

本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

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.
电机与控制应用, 2021, 48(10): 45.




数据监测
多维数据采集，全面运行分析
全景可视窗口，丰富报表类型


预测运维
海量行业数据，精准趋势预测
生命周期管理，性能尽在掌握


故障诊断
专业机理模型，自动故障告警
在线智能诊断，高效便捷派单


绿色节能
环保绿色先行，助力低碳生产
节能降耗减排，合理降本增效


聚汇商机
供需多方互联，协同合作共赢
有效整合资源，共享生态未来

SEARI
上电科

上海电器科学研究所(集团)有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司

云平台技术支持: 18918675776
固定电话: 021- 52669993

业务垂询: 18801608667
地址: 上海市普陀区武宁路505号9号楼



微信扫码关注我们

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*

郭 飞, 李春艳, 初 秋

(黑龙江大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 永磁同步电机性能优良, 但无法调节永磁体励磁, 导致调速范围小。利用磁桥增大 d 轴电感以及利用 W 型永磁体减小 q 轴电感, 提出一种新型的反凸极永磁同步电机 (NSPMSM) 转子结构。通过理论分析 NSPMSM 的转矩和弱磁调速的特点, 利用有限元方法验证该电机具有反凸极性。研究转子结构参数对 NSPMSM 电磁转矩和调速性能的影响。有限元弱磁仿真分析结果与理论分析结果相符合, 验证了其提高弱磁调速范围的有效性。

关键词: 反凸极永磁同步电机; 交直流电感; 弱磁; 电磁转矩

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)10-0045-06

doi: 10.12177/emca.2021.107

Research on Influence of Structural Parameters on Performance of New Negative-Salient PMSM*

GUO Fei, LI Chunyan, CHU Qiu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The performance of permanent magnet synchronous motor (PMSM) is excellent. However, the permanent magnet excitation cannot be regulated, which leads to a limited speed regulation range. A novel rotor structure of negative-salient permanent magnet synchronous motor (NSPMSM) is proposed by utilizing the magnetic bridge to increase d -axis inductance and the W-shaped permanent magnet to decrease q -axis inductance. The characteristics of torque and flux-weakening speed regulation of the NSPMSM are analyzed by theoretical analysis, and the negative-salient polarity is verified by the finite element method. The influences of rotor structure parameters on the electromagnetic torque and speed regulation performance of the NSPMSM are studied. The flux-weakening simulation results obtained by finite element method are consistent with the theoretical analysis results, which verifies the effectiveness of the structure in improving the flux-weakening speed regulation range.

Key words: negative-salient permanent magnet synchronous motor (NSPMSM); d -axis and q -axis inductance; flux-weakening; electromagnetic torque

0 引 言

永磁同步电机 (PMSM) 具有结构简单、效率高和功率密度高等优点, 在数控机床系统和电动

汽车驱动系统中具有广阔的应用前景。但因采用永磁体励磁, 固定的励磁源使得磁场难以调节, 限制了其在宽调速范围领域的进一步发展。因此, 充分发挥 PMSM 驱动系统的效率, 在现有基础上

收稿日期: 2021-07-13; 收到修改稿日期: 2021-09-19

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51307045); 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2019E075)

作者简介: 郭 飞 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种永磁同步电机设计。

李春艳 (1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为特种永磁电机设计。(通信作者)

进一步拓宽其弱磁调速范围是电机领域的一个重要研究方向^[1-3]。传统的内置式 PMSM 分为隐极电机和凸极电机 2 大类。凸极 PMSM 因其 d 轴电感小于 q 轴电感,称之为正凸极永磁同步电机 (PSPMSM)。经过转子永磁体结构上的设计,使得 PMSM d 轴电感大于 q 轴电感,故称为反凸极永磁同步电机 (NSPMSM)。与 PSPMSM 相比, NSPMSM 因其调速范围宽、过载能力强和永磁体不易退磁等优势引起了学者广泛的关注^[4-6]。

近年来,国内外学者对 PSPMSM 进行了大量的设计和分析工作,对 NSPMSM 的研究尚处于起步阶段。文献[7-8]提出了一种 NSPMSM。这种电机转子中永磁体采用 V 型分段结构,同时 q 轴位置对应的气隙比 d 轴大。采取分段永磁体使 d 轴电感增大、永磁体涡流损耗降低。弱磁调速时部分去磁磁力线不穿过永磁体而穿过永磁体之间的磁桥,相当于磁场旁路,因此提高了电机的工作点,进一步降低了永磁体不可逆去磁风险,有利于弱磁扩速。文献[9]提出了内置式弧形磁障 NSPMSM。该电机 q 轴处设置的弧形磁障尽量与 d 轴磁路平行,以减小磁障对 d 轴电感的影响,同时永磁体设置成 V 型,对 q 轴磁通有一定的阻碍作用。文献[10]提出了一种新型 NSPMSM,永磁体在转子中呈 M 形布置,在 q 轴磁路上设置三角形通风孔增加 q 轴磁阻。与普通 PMSM 相比,该 NSPMSM 减少了永磁体的用量,最大电磁转矩提高了 3.33%。NSPMSM 大部分运行状态下 d 轴电流为增磁电流,合理的控制永磁体磁化状态可以提高电机的效率和转速。文献[11]中电机为了减小 q 轴电感,在转子 q 轴处设置沿半径方向和沿圆周方向的磁障,提升了电机空载气隙磁密的正弦性。转子中永磁体选用低矫顽力的铝镍钴实现了永磁体磁化状态可调。低速时为产生大的电磁转矩使永磁体处于高磁化状态,可以减小铜耗。高速时为使电机有较宽的调速范围使永磁体处于低磁化状态,此时仅需要较小的 d 轴去磁电流,减小了铁耗,使电机在整个范围都具有较高效率。综上所述,为了实现 PMSM 宽范围调速,寻找合适的 NSPMSM 转子结构具有十分重要的意义和价值。

本文首先提出 W 型 NSPMSM 结构,验证反凸极结构的有效性。其次,分析 NSPMSM 的转

矩、转速特点,利用有限元方法分析电机的转矩和弱磁性能。仿真分析转子偏心、磁桥和永磁体对该电机转矩和弱磁能力的影响。最后,通过理论分析和仿真分析结果验证电机实现弱磁的有效性。

1 NSPMSM 结构及其特点

1.1 电机反凸极结构

新型 NSPMSM 结构如图 1 所示,与普通电机相似,电机由定子、转子和气隙构成。转子由铁心、W 型永磁体、磁桥和极间槽组成。

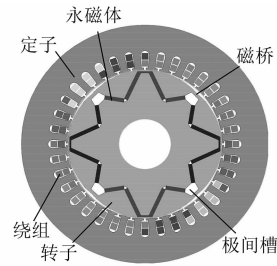


图 1 新型 NSPMSM 结构

通过在转子 q 轴处设置形状合适的极间槽,能够改变凸极比以及减小转矩脉动。转子设置磁桥给 d 轴磁通提供通路进而提高了 d 轴电感,虽然磁桥的存在降低了电磁转矩,永磁体利用率略微下降,但是 NSPMSM 在基速及基速以下运行时磁场为增强型磁场,能够增加电磁转矩的同时提高永磁体利用率,有利于扩大电机的弱磁范围。同时 W 型永磁体在 q 轴方向形成磁障减小 q 轴电感,而转子偏心又导致 d 轴方向的气隙长度比 q 轴方向小,因此既可实现 d 轴电感大于 q 轴电感,又可改善空载反电动势的正弦度。NSPMSM 的基本尺寸和额定参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子外径/mm	190	定子内径/mm	120
轴向长度/mm	100	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 500
额定功率/kW	7.5	额定电压/V	380

为验证在结构上新型转子能够实现反凸极特征,利用有限元方法分析 d 轴和 q 轴电流单独激励时电机的磁力线分布,分别如图 2 和图 3 所示。

在通入相同数值的 d 轴电流或 q 轴电流的条

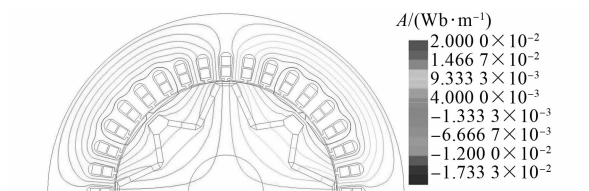


图2 d轴电流单独激励时电机磁力线分布

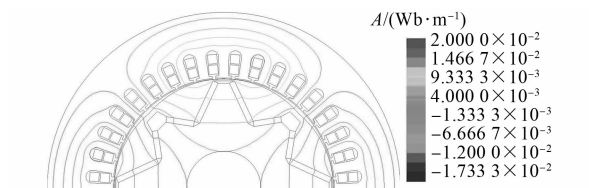


图3 q轴电流单独激励时电机磁力线分布

件下,图2和图3中直观显示出磁力线条数在仅d轴电流激励时明显多于仅q轴电流激励,验证了NSPMSM的d轴电感在数值上大于q轴电感。

1.2 NSPMSM 矩角特性

具有凸极效应的PMSM电磁转矩为

$$T_{em} = m \frac{E_0 U}{X_d \omega_s} \sin \theta + m \frac{U^2}{2\omega_s} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \quad (1)$$

式中: m 为电机相数; E_0 为空载反电动势; U 为电源电压; ω_s 为转子机械角速度; θ 为功角; X_d 、 X_q 分别为d、q轴同步电抗。

普通PMSM $L_d < L_q$, 当 $\theta < 90^\circ$ 时, 磁阻转矩分量为负值, 因此电磁转矩的最大值出现在 θ 为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间的位置。而NSPMSM $L_d > L_q$, 当 $\theta > 90^\circ$ 时, $\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) > 0$, $\sin 2\theta < 0$, 磁阻转矩为负值。因此, 为得到正向的磁阻转矩, NSPMSM 的功角只能出现在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内。

NSPMSM 外加额定负载电压时, 相同幅值状态变量在不同的相位时会导致电机输出不同大小的电磁转矩。确定转子初始位置后, 电机绕组施加三相正弦电压源激励, 通过有限元软件参数化扫描不同功角条件下得到的最大电磁转矩平均值所对应的功角如图4所示。

从图4 NSPMSM 功角特性仿真结果中可以看出 NSPMSM 的磁阻转矩分量在 $\theta < 90^\circ$ 时为正值, 验证了该电机的d轴电感大于q轴电感, 即电机具有反凸极特性。当 NSPMSM 工作在额定负载

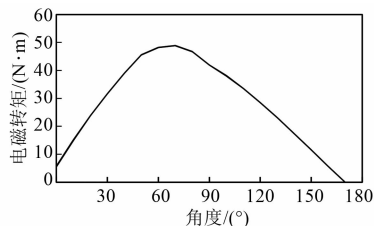


图4 NSPMSM 功角特性

状态下, d轴电枢磁通和永磁体发出的磁通位于同一个方向, 起到增磁作用, 因此相对于普通PMSM 能够降低永磁体退磁的风险, 从而增强了电机运行过程中永磁体的稳定性。

1.3 NSPMSM 转速范围

电机采用弱磁控制时, 忽略定子电阻的影响, 理论上PMSM 可以达到的理想最高转速为

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

式中: $u_{\lim}$ 为极限电压; $i_{\lim}$ 为极限电流。

从式(2)可以推断出, 当电机电压达到极限值, 绕组电流为负向的d轴电流且幅值为极限电流值时, 电机转速达到最高值。在极限电压和极限电流不变的条件下, 电机的最高转速主要取决于电机结构中对应的永磁磁链和d轴电感。较小的永磁磁链和较大的d轴电感有利于扩大电机的弱磁范围。

由于PMSM 采用永磁体激励从而无法调节永磁磁链, 提高弱磁调速范围需要电机提供较大数值的d轴电感。然而普通凸极PMSM 由于永磁体串联在d轴磁路中导致d轴电感很小, 因此弱磁调速范围小。NSPMSM d轴磁路中的磁桥能够为d轴磁通提供通路, 同时d轴方向气隙长度小于q轴方向, 因此能够获得比普通PMSM 更大的d轴电感, 理论上NSPMSM 能够有效提高电机的弱磁调速范围。

2 NSPMSM 有限元磁场分析

利用Maxwell 有限元分析软件, 对NSPMSM 外加额定负载电流源时的磁场仿真, 结果如表2所示。

2.1 额定负载转矩

NSPMSM 在额定转速 1 500 r/min 运行时额定负载相电动势和电磁转矩如图5和图6所示。

表 2 电机额定参数及仿真结果

电机参数		仿真结果	
额定功率/kW	7.5	输出功率/kW	7.54
额定转矩/(N·m)	47.7	输出转矩/(N·m)	48
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
最高转速/(r·min ⁻¹)	6 000	最高转速/(r·min ⁻¹)	>6 000

电磁转矩平均值为 50 N·m,额定负载转矩波动占平均转矩的 5%,电机运行平稳。按照额定电磁转矩的 4% 估算空载摩擦转矩,则计算 NSPMSM 输出的机械负载转矩为 48 N·m,换算成机械功率为 7.54 kW,满足额定输出功率要求。

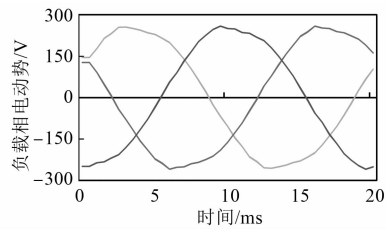


图 5 电机 1 500 r/min 运行时负载相电动势

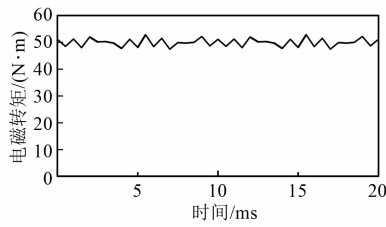


图 6 电机 1 500 r/min 运行时电磁转矩

2.2 弱磁范围仿真

NSPMSM 在 6 000 r/min 运行时负载相电动势和电磁转矩如图 7 和图 8 所示。

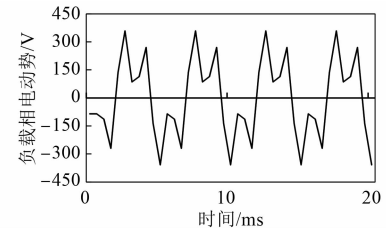


图 7 电机 6 000 r/min 运行时负载相电动势

当电机电磁转矩恰好抵消空载摩擦转矩时, NSPMSM 转速达到极限。摩擦转矩按照电磁转矩 4% 计算得出约为 2 N·m。由图 7 和图 8 可以看出, NSPMSM 运行在 6 000 r/min 时,电机输出转

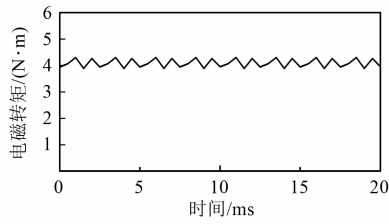


图 8 电机 6 000 r/min 运行时电磁转矩

矩能够克服空载摩擦转矩,电机负载相电动势有效值低于 220 V,即 NSPMSM 至少能够拓宽至 6 000 r/min。

3 转子偏心对 NSPMSM 影响分析

3.1 转子偏心对空载反电动势的影响

转子偏心可以改善 NSPMSM 三相绕组的空载反电动势波形的正弦性,进而降低转矩波动。

定义 *d* 轴位置转子铁心外圆与圆心的距离与 *q* 轴位置铁心外圆与圆心的距离之差为偏距离。不同的偏心距离反映了转子外圆铁心的圆弧度,即不等气隙的程度。利用有限元软件计算不同的偏心距离下的空载反电动势,经过傅里叶分解和谐波分析可得不同偏心距离对空载反电动势的影响如图 9 所示。

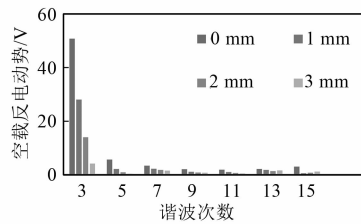


图 9 偏心距离对空载反电动势的影响

由图 9 可以看出,随着偏心距离的增大,等效气隙增大, NSPMSM 的空载反电势谐波含量降低, 3 次和 5 次谐波降低幅度较为明显,有效地增加了基波含量,减少了谐波成分,使其气隙磁密波形更接近于正弦波,减少了电机的运行损耗,提高了电机效率。

3.2 转子偏心对气隙磁密的影响

转子偏心能够改善气隙磁密的正弦性。利用有限元软件计算不同的偏心距离对气隙的影响如图 10 所示。经过傅里叶分解和谐波分析可得不同偏心距离对气隙谐波影响如图 11 所示。

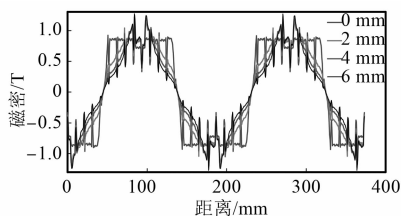


图 10 偏心距离对气隙磁密的影响

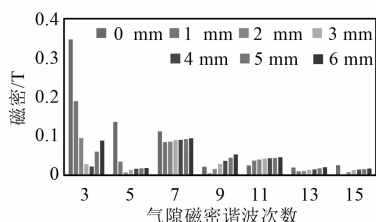


图 11 偏心距离对气隙磁密谐波的影响

由图 10 和图 11 可以看出,适度的转子偏心能够改善气隙磁通密度波形的正弦度,但偏心过大又会降低气隙磁通密度波形的正弦度,导致气隙磁通密度波形高次谐波含量会增加,理论上不利于降低铁耗及振动,因此转子偏心距离过大会对电机损耗和振动产生一定的影响。

3.3 转子偏心对电磁转矩的影响

转子偏心改善空载反电动势正弦性的同时也会影响电磁转矩,理论上气隙长度增加导致主磁路磁阻增加,降低气隙磁通密度从而导致电磁转矩减小。利用有限元软件计算不同的偏心距离对电磁转矩的影响如图 12 所示。

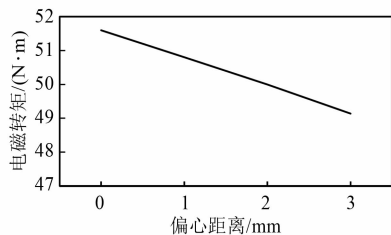


图 12 偏心距离对电磁转矩的影响

由图 12 可以看出,随着偏心距离的增加,等效的气隙长度增大。转子为圆时电磁转矩最大,随着偏心距离的增大,电磁转矩降低。

3.4 转子偏心对弱磁范围的影响

转子偏心使等效气隙长度增加,气隙磁通密度下降,理论上有利于扩大电机的转速范围。随

着偏心距离的增大,电机弱磁范围会越宽。利用有限元软件计算不同的偏心距离对弱磁范围的影响如图 13 所示。

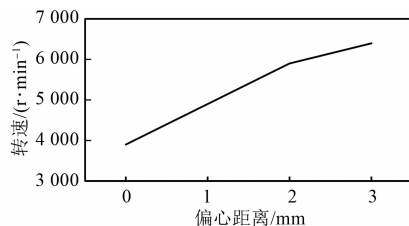


图 13 偏心距离对弱磁范围的影响

仿真结果表明较大的偏心距离有利于提高电机的最高转速。但偏心距离增加也使等效气隙增大,电磁转矩会下降,气隙磁通密度波形高次谐波含量会增加,不利于降低铁损及振动。因此选择偏心距离时应在满足额定转矩的前提下选择相对较为合适的偏心距离值,从而提高电机的弱磁范围。

4 磁桥对 NSPMSM 影响分析

4.1 磁桥对电磁转矩的影响

q 轴处极间槽与转子外圆之间的磁桥径向宽度影响 NSPMSM 电磁转矩。调整极间槽形状及大小可以调节磁桥宽度,利用有限元软件计算不同的磁桥宽度对电磁转矩的影响如图 14 所示。

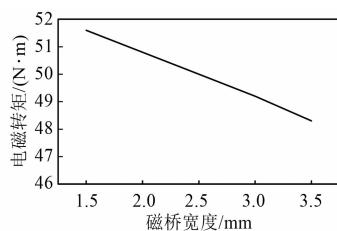


图 14 磁桥宽度对电磁转矩的影响

电磁转矩随着磁桥宽度的变大而逐渐降低。因为磁桥越大,永磁体经过磁桥在转子内部闭合的磁力线越多,极间漏磁越大,所以会降低电磁转矩。

4.2 磁桥对弱磁范围的影响

q 轴处极间槽与转子之间的磁桥宽度影响 NSPMSM 的 d 、 q 轴电感从而影响电机转速范围。调整磁障形状及大小,利用有限元软件计算不同的磁桥宽度对弱磁范围的影响如图 15 所示。

NSPMSM 最高转速随着磁桥宽度的增大而增大,但随着宽度的增加最高转速增加的幅度放缓。磁桥宽度选择时应当在满足电磁转矩的前提下选取最大值,以提升弱磁范围。

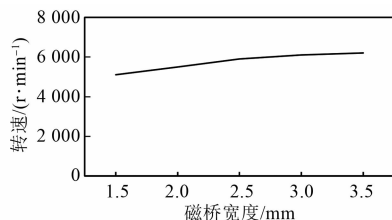


图 15 磁桥宽度对弱磁范围的影响

4.3 磁桥对永磁体损耗的影响

利用有限元软件计算不同的磁桥宽度对永磁体涡流损耗的影响如图 16 所示。

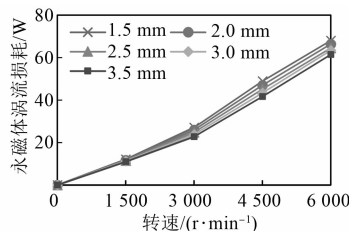


图 16 磁桥宽度对永磁体涡流损耗的影响

当电机高速运行时,旋转电枢磁动势的高次谐波会在永磁体中产生涡流,增加了永磁体不可逆退磁的风险。由图 16 可以看出,磁桥宽度适当增加可以有效降低永磁电机的涡流损耗。

5 永磁体对 NSPMSM 影响分析

5.1 永磁体对电磁转矩的影响

从转矩公式分析得知,永磁体产生的永磁磁链越大,电机的电磁转矩越大。利用有限元软件计算不同的永磁体厚度对 NSPMSM 电磁转矩的影响如图 17 所示。

随着永磁体厚度的增加,电磁转矩逐渐增大,但增大的幅度缓慢变小。因为随着厚度的增加,定转子铁心会逐渐出现饱和,单位厚度的永磁体增加的有效磁链变小,所以电磁转矩增加的幅度会略有放缓。

5.2 永磁体对弱磁范围的影响

从式(2)中可知 PMSM 永磁磁链越小,电机的最高转速越高,弱磁范围越宽。利用有限元软

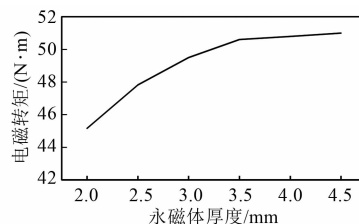


图 17 永磁体厚度对电磁转矩的影响

件计算不同的永磁体厚度对 NSPMSM 弱磁范围的影响如图 18 所示。

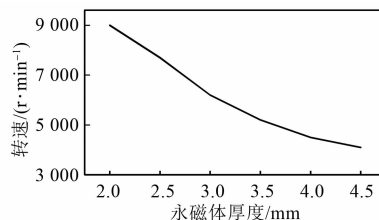


图 18 永磁体厚度对弱磁范围的影响

NSPMSM 的最高转速值随着永磁体厚度的增加而减小,仿真结果和理论分析一致。较大的永磁体厚度有利于提高电磁转矩的同时也会降低电机的弱磁范围,因此永磁体厚度在满足转矩输出条件下尽可能选较小值以提高电机的弱磁调速范围。

6 结 语

W 型 NSPMSM 最高转速达到额定转速的 4 倍,仿真分析结果与理论分析相符,验证新型电机弱磁的有效性。通过对 NSPMSM 的定性分析和定量计算表明:较小的永磁体厚度、较宽的磁桥和适当的转子偏心距离有利于提高弱磁范围,但会降低电磁转矩,设计电机时需要合理设计。

【参考文献】

- [1] 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, 2019, 39(8): 2114.
- [2] ZHU X Y, HUANG J, QUAN L, et al. Comprehensive sensitivity analysis and multi-objective optimization research of permanent magnet flux-intensifying motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2613.

(下转第 70 页)

- [5] POURAMIN A, DUTTA R, RAHMAN M F, et al. Inductances of a fractional-slot concentrated-winding interior PM synchronous machine considering effects of saturation and cross magnetization[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015.
- [6] 李峰, 夏超英. 考虑磁路饱和的内置式永磁同步电机电感参数旋转辨识算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 203.
- [7] 靳峰雷, 张利深. 基于增量电感拟合的开关磁阻电机电流预测控制[J]. 微特电机, 2020, 48(2): 42.
- [8] LAZARI P, SEN B, WANG J, et al. Accurate d - q axis modeling of synchronous machines with skew accounting for saturation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 8105704.
- [9] CHEN Y S, ZHU Z Q, HOWE D. Calculation of d - and q -axis inductances of PM brushless AC machines accounting for skew[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3940.
- [10] 张宇宁. 考虑交叉耦合的永磁同步电机电感参数研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [11] 肖玉坤, 戴正文, 邹琳, 等. 永磁电机交、直流电感特性有限元分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1196.
- [12] SHU Y, TAKASHI K, YOSHIHIRO Y, et al. A method to determine direct and quadrature-axis inductances of permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 128(7): 910.
- [13] 孙涛, 代颖, 刘皖秋, 等. 考虑交叉耦合时电动汽车用内置式永磁同步电机交直流电感计算[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 87.
- [14] YAMAZAKI K, KUMAGAI M. Torque analysis of interior permanent-magnet synchronous motors by considering cross-magnetization: variation in torque components with permanent-magnet configurations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3192.
- [15] LEE S T, BURRESS T A, TOLBERT L M. Power-factor and torque calculation with consideration of cross saturation of the interior permanent magnet synchronous motor with brushless field excitation[C]//2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009: 317.
- [16] 徐珂, 应红亮, 黄苏融, 等. 转子分段斜极对永磁同步电机电磁噪声的削弱影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(11): 2248.

(上接第 50 页)

- [3] 陈益广, 王颖, 沈勇环, 等. 内置混合式可控磁通永磁同步电机有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 29(6): 61.
- [4] WANG W, LIN H Y, YANG H, et al. Second-order sliding mode-based direct torque control of variable-flux memory machine[J]. IEEE Access, 2020, (8): 34981.
- [5] 赵魁, 裴宇龙, 柴凤. 锥形外转子永磁同步轮毂电机的转矩密度分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1): 265.
- [6] 刘福贵, 杨凯, 赵志刚, 等. 分数槽集中绕组表贴式永磁同步电机转子损耗[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(2): 52.
- [7] 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.
- [8] 寇宝泉, 赵晓坤. 反凸极永磁同步容错电机的短路特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6716.
- [9] ZHU X Y, YANG S, DU Y, et al. Electromagnetic performance analysis and verification of a new flux-intensifying permanent magnet brushless motor with two-layer segmented permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 52(7): 8204004.
- [10] 郑菲菲, 邓先明, 李学峰, 等. 一种新颖反凸极结构永磁同步电动机的设计与分析[J]. 微特电机, 2016, 44(2): 12.
- [11] IBRAHIM M, MASISI L, PILLAY P. Design of variable flux permanent-magnet machine for reduced inverter rating[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5): 3666.