

基于联合仿真的表贴式永磁游标电机性能分析^{*}

王伟炳, 邓孝华
(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 表贴式永磁游标电机内部电磁参数复杂多变, MATLAB/Simulink 不能精确反映不同运行工况下电机的实际电磁性能。将交叉耦合理论应用于表贴式永磁游标电机的磁链、电感和转矩模型的研究中, 分析了交叉耦合对表贴式永磁游标电机磁链、电感和转矩的影响。基于 ANSYS Maxwell、Simplorer 及 MATLAB/Simulink 软件建立了场路联合仿真的电机驱动控制系统模型, 测试了电机的驱动性能, 并与 MATLAB/Simulink 定参数仿真结果进行了对比。理论分析和仿真结果表明, 因电机内部电磁状态的实时变化, 采用联合仿真分析方法的计算结果具有更高的准确性。

关键词: 永磁游标电机; 联合仿真; 交叉耦合; 转矩特性

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)08-0060-06
doi: 10.12177/emca.2023.083

Performance Analysis of a Surface-Mounted Permanent Magnet Vernier Machine Based on Co-Simulation^{*}

WANG Weibing, DENG Xiaohua
(School of Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The internal electromagnetic parameters of a surface-mounted permanent magnet vernier machine are complex and changeable, and MATLAB/Simulink cannot accurately reflect the actual electromagnetic performance of the machine under different operating conditions. The influence of cross coupling on the flux, inductance and torque of surface-mounted permanent magnet vernier machine is analyzed and calculated by applying the cross coupling theory to the model of flux, inductance and torque of surface-mounted permanent magnet vernier machine. The field-circuit co-simulation model of a machine drive control system model was established based on ANSYS Maxwell, Simplorer and MATLAB/Simulink software. The driving performance of the machine is tested and compared with the simulation results of MATLAB/Simulink constant parameter simulation. The theoretical analysis and simulation results show that the calculation results of the co-simulation analysis method have higher accuracy because of the real-time change of the electromagnetic state inside the machine.

Key words: permanent magnet vernier machine; co-simulation; cross coupling; torque characteristic

0 引言

目前, 电动汽车驱动电机的使用趋势是以具有体积小、质量轻及功率密度高的永磁同步电机为主^[1]。因此汽车生产厂家为了达到大转矩输出大多是通过驱动电机与减速器的配合, 使得效率

较低且系统维护难度高^[2]。而获取大转矩的另一种方法是采用直接驱动式电机, 省去了中间环节, 减少了机械损耗、提高了能量传递效率。但是其缺点为一般极数较多、体积较大且负载运行电流高, 增加了控制器的要求, 提高了制造成本^[3]。

永磁游标电机(PMVM)是一种永磁同步电

收稿日期: 2023-04-01; 收到修改稿日期: 2023-04-18
^{*} 基金项目: 中国博士后科学基金(2018M632201); 江苏省高等学校自然科学基金(20KJA470004)
作者简介: 王伟炳(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为永磁游标电机分析与控制。

机,其不仅具有永磁同步电机的各项优点,还可通过将磁齿轮与常规永磁电机整合,利用磁场调制原理实现低速大转矩输出而且具有较高的功率密度,可以较好地回避上述问题。

目前针对 PMVM 的研究主要集中在电机本体新型拓扑结构的优化设计、静态特性分析计算和控制算法方面^[4-5]。然而,其中大部分都是有限元分析方法为基础,通过注入理想激励对电机额定工况下的运行性能评估并进一步对本体优化设计,该过程忽略了驱动控制系统与表贴式 PMVM 实际工况运行相互作用的影响,增大了电机运行特性的测试误差。同时,针对 PMVM 的大多数研究工作多采用基于 Simulink 搭建的电机数学模型的控制方案对电机的驱动性能进行分析^[6-7],有助于直接验证控制策略的可行性,然而在分析电机运行数据并改进控制算法时,Simulink 中的电机数学模型无法根据运行工况的变化对各项电磁参数进行实时更新,尤其是对于表贴式 PMVM 工作在大转矩、高饱和运行情况下时,电机的电感和磁链参数受到交直轴磁路交叉耦合作用的持续影响,参数值相对于额定运行点参数将发生较大的偏移^[8],如果仍将固定的 d 、 q 轴电感和磁链参数应用在电机模型上,则难以准确测试电机各项运行特性,这也就降低了分析结果的精确性。为提高 PMVM 控制系统仿真结果的精度和准确性,本文建立了基于 Maxwell、Simplorer 和 Simulink 联合仿真的表贴式 PMVM 驱动控制系统模型,研究了该系统在多种运行情况下的电机工作特性。

1 电机结构及数学模型

1.1 电机结构

表贴式 PMVM 转子内表面贴有瓦片形永磁体,定子齿不仅包含传统电机中电枢齿的作用,而且能够对转子磁场和电枢磁场进行调制,兼顾了调制齿的功能。定子中的电枢绕组的连接方式选用了分数槽绕组。电机结构如图 1 所示,电机整体采用了 18 槽 32 极的搭配。PMVM 的核心是基于磁场调制原理的“磁齿轮机理”,磁齿轮中的调磁块将气隙中的定子高速少极对数磁场调制成与转子极对数相同的低速磁场,从而实现磁场耦合以及机电能量转换^[9]。PMVM 将典型磁齿轮电

机中的调磁环替代为调制齿来达到磁场调制的目的,因有效谐波磁场的作用,在基波磁场匝链定子绕组产生常规电动势基础上,又增加了附加电动势,使得其感生电动势比同尺寸结构的永磁同步电机大很多^[10]。从而提高了转矩输出能力,使其拥有更高的转矩密度。

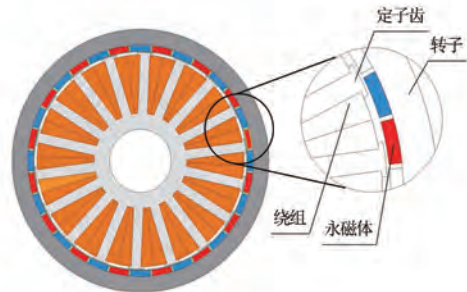


图 1 表贴式 PMVM 结构

1.2 电机数学模型

PMVM 传统 d 、 q 轴磁链模型为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_{pm} \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感, ψ_{pm} 为永磁体产生的磁链, ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴磁链, i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流。

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2}p\psi_{pm}i_q + \frac{3}{2}p(L_d - L_q)i_d i_q \quad (2)$$

式中: T_e 为电磁转矩; p 为转子极对数。

根据文献[11]建立的永磁同步电机交叉耦合磁链模型,考虑到磁路饱和和导致的交叉耦合作用,PMVM 磁链如下形式:

$$\begin{cases} \psi_d = \psi_{dd} + \psi_{dq} + \psi_{dpm} \\ \psi_q = \psi_{qq} + \psi_{qd} + \psi_{qpm} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ψ_{dd} 、 ψ_{qd} 分别为 d 轴自感磁链和因交叉耦合产生的 q 轴磁链; ψ_{qq} 、 ψ_{dq} 分别为 q 轴自感磁链和因交叉耦合产生的 d 轴磁链; ψ_{dpm} 、 ψ_{qpm} 分别为磁路饱和导致磁路不对称时永磁体产生的 d 轴磁链和 q 轴磁链。

将磁链方程进一步用电流、电感表示为

$$\begin{cases} \psi_d(i_d, i_q) = L_{dd}i_d + L_{dq}i_q + \psi_{dpm} \\ \psi_q(i_d, i_q) = L_{qq}i_q + L_{qd}i_d + \psi_{qpm} \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_{dd} 、 L_{qd} 分别为 d 轴自感和 q 轴交叉耦合电感; L_{qq} 、 L_{dq} 分别为 q 轴自感和 d 轴交叉耦合电感。

本文采用冻结磁导率的方法求取式中 d 、 q 轴总磁链中分离出的各类磁链和电感,具体流程如图 2 所示。

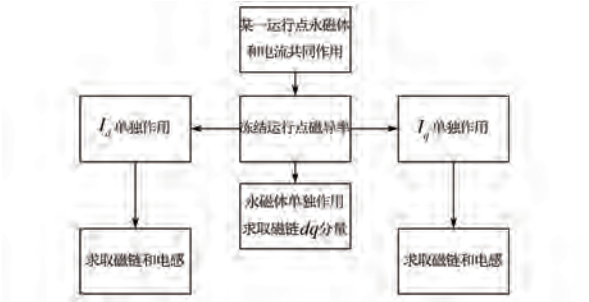


图 2 冻结磁导率流程图

按照电感参数定义,流程图中电感参数的计算式为

$$\begin{cases} L_{dd}(i_d,i_q)=\frac{\psi_{dd}}{i_d},L_{dq}(i_d,i_q)=\frac{\psi_{dq}}{i_q} \\ L_{qq}(i_d,i_q)=\frac{\psi_{qq}}{i_q},L_{qd}(i_d,i_q)=\frac{\psi_{qd}}{i_d} \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)代入式(2)中可以得到考虑交叉耦合时的电磁转矩计算式:

$$\begin{aligned} T_e &= T_{pm} + T_1 + T_2 \\ \begin{cases} T_{pm} = \frac{3}{2}p(\psi_{dpm}i_q - \psi_{qpm}i_d) \\ T_1 = \frac{3}{2}p(L_{dd} - L_{qq})i_d i_q \\ T_2 = \frac{3}{2}p(L_{dq}i_q^2 - L_{qd}i_d^2) \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: T_{pm} 为永磁体产生的转矩; T_1 为传统磁阻转矩; T_2 为交叉耦合产生的磁阻转矩。

2 基于场路耦合的联合仿真模型

2.1 联合仿真系统框图

表贴式 PMVM 的驱动控制系统联合仿真原理框图如图 3 所示,其中 3 个虚线框中的子系统结构分别为 Maxwell 中的电机本体模型、Simplorer 中的驱动电路模型和 Simulink 中的控制模型。3 个子模型的数据能够互相实时传递。

2.2 电机及驱动电路模型

在 Maxwell 和 Simplorer 中搭建表贴式 PMVM 的有限元模型和驱动电路模块,电机主要设计参

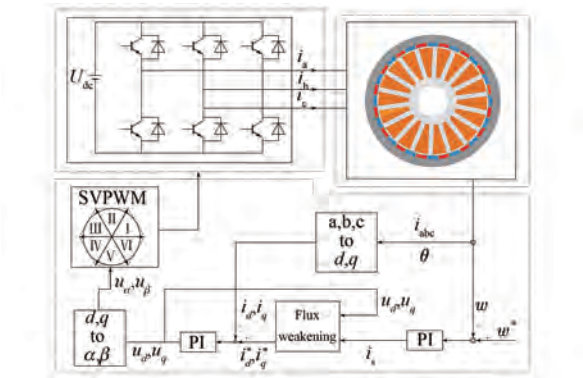


图 3 电机及驱动控制电路框图

数如表 1 所示。

表 1 表贴式 PMVM 主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
槽内半径/mm	24	齿宽/mm	5
槽开口内半径/mm	53.6	铁心长度/mm	39.8
槽开口外半径/mm	54.8	极弧比	0.9
永磁体内径/mm	55.5	线负荷/cm	170
转子轭的内半径/mm	58.5	额定电流/A	16
定子极对数	2	一相匝数	60
槽开口角/(°)	11.6	永磁体材料	N38SH

驱动电路模型由三相电压型逆变器电路组成,接收 Simulink 传递过来的脉宽信号,电机和驱动电路耦合模型如图 4 所示,Simulink 将从该模型中获得电流、转速和角度反馈信号。在反馈信号的转换处理过程中,由于 PMVM 的转子转动方向与 d 、 q 轴坐标系旋转的方向相反,因此本文中控制模型将采集的角度变化量取相反数。

2.3 控制策略

如图 5 所示,本文采用 $i_d=0$ 和超前角弱磁两种矢量控制算法对表贴式 PMVM 进行性能分析。

$i_d=0$ 控制将 PMVM 等效为一台他励直流电动机,定子电流中只有交轴分量,由于表贴式 PMVM 的 d 、 q 轴电感相同,根据式(2)可知,这将便于控制 PMVM 的转矩大小,测试其转矩和转速特性。

超前角弱磁通过改变电流矢量与 q 轴的夹角,即增大 d 轴去磁电流来达到升速的目的。超前角弱磁控制算法比电流调节器控制算法可以获得更好的控制效果,工作模式的切换更加自然、平滑,对电流的控制效果更好,系统将会更加稳定^[12]。

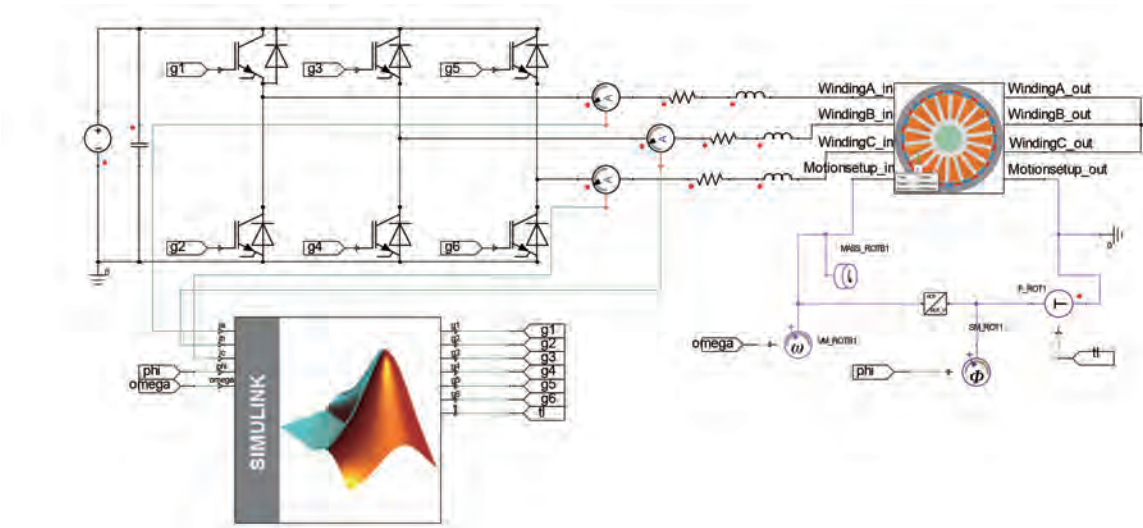


图4 电机及驱动电路耦合模型

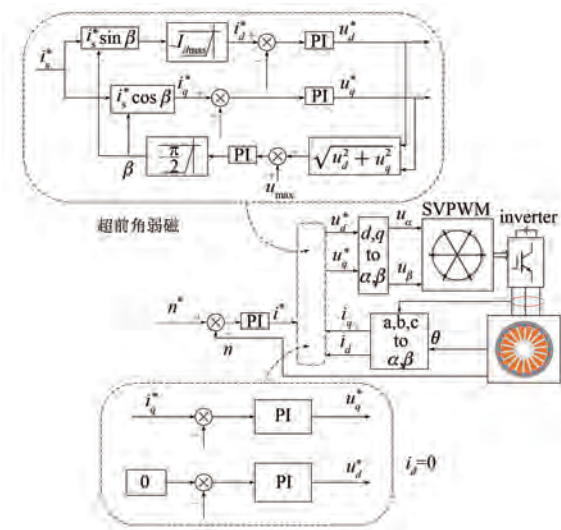


图5 矢量控制结构原理图

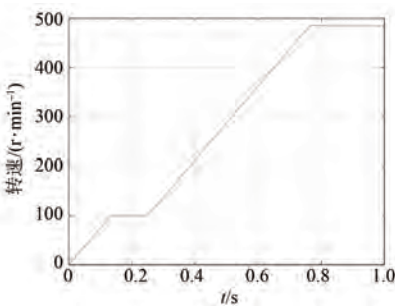


图6 转速波形

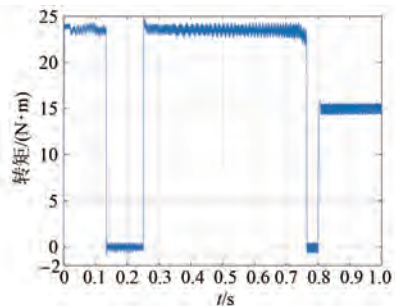


图7 转矩波形

3 仿真分析

3.1 $i_d=0$ 控制

初始时刻,给定目标转速 100 r/min,对电机施加 1.5 倍额定电流限幅,0.25 s 后,目标转速变为 485 r/min,0.8 s 时添加 15 N·m 的负载转矩。图 6 和图 7 分别给出了电机运行过程中转速和转矩的变化。可以看出,该电机有比较好的加速性能,可以在很短的时间里就达到并保持在预定的速度。此外,在加入负载后,电机的转速波动极小,整体的速度响应性能优秀,展现出了该电机良好的大转矩特性。

交叉耦合作用对电磁转矩有重要影响,特别是电机大转矩运行时^[13]。为验证交叉耦合对该电机性能影响,根据式(5)的各个电磁参数计算关系,采用冻结磁导率法进行分析。令 $i_d = -10$ A, $i_q = 40$ A,计算结果如表 2 所示。电机本身电感和磁链参数均受到了交叉耦合作用的影响,对磁链进行矢量合成后,负载时的转子合成磁链要小于空载时的转子磁链,同时, d 、 q 轴电感值均发生了偏移。不考虑交叉耦合时根据式(2)计算

的电磁转矩为 28.40 N·m;考虑交叉耦合时根据式(6)计算的电磁转矩为 27.44 N·m, 其中,永磁体转矩为 27.743 2 N·m, 传统磁阻转矩为 -0.210 5 N·m,交叉耦合磁阻转矩为-0.088 N·m;有限元仿真得到的转矩值为 27.34 N·m。考虑交叉耦合时的转矩计算值与有限元仿真结果相近。可以得出,电机输出的电磁转矩将会由于大负载时磁路饱和而降低。

表 2 电感和磁链计算参数

各类参数	参数值
L_{dq}/mH	-0.002 458
L_{qq}/mH	0.919 161
L_{dd}/mH	0.941 090
L_{qd}/mH	-0.002 647
ψ_{dp}/wb	0.029 598
ψ_{qp}/wb	-0.002 794
空载 d 轴磁链/wb	0.029 579
空载 q 轴磁链/wb	-0.000 001

图 8 和图 9 分别为定参数仿真和联合仿真下对电机施加 3 倍额定电流限幅时的转速和转矩曲线对比。可以看出,虽然电机在两种仿真方式下最终都达到了相同的预设转速,但是在不同仿真平台下的转速上升的时间不同,联合仿真平台达到目标转速时间较定参数平台长。联合仿真平台充分考虑了交叉耦合情况下磁路饱和的影响,因此电磁转矩的降低导致了电机转速的上升,时间有所延长。而 Simulink 平台由于采用了固定的电感参数和永磁体磁链幅值,忽略了交叉耦合对电磁转矩的影响,因此仿真结果表明了大转矩运行时的表贴式 PMVM 因交叉耦合导致单位电流的输出转矩减小,说明联合仿真的结果更准确。

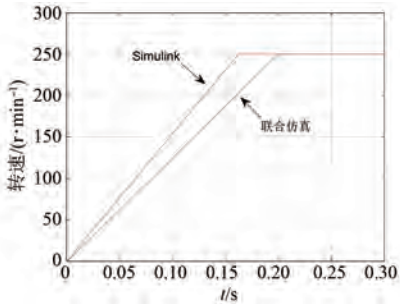


图 8 转速变化对比

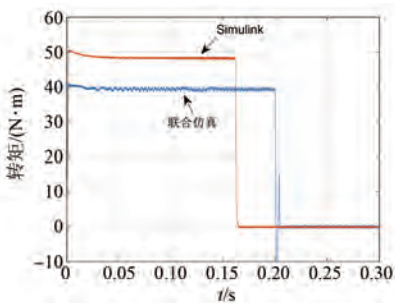


图 9 转矩变化对比

3.2 弱磁性能

设置仿真时间为 3 s, 给定目标转速 1 000 r/min,图 10 给出了电机转速曲线的变化。从图 10 可以看出,电机的基速区和弱磁调速区间的切换较为平稳,没有产生较大的转速尖峰,表明了电机的弱磁扩速性能良好。2.2 s 内电机转速持续上升,此时电机的转矩和输出功率分别如图 11 和图 12 所示。初始时刻,电机处于恒转矩区,此时电机的电磁转矩一直在 15 N·m 左右波动,因此输出功率随着转速的上升而不断增大。1.17 s 后,电机开始进入恒功率区,输出功率在 1.1 kW 左右波动,而电磁转矩随着转速的继续上升而不断降低,2.2 s 后,电机达到目标转速且转速波形稳定,同时由于未施加负载转矩,电机输出转矩和功率下降至 0 附近不断波动。结果表明,驱动控制系统较好地实现了该电机在弱磁区的恒功率控制。

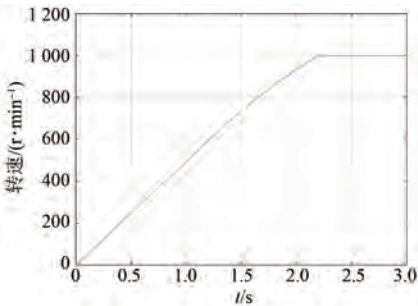


图 10 转速波形

4 结 语

将交叉耦合理论应用于表贴式永磁游标电机的磁链、电感和转矩模型的研究。采用 ANSYS Maxwell、Simplorer 及 Matlab/Simulink 场路联合仿真的方法构建了表贴式永磁游标电机的驱动控制

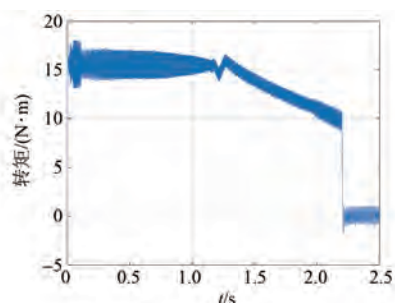


图 11 转矩波形

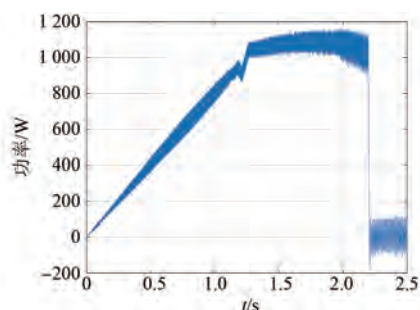


图 12 功率波形

系统模型,对比了该电机在联合仿真与 MATLAB/Simulink 定参数仿真两种不同仿真方式下的运行曲线,分析了其电磁特性和驱动性能。结果表明:联合仿真平台充分考虑了电磁参数变化的影响,其仿真结果相比于 MATLAB/Simulink 平台具有更高的可信度,为表贴式永磁游标电机本体结构的改进以及控制策略的优化设计和验证提供了重要依据,具有较好的参考及推广价值。

【参考文献】

[1] 梅叶依. 轮毂驱动用永磁游标电机设计及优化 [D]. 南京:东南大学,2021.

- [2] 黑亮声. 电动汽车用新型永磁游标电机的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [3] 王远喆. 电动汽车轮毂电机用磁场调制永磁游标电机设计与研究 [D]. 杭州:浙江大学,2018.
- [4] 骆继明,孔婉琦,黄明明,等. 可变磁通永磁游标电机设计及静态特性分析 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(17): 55.
- [5] 矫帅,赵文祥,邱先群,等. 基于改进式反电动势法的直线游标永磁电机无位置传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 2): 236.
- [6] 唐红雨,徐峰,黄海峰. 直线游标永磁电机反步滑模控制研究 [J]. 微特电机, 2018, 46(9): 71.
- [7] 陈浩,和阳,赵文祥,等. 基于占空比调制的五相容错永磁游标电机直接转矩控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1055.
- [8] 孙涛,代颖,刘皖秋,等. 考虑交叉耦合时电动汽车用内置式永磁同步电机交直流电感计算 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 87.
- [9] 李浩,井立兵,杨岸涛. 基于磁齿轮调制的复合电机有限元分析 [J]. 磁性材料及器件, 2017, 48(1): 37.
- [10] KIM B, LIPO T A. Operation and design principles of a PM vernier motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50, (6): 3656.
- [11] 诸自强,褚文强. 冻结磁导率先进技术及其在高性能电机研发中的应用 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 13.
- [12] 张鹏. 永磁同步电动机弱磁调速控制方法的研究 [D]. 天津:天津大学,2007.
- [13] LEE S T, BURRESS T A, TOLBERT L M. Power-factor and torque calculation with consideration of cross saturation of the interior permanent magnet synchronous motor with brushless field excitation [C] // 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部