

宽调速范围低转矩脉动的一种新型内置式永磁同步电机的设计与分析

徐 扬¹, 郭云翔¹, 王艾萌¹, 周 慎²

(1. 华北电力大学 电气与工程学院, 河北 保定 071003;
2. 国电南瑞科技股份有限公司 轨道技术分公司, 江苏 南京 210061)

摘要: 宽调速范围与低转矩脉动一直是设计电动汽车用内置式永磁同步电机时所追求的重要目标。设计了一种转子结构为 \overline{W} 的新型内置式永磁同步电机, 并进行了绕组结构优化与性能分析。利用有限元分析法, 将所设计的电机初始模型、优化模型以及转子结构为一字型的传统内置式永磁同步电机模型进行了对比分析。通过对电机的永磁体用量、 dq 轴电感、弱磁调速能力、齿槽转矩以及纹波转矩等重要参数的详细对比分析, 最终选择了 36 槽 8 极转子结构为 \overline{W} 的内置式永磁同步电机设计方案。此方案在保证电机转矩、功率要求的前提下, 可以获得较宽的调速范围和较小的整体转矩脉动。

关键词: 内置式永磁同步电机; 有限元分析; 弱磁调速范围; 转矩脉动

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2013) 04-0007-06

Design and analysis of a novel interior permanent magnet synchronous machine with wide speed region and low torque ripple

XU Yang¹, GUO Yun-xiang¹, WANG Ai-men¹, ZHOU Shen²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Rail Transit Technology Branch Company NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: Wide speed region and low torque ripple is always the key destination when designing a interior permanent magnet machine for electric vehicle traction. A novel interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) with rotor topology of \overline{W} -type, is designed then winding structure optimization and performance analysis have been presented. Using finite element analysis, the comparison and analysis of the initial design model, the optimization model and the traditional IPMSM model have been carried out. Detailed comparative analysis of the machines' parameters is made, which includes the total mass of the used permanent magnet, d - q axis inductance, the capacity of flux-weakening, cogging torque and ripple torque and so on. Finally, the design of the IPMSM with 36-slot 8-pole, and rotor topology of \overline{W} -type is selected. The machine has both a wide speed region and low torque ripple, while the torque and power of the machine have been ensured.

Key words: interior permanent magnet synchronous machine (IPMSM); finite element analysis (FEA); flux-weakening speed region; torque ripple

0 引言

收稿日期: 2013-02-20.

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2012502018).

随着全球变暖以及化石燃料紧缺问题日渐严重, 如何更高效地利用能源成为人类发展过程

中所必须面对的问题。永磁同步电机因其具有高效率、高输出转矩、高功率密度等良好的动态性能,且体积小、运行可靠,已经在众多领域内得到了广泛地应用^[1]。尤其是在汽车工业发展到新能源汽车的阶段,永磁同步电机起到了至关重要的作用。

内置式永磁同步电机作为牵引电机应用在新能源电动汽车中,相较于传统电机,其在拥有表贴式永磁电机所具备的优良特性的同时,可以通过转子结构的优化,获得更宽的调速范围^[2,3]。宽调速范围可以降低对电机最大功率的要求,提高能量的利用效率,并在满足电动汽车启动加速和低速爬坡性能的前提下,保持一定高速运行带载能力^[4]。此外,转矩脉动是永磁电机运行时所不可避免的。作为电动汽车首选的牵引电机,减小永磁同步电机的转矩脉动,将有利于电动汽车行驶时的平顺性。采用分数槽绕组可以有效减小永磁同步电机空载时的齿槽转矩^[5],并通过减少定转子磁动势的高次谐波耦合来降低负载时的纹波转矩^[6],从而改善电机的整体转矩脉动。

本文中内置式永磁同步电机的最终设计方案的 3D 模型如图 1 所示。其转子为 \bar{W} 型内置式永磁体结构,定子为 36 槽分数槽分布式绕组结构。

为了说明最终设计电机的综合性能,将 3 台同为 7.5 kW,8 级的电机模型进行了对比分析。

(1) 传统一字型内置式永磁电机,定子为 48 槽整数槽,如图 2(a)所示;

(2) \bar{W} 型内置式永磁电机,定子为 48 槽整数槽,如图 2(b)所示;

(3) \bar{W} 型内置式永磁电机,定子为 36 槽分数槽,如图 2(c)所示。

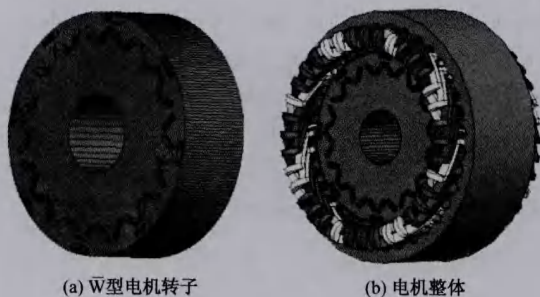


图 1 \bar{W} 型内置式永磁同步电机的 3D 模型
Fig. 1 3D Model of \bar{W} -shape IPM Machine

本文的主要工作:针对电动汽车牵引电机的性能的要求,利用有限元分析法对这 3 种类型的

内置式永磁同步电机的各项性能做了详细而又全面地对比分析。综合考虑,最终选择了 \bar{W} 型 36 槽分数槽内置式永磁同步电机的设计方案。

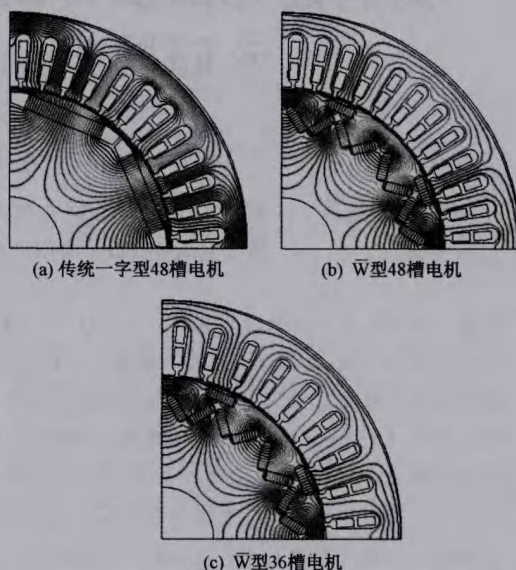


图 2 3 种内置式永磁电机模型空载磁力线分布横截面图

Fig. 2 Cross-sections of the Three IPM Machines Models' no-load flux distributions

1 新型内置式永磁电机模型的结构与参数

1.1 电机模型结构

3 种电机空载磁力线分布横截面图如图 2 所示。图 2(a)和(b)所示的 2 台电机模型转子结构不同,但定子绕组结构相同,均采用双层分布式 48 槽整数槽绕组。图 2(a)所示电机的转子结构为传统内置式一字型,图 2(b)为新型 \bar{W} 型内置式转子结构。图 2(c)所示模型保留了图 2(b)中的模型的 \bar{W} 型转子结构,将原来定子槽数由 48 减少为 36,由原先的整数槽分布式绕组变为分数槽分布式绕组。相比于传统一字型内置式永磁转子, \bar{W} 型转子可以使永磁电机拥有更好的弱磁能力,从而获得很宽的调速范围。

定子绕组的设计参数如表 1 所示。通过采用分布式短距绕组,可以有效地减小定子绕组电动势和磁动势 5 次与 7 次谐波的成份,从而改进定子绕组电动势与磁动势的波形。分数槽绕组的采用可以有效降低齿槽转矩与纹波转矩,从而改善电机运行时整体的转矩脉动。定子绕组在 1/4 电

机模型下的分布如图3所示。

表1 定子绕组设计参数

Tab.1 Parameters of Stator Windings

参数		整数槽	分数槽
极对数	p	4	4
相数	m	3	3
槽数	Q_s	48	36
每极每相槽数	$q = \frac{Q_s}{2pm}$	2	1.5
级距	$\tau = \frac{Q_s}{2p}$	6	4.5 ≈ 5
节距	y_1	5	4
短距因数	-	5/6	4/5
相带/°	-	60	80/40

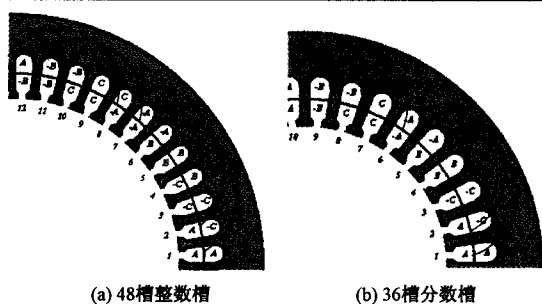


图3 定子绕组在1/4电机模型下的分布图

Fig.3 Distributions of the Stator Winding in 1/4 Model

1.2 电机关键参数与尺寸

本文中对比的3台电机模型的额定功率、转速、电流以及定转子尺寸以及材料均相同,最终采用的 \bar{W} 型36槽内置式永磁同步电机模型的主要参数如表2所示。值得注意的是:3种电机模型使

表2 \bar{W} 型36槽内置式永磁电机模型的主要参数

Tab.2 Main Parameters of the \bar{W} -type-36-slot IPM Machine Model

设计参数	参数值
额定功率/kw	7.5
额定电压/V	115
额定电流/A	45
额定转速/rpm	3 200
最高转速/rpm	11 000
额定转矩/Nm	22.6
极对数	4
槽数	36
定子外径/mm	175
定子内径/mm	120
气隙/mm	0.5
转子内径/mm	38
定转子磁钢材料	M19-29G

用的相同的钕铁硼型永磁体材料NdFeB,但由于转子结构不同,永磁体材料的使用量也不同。表3对3种类型电机模型永磁体尺寸与用量做了对比,由表3可见: \bar{W} 型永磁电机比传统的一字型电机更节省永磁体材料。钕铁硼型永磁材料价格日益高昂, \bar{W} 型内置式永磁同步电机可以显著节省制造成本。

表3 3台电机模型永磁体尺寸与用量

Tab.3 Magnet Mass and Dimensions of the Three Machine Models

电机类型	厚度/mm	每极下的总长度/mm	总用量/g
\bar{W} 型36槽	3.3	42.6	632.56
\bar{W} 型48槽	3.3	42.6	632.56
一字型48槽	5.5	30	742.4

2 弱磁能力分析

2.1 电机电感与转矩参数计算

在实际应用中,电机定转子铁芯的磁导率并非无穷大。所以,当定转子铁芯饱和时,电机的磁链和电感将发生变化。磁饱和现象使得电机的电感值会随电流的变化而改变。考虑磁饱和的永磁同步电机的 d 轴和 q 轴电感的计算如式(1)、式(2)所示。

$$L_d = \frac{\lambda_d - \lambda_{PM}}{I_d} \bigg|_{i_q=0} \quad (1)$$

$$L_q = \frac{\lambda_q}{I_q} \bigg|_{i_d=0} \quad (2)$$

式中: λ_{PM} 为永磁体产生的永磁磁链; I_d, I_q, λ_d 和 λ_q 分别为电机定子绕组电流以及由其产生的磁链的 dq 轴分量。

图4为3台电机模型的 dq 轴电感曲线图。从图4中可以看出:对于内置式永磁同步电机, q 轴电感均显著大于 d 轴电感,因此存在磁阻转矩并易于实现拓宽调速范围。但相较于 \bar{W} 型永磁电机,传统一字型电机的 dq 轴电感差异较小,所以其凸极率^[7]明显的小于 \bar{W} 型电机,从而限制了调速范围的拓展。

内置式永磁同步电机的电磁转矩由永磁转矩和磁阻转矩两部分组成。电磁转矩的计算公式如式(3)所示。

$$T_e = \frac{3}{2}p\lambda_{PM}I_q + \frac{3}{2}p(L_d - L_q)I_dI_q \quad (3)$$

式中: p 是电机的极对数; $\frac{3}{2}p\lambda_{PM}I_q$ 为永磁转矩;

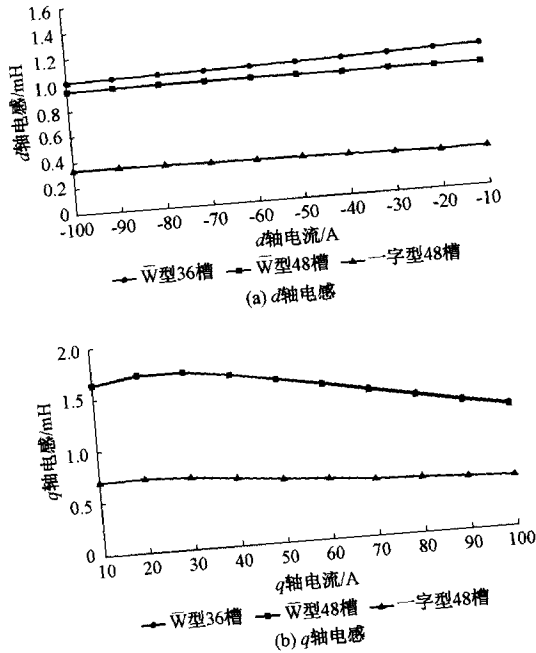


图 4 3 台电机模型的 dq 轴电感比较
Fig. 4 Comparison of d-axis and q-axis Inductance of the Three Machine Models

$\frac{3}{2}p(L_d - L_q)i_d i_q$ 为磁阻转矩。图 5 为 3 台电机模型在额定电流额定转速下总转矩中永磁转矩与磁阻转矩的对比。由图 5 可以看出,相较于传统一字型内置式永磁电机,具有 W 型转子的永磁电机输出转矩中磁阻转矩占有较高比例,说明 W 型内置式永磁电机可节省永磁材料,同时具有更好的弱磁能力。

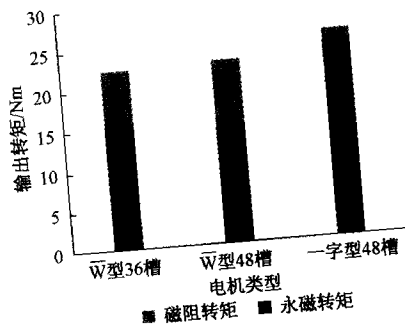


图 5 3 台电机模型的永磁转矩和磁阻转矩的比较
Fig. 5 Comparison of PM Torque and Reluctance Torque of the Three Machine Models

2.2 弱磁能力对比分析

弱磁能力直接影响永磁同步电机高速运转时的性能。因此,在对电机进行优化设计时,如何使电机具备较强的弱磁能力,是一个需要着重考虑的问题。内置式永磁同步电机的输出转矩中所

以包含磁阻转矩,是因为电机的凸极效应。而磁阻转矩的存在,使电机更易于弱磁控制。因此从一定程度上我们可以利用凸极效应的强弱来衡量一台内置式永磁同步电机的弱磁性能。我们用凸极率来表示电机凸极效应的强弱,凸极率的定义如式(4)所示:

$$\xi = \frac{L_q}{L_d} \quad (4)$$

ξ 越大即内置式永磁电机的 L_q 与 L_d 差别越大,转矩中的磁阻转矩比重越大,电机具备更强的弱磁调速能力^[7]。表 4 列出了 3 台电机模型的凸极率。从表中可见,W 型内置式永磁同步电机的凸极率远大于传统一字型电机,所以 W 型电机拥有很宽的弱磁调速范围。

表 4 3 台电机模型凸极率

Tab. 4 Saliency of the Three Machine Models			
参数	W 型 36 槽	W 型 48 槽	一字型 48 槽
凸极率	1.68	1.77	1.44

如图 6 所示为 3 台电机模型在额定电流下转矩和功率随电机转速的变化曲线。之所以有这样的曲线,是因为受逆变器最高输出电压的限制。从图中我们可以看出:3 台电机模型的基速相同,W 型内置式永磁同步电机的弱磁调速范围远大于传统一字型永磁电机,验证了 3 台电机模型的凸极率的差异。虽然 W 型永磁电机输出转矩要比

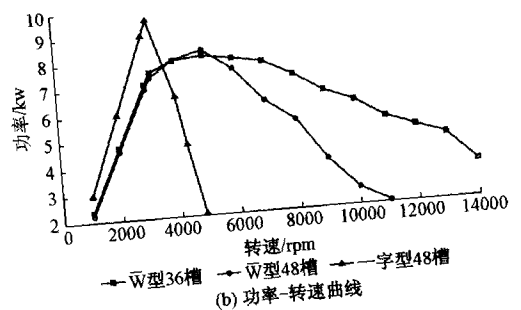
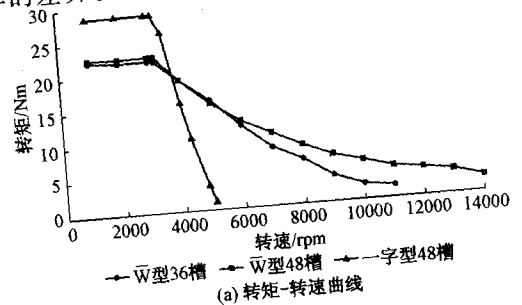


图 6 3 台电机模型的不同转速下的转矩、转速曲线
Fig. 6 Curve of Torque and Power Versus Speed of the Three Machine Models

传统一字型略小,但其永磁体量也更小,能够满足经济性方面的要求。

3 转矩脉动

内置式永磁同步电机的转矩脉动主要包括空载时的齿槽转矩和负载时的纹波转矩。本文主要考虑了在转子极数确定的情况下,改变定子槽数,即从槽极配合的角度减小 \bar{W} 型永磁同步电机的齿槽转矩以及纹波转矩,从而降低所设计电机整体转矩脉动的水平。

3.1 齿槽转矩

齿槽转矩是由转子的永磁体磁场和定子铁心的齿槽相互作用,在电机圆周方向产生的转矩。齿槽转矩与定子电流无关,对电机总体转矩的平均值无贡献,只会引起转矩脉动。在定转子相对位置变化的一个齿距的范围内,齿槽转矩是周期性变化的,变化的周期数取决于极数和槽数组合。齿槽转矩的幅值与周期数成反比,因此要减小齿槽转矩的幅值需使其周期数变大。齿槽转矩的周期数 N_p 可由式(5)表示:

$$N_p = \frac{2p}{\text{GCD}(Z, 2p)} \quad (5)$$

式中: Z 为永磁同步电机定子总槽数; $2p$ 为其极数; $\text{GCD}(Z, 2p)$ 是 Z 和 $2p$ 的最大公约数。36槽与48槽 \bar{W} 型内置式永磁同步电机的极数同为8。由上式可知,36槽(分数槽)电机在一个齿距内齿槽转矩变的周期数是48槽(整数槽)的两倍,因此36槽电机齿槽转矩的幅值会明显小于48槽电机。如图7所示为36槽和48槽 \bar{W} 型内置式永磁同步电机在额定转速下齿槽转矩的波形图。

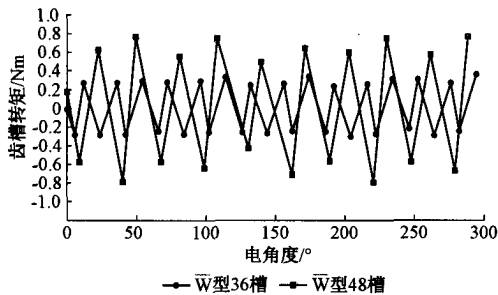


图7 36槽与48槽 \bar{W} 型永磁同步电机的齿槽转矩比较
Fig. 7 Comparison of Cogging Torque of 36-slot and 48-slot \bar{W} -type IPMSM

3.2 纹波转矩

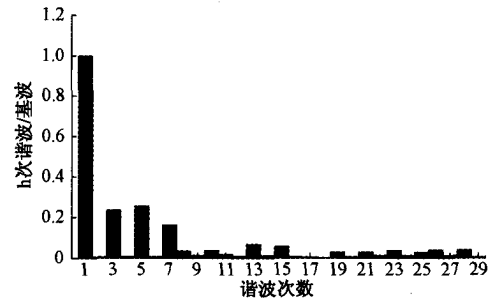
纹波转矩是由定子磁动势与转子磁动势中的

高次谐波耦合产生的。参考文献[6]中推导了纹波转矩的表达式,如式(6)所示:

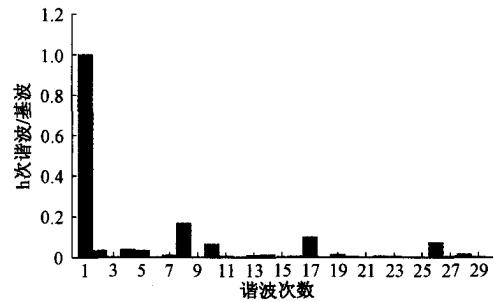
$$T_{\text{ripple}} = -p \frac{\mu_0}{g} r_g l_{stk} \pi \cdot \sum_{\substack{h=6m \pm 1 \\ m=1,2,3,\dots}} (h f_{s,h} f_{r,h} \sin((h \pm 1)\omega_e t \pm \gamma_d)) \quad (6)$$

式中: p 为电机的极对数; μ_0 为空气磁导率; g 为气隙的径向宽度; r_g 为气隙半径; l_{stk} 为电机轴向长度; $f_{s,h}$ 为定子磁动势的 h 次谐波; $f_{r,h}$ 为转子磁动势的 h 次谐波; $\omega_e t$ 为转子的电磁角位置; γ_d 为定子电流相对于 d 轴的相位。由式(6)可见:定、转子只有相同次数的磁动势谐波才会耦合,产生纹波转矩。永磁电机转子结构一定时,可以通过改变电机绕组槽数的方法削减定子磁动势对应的 $6m \pm 1$ 次谐波来减小纹波转矩。

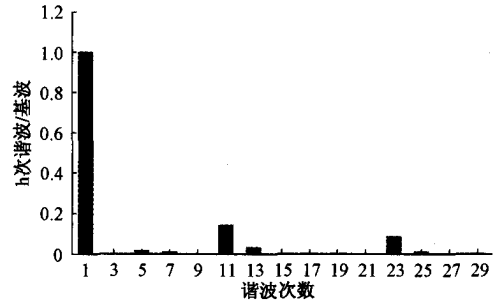
从图8中可以看出:定子磁动势5次、7次谐



(a) 转子磁动势频谱分析



(b) 36槽定子磁动势频谱分析



(c) 48槽定子磁动势频谱分析

图8 \bar{W} 型永磁同步电机定转子磁动势分析

Fig. 8 Frequency Analysis of Stator and Rotor's MMF in the \bar{W} -type PMSM

波已经通过绕组的短距结构大大削弱了。36 槽定子磁动势的谐波主要为 $9m \pm 1$ 次,48 槽定子磁动势的谐波主要为 $12m \pm 1$ 次。36 槽电机定子磁动势中有 $1/2$ 的偶数次谐波不会与转子磁动势中的 $6m \pm 1$ 奇数次谐波耦合,因而减小了纹波转矩。

图 9 为 \bar{W} 型 36 槽、48 槽永磁同步电机在额定转速、额定电流下的输出转矩曲线图。从表 5 可以看出,36 槽分数槽绕组相对于 48 槽整数槽绕组不但减小了齿槽转矩,而且通过减弱定子磁动势的高次谐波耦合减小了纹波转矩,从而进一步降低了电机整体转矩的脉动水平。

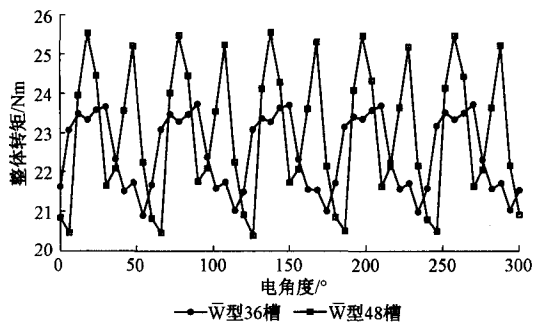


图 9 36 槽与 48 槽 \bar{W} 型永磁同步电机的输出转矩比较

Fig. 9 Comparison of Torque of 36-slot and 48-slot \bar{W} -type PMSM

表 5 \bar{W} 型 36 槽、48 槽电机转矩脉动对比

Tab. 5 Comparison of Torque Pulsation of 36-slot and 48-slot \bar{W} -type Machine

电机类型	齿槽转矩峰 峰值/Nm	输出转矩峰 峰值/Nm
\bar{W} 型 36 槽	0.67	2.83
\bar{W} 型 48 槽	1.56	5.16

4 结 论

本文设计了一种具有宽调速范围、低转矩脉动的新型 \bar{W} 型 36 槽内置式永磁同步电机。通过有限元分析法,将其与传统一字型和 \bar{W} 型 48 槽永磁同步电机进行了对比,由分析可知: \bar{W} 型永磁电

机不但节省永磁体用量,而且通过转子结构的创新设计获得了较强的弱磁性能和较宽的调速范围;定子侧通过采用 36 槽分数槽分布式绕组,虽然弱磁能力和最大输出转矩有一定程度的削弱,但这种改进不仅减小了空载时的齿槽转矩而且能降低负载时的纹波转矩,从而降低了电机整体转矩脉动的水平。综上所述,36 槽 \bar{W} 型永磁同步电机在满足电机输出性能的前提下,同时拥有较宽的弱磁调速范围和较低的转矩脉动,因此更适宜应用在新能源电动汽车中。

参考文献:

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] Zhu Z Q, Howe D. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, vol. 95, no. 4, pp. 746-765.
- [3] Soong W L, Miller T J E. Field-weakening performance of brushless synchronous AC motor drives [J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings-, 1994, vol. 141, no. 6, pp. 331-340.
- [4] 赵宇, 柴建云. 电动汽车用宽调速范围永磁磁阻电机优化设计研究 [J]. 电工电能新技术, 2007, 01: 43-46+63.
- [5] Jahns T M, Soong W L. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives-a review [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 1996, vol. 43, no. 2, pp. 321-330.
- [6] Seok-Hee Han, Jahns T M, Soong W L. Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Stators With Odd Number of Slots Per Pole Pair [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2010, vol. 25, no. 1, pp. 118-127.
- [7] EL-Refaie A M, Jahns T M. Optimal Flux Weakening in Surface PM Machines using Fractional-slot Concentrated windings [J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 790-800.

作者简介: 徐 扬 (1979-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统通信技术; 郭云翔 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机设计与控制。