

混合动力汽车 ISG 用混合永磁同步电机转子研究*

王晓光, 周 晟, 李新华, 赵 萌, 胡藏现

(湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 设计了一款混合动力汽车集成式起动发电机 (ISG), 用钕铁硼和铁氧体混合永磁的永磁同步电机 (PMSM)。分析了两种永磁体的结构参数对电机磁路的影响规律, 推导了钕铁硼和铁氧体并联磁路的约束条件; 以铁氧体的不可逆退磁量和电机的基本性能为优化目标, 通过场-路结合的方法, 确定了钕铁硼和铁氧体的结构参数; 并与传统的钕铁硼 PMSM 在电机性能和永磁体成本等方面进行了比较分析。研究表明, 所提出的 ISG 混合永磁电机能有效地减少永磁体材料成本和铁氧体退磁风险, 电机性能达到了设计要求。

关键词: 集成式起动发电机; 混合动力汽车; 混合永磁; 场-路结合; 铁氧体不可逆退磁

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)05-0107-06

Research on Rotor of Hybrid Permanent Magnet Synchronous Motor for Hybrid Electric Vehicle Integrated Starter Generator*

WANG Xiaoguang, ZHOU Sheng, LI Xinhua, ZHAO Meng, HU Cangxian

(Hubei Key Laboratory for High-Efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: A permanent magnet synchronous motor (PMSM) with NdFeB and ferrite hybrid permanent magnets for hybrid electric vehicle integrated starter generator (ISG) was designed. The influence of the structure parameters of the two permanent magnets on the magnetic circuit of the motor was analyzed, and the constraints of the parallel magnetic circuit of NdFeB and ferrite were deduced. With the irreversible demagnetization of ferrite and the basic performance of the motor as the optimization objective, the structure parameters of NdFeB and ferrite were determined by field-circuit combining method. The NdFeB PMSM was compared and analyzed in terms of motor performance and permanent magnet cost. The results showed that the ISG hybrid permanent magnet motor proposed could effectively reduce the cost of permanent magnet materials and the risk of ferrite demagnetization, and the performance of the motor met the design requirements.

Key words: integrated starter generator; hybrid electric vehicle; hybrid permanent magnet; field-circuit combination; irreversible demagnetization of ferrite

0 引 言

钕铁硼永磁电机具有高起动转矩、高效率等特点, 广泛应用于集成式起动发电机 (ISG)^[1-3]。稀土资源的稀缺使得钕铁硼的价格提升, ISG 钕铁硼永磁同步电机 (简称 ISG 钕铁硼电机) 的制造成本也有所上涨^[4-5]。因此, 低成本的铁氧体

永磁电机价格优势越来越明显。但铁氧体的矫顽力很低, 使得铁氧体永磁电机存在永磁体不可逆退磁的风险, 限制了该电机的广泛应用^[6-9]。

少稀土永磁、非稀土永磁和混合永磁电机逐渐成为研究热点。文献[7]对压缩机用混合永磁辅助式磁阻电机进行研究, 通过有限元仿真验证了电机气隙长度、磁路饱和程度以及永磁体厚度

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51607060); 湖北工业大学绿色工业引领计划项目 (ZZTS2017003); 湖北工业大学高层次人才科研启动基金项目 (BSQD2015022)

作者简介: 王晓光 (1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为永磁电机设计与控制。

对电机磁阻转矩的影响。文献[8]提出一种爪式混合永磁转子结构,证明了混合永磁转子结构中,并联磁路转子的磁阻小于串联磁路转子的磁阻,采用并联磁路的转子结构可以提高电机的输出特性。文献[9]将钕铁硼电机、铁氧体电机和混合永磁电机进行比较,研究结果显示,虽然钕铁硼电机的制造成本最高,但其性能最好、转矩密度最高而且不用考虑退磁问题,因此依然是应用最广泛的电机。文献[10]研究一种表贴式轴向永磁体混合电机,经过计算和仿真分析,混合永磁电机不仅可以减小电机的永磁体成本,还可以削弱电机齿槽转矩,从而降低转矩脉动率。

为了降低电机成本,并兼顾电机的性能和可靠性,本文设计了一款 ISG 混合永磁同步电机(简称 ISG 混合永磁电机)。该电机转子采用钕铁硼和铁氧体共同励磁。采用场-路结合的方法研究了两种永磁体的并联约束条件,分析了永磁体参数对电机转矩的影响;并采用有限元法对转子永磁体的退磁情况进行了详细的分析,通过优化转子结构和永磁体的尺寸,有效地降低了铁氧体的退磁风险。根据仿真结果和对比分析表明:ISG 混合永磁电机的制造成本较低,转矩性能与 ISG 钕铁硼电机相当,且性价比更高。

1 电机磁路研究

1.1 电机磁路模型

以 1 台 10 极 12 槽的 ISG 混合永磁电机为研究对象。为了方便比较分析,以某款混合动力汽车 ISG 钕铁硼电机为基准电机,其主要技术指标如表 1 所示^[11]。ISG 混合永磁电机除了极槽配合外,其余参数都与 ISG 钕铁硼电机一致。

表 1 ISG 钕铁硼电机主要技术指标

参数名称	参数值
额定电压/V	158
额定功率/kW	7.5
峰值功率/kW	15
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 390
峰值转速/(r·min ⁻¹)	5 500
定子铁心外径/mm	260
轴长/mm	41.2
极槽配合	12/18

ISG 混合永磁电机转子结构如图 1 所示。在

转子中同时摆放铁氧体(灰色)和钕铁硼(黑色)两种不同的永磁体,同种类型的永磁体采用相同的规格。电机的静态磁场由这两种永磁体共同产生。在转子的 d 轴上布置双层钕铁硼永磁体,利用钕铁硼较强的剩磁和双层结构产生的磁阻转矩,可以提高电机的转矩输出能力。为了兼顾发电状态下的电动势畸变率,在转子的 q 轴上放置铁氧体,保证电机的气隙磁场为正弦波。同时,将矫顽力较高的钕铁硼放置在最容易退磁的位置,以阻挡电枢磁场对铁氧体的冲击,从而减小铁氧体的退磁率。

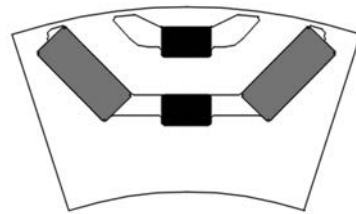


图 1 ISG 混合永磁电机转子结构

图 2 所示为通过有限元分析得到的电机静态磁场。从图 2 可以看出,转子磁路由钕铁硼永磁体和铁氧体永磁体共同产生。

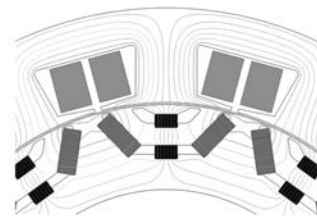


图 2 电机静态磁场

根据文献[8]的研究结果,并联磁路结构下电机的输出特性大于串联磁路结构,因此所设计的转子结构要保证两种永磁体的磁路为并联关系。为了实现对混合永磁电机磁路的计算,可得电机的主磁路图和等效磁路模型如图 3、图 4 所示。其中: F_{n1} 、 F_{n2} 分别为 2 块钕铁硼产生的磁动势, G_{n1} 、 G_{n2} 分别为 2 块钕铁硼的磁导, ϕ_n 为钕铁硼磁路的磁通量; F_{f1} 、 F_{f2} 分别为 2 块铁氧体产生的磁动势, G_{f1} 、 G_{f2} 分别为 2 块铁氧体的磁导, ϕ_f 为铁氧体磁路的磁通量; G_s 为电机气隙的磁导, ϕ_s 为两种永磁体产生的总磁通量。

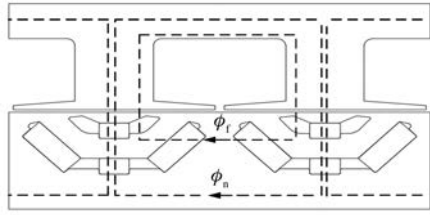


图3 电机主磁路图

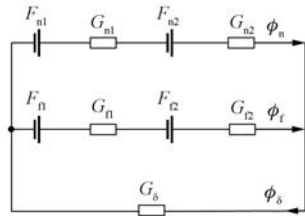


图4 等效磁路模型

1.2 电机磁路计算

根据磁路的基本定理, 钕铁硼磁路和铁氧体磁路都存在如下基本关系:

$$F_i = H_c w_i \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

$$G_i = \frac{\mu_0 \mu_r h l}{w_i} \quad (2)$$

$$\phi = B h l \quad (3)$$

$$F_G = \frac{\phi}{G_1} + \frac{\phi}{G_2} \quad (4)$$

式中: H_c ——永磁体矫顽力;

w ——永磁体厚度;

μ_0, μ_r ——真空磁导率和永磁体磁导率;

h ——永磁体宽度;

l ——永磁体轴向长度;

B ——永磁体磁通密度。

由于钕铁硼磁路和铁氧体磁路在等效磁路中是并联的关系, 所以钕铁硼磁路的总磁动势等于铁氧体磁路的总磁动势, 可得:

$$F_{n1} + F_{n2} - \frac{\phi_n(G_{n1} + G_{n2})}{G_{n1}G_{n2}} = F_f + F_r - \frac{\phi_f(G_{f1} + G_{f2})}{G_{f1}G_{f2}} \quad (5)$$

根据式(1)~式(4), 式(5)可以进一步推导为

$$H_{cn}(w_{n1} + w_{n2}) - \frac{B_n(w_{n1} + w_{n2})}{\mu_0 \mu_{rn}} =$$

$$H_{cf}(w_{f1} + w_{f2}) - \frac{B_f(w_{f1} + w_{f2})}{\mu_0 \mu_{rf}} \quad (6)$$

由于同种类型的永磁体都采用相同的规格, 所以式(6)可以化简为

$$H_{cn}w_n - \frac{B_n w_n}{\mu_0 \mu_{rn}} = H_{cf}w_f - \frac{B_f w_f}{\mu_0 \mu_{rf}} \quad (7)$$

$$w_n = \frac{H_{cf} - H_f}{H_{cn} - H_n} w_f \quad (8)$$

式中: H_n, H_f ——钕铁硼和铁氧体工作点处的磁场强度。

所采用的钕铁硼剩磁为 1.23 T, 矫顽力为 900 kA/m; 铁氧体剩磁为 0.45 T, 矫顽力为 350 kA/m。在工作点处, 永磁体的磁场强度不会大于永磁体的剩磁, 因此 H_n, H_f 与 H_{cn}, H_{cf} 相比非常小, 可以忽略不计。那么, 式(8)可以简化为

$$w_n = \frac{H_{cf}}{H_{cn}} w_f = \frac{350}{900} w_f = 0.38 w_f \quad (9)$$

由式(9)可得, 在图 1 的并联磁路混合永磁转子结构中, 钕铁硼厚度为铁氧体厚度 0.38 倍最为合理。

1.3 磁路计算有限元验证

为了验证前文磁路计算的合理性, 令钕铁硼厚度与铁氧体厚度比值为 k 。在铁氧体尺寸和钕铁硼宽度都不变的前提下, 改变 k 值的大小, 观察对应的气隙磁密基波幅值及其增量的大小, 结果如图 5 所示。

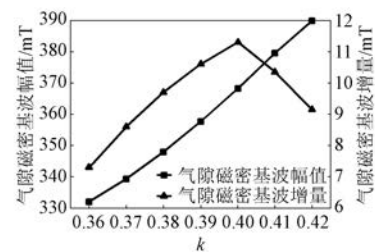


图5 k 值与气隙磁密基波幅值的关系曲线

由图 5 可以看到, 随着 k 值的增大, 电机气隙磁密的基波幅值呈上升的趋势。这是由于增大 k 值, 钕铁硼厚度增加, 在其宽度不变的情况下, 磁钢用量在增加, 导致电机气隙磁通量增加。但是电机气隙磁密基波幅值的增量在 $k=0.4$ 的时候达到最大。这说明 $k=0.4$ 时转子为并联磁路, 其磁阻要小于其他情况下的磁阻, 所以增加相同的磁

动势,由于磁阻的减小,使得电机的磁通量增加得更多。

根据磁路计算当 $k=0.38$ 时磁路并联,而由有限元仿真得到的结果为 $k=0.40$ 时磁路并联,原因是由于磁路计算时未考虑漏磁,因此与有限元分析存在一定的误差。

2 永磁体参数设计

转子永磁体的尺寸与其产生的磁场强度、转矩能力和电动势等电机性能密切相关,同时,永磁体尺寸也影响了其抗退磁能力。为了得到电机性能较好且永磁体退磁较少的设计方案,首先通过不同铁氧体厚度下所对应的永磁体退磁量确定铁氧体厚度;再根据前文的推导,计算出钕铁硼永磁体厚度;最后根据其输出转矩能力和电动势畸变率确定两种永磁体的宽度。

2.1 铁氧体厚度设计

电机运行的过程中会产生电枢电流,电枢电流会产生电枢磁通。电枢反应会造成永磁体弱磁。当永磁体的剩磁降低到退磁点以下就认为永磁体产生了不可逆退磁。

铁氧体厚度直接影响其抗退磁能力。

电机在峰值工况下铁氧体永磁体不同的厚度与铁氧体退磁体积的关系如图 6 所示。从图 6 可以看到,当铁氧体厚度从 5 mm 开始逐渐增大时,铁氧体永磁体的退磁量逐渐减小。这是由于增加铁氧体厚度,铁氧体产生的磁通量增加,铁氧体磁路的饱和程度增加,抑制电枢磁通流入铁氧体磁路,所以导致铁氧体的退磁量变小。当铁氧体厚度达到 10 mm 后,继续增加铁氧体厚度,铁氧体的退磁量呈上升趋势,这是由于增加铁氧体厚度使得转子的 q 轴磁路变窄, q 轴磁路的饱和程度增加,原本流入 q 轴磁路的电枢磁通流入了铁氧体磁路,使得铁氧体磁路的电枢磁通增大,对铁氧体

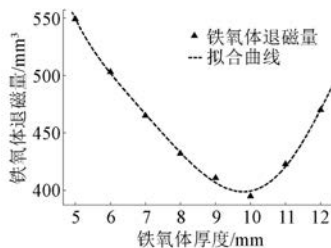


图 6 铁氧体厚度与退磁量的关系曲线

的冲击变大。因此确定铁氧体厚度 w_f 为 10 mm 最为合理。

确定铁氧体的厚度后,电流过载倍数与铁氧体退磁率的关系曲线如图 7 所示。当电机运行于额定工况时,铁氧体的退磁率仅为 0.97%;当电流为三倍过载时,铁氧体的退磁率达到了 38.7%。

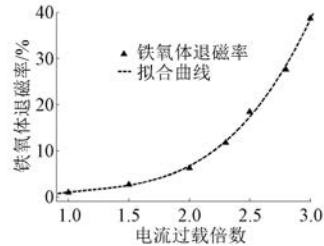


图 7 电流过载倍数与退磁率的关系曲线

2.2 永磁体尺寸设计

根据前文的推理,当铁氧体厚度 $w_f = 10$ mm 时,钕铁硼厚度应为 4 mm。图 8 所示为当 $w_f = 10$ mm、 $w_n = 4$ mm,预取铁氧体的宽度 $h_f = 18$ mm 时,不同钕铁硼厚度所对应的电机转矩和电动势畸变率的仿真结果。从图 8 可以看到,随着钕铁硼宽度的增加,电机的转矩和电动势畸变率都在增大。在通入 58 A 电流的情况下, $h_n = 11$ mm 可以达到额定转矩。继续增大钕铁硼宽度不仅会增加磁钢用量,还会增大电动势畸变率,影响电机性能。可以确定钕铁硼的宽度 $h_n = 11$ mm。

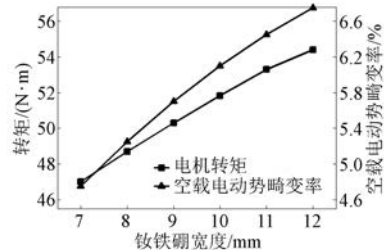


图 8 钕铁硼宽度对电机性能的影响

当 $h_n = 11$ mm、 $w_f = 10$ mm、 $w_n = 4$ mm 时,在不同铁氧体宽度 h_f 下,ISG 混合永磁电机的转矩和电动势畸变率的变化曲线如图 9 所示。随着铁氧体宽度的增加,转子两侧的磁场强度会增大;同时,增加铁氧体的宽度,转子的层间距会增大,转子中间的磁场会减弱。图 9 中当铁氧体宽度 $h_f = 10$ mm 时,转子两侧的磁场较弱,且转子中间的磁

场较强,电动势波形为尖顶波,此时的电动势畸变率较大。随着铁氧体宽度的增加,转子两侧的磁场增强,转子中间的磁场减弱,电机电动势波形趋于正弦,电动势畸变率减小。当 $h_f = 15 \text{ mm}$ 后,继续增大铁氧体宽度,电机的电动势畸变率又开始增大,这是因为转子两侧磁场继续增大,转子中间磁场继续减小,电机电动势波形越来越平顶,电动势畸变率变大。但当 $h_f = 15 \text{ mm}$ 时,电机转矩未达到额定值;当 $h_f = 16 \text{ mm}$ 时,电机转矩为 $51.7 \text{ N}\cdot\text{m}$,电动势畸变率为 5.8% 。

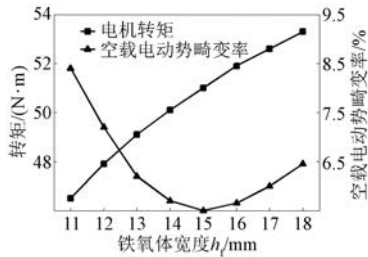


图9 铁氧体宽度对电机性能的影响

3 电机性能比较

比较分析了 ISG 混合永磁电机与 ISG 钕铁硼电机在额定转速下的电动势、额定工况和峰值工况下的输出转矩和电机永磁体材料成本。图 10 所示为两种电机的仿真模型。

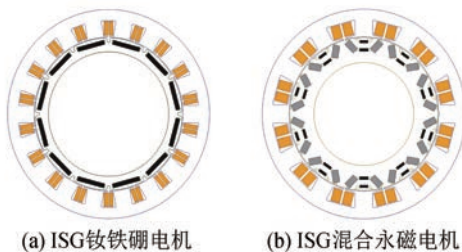


图10 两种电机的仿真模型

3.1 电动势比较

图 11 所示为两种 ISG 电机电动势的比较。观察图 11(a) 可以发现, ISG 混合永磁电机的电动势幅值小于 ISG 钕铁硼电机。这是由于减少了钕铁硼用量后,电机的气隙磁密也会减小,从而使得电机的电动势幅值减小。ISG 混合永磁电机的电动势基波幅值为 41 V , ISG 钕铁硼电机的电动势基波幅值为 57 V 。观察图 11(b), ISG 钕铁硼电机的 5 次谐波和 7 次谐波的幅值比 ISG 混合永

磁电机的大,但 ISG 钕铁硼电机的 9 次谐波和 11

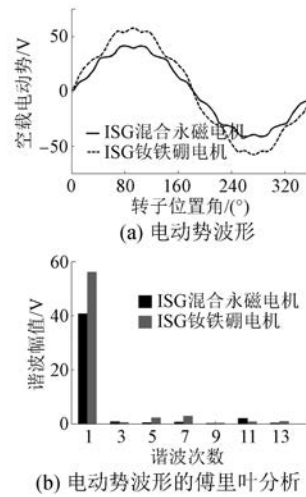


图11 两种 ISG 电机电动势的比较

次谐波幅值小于 ISG 混合永磁电机。分析两种电机电动势的畸变率, ISG 钕铁硼电机的电动势畸变率为 6.7% , ISG 混合永磁电机的电动势畸变率为 5.8% 。由此可得, ISG 混合永磁电机的电动势性能优于 ISG 钕铁硼电机。

3.2 输出转矩比较

图 12 所示为两种 ISG 电机在额定工况和峰值工况下的输出转矩比较。在额定工况下, ISG 钕铁硼电机在 58 A 的电流下, 达到额定转矩 $51.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩脉动为 8.1% ; ISG 混合永磁电机在 58 A 的电流下, 转矩达到了 $51.7 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩脉动为 7.8% 。在峰值工况下, ISG 钕铁硼电机在

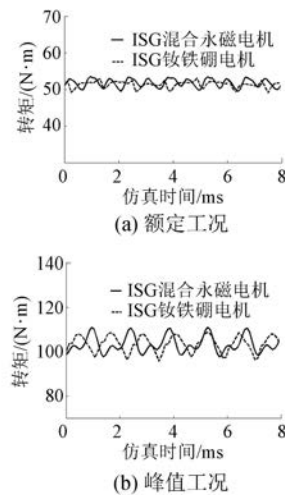


图12 两种 ISG 电机在额定工况和峰值工况下的输出转矩比较

112 A 的电流下达到峰值转矩 103.3 N·m, 转矩脉动为 12.6%; ISG 混合永磁电机在 113 A 的电流下达到峰值转矩 103.7 N·m, 转矩脉动为 12.8%。根据以上分析, ISG 混合永磁电机在额定工况下的转矩输出能力与 ISG 钕铁硼电机相当, 但 ISG 混合永磁电机在额定工况下的转矩脉动比 ISG 钕铁硼电机小 3.7%。由此可知, 在额定工况下, ISG 混合永磁电机具有更好的转矩特性。

3.3 永磁体成本比较

两种电机的永磁体材料消耗及永磁体成本比较如表 2 所示。

表 2 永磁体材料消耗及成本比较

参数名称	ISG 钕铁硼电机	ISG 混合永磁电机
铁氧体规格/mm	0	15×10
铁氧体体积/mm ³	0	131 658
铁氧体成本/元	0	26
钕铁硼规格/mm	43.5×6.5	11×4
钕铁硼体积/mm ³	139 668	36 117
钕铁硼成本/元	440	114
永磁体成本/元	440	140

由于将转子改为双层结构, 还采用了铁氧体与钕铁硼两种永磁体共同励磁, 在保证电机性能达到要求的前提下, ISG 混合永磁电机的永磁体材料成本比 ISG 钕铁硼电机的永磁体材料成本节省了近 70%。因此, ISG 混合永磁电机在制造成本上比 ISG 钕铁硼电机更有优势, 性价比更高。

4 结 语

(1) 在混合永磁电机中, 如果铁氧体磁路和钕铁硼磁路是并联的关系, 可以利用磁路分析计算出钕铁硼和铁氧体厚度之比。

(2) 根据铁氧体的退磁量可以确定铁氧体永磁体厚度, 从而计算出钕铁硼永磁体厚度。再根据转矩要求和电动势性能可以确定永磁体的尺寸, 完成电机转子设计。

(3) ISG 混合永磁电机在电动势、输出转矩等性能上均优于 ISG 钕铁硼电机, 且永磁体材料成本比 ISG 钕铁硼电机低 70%。由此可得, ISG

混合永磁电机与 ISG 钕铁硼电机相比, 具有更高的性价比。

【参 考 文 献】

[1] 李新华, 周彦, 殷鹏冬. ISG 永磁同步电机优化设计的仿真分析[J]. 湖北工业大学学报, 2013, 28(1): 46.

[2] 蒋佳明. 永磁 ISG 电机电磁设计及其控制系统研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.

[3] 李玉彬, 杨宗霄. 非均匀磁极盘式无铁心永磁 ISG 电机设计与分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 28.

[4] 史兵, 朱孝勇, 全力, 等. 共直流母线开绕组的少稀土混合磁材料永磁无刷电机系统零序电流抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(9): 25.

[5] 吴伟强, 朱孝勇, 项子旋, 等. 少稀土组合励磁永磁无刷电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(9): 73.

[6] TARIQ A R, NINO B C E, STRANGAS E G. Consideration of magnet materials in the design of PMSMs for HEVs application[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011.

[7] YU M. Analysis of hybrid permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for compressor[C] // 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2013: 1256.

[8] JEONG C L, KIM Y K, HU J. Optimized design of PMSM with hybrid type permanent magnet for improving performance and reliability [C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2017: 2439.

[9] AFINOWI I A A, ZHU Z Q, GUAN Y, et al. Switched-flux machines with hybrid NdFeB and ferrite magnets[J]. COMPEL-the International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering, 2016, 35(2): 456.

[10] 鲍晓华, 吴长江, 方金龙. 轴向永磁体组合削弱表贴式永磁同步电机齿槽转矩的方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4231.

[11] 李新华, 吴小江, 周彦, 等. 雅阁和思域混合动力车 ISG 比较分析[J]. 汽车电器, 2013(5): 33.

收稿日期: 2018-12-18