

双定子混合励磁磁通切换电机及其电磁性能分析*

汪 奇¹, 杜 恽¹, 卢 伟¹, 仲 叙², 熊婷婷¹

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 212000; 2. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212000)

摘 要: 提出了一种带有导磁桥的双定子混合励磁磁通切换(DS-HEFS)电机。通过建立混合励磁电机数学模型, 分析了混合励磁电机的优势所在; 并通过建立等效磁路模型, 总结了具有或不具有导磁桥的两种DS-HEFS电机特性。基于二维有限元分析, 对DS-HEFS的电磁性能进行了评估, 结果表明, 其不仅具有优异的磁场调节能力, 而且还具有更高的输出转矩。

关键词: 双定子; 混合励磁; 数学模型; 磁路模型

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)08-0068-06

Electromagnetic Performance Analysis of Dual Stator Hybrid Excitation Flux Switching Motor*

WANG Qi¹, DU Yi¹, LU Wei¹, ZHONG Xu², XIONG Tingting¹

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China;

2. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: A new dual stator hybrid excitation flux switching (DS-HEFS) motor with iron bridges was proposed. The advantages of the hybrid excitation motor were analyzed by building the mathematical model of hybrid excitation machine. And an equivalent magnetic circuit model was developed to summarize the characteristics of DS-HEFS machines with or without iron flux bridges, respectively. Based on 2D finite element analysis, the electromagnetic performances of the DS-HEFS were evaluated, and the results proved that it could exhibit not only better flux regulation capability but also higher torque.

Key words: partitioned stator; hybrid excitation; mathematical model; magnetic circuit model

0 引 言

受益于高性能永磁材料和独特的聚磁效应, 磁通切换永磁(Flux-Switching Permanent Magnet, FSPM)电机具有功率密度高、效率高等优点^[1-2]。然而, 由于永磁磁场的不可控, 气隙磁场难以调节, FSPM电机的恒定功率运行范围受到极大限制, 并成为限制高性能FSPM电机的应用与发展

主要因素之一。

具有永磁体和励磁绕组2种励磁源的混合励磁(Hybrid Excited, HE)电机不仅继承了永磁电机高效、高功率密度等优点, 而且具有电励磁电机磁场可调的功能, 近年来受到了国内外学者的广泛关注。基于HE电机设计思路, 将电励磁绕组引入FSPM电机, 进而构成了混合励磁磁通切换(Hybrid-Excited Flux-Switching, HEFS)电机, 力求

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51677081, 51377073); 江苏省高校优势学科项目; 江苏大学高级人才启动基金项目(14JDC169); 江苏大学“青年骨干教师培养工程”项目

作者简介: 汪 奇(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合励磁电机设计及其控制系统。

杜 恽(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为永磁电机设计及其控制系统。

卢 伟(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合励磁电机设计及其控制系统。

在保持电机效率和功率密度的前提下,合理改善电机的结构,引入辅助励磁绕组,实现直接调节和控制电机气隙磁场,改善电机调速性能、驱动性能和调压保护特性。

国内外学者对该类电机进行了有益的探索与研究。法国学者 E. Hoang^[3]通过传统 FSPM 电机定子外部加设带有励磁绕组的附加铁环,提出了一种 HEFS 电机,通过电励磁电流的调节,该电机可以实现发电模式下良好的电压调节特性和电动模式时宽广的恒功率调速范围,但缺点是附加铁环增加了电机的体积,降低了电机的转矩密度和功率密度。此外, E. Hoang 教授^[4]还提出了一种简单的 HEFS 电机,将电机励磁绕组和电枢绕组均放置在同一定子槽。英国谢菲尔德大学 Zhu Z. Q.^[5-6]通过减小永磁体体积并在原本安装永磁体的位置绕制励磁绕组,提出了与常规 FSPM 电机具有相同叠片的 HEFS 电机,对永磁体和励磁绕组具有不同空间安装位置时的性能进行了对比分析,并对导磁桥的作用进行了研究。基于 E 型铁心 FSPM 电机, Zhu Z. Q. 教授^[7]还提出了一种容错齿上绕制励磁线圈的 HEFS 电机,并对不同定转子极槽配比下的电机性能进行了研究。国内方面,东南大学程明教授^[8-11]课题组对 HEFS 电机结构、电磁性能、容错性能以及不同的分析方法进行了深入研究。南京航空航天大学王宇等^[12]将 1 台 FSPM 电机和 1 台电励磁磁通切换电机轴向并列设置,并共用 1 套电枢绕组,形成并列式 HEFS 电机,通过改变直流励磁电流的大小和方向,实现整台复合电机的调节功能;为避免该复合电机中两种励磁源之间相互影响并容纳励磁绕组,2 台单独电机轴向必须留有一定空间,导致轴向长度较长。江西理工大学刘细平等^[13]提出了一种 12/10 的定子分割式轴向 HEFS 电机,通过三维有限元分析了该电机的电磁特性,分析结果表明,此类电机具有较宽的调速范围,但是该电机具有三维磁路,增加了电机设计与计算的时间和难度。

综上所述,国内外学者已经提出并研究了多种不同拓扑结构 HEFS 电机,但是值得注意的是,现有的 HEFS 电机永磁体、励磁绕组和电枢绕组都位于单个定子中,导致定子空间十分紧张,不仅降低了电机的空间利用率,同时增加了电机的设

计难度。因此,本文提出了一种双定子混合励磁磁通切换 (Dual Stator Hybrid Excitation Flux-Switching, DS-HEFS) 电机,采用 2 个分离的定子分别安装电枢绕组和励磁源 (永磁体和励磁绕组)。由于其特殊的分隔定子结构,可以提高所提出电机的空间利用率,进而提高电机电磁性能。

1 电机基本结构

DS-HEFS 电机结构如图 1 所示。由外定子、内定子和夹在 2 个定子之间的分段转子组成,3 者同轴安装。外定子采用齿槽结构,集中式电枢绕组周向分布在相邻外定子槽中。内定子由若干个“工”形单元内定子铁心组成,并由导磁桥连接成一个整体。每 2 块“工”形铁心之间安装 2 块切向充磁的永磁体,且充磁方向一致,形成 1 组模块,相邻模块的永磁体充磁方向相反。电励磁绕组放置在内定子槽内。

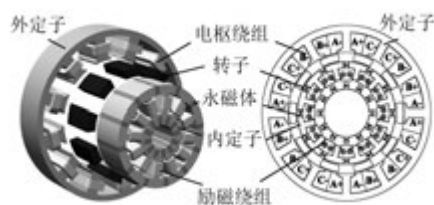


图 1 DS-HEFS 电机结构图

由于该电机励磁绕组设置在内定子中,充分利用了电机的内部空间,极大程度降低了 3 个电磁源在安装空间上的冲突。因此,可以在保持其功率密度的条件下增加磁场调节能力。此外,对于电枢和励磁绕组都采用不重叠的集中绕组,从而减少铜的使用且减少铜耗。

值得注意的是,在每 2 个“工”形内定子铁心之间采用导磁桥,使得内定子叠片为一个整体,便于制造。另一方面,导磁桥为磁场提供额外的磁路,可以进一步提高磁场调节能力,即通过较小的直流励磁磁动势实现更大的磁场调节能力。

2 DS-HEFS 电机运行原理

2.1 混合励磁电机运行原理

适用于 EV/HEV 等场合应用的电机要求其具有峰值扭矩大和调速范围宽等性能要求。因

此,有必要对混合励磁电机的数学模型进行分析,从理论上证明其优势所在。

对于混合励磁电机,空载时三相电枢绕组磁链为

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{ma} \\ \psi_{mb} \\ \psi_{mc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{af} \cdot i_f \\ M_{bf} \cdot i_f \\ M_{cf} \cdot i_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ψ_{ma} 、 ψ_{mb} 、 ψ_{mc} ——A、B、C 相永磁磁链;

M_{af} 、 M_{bf} 、 M_{cf} ——A、B、C 相电枢绕组与励磁绕组的互感;

i_f ——磁绕组电流。

以 A 相为例,调节励磁电流 i_f 的大小,反电动势 E 为

$$E = \frac{\partial \psi_a}{\partial t} = \frac{\partial (\psi_m + M_{af} i_f)}{\partial t} = \psi_\delta w_r = (\psi_m - i_d L_d - M_f i_f) w_r \quad (2)$$

式中: ψ_δ ——气隙磁链;

ψ_m ——气隙永磁磁链;

i_d ——直轴电枢电流;

L_d ——直轴电感;

M_f ——电励磁绕组电感;

w_r ——电角速度。

电机的端电压 U 需满足:

$$U \geq E \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知,混合励磁电机所能达到的最大电角速度 w_{rmax} 为

$$w_{rmax} = \frac{U}{(\psi_m - i_d L_d - M_f i_f)} \quad (4)$$

根据电机控制知识,电机最高转速和功率密度受到逆变器容量、导线电流密度以及电机冷却方式等条件的约束。对于永磁电机而言,调节气隙磁通只能通过直轴去磁分量 $i_d L_d$ 来实现,限制了电机的调速范围。对于混合励磁电机而言,调节气隙磁通不仅可以通过直轴去磁分量 $i_d L_d$ 来实现,还可以通过施加励磁电流去磁分量 $M_f i_f$ 实现,必将扩大电机的调速范围。

电磁转矩,尤其是电机的起动转矩作为电动汽车电机重要参数,可以表示为

$$T_e = \frac{3}{2} p [(\psi_m + M_f i_f) i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (5)$$

式中: i_q ——直轴电枢电流;

L_q ——直轴电枢电感。

根据式(5),较永磁电机而言,混合励磁电机在起动阶段(恒转矩区)的最大转矩较永磁电机增加了 $M_f i_f i_q$ 分量,将有利于提高电机响应速度,减少电机的起动时间,提高 EV/HEV 的加速度。由于存在额外的励磁损耗,使得一般的混合励磁电机的效率将低于同类型的永磁电机。但是,本文中采用双定子的 DS-HEFS 电机,充分地利用内部空间,补偿了由于励磁损耗而损失的部分效率。

2.2 导磁桥电机运行原理

为了提高励磁绕组的效率,以较小的直流励磁绕组磁势获得较大的气隙磁场调节范围,在 DS-HEFS 内定子铁心保留一定尺寸的导磁桥。为研究导磁桥的作用,建立了简化等效磁路模型对其进行分析。DS-HEFS 电机等效磁路模型如图 2 所示。图 2 中, F_{dc} 和 F_{pm} 分别为直流励磁绕组磁势和永磁磁势, P_{pm} 为永磁体磁导, P_{mb} 为导磁桥的磁导, P_g 为定转子之间的气隙等效磁导。

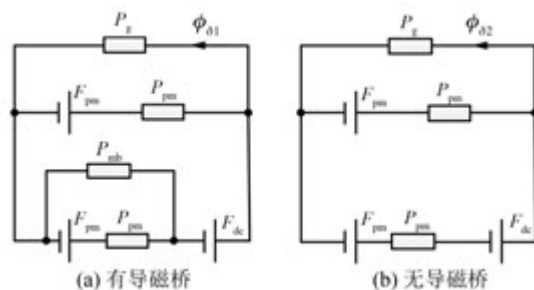


图 2 DS-HEFS 电机等效磁路模型

根据图 2,可得等效集总参数磁路模型,定性分析导磁桥的影响。为了简化推导,作出以下假设:

- (1) 除了导磁桥部分,其余铁心的磁阻为零。
- (2) 忽略电机漏磁。
- (3) 永磁体的矫顽力无穷大。
- (4) 磁场仅在径向变化。

当永磁体单独励磁时,即 $F_{dc} = 0$,有无导磁桥时的气隙合成主磁通分别为

$$\begin{cases} \phi_{\delta PM1} = \frac{2F_{pm} P_g P_{pm}}{2P_{pm} + P_{mb} + P_g} \\ \phi_{\delta PM2} = \frac{2F_{pm} P_g P_{pm}}{2P_{pm} + P_g} \end{cases} \quad (6)$$

当永磁体和电励磁绕组共同作用时,气隙合成磁通为

$$\begin{cases} \phi_{\delta 1} = \frac{2F_{pm}P_gP_{pm} + F_{dc}(P_{pm} + P_{mb})P_g}{2P_{pm} + P_{mb} + P_g} \\ \phi_{\delta 2} = \frac{(2F_{pm} + F_{dc})P_gP_{pm}}{2P_{pm} + P_g} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\phi_{\delta PM}$ ——由永磁体产生的气隙磁通;

下标 1、2——有导磁桥和无导磁桥 DS-HEFS 电机。

由于励磁电流的方向决定了 F_{dc} 的方向, 所以通过施加最大的正向增磁电流和最大的反向弱磁电流, 可得最大气隙合成磁通 $\phi_{\delta max}$ 和最小气隙合成磁通 $\phi_{\delta min}$ 。

为了更为直观地比较 2 台电机的调磁性能, 定义磁通调节比为

$$\gamma = \frac{\phi_{\delta max} - \phi_{\delta min}}{\phi_{\delta PM}} \quad (8)$$

上述 2 台电机的磁通调节比为

$$\begin{cases} \gamma_1 = 2F_{dc}P_g \left(1 - \frac{P_{pm} + P_g}{2P_{pm} + P_{mb} + P_g} \right) \\ \gamma_2 = 2F_{dc}P_g \left(1 - \frac{P_{pm} + P_g}{2P_{pm} + P_g} \right) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可以发现 $\gamma_1 > \gamma_2$, 即在施加相同的励磁绕组磁动势时, 采用导磁桥能够显著提高电机的磁场调节能力, 扩大电机的恒功率-速度范围。因此, 带有导磁桥的电机更加适用于电动汽车等宽调速场合。

3 DS-HEFS 电机有限元分析

为了验证上述分析, 利用有限元软件, 对有/无导磁桥的 2 个 DS-HEFS 电机分析并进行比较。

DS-HEFS 电机空载磁场分布如图 3 所示。与无导磁桥电机相比, 有导磁桥电机部分永磁磁场形成短路, 使得永磁转矩稍微下降, 但是其电励磁磁场经过导磁桥, 相对无导磁桥电机而言, 不经过永磁体, 所以有导磁桥电机磁场调节能力将提

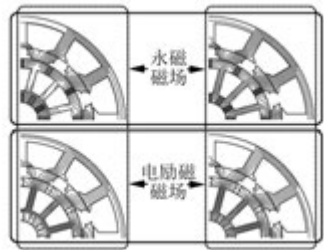


图 3 DS-HEFS 电机空载磁场分布

高。气隙磁密波形如图 4 所示。由图 4 可知, 无导磁桥的电机永磁磁密较有导磁桥的大, 然而前者的磁场调节范围要比后者小。

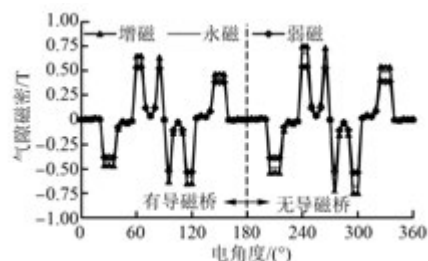


图 4 气隙磁密波形

图 5 给出了永磁体单独励磁时的齿槽转矩, 可见, 有导磁桥电机齿槽转矩较无导磁桥电机小。图 6 所示为不同励磁情况下的 2 台电机的感应电势波形。可以发现, 通入不同的励磁电流时, 可以实现感应电动势的有效调节, 且有导磁桥电机的磁通调节比无导磁桥电机大, 与图 4 中分析的气隙磁密保持一致。

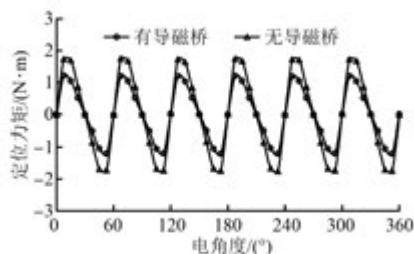


图 5 定位力矩波形

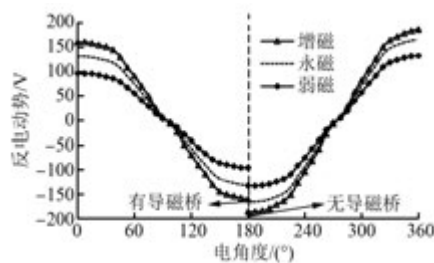


图 6 DS-HEFS 电机感应电动势波形

当电枢电流 $I_m = 10$ A, 且使用 $i_d = 0$ 控制方式时, 图 7 给出了具有不同激励时的 2 台电机的转矩波形, 可以发现, 无导磁桥电机在不同励磁情况下的平均转矩均大于有导磁桥电机相应励磁情况下的平均转矩。但有导磁桥电机的转矩变化范围较无导磁桥电机大, 这是有导磁桥电机的优势。

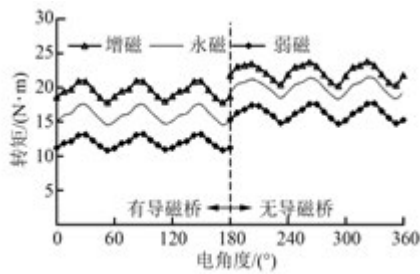


图7 DS-HEFS 电机转矩波形

同时,转矩的变化趋势和齿槽转矩的变化趋势保持一致,说明该类电机的转矩脉动主要由齿槽转矩引起。

由于混合励磁电机的励磁磁通由永磁体、励磁电流和电枢电流直轴分量 i_d 共同产生,所以可通过多种可变的电枢和励磁电流组合来产生相同的转矩。通常,在低速区,施加正向增磁电流,增加气隙磁密和输出转矩,提高系统的响应速度;在高速区,通过施加反向的弱磁电流,增加系统恒功率-速度范围。本文采用铜耗最小化弱磁调速方法^[14-16],对有/无导磁桥的 2 个 DS-HEFS 电机进行分析及比较。图 8 所示为 2 台电机的转矩/功率-速度曲线。可见,无导磁桥电机具有更高的转矩输出能力,但是,有导磁桥电机具有更大的恒功率区,也就是说,有导磁桥电机具有更大的磁场调节能力。

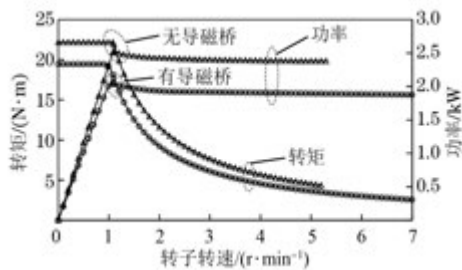


图8 DS-HEFS 电机转矩/功率-转速图

DS-HEFS 电机参数比较如图 9 所示。在图 9 中,对峰值转矩、齿槽转矩水平 α 、磁通量调节率 γ 、恒功率区域中的最高速度、功率/额定转矩和额定运行时的效率 η 这 6 个关键性能配置六边形进行比较,其中无导磁桥电机参数被设置为正六边形作为参考,而另一个不规则六边形则可以反映有导磁桥电机拓扑的优缺点。系统参数比较如表 1 所示。

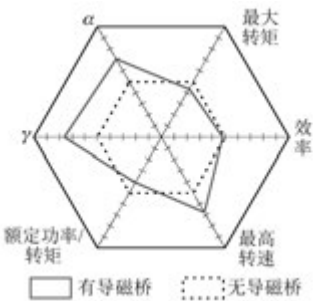


图9 DS-HEFS 电机参数比较

表 1 系统参数比较

参数名称	有导磁桥	无导磁桥
额定转矩/(N·m)	16.06	19.90
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 200	1 200
功率/kW	2.02	2.52
齿槽转矩水平	0.41	0.29
磁通调节比	0.49	0.32
最高转速/(r·min ⁻¹)	7 000	5 200
铁耗/W	132.3	158.1
铜耗/W	54	54
效率/%	91.56	92.24

齿槽转矩水平 α 由式(10)计算:

$$\alpha = \frac{1}{\beta} \tag{10}$$

式中: β ——齿槽转矩峰峰值。

由式(10)可知, α 越大,对应的齿槽转矩越小。

根据上述分析,可知:

- (1) 无导磁桥电机具有更大的额定输出能力且额定运行时效率也较有导磁桥电机高。
- (2) 对于有导磁桥电机,具有较宽的磁通调节范围,适合于电动汽车等需要大范围变速驱动的应用场合,且转矩脉动较无导磁桥电机小。

4 结 语

本文提出了一种 DS-HEFS 电机。首先,通过建立的数学模型,从理论上证明了混合励磁电机的优势所在;其次,通过等效磁路模型,分析了导磁桥对于电机性能的影响。有限元仿真结果表明,导磁桥的引入,使电机内定子为一个整体,便于加工和安装,同时提高了电机气隙磁场的调节

能力,适合于电动汽车等需要大范围变速驱动的应用场合。

【参考文献】

- [1] ZHU Z Q, PANG Y, HOWE D, et al. Analysis of electromagnetic performance of flux-switching permanent magnet machines by nonlinear adaptive lumped parameter magnetic circuit model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (11): 4277-4287.
- [2] DU Y, XIAO F, HUA W, et al. Comparison of flux-switching PM motors with different winding configurations using magnetic gearing principle [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52 (2): 1-8.
- [3] HOANG E, LECRIVAIN M, GABSI M. A new structure of a switching flux synchronous polyphased machine with hybrid excitation [C] // European Conference on Power Electronics and Applications, 2007: 1-8.
- [4] GAUSSENS B, HOANG E, LECRIVAIN M, et al. A hybrid-excited flux-switching machine for high-speed DC-alternator applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (6): 2976-2989.
- [5] OWEN R L, ZHU Z Q, JEWELL G W. Hybrid excited flux-switching permanent magnet machines [C] // European Conference on Power Electronics and Applications, 2009: 1-10.
- [6] OWEN R L, ZHU Z Q, JEWELL G W. Hybrid-excited flux switching permanent-magnet machines with iron flux bridges [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 (6): 1726-1729.
- [7] CHEN J T, ZHU Z Q, IWASAKI S, et al. A novel hybrid excited switched-flux brushless AC machine for EV/HEV applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60 (4): 1365-1373.
- [8] HUA W, CHENG M, ZHANG G. A novel hybrid excitation flux switching motor for hybrid vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (10): 4728-4731.
- [9] ZHANG G, HUA W, CHENG M, et al. Investigation of an improved hybrid-excitation flux-switching brushless machine for HEV/EV applications [J]. IEEE Transactions Industrial Applications, 2015, 51 (5): 3791-3799.
- [10] HUA W, ZHANG G, CHENG M, et al. Electromagnetic performance analysis of hybrid-excited flux-switching machines by a nonlinear magnetic network model [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2011, 47 (10): 3216-3219.
- [11] ZHAO W X, CHENG M, HUA W, et al. Back-EMF harmonic analysis and fault-tolerant control of flux-switching permanent magnet machine with redundancy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (5): 1926-1935.
- [12] 王宇, 邓智泉. 并列式混合励磁通切换电机直流发电系统功率角线性控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (12): 136-145.
- [13] 刘细平, 郑爱华, 王晨. 定子分割式轴向磁通切换混合励磁同步电机三维有限元分析与实验研究 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (10): 106-113.
- [14] 黄明明, 周成虎, 郭建. 混合励磁同步电动机分段弱磁控制 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (1): 52-60.
- [15] MBAYED R, SALLOUM G, VIDOL R, et al. Hybrid excitation synchronous motor control in electric vehicle with copper and iron losses minimization [C] // 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012: 4886-4891.
- [16] EVANS D J, ZHU Z Q, ZHAN H L, et al. Flux-weakening control performance of partitioned stator-switched flux PM machines [J]. IEEE Transactions Industrial Applications, 2016, 52 (3): 2350-2359.

收稿日期: 2018-03-26

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