

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

赵晓坤*, 黄梓旭, 郭启超, 韦 坚, 王伟男
(东北林业大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

Investigation of Torque Proportion Coefficient Impact on Torque Enhancement in the Asymmetric Rotor PMa-SynRM

ZHAO Xiaokun*, HUANG Zixu, GUO Qichao, WEI Jian, WANG Weinan

(College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] The permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMa-SynRM) has been widely adopted in industrial applications due to its excellent speed regulation performance and cost advantages. However, its further development is constrained by insufficient torque density. To enhance electromagnetic torque, the asymmetric rotor PMa-SynRM has become a research hotspot. Nevertheless, existing studies have failed to establish a quantitative relationship between the permanent magnet torque to reluctance torque proportion coefficient and electromagnetic torque enhancement capability, while also lacking systematic analysis of pole offset angle. Consequently, rapid evaluation of motor torque performance through torque proportion coefficient and pole offset angle remains challenging. To address this, this paper systematically investigates the impact of the torque proportion coefficient and pole shift angle on electromagnetic torque. [Methods] Based on these findings, this paper proposed an asymmetric rotor PMa-SynRM and evaluated its electromagnetic performance using the finite element method. [Results] The study revealed that as the torque proportion coefficient increases, the electromagnetic torque improvement initially rised and then declined, peaking when the ratio of permanent magnet torque to reluctance torque was 2. Furthermore, as the offset angle increases, the torque enhancement capability gradually strengthened. The results demonstrated that the proposed motor achieves a 7.82% increase in electromagnetic torque and a 57.73% reduction in torque ripple. [Conclusion] This study provides

critical theoretical foundation for optimizing the torque performance of asymmetric rotor PMa-SynRMs.

Key words: asymmetric rotor; permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor; electromagnetic torque; permanent magnet torque; reluctance torque

摘 要:【目的】永磁辅助同步磁阻电机(PMa-SynRM)因其优异的调速性能和成本优势在工业领域得到广泛应用,但转矩密度不足限制了其进一步发展。为提升电磁转矩,不对称转子 PMa-SynRM 成为研究热点。然而,现有研究尚未建立永磁转矩与磁阻转矩比例系数和电磁转矩提升能力之间的定量关系,且缺乏对磁极偏移角的系统分析,导致难以通过转矩分配关系和磁极偏移角度快速评估电机转矩性能。为此,本文系统研究转矩比例系数和磁极偏移角对电磁转矩的影响规律。【方法】基于上述规律,本文提出一种不对称转子 PMa-SynRM,并采用有限元法计算其电磁性能。【结果】研究发现,随着转矩比例系数增大,电磁转矩提升幅度先增大后减小,在永磁转矩与磁阻转矩之比为 2 时,电磁转矩提升能力最强;随着偏移角度增大,电磁转矩提升能力逐渐增强。结果表明,所提电机电磁转矩提升 7.82%,转矩脉动减小 57.73%。【结论】本研究为不对称转子 PMa-SynRM 的转矩性能优化提供了重要理论依据。

关键词: 不对称转子;永磁辅助同步磁阻电机;电磁转矩;永磁转矩;磁阻转矩

0 引言

近年来,电动汽车、装备制造和航空航天等领域对永磁同步电机的需求不断增加,导致稀土供应紧张,相关领域正面临资源约束与技术升级的

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(PL2024E006)

Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China
(PL2024E006)

双重挑战^[1-3]。同步磁阻电机能充分利用磁阻转矩,相较永磁同步电机具有成本低的优势^[4-6]。为提升同步磁阻电机的转矩密度,在其转子磁障中嵌入永磁体得到永磁辅助同步磁阻电机(Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motor, PMA-SynRM)^[7-11]。然而,现有PMA-SynRM的转矩输出仍难以满足高转矩应用场景的严苛需求,因此,采用不对称转子结构的PMA-SynRM优化设计已成为当前研究热点^[12-14]。

不对称转子PMA-SynRM通过改变转子结构,优化永磁体配置,从而提高电机的转矩性能^[15-18]。文献[19]提出一种新型不对称转子结构,该电机的相邻磁极具有不相等的极弧系数。结果表明不对称转子结构能有效抑制转矩脉动,但平均转矩并未提升。文献[20]采用27槽分布式绕组定子结构,该电机能抑制转矩脉动,但转矩提升幅度有限,不到3%。文献[21]提出了一种不对称混合三角型内置式永磁电机,该电机转矩脉动显著降低,但是转矩提升幅度仅为3.42%。文献[22]提出一种具有多个不对称磁障的V形永磁同步电机,与对称电机相比,其平均转矩仅提高3.5%,转矩脉动却有所增加。文献[23]在一字型永磁体右侧、V型永磁体右侧和辐条永磁体左侧分别设置磁障,提出一种不对称转子PMA-SynRM。研究发现,该不对称设计的转矩性能优于对称设计,但提升幅度不到6%。

上述不对称PMA-SynRM虽能提升电磁转矩,但提升幅度有限,且在部分情况下会增大转矩脉动。目前基于磁场偏移效应提升PMA-SynRM电磁转矩的理论已经成熟,但不对称转子PMA-SynRM设计时,永磁转矩与磁阻转矩的比例关系和磁极偏移角对电磁转矩提升能力的影响尚未研究,从而难以对电机结构设计提供理论指导,无法量化电磁转矩提升范围。本文研究转矩比例关系和磁极偏移角对电磁转矩提升能力的影响,得到永磁转矩与磁阻转矩的最佳比例,为不对称转子PMA-SynRM设计提供依据。

本文分析不同转矩比例系数与电机电磁转矩提升能力的变化。通过提出不对称转子PMA-SynRM,使其永磁转矩和磁阻转矩在相近电流角下最大,实现电磁转矩和转矩利用率的提升;再利用有限元软件对电机进行仿真计算;最后分析不

对称PMA-SynRM的电磁性能。

1 磁场偏移效应

磁场偏移效应的原理在于通过不对称磁障设计或特殊的永磁体排列,使得永磁转矩和磁阻转矩在相似或相同的电流角下达到最大值,可视为永磁转矩向磁阻转矩方向发生了偏移,进而提高电机转矩利用率并提升转矩性能^[24-26]。在 d - q 坐标系下,永磁体磁链偏移后的电机矢量关系如图1所示。

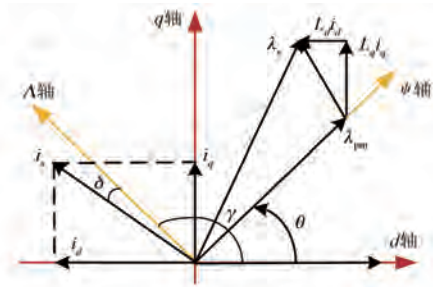


图1 PMA-SynRM空间矢量图

Fig. 1 Space vector diagram of PMA-SynRM

图1中, θ 为永磁体磁链偏移角; ψ 轴为永磁体磁链所在直线; Λ 轴为与 ψ 轴正交的直线; γ 为 Λ 轴与 d 轴之间的夹角; δ 为定子电流空间矢量与 Λ 轴的夹角。其中:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} + \theta \quad (1)$$

当 δ 为 0° 时,转矩方程为

$$\begin{cases} T_{em} = \frac{3p}{2}\psi_{pm}i_s + \frac{3p}{4}(L_q - L_d)i_s^2\sin(2\theta) \\ T_{pm} = \frac{3p}{2}\psi_{pm}i_s \\ T_{re} = \frac{3p}{4}(L_q - L_d)i_s^2\sin(2\theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 为极对数; T_{em} 为电磁转矩; T_{pm} 为永磁转矩; T_{re} 为磁阻转矩; i_s 为定子电流; ψ_{pm} 为永磁磁链; L_d 、 L_q 分别为 d 轴、 q 轴电感。

由式(2)可知,不对称PMA-SynRM的 T_{em} 由 T_{pm} 和 T_{re} 构成, T_{pm} 的周期是 T_{re} 的两倍。因此,在对称PMA-SynRM中, T_{pm} 与 T_{re} 的最大值分别对应不同的电流角,二者相差 45° ,其转矩特性如图2(a)所示。当 θ 为 45° 时, T_{em} 也达到最大值。因此,在PMA-SynRM的设计中,理论上将永磁体磁链向转子 d 轴偏移 45° ,则可使 T_{pm} 和 T_{re} 在相

同电流角处达到最大值,从而充分利用各转矩分量,提升电机转矩性能。

本文研究的不对称 PMa-SynRM 通过转子结构的不对称设计,产生磁场偏移效应,使永磁转矩向磁阻转矩偏移,从而使永磁转矩与磁阻转矩最大值对应的电流角相近或相同^[27-28]。该设计尽可能使电机转矩性能接近甚至达到理论最佳状态,其转矩特性如图 2(b)所示,将对称电机的最大电磁转矩视为基准值,各转矩均采用相同基准值。

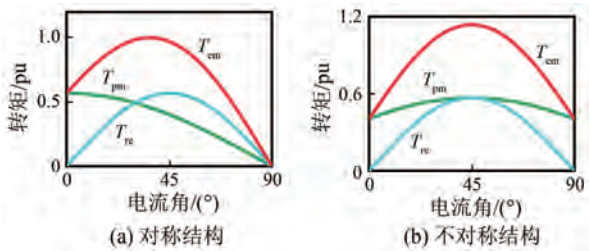


图 2 两种 PMA-SynRMs 转矩特性曲线
Fig. 2 Torque characteristic curves of two PMA-SynRMs

2 转矩比例关系研究

为了研究转矩比例关系和磁极偏移角对电磁转矩提升能力的影响,将永磁转矩最大值与磁阻转矩最大值之比定义为转矩比例系数 k_T ,具体为

$$k_T = \frac{T_{pmMax}}{T_{reMax}} \tag{3}$$

式中: T_{pmMax} 、 T_{reMax} 分别为永磁转矩最大值、磁阻转矩最大值。

假设永磁转矩最大值与磁阻转矩最大值之和始终为 30 N·m, k_T 由 1 到 4,磁极偏移角度从 0° 到 45°,分析不同 k_T 下对称与不对称 PMA-SynRM 的电磁转矩提升及其相应的磁阻转矩分量和永磁转矩分量利用率,得到电磁转矩最大值时电流角的变化规律。根据理论计算得出不同 k_T 和偏移角度所对应的最大电磁转矩及其电流角,如表 1 所示。

磁极偏移角不变且小于 45°时,随着 k_T 的增大,电磁转矩最大值的电流角呈逐渐减小的趋势。对于对称 PMA-SynRM,其磁极偏移角为 0°,随着 k_T 的增大,其电磁转矩先减小后增大。 k_T 相同时,随着磁极偏移角增大,电磁转矩最大值及其电流角也会随之增大。当偏移角为 45°时,电磁转

矩达到了理论最大值,相应的电流角也为 45°。
 k_T 与电磁转矩提升幅度的变化如图 3 所示。图中,随着 k_T 的增大,不对称 PMA-SynRM 的电磁转矩提升幅度先增大后减小; k_T 介于 1.5 到 2.5 之间时,电磁转矩提升幅度最大,达到 15% 以上。

表 1 转矩和电流角随 k_T 和偏移角度的变化
Tab. 1 Variation of torque and current angle with k_T and offset angle
(a) 电磁转矩最大值

k_T	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
	电磁转矩最大值/(N·m)					
1	26.40	27.13	28.36	29.26	29.81	30.00
1.5	26.05	26.87	28.21	29.21	29.80	30.00
2	25.98	26.81	28.19	29.19	29.80	30.00
2.5	26.03	26.84	28.21	29.20	29.79	30.00
3	26.14	26.93	28.26	29.22	29.80	30.00
3.5	26.27	27.04	28.31	29.24	29.81	30.00
4	26.42	27.15	28.38	29.27	29.80	30.00

k_T	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
	电流角/(°)					
1	36	38	40	42	44	45
1.5	32	34	36	40	42	45
2	30	32	35	38	42	45
2.5	28	30	34	38	42	45
3	25	28	32	36	40	45
3.5	24	26	30	36	40	45
4	22	24	30	35	40	45

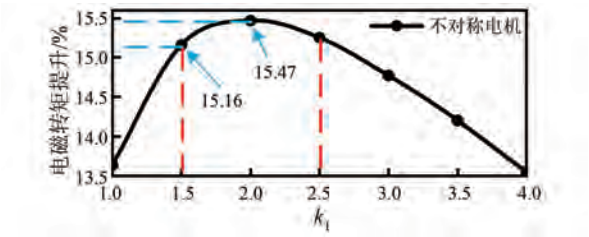


图 3 电磁转矩提升幅度随 k_T 的变化曲线
Fig. 3 Curve of electromagnetic torque enhancement versus k_T

为了研究 PMA-SynRM 的性能参数,将永磁转矩占比定义为 N_p 、将磁阻转矩占比定义为 N_r 、将

永磁转矩利用率定义为 M_p 、将磁阻转矩利用率定义为 M_r 。具体为

$$\begin{cases} N_p = \frac{T_{pm}}{T_{em}} \times 100\% \\ N_r = \frac{T_{re}}{T_{em}} \times 100\% \\ M_p = \frac{T_{pm}}{T_{pmMax}} \times 100\% \\ M_r = \frac{T_{re}}{T_{reMax}} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

不同 k_T 和磁极偏移角度所对应的不同转矩占比与利用率如表 2、图 4 所示。

表 2 PMA-SynRM 性能在不同 k_T 下随偏移角度的变化
Tab. 2 Variation of PMA-SynRM performance with offset angle under different k_T values

(a) k_T 为 1						
参数名称	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
$T_{pm}/(N \cdot m)$	12.13	12.58	13.59	14.34	14.82	15.00
$N_p/\%$	45.95	46.37	47.92	49.01	49.71	50.00
$M_p/\%$	80.87	83.87	90.60	95.60	98.80	100.00
$T_{re}/(N \cdot m)$	14.27	14.55	14.77	14.92	14.99	15.00
$N_r/\%$	54.05	53.63	52.08	50.99	50.29	50.00
$M_r/\%$	95.13	97.00	98.47	99.47	99.93	100.00
(b) k_T 为 1.5						
参数名称	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
$T_{pm}/(N \cdot m)$	15.26	15.74	16.80	17.39	17.87	18.00
$N_p/\%$	58.58	58.58	59.55	59.53	59.97	60.00
$M_p/\%$	84.78	87.44	93.33	96.61	99.28	100.00
$T_{re}/(N \cdot m)$	10.79	11.13	11.41	11.82	11.93	12.00
$N_r/\%$	41.42	41.42	40.45	40.47	40.03	40.00
$M_r/\%$	89.92	92.75	95.08	98.50	99.42	100.00
(c) k_T 为 2						
参数名称	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
$T_{pm}/(N \cdot m)$	17.32	17.82	18.79	19.49	19.85	20.00
$N_p/\%$	66.67	66.47	66.65	66.77	66.61	66.67
$M_p/\%$	86.60	89.10	93.95	97.45	99.25	100.00
$T_{re}/(N \cdot m)$	8.66	8.99	9.40	9.70	9.95	10.00
$N_r/\%$	33.33	33.53	33.35	33.23	33.39	33.33
$M_r/\%$	86.60	89.90	94.00	97.00	99.50	100.00

(d) k_T 为 2.5						
参数名称	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
$T_{pm}/(N \cdot m)$	18.92	19.42	20.26	20.88	21.27	21.43
$N_p/\%$	72.69	72.35	71.82	71.51	71.40	71.43
$M_p/\%$	88.29	90.62	94.54	97.43	99.25	100.00
$T_{re}/(N \cdot m)$	7.11	7.42	7.95	8.32	8.52	8.57
$N_r/\%$	27.31	27.65	28.18	28.49	28.60	28.57
$M_r/\%$	82.96	86.58	92.77	97.08	99.42	100.00
(e) k_T 为 3						
参数名称	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
$T_{pm}/(N \cdot m)$	20.39	20.71	21.52	22.09	22.41	22.50
$N_p/\%$	78.00	76.90	76.15	75.60	75.20	75.00
$M_p/\%$	90.62	92.04	95.64	98.18	99.60	100.00
$T_{re}/(N \cdot m)$	5.75	6.22	6.74	7.13	7.39	7.50
$N_r/\%$	22.00	23.10	23.85	24.40	24.80	25.00
$M_r/\%$	76.67	82.93	89.87	95.07	98.53	100.00
(f) k_T 为 3.5						
参数名称	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
$T_{pm}/(N \cdot m)$	21.31	21.78	22.53	22.90	23.24	23.33
$N_p/\%$	81.12	80.55	79.58	78.32	77.96	77.77
$M_p/\%$	91.34	93.36	96.57	98.16	99.61	100.00
$T_{re}/(N \cdot m)$	4.96	5.26	5.78	6.34	6.57	6.67
$N_r/\%$	18.88	19.45	20.42	21.68	22.04	22.23
$M_r/\%$	74.36	78.86	86.66	95.05	98.50	100.00
(g) k_T 为 4						
参数名称	偏移角度/(°)					
	0	5	15	25	35	45
$T_{pm}/(N \cdot m)$	22.25	22.69	23.18	23.63	23.90	24.00
$N_p/\%$	84.22	83.57	81.68	80.73	80.20	80.00
$M_p/\%$	92.71	94.54	96.58	98.46	99.58	100.00
$T_{re}/(N \cdot m)$	4.17	4.46	5.20	5.64	5.90	6.00
$N_r/\%$	15.78	16.43	18.32	19.27	19.80	20.00
$M_r/\%$	69.50	74.33	86.67	94.00	98.33	100.00

对称 PMA-SynRM (偏移角 0°) 随着 k_T 增大, M_p 随之提高, M_r 随之减小。不对称 PMA-SynRM 的 k_T 不变, 并且偏移角度在 0°到 45°之间时, 随着偏移角度增大, T_{pm} 和 T_{re} 及其利用率也随之增

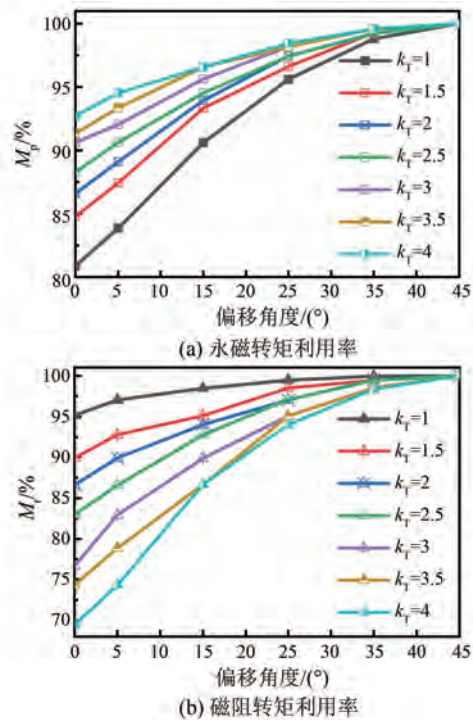


图 4 M_p 与 M_r 在不同 k_T 下随偏移角度的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of M_p and M_r with offset angle under different k_T values

大。当偏移角度为 45° 时, 不对称 PMA-SynRM 的各转矩分量及其利用率同时达到了理论最大值。
 k_T 与 T_{pm} 和 T_{re} 的提升幅度变化, 如图 5 所示。随着 k_T 增大, 不对称 PMA-SynRM 的 T_{pm} 提升幅度也随之减小, 但 T_{re} 提升幅度随之增大。

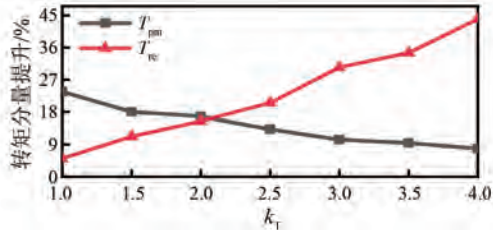


图 5 转矩分量提升幅度随 k_T 的变化

Fig. 5 Variation of torque component enhancement with k_T

3 电机结构设计

当 k_T 介于 1.5 到 2.5 之间时, 电磁转矩提升幅度达到 15% 以上。因此, 本文所提不对称 PMA-SynRM 的 k_T 为 1.5, 其结构如图 6 所示。该电机转子中的 1 型磁障向右偏移, 没有形成轴对称设计; 永磁体在材料与用量不变的情况下也为不对

称分布, 磁障右侧无永磁体。这样的转子设计使得电机内部的合成磁场发生偏移, 产生磁场偏移效应, 从而提高电机永磁转矩分量和磁阻转矩分量的利用率, 显著提升电机电磁转矩。
传统对称 PMA-SynRM 结构, 如图 7 所示。该电机为 8 极 48 槽结构, 其中转子磁极为内置式磁极; 永磁体材料为钕铁硼 NdFeB, 其牌号为 N35SH。PMA-SynRM 参数如表 3 所示。

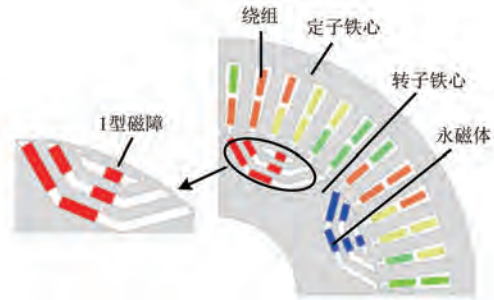


图 6 不对称 PMA-SynRM 结构

Fig. 6 Asymmetric PMA-SynRM structure

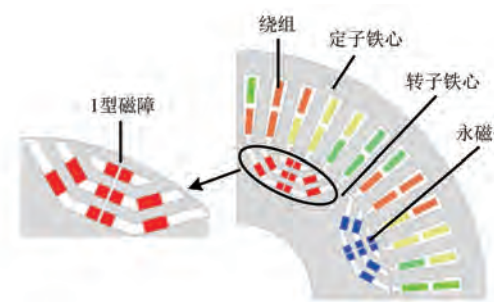


图 7 传统对称 PMA-SynRM 结构

Fig. 7 Conventional symmetric PMA-SynRM structure

表 3 PMA-SynRM 主要参数	
Tab. 3 Main parameters of the PMA-SynRM	
参数名称	参数值
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 600
定子内径/mm	100
定子外径/mm	158
气隙长度/mm	0.7
轴向长度/mm	90
极对数	4
定子槽数	48

4 电磁性能分析

4.1 空载气隙磁密
不对称 PMA-SynRM 发生磁场偏移后, 其性能

也势必会产生变化,利用有限元软件对两种结构的电机进行仿真计算。两种电机的空载气隙磁密,如图8所示。

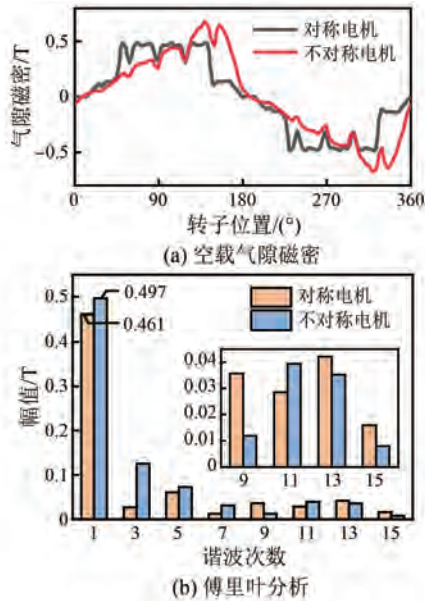


图8 空载气隙磁密及其傅里叶分析

Fig. 8 No-load air-gap magnetic flux density and its Fourier analysis

由图8可知,不对称PMA-SynRM由于不对称转子设计,导致磁场分布不均,永磁体集中或磁路磁阻较小的区域气隙磁密幅值明显升高;引入额外的谐波,导致磁密波形产生畸变。其基波气隙磁密相较对称电机提升7.67%,9次、13次、15次谐波较低,其余阶次的谐波较高。

4.2 空载反电动势

两种电机的空载反电动势如图9所示。由图9可知,不对称电机受到磁场偏移的影响,其反电动势波形向左偏移并且最大值略高。相比对称电机,基波反电动势提高约7.36%,3次、5次、7次谐波较高,其余阶次谐波较低。

4.3 转矩特性

两种电机的转矩曲线如图10所示,将两电机的电磁转矩分离并得到永磁转矩分量和磁阻转矩分量,如图11所示。

由图10可知,不对称电机的电磁转矩为33.10 N·m,相较对称电机的30.70 N·m,提高约7.82%,转矩脉动与对称电机相比降低57.73%。

由图11可知,不对称电机的转矩比例系数约为1.5,并且磁极偏移角小于45°。因此,永磁

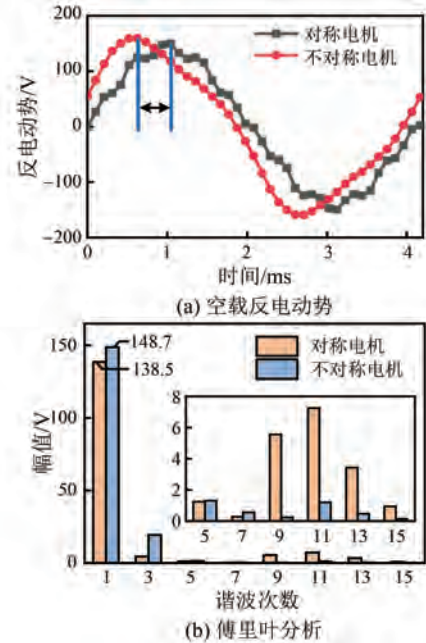


图9 空载反电动势及其傅里叶分析

Fig. 9 No-load back electromotive force and its Fourier analysis

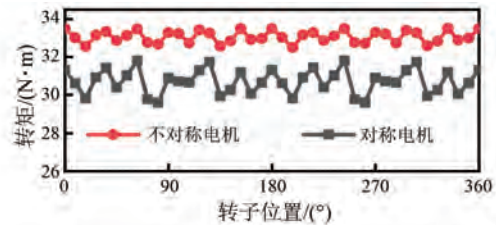


图10 电磁转矩波形

Fig. 10 Electromagnetic torque waveforms

转矩与磁阻转矩未在相同电流角下达到最大值,电磁转矩实际提升幅度小于理论最大提升幅度,验证了该电机不对称转子设计的合理性。

不对称电机转矩分量最大值的电流角之差由45°缩小至23°,即电机电磁转矩性能提升的原因。电机相关性能对比如表4所示,不对称电机永磁转矩利用率提高到96.5%,磁阻转矩利用率提高到100%,进一步证明了不对称电机设计在转矩利用方面的优势。

表4 电机性能对比

Tab. 4 Motor performance comparison

参数名称	对称电机	不对称电机
$T_{em}/(\text{N}\cdot\text{m})$	30.70	33.10
转矩脉动/%	7.24	3.06
$M_p/\%$	87.20	96.50
$M_r/\%$	91.00	100

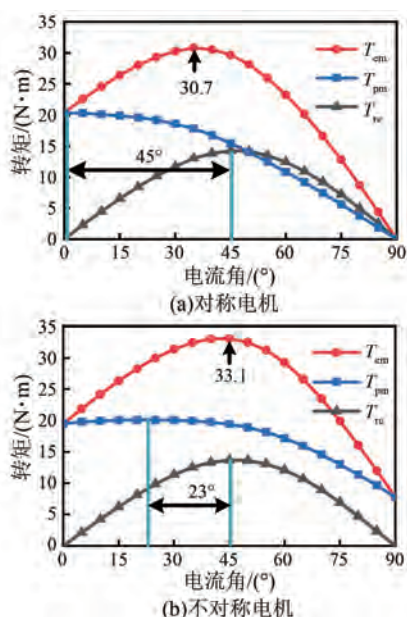


图 11 两种电机转矩分离图
Fig. 11 Torque separation of two motors

5 结语

本文分析了不对称转子 PMa-SynRM 在不同 k_T 下电磁转矩的提升能力。随着 k_T 的增大, 电磁转矩提升幅度先增大后减小; 当 k_T 介于 1.5 到 2.5 之间时, 电磁转矩提升幅度最大, 达到 15% 以上。为了提升 PMa-SynRM 电磁转矩, 本文提出一个不对称转子 PMa-SynRM。结果表明, 其电磁转矩提升了 7.82%, 转矩脉动下降了 57.73%, 永磁转矩利用率提高到 96.5%, 磁阻转矩利用率提高到 100%。通过不对称转子设计, 电机电磁转矩提升效果明显, 各转矩分量得到了充分利用。本文为不对称转子 PMa-SynRM 转矩密度提升提供了理论依据。

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、黄梓旭进行了方案设计与论文撰写, 黄梓旭进行了试验研究, 赵晓坤、黄梓旭、郭启超、韦坚和王伟男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 and paper writing were carried out by Zhao Xiaokun and Huang Zixu. The experiment was conducted by Huang Zixu. The manuscript was revised by Zhao Xiaokun, Huang Zixu, Guo Qichao, Wei Jian, and Wang Weinan. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] SHIMIZU Y, MORIMOTO S, SANADA M, et al. Investigation of rotor topologies for reducing torque ripple in double-layer IPMSMs for automotive applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 8276-8285.
- [2] CHEN Y Y, CAI T L, ZHU X Y, et al. Optimization of a new asymmetric-hybrid-PM machine with high torque density and low torque ripple considering the difference of magnetic materials [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 58(2): 1-5.
- [3] JUNG D H, LEE K D, LEE J K. A study on design method of synchronous reluctance motor based on nonlinear MEC using Newton-Raphson method [J]. IEEE Access, 2023, 11: 10723-10729.
- [4] 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.
- [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] MURATALIYEV M, DEGANI M, DI NARDO M, et al. Synchronous reluctance machines: A comprehensive review and technology comparison [J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(3): 382-399.
- [7] ZHANG S W, LIU 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] NARDO D M, 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.
- [12] XIAO Y, ZHU Z Q, JEWELL G W, et al. A novel asymmetric rotor interior permanent magnet machine with hybrid-layer permanent magnets [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57 (6): 5993-6006.
- [13] HSIEH M F, HUYNH A T, DO V V, et al. Design optimization of spoke-type flux-intensifying PM motor with asymmetric rotor configuration for improved performance [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2024, 60(9): 8203905.
- [14] AJAMLOO A M, GHAHERI A, IBRAHIM M N, et al. Investigation of different pole configurations in new asymmetric permanent magnet synchronous reluctance machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2025.
- [15] 刘成成, 王珂霖, 王韶鹏, 等. 基于不对称转子结构与序贯田口稳健优化方法的同步磁阻电机设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增刊1): 50-61.
- LIU C C, WANG K L, WANG S P, et al. Synchronous reluctance machine based on asymmetrical rotor structure and sequential Taguchi robust optimization method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 50-61.
- [16] 郑涛, 林晓刚, 陈伟, 等. 面向转子机械位置无传感技术的非对称磁障和隔磁桥 IPMSM 设计[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 181-191.
- ZHENG T, LIN X G, CHEN W, et al. Design of IPMSM with asymmetric magnetic barriers and magnetic bridges for rotor mechanical position sensorless technology [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 181-191.
- [17] LEE S C, KANG D H, KANG S G, et al. Optimal design of asymmetrical rotor with mas method for improving torque density of PMA-SynRM in high-speed railway applications [C] // 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, 2023.
- [18] 高锋阳, 李晓峰, 齐晓东, 等. 非对称 V 型磁极偏移内置式永磁同步电机转矩脉动分析[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(9): 112-120.
- GAO F Y, LI X F, QI X D, et al. Analysis of torque ripple of the interior permanent magnet synchronous motor with asymmetric V-pole offset [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(9): 112-120.
- [19] 王晓远, 王力新, 高鹏, 等. 电动汽车不对称转子永磁电机转矩脉动抑制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 46-54.
- WANG X Y, WANG L X, GAO P, et al. Suppression torque ripple of asymmetric rotor permanent magnet motors for electric vehicle [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(10): 46-54.
- [20] 李敏, 赵文良, 杨智铄, 等. 非对称转子永磁辅助式同步磁阻电机优化设计[J]. 导航与控制, 2021, 20(5): 52-60.
- LI M, ZHAO W L, YANG Z S, et al. Optimization design of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor with asymmetric rotor [J]. Navigation and Control, 2021, 20(5): 52-60.
- [21] SUPHAMA M, SEANGWONG P, FERNANDO N, et al. A novel asymmetric hybrid-layer del-shaped rotor interior permanent magnet motor for electric vehicles [J]. IEEE Access, 2023, 12: 2793-2802.
- [22] BI Y D, HUANG J H, WU H H, et al. A general pattern of assisted flux barriers for design optimization

- of an asymmetric V-shape interior permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(9): 1-4.
- [23] MUHAMMAD N, KHAN F, TARIQ S, et al. Comparative study of a novel symmetrical and asymmetrical interior permanent magnet synchronous machine for EVs application [C] // 2023 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power, Jakarta, 2023.
- [24] QIAO Z W, SHI L W, LI F C, et al. Characteristics analysis of magnetic-pole-shift in an asymmetric hybrid pole-permanent magnet assisted synchronous reluctance motor [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2025, 13(2): 1394-1405.
- [25] ZHU Z Q, XIAO Y. Novel magnetic-field-shifting techniques in asymmetric rotor pole interior PM machines with enhanced torque density [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 58(2): 1-10.
- [26] 刘炎. 新型永磁聚磁式同步磁阻电机研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- LIU Y. Research on the novel permanent magnet concentrated-flux synchronous reluctance motor [D]. Ji'nan: Shandong University, 2021.
- [27] YANG H, QIAN C, WANG W J, et al. A novel asymmetric-magnetic-pole interior PM machine with magnet-axis-shifting effect [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 5927-5938.
- [28] XIAO Y, ZHU Z Q, WANG S S, et al. A novel asymmetric interior permanent magnet machine for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2404-2415.

收稿日期:2025-04-26

收到修改稿日期:2025-06-16

作者简介:

赵晓坤(1993-),女,博士,副教授,研究方向为永磁同步电机及其控制技术,zhaoxk_hit@163.com;

* 通信作者:赵晓坤(1993-),女,博士,副教授,研究方向为永磁同步电机及其控制技术,zhaoxk_hit@163.com。