

基于联合仿真的磨机直驱永磁同步电机设计与损耗分析

郝子璐, 程 祥*, 张炳义

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Design and Loss Analysis of Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Motor of Mill Based on Joint Simulation

HAO Zilu, CHENG Xiang*, ZHANG Bingyi

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to address the insufficient research on the loss characteristics of direct drive permanent magnet synchronous motor (PMSM) under inverter power supply conditions. [Methods] A field-circuit coupled joint simulation model was constructed by establishing a PMSM vector control system in Simplorer and combining it with a two-dimensional transient electromagnetic field finite element model of the motor in Maxwell. The iron core loss and permanent magnet eddy current loss characteristics of a direct drive PMSM for an industrial mill under inverter power supply were investigated. [Results] With other inverter parameters kept constant, only the carrier frequency was varied, the results showed that the 5th and 11th harmonic amplitudes in the PMSM air-gap magnetic flux density, as well as the permanent magnet eddy current loss, decreased as the carrier frequency increased. Simultaneously, the peak magnetic flux density in the stator and rotor cores decreased with the rising carrier frequency, and the simulated iron loss also exhibited a downward trend. [Conclusion] Comparative analysis indicates that when the carrier frequency exceeds 5 kHz, the sensitivity of loss to frequency variation decreases. Therefore, 5 kHz is selected as the optimal carrier frequency for the field inverter. The theoretically calculated system efficiency shows good consistency with the measured operational efficiency of the mill, thereby validating the accuracy of the established theoretical model and analysis method.

Key words: permanent magnet synchronous motor; inverter power supply; finite element model; joint simulation; carrier frequency

摘 要: [目的] 本文旨在解决直驱永磁同步电机

(PMSM)在变频器供电条件下损耗特性研究不足的问题。

【方法】基于 Simplorer 搭建 PMSM 矢量控制系统,结合 Maxwell 建立的电机二维瞬态电磁场有限元模型,搭建场路耦合联合仿真模型,探究了工业磨机直驱 PMSM 在变频器供电下的铁心损耗与永磁体涡流损耗特性。**【结果】**在保持变频器其他参数不变的情况下,仅改变载波频率,PMSM 气隙磁密中的 5 次和 11 次谐波幅值以及永磁体涡流损耗均随载波频率升高而降低;同时,定转子铁心磁密峰值随载波频率上升而减小,仿真所得铁耗亦呈现下降趋势。**【结论】**对比分析表明,当载波频率提升至 5 kHz 以上时,损耗对频率变化的敏感度下降。因此,选定 5 kHz 作为现场变频器的最佳载波频率。理论计算得到的系统效率与磨机现场实测运行效率具有良好一致性,从而验证了所建立理论模型与分析方法的准确性。

关键词: 永磁同步电机;变频器供电;有限元模型;联合仿真;载波频率

0 引言

球磨机作为磨矿作业的关键设备,是一种典型的低速重载研磨装置^[1]。随着高性能永磁材料的问世与应用,球磨机采用低速大转矩永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 直接驱动方案,相较于传统的异步电机加减速机构传动方式,其在节能性、运行稳定性及维护周期等方面展现出显著优势^[2-4]。变频器的快速发展显著拓展了电机的应用范围,其在提升电机效率、抑制起动电流以及降低运行噪声方面展现出显著优势^[5-7]。然而,受限于开关频率,变频器逆变器输出的电流波形中含有时间谐波分

量^[8-9]。过高的谐波含量可能导致电机温升加剧,甚至危及电机的运行稳定性^[10]。

现有研究多聚焦于理想正弦波供电下 PMSM 的性能分析。例如,文献[11]探讨了负载对损耗的影响,但未考虑电源谐波;文献[12]通过合成特定谐波间接研究其影响;文献[13-15]利用场路耦合验证了联合仿真与控制算法的可靠性,但未深入研究损耗问题;文献[16-19]则针对感应电机,建立了铁耗模型并分析了正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)供电下的损耗与温升。此外,多物理场耦合被广泛应用于谐波损耗及热效应研究,如文献[20-21]通过电磁-热耦合分析了 PMSM 在谐波下的温升与涡流损耗。

与上述研究相比,本文系统探究了载波频率对低速大转矩 PMSM 的永磁体涡流损耗与铁耗的影响规律,通过场路耦合联合仿真与试验,为工程中载波频率的优选提供依据。

针对应用于低速大转矩直驱领域的 PMSM,目前普遍采用变频器供电,然而相关损耗与性能研究大多基于理想正弦波条件,存在一定不足。为此,本文以一台磨机用低速直驱 PMSM 为对象,重点研究在空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)方式下,不同载波频率引入的谐波特性及其对电机铁损和永磁体涡流损耗的影响规律。通过搭建 Simplorer 控制系统模型与 Maxwell 二维有限元模型,并进行场路耦合联合仿真,分析了载波频率变化对电机损耗的影响。仿真并通过实测数据验证,证明了模型的有效性。

1 损耗模型和电磁设计

1.1 损耗模型

1.1.1 铜耗

在正弦波供电情况下绕组铜耗计算式为^[22]

$$P_{Cu} = 3I^2 R \quad (1)$$

式中: I 为定子绕组在额定负载时相电流有效值; R 为每相电阻值,计算式为

$$R = K_F \rho_w \frac{2N_1 l_0}{S a_1} \quad (2)$$

式中: K_F 为电阻系数; N_1 为每相串联匝数; l_0 为线圈半匝平均长度; S 为导线截面积; a_1 为相绕组的

并联支路数; ρ_w 为绕组电导率。

PWM 供电时,需考虑谐波的影响,则式(1)可改写为

$$P_{Cu} = 3 \sum_{w=1}^{\infty} I_w^2 R \quad (3)$$

式中: I_w 为第 w 次谐波电流的有效值。

1.1.2 永磁体涡流损耗

永磁体由于自身磁导率较高,当外部磁场发生变化时,其内部会感应出涡流而产生涡流损耗^[23]。永磁体涡流损耗的计算式为^[24-25]

$$P_{PM} = \sum_w \int \frac{J_w^2}{2\sigma} dV \quad (4)$$

式中: J_w 为第 w 次谐波产生的涡流幅值; σ 为永磁体电导率; V 为永磁体体积。

1.1.3 铁耗

由于电枢电流产生的磁场相对定、转子运动,磁通密度在铁心中不断发生变化。电机铁心中不仅有交变磁场,还存在旋转磁场^[26],因此在计算电机铁耗时可以将旋转磁场分解为两个相位相互正交的交变磁场。所以旋转磁场的总铁耗就等于径向和切向上的交变磁场产生的铁耗之和^[27-28]。定、转子的涡流损耗为

$$P_w = \sum_{w=1}^N \frac{f^2 d^2 (B_{rw}^2 + B_{tw}^2) V_g}{12\rho} \quad (5)$$

式中: P_w 为第 w 次谐波产生的涡流损耗; f 为磁场交变频率; d 为硅钢片厚度; B_{rw} 、 B_{tw} 分别为铁心径向、切向磁通密度第 w 次谐波分量的幅值; ρ 为电阻率; V_g 为硅钢片体积。

磁滞损耗为

$$P_h = \sum_{w=1}^N K_h f (B_{rw}^\alpha + B_{tw}^\alpha) V \quad (6)$$

式中: K_h 为不同材料的计算系数,根据厂家提供的不同材料确定。

铁耗的计算式为

$$P_{Fe} = P_w + P_h \quad (7)$$

1.2 电磁设计

满足机械与电磁约束的低速直驱 PMSM 其主要尺寸关系为

$$T = \frac{\sqrt{2}\pi}{4} B_{\delta 1} D_{i1}^2 L_{ef} A \times 10^{-4} \quad (8)$$

式中: $B_{\delta 1}$ 为气隙磁密基波幅值; D_{i1} 为定子内径; L_{ef} 为铁心有效长度; A 为电负荷; T 为电机额定输

出转矩。

永磁体的尺寸和电机的性能直接相关,如式(9)所示,在满足性能的同时,需考虑永磁体抗退磁能力,厚度太小,则永磁体容易退磁。

$$\begin{cases} h_M = \frac{2K_s K_\alpha b_{m0} \delta}{(1 - b_{m0}) \sigma_0} \\ b_M = \frac{\sigma_0 B_{\delta 1} \tau_1 l_{ef}}{\pi b_{m0} B_r K_\phi l_M} \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_s 为电机的饱和系数; K_α 为与转子结构相关的系数; δ 为气隙长度; b_{m0} 为永磁体空载状态下的工作点; K_ϕ 为气隙磁通的波形系数; h_M 、 b_M 分别为磁钢磁化方向长度、宽度; B_r 为剩余磁感应强度; l_M 为永磁体轴向长度; σ_0 为空载漏磁系数; τ_1 为极距。

本文以一台额定功率 $P_N = 2\,000\text{ kW}$ 、额定转速 $n_N = 118\text{ r/min}$ 的 PMSM 为例展开,电机的有限元模型如图 1 所示,电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 主要参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	2 000
额定电压/V	10 000
额定电流/A	126.2
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	118
额定转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	161 864
定子外径/mm	1 990
冷却方式	水冷
铁心长度/mm	1 400
气隙长度/mm	3
永磁体长度/mm	38
永磁体宽度/mm	18
永磁体牌号	N42SH
空载反电势/V	9 357
热负荷/ $[\text{A}^2/(\text{mm}^3)]$	1 398.75

2 基于场路耦合的联合仿真模型

2.1 控制策略

采用 $i_d = 0$ 的控制策略,该策略下 d 、 q 轴电流由式(10)得到:

$$\begin{cases} i_q = \frac{2T_e}{3p_n \psi_f} \\ i_d = 0 \end{cases} \quad (10)$$

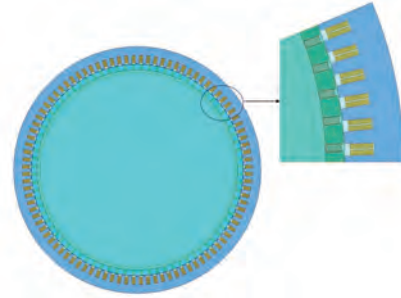


图 1 PMSM 有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the PMSM

式中: i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴定子电流; T_e 为电磁转矩; p_n 为电机极对数; ψ_f 为永磁体磁链。

表贴式 PMSM 的 d 、 q 轴电感近似相等,使其转矩方程中不含磁阻转矩分量。内置式 PMSM 则因 d 、 q 轴磁路不对称而产生磁阻转矩。采用最大转矩电流比 (Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 控制可优化 d 、 q 轴电流分配,综合利用两种转矩,从而在相同电流下输出更大转矩^[29]。

PMSM 在同步旋转坐标系下的电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5p_n i_q [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] \quad (11)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴定子电感。

定义同步旋转坐标系下定子电流矢量与 q 轴的夹角为 θ ,可得 d 、 q 轴电流和定子电流关系式为

$$\begin{cases} i_d = I_s \cos \theta \\ i_q = I_s \sin \theta \end{cases} \quad (12)$$

式中: I_s 为电枢电流。

将式(12)代入电磁转矩方程,可得电磁转矩和电流的关系如式(13)所示:

$$T_e = 1.5p_n I_s \sin \theta [\psi_f + (L_d - L_q) I_s \cos \theta] \quad (13)$$

由式(13)可知,在定子电流保持恒定条件下,转矩随电流矢量角的变化而改变。因此,通过求解最大转矩对应的电流矢量角,即可确定电机的 d 、 q 轴电流关系。由此,在采用 MTPA 控制策略时,电机的电流矢量应满足式(14):

$$\frac{\partial(T_e)}{\partial \theta} = 0 \quad (14)$$

将式(14)与式(13)联立可得:

$$\frac{3}{2} p_n \psi_f I_s \cos \theta + \frac{3}{2} p_n (L_d - L_q) I_s^2 \cos(2\theta) = 0 \quad (15)$$

Fig. 2 MTPA control module

变器驱动电路及控制模块三部分组成,系统结构如图 3、4 所示。通过实时反馈电机的机械量转速、角度与电流信号至控制模块,仿真系统实现了闭环运行,从而能够全面分析电机及其控制系统的综合动态性能^[30-31]。

本文基于 Ansys Maxwell 与 Simplorer 平台,构建了 PMSM 的场路耦合联合仿真模型。该模型由电机的二维电磁场有限元模型、三相电压型逆

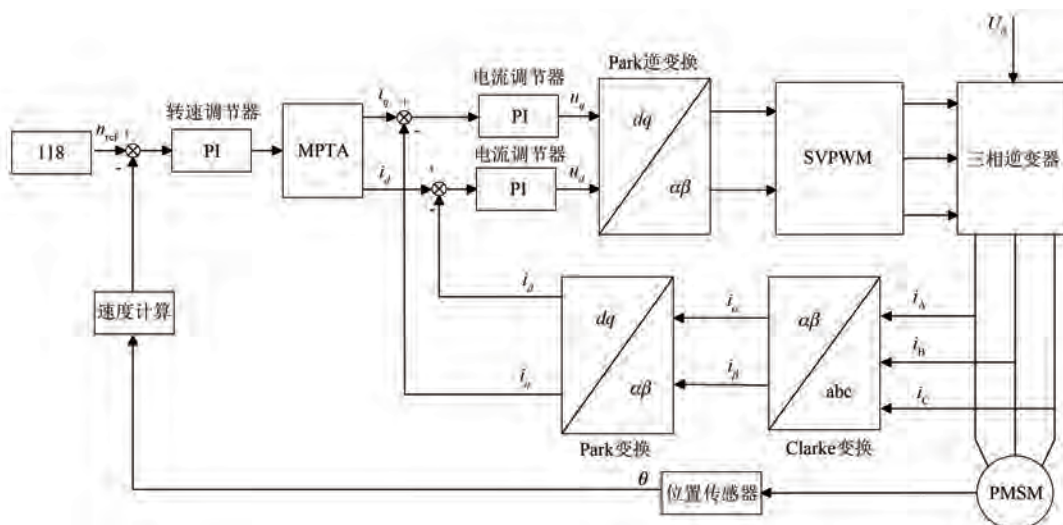


Fig. 3 Overall block diagram of the control system

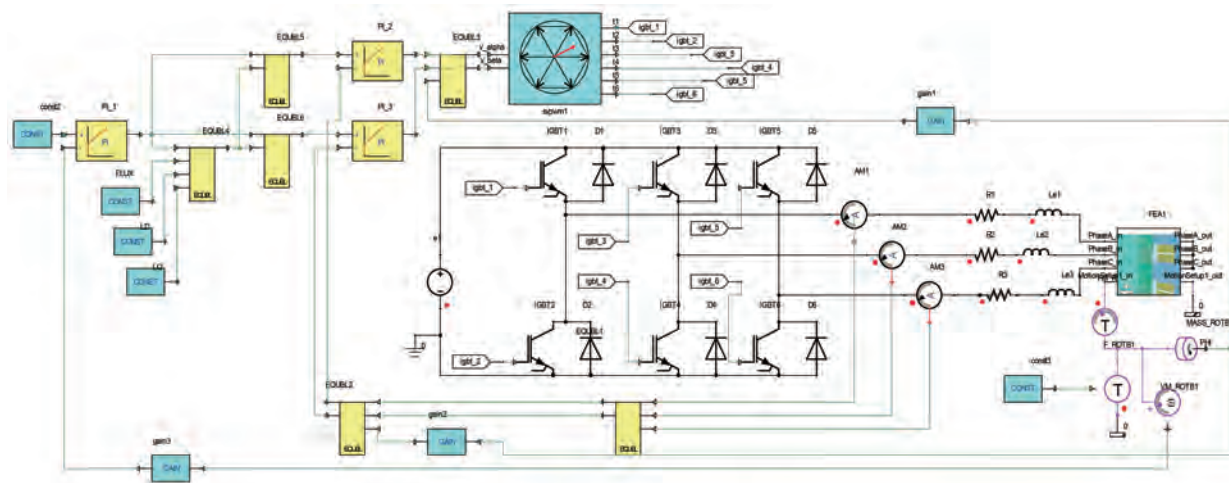


Fig. 4 Simulation diagram of MTPA control of a PMSM in Simpler

图 4 中三个比例积分 (Proportion Integral, PI) 控制器的参数经理论计算与现场调试整定, 最终取值如表 2 所示, 控制系统达到了理想效果。

表 2 PI 控制器参数

Tab. 2 PI controller parameters

PI 控制器	K_p	K_i
PI_1	8	16
PI_2	32	90
PI_3	32	90

通过对 PI 控制器的参数进行整定与优化, 控制系统实现了良好的动态与稳态性能。电机的转矩和转速曲线如图 5 所示, 证明了控制策略的有效性。

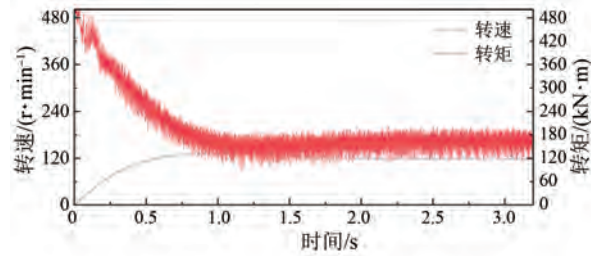


图 5 变频器供电情况下电机的转矩和转速曲线

Fig. 5 Torque and speed curves of the motor under inverter power supply

3 仿真分析

3.1 变频器供电情况的定子磁动势分析

在变频器供电条件下, 定子电流含有显著的谐波分量, 这些谐波电流是导致电机附加损耗增加的主要因素之一^[32]。为分析其频谱特性, 设置载波频率为 5 kHz, 提取 Maxwell 仿真结果中一个完整周期的定子相电流波形作为典型示例, 如图 6 所示。并对该周期电流波形进行傅里叶分解, 所得谐波频谱分析结果如图 7 所示。

使用变频器供电三相绕组流过的第 w 次谐波电流表达式为

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2} I_{Aw} \cos(k\omega t) \\ i_B = \sqrt{2} I_{Bw} \cos\left[k\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)\right] \\ i_C = \sqrt{2} I_{Cw} \cos\left[k\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)\right] \end{cases} \quad (17)$$

式中: I_{Aw} 、 I_{Bw} 、 I_{Cw} 分别为 A、B、C 三相绕组第 w 次谐波电流的最大值; ω 为角频率。

由此可得 A、B、C 三相绕组中的 w 次时间谐

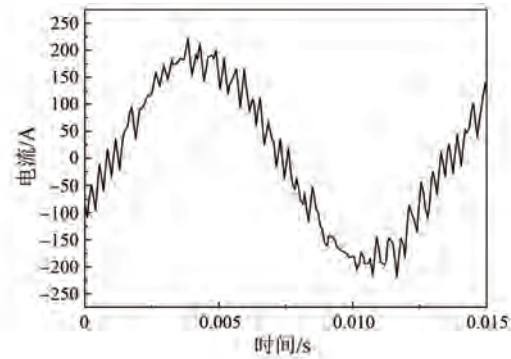


图 6 变频器供电情况下 A 相电流波形

Fig. 6 Phase-A current waveform under inverter power supply

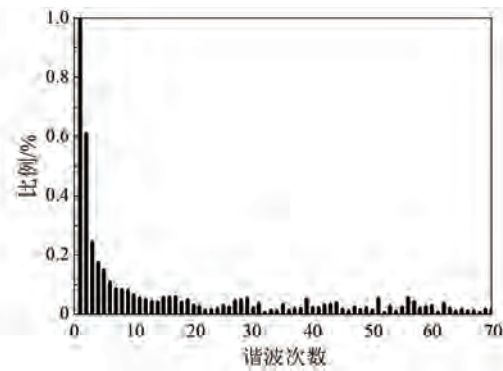


图 7 A 相电流谐波分布

Fig. 7 Harmonic distribution of phase-A current
波电流所产生的 v 次空间脉振磁动势表达式为

$$\begin{cases} F_{Aw,v} = \frac{2\sqrt{2} N k_v I_{Aw}}{\pi p_n} \cos(v_1 \theta) \cos(k\omega t) \\ F_{Bw,v} = \frac{2\sqrt{2} N k_v I_{Bw}}{\pi p_n} \cos v_1 \left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \cos k\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ F_{Cw,v} = \frac{2\sqrt{2} N k_v I_{Cw}}{\pi p_n} \cos v_1 \left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \cos k\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (18)$$

式中: k_v 为绕组系数; N 为匝数。

对式 (18) 进行展开并求和可得 w 次时间谐波电流所产生的 v 次空间谐波合成磁动势为

$$F_{(h,v)} = \begin{cases} \frac{3N k_v I_w}{\pi p_n} \cos(w\omega t + v\theta), & |w+v| = 3k, |w-v| \neq 3k, k=0,1,2 \\ \frac{3N k_v I_w}{\pi p_n} \cos(w\omega t - v\theta), & |w+v| \neq 3k, |w-v| = 3k, k=0,1,2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

由上述分析可知时间谐波会产生两个方向相反的电枢磁动势。当 $|w+v|=3k$, $|w-v|\neq 3k$ 时,空间谐波合成磁动势的电角速度方向与基波磁场相反,表达式为

$$n_{(w,v)s-} = \frac{60f}{pv} = \frac{w}{v} \frac{60f}{p} = -\frac{wn_1}{v} \quad (20)$$

式中: f 为额定频率; p 为电机极数; n_1 为电机额定转速。

当 $|w+v|\neq 3k$, $|w-v|=3k$ 时,空间谐波合成磁动势的电角速度方向与基波磁场相反,表达式为

$$n_{(w,v)s+} = \frac{60f}{pv} = \frac{w}{v} \frac{60f}{p} = \frac{wn_1}{v} \quad (21)$$

电源时间谐波所产生的谐波磁动势将导致定、转子铁心损耗以及转子永磁体涡流损耗加剧。

3.2 变频器供电情况下的磁钢涡流损耗

在变频器供电工况下,当电动机运行于额定工作状态时,永磁体涡流损耗随开关频率的变化规律如图8所示。

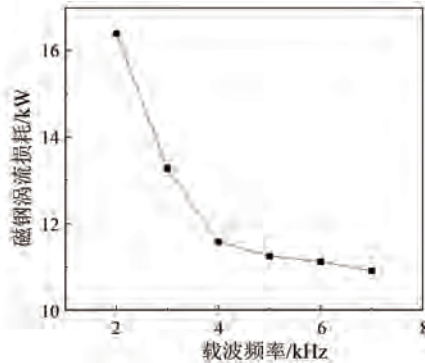


图8 磁钢涡流损耗随载波频率变化曲线

Fig. 8 Variation curve of permanent magnet eddy current loss with carrier frequency

由图8可知,永磁体涡流损耗随载波频率升高呈下降趋势。当载波频率从2 kHz增至3 kHz时,涡流损耗降低了18.75%;当频率从3 kHz增至5 kHz时,损耗进一步降低14.76%;而当频率从5 kHz继续增至7 kHz时,损耗仅降低了4.6%。分析损耗降低幅度百分比可知,虽然提高载波频率能有效减小永磁体涡流损耗,但当频率达到5 kHz后,损耗对频率提升的敏感性显著降低,继续增加载波频率对涡流损耗的抑制效果不明显。

不同变频器载波频率下气隙磁密谐波含量的变化情况如图9所示。

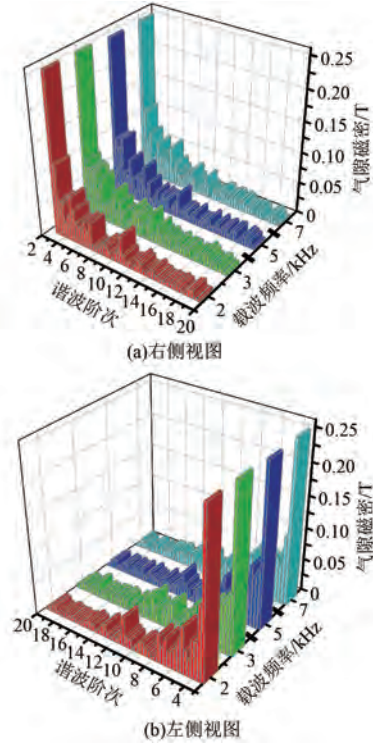


图9 气隙磁密随载波频率变化的谐波分布

Fig. 9 Harmonic distribution of air-gap magnetic flux density with carrier frequency variation

由图9可知,气隙磁场中含量较高的谐波主要为3次、5次、7次及11次谐波。由图9可知,第3次和第7次谐波的幅值随载波频率变化的波动较小,相对稳定。相比之下,第5次和第11次谐波的幅值随载波频率升高呈现下降趋势,其变化规律与图7所示的永磁体涡流损耗降低趋势具有相似性。据此可推断,该样机的永磁体涡流损耗主要受第5次和第11次谐波磁场的影响。

3.3 变频器供电情况下的硅钢片铁耗

由式(5)可知,电机定、转子铁心损耗不仅取决于供电频率和铁心材料牌号,还与磁通密度相关。为分析特定位置的磁通密度变化,选取定子上A点与转子上B点作为典型监测位置,其空间分布以及网格划分如图10所示。

选取定子铁心图10中所示A点作为监测位置,分别提取载波频率为3 kHz、5 kHz和7 kHz工况下该点的径向磁通密度 B_r 与切向磁通密度 B_t ,并绘制其磁密轨迹图如图11所示。

由图11可知,三种载波频率下的磁通密度轨迹均呈椭圆形。然而,不同频率下轨迹的波动存在差异,通过对 B_r 和 B_t 的方差分析,定量表征了

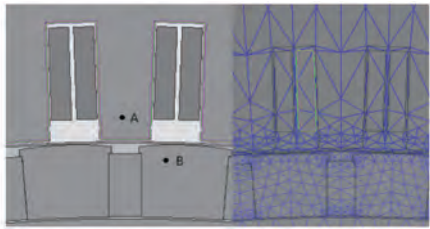


图 10 采样点及其网格划分
Fig. 10 Sampling points and their mesh division

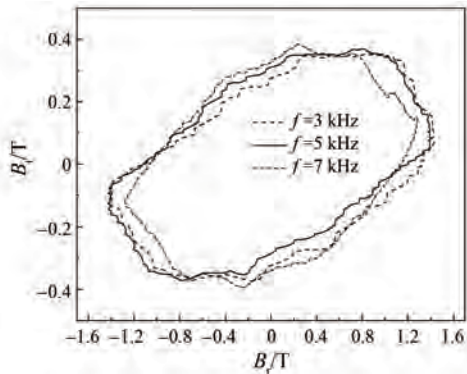


图 11 A 点磁密轨迹图
Fig. 11 Magnetic flux density trajectory at point A
磁密轨迹的波动程度,结果如表 3 所示。

表 3 A 点 B_r 和 B_t 波动方差值

Tab. 3 Variance of B_r and B_t fluctuations at point A		
载波频率/kHz	径向磁密方差值/ T^2	切向磁密方差值/ T^2
3	0.048 5	1.060
5	0.046 4	1.025
7	0.045 9	0.972

计算结果表明,随着载波频率从 3 kHz 增大至 7 kHz, B_r 的波动方差由 0.048 5 减小至 0.045 9, B_t 的波动方差由 1.06 减小至 0.972。该定量结果与定性观察结论一致,即载波频率为 7 kHz 时磁密轨迹的波动最小。

选取转子铁心图 10 中所示 B 点作为监测位置,对载波频率分别为 3 kHz、5 kHz 和 7 kHz 工况下该点的磁通密度进行分析,其磁密曲线如图 12 所示。

由图 12 可见,磁通密度波形的峰值随载波频率升高而降低,并且磁通密度曲线的平整度随载波频率上升而提高。

定转子铁耗随载波频率变化曲线如图 13 所示。由图 13 可知,电机铁心损耗随载波频率升高而下降。此现象与前述分析一致,载波频率的提

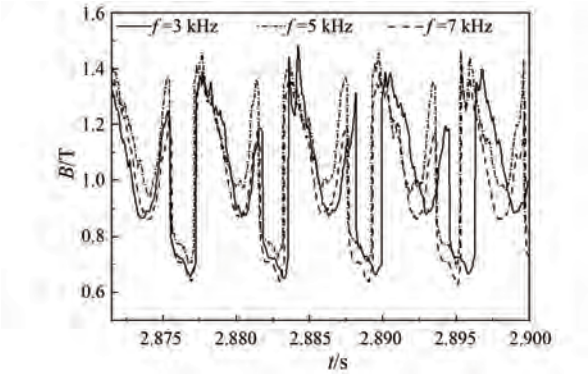


图 12 B 点磁密图
Fig. 12 Magnetic flux density plot at point B

升有效降低了定、转子铁心的磁密峰值与脉动幅值,并使其磁密轨迹更为平滑,从而减少了铁心损耗。此外,铁心损耗的变化规律与永磁体涡流损耗相似,当开关频率超过 5 kHz 后,继续提高频率对损耗的抑制效果显著减弱。

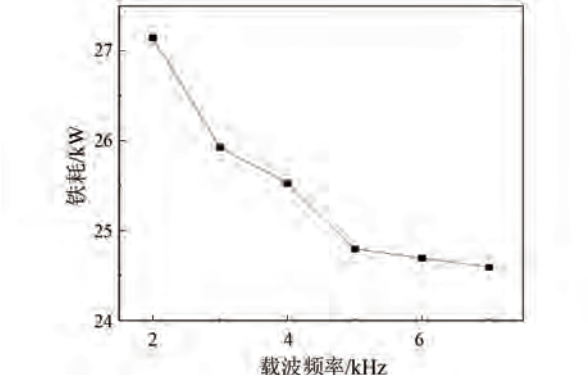


图 13 定转子铁耗随载波频率变化曲线
Fig. 13 Variation curve of stator and rotor iron loss with carrier frequency

当变频器载波频率设定为 7 kHz 时,电机铁心损耗与永磁体涡流损耗达到最小值。然而,提高载波频率会显著增加变频器开关器件的动作频率,进而导致开关损耗增大和变频器温升加剧。定量分析损耗-频率曲线可知,载波频率从 5 kHz 提升至 7 kHz 时,电机损耗的降低幅度已十分有限。因此,基于电机损耗抑制与变频器运行效率的综合优化考量,该样机系统的最佳载波频率选定为 5 kHz。

4 试验验证

为验证本文仿真与计算结果的准确性,对所研制样机进行了试验验证,采集了包括试验台空

载反电势测试数据及额定工况现场运行效率在内的实测数据。电机装配定转子结构图如图 14 所示,样机空载试验以及样机现场运行状态如图 15、16 所示。试验值与仿真值对比如表 4 所示。

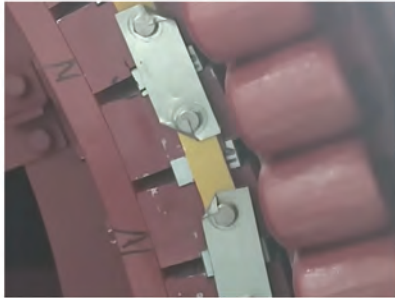


图 14 定转子结构图

Fig. 14 Stator and rotor structure diagram



图 15 电机空载试验图

Fig. 15 No-load experiment diagram of the motor



图 16 电机运行现场

Fig. 16 The motor operation site

表 4 试验值与仿真值对比

Tab. 4 Comparison between experimental and simulated values

参数名称	试验值	仿真值
额定功率/kW	2 062	2 000
额定电压/V	10 000	10 000
额定电流(有效值)/A	131	126.2
效率/%	95.5	95.2
空载反电势/V	9 270	9 220

表 4 中,电机关键参数的仿真值与采用直接法测得的试验值高度一致。这表明,本文建立的场路耦合联合仿真模型具有高可靠精度,能够为磨机直驱 PMSM 的工程设计提供有效依据。

5 结语

本文以一台额定功率为 2 000 kW、转速为 118 r/min 的低速大转矩 PMSM 为研究对象,探究变频器供电对其损耗特性的影响规律。首先,基于 Ansys Maxwell 软件建立电机二维电磁场有限元模型,并结合 Ansys Simplerer 平台构建电机控制系统模型,搭建场路耦合联合仿真环境。仿真分析表明,电机铁心损耗及永磁体涡流损耗均随变频器载波频率升高而降低。综合权衡损耗抑制效果与变频器自身损耗,确定该样机系统的最佳载波频率为 5 kHz。此外,通过对气隙磁密进行傅里叶分解并关联永磁体涡流损耗变化规律,发现损耗主要受气隙磁密中第 5 次和第 11 次谐波幅值的影响。

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

郝子璐进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写,程祥和张炳义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。

The scheme design, experimental research, content summarization, and paper writing were conducted by Hao Zilu. The paper was reviewed and revised by Cheng Xiang and Zhang Bingyi. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 李文亮,杨涛,于向军,等. 国外大型球磨机发展现状[J]. 矿山机械, 2007, (1): 13-15+4.
- LI W L, YANG T, YU X J, et al. Current development of large ball mills abroad [J]. Mining &

- Processing Equipment, 2007, (1): 13-15+4.
- [2] 王琴, 祖大磊, 张广伟, 等. 矿山碎磨设备节能降耗现状及发展趋势[J]. 现代矿业, 2016, 32(5): 223-225+231.
- WANG Q, ZU D L, ZHANG G W, et al. Current status and development trends of energy saving and consumption reduction in mining crushing and grinding equipment [J]. Modern Mining, 2016, 32(5): 223-225+231.
- [3] 张国强, 张炳义. 水泥磨机用超低速大转矩永磁电机转矩特性分析[J]. 电工技术, 2021, (15): 188-191.
- ZHANG G Q, ZHANG B Y. Analysis of torque characteristics of ultra-low speed and large torque permanent magnet motor for cement mill [J]. Electric Engineering, 2021, (15): 188-191.
- [4] 鲍晓华, 刘佳炜, 孙跃, 等. 低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1148-1160.
- BAO X H, LIU J W, SUN Y, et al. Review and prospect of low-speed high-torque permanent magnet machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1148-1160.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杨江飞, 管华, 杨春华, 等. 负载变化对永磁同步电机性能的影响分析[J]. 电气工程学报, 2018, 13(9): 20-25.
- YANG J F, GUAN H, YANG C H, et al. Influence of load variation on performance of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(9): 20-25.
- [12] 池磊, 李明, 王蓉. 变频器时间谐波电流对永磁屏蔽电机性能影响分析[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 74-83.
- CHI L, LI M, WANG R. Analysis of the influence of inverter time harmonic current on the performance of permanent magnet shielded motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 74-83.
- [13] 兰志勇, 罗元钧, 叶书帆, 等. 基于场路耦合的永磁同步电机联合仿真研究[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2023, 45(1): 1-12.
- LAN Z Y, LUO Y J, YE S F, et al. Research on co-simulation of permanent magnet synchronous motor based on field-circuit coupling [J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2023, 45(1): 1-12.
- [14] 王伟炳, 缪楠阳. 永磁游标电机无位置传感器场路耦合矢量控制[J]. 微电机, 2025, 58(3): 32-

37.
WANG W B, MIAO N Y. Position sensorless field circuit coupling vector control of permanent magnet vernier motor [J]. *Micromotors*, 2025, 58(3): 32-37.
- [15] 王伟炳, 邓孝华. 基于联合仿真的表贴式永磁游标电机性能分析[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(8): 60-65.
WANG W B, DENG X H. Performance analysis of a surface-mounted permanent magnet vernier machine based on co-simulation [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(8): 60-65.
- [16] 丁树业, 李冠男, 冯海军, 等. 驱动用异步电机负载变化对损耗影响数值计算[J]. *电机与控制学报*, 2013, 17(9): 36-41.
DING S Y, LI G N, FENG H J, et al. Numerical calculation of loss under load variation for driving asynchronous motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2013, 17(9): 36-41.
- [17] 赵海森, 张冬冬, 王义龙, 等. 变频供电条件下感应电机空载铁耗分布特点及其精细化分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(8): 2260-2269.
ZHAO H S, ZHANG D D, WANG Y L, et al. No-load iron loss distribution characteristics and its fine analysis for inverter-fed induction motors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(8): 2260-2269.
- [18] 明帅, 刘志远, 狄冲, 等. 双斜槽转子变频感应电机温升及转子热应力分析[J]. *电气工程学报*, 2023, 18(1): 14-23.
MING S, LIU Z Y, DI C, et al. Analysis of temperature rise and rotor thermal stress of variable frequency induction motor with double skewed rotor [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2023, 18(1): 14-23.
- [19] TONG W M, SUN R L, LI S Q, et al. Loss and thermal analysis for high speed amorphous metal PMSMs using 3-Delectromagnetic-thermal bi-directional coupling [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(4): 2839-2849.
- [20] 王玉彬, 林洋. 基于电磁热双向耦合的内置式永磁同步电机温度场等效模型及温度场分析[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(22): 7127-7139.
WANG Y B, LIN Y. Equivalent model of temperature field and temperature field analysis of interior permanent magnet synchronous motor based on electromagnetic-thermal bidirectional coupling [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(22): 7127-7139.
- [21] 陈天翔, 于明湖, 赵荣祥, 等. 基于磁热双向耦合的变频供电永磁同步电机转子涡流损耗与温升研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(15): 5650-5661.
CHEN T X, YU M H, ZHAO R X, et al. Research on rotor eddy current loss and temperature rise of PMSM under inverter supply based on magneto-thermal bidirectional coupling [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15): 5650-5661.
- [22] 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.
- [23] 佟文明, 王云学, 贾建国, 等. 变频器供电内置式永磁同步电机转子损耗计算与试验[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(24): 5811-5820.
TONG W M, WANG Y X, JIA J G, et al. Calculation and experimental research on the rotor loss of interior permanent magnet synchronous motors with converter supply [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(24): 5811-5820.
- [24] 侯云鹤, 程祥, 张炳义. 基于槽极比选择的切向永磁同步电机永磁体涡流损耗抑制措施[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(5): 100-110.
HOU Y H, CHENG X, ZHANG B Y. Measures to suppress eddy current loss in permanent magnets of tangential permanent magnet synchronous motors based on slot-pole ratio selection [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(5): 100-110.
- [25] 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.
- [26] 戈宝军, 罗前通, 王立坤, 等. 高速永磁同步电动机

- 机铁耗分析[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 32-39.
- GE B J, LUO Q T, WANG L K, et al. Analysis of iron losses of high-speed permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 32-39.
- [27] YANG G Q, CUI Z Z, SONG L W. Analysis of iron losses in induction motor with an improved iron-loss model [C]// 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pa-cific, Beijing, 2014.
- [28] 张洪亮, 邹继斌. 考虑旋转磁通的 PMSM 铁心损耗数值计算[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(4): 340-344+348.
- ZHANG H L, ZOU J B. Numerical calculation and analysis of stator iron losses due to rotational flux and magnet pole eddy-current loss in PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(4): 340-344+348.
- [29] ZHU D, LIU G H, WANG J, et al. A comparison of two MTPA algorithms for an interior permanent magnet synchronous motor drives [C]// 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, Chiba, 2016.
- [30] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- YUAN L, HU B X, WEI K Y, et al. Principles of Modern Permanent Magnet Synchronous Motor Control and MATLAB Simulation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016.
- [31] AL-SHEHARI R, CHAOUI H, GUALOUS H. MTPA trajectory tracking for IPMSM drives: A comparative study and analysis [C]// 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, 2018.
- [32] TENG X Y, LI Y, ZHANG B Y, et al. Rotor loss analysis of an external rotor high-speed permanent magnet motor considering current harmonics and thermal analysis under high-temperature gas [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2023, 18(4): 623-638.
-
- 收稿日期:2025-07-22
收到修改稿日期:2025-09-15
作者简介:
郝子璐(2001-),男,硕士研究生,研究方向为电机设计及其控制,8739765987@qq.com;
* 通信作者:程 祥(1974-),男,硕士,副教授,研究方向为电力系统无功补偿与电能质量控制,13840539230@qq.com。