

DOI: 10.7652/xjtuxb201902015

并列式混合励磁复合电机的设计及其磁场调节特性

谢颖, 张晓明, 华邦杰, 黑亮声

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 150080, 哈尔滨)

摘要: 基于磁场调制原理与混合励磁同步电机的设计理念与技术,提出了一种新型并列式混合励磁复合电机。介绍了该电机的基本结构与工作原理,给出其定转子槽/极匹配原则。通过三维有限元法分析,得到了电机空载运行处于不同励磁电流下的电枢绕组磁链、空载反电势、电机输出转矩等特性,验证了电机并列运行时满足叠加定理的特点;给出了电机空载等效磁路模型,推导了电机的磁场调节比例公式,并计算得到了磁场调节范围。根据理论分析加工制作了一台样机,测试获取了电机处于不同励磁电流时额定转速下的空载反电势,进而分析了电机的磁场调节特性,仿真计算与实验结果均表明,通过调节励磁电流可以实现气隙磁通的双向变化,实验结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 磁场调制;混合励磁;复合电机;有限元法;磁场调节范围

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)02-0113-08

A Design of a New Parallel Hybrid Excitation Compound Motor and Its Flux Regulation Performance

XIE Ying, ZHANG Xiaoming, HUA Bangjie, HEI Liangsheng

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A novel parallel hybrid excitation compound motor (PHECM) is proposed based on the principle of magnetic field modulation and the design idea and technology of hybrid excitation synchronous motor. The basic structure and working principle of the motor is presented and the matching principle of the slots and poles is given. A 3-D finite element method (FEM) is used to obtain the armature winding flux linkage, the no load electromotive force (EMF) and the output torque of the motor when it runs without load under different excitation currents. It is verified that the superposition theorem is satisfied when the motor runs at parallel operation. An equivalent magnetic circuit of the motor at no load, a formula and the range of the flux regulation are obtained. A prototype of the motor is manufactured according to the theoretical analysis and the no load EMF of the motor at rated speed with different excitation currents is tested. Then, its flux regulation performance is analyzed. Both the simulation and experimental data show that the air gap flux is bidirectionally changed by adjusting the excitation current. Analysis results are validated by experiments.

Keywords: flux modulation; hybrid excitation; compound motor; finite element method; flux regulation range

收稿日期: 2018-07-09。 作者简介: 谢颖(1974—),女,教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107022);黑龙江省杰出青年科学基金资助项目(JC2016010)。

网络出版时间: 2018-12-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181214.0913.010.html>

电动汽车技术在近年来受到了国内外学者的广泛关注,目前基于磁齿轮效应的磁场调制型复合电机转矩密度和功率密度更大,同时具有低速大转矩和直接驱动的特点,可节省汽车内部空间,因而其在电动汽车特别是在电动大巴车领域更具有优势。

Howe 等于 2001 年提出了具有磁场调制效应的磁齿轮^[1],经过近年来的发展,同心式磁齿轮与电机在内部复合形成的磁齿轮复合电机的拓扑结构多种多样。张东等将一台永磁无刷直流电机和一台磁齿轮整合在一起形成磁齿轮复合电机,在磁齿轮外转子上获得了低速大转矩,但是电机有三层气隙,整体结构较为复杂^[2]。为了进一步改善这种情况,王利利等提出的磁场调制型复合电机实现了磁齿轮和电机在机械方面的耦合,减小了电机结构的复杂程度^[3]。除了同心式磁齿轮的应用,Holehouse 等提出了一种能够实现直线运行的磁齿轮,传动比为 3.25/1,并给出了高转矩转子的结构设计^[4]。此外,磁齿轮与游标电机结合形成的新型永磁游标电机也成为了最近研究的热点^[5-8]。

然而,磁场调制型复合电机同永磁同步电机一样,永磁磁场相对恒定,难以调节,而电动汽车在恒功率运行区域要求较宽的磁场调节范围。为了解决这一矛盾,可以通过在复合电机内引入电励磁绕组实现“混合励磁”以增强其气隙磁场的调节能力,进而扩大其恒功率运行范围。

混合励磁思想最早是由俄罗斯学者于 20 世纪 80 年代时提出的,经过多年的发展,多种混合励磁电机的拓扑结构层出不穷。根据研究的角度不同,混合励磁电机有多种分类方式,从永磁体安放位置来看分为定子永磁型和转子永磁型;从磁路原理角度将混合励磁电机分为串联磁路、并联磁路、混合磁路等^[9-10]。并列式混合励磁电机是一种典型的混合励磁电机结构,其定子有两个并列的铁心,即永磁铁心和电励磁铁心,二者磁路相互独立,共用一套电枢绕组^[11]。文献[12-14]提出了几种不同的并列式混合励磁电机结构,特点是双向励磁调节性能较好。文献[15-16]介绍了一种高速混合励磁发电机,定子励磁型和高速大功率是这种电机最鲜明的特点。文献[17]研究了一种结合磁场调制原理和变极原理提出的磁场调制型混合励磁电机,其保留有低速大转矩和高转矩密度的特点,但是电机结构设计仍显复杂,同时电励磁磁动势对磁场范围的调节作用有限。

为了改进电动大巴车用永磁电机低速大转矩和直接驱动特性不足以及永磁磁场相对恒定难以调节

的缺点,本文将电励磁绕组以并列式的结构引入到磁场调制型复合电机中,使其气隙合成磁场灵活可调,同时保留了低速大转矩在内的一系列优点,提出了并列式混合励磁复合电机(PHECM)。PHECM 为定子永磁型,以调磁环作为转矩输出端口,省略了滑环与电刷,结构更为简单,性能更加优异,因此 PHECM 能够更好地契合电动汽车特别是电动大巴车的应用领域,具有一定的应用前景。

1 电机结构与工作原理

1.1 电机结构

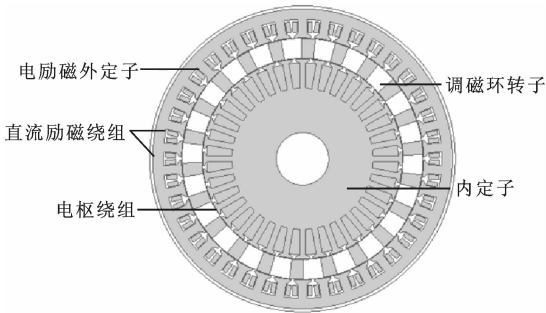
PHECM 的外定子部分为同轴并列排布的永磁部分和电励磁部分,调磁环作为转矩输出端口,因此电励磁部分为无刷结构。图 1a 和图 1b 给出了永磁部分和电励磁部分的径向示意图,图 1c 为电机轴向视图,电机设计数据见表 1。

表 1 PHECM 的设计参数

参数	数值	参数	数值
相数	3	额定转速/ $\text{r} \cdot \text{m}^{-1}$	682
额定功率/kW	3	内定子外径/mm	130
额定频率/Hz	250	外气隙长度/mm	0.6
外定子外径/mm	200	硅钢材料	50W350
内气隙长度/mm	0.6	电励磁每槽匝数	30
永磁体极对数	19	内定子极对数	3
电励磁极对数	19	传动比	3/22
调磁块个数	22	调磁块厚度/mm	13
磁钢厚度/mm	7.8	磁钢材料	N35
铁心长度/mm	100	磁钢轴向长度/mm	60
电励磁轴向长度/mm	20	轴向气隙长度/mm	20

1.2 工作原理

1.2.1 磁场调制原理分析 PHECM 是基于磁场调制式复合电机和并列式混合励磁电机的原理工作的。在复合电机中,电枢绕组或者永磁体产生的磁场通过调制后得出的空间谐波极对数为



(a) 永磁部分

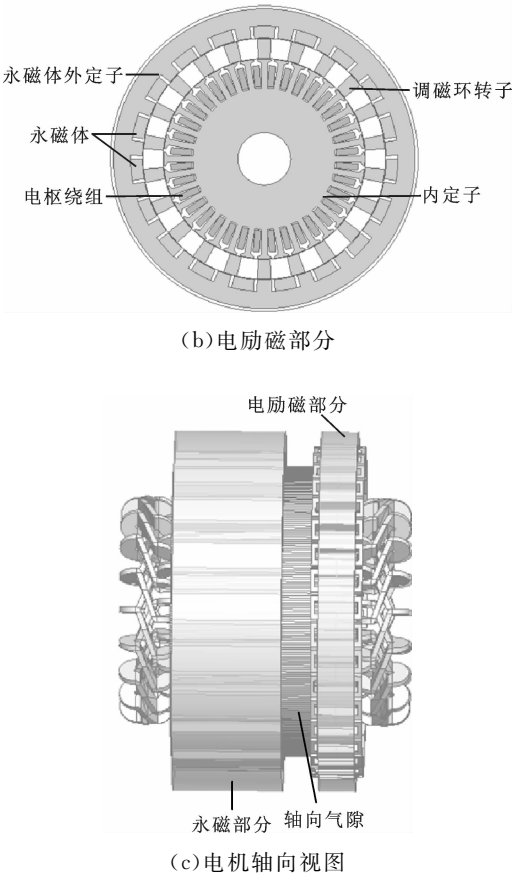


图 1 并列式混合励磁复合电机结构

$$P_{m,k} = | mp + kn_s |$$

$$m = 1, 3, 5, \dots, \infty; k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \infty$$

式中: p 为电机电枢绕组磁场或永磁磁场的磁极对数; n_s 为调磁块个数。经过调制作用产生的磁场空间谐波的旋转角速度为

$$\Omega_{m,k} = \frac{mp}{mp + kn_s} \Omega_r + \frac{kn_s}{mp + kn_s} \Omega_s \quad (2)$$

式中: Ω_r 为电机电枢绕组或者永磁体转子形成旋转磁场的角速度; Ω_s 为调磁环旋转角速度。当 $m=1$, $k=1$ 时,经调磁环作用后,对应气隙中磁场谐波极对数的磁密幅值最大,所以能够产生最大的传动力矩。由此可知,若电机的电枢绕组极对数为 p_1 ,永磁体极对数应为 $n_s - p_1$ 。在本文所提出电机中,调磁环为转子,可有 $\Omega_{m,k}=0$,则此时电机的传动比为

$$G_r = \frac{\Omega_r}{\Omega_s} = \frac{n_s}{p_1} \quad (3)$$

为了保证 PHECM 良好稳定地运行,电机的槽/极匹配原则应该符合磁场调制原理,电枢绕组采用单层链式绕组,产生 3 对极旋转磁场,调磁块数为 22,外定子永磁部分永磁体数为 19。电机调磁环部

分作为可动部件,内定子电枢绕组产生的 3 对极磁场,通过调磁环的磁场调制作用,在外侧气隙中产生 19 对极磁场,与永磁体数相同;同理,外侧 19 对极永磁磁场通过调磁环的调制作用,在内侧气隙中产生了 3 对极磁场,与电枢绕组产生磁场极对数相同,因此在电机内部可以实现稳定的能量传递。另一方面,外定子的电励磁绕组部分槽数为 38,每个齿上套有一个 30 匝的环形励磁线圈,相邻两齿上的线圈所通电流方向相反,以产生 19 对极磁场,这样的槽/极匹配使电励磁部分同样满足磁场调制原理,所以 PHECM 满足磁场调制原理。

1.2.2 并列式混合励磁原理分析 利用有限元法分析并列式混合励磁工作原理。当电机内定子电枢绕组不通电时,选取内气隙侧,调节直流励磁电流 I_f 分别为 -10 、 0 、 10 A,PHECM 的三维内层气隙磁密分布如图 2 所示。

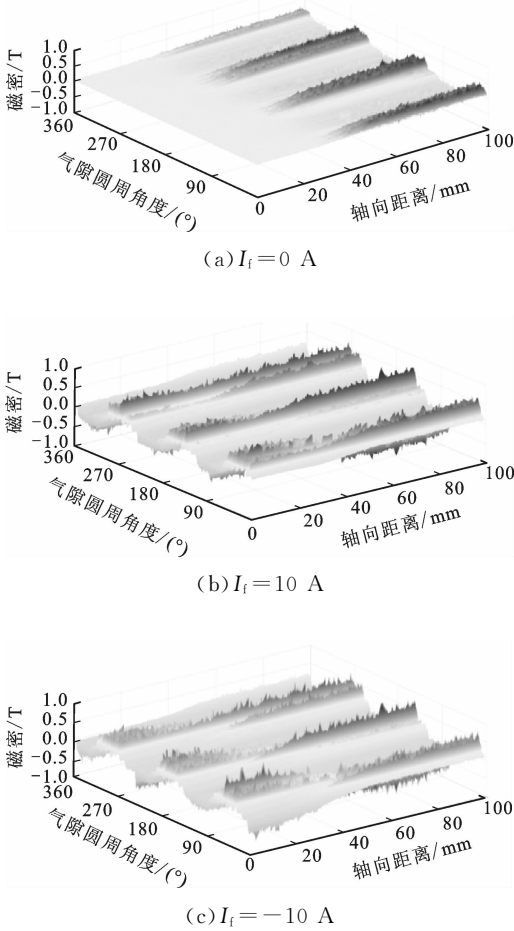


图 2 内层气隙磁密

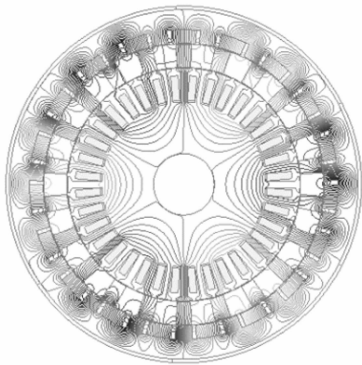
由图 2 可以看出,永磁部分径向气隙磁密和电励磁部分径向气隙磁密均呈三对极对称分布,电机外定子的永磁部分轴向长度为 60 mm,电励磁部分

轴向长度为 20 mm,两部分在轴向上通过 20 mm 的气隙层隔开以保证彼此磁路互不影响。参见图 2a,当直流励磁电流为零时,电机内气隙的磁场仅由永磁体产生;由图 2b 和图 2c 可以看出,通以正向直流励磁电流时,电励磁部分产生磁场方向与永磁体磁场方向相同,气隙合成磁通增大,电机处于增磁状态;通以负向直流励磁电流时,电励磁部分产生磁场方向与永磁体磁场方向相反,气隙合成磁通减小,电机处于弱磁状态,实现了本文通过调节励磁电流来改变气隙合成磁通的设计初衷。

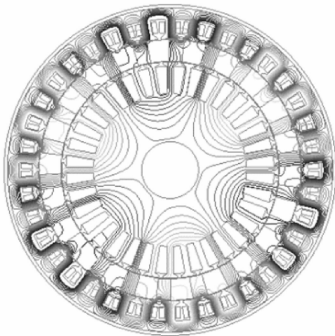
2 电磁性能分析

2.1 磁场分布

图 3 给出了 PHECM 在其两种外定子结构分别单独工作时的空载磁力线分布图。磁力线均经由调磁块、内定子齿部、内定子轭部和外定子轭部等形成闭合回路,并且通过调磁环调制出明显的六极磁场,由此验证了磁场调制原理。



(a)永磁部分磁场分布



(b)电励磁部分磁场分布

图 3 空载磁场分布

2.2 磁链、电动势及电磁转矩

PHECM 的稳定运行需要保证永磁部分和电励磁部分的磁链、电动势、电磁转矩能够高效叠加。图

4 和图 5 为通以 10 A 励磁电流的情况下,电机在一个电周期内电枢绕组的空载磁链和空载反电势曲线。外定子永磁部分和电励磁部分产生的磁链和空载反电势波形相似,相位相同,实现了高效叠加。

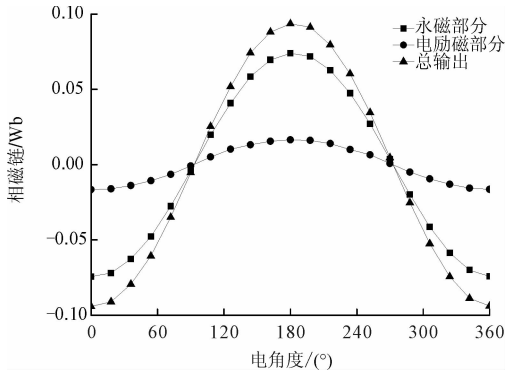


图 4 空载磁链曲线

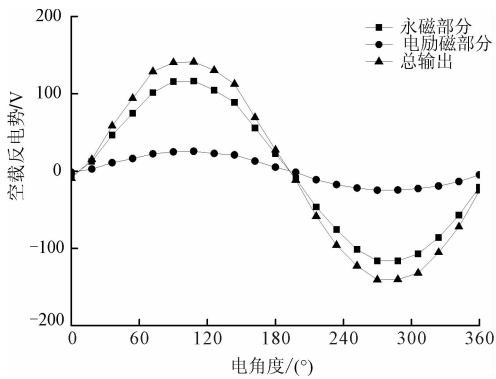


图 5 空载反电势曲线

对 PHECM 而言,其电磁转矩同样由电励磁部分和永磁部分叠加而成。为了更加精准地进行验证,电励磁绕组通以 10 A 直流电,电枢电流为有效值 10 A 的三相对称电流,图 6 给出了电机的永磁部分转矩、电励磁部分转矩和总输出转矩。

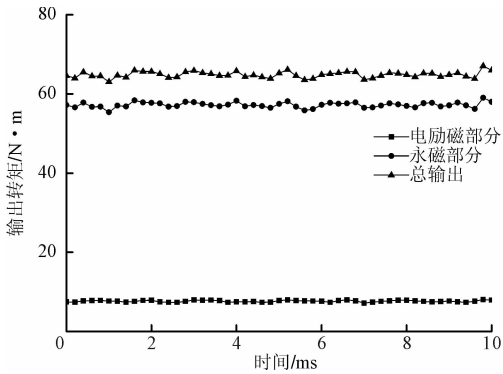


图 6 稳态转矩曲线

2.3 电感特性

PHECM 的电感特性包括电枢绕组自感、电枢绕组间的互感、励磁绕组自感、励磁绕组与电枢绕组

间的互感等。

2.3.1 电枢绕组电感 相绕组电感是电机的重要参数。电励磁绕组不施加电流,仅对 A 相绕组施加直流励磁电流 $I_f = 1$ A,则通过三维有限元法计算得到的电枢绕组自感 L_{aa} 与互感 M_{ba} 和 M_{ca} 的变化曲线如图 7 所示。电枢绕组自感曲线存在一定波动,这是由于外定子永磁体间隔排布导致外定子磁阻分布不均匀,当调磁环铁块与永磁部分外定子齿重合时,电枢绕组自感达到最大。

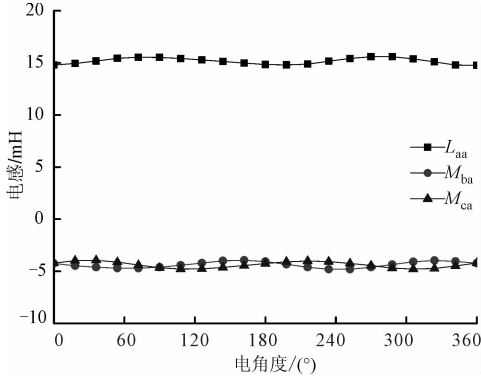


图7 电枢绕组电感

2.3.2 励磁绕组电感 与获得电枢绕组电感的方式一样,在电励磁绕组中通入直流励磁电流 $I_f = 1$ A 可获得励磁绕组自感 L_{ff} 及其与 A 相绕组之间的互感 L_{af} ,如图 8 所示,要见励磁绕组自感随转子位置变化不明显,这是由于电励磁绕组通电后作为等效磁极,电励磁部分可视为是表贴式永磁电机,所以外定子处磁阻分布更为均匀。由于电励磁绕组同电枢绕组不存在交叠,所以互感值较小。

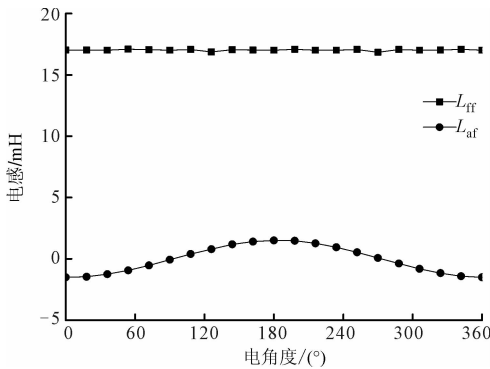


图8 励磁绕组电感

3 磁场调节特性研究

3.1 电机磁路模型

根据并列式混合励磁电机的磁路分析方法,PHECM 电机的空载等效磁路模型如图 9 所示。

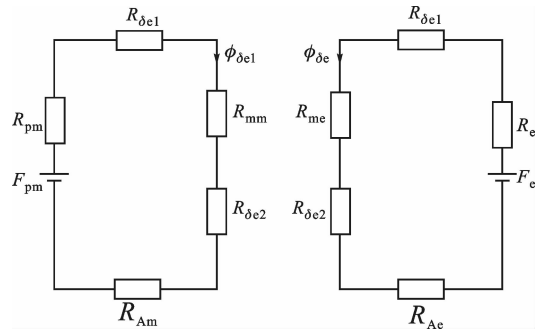


图9 PHECM 空载等效磁路模型

PHECM 磁路为并列排布,由于调磁环转子的存在,电机有两层气隙,其中: F_{pm} 和 F_e 分别代表永磁磁动势和电励磁磁动势; R_{pm} 和 R_e 为永磁体和电励磁绕组的等效磁阻; $R_{\delta m1}$ 和 $R_{\delta m2}$ 分别为永磁部分外层和内层的气隙磁阻; $R_{\delta e1}$ 和 $R_{\delta e2}$ 分别为电励磁部分外层和内层的气隙磁阻。同理,定义内定子轭部磁阻 R_A 和调磁环磁阻 R_m 。另外,还需要定义 R_1 为永磁外部等效磁阻, $R_1 = R_{\delta m1} + R_{\delta m2} + R_{mm} + R_{Am}$,同理,定义 R_2 为电励磁外部等效磁阻。根据磁路模型可知,永磁部分和电励磁部分的每极气隙磁通分别为

$$\phi_{\delta m} = \frac{F_{pm}}{R_{pm} + R_1} \quad (4)$$

$$\phi_{\delta e} = \frac{F_e}{R_e + R_2} \quad (5)$$

气隙合成磁通为

$$\phi_{\delta} = \phi_{\delta m} + \phi_{\delta e} \quad (6)$$

则当仅有永磁部分作用时,气隙合成磁通为 $\phi_{\delta m}$,通以正向励磁电流时,气隙合成磁通为

$$\phi_{\delta+} = \frac{F_{pm}(R_2 + R_e) + F_{e+}(R_{pm} + R_1)}{(R_{pm} + R_1)(R_2 + R_e)} \quad (7)$$

通以负向励磁电流时,气隙合成磁通为

$$\phi_{\delta-} = \frac{F_{pm}(R_2 + R_e) + F_{e-}(R_{pm} + R_1)}{(R_{pm} + R_1)(R_2 + R_e)} \quad (8)$$

由文献[18]可知,主磁导值主要取决于气隙参数和磁路饱和程度。由此,可知永磁部分的两层气隙磁导为

$$\Lambda_{\delta pm1} = \frac{\mu_0 \alpha_{ipm1} \tau L_{efpm1}}{2\delta_1 K_{\delta pm1} K_{spm1}} \times 10^{-2} \quad (9)$$

$$\Lambda_{\delta pm2} = \frac{\mu_0 \alpha_{ipm2} \tau L_{efpm2}}{2\delta_2 K_{\delta pm2} K_{spm2}} \times 10^{-2} \quad (10)$$

式中: μ_0 为空气磁导率; α_i 为计算极弧系数; τ 为极距; δ 为气隙长度; L_{ef} 为电枢计算长度; K_{δ} 、 K_s 为气隙系数、磁路饱和系数。永磁部分的主磁导即外部等效磁导为

$$\Lambda_{\delta pm} = 1/(1/\Lambda_{\delta pm1} + 1/\Lambda_{\delta pm2}) \quad (11)$$

由于电励磁绕组通电后起到等效磁极的作用,电励磁部分结构与表贴式永磁电机类似,所以电励磁部分的两层气隙磁导 $\Lambda_{\delta e1}$ 和 $\Lambda_{\delta e2}$ 以及其主磁导 $\Lambda_{\delta e}$ 的求解方法同永磁部分磁导。

经过计算可得

$$\Lambda_{\delta pm} / \Lambda_{\delta e} = 2.84 \quad (12)$$

由于永磁磁阻和外部等效磁阻远远大于电励磁绕组等效磁阻,进一步推导磁场调节比例为

$$\frac{\phi_{\delta+}}{\phi_{\delta 0}} = 1 + \frac{F_{e+}}{2.84 F_{pm}} \left(1 + \frac{R_{pm}}{R_1} \right) \quad (13)$$

$$\frac{\phi_{\delta-}}{\phi_{\delta 0}} = 1 + \frac{F_{e-}}{2.84 F_{pm}} \left(1 + \frac{R_{pm}}{R_1} \right) \quad (14)$$

通过调磁比例公式可知,当永磁体参数和电励磁磁动势确定时,PHECM 的磁场调节范围主要由永磁部分和电励磁部分的轴向长度比决定,式(13)中的系数 2.84 为永磁部分和电励磁部分的外部等效磁导的比值,这个值的大小主要由这两部分的电枢计算长度决定,反映了二者轴向长度比对电机调磁范围的影响。需要强调的是,空载磁路等效模型的磁导计算主要考虑了气隙参数和磁路饱和程度的影响,估算结果与实际结果会有一定差距,后文将通过磁路法、有限元仿真以及实验所得结果对 PHECM 的磁场调节特性做进一步说明。

3.2 磁场调节特性实验

基于上述分析,加工了一台 PHECM 样机,图 10 给出了所加工样机部分结构图。图 11 给出了样机空载实验平台,永磁同步电机作为施拖电机,调节变频器驱动永磁同步电机以 682 r/min 的转速转动,调节直流电源为电励磁绕组提供 $-10 \sim 10$ A 的直流电。利用示波器记录 PHECM 样机的三相空载反电势并绘制实测反电势波形,电机空载反电势实验值与仿真值对比如图 12 所示。

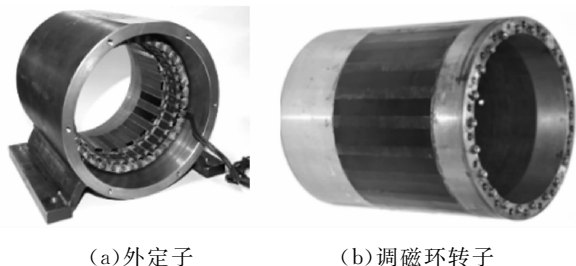
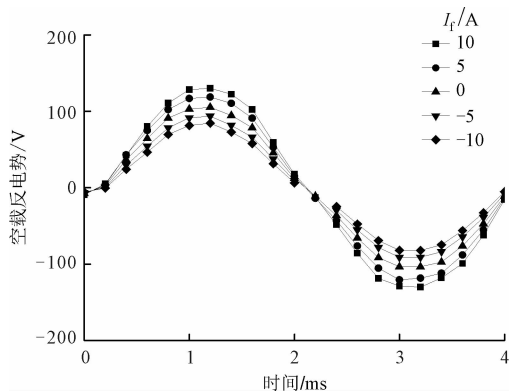


图 10 样机部分结构

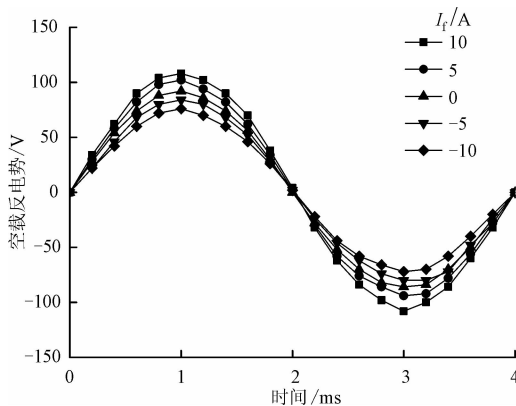
通过对比发现,反电势具有较好的正弦度,表明 PHECM 双向磁场调节能力平稳,需要强调的是,在电机制造过程中,工艺水平的局限也会导致出现不同程度的机械误差和装配误差,这些均会导致电机



图 11 样机空载实验平台



(a) 仿真值



(b) 实测值

图 12 空载反电势曲线对比

实测反电势的幅值与仿真反电势存在一定的差距。

3.3 磁场调节范围分析

为了更加直观地分析电机的磁场调节范围,定义电压调节系数为

$$\lambda = \frac{U_o - U}{U} \quad (15)$$

式中: U_o 代表 PHECM 处于混合励磁状态下的空载反电势; U 代表 PHECM 电励磁部分不作用时的空载反电势。图 13 给出了直流励磁电流 I_f 在 $-10 \sim 10$ A 之间变化时, PHECM 通过磁路法、有限元法以及实验得到的磁场调节范围。

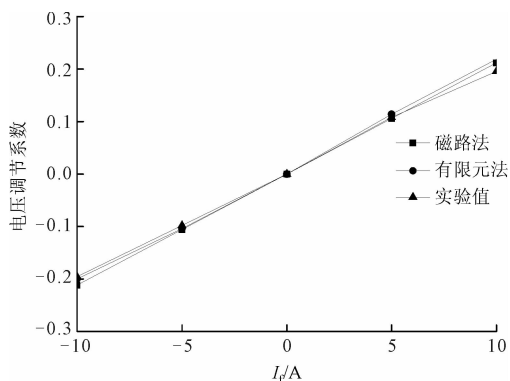


图13 磁场调节范围

从图13可以看出,PHECM通过磁路法、有限元法以及实验得到的磁场调节范围是比较吻合的,然而由于磁路法计算的过程中未考虑铁心饱和的影响,所以磁路法计算得到的磁场调节范围与实验值相比有一定的偏差。需要说明的是,PHECM中的永磁磁动势远大于电励磁磁动势,但实验证明电励磁磁动势对电机的磁场范围调节约在 $0.8 \sim 1.2$ 之间,这表明PHECM的样机具有较宽的双向磁场范围。

4 结 论

本文提出了一种新型并列式混合励磁复合电机(PHECM),介绍了电机的基本结构与工作原理,建立了电机的有限元模型,给出了电机的等效磁路模型并详细分析了其磁场调节特性,设计加工了样机进行实验,可以得到以下结论:

(1)PHECM符合磁场调制原理和并列式混合励磁原理,电机在混合励磁状态下的空载反电势、空载磁链以及输出转矩均满足叠加定理;

(2)当永磁体参数、电励磁磁动势确定时,PHECM的磁场调节范围主要由永磁部分和电励磁部分的轴向长度比决定,另外优化两层气隙与调磁环之间的磁路也可提高电机的磁场调节范围;

(3)PHECM是基于磁场调制型复合电机与电励磁电机的有机结合提出的,电励磁绕组的加入使得电机气隙合成主磁通灵活可调,拓宽了电机恒功率运行范围,提高了电机的磁场调节能力,使电机能更好契合类似于电动大巴车的应用领域。

参考文献:

[1] ATALLAH K, HOWE D. A novel high-performance magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 2844-2846.

[2] 张东,邹国棠,江建中,等. 新型外转子磁齿轮复合电机的设计与研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(30): 67-72.
ZHANG Dong, CHAU K T, JIANG Jianzhong, et al. Design and research of a novel magnetic-gear outer rotor compact machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(30): 67-72.

[3] 王利利. 磁场调制型永磁齿轮与低速电机的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 107-112.

[4] HOLEHOUSE R, ATALLAH K, WANG J. Design and realization of a linear magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4171-4174.

[5] 林鹤云,张洋,阳辉,等. 永磁游标电机的研究现状与最新进展 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 5021-5034.
LIN Heyun, ZHANG Yang, YANG Hui, et al. Overview and recent developments of permanent magnet vernier machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 5021-5034.

[6] BAI Jingang, ZHENG Ping, TONG Chengde, et al. Characteristic analysis and verification of the magnetic-field-modulated brushless double-rotor machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4023-4032.

[7] 李祥林,程明,邹国棠,等. 聚磁式场调制永磁风力发电机工作原理与静态特性 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 1-9.
LI Xianglin, CHENG Ming, CHAU K T, et al. Principle and analysis of a new flux-concentrating field-modulated permanent-magnet wind power generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 1-9.

[8] 刘国海,杨欣,徐亮,等. 五相永磁容错型游标电机弱磁特性研究 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 52-61.
LIU Guohai, YANG Xin, XU Liang, et al. Research on flux-weakening performances for five-phase fault-tolerant permanent-magnet vernier motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 52-61.

[9] 朱孝勇,程明,赵文祥. 混合励磁电机技术综述与发展展望 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 30-39.
ZHU Xiaoyong, CHENG Ming, ZHAO Wenxiang. An overview of hybrid excited electric machine capable of field control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 30-39.

[10] 张卓然,耿伟伟,戴冀,等. 新型混合励磁电机技术

- 研究与进展 [J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 27-36.
- ZHANG Zhuoran, GENG Weiwei, DAI Ji, et al. Recent progress of novel hybrid excitation machines [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(1): 27-36.
- [11] 赵朝会, 张卓然, 秦海鸥. 混合励磁电机的结构及原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 171-172.
- [12] NEDIAR B, HLIQUI S, AMARA Y. A new parallel double excitation synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(9): 2252-2260.
- [13] KAMIEV K, NERG J, PYRHONEN J. Hybrid excitation synchronous generators for island operation [J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(1): 1-11.
- [14] 耿伟伟, 张卓然, 于立, 等. 新型并列式混合励磁无刷直流电机结构原理及其磁场调节特性 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 132-138.
- GENG Weiwei, ZHANG Zhuoran, YU Li, et al. Operation principle and flux regulation characteristics of a new parallel hybrid excitation brushless DC machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 132-138.
- [15] 林楠, 王东, 魏锟, 等. 高速混合励磁发电机的结构及调压性能 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 19-25.
- LIN Nan, WANG Dong, WEI Kun, et al. Structure and voltage regulation performance of high speed hybrid excitation synchronous generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 19-25.
- [16] 林楠, 王东, 魏锟, 等. 新型混合励磁同步电机的数学模型与等效分析 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 149-156.
- LIN Nan, WANG Dong, WEI Kun, et al. Mathematical model and equivalent analysis of a novel hybrid excitation synchronous machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 149-156.
- [17] ZHAO Xing, NIU Shuangxia. Design and optimization of a new magnetic-gear pole-changing hybrid excitation machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9943-9952.
- [18] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 43-44.

(编辑 武红江)

(上接第31页)

- [27] 梅堂杰, 郭俊德, 董光能. 片状纳米 MoS_2 的制备及其在油润滑中的减摩抗磨性能研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(8): 129-138.
- MEI Tangjie, GUO Junde, DONG Guangneng, et al. Preparation of flaky nano- MoS_2 and its anti-friction and anti-wear performance in oil [J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 129-138.
- [28] JOLY-POTTUZ L, DASSENOY F, BELIN M, et al. Ultralow-friction and wear properties of IF- WS_2 under boundary lubrication [J]. Tribology Letters, 2005, 18(4): 477-485.
- [29] TANNOUS J, DASSENOY F, LAHOUIJ I, et al. Understanding the tribochemical mechanisms of IF- MoS_2 nanoparticles under boundary lubrication [J]. Tribology Letters, 2011, 41(1): 55-64.
- [30] YI M, ZHANG C. The synthesis of MoS_2 particles with different morphologies for tribological applications [J]. Tribology International, 2017, 116: 285-294.
- [31] TANNOUS J, DASSENOY F, LAHOUIJ I, et al. Understanding the tribochemical mechanisms of IF- MoS_2 , nanoparticles under boundary lubrication [J]. Tribology Letters, 2011, 41(1): 55-64.
- [32] XU Y, HU E, HU K. Formation of an adsorption film of MoS_2 nanoparticles and dioctyl sebacate on a steel surface for alleviating friction and wear [J]. Tribology International, 2015, 92: 172-183.
- [33] 唐国钢. 新型 MoS_2 基纳米复合材料的形貌调控及摩擦学性能 [D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2016: 50-53
- [34] 孙天华, 杨生荣, 马立民, 等. 花状 O- MoS_2 添加剂的制备及摩擦学性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 631-638.
- SUN Tianhua, YANG Shengrong, MA Limin, et al. Preparation and tribological performance of O- MoS_2 nanoflowers as an effective lubricant additive [J]. Tribology, 2017, 37(5): 631-638.

[本刊相关文献链接]

- 李金宽, 柳在鑫, 李世蓉, 等. 倾斜式双滚柱包络环面蜗杆传动弹流润滑分析. 2018, 52(3): 83-90. [doi:10.7652/xjtuxb201803012]
- 董国忠, 张辉, 李月, 等. 混合弹流润滑系统的建模与摩擦学特性研究. 2018, 52(1): 107-114. [doi:10.7652/xjtuxb201801016]
- 孟凡净, 刘焜, 秦涛. 颗粒流润滑力链演变及动力学状态的研究. 2017, 51(9): 106-111. [doi:10.7652/xjtuxb201709015]
- 李月, 郭俊德, 董国忠, 等. 温敏水凝胶释放润滑液的摩擦学性能. 2017, 51(4): 16-22. [doi:10.7652/xjtuxb201704003]

(编辑 杜秀杰)