DOI:10.12177/emca.2024.151 文章编号:1673-6540(2025)01-0074-10 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

变频器时间谐波电流对永磁屏蔽电机性能影响分析

池 磊*, 李 明, 王 蓉
(渤海大学 控制科学与工程学院,辽宁 锦州 121000)

Analysis of the Influence of Inverter Time Harmonic Current on the Performance of Permanent Magnet Shielded Motors

CHI Lei*, LI Ming, WANG Rong
(College of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China)

Abstract: **[Objective]** Permanent magnet shielded motors are widely used in fields that require high sealing and stability. These motors are typically powered by inverters, but the time harmonic currents generated by the inverter can lead to a deterioration in motor performance. Therefore, an in-depth study of the impact of time harmonic current on motor performance is essential for optimizing motor design and ensuring stable operation when powered by inverters. **[Methods]** A finite element method was employed to model a permanent magnet shielded motor with a rated power of 1.5 kW and a rated speed of 9 000 r/min. This study compared and analyzed the eddy current losses in the permanent magnets, shielded sleeve losses, torque characteristics, efficiency, and power factor of the motor under excitation from 5th and 7th order time harmonic currents with different amplitudes. Different materials for the shielded sleeve were also considered. **[Results]** Simulation results showed that the injection of harmonic excitation significantly affected the motor losses. As the harmonics order and amplitude increased, both the eddy current losses in the permanent magnets and the losses in the shielded sleeve showed an upward trend. Notably, when using SUS430 shielded sleeves, the increase in eddy current losses was the largest due to its higher electrical conductivity and magnetic permeability. The harmonic current had little effect on the average torque, but the torque fluctuation grew significantly with increasing harmonic order and amplitude. The SUS430 material, due to its high magnetic permeability, effectively reduced the magnetic resistance in the magnetic circuit, thereby minimizing torque fluctuation. The power factor of the motor showed minimal variation, while the efficiency gradually decreased as the harmonic amplitude increased. **[Conclusion]** This study reveals the effects of time harmonic currents caused by inverter power supplies on the performance of permanent magnet shielded motors, including increased eddy current losses in the permanent magnets and shielded sleeve, greater torque fluctuation, and reduced efficiency. It not only provides theoretical basis for optimizing the design of permanent magnet shielded motors and for harmonic suppression, but also offers valuable insights into improving the performance and reliability of permanent magnet shielded motors in practical applications.

Key words: permanent magnet shielded motor; time harmonic current; finite element method; motor performance

摘 要:**【目的】**永磁屏蔽电机被广泛应用于对密封性和稳定性要求较高的领域,通常采用变频器给电机供电,而变频器供电时产生的时间谐波电流会导致电机性能恶化。因此深入研究时间谐波电流对电机性能的影响,对于优化电机设计、确保变频器供电时电机的稳定运行至关重要。**【方法】**基于有限元法进行建模,以一台额定功率 1.5 kW、额定转速 9 000 r/min 的永磁屏蔽电机为研究对象。对比分析了 SUS304、SUS316 和 SUS430 三种屏蔽套材料的永磁屏蔽电机在不同幅值的 5 次、7 次时间谐波电流激励下的永磁体涡流损耗、屏蔽套损耗、转矩特性、效率以及功率因数。**【结果】**仿真结果表明:谐波激励的注入显著影响了电机损耗;随着谐波次数和谐波幅值的增加,永磁体涡流损耗和屏蔽套损耗均呈上升趋势,尤其是使用 SUS430 屏蔽套时,由于其较高的电导率和磁导率,导致涡流损耗增幅最大;谐波电流对平均转矩的影响

基金项目:辽宁省教育厅一般项目(LJ212410167024)
General Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJ212410167024)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

很小，但转矩波动随着谐波次数和谐波幅值的增加而显著变大，而 SUS430 材料因其较高的磁导率能够有效地降低磁路中的磁阻，从而转矩波动最小；电机的功率因数变化较小，而效率随谐波幅值增加逐渐下降。【结论】本研究揭示了变频器供电引起的时间谐波电流对永磁屏蔽电机性能的影响规律，包括永磁体涡流损耗和屏蔽套损耗的增加、转矩波动的增大以及效率的下降；不仅为永磁屏蔽电机优化设计和谐波抑制提供理论依据，还对提高永磁屏蔽电机在实际应用中的性能与可靠性具有重要的参考价值。

关键词：永磁屏蔽电机；时间谐波电流；有限元法；电机性能

0 引言

永磁屏蔽电机作为驱动密封屏蔽泵的核心动力源，以其体积小、噪声低、耐腐蚀、转速高、功率密度大和安全可靠等优势在工业领域脱颖而出[1-4]。相较于传统的永磁同步电机，永磁屏蔽电机的定子外侧和转子内侧分别装有圆筒状的屏蔽套，可以保护定子绕组和永磁体免受腐蚀，使得电机能够在恶劣环境下工作[5-7]。因此永磁屏蔽电机在核电、煤炭、化工及制药等高要求行业中展现出独特的优势。

现代工业技术的发展使得能源效率备受关注。使用变频器给电机供电不仅可以扩大调速范围、提高电机运行效率，还具有降低启动电流和噪音等优点[8-10]。然而由于逆变器的死区效应和管压降等非线性特性的影响使逆变器输出电流波形发生畸变，导致时间谐波电流的产生[11-13]。这些谐波成分会使电机损耗增加，引起局部过热，进而加速绝缘层老化，降低设备的使用寿命[14-15]。因此，深入准确地分析变频器供电时产生的谐波电流对电机损耗及效率的影响，对于优化电机性能和提升设备效率至关重要。这不仅有助于预防潜在的电机故障，还能确保电机在实际运行中达到更高的能效水平。

目前已有大量学者研究了变频器供电时产生的时间谐波电流对电机性能的影响，并取得了一定的成果。文献[16]分析了不同绕组形式下永磁同步电机受时间谐波电流的影响，发现高频时间谐波电流能够引起铁耗和永磁体涡流损耗的大幅度增加，对永磁体涡流损耗影响更大。文献[17]加入了谐波相位角对电机进行仿真，结果表明在考虑时间谐波电流相位角后仿真得到的定子铁心损耗与转子涡流损耗均有变化。文献[18]建立了考虑涡流反作用和各次时空谐波的高速永磁同步电机转子涡流损耗解析模型，通过该解析模型研究了不同变频器开关频率及气隙长度下，各次时空谐波在转子上产生的涡流损耗变化规律。文献[19]表明采用变频器供电时电机的转矩脉动、定转子铁心涡流损耗和永磁体涡流损耗比正弦波供电时分别增大 11%、72% 和 81%。文献[20]搭建了电机与空间矢量脉宽调制逆变器的场路联合仿真模型，求解样机在恒转矩和恒功率调速时损耗的谐波特性，得出了定转子谐波损耗的来源。文献[21]搭建了 Simulink 和 Ansys EM 联合仿真模型，发现谐波电流随载波频率和载波比的增加而减小，在载波频率为 7 kHz 时电机效率最高。文献[22]研究发现电流谐波含量的增加会导致三相感应电机效率下降，且随着谐波次数的增高和气隙宽度的增加，这种效率降低的趋势更加明显。文献[23]利用场路耦合分析法研究了谐波电流对屏蔽感应电机的影响，得到了不同负载下电机的电磁场、涡流损耗和温度场分布，认为时间谐波电流显著增加了屏蔽感应电机的损耗。

然而，现有文献在分析变频器供电对电机性能的影响时，主要集中在损耗和效率计算方法的研究上，并未进一步揭示时间谐波电流对电机性能的具体影响。

因此，本文通过有限元法深入分析了时间谐波电流对永磁屏蔽电机损耗、转矩特性及效率的影响。本研究不仅为谐波抑制与电机优化设计提供了理论依据，还对提高永磁屏蔽电机在实际应用中的性能与可靠性具有重要的参考价值。

1 电机参数和有限元模型

本文以一台额定功率 1.5 kW、额定转速 9 000 r/min 的 9 槽 6 极永磁屏蔽电机为研究对象，其主要参数如表 1 所示。根据电机参数，建立了该电机的二维瞬态场有限元模型，如图 1 所示。在有限元模型中网格划分总数为 10 500，模型的残值设置为 0.000 1。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

表 1　永磁屏蔽电机参数

Tab. 1　Parameters of permanent magnet shielded motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
极数	6
定子屏蔽套厚度/mm	0.5
转子屏蔽套厚度/mm	0.5
定子外径/mm	107
转子外径/mm	49.5
额定频率/Hz	450

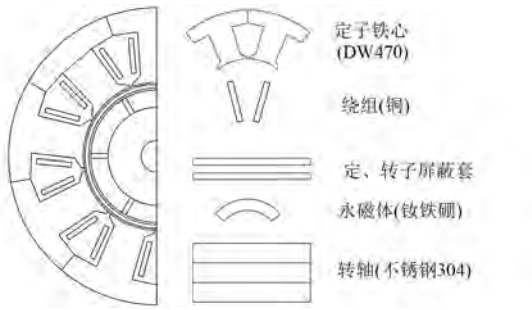

图 1　电机有限元模型

Fig. 1　Finite element model of the motor

在进行电磁场分析时,为了降低电磁计算的复杂度,提出以下假设:

(1) 永磁屏蔽电机材料为各向同性;

(2) 忽略电机的端部效应,向量磁位只有 Z 轴分量;

(3) 除了定子铁心和转子磁轭外,材料的磁导率和电导率都恒定;

(4) 温度对材料电导率和磁导率的影响忽略不计。

基于所提假设和电磁场分析理论,在直角坐标系下,电磁场求解方程为[24]

$$\begin{cases}\int\left[\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{1}{\mu}\dfrac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{1}{\mu}\dfrac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial y}\right)\right]=-\boldsymbol{J}_z+\sigma\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}\\ \Gamma_1:\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}_0\\ \Gamma_2:\dfrac{1}{\mu}\dfrac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial n}\Big|_{l^-}-\dfrac{1}{\mu}\dfrac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial x}\Big|_{l^+}=\boldsymbol{J}_s\end{cases} \tag{1}$$

式中:μ 为相对磁导率;$\boldsymbol{A}$ 为矢量磁势;$\boldsymbol{A}_0$ 为初始矢量磁势;σ 为永磁体电导率;$\boldsymbol{J}_z$ 为电密在 Z 轴方向上的分量;n 为永磁体边界的法向;$\boldsymbol{J}_s$ 为永磁体等效面电流密度;t 为时间;l 为永磁材料和其他材料的等效表面电流层之间的边界;Γ_1 为第一类边界;Γ_2 为第二类边界。

在永磁屏蔽电机二维电磁场的数值计算中,采用等效面电流对永磁体进行模拟,等效面电流可以用面电流密度 $\boldsymbol{J}_s$ 表示:

$$\boldsymbol{J}_s=\frac{\boldsymbol{M}_r\times n}{\mu_r} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{M}_r$ 为剩磁;μ_r 为相对磁导率。

2　损耗计算

2.1　铜耗

电机铜耗指当定子绕组通入电流时发生的能量损失。在 m 相绕组中,通过电流 I 时的铜耗为[25]

$$P_{Cu}=mI^2R \tag{3}$$

式中:I 为绕组相电流的有效值;R 为每相绕阻的有效电阻值,其表达式为

$$R=k_R\frac{Nl_{av}}{\sigma_{Cu}S_c} \tag{4}$$

式中:k_R 为电阻系数;N 为匝数;l_{av} 为单匝线圈平均长度;S_c 为导体截面积;σ_{Cu} 为绕组电导率。

2.2　永磁体涡流损耗

永磁体涡流损耗是指当电机的外磁场发生变化时,由于永磁体自身电导率较高,在其内部会感应出涡流而产生的能量损失。永磁体涡流损耗表达式为[26]

$$P_{PM}=\frac{1}{\sigma_{PM}}\int_{vol}\frac{J^2}{2}\mathrm{d}V \tag{6}$$

式中:J 为永磁体涡流密度;σ_{PM} 为永磁体电导率;vol 为永磁体体积。

2.3　屏蔽套损耗

永磁屏蔽电机气隙中的磁场是交变的,屏蔽套作为一个圆筒状的整体金属部件,在交变的磁场作用下会感应出涡流,这些涡流在屏蔽套内流动时会因为电阻而转化为热能,从而导致能量损失。在有限元计算中,常见的屏蔽套损耗计算式为[27]

$$P=\sum_i^M V_iE_i=\frac{c}{2\pi^2}Nf^2\sum_{i=1}^{M}\left[V_i\sum_{k=1}^{N}(B_{i-k+1}-B_{i-k})^2\right] \tag{7}$$

式中:V_i 为第 i 个网格单元的体积;M 为网格单元的总个数;N 为每个时间段的步数;B 为磁通密度;f 为交变磁场频率;E_i 为第 i 个网格单元的损耗密度,其表达式为

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$$E_i = \frac{c}{2\pi^2} \cdot \frac{1}{T \cdot \Delta t} \sum_{k=1}^{N} (B_{i_k+1} - B_{i_k})^2 \quad (8)$$

式中：c 为施泰尼茨系数；T 为时间周期；Δt 为离散的第 k 步与第 k+1 步的时间间隔。

3 时间谐波电流对永磁屏蔽电机性能的影响

由于变频器供电时产生的时间谐波电流主要以 5 次、7 次谐波为主[28-29]，因此本文在分析变频器供电时产生的时间谐波电流对永磁屏蔽电机性能的影响时主要考虑 5 次、7 次谐波。5 次、7 次时间谐波电流幅值约占基波电流幅值的 5% ~ 10%[30]，因此在采用有限元模型分析时，激励设置如表 2 所示。此外，采用总谐波失真（Total Harmonic Distortion，THD）反映叠加谐波后的电流波形与正弦波形的差异程度，其表达式为

$$I_{\mathrm{THD}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \quad (9)$$

式中：I_n 为第 n 次谐波电流有效值；I_1 为基波电流有效值。

表 2 激励设置

Tab. 2 Excitation settings

激励类型	I_{THD}	Case
基波	0	1
基波+5% 基波幅值的 5 次谐波	5%	2
基波+10% 基波幅值的 5 次谐波	10%	3
基波+5% 基波幅值的 7 次谐波	5%	4
基波+10% 基波幅值的 7 次谐波	10%	5

为深入分析时间谐波电流幅值和次数对电机性能的影响，以电机额定工况为例，选取不锈钢 SUS304、SUS316 和 SUS430 三种常见的屏蔽套材料进行计算和对比。三种材料的物理特性参数如表 3 所示。

表 3 屏蔽套材料部分物理特性

Tab. 3 Physical properties of shielded sleeve materials

参数名称	参数值		
	SUS304	SUS316	SUS430
电导率/（$\mathrm{S \cdot m^{-1}}$）	1.43×10^6	1.37×10^6	1.67×10^6
磁导率/（$\mathrm{H \cdot m^{-1}}$）	1.008	1.008	600~1 100

在保证电机额定转矩不变的情况下，不同屏蔽套材料的电机额定电流如图 2 所示。

以额定电流为基波电流，参考表 2 中的激励设置，分析变频器供电时产生的时间谐波电流对永磁屏蔽电机性能的影响。不同激励下电机的转速和仿真步长等设置一致且不考虑谐波相位角对仿真结果的影响。

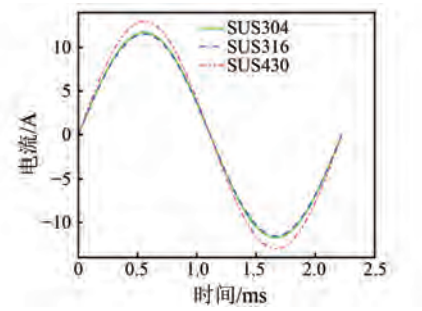

图 2 不同屏蔽套材料的电机额定电流

Fig. 2 Rated current of motor with different shielded sleeve materials

3.1 时间谐波电流对电机损耗影响

通过有限元仿真得到了不同激励条件下永磁屏蔽电机的永磁体涡流损耗，结果如表 4 所示。

表 4 时间谐波电流对永磁体涡流损耗的影响

Tab. 4 Effect of time harmonic current on eddy current losses in permanent magnets

屏蔽套材料	永磁体涡流损耗/W				
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
SUS304	3.84	4.17	5.09	4.27	5.56
SUS316	3.73	4.05	4.94	4.15	5.40
SUS430	1.36	1.69	2.66	1.78	2.69

由表 4 可知，当屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 以及 SUS430 时，在 Case2 和 Case3 激励下，永磁体的涡流损耗相较于 Case1 激励分别增加了 8.59% 和 32.55%、8.58% 和 32.44% 以及 24.26% 和 95.59%。可见，对于同一种屏蔽套材料，在相同谐波次数下，随着谐波幅值的增加，永磁体涡流损耗也逐渐增大。这是因为永磁体涡流损耗与磁通密度的平方成正比，谐波幅值的增加会导致永磁体内的磁通密度增大，涡流损耗随之增加。

当屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 以及 SUS430 时，在 Case2 和 Case4 激励下，永磁体的涡流损耗相较于 Case1 激励分别增加了 8.59% 和 11.20%、8.58% 和 11.26% 以及 24.26% 和 30.88%。可见，对于同一种屏蔽套材料，在相同谐波幅值下，随着谐波次数的增加，永磁体涡流损耗逐渐增

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

大。这是因为永磁体涡流损耗与频率的平方成正比,高频谐波会显著增加损耗,导致屏蔽套损耗逐渐增大。

通过有限元仿真得到了屏蔽套材料为SUS304时定、转子屏蔽套的涡流密度,结果如图3所示。

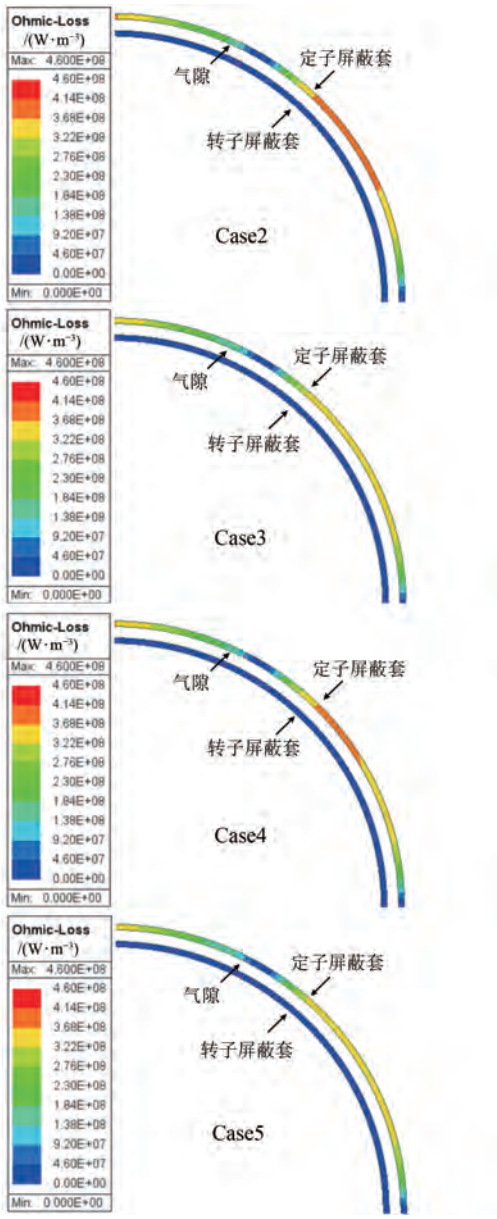

图3　时间谐波电流对屏蔽套涡流密度的影响

Fig. 3　Effect of time harmonic current on the eddy current density of shield sleeve

由图3可知,定子屏蔽套的涡流密度远大于转子屏蔽套的涡流密度。其主要原因是定子屏蔽套与旋转磁场之间存在相对运动,而转子屏蔽套与旋转磁场相对静止。此外,转子屏蔽套的涡流损耗主要由气隙磁通中的谐波分量引起,但这些谐波在转子屏蔽套中产生的涡流较小,因此其损耗较低。

基于有限元模型对电机的屏蔽套损耗进行了计算,结果如表5所示。

表5　时间谐波电流对屏蔽套损耗的影响

Tab. 5　Effect of time harmonic current on shield sleeve losses

屏蔽套材料		屏蔽套损耗/W				
		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
SUS304	定子	360.47	360.54	360.96	361.15	362.41
	转子	2.90	3.11	3.32	3.87	4.60
SUS316	定子	340.23	340.29	340.68	340.86	342.02
	转子	2.66	2.86	3.05	3.55	4.23
SUS430	定子	383.37	386.65	386.98	394.60	397.56
	转子	11.10	12.01	12.47	14.74	15.03

由表5可知,当屏蔽套材料为SUS304时,在Case2和Case4激励下,定、转子的屏蔽套损耗相较于Case1激励分别增加了0.02%、7.24%和0.14%、14.48%;当屏蔽套材料为SUS316时,在Case2和Case4激励下,定、转子的屏蔽套损耗相较于Case1激励分别增加了0.02%、7.52%和0.13%、14.66%;当屏蔽套材料为SUS430时;在Case2和Case4激励下,定、转子的屏蔽套损耗相较于Case1激励分别增加了0.86%、8.20%和0.94%、12.34%。可见,对于同一种屏蔽套材料,在相同谐波幅值下,随着谐波次数的增加,定、转子的屏蔽套损耗逐渐增大。这是由于屏蔽套损耗与频率的平方成正比。

同理,由Case2和Case3激励下的屏蔽套损耗对比结果可知,对于同一种屏蔽套材料,在相同谐波次数下,随着谐波幅值的增加,定、转子的屏蔽套损耗也逐渐增大。这是由于屏蔽套损耗与磁通密度的平方成正比。

进一步观察表5可知,当屏蔽套材料为SUS430时电机的屏蔽套损耗最高。这是因为SUS430的电导率和磁导率高于SUS304和SUS316,因此气隙磁密最大,感应电动势最大,电阻最小,屏蔽套涡流损耗最高。

3.2　时间谐波电流对电机转矩影响

本文通过对比不同屏蔽套材料的永磁屏蔽电机在不同谐波激励条件下的转矩和转矩波动,来

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

研究时间谐波电流对电机转矩的影响，结果如图 4 和图 5 所示。

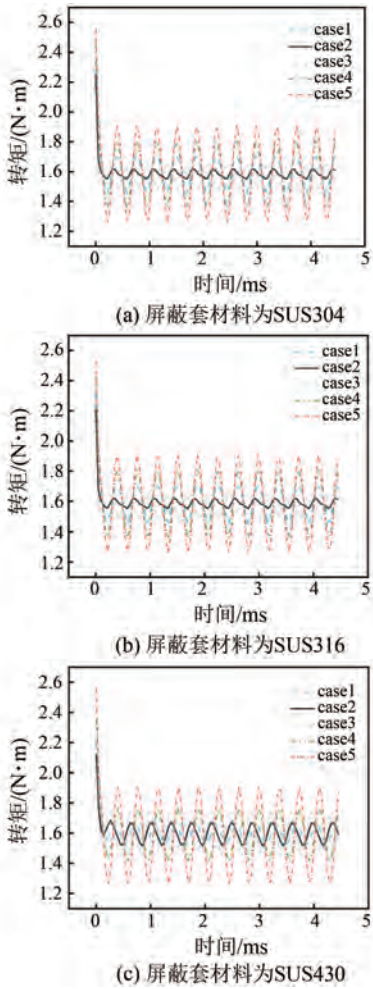

图 4　时间谐波电流对转矩影响

Fig. 4　Effect of time harmonic current on torque

由图 4 可知，谐波电流幅值及次数的变化对电机转矩的影响不大。转矩最大变化为 0.02 N·m，仅占平均转矩的 1.18%。

由图 5 可知，当屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 和 SUS430 时，Case2 激励下的转矩波动分别为 2.23%、2.16% 和 4.95%，Case3 激励下的转矩波动分别为 5.44%、5.32% 和 9.01%；Case4 激励下的转矩波动分别为 13.06%、12.91% 和 7.09%。对比 Case2 和 Case4 激励下的转矩波动可知，在相同谐波幅值下，电机的转矩波动会随着谐波次数的增加而增大。对比 Case2 激励和 Case3 激励下的转矩波动可知，在相同的谐波次数下，电机的转矩波动会随着谐波幅值的增加而变大。

此外，屏蔽套材料的磁导率和电导率对电机

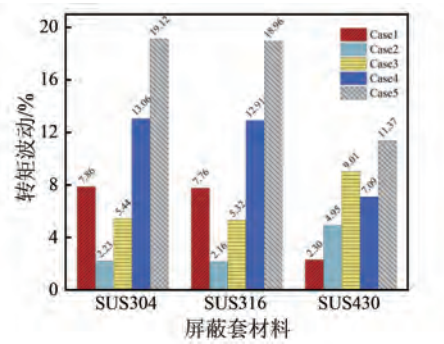

图 5　时间谐波电流对转矩波动的影响

Fig. 5　Effect of time harmonic current on torque fluctuation

转矩波动也有一定的影响。在 Case1 激励下，当屏蔽套材料为 SUS430 时，转矩波动最小，为 2.30%；屏蔽套材料为 SUS316 时转矩波动次之，为 7.76%；屏蔽套材料为 SUS304 时转矩波动最高，为 7.86%。这主要是因为 SUS430 的磁导率远高于 SUS316 和 SUS304，更高的磁导率能够有效降低磁路中的磁阻，从而减少转矩波动。SUS304 和 SUS316 的磁导率相近，但转矩波动相差 0.1%，这是由于其电导率存在差异。

3.3　时间谐波电流对电机效率和功率因数的影响

效率和功率因数是评估电机性能的两个关键指标。效率反映了电机内部能量转换的效果，而功率因数则表明了电流的有效利用程度。在工业应用中，电机并不总在额定工况下运行，但无论工况如何，都要求其保持较高的效率和功率因数。

因此，本文以屏蔽套材料为 SUS304 的永磁屏蔽电机为例，采用有限元法对其在半载和满载条件下的效率和功率因数进行了分析，旨在探究时间谐波电流对电机效率和功率因数的影响，仿真结果如表 6 所示。

表 6　时间谐波电流对效率和功率因数的影响

Tab. 6　Impact of time harmonic current on efficiency and power factor

负载率		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
50%	效率/%	53.65	53.49	53.29	53.57	53.42
	功率因数	0.981 4	0.978 0	0.978 1	0.978 3	0.978 2
100%	效率/%	67.31	67.19	67.00	67.22	67.02
	功率因数	0.945 1	0.941 5	0.942 2	0.941 5	0.941 7

从表 6 可以看出，负载率为 50% 时，Case2 激励下电机效率为 53.49%，而在 Case3 激励下效率降至 53.29%，相比 Case2 降低了 0.2%。在负载率

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

为 100% 时,Case3 激励下的电机效率比 Case2 降低了 1.9%。可见,在相同负载率和谐波次数下,随着谐波幅值的增加,电机效率逐渐下降,但功率因数变化不大。这是因为谐波幅值的增加导致电机损耗增大,致使电机效率降低。

4　试验验证

为了验证本文计算结果的准确性,根据参数制造了样机,并搭建了如图 6 所示的样机测试平台。

图 6　样机测试平台

Fig. 6　Prototype test platform

利用样机测试平台,采用反拖法对样机空载反电动势进行测定,测量结果与仿真结果对比如图 7 所示。

由图 7 可知,空载反电动势实测波形与仿真结果具有较好的一致性。实测样机空载反电动势有效值为 145.3 V,仿真计算值为 147.2 V,两者仅相差 1.31%。证明了有限元计算的有效性与准确性。

5　结语

本文以一台额定功率 1.5 kW、额定转速 9 000 r/min 的永磁屏蔽电机为研究对象,运用有限元法分析了不同屏蔽套材料、谐波次数及谐波幅值对电机永磁体涡流损耗、屏蔽套损耗、转矩、效率和功率因数的影响,得出以下结论。

(1) 电机在额定工况下运行时,随着谐波次数、谐波幅值的增加,电机的永磁体涡流损耗、屏蔽套损耗和转矩波动也都随之增大,但平均转矩变化不大。

(2) 在相同负载率和谐波次数下,随着谐波幅值的增加,电机效率逐渐下降,但功率因数变化不大。

(3) 导磁率更高的屏蔽套材料其转矩波动更小。

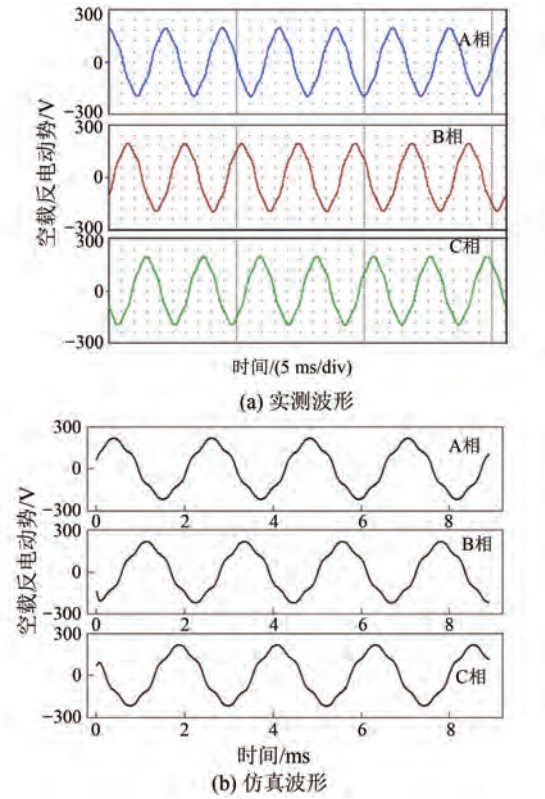

图 7　空载反电动势仿真与实测波形对比

Fig. 7　Comparison of no-load back EMF simulation and measured waveforms

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李明进行了方案设计,池磊进行了试验研究、内容总结与论文撰写,李明、王蓉参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Li Ming carried out the scheme design. Chi Lei carried out the experimental study, content summary and paper writing. Li Ming and Wang Rong participated in the review and modification of the paper. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参 考 文 献

[1] 于添昊, 李明, 伦淑娴. 屏蔽套材料对屏蔽式永

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

磁同步电机电磁场和温度场的影响研究[J]. 电机与控制应用，2024，51(4)：90-101.
YU T H，LI M，LUN S X. Study on the influence of can sleeve material on the electromagnetic field and temperature field of canned permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application，2024，51(4)：90-101.

[2] DU L X，LIU X P，FU J S，et al. Design and optimization of reverse salient permanent magnet synchronous motor based on controllable leakage flux [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems，2021，5(2)：163-173.

[3] 秦雪飞，沈建新，ROBERT N，等. 高速永磁同步电机在多物理场和变流器约束下的设计[J]. 电工技术学报，2022，37(7)：1618-1633.
QIN X F，SHEN J X，ROBERT N，et al. Design of high-speed PMSM considering multi-physics fields and power converter constraints [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37(7)：1618-1633.

[4] 穆海琦，周舒昊，于添昊，等. 真空泵用屏蔽式永磁同步电机电磁场-温度场互相迭代计算方法[J]. 电机与控制应用，2024，51(2)：113-122.
MU H Q，ZHOU S H，YU T H，et al. Electromagnetic field-temperature field iterative calculation method of canned permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application，2024，51(2)：113-122.

[5] 张宝. 永磁屏蔽电机温度场分析[J]. 防爆电机，2024，59(3)：51-54.
ZHANG B. Temperature field analysis of permanent magnet canned motors [J]. Explosion-proof Electric Machine，2024，59(3)：51-54.

[6] 张文校，胡岩，曹力，等. 高速永磁屏蔽电机摩擦损耗分析与计算[J]. 电工技术学报，2023，38(12)：3122-3129.
ZHANG W X，HU Y，CAO L，et al. Analysis and calculation of friction loss of high-speed permanent magnetic shielding motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2023，38(12)：3122-3129.

[7] XU R，SONG Y，GU X Y，et al. Research on the clearance flow between stator and rotor cans in canned motor RCP [J]. Annals of Nuclear Energy，2021，164：108583.

[8] 王天海，夏加宽，李思源，等. 变频器供电水下航行器永磁电机损耗分析及温度场仿真[J]. 船电技术，2022，42(9)：30-34.
WANG T H，XIA J K，LI S Y，et al. Loss analysis and temperature field simulation of permanent magnet motor of underwater vehicle with converter supply [J]. Marine Electric & Electronic Engineering，2022，42(9)：30-34.

[9] 张晓排，刘菲，刘忠臣，等. 变频供电对异步电机电磁噪声的影响[J]. 大连交通大学学报，2024，45(3)：68-73.
ZHANG X P，LIU F，LIU Z C，et al. Influence of frequency converter on electromagnetic noise radiated by asynchronous motor [J]. Journal of Dalian Jiaotong University，2024，45(3)：68-73.

[10] 杨顺吉，王天宝，炊军立，等. 基于场路耦合的永磁电机高频径向电磁力波分析[J]. 电机与控制应用，2023，50(2)：24-35.
YANG S J，WANG T B，CHUI J L，et al. High frequency radial electromagnetic force wave analysis of permanent magnet motor based on field-circuit coupling [J]. Electric Machines & Control Application，2023，50(2)：24-35.

[11] 刘文彬. 基于时间电流谐波抑制永磁电机附加谐波损耗的研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2023.
LIU W B. Research on suppression of additional harmonic loss of permanent magnet motor based on time current harmonics [D]. Shenyang：Shenyang University of Technology，2023.

[12] 陈瑶，张钊源，冯鑫鹏，等. 基于复合控制的永磁同步电机电流谐波抑制策略[J]. 电机与控制应用，2022，49(7)：30-37.
CHEN Y，ZHANG Z Y，FENG X P，et al. Suppression strategy of current harmonic in permanent magnet synchronous motor based on compound control [J]. Electric Machines & Control Application，2022，49(7)：30-37.

[13] 黄于丹，杨双，李国银，等. 基于参数辨识的IPMSM电流谐波自适应抑制方法研究[J]. 陕西科技大学学报，2024，42(3)：150-157.
HUANG Y D，YANG S，LI G Y，et al. Research on an adaptive current harmonic suppression method based on parameter identification for interior permanent magnet synchronous motors [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology，2024，42(3)：150-157.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

[14] QIU H B, UO Y D, YU W F, et al. Research on the influences of time harmonics on permanent magnet synchronous motors with hybrid magnet poles [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2019, 14: 1165-1172.

[15] 苏锦智, 张继鹏, 安群涛. 基于频率自适应复矢量 PI 控制器的 PMSM 电流谐波抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(12): 30-36.
SU J Z, ZHANG J P, AN Q T. Frequency adaptive complex vector PI controller based current harmonics suppression of PMSM drives [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(12): 30-36.

[16] 陈东锁, 陈彬, 肖勇, 等. 电流谐波对不同绕组形式永磁同步电机损耗研究[J]. 微特电机, 2021, 49(8): 12-15+20.
CHEN D S, CHEN B, XIAO Y, et al. Research on current harmonic effect on the loss of permanent magnet synchronous motor with different winding forms [J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(8): 12-15+20.

[17] 熊博文. 基于变频器 SVPWM 供电下的高速永磁同步电机铁耗仿真及分析[J]. 机电工程技术, 2022, 51(6): 162-167+271.
XIONG B W. Simulation and analysis of iron loss of high-speed permanent magnet synchronous motor based on inverter SVPWM power supply [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(6): 162-167+271.

[18] 佟文明, 侯明君, 孙鲁, 等. 基于精确子域模型的带护套转子高速永磁电机转子涡流损耗解析方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4047-4059.
TONG W M, HOU M J, SUN L, et al. Analytical method of rotor eddy current loss for high-speed surface-mounted permanent magnet motor with rotor retaining sleeve [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4047-4059.

[19] 于松建, 韦伟. 电流时间谐波对高速永磁同步潜油电动机性能影响研究[J]. 电气应用, 2023, 42(4): 11-17.
YU S J, WEI W. Study on the effect of current time harmonics for the performance of high speed permanent magnet synchronous submersible motor [J]. Electrotechnical Application, 2023, 42(4): 11-17.

[20] 陈浈斐, 邢宁, 李志新, 等. SVPWM 逆变器供电时 FSCW-PMSM 损耗特性研究[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 73-83.
CHEN Z F, XING N, LI Z X, et al. Loss characteristics investigation of FSCW-PMSM under SVPWM inverter supply [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 73-83.

[21] 周舒昊, 李明. 时间谐波对永磁屏蔽电机损耗及效率特性的影响分析[J]. 微电机, 2023, 56(9): 4-8+13.
ZHOU S H, LI M. Analysis of influence of time harmonic on loss and efficiency characteristic for canned permanent magnet motor [J]. Micromotor, 2023, 56(9): 4-8+13.

[22] 杨玺, 叶伟玲, 汤铭华, 等. 谐波影响下的三相感应电机效率研究[J]. 微特电机, 2020, 48(3): 29-32.
YANG X, YE W L, TANG M H, et al. Study on the efficiency of three-phase induction motor under harmonic influence [J]. Small & Special Electrical Machines, 2020, 48(3): 29-32.

[23] LI M, AN Y J, ZHANG Z H, et al. Effect of time harmonic current considering load condition on performance of canned induction motor [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2021, 66(3): 369-385.

[24] 张勇. 永磁同步电机多物理场及电磁参数优化研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2020.
ZHANG Y. Research on the multi-physics fields and electromagnetic parameters optimization of permanent magnet synchronous motor [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2020.

[25] 刘福贵, 张建宇, 赵志刚, 等. 盘式永磁同步电机永磁体涡流损耗研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7): 13-19.
LIU F G, ZHANG J Y, ZHAO Z G, et al. Study on eddy current loss of permanent magnet for disc permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(7): 13-19.

[26] 陈博, 王淑红. 基于场路耦合的永磁同步电机性能分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 45-50.
CHEN B, WANG S H. Field-circuit coupled performance analysis of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(3): 45-50.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

[27] 褚赛. 屏蔽式永磁电机的屏蔽套效应及涡流分析[D]. 徐州：中国矿业大学，2020.
CHU S. Analysis of can effect and eddy current of canned permanent magnet motor [D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2020.

[28] 谭又博，余小玲，臧英，等. 谐波电流对换流变压器绕组损耗及温度分布特性的影响[J]. 电工技术学报，2023，38(2)：542-553.
TAN Y B，YU X L，ZANG Y，et al. The influence of harmonic current on the loss and temperature distribution characteristics of a converter transformer winding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2023，38(2)：542-553.

[29] 陶顺，朱歆艺，陈慧琳，等. 并网逆变器死区耦合谐波源建模[J/OL]. 中国电机工程学报，2024-11-06. https://doi. org/10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 241845.
TAO S，ZHU X Y，CHEN H L，et al. Dead-time coupling harmonic source modeling of grid-connected inverter [J/OL]. Proceedings of the CSEE，2024-11-06. https://doi. org/10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 241845.

[30] 张士强，葛兴来，左运，等. 基于高阶扩展状态观测器的感应电机驱动系统逆变器死区效应在线补偿方法[J/OL]. 中国电机工程学报，2024-09-13. https://doi. org/10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 232656.
ZHANG S Q，GE X L，ZUO Y，et al. An inverter dead-time on-line compensation method for induction motor drive system based on high-order extended state observer [J/OL]. Proceedings of the CSEE，2024-09-13. https://doi. org/10. 13334/j. 0258-8013. pcsee. 232656.

收稿日期：2024-10-11
收到修改稿日期：2024-11-04

作者简介：
池磊(1999-)，男，硕士研究生，研究方向为永磁电机优化设计，13956284527@ 163. com；
* 通信作者：池磊(1999-)，男，硕士研究生，研究方向为永磁电机优化设计，13956284527@ 163. com。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4. 0 license.