

IE5 能效等级永磁辅助式同步磁阻 电机系列产品的开发

姚丙雷^{1*}, 王文良¹, 王鸿鹄¹, 王禹羲¹, 陆海玲¹, 张永亮²

[1. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063;

2. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063]

Development of IE5 Efficiency Class Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Series Products

YAO Binglei^{1*}, WANG Wenliang¹, WANG Honghu¹, WANG Yuxi¹,
LU Hailing¹, ZHANG Yongliang²

[1. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd.,
Shanghai 200063, China]

Abstract: [Objective] To meet the requirements of the IE5 international maximum energy efficiency class and address the issues of high cost in permanent magnet motors, excessive material consumption in asynchronous motors for achieving IE5 efficiency class, and low power factor in pure reluctance motors, this study developed a series of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASRM) featuring high efficiency, high power factor, and low cost. [Methods] Firstly, the influences of key parameters, including the number of motor poles, air gap length, the number of flux barrier layers, flux barrier ratio, and rotor rib width, on electromagnetic performance such as torque, efficiency, and power factor were systematically investigated. Then, the finite element method was employed for parameter optimization design and torque-angle characteristic simulation, through which the optimal current control angle was determined. Moreover, an electromagnetic-structural coupled strength analysis was conducted on the rotor flux barrier bridge to guarantee mechanical reliability. Finally, the trial production and testing of nine prototypes across six specifications were completed. [Results] All prototypes achieved the IE5 energy efficiency class, and their power factors generally exceeded the requirements of industrial standards. Cost analysis results demonstrated that, at the same output power, the total cost of active materials for this series of motors was lower than that of IE4 efficiency class induction motors and permanent magnet motors, showing a particularly significant cost advantage.

[Conclusion] The series of PMASRM developed in this study have successfully achieved the IE5 energy efficiency target. They demonstrate outstanding cost-performance ratio across most commonly used speed points, integrating both energy-saving and material-saving characteristics. With substantial market potential, the proposed motor series provides robust technical support for enhancing the international competitiveness of China's motor industry.

Key words: permanent magnet assisted synchronous reluctance motor; IE5 efficiency class; parameter optimization; electromagnetic performance

摘要: [目的]为满足 IE5 国际最高能效等级标准要求,并应对永磁电机成本高、异步电机实现 IE5 能效等级材料用量大以及纯磁阻电机功率因数低等问题,本研究开发了兼具高效率、高功率因数及低成本优势的永磁辅助式同步磁阻电机(PMASRM)系列产品。[方法]首先,系统研究了电机极数、气隙长度、磁障层数、磁障比和转子肋宽等关键参数对转矩、效率以及功率因数等电磁性能的影响规律。然后,采用有限元法进行了参数优化设计与矩角特性仿真,确定了最佳电流控制角,并对转子隔磁桥进行了电磁-结构耦合强度分析以确保机械可靠性。最后,完成了 6 个规格 9 台样机的试制与测试。[结果]样机效率全部达到 IE5 能效等级,功率因数普遍高于行业标准要求。成本分析结果表明,在相同输出功率下,该系列电机的有效材料总成本低于 IE4 能效等级异步电机和永磁电机,成本优势尤为显著。[结论]本研究开发的

PMASRM 系列产品成功实现了 IE5 能效目标,并在多数常用转速点展现出优异的性价比,兼具节能与节材特性,市场潜力广阔,为我国电机行业提升国际竞争力提供了有力支撑。

关键词: 永磁辅助式同步磁阻电机;IE5 能效等级;参数优化;电磁性能

0 引言

自 2008 年 10 月国际电工委员会首次发布 IEC 60034-30“单速、三相笼型感应电动机的能效分级”标准后,在 2014 年、2016 年分别发布了 IEC 60034-30-1;2014《旋转电机效率分级(IE 代码)第 1 部分:电网供电的交流电动机》及 IEC 60034-30-2;2016《旋转电机效率分级(IE 代码)第 2 部分:变速交流电动机》,标准分别规定了电网供电运行的交流电动机及变频器供电的变频调速电动机的能效等级。标准的第 2 部分首次正式发布了 IE5 能效指标,是目前最高的能效等级^[1]。

永磁同步电机由于稀土永磁的作用,可减少电机无功励磁电流,具有较高的能效及优良的性能,但成本较高^[2-3]。纯磁阻电机不需要稀土永磁材料,依靠磁阻转矩运行,成本低^[4-8],但功率因数低、电流大,不易实现 IE5 能效等级。三相异步电机要实现 IE5 能效,需采用较高牌号硅钢材料,新型不等匝绕组及良好的制造工艺^[9-10],且需使用较多有效材料,成本较高。

永磁辅助式同步磁阻电机(Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, PMASRM)是一种不含稀土永磁材料的同步电机,兼具永磁电机与纯同步磁阻电机的优点^[11-15],其电机转子设置多层永磁体槽,增大了电机凸极比,且内有铁氧体永磁材料励磁^[16-18]。PMASRM 具有结构简单、效率高、功率因数高以及转矩密度高等特点,近年来成为国内外科研机构与电机生产企业关注的方向^[19-20]。

PMASRM 在充分利用永磁材料高性能优势的同时,有效避免了永磁材料价格波动及稀土供应链不稳定带来的风险,显著减少了因稀土资源不可持续性及其开采过程引发的环境污染问题^[21-22]。同时,PMASRM 由于转子无导条,无转子铜耗,效率更高,能达到 IE5 能效等级^[23]。国

内外科研机构与制造企业积极推动 PMASRM 产品的研究。在国外,ABB 公司已推出达到 IE5 能效等级的相关产品;在国内,有部分企业成功开发出符合 IE4 与 IE5 能效标准的 PMASRM 系列产品,并实现了规模化应用。

为了满足市场需求,提升国际竞争力,根据国内外电机能效发展的最新趋势,2021 年 7 月启动了 IE5 能效等级 PMASRM 系列产品的联合研发工作,成立了由上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司牵头,联合卧龙电气驱动集团股份有限公司、西安西玛电机有限公司、佳木斯电机股份有限公司、常州市南方电机有限公司、安波电机(宁德)有限公司、山东力久特种电机股份有限公司、中车永济电机有限公司、江西江特电机有限公司、宁波鸿达电机模具有限公司、山东科汇电力自动化股份有限公司、苏州巨峰电气绝缘系统股份有限公司、上海 ABB 电机有限公司、西门子电机(中国)有限公司、德州恒力电机有限责任公司以及衡水电机股份有限公司等二十余家企业组成的 IE5 能效等级 PMASRM 系列产品开发联合设计工作组。

工作组针对 TCYP 系列(IP55)PMASRM 系列产品的开发,开展了气隙长度、磁障层数、磁障比以及转子肋宽等电机参数对电磁性能影响的技术研究,以及矩角特性仿真、最佳电流控制角度的优化和转子隔磁桥的强度核算等关键技术研究,并完成了 6 个规格 9 台样机的试制与测试,样机全部达到了 IE5 能效等级,且其性能达到行业标准《TCYP 系列变频调速永磁磁阻式三相同步电动机技术规范》的设计要求,完成了技术任务书规定的各项任务,达到了预期目标。

1 研究内容

为了确保开发的 PMASRM 系列产品达到 IE5 效率等级,同时满足产品标准的要求,对其转子拓扑结构及参数化设计方法进行了研究。

1.1 极数选择

在产品开发初期,原计划采用 6 极电机统一实现 3 000 r/min、1 500 r/min、1 000 r/min 及 750 r/min 四种额定转速。随着开发的深入,电磁计算与仿真分析表明:在 1 500 r/min、1 000 r/min 和 750 r/min 三种转速下,电机效率均可达到 IE5

能效等级;但在 3 000 r/min 转速下,由于运行频率升高至 150 Hz,铁耗显著增大,电机效率无法达到 IE5 能效等级。因此,工作组对设计方案进行了调整,将 3 000 r/min 转速改由 4 极电机实现。因此,最终系列产品采用 4 极和 6 极两种极数,4 极电机用于实现 3 000 r/min 转速,6 极电机用于覆盖 1 500 r/min、1 000 r/min 及 750 r/min 三种转速。系列产品极数、额定转速及对应频率的关系如表 1 所示。

表 1 系列产品极数、转速及频率的对应关系

Tab.1 Corresponding relationship between pole number, speed, and frequency for the series products

额定转速/(r·min ⁻¹)	极数	额定频率/Hz
3 000	4	100
1 500	6	75
1 000	6	50
750	6	37.5

1.2 电机结构参数对电磁性能的影响

为提升 PMASRM 的综合性能,需对其结构参数进行优化设计,以提高单位电流转矩输出,并降低绕组损耗。本研究从永磁转矩和磁阻转矩两方面进行协同优化:一方面通过增强永磁磁链来提高永磁转矩分量;另一方面通过优化电机拓扑结构来提升凸极比,增强磁阻转矩分量。采用有限元分析方法,系统研究了气隙长度、磁障层数、磁障比和转子肋宽等关键结构参数对电机电磁性能的影响规律,以确定电机结构配置方案。

1.2.1 气隙长度对电磁性能的影响

在传统永磁电机中,电磁转矩 T_{em} 主要来源于永磁转矩,气隙变化对电磁性能的影响相对较小,因此通常采用较大气隙以降低加工难度,抑制齿槽效应引起的转矩脉动和波形畸变。相比之下,PMASRM 的电磁性能对气隙尺寸变化较为敏感,设计中通常需采用较小的气隙值。为优化此类电机的综合性能,深入研究气隙长度对电磁性能的影响规律具有重要意义。图 1、图 2 分别为典型规格 TCYP250M-6-1500 产品不同气隙长度(0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm、1.1 mm、1.2 mm 和 1.3 mm)对电感参数、电磁转矩的影响曲线。

由图 1 可知,PMASRM 的电感参数对气隙长

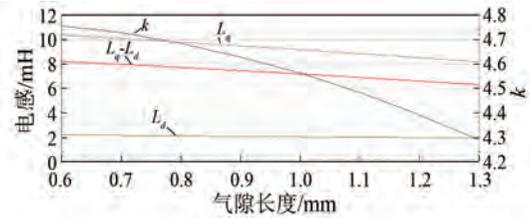


图 1 气隙长度对电感参数的影响

Fig.1 The influence of air gap length on inductance parameters

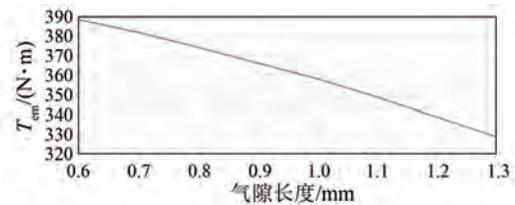


图 2 气隙长度对电磁转矩的影响

Fig.2 The influence of air gap length on electromagnetic torque

度变化较为敏感。随着气隙长度增大, d 、 q 轴电感 L_d 、 L_q 均呈下降趋势,但 L_d 下降幅度较小,而 L_q 显著降低。具体而言, L_q-L_d 从 8.2 mH 降至 6.3 mH,降幅达 23%;凸极比 $k=L_q/L_d$ 由 4.73 降至 4.29。由图 2 可知,随着气隙长度增大, T_{em} 从 388.4 N·m 降至 328.1 N·m,降幅达 15.5%。

这一变化趋势主要源于 d 、 q 轴磁路结构的差异。在 d 轴磁路中,磁阻主要集中于磁障、永磁体及气隙部分,由于气隙长度通常远小于磁障和永磁体厚度,其变化对 d 轴总磁阻影响有限。而在 q 轴磁路中,磁阻主要分布于气隙、定子齿部、定子轭部以及转子导磁通道,气隙磁阻在总磁阻中占比较高,因此气隙长度对 L_q 的影响远大于 L_d 。

1.2.2 磁障层数对电磁性能的影响

PMASRM 通常采用多层磁障结构,并在其中嵌入永磁体。磁障层数不仅影响磁场分布,还与转子的机械强度及工艺性密切相关。转子中设置多层磁障相当于在转子上开设多个槽口,容易引起齿槽效应,加大转矩脉动。本文在保持磁障比基本一致的前提下,针对磁障层数为 3 层、4 层的两种转子结构进行对比分析,其有限元仿真模型如图 3 所示。

两种转子结构均采用铁氧体永磁材料。在铁心长度方面,3 层、4 层磁障结构稍有不同,3

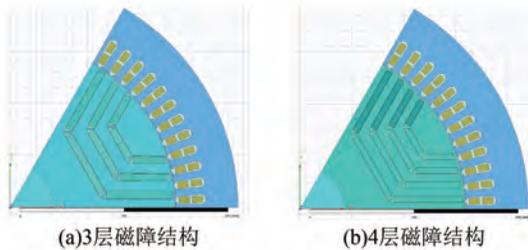


图 3 不同磁障层数的电机有限元模型

Fig. 3 Finite element models of motors with different flux barrier layer numbers

层磁障结构稍长。在永磁体布置方面,3 层磁障结构的各层永磁体厚度一致,每层布置三块等宽永磁体;4 层磁障结构的各层永磁体厚度也相同,每层也布置三块等宽永磁体。3 层磁障结构永磁体总厚度为 21 mm,4 层磁障结构为 22.8 mm,两者磁障比基本一致。通过对两种电机方案进行对比分析,得到气隙磁场的傅里叶分析结果、气隙磁密谐波幅值对比分别如图 4、图 5 所示。

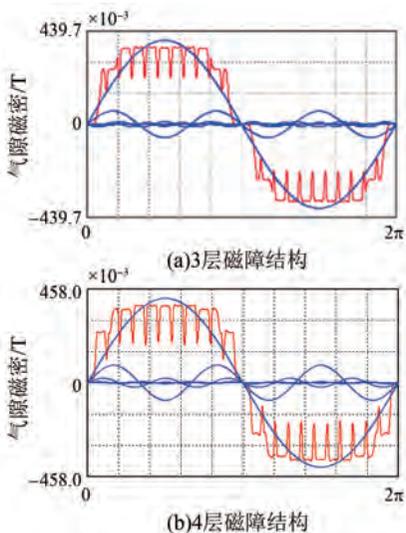


图 4 不同磁障层数的气隙磁场傅里叶分析结果

Fig. 4 Fourier analysis results of the air gap magnetic field with different flux barrier layer numbers

由图 5 可知,3 层磁障结构的气隙磁密基波幅值和高次谐波(7 次、9 次、11 次和 13 次)幅值大于 4 层磁障结构,但低次谐波(3 次、5 次)幅值小于 4 层磁障结构。

电机性能仿真结果如表 2 所示。可见,3 层磁障结构的电机功率因数更高,4 层磁障结构的电机输出转矩和电机效率更高。

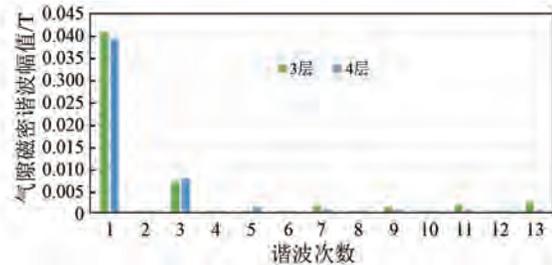


图 5 不同磁障层数的气隙磁密谐波幅值

Fig. 5 Harmonic amplitudes of air gap magnetic flux density with different flux barrier layer numbers

表 2 3 层与 4 层磁障电机性能对比

Tab. 2 Performance comparison of motors with three-layer and four-layer flux barriers

磁障层数	效率/%	功率因数	输出转矩/(N·m)	k
3	96.61	0.969 4	355.2	4.74
4	96.99	0.931 7	357.8	4.56

1.2.3 磁障比对电磁性能的影响

将磁障比 α 定义为 d 轴方向磁障总厚度与转子总厚度之比。 α 对 L_d 、 L_q 影响显著。 $\alpha=0$, 意味着转子 d 轴方向完全由导磁材料构成。 α 的变化会显著改变磁路特性。 α 为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 时所对应的 PMSRM 有限元模型如图 6 所示。

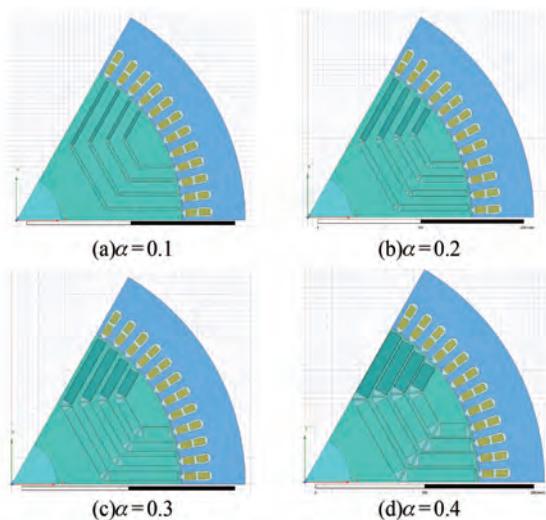


图 6 不同磁障比的电机有限元模型

Fig. 6 Finite element models of motors with different flux barrier ratios

在保持磁障层数不变的条件下,电机电感参数、电磁转矩随 α 变化的规律如图 7、图 8 所示。由图 7 和图 8 可知,随着 α 的增大, d 轴磁路的隔磁作用增强,但其隔磁效果存在饱和趋势;当 α 大

于0.3后, L_d 的下降幅度逐渐趋缓。在 q 轴磁路中, α 增大使得导磁面积减小,导致该区域磁路趋于饱和,引起 L_q 显著降低。 L_q-L_d 在 $\alpha=0.25$ 时达到最大, T_{em} 也在此时取得较大值,为 $340\text{ N}\cdot\text{m}$ 。当 α 进一步增大至0.4后,因磁路饱和加剧,凸极比 k 与 L_q-L_d 均下降, T_{em} 大幅降低,说明 α 对 T_{em} 具有显著影响。

此外,随着 α 的增大,永磁体厚度也相应增加,其工作点得以提升,从而增大了永磁转矩分量,但同时磁阻转矩分量相应减小。值得注意的是,永磁体工作点达到一定程度后基本稳定,仅依靠增加永磁体厚度对整体性能的提升作用有限。因此,存在最优磁障比,使电机的 T_{em} 达到最大值。

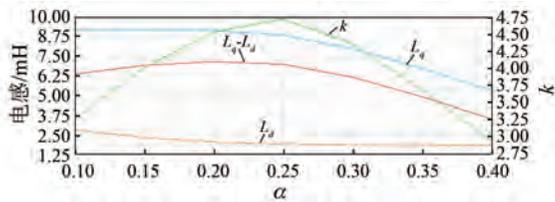


图7 磁障比对电感参数的影响

Fig. 7 The influence of flux barrier ratio on inductance parameters

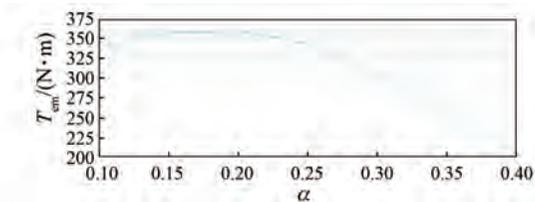


图8 磁障比对电磁转矩的影响

Fig. 8 The influence of flux barrier ratio on electromagnetic torque

1.2.4 转子肋宽对电磁性能的影响

PMASRM 利用转子肋部磁通密度的高度饱和和作用来增加 d 轴磁路磁阻,从而减小 L_d ,使磁力线走向更趋合理,增大磁阻转矩,以改善电机性能。因此研究转子肋宽对 PMASRM 电磁性能的影响很有必要。电机电感参数、 T_{em} 随转子肋宽的变化规律如图9、图10所示。

由图9可知,随着转子肋宽的增大, L_d 呈上升趋势。这是由于磁通倾向于沿磁阻最小路径闭合,当转子肋宽增大时, d 轴磁路的磁阻降低,导致 L_d 增加,并伴随一定漏磁现象。相比之下,转

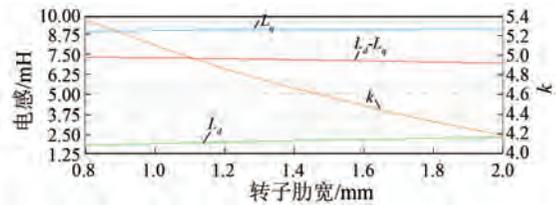


图9 转子肋宽对电感参数的影响

Fig. 9 The influence of rotor rib width on inductance parameters

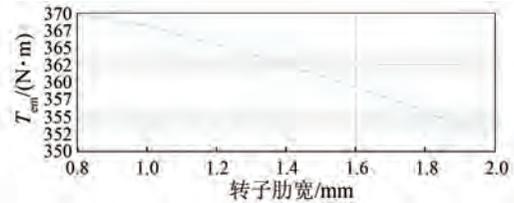


图10 转子肋宽对电磁转矩的影响

Fig. 10 The influence of rotor rib width on electromagnetic torque

子肋宽对 L_q 的影响较小。转子肋宽从1mm增大至2mm, k 下降22%, T_{em} 减小 $18\text{ N}\cdot\text{m}$,说明增大转子肋宽会削弱电机的磁阻转矩。

因此,在设计转子肋部结构时,需平衡转子机械强度与电磁性能。若忽略加工成本与工艺复杂度,可采用无导磁肋结构,即在转子肋部使用非导磁材料替代铁磁材料。该方式既能保证所需的机械强度,又能有效抑制 L_d 增大,从而改善电机整体性能。

PMASRM 的 k 作为关键电磁参数,仅取决于电机结构设计。本系列产品中 k 介于3.3~5.5之间。

1.3 电机负载特性计算

1.3.1 矩角特性仿真

PMASRM 的电磁功率 P_{em} 可表示为

$$P_{em} \approx P_1 \approx \frac{mE_0U}{X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta) \quad (1)$$

式中: P_1 为输入功率; m 为相数; E_0 为空载反电势; U 为端电压; X_d 、 X_q 分别为 d 、 q 轴同步电抗; θ 为转矩角。

由式(1)可得 T_{em} 为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{mpE_0U}{\omega X_d} \sin \theta + \frac{mpU^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta) \quad (2)$$

式中: Ω 为电机机械角速度; ω 为电机电角速度; p 为极对数。

利用 Maxwell Ansoft 软件对电机矩角特性进行仿真。设定转子 d 轴与定子 A 相轴线重合, 采用电压源激励, 并使其相位角与功角一致。通过参数化扫描方式改变功角, 计算各角度下的输出有功, 最终得到如图 11 所示的矩角特性曲线。

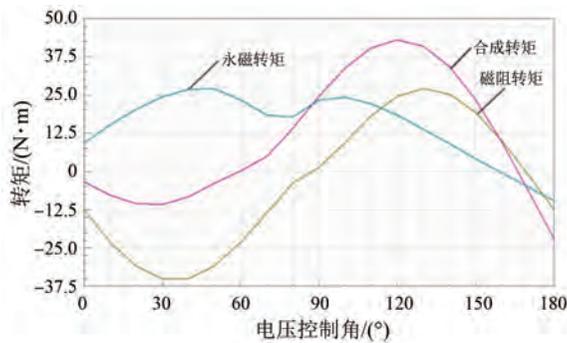


图 11 矩角特性曲线

Fig. 11 Torque-angle characteristic curves

由图 11 可知, 由于 PMSRM 的 $X_d < X_q$, 磁阻转矩呈负正弦特性, 导致合成转矩最大值对应的转矩角大于 90° 电角度, 约为 120° 电角度, 最大合成转矩 T_{\max} 为 $42.93 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。在该工作点, 永磁转矩为 $18.44 \text{ N}\cdot\text{m}$, 占总转矩的 43%; 磁阻转矩为 $24.49 \text{ N}\cdot\text{m}$, 占总转矩的 57%。可见, 磁阻转矩在合成转矩中起主导作用。额定转矩 T_N 对应的转矩角为 80° 电角度。矩角特性上的转矩最大值也称为失步转矩, 电机的失步转矩倍数 T_{po} 为

$$T_{po} = \frac{T_{\max}}{T_N} = \frac{42.93}{14.27} \approx 3.008 \quad (3)$$

由式(3)可知, 该结果满足过载倍数的要求。

1.3.2 电流控制角的确定

在瞬态场有限元模型中, 通过扫描电流控制角 θ_i 可确定其最优值, 并获取输出转矩-电流控制角特性曲线。有限元法能够充分考虑磁路饱和及材料非线性等因素, 因此所得结果能准确反映电机的固有特性。

本文计算了电流幅值分别为额定有效值的 10%、20%、...、100% 共 10 种工况下输出转矩随 θ_i 变化的曲线, 结果如图 12 所示。

由图 12 可知, 随着电流的增大, 输出转矩逐渐提升; 对于任一给定电流, 存在一个最佳电流控制角使输出转矩达到最大。控制角偏离该最佳值

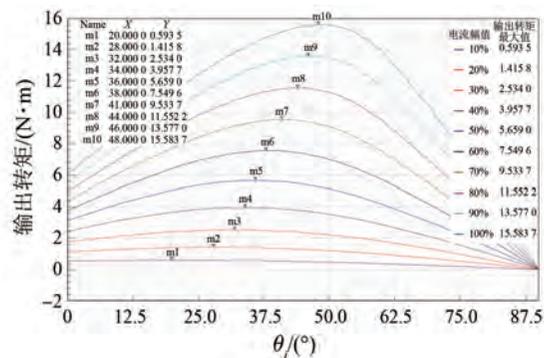


图 12 输出转矩-电流控制角特性曲线

Fig. 12 Output torque-current control angle characteristic curves

时, 转矩下降。此外, 不同电流下的最佳电流控制角亦不相同, 其值介于 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之间, 随电流增大呈上升趋势。在电流较低时, 相同电流增幅所引起的控制角变化更为显著。当电流为 4.5 A 、控制角为 48° 时, 电磁转矩为 $14.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 接近电机额定转矩。

1.4 转子隔磁桥的强度核算

隔磁桥在转子中主要起连接与结构增强作用。从电磁性能角度出发, 为维持 L_d 、 L_q 间的显著差异, 隔磁桥宽度应尽可能减小。然而在电机运行过程中, 转子受到电磁力与离心力的共同作用, 若其机械强度不足, 可能导致结构损坏, 特别是在高速运行时, 离心力对转子强度的影响更为突出。同步磁阻电机的多层磁障结构导致转子包含多个切向隔磁桥, 为增强整体机械强度, 本文针对不同规格电机设置了径向隔磁桥。为确保隔磁桥满足强度要求, 需对其进行详细的仿真分析。

在强度分析中, 首先对转子施加电磁载荷, 通过 Maxwell 电磁计算得到转子所受电磁力分布, 结果如图 13 所示。

将电磁力计算结果作为载荷导入结构场进行分析, 耦合分析流程如图 14 所示。

根据 GB/T 755-2019 的规定, 交流电机应能承受 1.2 倍最高额定转速, 超速试验后应无永久性异常变形且不产生妨碍电机正常运行的缺陷。由于该规格电机的额定转速为 1500 r/min , 最高转速为 1800 r/min , 因此将转子转速设定为 1.2 倍最高转速, 即 2160 r/min , 其应力分布如图 15 所示。

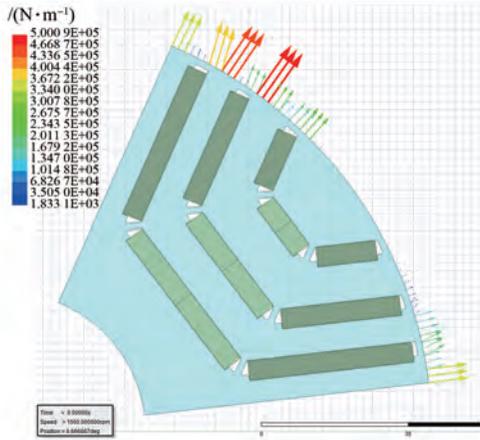


图 13 转子电磁力分布

Fig. 13 Rotor electromagnetic force distribution

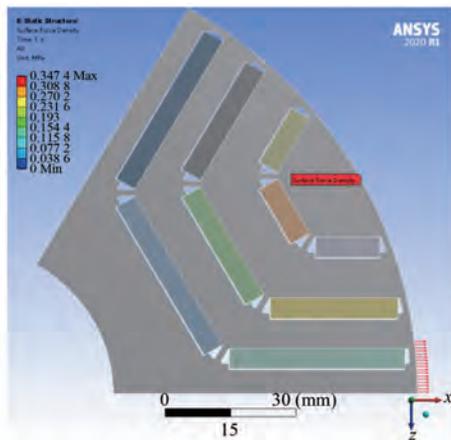


图 14 耦合分析流程

Fig. 14 Coupling analysis process

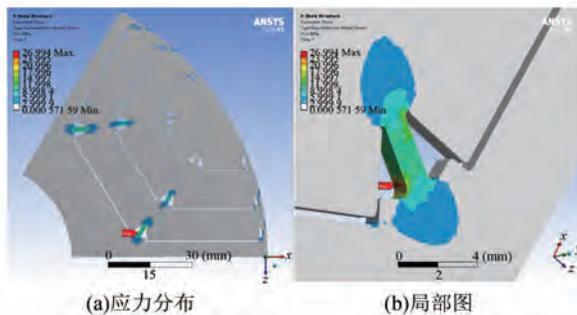


图 15 转子应力分布

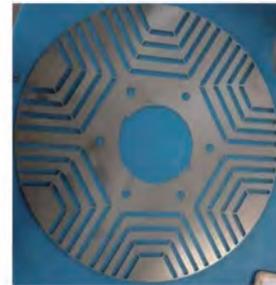
Fig. 15 Rotor stress distribution

由图 15 可知,转子最大应力集中于第一道隔磁桥处,为 26.994 MPa。所采用的硅钢片材料为 50WW270,其安全系数约为 16.3,满足设计要求。

2 样机试制与验证

为验证本文所提设计方法与研究内容的可行

性与准确性,在完成全系列电机设计后,选取典型规格进行了样机试制。样机主要零部件结构与型式试验现场如图 16 与图 17 所示。



(a)转子冲片



(b)转子铁心

(c)定子铁心与绕组

图 16 样机主要零部件

Fig. 16 Main components of the prototype



(a)TCYP180L-6-1500

(b)TCYP112M-6-1500

图 17 不同型号样机型式试验

Fig. 17 Type tests of different prototype models

对试制样机的效率进行了系统测试,结果如表 3 所示。

表 3 样机效率

Tab. 3 Prototype efficiency

样机型号	额定功率/kW	IE5 效率/%	IE5 效率 (变频)/%	实测效率/%
TCYP100L-4-3000	4	91.10	89.90	90.50
TCYP112M-6-1500	4	92.80	91.81	92.40
TCYP112M-6-1500	4	92.80	91.81	92.60
TCYP132M-6-1500	7.5	93.30	92.37	92.50
TCYP180L-6-1500	22	95.50	94.86	95.60
TCYP180L-6-1500	22	95.50	94.86	95.80
TCYP180L-6-1500	22	95.50	94.86	95.00
TCYP180L-6-1500	22	95.50	94.86	96.10
TCYP280M-6-1500	90	96.90	96.45	96.50

测试过程严格遵循国家标准的相关规定,效率保留四位有效数字,功率因数保留三位有效数字,9 台样机均达到了 IE5 效率水平。

对 9 台样机中的 6 个规格进行了功率因数测试,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,除 TCYP100L-4-3000 功率因数偏低外,其余 4 个规格电机的功率因数测试值均明显高于行业标准规定的指标,平均较标准值高 0.081 左右。TCYP100L-4-3000 功率因数偏低的原因如下:新产品工艺不稳定、控制器有优化空间。

表 4 样机功率因数

Tab. 4 Prototype power factor

样机型号	额定功率/kW	功率因数标准值	功率因数实测值
TCYP100L-4-3000	4	0.88	0.834
TCYP112M-6-1500	4	0.80	0.950
TCYP112M-6-1500	4	0.80	0.922
TCYP180L-6-1500	22	0.85	0.940
TCYP180L-6-1500	22	0.85	0.939
TCYP180L-6-1500	22	0.85	0.913

3 电机成本分析

为评估不同技术路线下的电机经济性,对 IE5 能效等级 PMASRM、永磁电机及 IE4 能效等级三相异步电机进行了成本对比分析。

从系列整体来看,总输出功率相同时,PMASRM 的有效材料总成本最低,展现出显著的成本优势,其折算后的每千瓦有效材料成本分别较异步电机和永磁电机降低 19% 和 9%,具有明显的性价比。

为进一步分析成本结构,按不同转速对三种电机的每千瓦有效材料成本进行了细分对比,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,在高速(3 000 r/min)工况下,永磁电机的材料成本最具竞争力;在中低速(1 500 r/min 与 1 000 r/min)工况下,IE5 能效等级 PMASRM 的成本优势最为突出;在低速(750 r/min)工况下,永磁电机因需使用更多永磁体,成本显著上升,IE5 能效等级 PMASRM 的成本最低。

综上所述,IE5 能效等级 PMASRM 在全系列

及多数常用转速下均表现出更优的经济性,不仅实现了更高的能效等级,同时在材料成本上具备显著竞争力,是一种兼具节能与节材特性的低碳产品,符合国家大力发展高效节能装备的产业政策导向。

表 5 三种电机不同转速成本对比

Tab. 5 Cost comparison of three motor types at different speeds

电机类别	电机成本			
	3 000 r·min ⁻¹	1 500 r·min ⁻¹	1 000 r·min ⁻¹	750 r·min ⁻¹
IE4 能效等级异步电机	高	高	高	中
永磁电机	低	中	中	高
IE5 能效等级 PMASRM	中	低	低	低

4 结语

PMASRM 作为新型高效电机,目前国内外成熟产品较少,整体设计水平尚待提升。本项目的成功研发及相关技术成果的公开,有助于推动国内该类型电机设计能力的进步。在成本方面,该电机表现出显著优势,在同等效率水平下,其制造成本较永磁电机降低约 10% ~ 30%,材料用量较异步电机节省约 8% ~ 20%,兼具高效率与低成本特点,市场潜力广阔。

该系列电机适用于水泵、风机和压缩机等工业负载设备,在材料成本、能效等级与负载匹配等关键性能上具备独特的综合竞争力。其优越的能效表现和较低的综合成本有助于提升市场认可度,拓展应用空间,为增强我国电机行业的国际市场竞争能力提供有力支撑。

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

姚丙雷进行了系列产品设计原则的制定、方案评审与指导、研制总结及项目方案设计、仿真、试验研究、数据处理与论文撰写,王文良、王鸿鹄

和王禹锡进行了数据收集、计算与仿真分析,王禹羲、陆海玲和张永亮参与了论文的修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Yao Binglei was responsible for formulating the design principles of the series products, conducting scheme review and guidance, summarizing the development outcomes, as well as carrying out project scheme design, simulation, experimental research, data processing, and manuscript writing. The data collection, calculation, and simulation analysis were carried out by Wang Wenliang and Wang Honghu. The manuscript was reviewed and revised by Wang Yuxi, Lu Hailing and Zhang Yongliang. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 全国旋转电机标准化技术委员会. 旋转电机效率分级(IE代码)第2部分: 变速交流电机; GB/T 32891.2—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Technical Committee for Rotating Electrical Machinery of Standardization Administration of China. Rotating electrical machines-Efficiency classes (IE-code)-Part 2: Variable speed AC motors; GB/T 32891. 2-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [2] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Tang R Y. Modern permanent magnet machines theory and design [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [3] 刘栋良, 李阿强, 刘伟, 等. 电动汽车用永磁辅助同步磁阻电机转子优化 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26(9): 119-129.
Liu D L, Li A Q, Liu W, et al. Rotor optimization of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor for electric vehicles [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(9): 119-129.
- [4] 王谨, 李岩, 贾建国, 等. 反电动势和凸极率对高效永磁同步磁阻电机稳态特性影响分析 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4688-4698.
Wang J, Li Y, Jia J G, et al. Analysis of the influence of back-EMF and saliency ratio on steady-state characteristics of a high efficiency permanent magnet synchronous reluctance motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(22): 4688-4698.
- [5] 刘成成, 刘乾宇, 王韶鹏, 等. 低转矩脉动同步磁阻电机磁障形状分析与优化设计 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12): 38-47.
Liu C C, Liu Q Y, Wang S P, et al. Flux barrier shape analysis and optimal design for low torque ripple synchronous reluctance machine [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(12): 38-47.
- [6] 许东滢, 鲍晓华, 徐翌翔, 等. 同步磁阻电机转子结构优化设计 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 44-50.
Xu D Y, Bao X H, Xu Y X, et al. Rotor structure optimization design of synchronous reluctance motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(7): 44-50.
- [7] Murataliyev M, Degano M, Nardo M D, et al. Synchronous reluctance machines: A comprehensive review and technology comparison [J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(3): 382-399.
- [8] 赵晓坤, 黄梓旭, 郭启超, 等. 不对称转子永磁辅助同步磁阻电机转矩比例系数对转矩提升能力的影响研究 [J]. 电机与控制应用, 2025, 52(8): 879-887.
Zhao X K, Huang Z X, Guo Q C, et al. Investigation of torque proportion coefficient impact on torque enhancement in the asymmetric rotor PMA-SynRM [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(8): 879-887.
- [9] 赵志明. IE5能效等级三相异步电动机分析 [J]. 中国机械, 2022, 35(12): 20-26.
Zhao Z M. Analysis of three-phase asynchronous motor with IE5 efficiency class [J]. Machine China, 2022, 35(12): 20-26.
- [10] 黄坚, 顾卫东, 杨旭, 等. IE5能效等级三相异步电动机的研制 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 73-77.
Huang J, Gu W D, Yang X, et al. Development of IE5 energy efficiency three-phase asynchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(1): 73-77.
- [11] Shen J X, Lin Y Q, Sun Y, et al. Permanent magnet synchronous reluctance machines with axially combined rotor structure [J]. IEEE Transactions on

- Magnetics, 2022, 58(2): 1-10.
- [12] 曹恒佩, 艾萌萌, 王延波. 永磁辅助同步磁阻电机研究现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4575-4592.
- Cao H P, Ai M M, Wang Y B. Research status and development trend of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4575-4592.
- [13] Zhang S W, Lu C C, Wang Y H, et al. Shape design optimization and comparative analysis of a novel synchronous reluctance machine with grain-oriented silicon steel [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2024, 60(9): 8101705.
- [14] Nardo M D, Gallicchio G, Cupertino F, et al. Permanent magnet assisted synchronous reluctance machine design for light traction applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(4): 6079-6091.
- [15] 冯魏, 郭凯凯. 低转矩脉动永磁辅助同步磁阻电机转子结构优化设计[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 70-79.
- Feng W, Guo K K. Optimized rotor design for permanent magnet assisted synchronous reluctance motor with low torque ripple [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 70-79.
- [16] 杨晨, 白保东, 陈德志, 等. 可变磁通永磁辅助同步磁阻电机设计与性能分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 489-498.
- Yang C, Bai B D, Chen D Z, et al. Design and analysis of a variable flux permanent magnet assisted synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 489-498.
- [17] 王鑫颖, 佟文明. 混合辅助同步磁阻电机转子拓扑分析与优化[J]. 微特电机, 2024, 52(10): 6-10.
- Wang X Y, Tong W M. Analysis and optimization of rotor topologies for hybrid-assisted synchronous reluctance motors [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(10): 6-10.
- [18] 林迎前, 孙毅, 王云冲, 等. 稀土和铁氧体混用永磁辅助同步磁阻电机[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1145-1157.
- Lin Y Q, Sun Y, Wang Y C, et al. A hybrid PM-assisted SynRM with ferrite and rare-earth magnets [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1145-1157.
- [19] 朱焜秋, 丁海飞, 黄磊. 无轴承同步磁阻电机系统及其关键技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 261-275.
- Zhu H Q, Ding H F, Huang L. Development of bearingless synchronous reluctance motor system and key technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 261-275.
- [20] 徐翌翔, 鲍晓华, 许东滢, 等. 潜水永磁辅助同步磁阻电机转子电磁方案设计[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(8): 44-49+71.
- Xu Y X, Bao X H, Xu D Y, et al. Design of rotor for submersible permanent magnet assisted synchronous reluctance motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(8): 44-49+71.
- [21] 黄辉, 胡余生, 张恩伟, 等. 永磁辅助同步磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- Huang H, Hu Y S, Zhang E W, et al. Design and application of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [22] 顾卫东. 碳效比在电机碳属性评估中的应用实践[J]. 防爆电机, 2025, 60(4): 64-68+86.
- Gu W D. Application and practice of carbon efficiency ratio in carbon attribute evaluation of electric motors [J]. Explosion-proof Electric Machine, 2025, 60(4): 64-68+86.
- [23] Prakht V, Dmitrievskii V, Kazakbaev V. Mathematical modeling ultra premium efficiency (IE5 class) PM assisted synchronous reluctance motor with ferrite magnets [C]//2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives, Moscow, Russia, 2018: 1-6.

收稿日期:2025-12-04

收到修改稿日期:2025-12-23

作者简介:

姚丙雷(1976—),男,硕士,正高级工程师,研究方向为电机系统节能技术、永磁电机产品开发及相关标准制订工作,yaobinglei@163.com;

*通信作者:姚丙雷(1976—),男,硕士,正高级工程师,研究方向为电机系统节能技术、永磁电机产品开发及相关标准制订工作,yaobinglei@163.com。