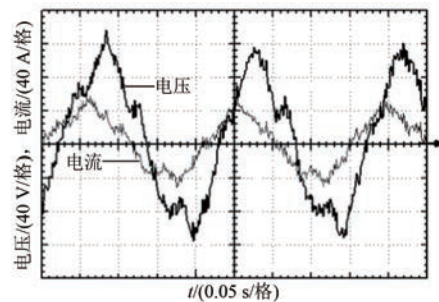


图 13 电流和电压曲线

6 结 语

本文主要对 CDPMSM 2 个转子的转速自同步技术开展研究,通过对电枢两侧气隙内的反向自旋耦合磁场的特性,分析并建立了电机等效磁

网络模型,利用特殊的磁路设计和交叉耦合同步控制系统的引入,使得电机在动静态时转速能够较好地保持自同步。得出如下结论:

(1) 通过差异化材料选取的内外永磁体转子结构设计及内外双转子直径比优选,使 CDPMSM 无需采用额外措施,可以保证内、外 2 个转子具备大小相等、方向相反的电磁转矩和速度。

(2) 通过将电枢铁心常规磁阻转换为电枢铁心切向磁阻和法向磁阻分量的合成,有效简化了 CDPMSM 复杂的磁路分析过程,并据此构建电机等效磁路网格模型。

(3) 设计了交叉耦合同步控制系统以确保动态下双转子保持同步,有限元分析表明稳态下双转子转速具有较好的同步能力。

【参考文献】

- [1] 李宁,王李管,贾明滔,等. 基于信息融合理论的风机故障诊断[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013,44(7):2861.
- [2] 姜燕,黄钟,成双银,等. 对转永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报,2015,30(10):101.
- [3] CARICCHI F, CRESCIMBINI F, SANTINI E. Basic principle and design criteria of axial-flux PM machines having counter-rotating rotors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(5): 1062.
- [4] GOTTIPATI P. Comparative study of double rotor permanent magnet brushless motors with cylindrical

- and disc type slot-less stator [D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2007.
- [5] NO T S, KIM J E, MOON J H, et al. Modeling, control, and simulation of dual rotor wind turbine generator system[J]. Renewable Energy, 2009, 34(10): 2124.
- [6] IKARIGA A, SHIMOJI H, ENOKIZONO M, et al. Magnetic characteristic analysis of dual-rotor machines [C]//12th International Symposium on Interdisciplinary Electromagnetic, 2007.
- [7] ZHANG F, BAI X, NOLLE E, et al. Theory research and dynamic simulation of novel induction machine with inner and outer double rotors [J]. Elektrische, 2008(1/2/3): 10.
- [8] 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.
- [9] XU F, SHI L, LI Y. The weighted vector control of speed-irrelevant dual induction motors fed by the single inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5665.
- [10] 徐奇伟,孙静,杨云,等. 用于混合动力车的复合结构永磁电机电磁优化设计[J]. 电工技术学报, 2020,35(增刊1):126.
- [11] 张林森,徐海珠,胡平. 新型双转子永磁电机转速同步技术的研究进展[J]. 微特电机,2015,43(4): 77.
- [12] 钟义长,黄守道,罗德荣,等. 双转子盘式对转永磁电机同步控制策略[J]. 电工技术学报,2018,33(7):1478.

[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。