

具有机械角度辨识功能的带辅助齿 SPMSM 设计与研究

杜恒川^{1,2}, 林晓刚^{2*}, 曾 铮², 王晓璨³, 解 伟²

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;

2. 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究中心, 福建 泉州 362216;

3. 厦门理工大学 电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361012)

Design and Research of SPMSM with Auxiliary Teeth with Mechanical Angle Identification Function

DU Hengchuan^{1,2}, LIN Xiaogang^{2*}, ZENG Zheng², WANG Xiaocan³, XIE Wei²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences,
Quanzhou 362216, China;

3. College of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361012, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motors have been widely used in various fields due to their high power density, efficiency, and reliability. In applications that require mechanical angles, position sensors are generally used to obtain the mechanical position information of the motor rotor, which can reduce the reliability, integration, and power density of the control system. In order to achieve mechanical angle identification of permanent magnet motors without the use of position sensors, the electromagnetism of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) is designed. By adding auxiliary teeth of different heights to the rotor, the inductance of the motor topology includes the mechanical angle information of the rotor. The negative effects of adding auxiliary teeth on the back electromotive force, output torque, and three-phase inductance of the motor are analyzed using finite element simulation software. Finally,

the mechanical angle identification ability of the proposed topology is verified on the 0.75 kW SPMSM platform.

Key words: permanent magnet synchronous motor; mechanical angle; auxiliary teeth; finite element analysis

摘 要: 永磁同步电机因其高功率密度、高效率以及高可靠性,被广泛应用在各个领域。在对机械角度有要求的应用场合一般使用位置传感器来获取电机转子的机械位置信息,这样会降低控制系统的可靠性、集成度以及功率密度。为了在不借助位置传感器的情况下实现对永磁电机的机械角度辨识,设计了一台表贴式永磁同步电机(SPMSM)的电磁。通过在转子上添加不同高度的辅助齿,使得电机拓扑的电感包含转子机械角度信息。使用有限元仿真软件分析了添加辅助齿对电机反电动势、输出转矩以及三相电感的负面影响。最后在0.75 kW的SPMSM平台上验证了所提拓扑结构的机械角度辨识能力。

关键词: 永磁同步电机; 机械角度; 辅助齿; 有限元分析

基金项目: 国家自然科学基金(52307072); 福建科技计划-自然科学基金青年创新项目(2021J05105); 泉州科技计划-高层次人才创新创业项目(2021C025R); 福建科技计划-STS院省合作项目(2022T3041); 厦门市留学人员科研项目资助([2022]205-04)

National Natural Science Foundation of China (52307072); Fujian Science and Technology Plan-Natural Science Foundation Youth Innovation Project (2021J05105); Quanzhou Science and Technology Plan-High level Talent Innovation and Entrepreneurship Project (2021C025R); Fujian Science and Technology Plan-STS Institute Provincial Cooperation Project (2022T3041); Xiamen Overseas Chinese Scholars Project under Grant ([2022]205-04)

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)由于其体积小、质量轻、运行效率高、可靠性高以及动态性能好等优点,被广泛应用于各个领域^[1]。在类似多轴机械臂以及伺服控制等需要获取PMSM机械位置的应用场景中,大量使用了旋转变压器、磁编码器以

及光电编码器等位置传感器。然而位置传感器的使用降低了控制系统的通用性、可靠性以及复杂度,同时增加了成本和体积^[2-3]。针对使用位置传感器带来的弊端,国内外研究人员提出了无位置传感器控制方法,在零低速域以及中高速域分别提出了基于凸极效应^[4-7]以及基于反电动势^[8-11]的无传感算法。

上述无传感器控制方法可以实现全速域范围内的转子电角度观测,但在多对极 PMSM 中,由于电机的电气特性在一个机械周期内出现多次循环,导致电周期在一个机械周期中重复了与电机极对数相同的次数。比如,四对极 PMSM 在一个机械周期内的电角度以及机械角度特征为:单一的电角度对应四个不同的机械角度,在无传感器的情况下若只观测到转子电角度,则无法判断当前电角度所对应的磁极,进而无法对机械角度进行进一步辨识。所以需要一种新方法在没有传感器的前提下也能实现转子机械角度的辨识,以此向伺服控制等高端领域引入无位置传感器控制算法^[12]。

有学者提出从电机内部结构入手来使得电机在不同的机械角度存在不同的电气特性^[13-15]。文献[16-17]中韩国首尔大学提出了两种六极九槽电机拓扑结构,文献[16]对九个槽中处于不同电角度周期内三个槽的匝数进行修改,并对转子进行开槽处理,最后通过 d 轴的高频响应电流获取转子机械角度信息。但不对称的匝数增加了定子制造难度并且该方法对电流采样精度要求较高。文献[17]是通过转子分块削极配合三个检测绕组提取转子机械位置相关信号,该方法增加的硬件检测电路本质上还是位置传感器。文献[18-20]中青岛大学和哈尔滨工业大学提出了一种双气隙双极电机拓扑,其在转子上增加一套不同极对数的磁极,使得转子内外电角度信息中包含转子机械角度信息,然而该电机拓扑结构复杂,制造难度较大。文献[21]中英国谢菲尔德大学提出了一种转子动态偏心的电机拓扑,利用负载转矩在转子动态偏心时出现的机械周期同频分量来辨识转子机械角度,但转子偏心限制了基于模型的辨识精度以及电机动态性能。

上述文献通过设计不对称电机拓扑,并配合软件或硬件实现机械角度的辨识,但都存在制造

困难或动态性能有限等问题。

文献[22]基于一台额定转速为 3 000 rpm、额定功率为 0.75 kW 带辅助齿表贴式永磁同步电机 (Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM) 提出了机械角度无传感器辨识策略,并对其进行了仿真验证。但对添加辅助齿的思路及原理没有进行说明,同时忽略了本体结构上的改动对电机性能的影响。本文阐述了带辅助齿的表贴式永磁同步电机拓扑的设计原理并对其参数进行进一步优化。其电感参数中携带转子机械角度信息,结合 Ansys 有限元仿真软件的分析结果,说明所提电机拓扑实现无传感器机械角度观测的可行性以及结构改变对电机性能的负面影响,得出了该拓扑方案的合理性。最后在一个 0.75 kW 的 PMSM 平台上验证了带辅助齿表贴式永磁同步电机可用于机械角度的无传感器辨识。

1 带辅助齿 SPMSM 拓扑及其电感特性分析

为了实现无位置传感器的转子机械角度辨识,本文所提带辅助齿的 SPMSM 拓扑在保持定子结构参数不变的前提下对转子进行改造,在磁钢间隙中添加辅助齿。本章先介绍了带辅助齿的 SPMSM 拓扑的设计思路,再进一步分析了因转子结构改变产生的电感中出现机械周期同频分量的特性。

1.1 带辅助齿 SPMSM 拓扑

考虑到内置式永磁同步电机 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 的转子冲片加工难度较高,本文以传统 SPMSM 为基础提出了一台八极九槽带辅助齿的 SPMSM 拓扑,图 1 中为传统 SPMSM 与带辅助齿 SPMSM 的截面图。

为了降低电机制造难度,带辅助齿的 SPMSM 拓扑在定子侧不做改动,与文献[21]所使用的带辅助齿 SPMSM 不同的是,为了降低只引出三个辅助齿导致的谐波含量过大对电机性能产生的影响,本文所提带辅助齿 SPMSM 在八个磁钢的间隙中引出了八个辅助齿,以减少引入的一次谐波含量,同时额外添加了隔磁桥以提高永磁体利用率。此时相较于传统 SPMSM 没有凸极效应、只

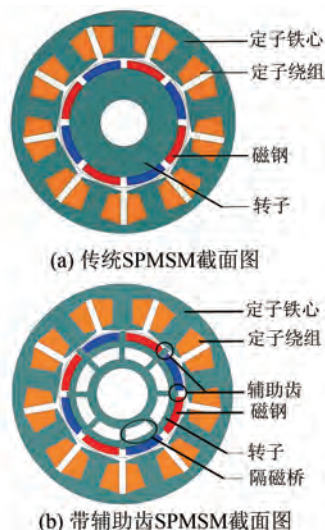


图 1 SPMSM 截面图

Fig. 1 SPMSM cross section

存在永磁转矩以及 d 、 q 轴电感相等的特性,带辅助齿 SPMSM 的永磁体两侧与转子铁心有接触,原本的气隙空间被转子铁心占据。由于转子铁心的磁导率远大于空气磁导率,导致 d 轴和 q 轴的磁阻出现差异,电机出现凸极效应, d 、 q 轴电感不相等,同时电机转矩构成中额外增加了磁阻转矩。上述结构的改变通过增加 d 、 q 轴电感差异优化了基于凸极效应的无位置传感器控制方法在零低速域的表现。带辅助齿 SPMSM 的磁钢及定子等参数如表 1 所示。

表 1 带辅助齿 SPMSM 参数

Tab. 1 Parameters of SPMSM with auxiliary teeth

参数名称	参数值	参数名称	参数值
磁钢长度/mm	60	极弧系数	81.21
磁钢厚度/mm	2.7	铁心长度/mm	60
磁钢宽度/mm	13.88	铁心外径/mm	38.20
磁钢形状	瓦形	铁心内径/mm	21.96
磁钢材料	钕铁硼	槽型	半闭口槽
充磁方向	径向充磁	定转子材料	DW540-50

在无位置传感器条件下,可以直接采样得到三相的电流信息,而电流可以间接反映出负载的电感特性。所以,考虑改变转子铁心结构使得电机电感出现机械周期相关的不对称特性,之后利用电流响应作为机械位置辨识的依据。

表 2 为加高辅助齿个数、线电感峰峰值 (Peak-to-Peak, PP) 以及总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 之间的关系。线电感峰峰值与带辅助齿 SPMSM 的机械角度辨识能力

呈正相关,线电感畸变率表征了辅助齿对电机性能的负面影响。从表中可以看出加高的辅助齿个数越多,电机拓扑的机械角度辨识能力越强,但同时性能也越差。加高四个齿相较于加高三个齿,线电感峰峰值仅提高了 0.04 mH,但 THD 提高了 1.18%。而不等高辅助齿拓扑虽然 THD 较低,但线电感峰峰值也较低,机械角度辨识能力不足。综合考虑,采用加高三个辅助齿的拓扑方案。

表 2 不同加高辅助齿个数仿真结果

Tab. 2 Simulation results for different numbers of height-increasing auxiliary teeth

加高辅助齿个数	THD/%	PP/mH
0	3.46	0.56
1	5.94	2.03
2	9.87	3.04
3	12.48	3.77
4	13.66	3.41
不等高辅助齿	6.53	2.35

图 2 为转子铁心表面的展开图。考虑到过大的辅助齿相对高度会引入过多的谐波分量从而影响电机性能,太小的辅助齿相对高度则会使得电机参数携带的机械角度信息不足,影响机械角度的辨识,同时辅助齿高度也受到电机定转子间隙长度的限制。本文通过加高八个辅助齿中的三个辅助齿至 3.24 mm,保持其他辅助齿高度为 0.64 mm,来使得气隙长度不对称。

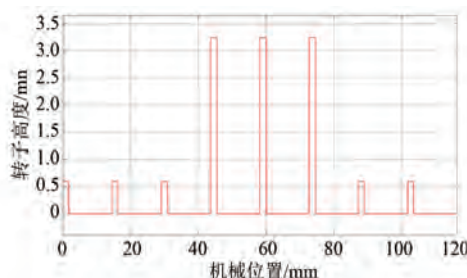


图 2 转子铁心表面展开图

Fig. 2 Surface development diagram of rotor iron core

对转子铁心表面高度进行快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT),得到的结果如图 3 所示,其中一次及以上谐波含量与气隙长度中的谐波含量相同。

从傅里叶变换结果可以看出与传统 SPMSM 基本只存在直流分量的气隙长度不同,带辅助齿 SPMSM 的气隙长度中包含机械角度辨识所需要的机械周期同频分量以及表征凸极效应的两倍电

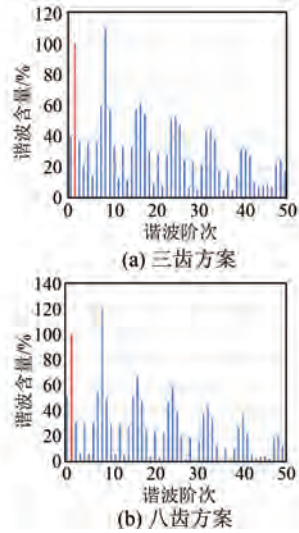


图 3 转子铁心高度 FFT 结果

Fig. 3 FFT results of rotor core height

周期频率分量。优化后的带辅助齿 SPMSM 降低了气隙长度中的无用谐波含量,同时强化了电机的凸极特性,更有利于无传感器的电角度观测。下一节将以此为基础对带辅助齿 SPMSM 的电感进行分析。

1.2 带辅助齿 SPMSM 电感特性分析

为方便电感计算,作以下假设:忽略磁滞损耗及涡流损耗,忽略气隙磁场高次谐波,定转子表面光滑。则气隙磁导率 $\lambda(\theta)$ 可近似表示为直流分量、一次谐波以及八次谐波之和:

$$\lambda(\theta) = \lambda_{\delta 0} + \lambda_{\delta m} \cos \theta_m + \lambda_{\delta e} \cos(2\theta_e) \quad (1)$$

式中: $\lambda_{\delta 0}$ 为直流分量幅值; $\lambda_{\delta m}$ 为一次谐波幅值; $\lambda_{\delta e}$ 为八次谐波幅值; θ_m 为机械角度; θ_e 为电角度。沿定子分布的基波磁动势为

$$F_{a1} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_{ph} \cdot k_{w1}}{2n_p} \cdot i_a \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

式中: N_{ph} 为每相绕组总匝数; n_p 为极对数; k_{w1} 为修正用的绕组因数; α 为计算位置与 A 相的角度差。

由式(1)和式(2)可以计算出气隙磁密:

$$B_{\delta}(\alpha) = F_{a1} \cdot \lambda(\theta) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_{ph} \cdot k_{w1}}{2n_p} \cdot i_a \cdot \cos \alpha \cdot [\lambda_{\delta 0} + \lambda_{\delta m} \cos \theta_m + \lambda_{\delta e} \cos(2\theta_e)] \quad (3)$$

同时可以计算出磁链 ψ_{aa} ,再通过除以电流得到电感,以 A 相自感 L_{aa} 为例:

$$\psi_{aa} = L_{\sigma} \cdot i_a + \frac{2}{\pi} \cdot N_{ph} \cdot k_{w1} \cdot F_{a1} \cdot \tau \cdot l \cdot [\lambda_{\delta 0} + \lambda_{\delta m} \cos \theta_m + \lambda_{\delta e} \cos(2\theta_e)] =$$

$$L_{\sigma} \cdot i_a + \left(\frac{2}{\pi} \cdot N_{ph} \cdot k_{w1} \right) 2 \cdot \frac{\tau \cdot l}{n_p} \cdot i_a [\lambda_{\delta 0} + \lambda_{\delta m} \cos \theta_m + \lambda_{\delta e} \cos(2\theta_e)] \quad (4)$$

$$L_{aa} = \frac{\psi_{aa}}{i_a} = L_{\sigma} + \left(\frac{2}{\pi} \cdot N_{ph} \cdot k_{w1} \right) 2 \cdot \frac{\tau \cdot l}{n_p} \cdot [\lambda_{\delta 0} + \lambda_{\delta m} \cos \theta_m + \lambda_{\delta e} \cos(2\theta_e)] \quad (5)$$

式中: L_{σ} 为 A 相漏感; τ 为极距; l 为叠片长度。

由式(5)可以看出,添加辅助齿导致气隙长度的改变,最终会作用于电机的电感,使得其携带与机械角度位置相关的谐波分量。

为验证上述推理,本节使用有限元分析软件 Ansys 对带辅助齿 SPMSM 的电感进行仿真,得到 A 相电感的仿真结果如图 4 所示。

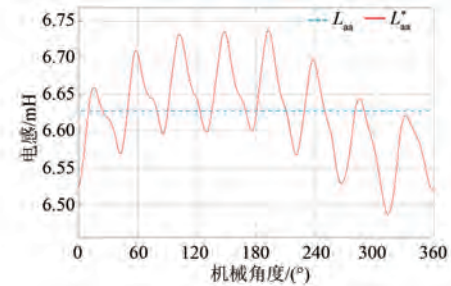


图 4 带辅助齿 SPMSM 的 A 相电感仿真图

Fig. 4 A-phase inductance simulation diagram of SPMSM with auxiliary teeth

从图 4 中可以直观地看出与普通 SPMSM 仅存在直流分量的相电感相比,带辅助齿 SPMSM 的 A 相自感中存在直流分量、与机械周期同频分量以及两倍电周期同频分量。现对其进行傅里叶变换,结果如图 5 所示,在传统 SPMSM 直流分量的基础上,新叠加的谐波主要为一次谐波以及八次谐波。该一次谐波分量会使电感在一个机械周期中的不同电角度周期内不再单调地重复,而是在不同的机械角度存在不同的电感特性。

综上所述,辅助齿的引入使得该 SPMSM 拓扑的电感出现了与机械周期同频的一次谐波,通过高频电压响应所反映的电感特征,可以辅助实现机械角度的辨识。同时也出现了两倍电角频率的谐波,即产生了可用于无传感器电角度观测的凸极效应。

2 添加辅助齿的影响

上一章介绍了带辅助齿 SPMSM 拓扑并分

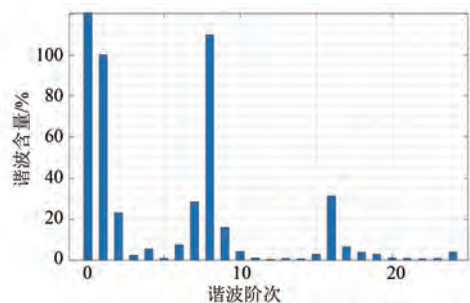


图5 带辅助齿 SPMSM 的 A 相电感谐波含量
Fig. 5 A-phase inductance harmonic content of SPMSM with auxiliary teeth

析了其电感特性,得出了通过在转子上添加辅助齿可以使电机的电感参数携带机械角度信息,从而使该电机拓扑具有反馈机械角度信息的能力。

本章将从反电动势、输出转矩以及齿槽转矩三个方面分析辅助齿的引入对电机性能产生的影响。

2.1 添加辅助齿对反电动势的影响

在正弦矢量控制的电机设计中,一般都希望反电动势为标准正弦波,此时谐波、杂散损耗、转矩脉动以及电机的振动噪声都较小。

图6为 Ansys 仿真得到的带辅助齿 SPMSM 在额定转速 3 000 rpm 的三相反电动势,反电动势幅值为 119.86 V,小于额定的 380 V。同时比传统 SPMSM 的反电动势 121.60 V 下降了 1.43%,比三齿的带辅助齿 SPMSM 的反电动势 117.73 V 上升了 1.81%。在添加了辅助齿之后,电机的反电动势中产生了机械周期同频的分量,傅里叶变换之后取各次谐波幅值可计算得到其正弦波畸变率约为 4.25%,比传统 SPMSM 上升了 0.23 个百分点,比三齿 SPMSM 下降了 0.49 个百分点,其正弦度相较三齿 SPMSM 得到了优化。

2.2 添加辅助齿对输出转矩的影响

电机的输出转矩可以直观地表征电机拖动负载的能力,永磁同步电机电磁转矩计算式如式(6)所示:

$$T_{em} = \frac{3}{2} n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

式中: ψ_f 为永磁体磁链; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感。本文所提的带辅助齿 SPMSM 不同于传统 SPMSM 的等值 d 、 q 轴电感,其 d 、 q 轴电感引入了与机械周期有关的谐波,进

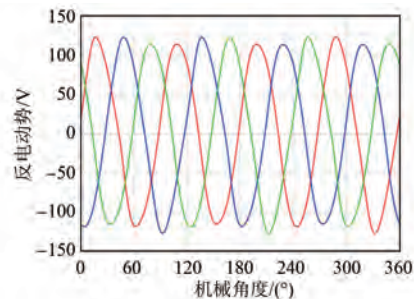


图6 带辅助齿 SPMSM 反电动势波形
Fig. 6 Back electromotive force waveforms of SPMSM with auxiliary teeth

一步影响 d 、 q 轴电流从而导致电磁转矩出现变化。

本节同样使用 Ansys 软件在额定转速 3 000 rpm、额定电流 3.0 A 时对带辅助齿 SPMSM 的输出转矩进行仿真,仿真结果如图7所示。其中,红色实线为八齿 SPMSM 的输出转矩波形,蓝色虚线为三齿 SPMSM 的输出转矩波形。

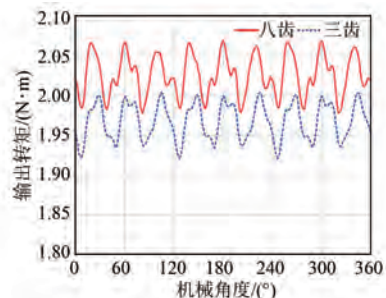


图7 带辅助齿 SPMSM 输出转矩波形
Fig. 7 Output torque waveforms of SPMSM with auxiliary teeth

在额定工况下带辅助齿 SPMSM 的输出转矩平均值为 $2.03 \text{ N}\cdot\text{m}$,相较于传统 SPMSM 的平均输出转矩 $2.17 \text{ N}\cdot\text{m}$ 下降了 6.45%,相较于优化前的三齿电机的平均转矩 $1.97 \text{ N}\cdot\text{m}$ 上升了 3.04%。

现用转矩脉动率 (Torque Ripple Ratio, TTR) 来表征电机输出转矩的稳定程度, TTR 可由式(7)表示:

$$TTR = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: T_{\max} 为一个机械周期内转矩的最大值; T_{\min} 为一个机械周期内转矩的最小值; T_{avg} 为一个机械周期内转矩的平均值。所提电机拓扑在额定工况下的 TTR 为 4.53%,相较于传统 SPMSM 上升了 0.22 个百分点,相较于优化前的三齿电机下降

了 0.29 个百分点。

综上所述,在添加了辅助齿后,所提电机拓扑的转矩脉动只有轻微上升,但其转矩输出能力下降了 6.45%,需要后续进一步优化。

2.3 添加辅助齿对齿槽转矩的影响

齿槽转矩是永磁电机绕组不通电时永磁体和定子铁心之间相互作用产生的转矩,其对电机在低速状态下的控制以及高精度的定位都会产生影响。图 8 为额定转速 3 000 rpm、不额外注入电流时使用 Ansys 仿真得到的带辅助齿 SPMSM 在一个机械周期内的齿槽转矩波形图,图中红色实线为八齿 SPMSM 的齿槽转矩波形,蓝色虚线为三齿 SPMSM 的齿槽转矩波形。

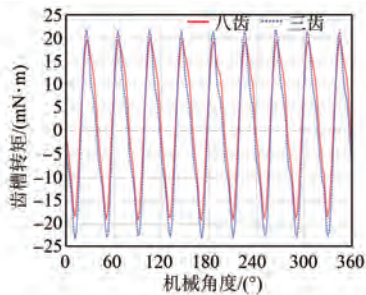


图 8 带辅助齿 SPMSM 齿槽转矩波形

Fig. 8 Cogging Torque waveforms of SPMSM with auxiliary teeth

传统 SPMSM 的齿槽转矩波峰为 17.14 mN·m,波谷为 -17.07 mN·m。如图 8 所示,在添加了辅助齿之后,三齿 SPMSM 的齿槽转矩波峰为 21.80 mN·m,波谷为 -23.24 mN·m;所提八齿 SPMSM 的齿槽转矩波峰为 19.98 mN·m,波谷为 -19.24 mN·m。相较三齿 SPMSM,由式(8)计算出齿槽转矩峰峰值下降了 12.92%,但相较传统 SPMSM 的齿槽转矩峰峰值还是有一定的上升,后续可进行进一步优化。

$$1 - \frac{(19.98 + 19.24)}{(21.80 + 23.24)} \times 100\% = 12.92\% \quad (8)$$

本章分析了添加辅助齿之后,电机拓扑参数的变化。各项参数相较于三齿 SPMSM 都得到了改善,但相较于传统 SPMSM 仍有一些差距。其中,反电动势的畸变率上升了 0.23 个百分点,幅值下降了 1.43%;电机输出转矩的能力下降了 6.45%,转矩脉动率上升了 0.22 个百分点;同时齿槽转矩峰峰值上升了约 14.64%。

3 试验结果与分析

为进一步验证带辅助齿 SPMSM 的机械角度辨识功能,本章在一个 0.75 kW 的 PMSM 试验平台上进行了验证试验。图 9 为试验平台图片,其中控制芯片采用 TMS320F28335, LCR 表采用胜利仪器的 4090A 型号 LCR 数字电桥。

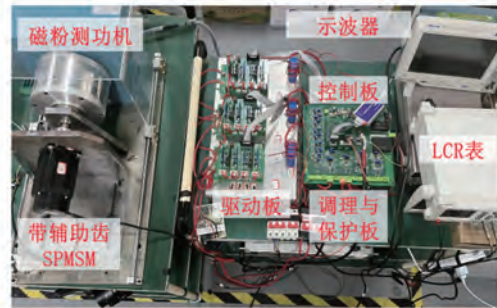


图 9 试验平台

Fig. 9 Experimental platform

在中性点未被引出的条件下,通过线电感可以快速获取电机的电感特征,并从中解析出转子的机械角度信息。本文先通过光电编码器读取电机机械角度,同时使用 LCR 数字电桥测试了带辅助齿 SPMSM 一个机械周期内的线电感,在 360°的机械角度内读取 500 个点,实测得到的 ab、bc、ca 的线电感如图 10 所示,其中峰峰值为 3.82 mH,略大于仿真结果。

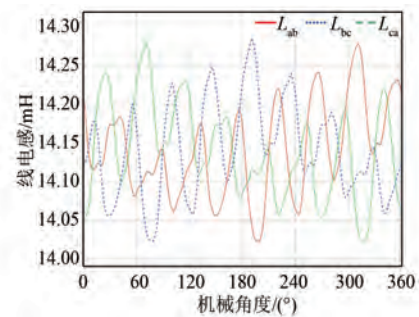


图 10 带辅助齿 SPMSM 线电感波形

Fig. 10 Line inductance waveforms of SPMSM with auxiliary teeth

与传统 SPMSM 的等幅值线电感不同,带辅助齿 SPMSM 的线电感在一个机械周期内出现了幅值上的变化,并且其中叠加了与机械周期同频的谐波分量。幅值上的变化以及一次谐波的叠加使得该八极电机一个电角度对应的四个机械角度处的线电感大小和数量均不相同。上述特性的出

现使得带辅助齿 SPMSM 的初始机械位置可以通过其线电感特性得到,后续机械位置可以通过无传感算法得到的电角度对转子机械角度进行增量式更新,如式(9)所示:

$$\theta_m = \theta_{m_init} + \frac{\Delta\theta_e}{n_p} \quad (9)$$

式中: θ_{m_init} 为辨识得到的初始机械角度; $\Delta\theta_e$ 为电角度改变量。

线电感的特征可以通过观测线间高频电压注入的响应电流幅值间接得到,注入电压的频率足够高的情况下可以忽略线间电阻产生的阻抗,此时响应电流的幅值与线电感可近似为线性关系。考虑到电机的峰值电压以及响应电流幅值的信噪比,选取注入电压的频率为 250 Hz、幅值为 90 V,分别在 ab 相、bc 相以及 ca 相进行线间电压注入。以电角度 250° 对应的四个机械角度 62.5°、152.5°、242.5° 以及 332.5° 为例,图 11 为三段高频电压注入的电流响应波形图,表 3 为四个点位的响应电流幅值图。

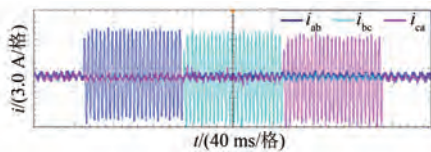


图 11 高频响应电流

Fig. 11 High frequency response current

表 3 高频响应电流幅值

Tab. 3 Amplitude of high frequency response current

机械角度/(°)	i_{ab}/A	i_{bc}/A	i_{ca}/A
62.5	3.84	3.95	3.80
152.5	3.83	3.95	3.89
242.5	3.83	3.90	3.96
332.5	3.95	3.87	3.83

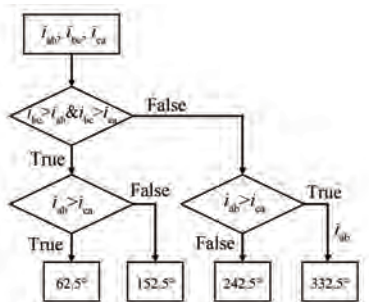


图 12 机械角度辨识依据

Fig. 12 Mechanical angle identification basis

从表 3 中可以看出在同一电角度对不同机械位置进行高频电压注入得到的响应电流幅值大小和数量关系均不相同。并且与文献[21]不同的是:如图 12 所示,优化后的电机拓扑结构可以直接通过电流幅值大小进行机械角度的辨识,而不需要对其进行加减运算,提高了机械角度辨识的可靠性,验证了带辅助齿的 SPMSM 可借助线电感中的机械周期同频分量进行电机初始机械角度的判断。

为进一步验证电机的输出性能,现通过磁场定向控制策略对电机速度进行控制,在额定转速 3 000 rpm 的情况下通过磁粉测功机加载仿真的平均输出转矩为 2.03 N·m,稳定运行时得到一个机械周期的三相电流波形如图 13 所示。电流幅值约等于额定电流 3.0 A,输出能力与仿真基本吻合。

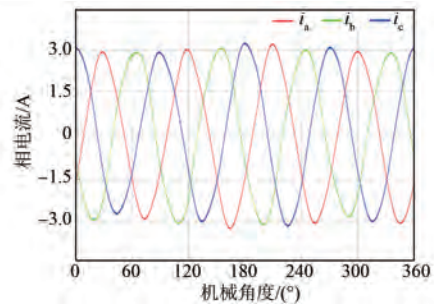


图 13 额定工况下三相电流波形图

Fig. 13 Waveform diagram of three-phase current under rated operating conditions

4 结语

本文针对无传感器条件下多极永磁同步电机只通过电角度无法得到机械角度的问题,设计了一台具有机械角度辨识能力的带辅助齿 SPMSM。

本文先介绍了该电机拓扑的结构特点,之后分析了其电感特性,推导并仿真验证了该电机拓扑在电感中存在机械周期同频的一次谐波以及两倍于电角频率的八次谐波。随后分析了辅助齿的添加对电机性能的影响:反电动势正弦波畸变率上升了 0.23 个百分点,幅值下降了 1.43%;输出转矩下降了 6.45%,并且齿槽转矩峰峰值上升了约 14.64%,转矩脉动率上升了 0.22 个百分点。

最后在 0.75 kW 的试验平台上对所提电机拓扑的机械角度辨识能力进行了验证,证明其在无位置传感器情况下机械角度辨识的可行性。

参考文献

- [1] 王利国, 高强. 无位置传感器控制下的永磁同步电机电阻在线辨识[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 20-26+59.
WANG L G, GAO Q. Online resistance identification for permanent magnet synchronous motor under position sensorless control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(10): 20-26+59.
- [2] 李瑞棋, 杨波, 贺建湘, 等. 基于变论域模糊 PI 的永磁同步电机无传感控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 29-34.
LI R Q, YANG B, HE J X, et al. Sensorless control of PMSM based on variable universe fuzzy PI [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(10): 29-34.
- [3] DTALINGER C, HIRZ M. Investigations of rotor shaft position sensor signal processing in electric drive train systems [C] // 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, Bangkok, 2018.
- [4] 宋同月, 颜建虎, 应展烽, 等. 基于脉振高频注入法的零低速永磁直线同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(11): 10-17+24.
SONG T Y, YAN J H, YING Z F, et al. Sensorless control of permanent magnet linear synchronous motor at standstill and low speed based on pulsating high frequency injection [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(11): 10-17+24.
- [5] 吴少凤, 单忠. 基于脉振高频方波注入的永磁同步电机无位置传感器磁场定向控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 41-47.
WU S F, SHAN Z. Sensorless field oriented control of permanent magnet synchronous motor based on fluctuating high frequency square wave injection [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(1): 41-47.
- [6] RAFAQ M S, JUNG J M. A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(7): 4747-4758.
- [7] 王宇, 邢凯玲, 张成糕. 基于旋转综合矢量脉振高频电压注入的永磁通切电机无位置传感器技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7224-7235.
WANG Y, XING K L, ZHANG C G. A rotating synthesis vector based high frequency pulse voltage injection method for the sensorless control of the flux-switching permanent magnet machine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(19): 7224-7235.
- [8] AKREM A M, PILLAY P. Novel flux linkage estimation algorithm for a variable flux PMSM [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(3): 2319-2335.
- [9] 张瑞祥, 包广清, 汪波, 等. 基于变趋近律滑模反电动势观测器的 BLDCM 无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(8): 1-6.
ZHANG R X, BAO G Q, WANG B, et al. BLDCM position sensorless control based on variable reaching law sliding mode back EMF observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(8): 1-6.
- [10] 杨永杰, 刘旭东. 基于改进滑模方法的永磁同步电机宽速范围无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(7): 7-13.
YANG Y J, LIU X D. Position sensorless control of permanent magnet synchronous motor in wide speed range based on improved sliding mode method [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(7): 7-13.
- [11] SONG X D, FANG J C, HAN B C, et al. Adaptive compensation method for high-speed surface PMSM sensorless drives of EMF-based position estimation error [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 31(2): 1438-1449.
- [12] 张益峰. 六自由度机械臂轨迹规划研究[J]. 信息技术与信息化, 2023, 6: 79-82.
ZHANG Y F. Research on trajectory planning of a six degree of freedom robotic arm [J]. *Information Technology & Informatization*, 2023, 6: 79-82.
- [13] JANG G H, YOON J W, PARK N Y, et al. Torque and unbalanced magnetic force in a rotational unsymmetric brushless DC motors [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(5): 5157-5159.
- [14] ZHU Z Q, JAMIL M L M, WU L J. Influence of slot and pole number combinations on unbalanced magnetic force in PM machines with diametrically asymmetric windings [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, 49(1): 19-30.
- [15] MASSARINI A, KAZIMIERCZUK M K. Self-

- capacitance of inductors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(4): 671-676.
- [16] KWON Y C, SUL S K, BALOCH N A, et al. Design and control of IPMSM sensorless drive for mechanical rotor position estimation capability [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(2): 152-158.
- [17] KWON Y C, SUL S K, BALOCH N A, et al. Design of IPMSM with eccentric rotor and search coils for absolute position sensorless drive [C] // International Conference on Power Electronics & Ecce Asia, Seoul, 2015.
- [18] NIE S X, NI R G, WU Y W, et al. Design of novel variable reluctance resolver with outer rotor [C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems, Harbin, 2019.
- [19] FANG Y M, NI R G, JIANG T. Torque optimization control of dual-gap dual-pole composite machine for high efficiency and high dynamic performance [C] // 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems, Gyeongju, 2021.
- [20] NI R G, GU S Z, NIE S X, et al. Dual-gap dual-pole composite machine for mechanical rotor position estimation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10481-10489.
- [21] WU X M, ZHU Z Q. Simple mechanical rotor position estimation method based on rotor eccentricity [C] // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, San Diego, 2019.
- [22] 朱红庆, 钟思恒, 陈祥林, 等. 基于高频电压注入的带辅助齿 SPMSM 转子机械角度无传感器辨识策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 35-42+50.
- ZHU H Q, ZHONG S H, CHEN X L, et al. Sensorless identification strategy of SPMSM rotor mechanical angle with auxiliary teeth based on high-frequency voltage injection [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 35-42+50.

收稿日期:2023-11-08

收到修改稿日期:2024-01-09

作者简介:

杜恒川(1999-),男,硕士研究生,研究方向为电机设计与控制,790207922@qq.com;

* 通信作者:林晓刚(1990-),男,博士,副研究员,研究方向为电机设计与控制,xg_lin_nuaa@126.com。

Design and Research of SPMSM with Auxiliary Teeth with Mechanical Angle Identification Function

DU Hengchuan^{1,2}, LIN Xiaogang^{2*}, ZENG Zheng², WANG Xiaocan³, XIE Wei²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362216, China;

3. College of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361012, China)

Key words: permanent magnet synchronous motor; mechanical angle; auxiliary teeth; finite element analysis

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are widely used in various fields due to their smaller size, lighter weight, higher operational efficiency, greater reliability, and better dynamic performance. In applications like multi-axis robotic arms and servo control, where the mechanical position of PMSM needs to be determined, a large number of position sensors such as rotary transformers, magnetic encoders, and photoelectric encoders are used. However, the use of position sensors reduces the versatility, reliability, and increases the complexity of the control systems, while also adding to the cost and size. To counteract the disadvantages of using position sensors, researchers, both domestic and international, have proposed sensorless control methods. For the low and zero speed range as well as the medium and high speed range, sensorless algorithms based on saliency and back electro-motive force have been introduced respectively.

The aforementioned sensorless control methods can achieve the observation of rotor electrical angle over the entire speed range. However, in multipole PMSM, due to the electrical characteristics of the motor cycling multiple times within one mechanical cycle, one mechanical cycle contains a number of electrical angle cycles equal to the number of pole pairs. For example, the relationship between mechanical angle and electrical angle of an 8-pole PMSM within one mechanical cycle is shown in Fig.1. The characteristic of the electrical and mechanical angles within one mechanical cycle is such that a

single electrical angle corresponds to four different mechanical angles. Without sensors, if only the rotor electrical angle is observed, it is impossible to determine the corresponding magnetic pole and thus further identify the mechanical angle. Therefore, a new method is needed to identify the rotor mechanical angle without sensors, in order to introduce sensorless control algorithms into high-end fields like servo control.

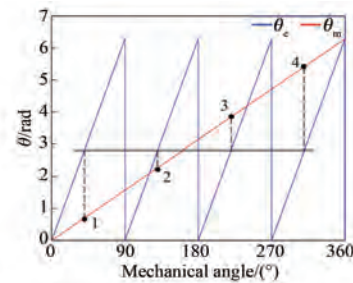


Fig. 1 Diagram of the relationship between electrical angle and mechanical angle of 8-pole PMSM

The electromagnetism of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) is designed by adding auxiliary teeth of different heights on the rotor to ensure the motor's inductance topology includes information about the rotor's mechanical angle. The negative impacts of adding auxiliary teeth on the motor's back electromotive force (EMF), output torque, and three-phase inductance are analyzed using finite element simulation software. Finally, the mechanical angle identification capability of the proposed topology is verified on a 0.75 kW SPMSM platform.