

并列式双转子混合自励磁电机励磁源参数 优化设计和磁场调节特性分析

马涛^{1,2}, 林晓刚^{2*}, 解伟²

(1. 福州大学 先进制造学院, 福建 晋江 362251;

2. 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究中心, 福建 泉州 362216)

Optimization Design of Excitation Source Parameters and Magnetic Field Regulation Characteristics Analysis for Parallel Dual-Rotor Hybrid Self-Excited Motor

MA Tao^{1,2}, LIN Xiaogang^{2*}, XIE Wei²

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Jinjiang 362251, China;

2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences,
Quanzhou 362216, China)

Abstract: To address the fixed air-gap magnetic field of permanent magnet synchronous motors and the inefficiencies of traditional electrically excited motors, a novel parallel dual-rotor hybrid self-excited motor is introduced. Firstly, the proposed motor utilizing the harmonic excitation principle, it allows for flexible control of excitation current by adjusting harmonic voltage, which enhances speed control in medium and high-speed ranges. Secondly, under the premise of ensuring that the power remains unchanged, the proportion of each of the two parts is analyzed, and then the excitation source parameters are optimized and designed. Finally, the performance of the proposed motor is verified by adjusting the magnitude and direction of the excitation current and using the two-dimensional finite element model. The simulation results show that the proposed motor has a good ability to adjust the magnetism, and in the case of weak field, the amplitude of the back electromotive force

is close to 0, which can effectively realize the speed adjustment.

Key words: hybrid self-excited motor; dual-rotor; parallel; finite element model

摘 要: 针对永磁同步电机气隙磁场不可调以及传统电励磁电机的效率低等问题,提出了一种新型并列式双转子混合自励磁电机。首先,该电机利用谐波激励原理,通过调节谐波电压可灵活调整励磁电流,在中高速域更容易实现弱磁扩速。其次,保证功率不变的前提下,先分析两部分各占的比重,再分别对励磁源参数进行优化设计。最后,通过调节励磁电流的大小与方向且利用二维有限元模型对所提电机的性能进行验证。仿真结果证明:所提电机具有较好的调磁能力,在弱磁情况下,反电动势幅值接近于0,可以有效实现转速调节。

关键词: 混合自励磁电机; 双转子; 并列式; 有限元模型

基金项目: 省科技计划-自然科学基金青年创新项目 (2021J05105); 泉州科技计划-高层次人才创新创业项目 (2021C025R); 福建科技计划-STS院省合作项目 (2022T3041)

Provincial Science and Technology Plan-Natural Science Foundation Youth Innovation Project (2021J05105); Quanzhou Science and Technology Plan-High level Talent Innovation and Entrepreneurship Project (2021C025R); Fujian Science and Technology Plan-STS Institute Provincial Cooperation Project (2022T3041)

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 由于其高转矩密度、高功率密度及高效率被广泛应用于各种工业生产与生活中,但其也存在气隙磁场不可调、永磁体退磁等风险,在高温场合上述问题更加突出。近年来,重视电励磁电机 (Electrically Excited Synchronous Motor, EESM) 发展的呼声越来越

高,其在风力发电的应用场合备受关注,人们逐渐意识到电励磁电机的重要性与不可替代性^[1-3]。电励磁电机无需永磁体,不存在永磁体退磁风险,且具有较高转速调节范围,在上述场合极具潜力。但传统电励磁同步电机需要电刷和集电环提供励磁电流,存在电刷消耗较快且容易产生安全隐患等问题,相较于永磁同步电机其转矩密度与效率较低^[4-6]。

为了解决上述问题,美国学者率先提出了混合励磁电机的概念,在电励磁电机中增加永磁体以提高转矩密度、功率密度和效率。混合励磁电机不仅减小了永磁体的用量,而且解决了永磁同步电机气隙磁场不可调的关键问题,提高了电励磁电机的转矩密度和效率等^[7-10]。近年来,研究人员又提出了多种混合励磁电机的结构,依据磁路可以分为串联磁路式与并联磁路式两种类型。串联式的混合励磁电机结构原理更为简单,但相较于并联磁路式混合励磁电机励磁电流较大,会导致永磁体退磁这一不可逆风险的增加^[11]。英国学者 B. J. Chalmers 提出了一种磁阻转子与永磁转子并列的电机结构^[12],但低速下磁阻转子工作效率较低,导致电机转矩密度较低。南京航空航天大学严仰光等人提出了一种并列式混合励磁电机^[13],结构完全并列,不存在永磁体退磁这一风险。以上提到的并列式混合励磁电机大多数含有额外励磁机或电刷滑环,集成度较低,稳定性较差。

文献^[14]提出一种自励磁同步电机(Self-Excited Synchronous Motor, SESM),无需电刷滑环和额外添加励磁机,利用定子绕组电流的磁动势谐波进行励磁,在转子谐波绕组中产生感应电动势,并经过整流器后接入转子上励磁绕组,从而实现“自励磁”。自励磁电机无需额外励磁机,但零低速下励磁电流较低,启动困难。

针对上述问题,本文提出一种新型十一相并列双转子混合自励磁电机(Hybrid Self-Excited Synchronous Motor, HSESM),采用自励磁和永磁两种励磁源进行混合励磁,自励磁电机的引入解决了大多数并列式混合励磁电机无法实现无刷化、存在一定的安全隐患且需要后期维修保养以及自励磁电机启动困难等问题。

本文提出新型电机拓扑结构,介绍其工作原

理以及关键参数优化,并构建联合仿真模型分析该电机的调磁特性,表明该电机结构的先进性与合理性。

1 HSESM 结构拓扑与原理

HSESM 采用 11 槽 12 级的拓扑结构,共用一套定子绕组,并采取分数槽集中式绕组,丰富谐波含量的同时减少端部绕组长度、损耗与体积^[15-17]。

图 1 为并列双转子混合自励磁电机结构剖面图,转子侧具有自励磁转子和永磁转子,二者并列安装在同一根轴上,且两部分转子内径相同。同时,轴上安装了转子整流板,为转子侧整流供电。定子侧采用一套定子绕组,HSESM 的两部分转子共用一个定子。两部分转子具有高度独立性,可以避免永磁体发生退磁问题。因此,HSESM 感应电动势为 PMSM 部分和 SESM 部分之和,二者在磁路上也相互独立。

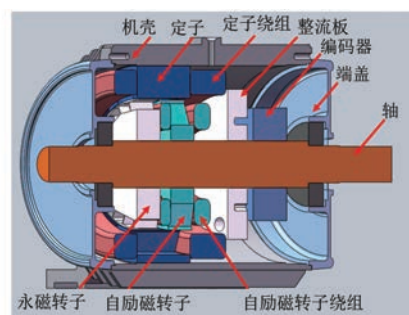


图 1 HSESM 结构剖面

Fig. 1 Structure section of the HSESM

自励磁电机定子第 k 相电流为^[18]

$$i_k = I \cdot \cos \left[\omega t - p \cdot (k - 1) \frac{2\pi}{m} \right] \quad (1)$$

$$p = \begin{cases} 1, 2, 3, \dots, \frac{Q_s}{2} - 1, & Q_s \text{ 为偶数} \\ 1, 2, 3, \dots, \frac{Q_s + 1}{2} - 1, & Q_s \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I 为定子电流幅值; ω 为角频率; p 为定子电流极对数; m 为电机相数; Q_s 为定子槽数。

如图 2 所示,自励磁电机主要依靠定子侧十一相绕组中定子电流所含的谐波磁动势进行励磁,通过谐波绕组捕获气隙中的谐波磁动势产生感应电动势,进而产生谐波电流,又经过转子侧的整流电路对该电流进行整流后通入励磁绕组成为

励磁电流,从而实现“自励磁”^[14]。

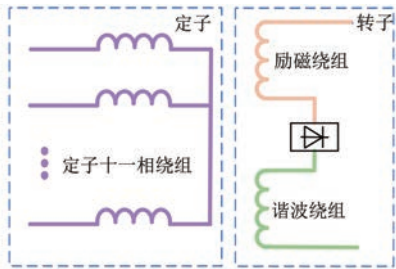


图 2 SESM 励磁原理

Fig. 2 SESM excitation schematic

图 3 为 HSESM 磁通调节原理图,永磁体电机部分磁通固定不变,可以通过调节自励磁电机部分气隙磁通来对整个电机磁通进行调节。由于自励磁电机部分是谐波励磁,所以可以减小电枢绕组中谐波含量,便可以减小气隙磁通大小;反之则将增加气隙磁通大小。

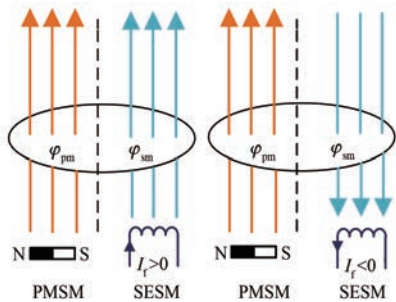


图 3 HSESM 磁通调节原理

Fig. 3 Flux control principle of HSESM

HSESM 的电枢绕组的总磁通为

$$\varphi = \varphi_{\text{pm}} + \varphi_{\text{sm}} \tag{3}$$

式中: φ_{pm} 、 φ_{sm} 分别为永磁电机部分、自励磁电机部分所产生的磁通。

每匝线圈的总磁链可以表示为

$$\psi = \psi_{\text{pm}} + \psi_{\text{sm}} \tag{4}$$

式中: ψ_{pm} 、 ψ_{sm} 分别为永磁电机部分、自励磁电机部分所产生的磁链。

HSESM 磁链调节范围为

$$\begin{cases} \psi_{\text{max}} = \psi_{\text{pm}} + \psi_{\text{sm}} \\ \psi_{\text{min}} = \psi_{\text{pm}} - \psi_{\text{sm}} \end{cases} \tag{5}$$

式中: ψ_{max} 、 ψ_{min} 分别为混合自励磁电机所产生的磁链的最大值、最小值。

HSESM 电机的感应电动势为两部分电机的感应电动势之和。具体 HSESM 感应电动势为

$$E_{\text{coil}} = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(\psi_{\text{pm}} + \psi_{\text{sm}})}{dt} \tag{6}$$

由于永磁电机通常以高转矩密度、高功率密度著称,而自励磁电机具有宽调速范围、无刷化等特点,所以本文混合励磁并列双转子结构具有高转矩密度、高功率密度、无刷化以及宽调速范围等优点。因此,需要通过合理且适当地完成上述设计。

2 电机设计原则及优化

2.1 定转子组合结构

由于 HSESM 采用分数槽集中绕组,对电机的极对数存在一定的约束条件,主要有以下五点^[19]:

- (1) 定子槽数 Z 为相数 m 的整数倍。
- (2) 由于 Z/p 为不可约分数,所以极对数 p 不能为相数 m 的整数倍。
- (3) 若定子槽数 Z 为偶数,极对数 p 为奇数。
- (4) 若定子槽数 Z 为奇数,极对数 p 可能为奇数,也可能为偶数。
- (5) 短距系数应该大于等于 0.866。

根据式(1)中定子电流极对数 p 的取值式可得,11 槽自励磁电机 p 可以取值为 1、2、3、4、5,不同 p 值下所产生的主要谐波阶次不同,主要谐波阶次与如表 1。

表 1 不同 p 值下主要谐波次数表

Tab. 1 The key parameters of HSESM

p	谐波阶次		
1	1	10	...
2	2	9	...
3	3	8	...
4	4	7	...
5	5,6		...

首先确定 HSESM 的定子槽数为 11 槽,根据上述约束条件,符合上述条件的转子极数有 8、10、12、14 四种,其中短距系数分别为 0.909 6、0.989 8、0.989 8、0.909 6,均符合上述约束条件。但由于 SESM 部分产生含量最高的磁动势谐波阶次分别 1、2、3、4、5 次,所以其极对数不应超过 5。但考虑到 PMSM 部分转矩性能与功率密度,在综合考虑下最终选择转子极数为 12 极。

本文所提出的 HSESM 结构由 SESM 和 PMSM 构成,均为 11 槽 12 极结构。由于两电机同心同轴,所以两电机的转速与转向均一致^[20-22]。

SESM 部分电机拓扑结构如图 4 所示,为 11 槽 12 级的拓扑结构,自励磁电机部分转子侧具有谐波绕组和励磁绕组两套绕组。PMSM 部分电机拓扑结构如图 5 所示,为 11 槽 12 级的拓扑结构。



图 4 SESM 部分电机拓扑

Fig. 4 SESM part of the motor topology

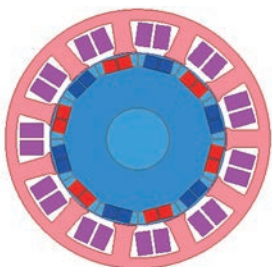


图 5 PMSM 部分电机拓扑

Fig. 5 PMSM part of the motor topology

2.2 SESM 部分与 PMSM 部分铁心比例确定

因为 HSESM 两部分电机的定转子外径相同,所以 HSESM 的调磁性能与 PMSM 和 SESM 二者的气隙以及转子铁心长度有关。综上所述,在保证 HSESM 电机调磁性能的前提下,以采用较短的 SESM 电机铁心长度为目标。其中, PMSM 部分气隙为 0.7 mm,铁心长度为 36 mm; SESM 部分气隙为 0.35 mm,在此条件下对自励磁部分的电机铁心比例进行确定。

良好的调磁性能需满足下列两个条件:

- (1) 低速带载情况下,二者电势之和不能超过额定电压。
- (2) 高速空载情况下,二者电势之差不能超过额定电压。

$$\begin{cases} U \geq U_{pm} + U_{sm}, \text{低速带载} \\ U \geq U_{pm} - U_{sm}, \text{高速空载} \end{cases} \quad (7)$$

通过有限元仿真分析,保证 HSESM 调磁性能的前提下,SESM 最短铁心长度为 36 mm。

2.3 永磁体关键参数确定

由于永磁体的厚度对 PMSM 部分的转矩、功率特性的影响至关重要,所以本文在对功率基本不造成影响的范围内且保证其他参数不变的情况下,研究了永磁体宽度这个关键性设计参数对平均电磁转矩以及转矩脉动的影响。永磁体宽度对 PMSM 部分转矩情况的影响如图 6 所示。

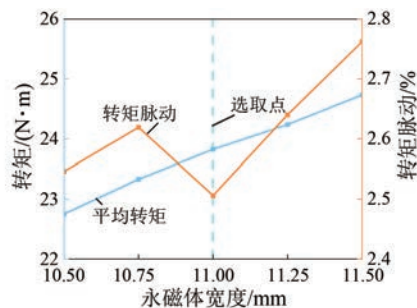


图 6 永磁体宽度与转矩、转矩脉动关系

Fig. 6 The relationship of the width of the permanent magnet and the torque and torque ripple

在永磁体的厚度保持不变时,对永磁体宽度进行仿真分析。从图 6 可以看出,PMSM 部分转矩随着永磁体宽度增大而增加,但当永磁体宽度为 11 mm 时,转矩脉动最小,因而选取 11 mm 作为永磁体宽度。

2.4 SESM 部分激磁/励磁绕组匝数比确定

由于 SESM 部分转子上谐波绕组与励磁绕组匝数配比将直接影响转矩性能,所以本文在保证对功率基本不造成影响且其他参数不变的情况下,对匝数比进行优化仿真分析,结果如图 7 所示。

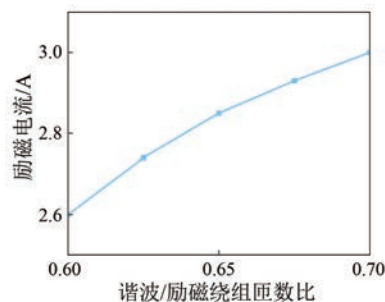


图 7 励磁电流随谐波/励磁匝数比变化

Fig. 7 Excitation current as a function of the excitation/turns ratio

从图 7 可以看出,自励磁同步电机的谐波/励磁绕组匝数比与励磁电流成正比。随着谐波/励磁绕组匝数比的上升,由于谐波绕组捕获气隙中定子磁动势效率有限,该曲线励磁电流增加量有

所下降。为保证励磁绕组的电流密度在合理取值范围内以及考虑电机散热等相关问题,根据上述情况综合考虑选取 0.65 作为 HSESM 的谐波绕组/励磁绕组匝数比最为合理。

3 有限元仿真分析

并列双转子混合自励磁电机共用一套定子绕组,电机中两部分转子独立工作,HSESM 的电路耦合,而磁路相对独立。Ansys Maxwell 三维有限元仿真分析模型所需仿真时间过长,占用过大内存,仿真效率较低。本文提出用 Ansys Simplorer 与 Ansys Maxwell 二维模型进行联合仿真。图 8 对两部分电机的定子侧绕组进行串联,并添加端部绕组电感以及绕组电阻,相较于三维有限元模型仿真可以很大程度缩短仿真时长,提高仿真效率,而且在加入端部电感和电阻后,可以提高仿真结果的真实性及准确性。

图 9 为整流电路通过二极管对谐波绕组产生的激磁电流进行整流,然后利用电容进行滤波以减小电流脉动,最后通入励磁绕组为 SESM 部分提供励磁电流,进而产生可调磁场,拓宽电机转速范围。HSESM 电机主要设计参数如表 2 所示。

表 2 HSESM 电机关键设计参数

Tab. 2 The key design parameters of HSESM	
参数名称	参数值
定子外径/mm	210
定子内径/mm	140.7
PMSM 转子外径/mm	139.3
SESM 转子外径/mm	140
转子内径/mm	50
定子轴向长度/mm	82
PMSM 轴向长度/mm	36
SESM 轴向长度/mm	36
转速/(r•min ⁻¹)	500
激磁/励磁绕组匝数比	0.65
永磁体宽度/mm	11
永磁体厚度/mm	10

本文联合仿真中采用电压源进行供电,在电枢绕组前端加入了端部电感以及绕组电感,并对自励磁电机与永磁同步电机电枢绕组进行串联。分别通过 V_ROT 以及 MASS_ROTb 模块给定电机转速与初始位置角;搭建整流电路对自励磁转子谐波绕组中电流进行整流,通入励磁绕组。为保证两部分电机的平衡性以及仿真结果的合理

性,两部分电机均采用 11 槽 12 级的极槽配比,且定子槽型、转子铁心长度、转子内径均一致。永磁转子气隙磁通密度较高,而自励磁转子气隙磁通密度相较更低。因此,设计时使永磁转子的气隙更大,使二者之间的电压分配以及转矩等因素更加平衡。由于 SESM 部分转子需要绕线,故而需要在两部分转子中间留出一定的空隙提供给 SESM 转子端部绕组,所以设计时定子轴向长度应留出绕组端部空间。

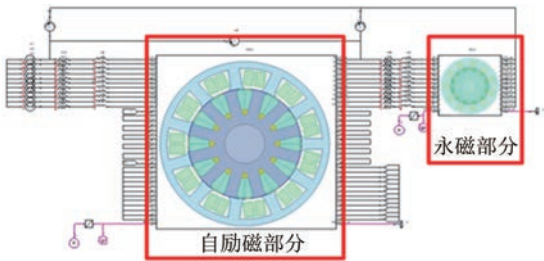


图 8 Simplorer 与 Maxwell 联合仿真
Fig. 8 Simplorer and Maxwell co-simulation

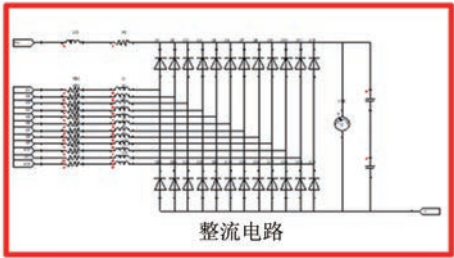


图 9 整流电路
Fig. 9 Rectifier circuits

采用二维有限元仿真进行分析,将两部分相反电动势与相磁链进行叠加。图 10 为额定情况下自励磁部分励磁电流图,励磁电流平均值为 2.8 A。

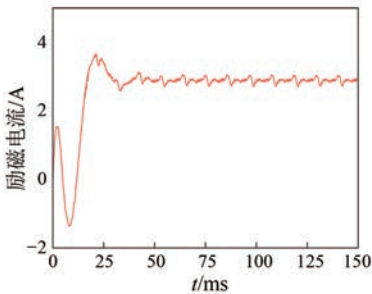


图 10 额定情况下励磁电流
Fig. 10 Excitation current in the case of nominal conditions

图 11 中自励磁电机部分额定转矩为 20.2 N•m,

转矩脉动为 11.6%;永磁同步电机部分额定转矩为 $23.8 \text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动为 2.5%。由于两部分电机同轴旋转,且额定情况下转矩方向一致,所以混合自励磁同步电机额定转矩是将 PMSM 和 SESM 两部分的额定转矩进行线性叠加,额定转矩为 $44 \text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动为 6.7%。

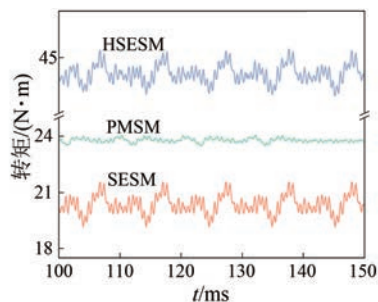


图 11 额定情况下转矩

Fig. 11 Torque in the case of nominal conditions

从表 3 中可以看出,在相同输入功率的情况下,HSESM 的输出转矩和效率介于 PMSM 与 EESM 二者之间,但更接近于 EESM。该结果说明 HSESM 的设计符合基本目标,且 EESM 的效率略低于 HSESM。

表 3 不同电机额定工况下转矩与效率

Tab. 3 Torque and efficiency under different motor rated working conditions

电机名称	转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	效率/%
PMSM	48.1	84.6
EESM	41.8	73.4
HSESM	44	77.3

HSESM 通过调节 SESM 部分的励磁电流方向和大小分为弱磁、增磁两种情况,SESM 部分的磁场方向与大小也随之变化。

图 12 为空载下 PMSM 部分与 SESM 部分的励磁绕组中通入不同方向的 2.8 A 励磁电流时反电动势的叠加波形图。

从图 12 中可以看出在增磁情况下,反电动势有所上升;在弱磁情况下,反电动势有所下降。通过改变励磁电流,进而改变反电动势大小,且在弱磁情况下,反电动势幅值接近于 0。

图 13 为空载下 PMSM 部分励磁绕组与 SESM 部分励磁绕组中通入不同方向的 2.8 A 励磁电流时相磁链的叠加波形图。

从图 13 可以看出,在增磁情况下,磁链明显增大,而在弱磁情况下,磁链也有所减小,但弱

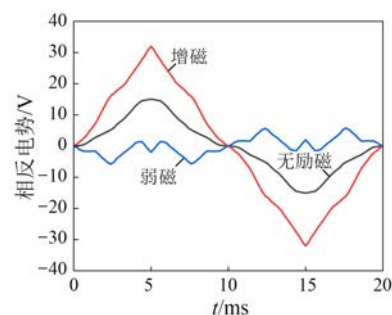


图 12 转速 500 r/min、不同励磁电流方向反电动势

Fig. 12 The back electromotive force in different excitation current directions at 500 r/min

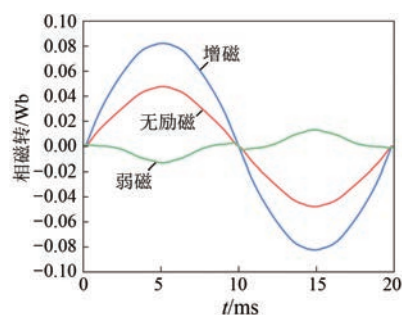


图 13 转速 500 r/min、不同励磁电流方向相磁链

Fig. 13 The phase flux linkages in different excitation current directions at 500 r/min

磁时磁链由于受电机的凸极效应影响,并不能使磁链完全为 0。

4 结语

本文为解决 PMSM 气隙磁场不可调、永磁体存在退磁风险、SESM 启动困难以及 EESM 功率密度低、存在电刷滑环等安全隐患,提出一种新型的并列式混合自励磁结构。将 PMSM 与 SESM 进行组合,介绍了 SESM 的基本工作原理,并依据磁通调节原理,设计研究了一种新型的自励磁混合励磁电机,增大永磁同步电机的工作范围。基于 Ansys Simplorer 搭建的整流电路和 Ansys Maxwell 电磁场有限元联合仿真,研究永磁体厚度、谐波/励磁绕组匝数比对电机电磁性能的影响,并完成电磁参数设计。然后,基于设计的原理样机模型,仿真调磁性能,获得不同调磁状态下的反电动势、相磁链的参数曲线。结果显示,新型并列式混合自励磁电机具有较好的双向调磁性能,可以有效实现对转速的调节且弱磁情况下反电动势接近于 0。

参考文献

- [1] 《中国油气产业发展分析与展望报告蓝皮书》和《中国低碳经济发展报告蓝皮书》发布[J]. 中国石油企业, 2021.
“Blue book report on analysis and outlook of china’s oil and gas industry development” and “Blue book report on china’s low carbon economy development” released [J]. China Petroleum Enterprises, 2021.
- [2] 付兴贺, 江政龙, 吕鸿飞, 等. 电励磁同步电机无刷励磁与转矩密度提升技术发展综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1689-1702.
FU X H, JIANG Z L, LV H F, et al. Review of the brushless excitation and torque density improvement in wound field synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1689-1702.
- [3] 宁银行, 赵朝会, 刘闯. 混合励磁电机的技术现状及新进展[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(5): 1-12+26.
NING Y H, ZHAO C H, LIU C. Overview and new process of hybrid excitation motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(5): 1-12+26.
- [4] 杨鑫, 林晓刚, 赵宇纬, 等. 多相自励磁同步电机稳态下高频励磁建模与分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(5): 46-52+60.
YANG X, LIN X G, ZHAO Y W, et al. Modeling and analysis of high-frequency excitation in steady state of multi-phase self-excited synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(5): 46-52+60.
- [5] 张卓然, 王东, 花为. 混合励磁电机结构原理、设计与运行控制技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7834-7850+8221.
ZHANG Z R, WANG D, HUA W. Overview of configuration, design and control technology of hybrid excitation machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7834-7850+8221.
- [6] STANCU C, WARD T, RAHMAN K, et al. Separately excited synchronous motor with rotary transformer for hybrid vehicle application [C] // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Pittsburgh, PA, 2014.
- [7] 项倩雯, 彭振德, 欧钰, 等. 基于定转子开窗的混合励磁双定子 BSRM 振动抑制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 43-50.
XIANG Q W, PENG Z D, OU Y, et al. Vibration suppression of hybrid excitation double-stator BSRM based on stator-rotor fenestrating [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 43-50.
- [8] 王宇婷, 蓝益鹏. 混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的温升特性分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 60-66+73.
WANG Y T, LAN Y P. Analysis of temperature rise characteristics of hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(12): 60-66+73.
- [9] AHN J W, PARK S J, LEE D H. Hybrid excitation of srm for reduction of vibration and acoustic noise [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 374-380.
- [10] KOSAKA T, SRIDHARBABU M B, YAMAMOTO M, et al. Design studies on hybrid excitation motor for main spindle drive in machine tools [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3807-3813.
- [11] 朱孝勇, 程明, 赵文祥, 等. 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 X Y, CHENG M, ZHAO W X, et al. An overview of hybrid excited electric machine capable of field control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 30-39.
- [12] CHLAMERS B J, AKMESE R, MUSABA L. Design and field-weakening performance of permanent magnet/reductance motor with two-part rotor [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1998, 145(2): 133-138.
- [13] 严仰光, 陈志辉. 混合励磁同步电机[P]. 中国, 200310106347, 2004-11-10.
YAN Y G, CHEN Z H. Hybrid excitation synchronous machine [P]. China: 200310106347, 2004-11-10.
- [14] DAJAKU G, GERLING D. New self-excited synchronous machine with tooth concentrated winding [C] // International Electric Drives Production Conference, 2013.
- [15] 胡景泰, 付显, 梁海泉. 双三相永磁同步发电机多

- 目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 77-83.
- HU J T, FU X, LIANG H Q. Multi-objective optimization of dual three-phase permanent magnet synchronous generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(6): 77-83.
- [16] 孙春阳, 骆皓, 吴刚, 等. 分数槽集中绕组感应电机非主导极次谐波磁动势抑制方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 86-95.
- SUN C Y, LUO H, WU G, et al. Method for suppressing non-dominant pole log-harmonic magnetomotive force in fractional slot concentrated winding induction machines [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 86-95.
- [17] 葛研军, 刘振晗, 杨博, 等. 磁齿轮电机与集中绕组永磁电机的比较分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 49-55.
- GE Y J, LIU Z H, YANG B, et al. Comparison and analysis of magnetic gear motor and concentrated winding permanent magnet motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(1): 49-55.
- [18] DAJAKU G, GERLING D. Self-excited synchronous machine with high torque capability at zero speed [C] //International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Amalfi, 2018.
- [19] 谭建成. 三相无刷直流电动机分数槽集中绕组槽极数组合规律研究[J]. 微电机, 2007, 3(12): 72-77+86.
- TAN J C. Investigation on slot/pole number combinations for 3-phase bldcm with concentrated windings [J]. Micromotors, 2007, 3(12): 72-77+86.
- [20] 赵纪龙, 林明耀, 付兴贺, 等. 混合励磁同步电机及其控制技术综述和新进展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5876-5887.
- ZHAO J L, LIN M Y, FU X H, et al. An overview and new progress of hybrid excited synchronous machines and control technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5876-5887.
- [21] 井立兵, 高起兴, 王冲, 等. 双转子混合励磁电机优化设计和特性分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 43-50.
- JING L B, GAO Q X, WANG C, et al. Optimization design and characteristic analysis of dual-rotor hybrid excitation motor [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(9): 43-50.
- [22] 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): 131-137+154.
- GENG W W, ZHANG Z R, YU L, 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): 131-137+154.

收稿日期:2024-02-23

收到修改稿日期:2024-04-29

作者简介:

马涛(1999—),男,硕士,研究方向为电机设计, 3013270014@qq.com;

* 通信作者:林晓刚(1990—),男,博士,副研究员,研究方向为电机设计与控制, xg_lin_nuaa@126.com。

Optimization Design of Excitation Source Parameters and Magnetic Field Regulation Characteristics Analysis for Parallel Dual-Rotor Hybrid Self-Excited Motor

MA Tao^{1,2}, LIN Xiaogang^{2*}, XIE Wei²

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Jinjiang 362251, China;
2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362216, China)

Key words: hybrid self-excited motor; dual-rotor; parallel; finite element model

Despite permanent magnet synchronous motors (PMSMs) have high power and torque density due to the use of permanent magnets as the source of excitation, suffer from an unadjustable air-gap magnetic field, limited speed range, and restricted application scenarios. Coupled with the inefficiencies of traditional electrically excited synchronous motors caused by significant losses in the excitation winding, the presence of an additional excitation system, lower integration, and larger size, a self-excited synchronous motor that do not require an additional excitation system is proposed at this paper. A hybrid self-excited motor utilizing both harmonic excitation and permanent magnet excitation sources is designed.

Firstly, the harmonic excitation principle of self-excited synchronous motors, and the concept and principle of magnetic flux adjustment in parallel dual-rotor synchronous motors are introduced at this paper. Based on these principles, a new type of hybrid self-excited motor is designed, expanding the operating ranges of permanent magnet synchronous motors.

Subsequently, optimizations are conducted on key parameters that have a decisive impact on motor performance, specifically the width of the permanent magnet and the turn ratio between the harmonic winding and the excitation winding.

Finally, due to the low efficiency and high memory consumption of three-dimensional finite

element simulations, a two-dimensional finite

element simulation is conducted using Ansys Maxwell and Ansys Simplorer to analyze the motor's magnetic adjustment performance. Based on the designed prototype model, the simulation of magnetic adjustment performance is carried out to obtain parameter curves of back electromotive force and phase magnetic flux linkage under different magnetic adjustment states. The results demonstrate that the new parallel hybrid self-excited motor possesses good bidirectional magnetic adjustment capabilities, effectively enabling speed regulation.

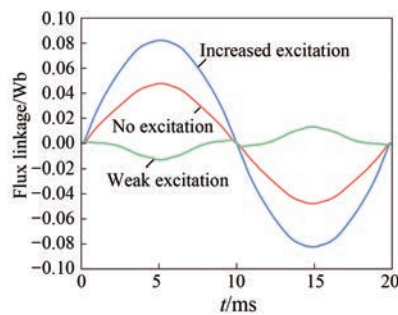


Fig. 1 The phase flux linkages in different excitation current directions at 500 r/min

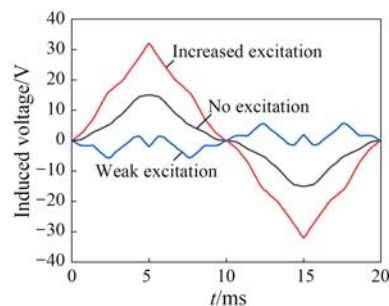


Fig. 2 The back electromotive force in different excitation current directions at 500 r/min