DOI: 10.3901/JME.2019.14.096

混合动力汽车 BSG 用分块 SRM 优化及试验*

孙晓东¹ 周追财¹ 陈 龙¹ 杨泽斌² 韩守义² 薛正旺¹

(1. 江苏大学汽车工程研究院 镇江 212013;

2. 江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013)

摘要: 克服普通开关磁阻电机(SRM)固有缺陷,提出了一种混合动力汽车皮带式驱动起动/发电机(BSG)用新型容错式分块 SRM,并分析其电磁特性。为提高容错式分块 SRM 的输出转矩,对影响电机输出转矩的关键结构参数进行优化处理,分析优化后电机的静态特性和动态特性。为研究分块 SRM 的容错性能,对比分析普通 SRM 和优化后分块 SRM 的互感和缺一相故障下的电磁特性。设计并制造出一台试验样机,对样机开展静态特性和负载运行的试验研究。仿真和试验结果表明,优化后的分块 SRM 输出转矩更大,比普通 SRM 的动力性能和容错性能更好。通过对新型容错式分块 SRM 进行优化和容错性分析,为设计安全可靠的 BSG 用电机提供了理论指导。

关键词: 混合动力汽车; 皮带式驱动起动/发电机; 容错式; 分块开关磁阻电机; 互感; 输出转矩

中图分类号: TM301

Optimization and Experimental Analysis of a Segmented Rotor SRM of BSG for HEVs

SUN Xiaodong¹ ZHOU Zhuicai¹ CHEN Long¹ YANG Zebin² HAN Shouyi² XUE Zhengwang¹

(1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: To overcome the inherent defects of conventional switched reluctance motor (SRM), a new type of fault-tolerant segmented rotor SRM for the belt-driven starter generator (BSG) of HEVs is proposed, and then its electromagnetic characteristics are analyzed. Firstly, in order to improve the output torque of the new fault-tolerant segmented rotor SRM, the key structural parameters affecting the motor output torque are optimized, and the static and dynamic characteristics of the optimized motor are analyzed. Secondly, to study the fault-tolerant performance of the proposed motor, the characteristics of mutual inductance and fault tolerance features in case of a phase failure of the conventional SRM and fault-tolerant segmented rotor SRM are compared. Finally, an experimental prototype is designed and fabricated to verify the static characteristics. In addition, experimental studies on the prototype motor were carried out when it operated under the load operation. Both the simulated and experimental results reveal that the output torque of optimized fault-tolerant segmented rotor SRM was larger than that of the motor before optimization. Moreover, its dynamic and fault tolerance performances were better than those of the conventional SRM. Through the optimization and fault tolerance analysis of the fault-tolerant segmented rotor SRM, theoretical guidance for the design of BSG motors with safe and reliable characteristics is provided.

Key words: HEV; BSG; fault-tolerant; segmented rotor SRM; mutual inductance; output torque

0 前言

随着环境污染和石油资源问题变得越来越严

重,研发电动汽车已经刻不容缓^[1]。电动汽车包括纯电动汽车^[2]、混合动力汽车^[3]、燃料电池电动汽车^[4]等,其中混合动力汽车发展得最快。混合动力汽车有三种典型模式,分别是混合动力车用皮带式驱动起动/发电机(BSG),集成起动发电机(ISG)和全混用驱动电机和发电系统。与其他两种典型模式相比,BSG系统只是对原有发动机的工况进行优化,提高燃油效率和减少尾气排放。因此,混合动力汽车BSG技术已经在各国政府和汽车公司获得越来越

* 国家自然科学基金(51875261、U1564201、U1664258)、江苏省杰出青年基金(BK20180046)、江苏省优秀青年基金(BK20170071)、2015 年省级战略性新兴产业发展专项资金、江苏高校“青蓝工程”、江苏省高等学校自然科学研究重大(17KJA460005)、江苏省“六大人才高峰”(2015XNYQC-003)、江苏省“333”工程(BRA2017441)和江苏高校优势学科建设工程资助项目。20180928 收到初稿,20190312 收到修改稿

多的重视。

一般BSG系统选用感应电机^[5]和永磁电机^[6-7],然而,感应电机在低速时很难获得高转矩,永磁电机采用的永磁材料成本较高且在高温下容易出现退磁现象,因此越来越多的学者开始着眼于选用开关磁阻电机(SRM)。与感应电机和永磁电机相比,SRM具有成本低、坚固性好、容错性能高、能适用于高速运行和恶劣环境等优点^[8-12]。基于上述优点,SRM在电动汽车电机驱动领域有着良好的发展前景,同时也是各国研究与实践的热门课题之一^[13]。

SRM的非线性和铁心磁通密度的高饱和性给SRM的优化设计带来了很大的困难。宋受俊等^[14]提出了一种改进的遗传算法对电机关键几何尺寸及控制参数进行了优化,提高了电机的效率并降低了转矩脉动。孙鹏飞^[15]指出电机驱动系统可靠性能的优劣决定了电动汽车安全性能的优劣,而高可靠性是指电机系统在发生故障后仍然有一定满足动力输出的能力。SRM驱动系统相对于传统电机驱动系统具有更好的容错性,而且由双三相逆变器驱动的SRM系统的容错性将进一步提高^[16]。然而普通SRM有转矩脉动过高、噪声过大以及高速运行时效率低的缺点,因此导致普通SRM在电动车电机驱动领域难以推广应用^[17-18]。陈小元等^[18]提出了整距式分块转子SRM设计中的关键技术,包括电机的主要公式的推导、定转子极弧系数的选择和电机绕组参数的计算。TORKAMAN等^[19]提出了应用于容错式电机的两种新转子结构,一种为阶梯转子式SRM,另一种为斜极转子式SRM,并探究了这两种转子结构对故障诊断指数的影响。

本文针对上述所提到的关于SRM缺点,结合混合动力汽车BSG应用场合,提出了一种新型容错式分块SRM。首先,分析了BSG结构和容错式分块SRM的基本结构。其次,对容错性分块SRM的关键参数进行优化,并利用ANSYS Maxwell 2D软件对优化后电机的静态和动态特性进行了分析。此外,为了验证容错式分块SRM的容错性能,分析了容错式分块SRM和普通8/6 SRM的互感特性以及在缺一相故障下的电流和输出转矩特性。最后,制造了一台试验样机并搭建了试验平台,进行了静态特性验证和在负载下运行的试验分析,进而说明新型容错式分块SRM在混合动力汽车BSG系统上的优势。

1 BSG系统和电机结构

混合动力汽车BSG系统结构如图1所示^[20],

BSG电机通过皮带与发动机前端连接,代替了传统BSG系统中的发电机,这就意味着本文所提BSG电机既作起动机也作发电机。在汽车起动瞬间,BSG电机作为起动机快速拖动发动机至怠速转速;在汽车减速或正常行驶时,BSG电机起发电机的作用给汽车电源及各用电设备供电。

图1 BSG系统结构示意图

图2所示是本文所提新型容错式分块SRM的二维结构图,该电机是一台具有8个激励齿、8个辅助齿和10个转子齿的四相容错式分块SRM电机。该电机具体包括转轴1、铝套2、转子块3、绕组4、定子极5、激励齿6和辅助齿7。和普通SRM的绕组连接方式不同,新型容错式分块SRM的绕组只缠绕在8个激励齿上,在辅助齿上不缠绕绕组,仅提供励磁回路。该结构设计使得所提出的新型容错式分块SRM在具有普通SRM的结构简单特点的同时,也取得了更高的容错性能。

图2 新型容错式分块SRM结构

2 容错式分块SRM参数优化分析

本文以电机额定参数作为设计点来设计样机,电机的额定功率为1.8 kW、额定电压为60 V、额定转速为6 000 r/min。

2.1 优化目标和优化参数的选择

影响输出转矩的主要因素包括:定、转子极弧系数 $\alpha_{s2}(\alpha_{s2}=2\alpha_{s1})$ 、 α_r ,定子内径 D_{si} 和转子块的径向高度 h_{cr} ,这几个参数的定义如图2所示。该电机转矩输出式为

$$T = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (1)$$

由式(1)可知:电机输出转矩与电感变化率成正比。对式(1)做线性化处理可知,当从最小电感 $L_{\min}$ 到最大电感 $L_{\max}$ 所对应的转子位置变化角 $\Delta\theta$ 固定不变(即为半周期)时,转矩 T 正比于 $\Delta L = L_{\max} - L_{\min}$ 。因此参照普通 SRM 的设计经验可得本文的优化目标为 $L_{\max}$ 与 $L_{\min}$ 的比值需要大于 3,且容错式分块 SRM 的 $L_{\max}$ 与 $L_{\min}$ 的比值定义为

$$K = \frac{L_{\max}}{L_{\min}} \quad (2)$$

随着 K 值的增大,BSG 电机的输出转矩和动力性能也将增强。

2.2 关键参数优化

考虑到需要满足减小不对齐位置时的最小电感以及定子槽满率的要求,激励齿的极弧系数 α_{s2} 、转子分块的极弧系数 α_r 的变化范围分别为 0.84~0.95 和 0.70~0.84。根据 α_{s2} 、 α_r 的变化范围,并结合 ANSYS Maxwell 有限元软件所得的静态特性,可以获得在不同 α_{s2} 与 α_r 组合下的 $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$,图 3 给出了 K 值随定、转子块极弧系数的变化关系图。

图 3 K 值随定、转子极弧系数变化的关系

由图 3 可知,当定子激励齿极弧系数 α_{s2} 确定时, K 值随着 α_r 的增加呈先上升后下降的变化趋势,并且在 $\alpha_r=0.74$ 处达到最大值。当 $\alpha_r=0.74$ 时, K 值随着 α_{s2} 的增加而不断增大,且在 $\alpha_{s2}=0.95$ 时 K 取最大值。综上,定子激励齿、转子块极弧系数分别取为 0.95 和 0.74。

由于减小定子齿身高度可以减小磁路长度,并且可以充分减少铁损,因此将定子内径 D_{si} 的取值范围初定为 58.5~86.5 mm。图 4 为 K 值随 D_{si} 的变化关系曲线图。由图 4 可知, K 值随 D_{si} 的增加而增加,考虑到绕组嵌入定子槽空间的要求,选取 $D_{si}=82.5$ mm,此时既可以提高 K 值,又能确保满足定子槽满率的要求。当选取 $D_{si}=82.5$ mm 时, $K=3.05$,达到合理的较大值。另外,由图 3 和图 4 可知, D_{si} 对 K 值的影响比 α_{s2} 、 α_r 而言要更显著。

转子块的大小对磁路路径以及磁通量大小的影响较大。结合转子块的用料情况及安装要求, h_{cr} 的

图 4 K 值随定子内径变化的关系

取值范围初定为 2.5~9.5 mm。图 5 给出了 K 值随 h_{cr} 变化的关系曲线图。由图 5 可知, K 值随着 h_{cr} 的增加呈先增大后减小的变化趋势,并在 h_{cr} 为 5.5 mm 时 K 值达到最大,为 3.07。综上所述,容错式分块 SRM 优化前后的结构参数如表 1 所示。

图 5 K 值随转子块径向高度的变化关系

表 1 容错式分块 SRM 优化前后结构参数对比

优化变量	初始值	优化值
定子极弧系数 α_{s1}/α_{s2}	0.45/0.90	0.475/0.95
转子块极弧系数 α_r	0.82	0.74
定子内径 D_{si}/mm	60.5	82.5
转子块径向高度 h_{cr}/mm	6.5	5.5

3 优化前后仿真分析

根据上述优化分析结果,优化后的容错式分块 SRM 和普通 8/6 SRM 的主要参数如表 2 所示。

表 2 容错式分块 SRM 与普通 8/6 SRM 的结构参数

参数	SRM	容错式分块 SRM
定子外径 D_s/mm	128	128
铁心叠长 l_g/mm	80	80
定子轭厚 h_{cs}/mm	7.2	7
定子极弧系数 α_s	0.45	0.475/0.95
气隙长度 δ/mm	0.25	0.25
转子外径 D_a/mm	82	82
转子块极弧系数 α_r	0.35	0.74
分支绕组匝数 N	34	24
绕组线径 ϕ/mm	2.24	1.5
槽满率 k_s	0.56	0.53
开通角 $\theta_{on}/\text{关断角 } \theta_{off}/(^{\circ})$	0/19.5	-3/12

3.1 静态仿真结果

A相绕组激励容错式分块SRM的时电感特性曲线簇如图6所示。由图6可知,随着电流的增加,同一转子位置角下的电感减小,也就是说电感与电流成反比,并且在电流*i*为10A时,优化后的*K*值明显大于优化前的*K*值。图7为A相绕组激励时优化后容错式分块SRM的矩角特性曲线簇。由图7可知,在同一转子位置角下的电机转矩与电流成正比,电流越大转矩越大。

图6 优化后电机的相电感特性

图7 优化后电机的矩角特性

3.2 瞬态仿真结果

图8为额定转速 n_N 为6000 r/min时容错式分块SRM的瞬态电流波形图。由图8可知,电流波形为角度位置控制(APC)下的标准波形,明显达到优化目标。图9为额定转速时容错式分块SRM优化前后的输出转矩对比图。由图9可知,优化后电机的输出转矩明显高于优化前电机的输出转矩,并且电机优化后的平均输出转矩值 T_{avg} 为2.941 N·m,达到了额定输出转矩的要求(2.865 N·m)。

图8 优化后电机的瞬态电流

图9 优化后电机的输出转矩

电机的转矩脉动可用转矩脉动系数 K_T 表示为

$$K_T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{avg}}} \quad (3)$$

式中, $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 和 T_{avg} 分别为最小转矩、最大转矩和平均转矩。

表3给出了电机优化前后输出转矩的具体对比情况。由表3可知,优化后的电机不仅输出转矩达到设计要求,而且转矩脉动系数 K_T 相比优化前也明显减小,有利于电机的性能提高。

表3 容错式分块SRM优化前后输出转矩对比

	最大转矩 $T_{\max}/(\text{N} \cdot \text{m})$	最小转矩 $T_{\min}/(\text{N} \cdot \text{m})$	平均转矩 $T_{\text{avg}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	转矩脉动 系数 K_T
优化前	3.557	1.088	1.812	1.363
优化后	4.761	1.887	2.941	0.977

4 容错性能

对缺相故障发生前后电机的输出转矩、电流性能进行对比来分析电机的容错能力。

4.1 互感分析

以相A、B作为分析对象,通过ANSYS Maxwell有限元仿真软件可以分别获得单相A激励、单相B激励以及A、B两相同时激励下的磁链特性。图10a和10b分别给出了普通SRM与容错式分块SRM在A相电感最大位置下,这两种激励方式下的磁链特性。其中, ψ_A 、 ψ_B 分别是A、B两相单独激励时的磁链,而 ψ_{AB} 、 ψ_{BA} 分别是A、B两相同时激励时的相A、B的磁链。

(b) 新型容错式分块 SRM

图 10 相 A 和相 B 在不同激励方式下的磁链特性

在图 10 的基础上, 推导电机互感的计算方法。

A、B 两相分别激励时的磁链为

$$\begin{cases} \psi_A = L_A i_A \\ \psi_B = L_B i_B \end{cases} \quad (4)$$

式中, L_A 、 L_B 分别是 A、B 两相单独激励时的自感, 而 i_A 、 i_B 分别是 A、B 两相单独激励时的激励电流。

A、B 两相同时激励时的磁链可以用矩阵表示为

$$\begin{pmatrix} \psi_{AB} \\ \psi_{BA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_A & M_{AB} \\ M_{BA} & L_B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \end{pmatrix} \quad (5)$$

则 A、B 两相同时激励时的总磁链为

$$\psi_{AB} + \psi_{BA} = \psi_A + \psi_B + M_{AB} i_B + M_{BA} i_A \quad (6)$$

式中, M_{AB} 是相 B 激励后对相 A 产生的互感, M_{BA} 是相 A 激励后对相 B 产生的互感。

当电机运行在 APC 下, 激励电流值相等, 即 $i_A = i_B$ 。因此, 电机的互感又为

$$M_{AB} = M_{BA} = \frac{\psi_{AB} + \psi_{BA} - \psi_A - \psi_B}{2i_A} \quad (7)$$

由式(7)可得相电流 $i=30$ A 时容错式分块 SRM 与普通 SRM 的互感曲线, 如图 11 所示。表 4 给出了普通 SRM 与容错式分块 SRM 的互感 M_{AB} 、自感 L_A 以及互感和自感的比值 M_{AB}/L_A 。由表 4 可知, 普通 SRM 的 M_{AB}/L_A 比容错式分块 SRM 的 M_{AB}/L_A 大, 说明容错式分块 SRM 具有较高的容错性。

(a) SRM

(b) 新型容错式分块 SRM

图 11 容错式分块 SRM 与普通 SRM 的互感曲线

表 4 普通 SRM 与容错式分块 SRM 的互感与自感值

	互感 M_{AB}/mH	自感 L_A/mH	互感与自感比 $M_{AB}/L_A(\%)$
普通 SRM	0.443	2.5	17.7
容错式分块 SRM	0.122	1.6	7.6

4.2 缺一相故障仿真分析

仿真时设置电机的开通角 θ_{on} 为 -3° , 关断角 θ_{off} 为 12° , 转速 n 为 6000 r/min, 电压 U 为 60 V, 并采用 APC 控制方式。图 12a 和 12b 给出了普通 SRM 在正常运行与缺相故障运行时的各相电流波形。

(a) SRM 正常运行

(b) SRM 缺相故障运行

图 12 普通 SRM 正常运行与缺相故障运行下的电流波形

由图 12 可知, 当相 A 发生故障时, 电流有效值相对下降, 且各相电流波形不一致。另外, 由于普通 SRM 的相间互感较大使得在相 A 发生故障后相 A 仍然会产生较小的电流, 也使得在正常和缺相

故障运行下各相电流波形底部都产生了较小的电流。图13为容错式分块SRM缺相故障运行下的电流波形。由图8、13可知,当容错式分块SRM的相A发生故障时,A相的电流直接变为零,而其余三相的电流波形及电流有效值基本不变,这是因为容错式分块SRM的互感相对更小,这也进一步验证了该结构的SRM容错能力更强。

图13 容错式分块SRM缺相故障运行下的电流波形

图14a和14b分别为普通SRM与容错式分块SRM在正常运行与缺相故障运行时的输出转矩波形图。由图14a可知,在相A发生故障后,普通SRM输出转矩能力下降,转矩脉动变大。由图14b可知,容错式分块SRM由于相间耦合作用小的原因,导致与普通SRM相比输出转矩重大,转矩脉动更小。

(a) SRM

(b) 新型容错式分块SRM

图14 普通SRM与容错式分块SRM正常运行与缺相故障运行下的转矩波形

此外,表5给出了普通SRM与容错式分块SRM在正常运行与缺相故障运行下的平均转矩值和转矩

脉动系数对比情况。由表5可知,容错式分块SRM在缺相故障运行时的输出转矩为正常运行时的80%左右,而普通SRM仅为67%左右。并且无论故障发生前后,容错式分块SRM的转矩脉动系数相较于普通SRM都较小,这表明容错式分块SRM具有更好的运行性能。

表5 普通SRM与容错式分块SRM正常运行与缺相故障运行下转矩值对比

运行情况	参数	SRM	容错式分块SRM
正常运行	平均转矩 $T_{avg}/(N \cdot m)$	2.874	2.941
	转矩脉动系数 K_T	1.174	0.977
缺相故障运行	平均转矩 $T_{avg}/(N \cdot m)$	1.907	2.353
	转矩脉动系数 K_T	2.666	2.201

5 试验验证

为了验证上述理论分析的有效性,根据优化后容错式分块SRM样机参数,制造了一台试验样机。图15展示了该样机的定转子部件,图16为该电机的负载试验平台。

图15 容错式分块SRM样机定转子实物图

图16 样机负载试验平台

5.1 静态特性测量

图17为A、B两相电流分别为15A和20A时的实测与仿真静态转矩的对比图。由图17可知,在A、B两相分别同时输入15A和20A时,最大转矩分别为3.42N·m和5.30N·m。另外,仿真值与实测值几乎一致,验证了容错式分块SRM的结构有效性与正确性。

图 17 不同电流下实测、仿真静态转矩对比

5.2 样机负载电动运行试验

表 6 给出了当电机转速 n 分别为 2 000~6 000 r/min 时, 在恒定负载 T_L 为 2 N·m 下测得的输出功率 P_{out} 、输入功率 P_{in} 及效率 η 。由表 6 可知, 电机在各转速下都可以维持恒转矩输出。

表 6 恒转矩下动态测试数据

电机转速 $n/(r/min)$	输入功率 P_{in}/W	输出功率 P_{out}/W	效率 η (%)
2 000	530.05	410	75.5
3 000	776.94	620	79.8
4 000	1 041.67	850	81.6
5 000	1 265.21	1 040	82.2
6 000	1 533.82	1 270	82.8

图 18 为样机在恒定负载 T_L 为 2 N·m 的情况下, 转速 n 为 2 000~6 000 r/min 时的效率曲线。由图 18 可知, 电机可以在宽转速范围内保持较高效率, 这充分证明了容错式分块 SRM 在宽转速范围内仍然能保持较好的运行性能。

图 18 不同转速下样机效率曲线

6 结论

提出了一种新型容错式分块 SRM, 对该电机的静、动态特性和容错性能进行了仿真分析计算; 设计制造了试验样机, 并对其进行了测试。具体结论如下。

(1) 优化后的容错式分块 SRM 的输出转矩值更大, 转矩脉动更小, 而且优化后电机的电流波形与角度位置控制下的标准波形基本一致。

(2) 容错式分块 SRM 的容错性能比普通 SRM 更好。容错式分块 SRM 的 M_{AB}/L_A 值比普通 SRM 的 M_{AB}/L_A 更小, 在缺一相故障下, 容错式分块 SRM 其余三相的电流波形基本不变, 输出转矩下降得更少。

(3) 试验结果验证了该电机结构的合理性和有效性, 该电机具有较高的输出转矩, 能在宽转速范围内保持正常运行。

参 考 文 献

- [1] 靳立强, 田瑞洋, 刘阅. 电动轮汽车驱动助力转向与稳定性协调控制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 160-169.
JIN Liqiang, TIAN Ruiyang, LIU Yue. Electric wheel vehicle drive power steering and stability coordination control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 160-169.
- [2] 黄万友, 程勇, 曹红, 等. 纯电动汽车能量回馈效率特性测试分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 88-95.
HUANG Wanyou, CHENG Yong, CAO Hong, et al. Test and analysis of energy efficiency of pure electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 88-95.
- [3] 刘永刚, 李杰, 秦大同, 等. 基于多工况优化算法的混合动力汽车参数优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 61-69.
LIU Yonggang, LI Jie, QIN Datong, et al. Parameter optimization of hybrid electric vehicle based on multi-case optimization algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 61-69.
- [4] 王婷, 谷波, 赵鹏程, 等. 燃料电池汽车动力控制模块水冷冷板的性能仿真及评估[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 150-158.
WANG Ting, GU Bo, ZHAO Pengcheng, et al. Performance simulation and evaluation of water-cooled cold plate for fuel cell vehicle power control module[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 150-158.

- 150-158.
- [5] DE Z L, WILSON W, FATHY I. An intelligent harmonic synthesis technique for air-gap eccentricity fault diagnosis in induction motors[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(6): 1296-1304.
- [6] 季元进, 李锐, 任利惠. 基于轮毂电机和转速差反馈的独立车轮对主动导向控制的影响因素[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 48-56.
- JI Yuanjin, LI Rui, REN Lihui. Factors affecting active steering control of independent wheel wheels based on hub motor and rotational speed difference feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 48-56.
- [7] 张利鹏, 李亮, 祁炳楠. 轮毂电机驱动电动汽车侧倾稳定性解耦控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 94-104.
- ZHANG Lipeng, LI Liang, QI Bingnan. Wheel hub motor drive electric vehicle roll stability decoupling control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 94-104.
- [8] SHIN H, LEE K B. Optimal design of a 1 kW switched reluctance generator for wind power systems using a genetic algorithm[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(8): 807-817.
- [9] GUO X, ZHONG R, ZHAO L, et al. Method for radial vibration modeling in switched reluctance motor[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(9): 834-842.
- [10] BARTOLO J B, DEGANI M, ESPINA J, et al. Design and initial testing of a high speed 45 kW switched reluctance drive for aerospace application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 988-997.
- [11] 崔敏超, 赵升吨, 陈超, 等. 混合动力汽车用开关磁通电动/发电机数值模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 100-105.
- CUI Minchao, ZHAO Shengdun, CHEN Chao, et al. Numerical simulation and experimental study of switched flux motor/generator for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 100-105.
- [12] HU Y, DING W, WANG T, et al. Investigation on a multi-mode switched reluctance motor: design, optimization, electromagnetic analysis and experiment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9886-9895.
- [13] 薛玉春, 张义民, 贺向东. 电动汽车的开关磁阻电动机驱动及其系统激励仿真[J]. 中国机械工程, 2007, 18(11): 1378-1382.
- XUE Yuchun, ZHANG Yiming, HE Xiangdong. Switched reluctance motor drive for electric vehicle and its system excitation simulation[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(11): 1378-1382.
- [14] 宋受俊, 葛乐飞, 刘虎成, 等. 开关磁阻电机设计及多目标优化方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 197-204.
- SONG Shoujun, GE Lefei, LIU Hucheng, et al. Design of switched reluctance motor and multi-objective optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 197-204.
- [15] 孙鹏飞. 电动汽车电机驱动系统容错控制策略的研究与实现[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- SUN Pengfei. Research and implementation of the fault-tolerant control strategy for electric vehicle motor drive system[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [16] CHEN Q, XU D, XU L, et al. Fault-tolerant operation of a novel dual-channel switched reluctance motor using two 3-phase standard inverters[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-5.
- [17] 陈小元, 邓智泉, 王晓琳, 等. 分块开关磁阻电机的研究现状及其新结构猜想[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 20-28.
- CHEN Xiaoyuan, DENG Zhiquan, WANG Xiaolin, et al. Research status and new structure conception of block-switched reluctance motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 20-28.
- [18] 陈小元, 邓智泉, 许培林, 等. 整距绕组分块转子开关磁阻电机的电磁设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 109-115.
- CHEN Xiaoyuan, DENG Zhiquan, XU Peilin, et al. Electromagnetic design of rotor switched reluctance motor with partitioned rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(36): 109-115.
- [19] TORKAMAN H, FARAJI N, TOULABI M S, et al. Influence of rotor structure on fault diagnosis indices in two-phase switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(3): 8200608.
- [20] 薛正旺. 弱混合动力汽车新型容错式开关磁阻 BSG 电机研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- XUE Zhengwang. A novel fault-tolerant switched reluctance motor for belt-driven starter generator of micro-hybrid vehicles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

作者简介: 孙晓东, 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新能源汽车驱动控制、汽车电控、电机及其控制、磁悬浮(无轴承)技术等。

E-mail: xdsun@ujs.edu.cn

周追财, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为新能源汽车驱动用开关磁阻电机及其控制。

E-mail: jdzhouzhucai@163.com

陈龙(通信作者), 男, 1958 出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新能源汽车及其控制、车辆动态性能模拟与控制、载运工具运行与交通运输规划等。

E-mail: chenlong@ujs.edu.cn