

无定子轭轴向磁通永磁同步电机 弱磁扩速能力研究

赵晓坤^{1*}, 张程¹, 朱良宽²

(1. 东北林业大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

Research on Flux-Weakening Speed Expansion Methods for Yokeless-Stator Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Motors

ZHAO Xiaokun^{1*}, ZHANG Cheng¹, ZHU Liangkuan²

(1. College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] Dual-rotor axial-flux permanent magnet synchronous motor (AFPMSM) attracts significant attention in applications such as automotive in-wheel drives and wind power generation due to their high torque density and compact structure. However, traditional surface-mounted permanent magnet motors exhibit low inductance and poor field-weakening capability. To address this issue, this paper proposes a comprehensive optimization design for an 8-pole 48-slot yokeless stator AFPMSM. [Methods] The constant power speed range of a yokeless stator AFPMSM was broadened while maintaining high torque density, through the design of a d -axis magnetic bridge. The key structural parameters influencing the field-weakening performance were thoroughly analyzed to identify the optimization variables. To significantly enhance the optimization efficiency, the three-dimensional finite element model was converted into a two-dimensional equivalent model for multi-objective optimization, and the accuracy of the equivalent conversion was validated. [Results] The simulation results indicated that the yokeless stator AFPMSM achieved an output torque of 96.2 N·m and a constant power speed range of 5:1. [Conclusion] The proposed motor design effectively expands the constant power speed range while meeting the requirement for high torque density.

Key words: axial-flux permanent magnet synchronous motor;

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合基金培育项目 (PL2024E006)

Cultivation Project of the Joint Fund of the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (PL2024E006)

d -axis magnetic bridge design; constant power speed range; multi-objective optimization

摘要:【目的】双转子轴向磁通永磁同步电机 (AFPMSM) 凭借其转矩密度高、结构紧凑等优势, 在汽车轮毂、风力发电等领域备受关注。然而, 传统表贴式永磁电机电感小, 弱磁能力差。针对这一问题, 本文提出一种面向 8 极 48 槽无定子轭 AFPMSM 的综合优化设计。【方法】通过 d 轴磁桥设计, 在保持高转矩密度基础上, 拓宽无定子轭 AFPMSM 的恒功率调速范围。深入分析影响弱磁性能的主要结构参数, 以此确定优化变量。为显著提升优化效率, 将三维有限元模型转换为二维等效模型, 并进行多目标优化, 验证等效结果的准确性。【结果】仿真结果表明, 无定子轭 AFPMSM 输出转矩为 96.2 N·m, 恒功率调速范围达到 5:1。【结论】本文所提电机设计在满足高转矩密度需求前提下, 有效拓宽了恒功率调速范围。

关键词: 轴向磁通永磁同步电机; d 轴磁桥设计; 恒功率调速范围; 多目标优化

0 引言

双转子轴向磁通永磁同步电机 (Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor, AFPMSM) 凭借其结构紧凑、转矩密度大及效率高等优点, 被广泛应用于汽车轮毂驱动、风力发电等领域^[1-6]。然而, 现阶段双转子 AFPMSM 普遍采用表贴式永磁体结构设计, 其弱磁扩速能力受限, 最大恒功率调速范围仅为 2:1, 远低于径向磁通电机的 3~5 倍^[7-12]。

拓展电机恒功率调速的方法包括增大 d 轴电感、采用混合励磁以及设计外部机械结构等^[13-18]。文献[19]针对 AFPMSM 弱磁能力差、磁阻转矩利用不足的问题,在内嵌式单 U 型永磁体基础上,提出双层 U 型磁极排列结构,通过磁路设计提升 d 轴电感,电磁转矩提升 6.0%,恒功率调速范围扩大至 3.3:1。文献[20]以不影响 q 轴电感为前提,利用软磁材料取代部分永磁体,提出了一种轴向磁通反凸极永磁同步电机的新拓扑。该设计方案显著提升了电机弱磁扩速能力、 d 轴电感,拓宽了恒功率扩速范围,但由于漏磁导致电磁转矩下降。

混合激励电机通过永磁体磁场与直流励磁线圈磁场的矢量叠加,形成可调合成磁场。其通过精确调控励磁电流的幅值和方向,实现气隙磁场的双向调节,增强电机转矩输出与弱磁扩速能力^[21-24]。文献[25-26]在 TOURS 拓扑结构基础上,采用双定子励磁绕组配置与永磁体交错磁极结构设计,实现了转矩输出能力和弱磁扩速能力的提升。然而混合激励电机因添加直流励磁线圈和独立供电控制系统,复杂程度增加,导致损耗增大。

文献[27]将磁力耦合器集成于转子盘内部,在耦合转矩反馈的基础上构建了双转子间角位移自动调节机构,使电机兼具较强的转矩自适应能力和弱磁扩速能力,恒功率调速范围达到 5:1。文献[28]利用外部机械结构控制转子与定子沿径向相对运动,动态调节永磁体与铁心之间的耦合面积,试验验证弱磁调速范围达到 6:1。文献[29]则利用外部机械结构动态调节转子位移角,改变绕组间反电动势矢量相位差,维持端电压恒定,限制电机高速运行工况下的电压幅值,增强弱磁扩速能力,恒功率调速范围达到 5:1。外加机械结构法利用动态机械结构实现气隙磁场和反电动势幅值调节,虽有效拓宽了弱磁调速范围,但对控制器精度和动态响应特性提出较高的要求,电机成本增加。

无定子轭 AFPMSM 在双转子 AFPMSM 拓扑基础上省去定子轭部,减小了体积,提升了转矩密度。然而,无定子轭 AFPMSM 弱磁能力差,无法应用在宽速域场景中。因此,本文对无定子轭 AFPMSM 的 d 轴磁路进行设计与优化,通过增大

d 轴电感,增强电机的弱磁扩速能力。通过有限元仿真计算和优化设计,验证了无定子轭 AFPMSM 具有低速大转矩和高速宽恒功率调速范围的特性,为其在电动汽车等领域的应用提供了理论支撑。

1 无定子轭 AFPMSM 拓扑结构与弱磁控制

1.1 无定子轭 AFPMSM 拓扑结构

无定子轭 AFPMSM 采用双转子对称布局,由定子及同轴安装在定子两侧的转子构成,如图 1 所示。定子由定子铁心和嵌入定子槽的绕组组成。定子铁心采用无轭部结构,通过轻质非导磁材料集成多个独立的定子齿。绕组采用整数槽分布方式。转子由转子铁心、永磁体和磁桥构成。磁桥和永磁体沿 d 轴方向交替排布,形成并联磁路结构,有效增大了 d 轴电感。电机关键尺寸参数如表 1 所示,额定性能参数如表 2 表示。



图 1 无定子轭 AFPMSM 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of yokeless stator AFPMSM structure

表 1 无定子轭 AFPMSM 结构参数

Tab. 1 Structural parameters of yokeless stator AFPMSM

参数名称	参数值
定子内径 R_1 /mm	180
定子外径 R_2 /mm	252
气隙长度 l_1 /mm	1
定子槽口宽度 w_{s0} /mm	0.7
定子槽口高度 h_1 /mm	1.2
极弧系数	0.72
磁桥宽度/(°)	0.46
定子线圈匝数/匝	20
极槽比	8/48

1.2 d 轴等效磁路

建立传统 AFPMSM 与无定子轭 AFPMSM 的 d 轴等效磁路模型,如图 2 所示。图 2 中, F_d 为 d 轴电枢绕组电动势; F_{pm} 为永磁体磁动势; R_{pm} 、 $R_{d\delta}$ 、 R_s 、 R_r 分别为永磁体磁阻、气隙磁阻、定子铁心磁阻和转子铁心磁阻; R_{eq} 为磁桥磁阻; Φ_{pm} 、 $\Phi_{pm\delta}$ 、 $\Phi_{pm\sigma}$ 分别为永磁体总磁通、主磁通、漏磁通; Φ_d 为 d 轴电枢反应磁动势; Φ_{d1} 与 Φ_{d2} 为 d 轴电枢反应磁动势的分量。无定子轭 AFPMSM 通过 d 轴磁桥设计,使 R_{eq} 与 R_{pm} 并联,由于 R_{eq} 远小于 R_{pm} ,因此 d 轴磁阻减小、电感增大,进而增强电机的弱磁性能。

表 2 无定子轭 AFPMSM 额定性能参数

Tab. 2 Rated performance parameters of yokeless stator AFPMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	15
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
额定电压/V	380

无定子轭 AFPMSM 永磁体总磁通 Φ_{pm} 分为与电枢绕组交链的主磁通 $\Phi_{pm\delta}$ 以及流经 R_{eq} 的漏磁通 $\Phi_{pm\sigma}$ 两部分。 F_d 的数值影响磁桥的饱和程度, R_{eq} 随之变化。当 d 轴电流为增磁电流时, F_d 和 F_{pm} 方向相同, Φ_{d1} 和 $\Phi_{pm\sigma}$ 方向相反。因此,增磁电流对应较大的 $\Phi_{pm\sigma}$ 和较小的 $\Phi_{pm\delta}$ 。

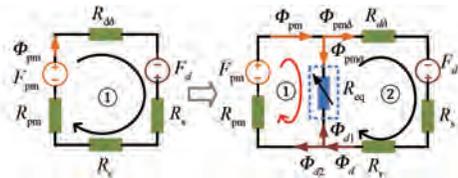


图 2 传统 AFPMSM 与无定子轭 AFPMSM 的 d 轴等效磁路

Fig. 2 d -axis equivalent magnetic circuits of conventional AFPMSM and yokeless stator AFPMSM

d 轴磁路磁阻分别为

$$R_1 = R_{pm} + R_{d\delta} + R_s + R_r \quad (1)$$

$$R_{1c} = \frac{R_{pm} + R_{eq}}{R_{pm} R_{eq}} + R_{d\delta} + R_s + R_r \quad (2)$$

式中: R_1 、 R_{1c} 分别为传统双转子 AFPMSM、无定子轭 AFPMSM 的 d 轴磁路磁阻。

根据式 (1) 和式 (2) 可得, 传统双转子 AFPMSM 的 d 轴磁路存在永磁体, 磁阻 R_{pm} 大, 整

体 d 轴磁阻数值偏高, 导致 d 轴电感较小。

1.3 AFPMSM 弱磁控制

PMSM 的励磁磁场由永磁体提供, 磁通难以调节。电机处于高速运行状态时, 可通过增大 d 轴去磁电流或减小 q 轴电流分量减小气隙合成磁场, 拓宽恒功率调速范围。

当电机采用弱磁控制时, 转速与电压之间的关系如式 (3) 所示:

$$n = \frac{60u_{lim}}{2\pi\sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2}} \quad (3)$$

式中: u_{lim} 为极限电压; ψ_f 为永磁体磁链; L_d 、 L_q 分别为电机 d 、 q 轴电感; i_d 、 i_q 分别为定子电流 d 、 q 轴分量。

当电机端电压和端电流达到最大值, 逆变器输出电流均为 d 轴去磁电流时 ($i_q = 0$), 忽略定子绕组电阻的影响, 电机的理想最高转速为

$$n_{max} = \frac{60u_{lim}}{2\pi p |\psi_f - L_d i_{lim}|} \quad (4)$$

式中: i_{lim} 为逆变器输出的极限电流; p 为极对数。

根据式 (3) 和式 (4) 可以推导得出: 增大极限电压 u_{lim} 和极限电流 i_{lim} , 减小永磁体磁链 ψ_f 以及增大 d 轴电感 L_d 等方法能够拓宽电机弱磁扩速范围。然而逆变器容量限制了极限电压与电流, 从电机本体设计角度考虑, 减小永磁体磁链或增大电机 d 轴电感可有效提升电机的弱磁扩速性能, 理论上电机可通过弱磁控制运行至任意转速。

2 无定子轭 AFPMSM 优化

2.1 优化流程

无定子轭 AFPMSM 优化流程主要分三个阶段, 如图 3 所示。首先, 根据电机性能指标推导尺寸, 建立三维有限元模型, 通过分析影响弱磁性能的主要结构参数, 确定优化变量。其次, 通过二维等效模型和遗传算法计算得到满足优化目标的相关参数。然后, 对二维等效模型和三维有限元模型计算结果的误差进行对比验证, 证明优化的准确性。最后基于三维有限元法分析电机电磁性能。

2.2 影响弱磁性能的主要参数

在无定子轭 AFPMSM 中, 磁桥和永磁体共同作为磁路一部分: 永磁体作为恒定磁动势源; 磁桥提供低磁阻路径, 提升 d 轴电感, 优化电机弱磁扩

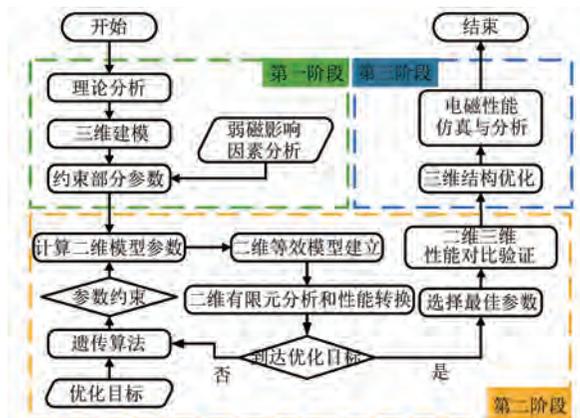


图3 无定子轭 AFPMSM 优化流程

Fig.3 Optimization process of yokeless stator AFPMSM

速能力。永磁体宽度、厚度和磁桥占比对电机恒功率调速范围的影响如图4所示。

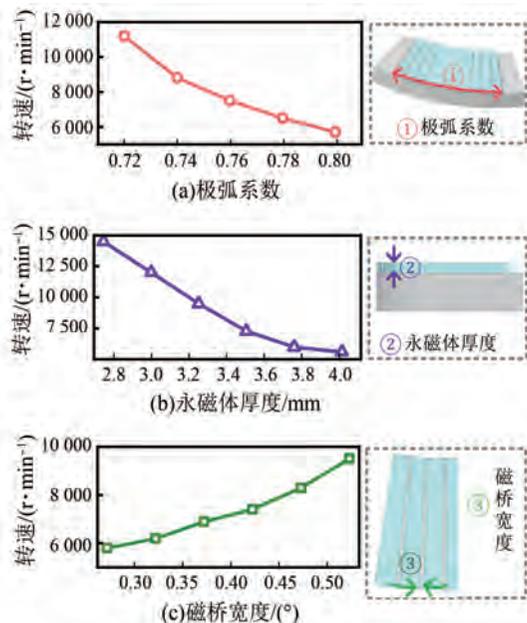


图4 弱磁性能影响因素

Fig.4 Influencing factors of flux-weakening performance

永磁体宽度和厚度增大,永磁磁链随之增大,过高的磁链导致反电动势幅值上升,限制电机调速范围。磁桥占比影响电机 d 轴电感, d 轴电感随磁桥宽度扩大而提升。因此,在满足电机转矩密度要求的前提下,合理选择永磁体几何参数和磁桥宽度,能够有效拓宽电机高转速工况下的恒功率运行范围。设计变量初始值和取值范围如表3所示。

2.3 二维等效模型

对三维有限元模型作出如下假设。

- (1) 假设永磁体磁导率与气隙磁导率相等,忽略其非线性磁化特性以及温度敏感性。
- (2) 假设气隙磁场沿轴向均匀分布。
- (3) 仅考虑有效气隙区域内的磁场分布情况,忽略绕组端部漏磁。

表3 设计变量初始值及取值范围

Tab.3 Initial values and ranges of design variables

变量名称	初始值	取值范围
极弧系数	0.74	0.72~0.76
永磁体厚度 H_m /mm	2.8	2.8~3.5
磁桥宽度/ $^\circ$	0.5	0.4~0.55
磁桥偏移角度 θ_b / $^\circ$	4	2~6

双转子 AFPMSM 具有轴向对称性,二维磁通路径沿轴向分布。应用前述假设并引入周期性边界条件,将三维有限元模型分解为二维等效子模型,并进行简化分析。无定子轭 AFPMSM 二维等效模型如图5所示。

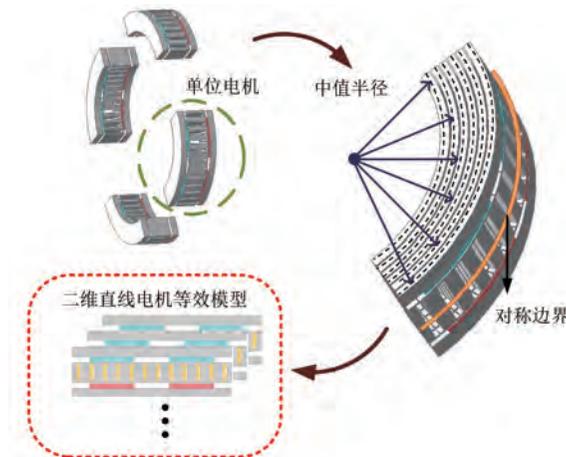


图5 二维等效模型

Fig.5 2D equivalent model

新型双转子 AFPMSM 的三维模型划分为单元电机后,基于轴向对称性与周期性边界条件,分解为 K 块具有相同径向厚度的切片。 R_1 为径向厚度, R_k 为每块切片对应的中值半径,分别如式(5)、(6)所示:

$$R_1 = (R_{out} - R_{in})/K \quad (5)$$

$$R_k = R_{in} + (2k - 1)R_1/2, k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中: R_{in} 、 R_{out} 分别为电机内、外径。

将二维子模型径向推力等效为输出转矩,如式(7)所示:

$$T_k = R_k \cdot F_k \quad (7)$$

式中: F_k 为二维子模型输出推力; T_k 为输出推力对应的等效转矩。

本研究采用考虑径向依赖性的解析模型, 对电机内外径的端部效应进行建模。该模型通过函数精确描述磁场的径向分布, 其计算结果具有较高的相对精度。函数表达式为

$$g(r) = \left(\frac{1}{\pi} \right) \cdot \left[\alpha \tan\left(\frac{r - R_{in}}{a} \right) - \alpha \tan\left(\frac{r - R_{out}}{a} \right) \right] \quad (8)$$

$$a = \frac{R_{out} - R_{in}}{\tan\left(\frac{\beta\pi}{2} \right)} \quad (9)$$

式中: r 为电机半径; a 为有效长度; α 、 β 分别为调节电机内外径附近轴向磁通密度的径向变化速度、整体衰退程度。

通过线性叠加原理实现二维等效模型与三维有限元模型转矩特性转换, 如式(10)所示:

$$T_{2D} = \sum_{k=1}^K [g^2(R_k) \cdot F_{avg,k} \cdot R_k] = \sum_{k=1}^K [g^2(R_k) \cdot T_k] \quad (10)$$

式中: $F_{avg,k}$ 为第 k 个二维子模型产生的平均径向推力。

2.4 多目标优化

以无定子轭 AFPMSM 的电磁转矩最大化与转矩脉动最小化作为多目标优化函数, 采用遗传算法进行多次迭代求解。优化过程如图 6 所示, 随着迭代进行, 解集逐渐收敛并逼近帕累托前沿。该帕累托前沿清晰地展现了转矩与转矩脉动之间的权衡关系。基于此权衡关系, 最终选取了一组最优的电机结构参数组合, 如表 4 所示, 该解在保

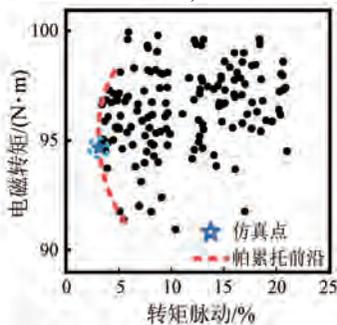


图 6 帕累托前沿分布

Fig. 6 Pareto front distribution

证较高输出转矩的同时, 有效抑制了转矩脉动。

表 4 设计变量优化值

Tab. 4 Optimized values of design variables

变量参数	优化值
极弧系数	0.72
永磁体厚度 H_m /mm	3.15
磁桥宽度/(°)	0.46
磁桥偏移角度 θ_0 /(°)	3.68

2.5 等效误差分析

三维有限元模型与二维等效模型的空载反电动势电机对比曲线如图 7 所示。在空载工况下, 两种模型的反电动势波形高度吻合, 其峰值相对误差仅为 2.1%。

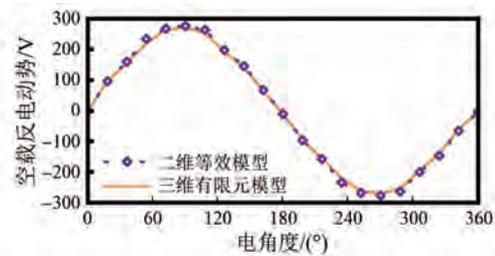


图 7 三维有限元模型与二维等效模型空载反电动势

Fig. 7 No-load back-EMF of 3D finite element model and 2D equivalent model

不同相电流情况下两种模型的负载转矩特性如图 8 所示。图中, 30 A 相电流工况下, 三维有限元模型输出转矩为 101.1 N·m, 二维等效模型的输出转矩为 105.6 N·m, 两者之间误差为 4.2%。

当电机转速达到 3 000 r/min, 输出功率达到峰值, 三维有限元模型与二维等效模型电磁转矩波形对比如图 9 所示。图中, 两种模型平均转矩分别为 57.72 N·m 和 60.84 N·m, 平均转矩与转矩波动误差分别为 5.4% 与 4.8%。在弱磁工况下, 两种模型转矩波形呈现良好的一致性。

经仿真验证, 二维等效模型的计算精度满足工程要求, 且计算效率显著提升。

3 电机电磁性能

3.1 空载性能

优化前后空载反电动势波形如图 10 所示, 其谐波分布情况如图 11 所示。优化前空载反电动势幅值为 262.69 V, 优化后为 275.5 V。此外, 优

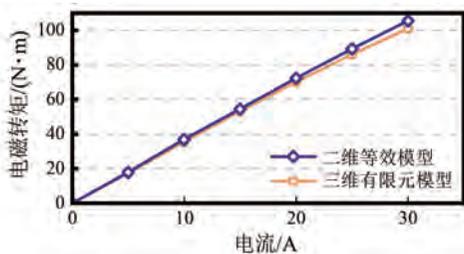


图8 三维有限元模型与二维等效模型输出转矩随电流变化

Fig. 8 Output torque vs. current of 3D finite element model and 2D equivalent model

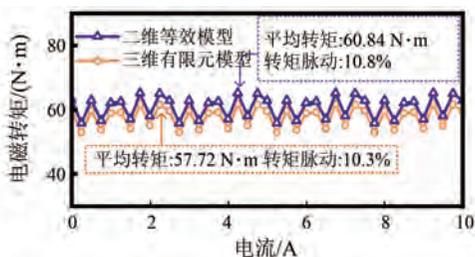


图9 三维有限元模型与二维等效模型电磁转矩

Fig. 9 Electromagnetic torque of 3D finite element model and 2D equivalent model

化后5次、7次和9次谐波幅值相较于优化前显著减小,以3次谐波为主,空载反电动势波形正弦性较好。

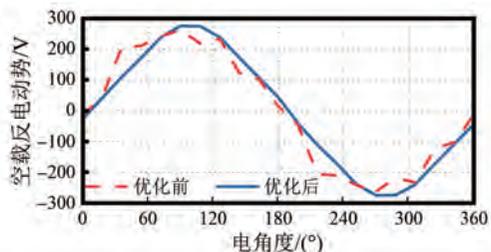


图10 无定子轭AFPMSM优化前后空载反电动势对比
Fig. 10 Comparison of no-load back-EMF for yokeless stator AFPMSM before and after optimization

有限元计算所得齿槽转矩数据优化前后分别为 $1.48 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $0.85 \text{ N}\cdot\text{m}$,如图12所示。相较于优化前,齿槽转矩下降42.5%,齿槽转矩幅值控制在电磁转矩的3%以内,对电机性能影响有限,符合性能要求。

3.2 负载性能

优化前后电磁转矩均值及转矩波动对比如图13所示。图中,优化前电磁转矩均值为 $91.14 \text{ N}\cdot\text{m}$,优化后为 $96.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。转矩脉动幅值由

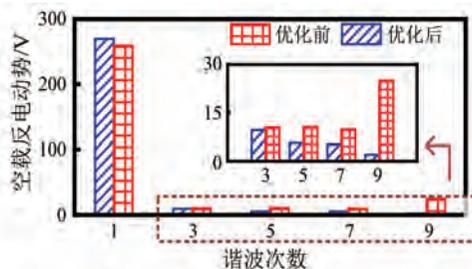


图11 无定子轭AFPMSM优化前后空载反电动势谐波幅值

Fig. 11 Comparison of no-load back-EMF harmonic amplitudes for yokeless stator AFPMSM before and after optimization

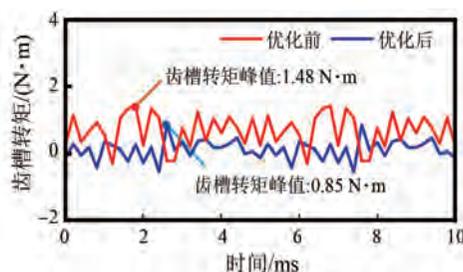


图12 无定子轭AFPMSM优化前后齿槽转矩对比

Fig. 12 Comparison of cogging torque for yokeless stator AFPMSM before and after optimization

$35.45 \text{ N}\cdot\text{m}$ 降低至 $3.17 \text{ N}\cdot\text{m}$,根据转矩波动公式计算可知,转矩波动显著降低,从38.9%缩减至3.3%。该结果验证了设计优化的可行性与有效性。

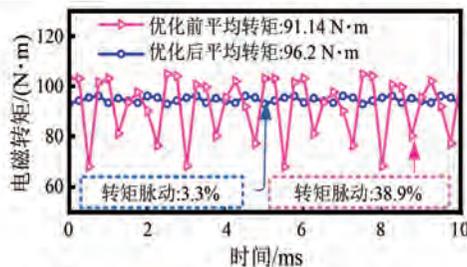


图13 无定子轭AFPMSM优化前后电磁转矩

Fig. 13 Comparison of electromagnetic torque for yokeless stator AFPMSM before and after optimization

无定子轭AFPMSM转矩-转速曲线和功率-转速曲线如图14所示。电机额定功率为 15 kW 、额定转速为 1500 r/min ,弱磁工况下,功率维持在 15 kW 以上,电机最高转速达到 7670 r/min ,恒功率调速比扩展至5:1,验证了本文所提无定子轭AFPMSM设计具有宽恒功率特性。

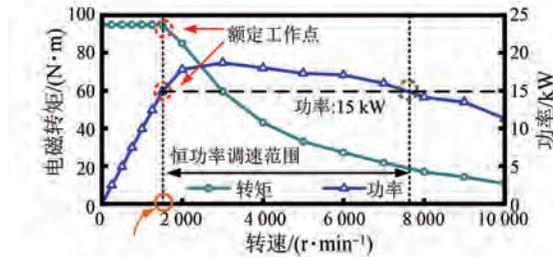


图 14 无定子轭 AFPMSM 转矩-转速曲线和功率-转速曲线

Fig. 14 Torque-speed curve and power-speed curve of yokeless stator AFPMSM

4 结语

本文研究了无定子轭 AFPMSM 的弱磁扩速能力,提出了一种兼具高转矩密度与宽恒功率调速范围的无定子轭 AFPMSM。为了增强弱磁能力,在 d 轴设计磁桥。采用三维模型分析影响弱磁性能的关键参数,并基于二维等效模型优化电机结构参数,使得无定子轭 AFPMSM 具有低速大转矩和高速宽恒功率调速范围特性。计算分析电机的电磁特性,仿真结果表明,无定子轭 AFPMSM 电磁转矩为 $96.2 \text{ N}\cdot\text{m}$,转矩波动为 3.3%,恒功率调速范围达到 5:1,为其在宽速域领域应用奠定基础。

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

赵晓坤、张程进行了方案设计,张程进行了试验研究、内容总结与论文撰写,赵晓坤、朱良宽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 was carried out by Zhao Xiaokun and Zhang Cheng. Zhang Cheng conducted the experimental research, content summarization, and manuscript drafting. The manuscript revision and review were performed by Zhao Xiaokun and Zhu Liangkuan. All authors have read and approved the final manuscript for submission.

参考文献

- [1] 马涛,林晓刚,解伟. 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 [J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 67-75.
Ma T, Lin X G, Xie W. Optimization design of excitation source parameters and magnetic field regulation characteristics analysis for parallel dual-rotor hybrid self-excited motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 67-75.
- [2] 任明洋,骆皓,朱坤硕,等. 基于空间极对数宽频带耦合的双转子同步风力发电机电磁特性分析 [J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 85-96.
Ren M Y, Luo H, Zhu K S, et al. Electromagnetic characteristic analysis of dual-rotor synchronous wind generator based on wide-bandwidth spatial pole pair [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 85-96.
- [3] 徐航,黄平林. 聚磁式转子轴向磁齿轮复合电机的有限元分析 [J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 50-58.
Xu H, Huang P L. Study on an axial magnetic gear composite motor with spoke-typerotor by finite element method [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 50-58.
- [4] Shao L Y, Navaratne R, Popescu M, et al. Design and construction of axial-flux permanent magnet motors for electric propulsion applications—A review [J]. IEEE Access, 2021, 9: 158998-159017.
- [5] Nguyen M D, Yang J W, Hoang D T, et al. Electromagnetic analysis of YASA axial flux motor using harmonic modeling considering nonlinear core permeability [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2025, 61(9): 8203412.
- [6] 孙奥,冯桂宏. 矿用工程车轴向磁通永磁牵引电机[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(4): 77-82+103.
Sun A, Feng G H. Axial flux permanent magnet traction motor of mine engineering vehicle [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(4): 77-82+103.
- [7] Do V V, Huynh T A, Hsieh M F. Design and analysis of flux-intensifying spoke-type IPM motor for improving output torque and flux-weakening performance [C]// 2022 25th International

- Conference on Electrical Machines and Systems, Chiang Mai, Thailand, 2022: 1-6.
- [8] Cui S, Feng C, Zhang Y. Design and simulation of a new type of axial flux wireless electrically excited synchronous motor [C]// 2024 11th International Forum on Electrical Engineering and Automation, Shenzhen, China, 2024: 846-851.
- [9] 章友京, 刘琳, 沙文瀚. 电动汽车轴向轮毂电机的工作特性[J]. 时代汽车, 2021(6): 101-105.
Zhang Y J, Liu L, Sha W H. Working characteristics of axial hub motors for electric vehicles [J]. Auto Time, 2021(6): 101-105.
- [10] 郭飞, 李春艳, 初秋. 转子结构参数对新型反凸极永磁同步电机性能影响的研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 45-50+70.
Guo F, Li C Y, Chu Q. Research on influence of structural parameters on performance of new negative-salient PMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(10): 45-50+70.
- [11] Wang C, Li K, Liu Y P, et al. Multi-objective optimization with hybrid 2-d equivalent model on axial flux permanent magnet machine for special electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(2): 5819-5830.
- [12] Wang D H, Peng C, Xue D H, et al. Performance assessment and comparative study of a permanent magnet machine with axial flux regulator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1522-1531.
- [13] 寇宝泉, 赵晓坤, 王梦瑶, 等. 反凸极永磁同步电机及其控制技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 39(8): 2414-2425.
Kou B Q, Zhao X K, Wang M Y, et al. Overview of negative-salient permanent magnet synchronous motor and its control technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 39(8): 2414-2425.
- [14] Geng W W, Wang Y, Wang J, et al. Comparative study of yokeless stator axial-flux PM machines having fractional slot concentrated and integral slot distributed windings for electric vehicle traction applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(1): 155-166.
- [15] Zhao X K, Kou B Q, Zhang L, et al. Design and analysis of permanent magnets in a negative-salient permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Access, 2020, 8: 182249-182259.
- [16] 李烽, 王凯, 宋旭敏, 等. 交流励磁型混合励磁发电机高效宽域协调控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(10): 4046-4055.
Li F, Wang K, Song X M, et al. Coordinated control with high efficiency in wide operating region of AC-excited hybrid excitation generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 4046-4055.
- [17] Zhao J, Yan Y S, Gu Z X, et al. Research on an axial-axial flux compound-structure PMSM with varying air gap to fulfill field-weakening control [C]// 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, Hangzhou, China, 2014: 3345-3349.
- [18] Heins G, Thiele M, Patterson D, et al. Increase in operating range and efficiency for variable gap axial flux motors [C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Pittsburgh, PA, USA, 2014: 5870-5876.
- [19] Geng W W, Wang J, Fu Y, et al. Design and performance analysis of a novel axial-flux IPM machine for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 11(2): 5569-5577.
- [20] Moncada R H, Tapia J A, Jahns T M. Analysis of negative-saliency permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 122-127.
- [21] Hou J N, Geng W W, Li Q, et al. 3-D equivalent magnetic network modeling and FEA verification of a novel axial-flux hybrid-excitation in-wheel motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(7): 1-12.
- [22] Ye C Y, Du Y H, Yang J T, et al. Research of an axial flux stator partition hybrid excitation brushless synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-4.
- [23] 卢浩, 杜怿, 刘新波, 等. 磁场调制型双馈无刷混合励磁电机及其静态性能分析 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 2969-2978.
Lu H, Du Y, Liu X B, et al. Static performance analysis of magnetic field-modulated doubly-fed brushless hybrid excitation motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 2969-2978.
- [24] Shen Q P, Xu Q W. Design of variable air gap axial flux permanent magnet machine for extending the

- speed region [C]// 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, Hangzhou, China, 2014: 1114-1118.
- [25] Wang X G, Wan Z W, Tang L, et al. Electromagnetic performance analysis of an axial flux hybrid excitation motor for HEV drives [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31 (8): 1-5.
- [26] Xu L, Zhu X, Fan W, et al. Comparative analysis and design of partitioned stator hybrid excitation axial flux switching PM motors for in-wheel traction applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 37(2): 1416-1427.
- [27] Wan Z X, Pei Y L, Chai F. A novel torque-coupled axial-flux permanent magnet motor with magnetic coupler for flux weakening [C]//2024 International Conference on Electrical Machines Torino, Italy, 2024: 1-7.
- [28] Zhao J, Cheng D S, Zheng P, et al. Field weakening capability investigation of an axial flux permanent-magnet synchronous machine with radially sliding permanent magnets used for electric vehicles [J]. Journal of Applied Physics, 2022, 111 (7): 07A719.
- [29] Chen H, El-Refaie A M, Liu Y. Investigation of a PM flux-modulated motor with mechanical flux-weakening solution for wide speed-range operation in traction applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(8): 8646-8657.

收稿日期:2025-08-16

收到修改稿日期:2025-12-09

作者简介:

张程(1999—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机设计与优化,zcshangana@163.com;

* 通信作者:赵晓坤(1993—),女,博士,副教授,研究方向为电动汽车的永磁同步电机设计与优化,zhaoxk_hit@163.com。