

# 新型转子定子电励磁无刷同步电机特性分析

蒋晓东, 代勇, 石征锦

(沈阳理工大学 自动化与电气工程学院, 沈阳 110159)

**摘要:** 针对极端环境下因永磁体失磁导致电机性能下降, 而不适宜采用永磁电机的情况, 提出一种新型转子结构的定子侧电励磁无刷同步电机(stator electrically excited brushless synchronous motor, SEEBSM)。分别阐述绕组分布、转子结构和运行系统, 设计一台额定功率为11 kW的样机, 给出了主要参数和励磁绕组接线图, 建立了电机二维物理模型, 采用有限元方法分别对其空载和负载(轻载和额定负载)运行时的电磁特性进行了分析, 研究结果表明所提出的新型转子结构能够改善起动性能, 且能省去由励磁控制器向励磁绕组提供小直流电流使转速牵入同步的过程, 可为后续样机的研制和实验研究提供参考。

**关键词:** 电励磁无刷同步电机; 新型转子结构; 电磁特性; 有限元

中图分类号: TM352

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.05.005

## Characteristic Analysis of Stator Electrically Excited Brushless Synchronous Motor with Novel Rotor

JIANG Xiaodong, DAI Yong, SHI Zhengjin

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that a permanent magnet motor is inapplicable for extreme environment because of its performance degradation due to the loss of permanent magnet excitation, a stator electrically excited brushless synchronous motor(SEEBSM) with novel rotor structure is proposed. The winding distribution, rotor structure, operation system are expounded respectively. A prototype with rated power of 11 kW is designed. The main parameters and exciting winding wiring diagram are described. A 2D physical model of SEEBSM is established. The electromagnetic characteristics under no-load and load(light load and rated load) are simulated by finite element method. The results show that the novel rotor structure can not only improve the starting performance, but also save the process of excitation controller providing a small DC current to the excitation winding to synchronize the speed, which provides a reference for the development and experimental research of the following prototype.

**Key words:** electrically excited brushless synchronous motor; novel rotor structure; electromagnetic characteristic; finite element

稀土永磁材料是我国重要战略资源之一, 利用其制成的永磁电机因具有结构简单、功率因数

和效率较高以及功率密度大等特点, 近些年在新能源发电<sup>[1]</sup>、电动汽车<sup>[2]</sup>以及机器人<sup>[3]</sup>等领域得

到了广泛应用。然而在某些极端环境(如高温、高湿度等)下,由稀土永磁材料制成的永磁体存在失磁风险,导致其电磁性能大幅度降低<sup>[4-5]</sup>,因此在某些特殊环境中不宜采用永磁电机。

电励磁电机相比于永磁电机,最大优势是可靠性高、磁性不受材料影响,可以在极端环境下使用<sup>[6]</sup>,然而缺点也很显著,常规电励磁电机一般包含电刷和滑环等结构,在运行过程中易产生电火花,不适合在易燃、易爆等环境下使用<sup>[7]</sup>。综上所述,研发和设计具有新型结构的无刷电励磁电机具有重要意义。

国内外专家学者针对电励磁电机进行了一系列研究。文献[8]提出了一种适用于极端环境的磁阻转子定子侧电励磁无刷同步电机,在阐明该电机运行机理的基础上,采用有限元方法对其特性进行了研究,结果表明启动时调节励磁绕组串接电阻可以改善电机启动性能,带载运行时调节励磁电流大小可以提高电机的带载能力;文献[9]在文献[8]基础上,分别研究了磁阻转子有无笼条以及笼条不同组合形式等对转速、带载能力以及结构温升的影响,结果表明磁阻转子带笼条结构可以大幅度提高运行性能,额定负载运行时温升虽然显著增大,但满足绝缘等级要求。文献[10-11]提出了一种混合式转子结构无刷电励磁电机,对其磁场调制机理、运行特性进行研究,得到励磁绕组极对数对磁场耦合能力影响规律。文献[12]提出了一种新型无刷电励磁同步电机,仿真研究得到了磁力线、磁密分布以及损耗等结果,通过实验研究验证了其理论分析的合理性。文献[13]分别对比分析了磁障转子和混合转子两种转子结构无刷电励磁电机的电磁性能,得出混合转子性能优于磁障转子性能的结论。文献[14]针对目前定子电励磁同步电机的研究进展进行了综述,系统阐述了定子电励磁同步电机的运行原理和结构。文献[15]针对无刷电励磁同步电机的损耗和温度场进行了研究,通过实验验证了研究结果的正确性。

本文在现有研究基础上,提出一种新型转子结构定子侧电励磁无刷同步电机(stator electrically excited brushless synchronous motor, SEEBSM),分别阐述了其绕组分布、转子结构以及运行系统,采用有限元方法分别对该电机在空载和负载(轻载和额定负载)运行时的电磁特性进行分析,研究成果可为后续样机的研制和实验提供参考依据。

## 1 结构和运行系统

SEEBSM 可采用与传统感应电机一致的定子结构,但其定子槽内绕组分布有所不同,即在现有三相对称绕组(电枢绕组)基础上,增加了一套单相励磁绕组,槽内绕组分布示意图如图1所示,SEEBSM 转子由磁阻叠片和笼条组成,笼条又分为公共笼条和短路笼条,沿圆周均匀放置于磁阻叠片导磁层之间的空隙中,其结构如图2所示。

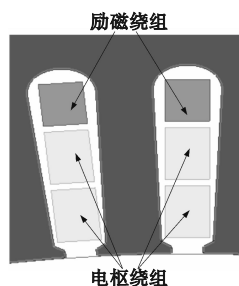


图1 定子槽内绕组分布示意图

Fig. 1 Stator slot winding distribution diagram

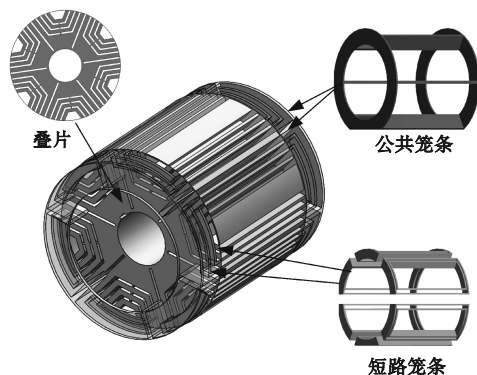


图2 转子结构

Fig. 2 Rotor structure

SEEBSM 运行系统如图3所示,其中电枢绕组与工频电网直接相连,励磁绕组与直流励磁控制器一侧连接,将其另一侧接入到电网中。励磁控制器的作用是将电网中的三相交流电流转换为单相直流电流。

SEEBSM 启动时,在励磁绕组中串入电阻,进入异步启动和运行阶段,当转速接近同步转速时,将串入电阻切除并切换到由励磁控制器供给励磁绕组直流电流方式,经一段时间后,SEEBSM 转速牵入到同步转速,异步和同步运行时运动方程如公式(1)所示。

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_{em} - T_1 \quad (1)$$

式中:  $T_l$  为负载转矩;  $T_{em}$  为电磁转矩;  $\omega_r$  为机械角速度;  $J$  为转动惯量。

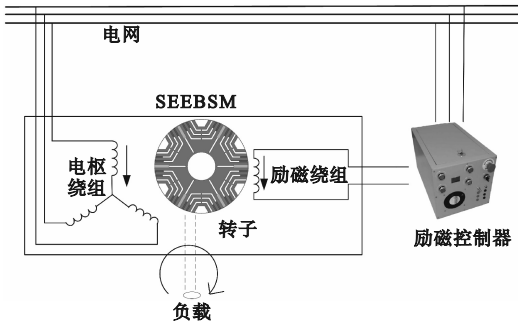


图 3 SEEBSM 运行系统

Fig. 3 SEEBSM operating system

## 2 磁场调制机理

新型转子结构 SEEBSM 气隙磁场密度  $B_g$  解析表达式为

$$B_g = (f_L + f_p) \lambda_g \quad (2)$$

式中:  $\lambda_g$  为忽略高次谐波的气隙比磁导;  $f_L$  和  $f_p$  分别为励磁绕组和电枢绕组磁动势。将公式(2)展开为

$$B_g = B_{p1(+)} + B_{p1(-)} + B_{L1(+)} + B_{L1(-)} + B_{p0} + B_{L0} \quad (3)$$

其中

$$B_{p1(\pm)} = 0.5 \lambda_1 F_p \cos[(p_p \pm p_r) \varphi - (\omega_p \pm p_r \omega_r) t \mp p_r \theta_0] \quad (4)$$

$$B_{L1(\pm)} = 0.5 \lambda_1 F_L \cos[(p_L \pm p_r) \varphi \mp p_r \omega_r t \mp p_r \theta_0 - \theta_1] \quad (5)$$

$$B_{p0} = \lambda_0 F_p \cos(p_p \varphi - \omega_p t) \quad (6)$$

$$B_{L0} = \lambda_0 F_L \cos(p_L \varphi - \theta_1) \quad (7)$$

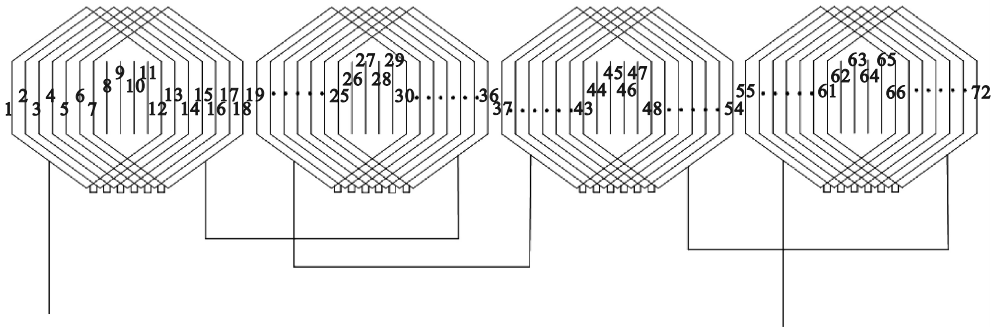


图 4 励磁绕组接线方式

Fig. 4 Excitation winding wiring mode

采用有限元方法对其空载运行时的电磁特性进行分析。转速和转矩随时间变化曲线分别如图

式中:  $F_p$  为电枢绕组磁动势幅值;  $F_L$  为励磁绕组磁动势幅值;  $\lambda_1$  为基波磁导幅值;  $\lambda_0$  为气隙磁导平均分量;  $p_p$  为电枢绕组极对数;  $p_L$  为励磁绕组极对数;  $p_r$  为转子等效极对数;  $\theta_0$  为电枢绕组合成磁动势轴线与转子参考轴的夹角;  $\theta_1$  为励磁绕组和电枢绕组合成磁动势的夹角;  $\omega_r$  为转子机械角速度;  $\omega_p$  为电角频率。  $\omega_r$  与  $\omega_p$  的关系如公式(8)所示。

$$\omega_p = \omega_r p_r \quad (8)$$

由式(4)~(7)可知,通过新型转子对磁场的调制后,SEEBSM 气隙中存在 6 种不同极对数和转速的磁场,其中  $B_{L1(\pm)}$  和  $B_{p0}$  在绕组中产生的电动势频率与电流频率一致,输出稳定电磁转矩。

## 3 电磁特性分析

### 3.1 空载特性

针对本文所提出的新型转子结构 SEEBSM,设计了一台额定功率为 11 kW、额定转速为 500 r/min 的样机,主要参数如表 1 所示,励磁绕组接线方式如图 4 所示,其中并联支路数为 1,有限元分析二维物理模型如图 5 所示。

表 1 主要参数

Table 1 Major parameters

参数	数值	参数	数值
定子外径/mm	400	铁心长/mm	225
定子内径/mm	285	同步转速/(r·min <sup>-1</sup> )	500
转子外径/mm	284	电枢绕组极数	8
转子内径/mm	85	励磁绕组极数	4
定子槽数	72	额定功率/kW	11

6 和图 7 所示。

观察图 6 可知,在 0~1 s 内,转速逐渐升高,

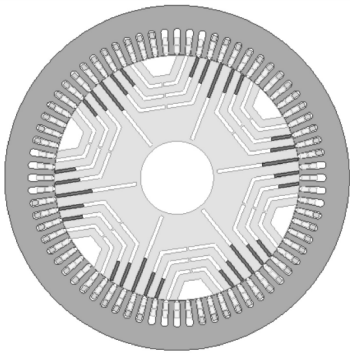


图5 二维物理模型

Fig. 5 2D physical model

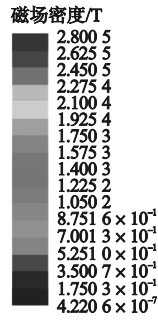


图8 空载磁场密度分布

Fig. 8 Magnetic density distribution at no-load

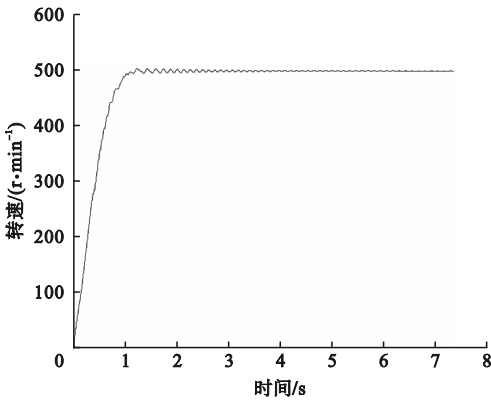


图6 空载转速随时间变化曲线

Fig. 6 Speed curve with time at no-load

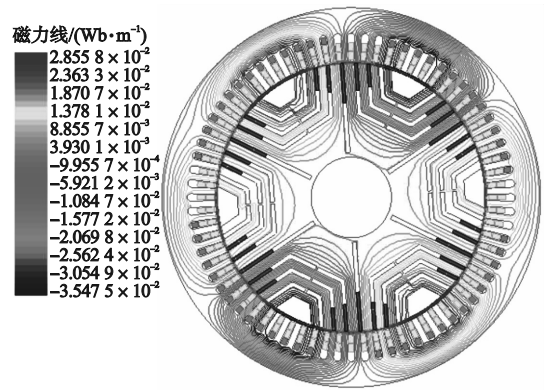


图9 空载磁力线分布

Fig. 9 Magnetic field lines distribution at no-load

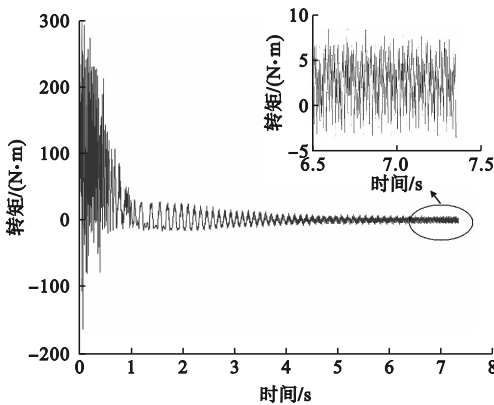


图7 空载转矩随时间变化曲线

Fig. 7 Torque curve with time at no-load

临近1 s时,已接近同步转速,表明新型转子结构SEEBSM具有较强的起动能力,随后转速经过一定波动,逐渐稳定于同步转速。

由图7可知,起动瞬间转矩激增,峰值约为291 N·m,随后转矩随时间逐渐下降,在6.4 s之后,转矩基本稳定在3.7 N·m左右,并伴随有小幅度波动。当转速稳定时,SEEBSM磁场密度和磁力线分别如图8和图9所示。

观察图8和9可知,SEEBSM等效极对数为6极,满足磁场调制电机极数“和调制”原则<sup>[16]</sup>,最大磁密的位置在转子导磁层之间连接筋处,磁密整体分布合理,漏磁较少。空载气隙磁密沿圆周分布情况和谐波分析结果分别如图10和图11所示。

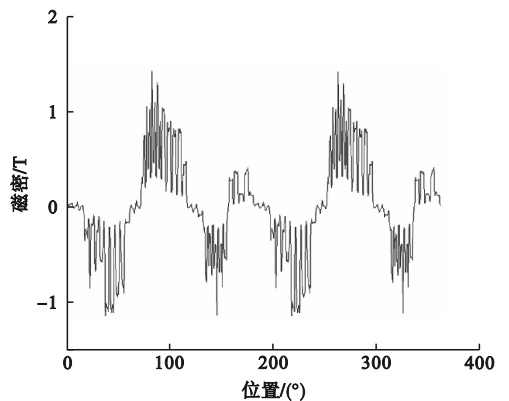


图10 空载气隙磁密分布

Fig. 10 Air gap magnetic density distribution at no-load

由图10和图11可知,气隙磁密主要包含2次谐波和4次谐波,2次谐波由励磁绕组产生,4

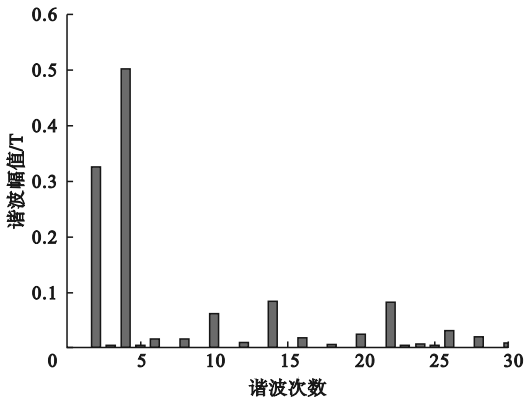


图 11 谐波分析

Fig. 11 Harmonic analysis

次谐波由电枢绕组产生,幅值分别为 0.32 T 和 0.502 T,其余谐波均较小。

### 3.2 负载特性

#### 1) 轻载运行

当 SEEBSM 稳定运行于同步转速时,突加 50 N·m 负载(轻载),其转速、转矩随时间变化曲线以及励磁绕组中电流随时间变化曲线如图 12 ~ 14 所示。

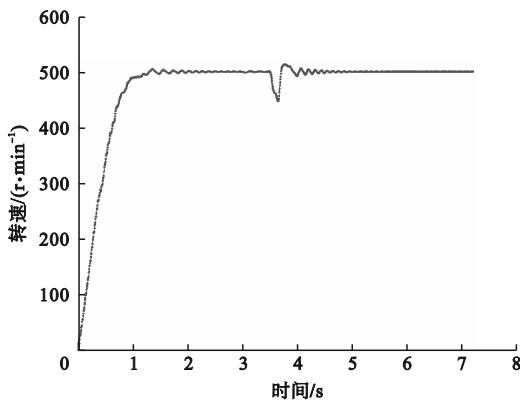


图 12 轻载时转速随时间变化曲线

Fig. 12 Speed curve with time at light load

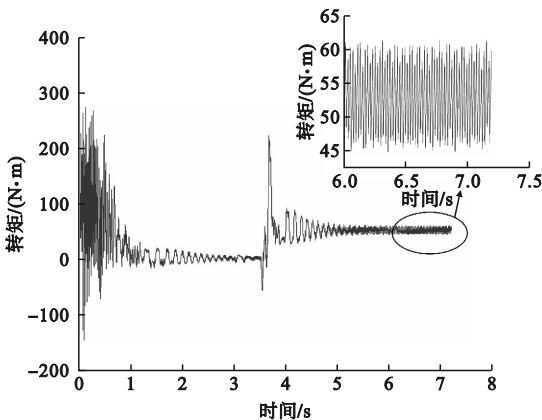


图 13 轻载时转矩随时间变化曲线

Fig. 13 Torque curve with time at light load

观察图 12 可知:在 0 ~ 3 s 内,SEEBSM 处于异步起动和运行阶段,转速随时间不断增加;在 3 ~ 3.5 s 之间,SEEBSM 处于同步运行阶段,转速逐渐稳定在同步转速;在 3.5 s 时,SEEBSM 突加 50 N·m 负载(轻载),转速由同步转速开始下降;到 3.64 s 时,转速下降至最低点,最低点转速为 447 r/min,下降幅度为 10.6%;随后转速逐渐升高,经过一段时间波动,在 5.27 s 以后逐渐稳定在同步转速。

观察图 13 可知:在 3.5 s 之前,SEEBSM 转矩为空载转矩,约为 3.7 N·m;在 3.5 s 时突加 50 N·m 负载,转矩瞬间激增;3.67 s 时达到峰值 215.8 N·m;随后经过一段时间波动,最终稳定在 53.7 N·m 左右。轻载时励磁绕组中电流随时间变化曲线如图 14 所示。

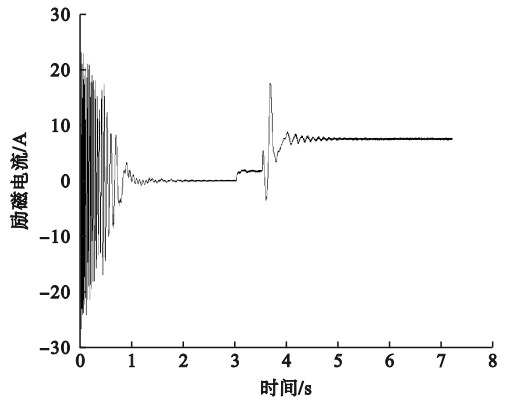


图 14 轻载时励磁绕组电流随时间变化曲线

Fig. 14 Excitation winding current curve with time at light load

观察图 14 可知,在 0 ~ 3 s 内,SEEBSM 处于异步起动和运行阶段,临近 3 s 时,励磁绕组中电流几乎为 0;在 3 ~ 3.5 s 之间,处于牵入同步阶段,励磁绕组中存在少量励磁电流,其值约为 1.8 A。在 3.5 s 时,突加 50 N·m 负载,励磁电流瞬间增大,随时间最终稳定在 7.5 A 左右。

#### 2) 额定负载运行

当 SEEBSM 稳定运行于同步转速时,突加 210 N·m 的额定负载,其转速、转矩随时间变化曲线以及励磁绕组中电流随时间变化曲线如图 15 ~ 17 所示。

观察图 15 可知:在 3 s 时,由于向励磁绕组中通入直流电流,转速由同步转速开始略有小幅度下降;在 3.5 s 时,由于突加额定负载,转速明显降低;到 3.54 s 时转速下降至最低点,最低点转速为 409 r/min,下降幅度为 18.2%;随后转速逐渐升

高,经过一段时间波动,在6 s以后转速基本稳定于同步转速。

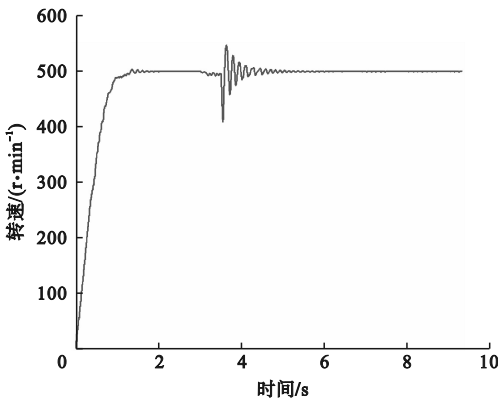


图 15 额定负载时转速随时间变化曲线

Fig. 15 Speed curve with time at rated load

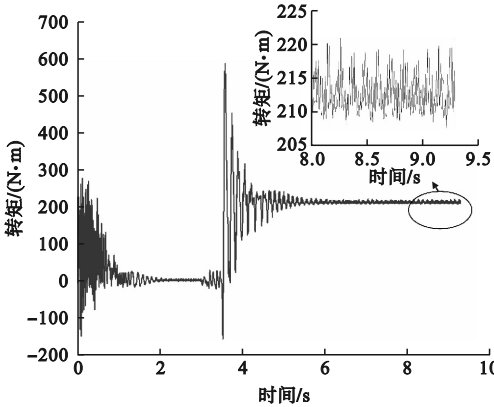


图 16 额定负载时转矩随时间变化曲线

Fig. 16 Torque curve with time at rated load

观察图 16 可知:在 3 s 之前,转矩随时间变化曲线走势与图 13 基本一致;在 3 ~ 3.5 s 之间,转矩波动较为明显;在 3.5 s 时,突加额定负载,转矩瞬间增大;3.57 s 时刻达到峰值 586.4 N·m;经过一段时间波动,最终稳定在 213.7 N·m 左右。励磁绕组中电流随时间变化曲线如图 17 所示。

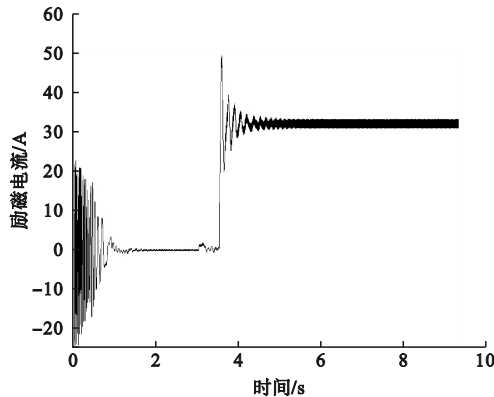


图 17 额定负载时励磁绕组电流随时间变化曲线

Fig. 17 Excitation winding current curve with time at rated load

观察图 17 可知:在 0 ~ 3 s 内,励磁绕组中电流随时间变化与图 14 基本一致;在 3 ~ 3.5 s 之间,励磁绕组中存在少量电流,其值在 1 A 以下;在 3.5 s 时,突加额定负载,励磁电流显著增大,峰值可达 41.8 A,2 s 以后,最终稳定在 32.5 A 附近,并伴有小幅波动。SEEBSM 额定负载运行时的磁场密度分布如图 18 所示。

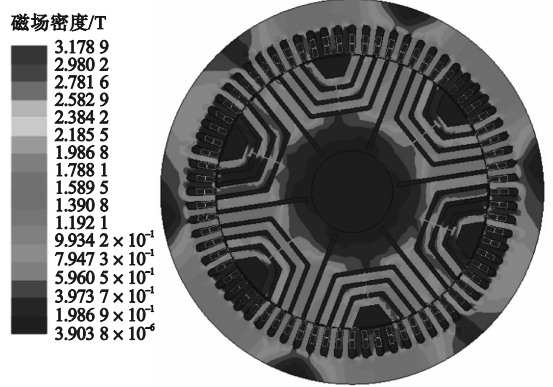


图 18 额定负载磁场密度分布

Fig. 18 Magnetic density distribution at rated load

观察图 18 可知,额定负载运行时定转子磁密最大值在 1.78 ~ 1.98 T 之间,部分转子导磁层的连接筋处存在饱和现象,磁密约为 2 T,由此可知硅钢片材料得到了充分利用。额定负载下气隙磁密沿圆周分布情况和谐波分析结果分别如图 19 和图 20 所示。

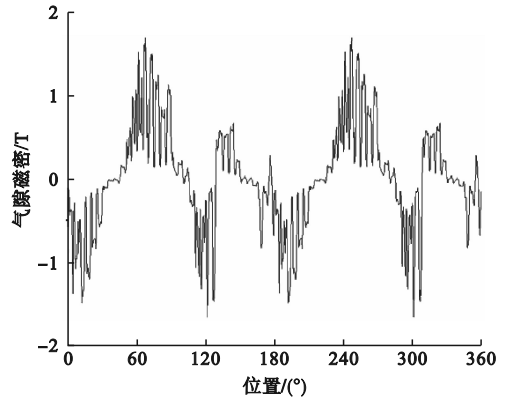


图 19 额定负载气隙磁密分布

Fig. 19 Air gap magnetic density distribution at rated load

观察图 19 和图 20 可知,电枢绕组产生 4 次谐波幅值为 0.545 T,励磁绕组产生 2 次谐波幅值为 0.436 T,相比于空载气隙磁密分别增大了 8.6% 和 36.3%。励磁绕组产生的磁密幅值明显增大,这是因为突加额定负载以后,励磁绕组中电流显著增大,导致磁场增强的缘故;另外额定负载

运行时气隙中其他高次谐波幅值也略有增大。

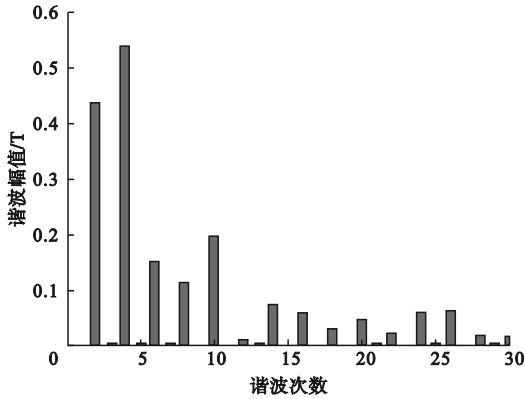


图 20 谐波分析  
Fig. 20 Harmonic analysis

## 4 讨论与分析

由图 6 可知,SEEBSM 空载转速最终稳定在同步转速,表明了采用本文所提出的新型转子结构的 SEEBSM 在起动后较短时间内可以直接进入同步运行阶段,省去了由励磁控制器向励磁绕组提供小电流再使其由异步运行进入同步运行的过程。

当空载转速稳定于同步转速时,直接分别施加  $50 \text{ N}\cdot\text{m}$  和  $210 \text{ N}\cdot\text{m}$  负载,在保证向励磁绕组中通入励磁电流大小与 2.2 中对应相同负载励磁电流大小不变的情况下,转速随时间变化曲线如图 21 所示。

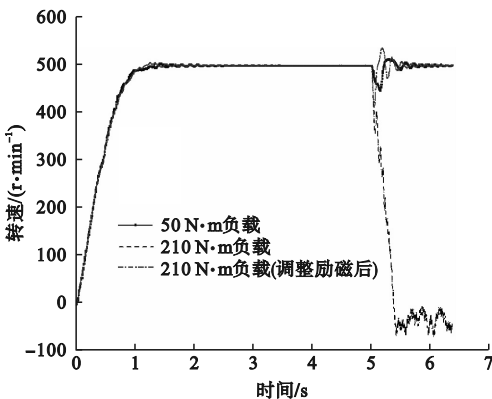


图 21 不同负载下转速随时间变化曲线

Fig. 21 Speed curve with time at different loads

观察图 21 可知,在  $0 \sim 5 \text{ s}$  内,转速随时间变化基本一致。在  $5 \text{ s}$  时刻突加负载,在保证励磁电流不变情况下,加载  $50 \text{ N}\cdot\text{m}$  负载的曲线转速最终仍然会稳定在同步转速;而加载  $210 \text{ N}\cdot\text{m}$  额定负载的曲线转速却出现了失步,转速急剧下降,但再调

整励磁电流大小后,最终也会稳定在同步转速。

上述研究结果表明,采用本文提出的新型转子结构的 SEEBSM 在带载运行前,不再需要先由励磁控制器向励磁绕组提供小电流使转速牵入到同步转速。

## 5 结论

本文针对 SEEBSM 提出了一种新型转子结构,阐述了其绕组、转子结构以及运行系统,对其空载和负载的运行特性进行了研究,得出如下结论:

1) 针对 SEEBSM 所提出的新型转子结构可以提高电枢绕组和励磁绕组的磁场耦合能力,使得电机起动性能较好;

2) 空载运行时 SEEBSM 的转速最终会稳定在同步转速,因此可直接省去由励磁控制器向励磁绕组提供直流电使其转速牵入同步的过程;且省去牵入同步过程并不影响该电机负载运行时的带载能力;

3) 负载(轻载,额定负载)运行时,如果出现了转速的失步,可以调整励磁电流大小,使得转速重新恢复到同步转速。

本文不仅为 SEEBSM 提供了一种新的转子拓扑结构,而且得到 SEEBSM“起动后转速稳定时可以直接加载,不再需要牵入同步过程”的重要结论,研究内容为后续研制样机以及实验提供了重要的参考依据。

### 参考文献 (References):

- [1] 刘冠芳,李丹,郑瑞娟,等. 永磁同步风力发电机定子绕组电压分布特性研究[J]. 绝缘材料,2022,55(6):84-87.  
LIU G F, LI D, ZHENG R J, et al. Research on voltage distribution characteristics in stator windings of permanent magnet synchronous wind generator[J]. Insulating Materials, 2022, 55(6):84-87. (in Chinese)
- [2] 王道涵,彭晨,王秀和. 电动汽车高性能永磁电机转矩脉动与电磁振动抑制方法研究[J]. 电气工程学报,2021,16(4):42-50.  
WANG D H, PENG C, WANG X H. Research on different design approaches to mitigate torque ripple and electromagnetic vibration for high-performance electric vehicle traction machine[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(4):42-50. (in Chinese)
- [3] 李荣,许晶波,孙贤备,等. 机器人关节用双定子永磁同步电机设计[J]. 微特电机,2021,49(11):14-18,24.  
LI R, XU J B, SUN X B, et al. Design of double stator permanent magnet synchronous motor for robot joint [J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(11):14-18,24. (in Chinese)