

DOI:10.11918/202004093

可调磁通电机系统及其关键技术发展

郑萍,王明娇,乔光远,刘法亮,张书宽

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,哈尔滨 150080)

摘要: 针对传统汽车工业发展面临的能源危机和环境污染等问题,为满足新能源汽车驱动电机在宽调速范围内高效率运行的需求,对可调磁通电机(variable-flux machine, VFM)系统及其关键技术发展进行综述. 首先,介绍了可调磁通电机的应用背景与工作原理;之后,简要分析了各类可调磁通电机(包括交流调磁型、直流调磁型和机械调磁型)的拓扑结构和优缺点,总结了不同种类可调磁通电机的结构特点和设计方法;最后,针对可调磁通电机特殊的工作原理,以及电机在负载运行和在线调磁控制时对参数在线辨识、调磁电流控制和转矩波动抑制等方面的需求,总结了专用于可调磁通电机的控制策略(包括磁链观测器、电流与转矩控制策略以及调磁与调速控制策略),分析了各种控制策略的理论依据、实现方法、系统框架及优缺点. 结果表明:可调磁通电机能够调节电机气隙磁场强弱,从而扩宽电机的转速范围,同时提高电机在高速区的运行效率;采用先进的控制策略,能够实现电机的在线调磁及调速控制,并降低转矩波动和调磁损耗,保证系统高效、稳定运行. 新型可调磁通电机系统的提出及相关技术发展,将使可调磁通电机系统在电动汽车、数控机床等领域得到更广泛的应用,是未来新能源领域重点发展的核心技术之一.

关键词: 电动汽车;可调磁通电机;组合磁极;磁链观测器;电流控制策略;调磁控制策略

中图分类号: TH133;TP183

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)06-0207-11

Development of variable-flux machine system and its key technologies

ZHENG Ping, WANG Mingqiao, QIAO Guangyuan, LIU Faliang, ZHANG Shukuan

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Variable-flux machine (VFM) is designed to solve the problems of energy crisis and environmental pollution for traditional automotive industry, which satisfies the requirements of high-efficiency operation of new energy vehicle driving machines in a wide speed range. The development of VFM system and its key technologies were reviewed. First, the application background and operating principle of VFMs were introduced. Then, the topologies, advantages, and disadvantages of various VFMs (including VFMs using AC flux-adjustment coils, DC flux-adjustment coils, and mechanical structures) were analyzed, and the structure characteristics and design methods of different VFMs were summarized. Finally, in view of the special working principle of VFMs and the requirements of on-line parameter identification, flux-adjusting current control, and torque ripple suppression during load and on-line flux-adjustment operations, the control strategies specific to VFMs (including flux observer, current and torque control strategies, flux-adjustment, and speed regulation strategies) were summarized. The theoretical method, implementation approach, system structure, advantages, and disadvantages of various control strategies of VFMs were analyzed. Results show that the air-gap magnetic field of VFMs could be adjusted to expand the speed range and improve the efficiency of machines in high-speed range. By adopting advanced control methods, the on-line flux-adjustment and speed regulation could be realized, and the system could operate efficiently and steadily with torque ripple and flux-adjusting loss reduced. Thus, with the development of VFM topologies and related technologies, VFMs have great application prospects in the fields of electric vehicles and numerically controlled machines, and will become one of the key technologies in the future development of new energy fields.

Keywords: electric vehicles; variable-flux machine; combined magnetic pole; flux observer; current control strategy; flux-adjustment control strategy

在世界范围内,日益严重的能源危机和环境污

染问题使得传统汽车工业的发展面临空前挑战^[1],新能源汽车成为未来汽车的发展方向^[2]. 我国在《中国制造2025》中将“节能与新能源汽车”列为我国未来重点发展的十大领域之一,作为新能源汽车的最主要车型,拥有巨大发展空间的电动汽车受到

收稿日期:2020-04-16

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51637003);

国家重点研发计划(2017YFB0203603)

作者简介:郑萍(1969—),女,教授,博士生导师

通信作者:郑萍, zhengping@hit.edu.cn

广泛关注. 驱动电机作为电动汽车的核心技术之一, 是电动汽车的研究重点, 开发先进的驱动电机也是提升我国在电动汽车领域实力的重要途径之一^[3].

永磁同步电机(permanent-magnet synchronous machine, PMSM)因其高效率、高功率密度等优点, 目前已成为电动汽车车用电机的主流机种, 其占有率呈现逐年上升趋势. 但是传统永磁同步电机面临着一些急需解决的问题: 永磁同步电机气隙磁场调节困难, 导致其恒功率区域较窄, 宽速运行受限; 电机一般采用弱磁控制进行扩速, 但需要持续施加直轴弱磁电流, 这将产生额外的铜损, 导致电机在高速区域效率较低; 电机在运行过程中永磁体可能出现局部温度过高、承受去磁电流冲击、或由于运行工况恶劣出现剧烈振动等情况, 有局部退磁风险; 电机所用稀土永磁材料价格受到国际形势和国家政策的影响, 价格波动较大.

针对上述问题, 有学者提出了一种能够调节气隙磁场强弱的电机—可调磁通电机(variable-flux machine, VFM), 又被称作记忆电机^[4]. 可调磁通电机的概念提出以来, 受到业界的广泛关注, 先后发展出了基于不同原理、具有不同结构的可调磁通电机, 同时学者们对电机进行调磁时所带来的问题进行了研究, 提出了诸多针对可调磁通电机的控制策略. 可调磁通电机的提出, 能够解决传统永磁同步电机气隙磁场调节困难的问题, 降低永磁体发生退磁的风险, 不仅保留了传统永磁同步电机的优点, 还可通过调磁调速使电机具有较宽的调速范围和较高的运行效率, 其出现与发展为拓宽永磁同步电机的调速范围提供了新的方法和途径, 有望为电动汽车、数控机床及轨道交通等应用领域提供新型的永磁电机宽调速驱动系统.

本文以可调磁通电机的调磁方式进行分类, 总结了现有不同结构的可调磁通电机, 通过总结各种电机的工作原理、拓扑结构以及各自的优缺点, 阐述了可调磁通电机的关键技术问题; 同时针对可调磁通电机的特殊问题, 对电机控制策略进行了归纳总结.

1 可调磁通电机原理及拓扑结构

1.1 可调磁通电机原理

可调磁通电机的基本工作原理是通过改变电机气隙磁密, 扩宽电机能够运行的速度范围. 大部分可调磁通电机通过施加充、去磁电流改变永磁体磁化强度来调节气隙磁密, 可以通过在电机定子或转子上额外设置专用于调磁的直流调磁绕组实现对永磁体充、去磁, 也可以直接利用电机电枢绕组施加调磁电流; 另外有的可调磁通电机通过附加机械结构改

变电机主磁路磁场分布, 从而达到调节电机气隙磁密的目的.

改变永磁体磁化强度是利用了永磁材料的磁滞特性, 学界常采用磁滞回线来反映这种特性, 图 1 为常用于可调磁通电机中 AlNiCo 材料的磁滞回线, 当永磁体磁状态受到外部磁场作用发生改变后, 撤去外部磁场, 永磁体不能恢复到原来的磁状态, 而是沿着局部回复曲线稳定在新的磁状态. 机械调磁型可调磁通电机则是通过改变主磁路磁阻、改变转子磁极位置等方式来调节气隙磁密的.

基于上述原理, 国内外学者们提出了大量不同结构的可调磁通电机, 按电机调磁方式分类, 可将可调磁通电机分为交流脉冲调磁型、直流脉冲调磁型和机械调磁型. 交流脉冲调磁型利用定子电枢绕组产生调磁电流; 直流脉冲调磁型通过额外安装的调磁绕组对永磁体充、去磁; 机械调磁型通过机械装置进行磁场调节. 按励磁方式分类, 可将可调磁通电机分为单一永磁型、组合磁极型和混合励磁型.

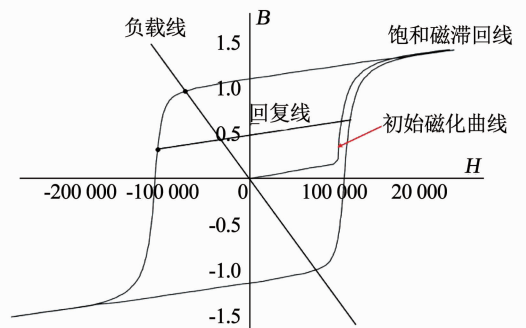


图 1 AlNiCo 材料磁滞回线

Fig. 1 Hysteresis loop of AlNiCo

1.2 交流调磁型可调磁通电机

1.2.1 单一永磁型

可调磁通电机最早由德国学者 V. Ostovic^[4] 提出, 其结构如图 2 所示, 电机定子结构与传统永磁电机类似, 转子由 AlNiCo、转子铁心和非导磁材料组成“三明治”结构. 通过定子电枢绕组施加直轴充、去磁脉冲电流, 可以实现 AlNiCo 磁极的反复充、去磁, 而且其调磁电流为瞬时脉冲电流, 几乎没有充、去磁损耗. 实验结果表明该电机转速范围较宽, 能够在 600 ~ 4 000 r/min 的转速范围内保持较高的效率.

美国威斯康星大学麦迪逊分校 R. D. Lorenz 等^[5] 提出了交轴磁阻增强式可调磁通电机, 如图 3 所示. 通过在转子铁心上开槽, 使电机的交轴电感小于直轴电感, 因此可利用直轴增磁电流得到正的磁阻转矩, 并通过合理设计漏磁路径实现更大的磁通调节范围.

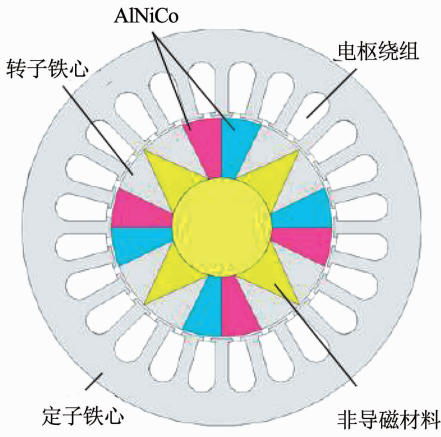
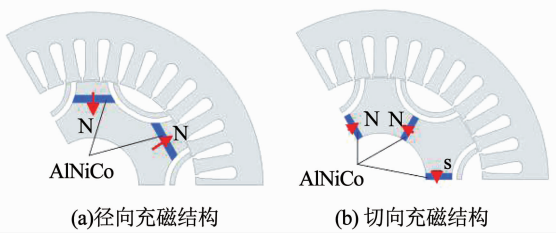


图2 原型可调磁通电机结构^[4]

Fig.2 Structure of VFM prototype^[4]



(a) 径向充磁结构 (b) 切向充磁结构

图3 交轴磁阻增强式可调磁通电机^[5]

Fig.3 Q-axis reluctance enhanced VFM^[5]

单一永磁型可调磁通电机能够通过调节永磁磁通扩大调速范围, 但该类电机只采用矫顽力较低的永磁材料, 与采用NdFeB等高矫顽力永磁材料的电机相比, 其气隙磁通较小, 在相同尺寸下电机功率密度较低。另外, 为了获得足够的磁通, 上述电机常使用较厚的AlNiCo材料, 从而需要较大的调磁脉冲电流, 增大了逆变器容量。

1.2.2 组合磁极型

为了解决单一永磁型可调磁通电机存在的问题, 有学者提出了组合磁极型可调磁通电机, 根据永磁体的组合方式, 该类电机可分为串联型和并联型两大类。

日本东芝公司 S. Maekawa 等^[6]提出了一种串联型表贴式外转子可调磁通电机, 如图4所示。在同一主磁路中的一对磁极分别由不同的永磁材料构成, 其中可调磁通磁极采用具有低矫顽力特性的SmCo材料, 其退磁曲线呈线性, 磁化特性相较于AlNiCo更易获得。英国谢菲尔德大学 Z. Q. Zhu 等^[7]提出了一种内置式串联型可调磁通电机, 如图5所示。与并联型结构相比, 该电机的可调磁通磁极工作点在调磁过程中更易于控制, 且具有较高的转矩密度。但电机需要的去磁电流较大, 扩速性能受逆变器容量限制。

日本东洋大学 K. Sakai 等^[8]提出了一种并联型

可调磁通电机, 其结构如图6所示, 电机的AlNiCo磁极切向充磁, 而NdFeB磁极径向充磁。AlNiCo可以被直流电流充、去磁, AlNiCo磁通可与NdFeB磁通共同进入气隙, 从而增强气隙磁通, 也可将NdFeB产生的磁通在转子内部部分短路, 起到去磁效果。

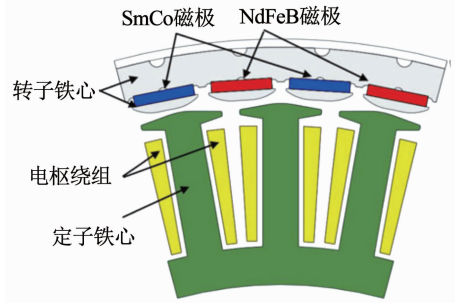


图4 表贴式外转子可调磁通电机结构^[6]

Fig.4 Structure of external-rotor VFM^[6]

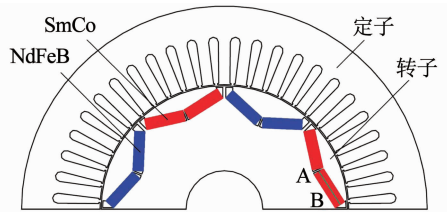


图5 内置式串联型可调磁通电机结构^[7]

Fig.5 Structure of series internal VFM^[7]

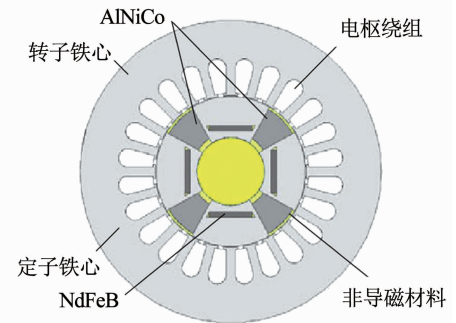


图6 并联型可调磁通电机结构^[8]

Fig.6 Structure of parallel VFM^[8]

天津大学陈益广等^[9-10]提出了一系列的并联型可调磁通电机, 典型结构如图7所示。W型结构由径向充磁的NdFeB作为主励磁源, 切向充磁的AlNiCo用于调磁, 两块NdFeB交点与转子外边缘间磁路设计的较窄, 起到增大交轴磁路磁阻的作用; V型结构中的NdFeB和AlNiCo均为切向充磁, 转子磁极直轴处隔磁桥起到增大交轴磁阻的作用, 减小了电机运行时交轴电枢反应对AlNiCo磁状态的影响。

华中科技大学曲荣海等^[11]提出了一种如图8所示的并联型可调磁通电机, 其转子磁极由切向充磁的AlNiCo和NdFeB构成, 通过添加交轴磁障提高交轴磁阻, 使得直轴增磁电流能够产生正的磁阻

转矩,该结构的转矩较单一永磁型可调磁通电机提升了 14%,双层磁障的添加还可以抑制 NdFeB 对 AlNiCo 的去磁作用,有利于提高电机的充磁能力. 浙江大学沈建新等^[12]提出了一种并联式可调磁通电机,其结构如图 9 所示,采用由 NdFeB 和铁氧体组成的组合磁极,电机采用转子铁心添加交轴磁障的方法,缓解了并联型结构低矫顽力永磁体不易被充磁的问题. 研究表明该结构添加磁障后具有更好的正向磁化特性,降低了铁氧体磁极在电机负载运行时的退磁风险;但是磁障会削弱铁氧体磁极对 NdFeB 的短路作用,影响电机的调磁能力.

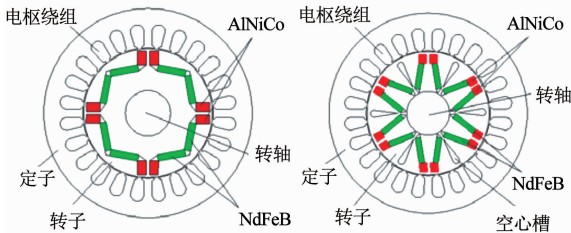


图 7 W 和 V 型结构的并联型可调磁通电机结构^[9-10]
Fig. 7 Structures of W- and V-type parallel VFMs^[9-10]

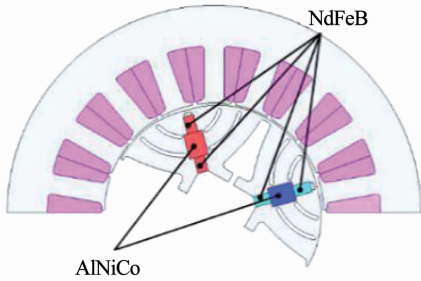


图 8 切向充磁串联型可调磁通电机结构^[11]
Fig. 8 Structure of tangentially magnetized parallel VFM^[11]

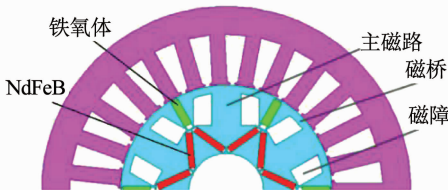
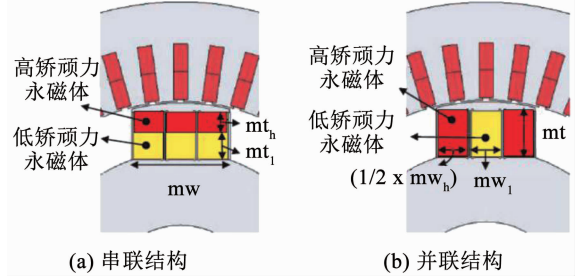


图 9 具有隔磁磁障的并联型可调磁通电机^[12]
Fig. 9 Structure of parallel VFM with magnetic barriers^[12]

凸极式可调磁通电机的 MTPA (maximum torque per ampere) 曲线在第二象限,在重载情况下负的直轴电流和较大的交轴电流会对低矫顽力永磁体去磁,从而降低电机的转矩输出能力. 反凸极式可调磁通电机由于其 MTPA 曲线位于第一象限,在重载情况下直轴增磁电流对低矫顽力永磁体工作点有增强作用,可以有效地防止低矫顽力永磁体被交轴电枢反应去磁. R. D. Lorenz 等^[13]提出了一种反凸极式可调磁通电机,其结构如图 10 所示. 通过对串联型

和并联型两种结构的研究,发现串联结构具有更高的转矩密度,但是低矫顽力永磁体不易被去磁;并联结构磁状态的可调节范围更宽,但是低矫顽力永磁体不易被充磁. 但是为了提高电机的反凸极率,在电机设计时将交轴电感设计的很小,因此反凸极式可调磁通电机的磁阻转矩较小.



(a) 串联结构 (b) 并联结构

图 10 反凸极式可调磁通电机结构^[13]
Fig. 10 Structures of reverse-salient VFMs^[13]

东南大学林鹤云等^[14-15]提出了多种串并联混合可调磁通电机,一种代表性结构如图 11 所示. 采用磁路法和有限元仿真优化了电机的电磁性能,实验结果证明电机有较好的调磁性能,较宽的调磁范围和较高的转矩输出能力.

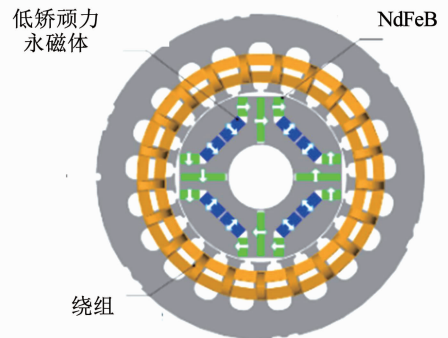


图 11 串并联混合型可调磁通电机结构^[14-15]
Fig. 11 Structure of series-parallel-hybrid VFM^[14-15]

哈尔滨工业大学郑萍等^[16]提出了一种具有半串联结构的可调磁通电机,该结构在饱和充磁情况下 NdFeB 和 AlNiCo 的磁路为串联模式,非饱和充磁情况下 NdFeB 和 AlNiCo 的磁路为串并联混合模式,这种串联为主并联为辅的可调磁通电机被称为半串联结构,如图 12(a)所示. 对比分析了半串联、串联和并联结构,发现所提出结构具有综合了串联结构高功率密度和并联结构宽调磁范围的优点,实验结果与理论分析及仿真结果具有较好的一致性,证明了设计方案的正确性;提出了一种磁路分割式 V 型交流调磁可调磁通电机,如图 12(b)所示,该结构相比传统内置 V 型可调磁通电机空载反电势和气隙磁密的正弦性更好,转矩脉动较低,负载调磁倍数更高,且需要的充磁脉冲电流更小,针对该结构提

出了一种高精度的等效磁路模型,对于不同的电机参数,所提出模型的气隙磁密计算误差均小于 6%,永磁体的相对工作点误差均小于 5%^[17-18];提出了一种具有反凸极特性的串联磁路可调磁通电机,如图 12(c)所示,该电机由于具有旁路磁通流路径,电机在去磁后钕铁硼产生的多余磁通在铁心中被旁路磁通路径短路,其调磁范围可以达到传统并联结构的程度^[19];提出了一种串并联结构的可调磁通电机,其结构如图 12(d)所示,该电机在 V 型串并联磁路型磁极结构的基础上,增加了一层 AlNiCo 与 NdFeB 串联排布的 U 型永磁体,用以提高电机的功率密度并稳定 AlNiCo 的工作点,电机具有较宽的调磁范围和较强的充去磁能力。

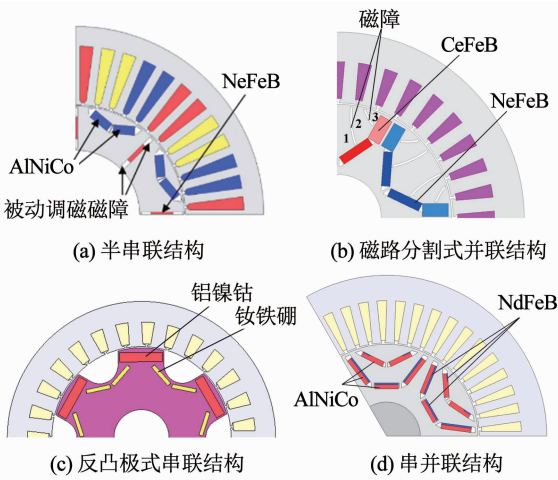


图 12 混合永磁交流调磁可调磁通电机结构^[16-19]

Fig. 12 Structures of hybrid-PM VFMs^[16-19]

1.3 直流调磁型可调磁通电机

香港大学邹国棠等^[20-21]首次将记忆电机的理念引入了定子永磁型电机中,提出了双凸极可调磁通电机,如图 13 所示. 该电机定子采用双层结构,分别放置电枢绕组和调磁绕组,电枢绕组放置于定子磁极外侧,从而避免了电枢反应对永磁体的影响,另外单独设置的调磁绕组可以保证电机在线调磁时的负载能力,研究了电机在不同磁化状态下的电磁性能和运行性能,并给出了详细的电机设计准则。

Z. Q. Zhu 等^[22]提出了一种磁通切换可调磁通电机,其结构如图 14(a)所示,定子磁极由切向充磁的 NdFeB 和径向充磁的低矫顽力永磁体组成,直流调磁绕组位于定子低矫顽力永磁体两侧,综合考虑电磁转矩、过载能力和调磁性能,给出了电机的最佳极槽配合关系. 江苏大学朱孝勇等^[23]提出一种定子分块的磁通切换可调磁通电机,其结构如图 14(b)所示,电枢绕组位于外定子上,永磁体和直流调磁绕组置于内定子上,转子位于两个定子之间. 研究表

明,该电机中 AlNiCo 的加入提高了电机工作特性,并且降低了电机永磁体成本;但是电机定子结构更加复杂,且电磁转矩有所下降。

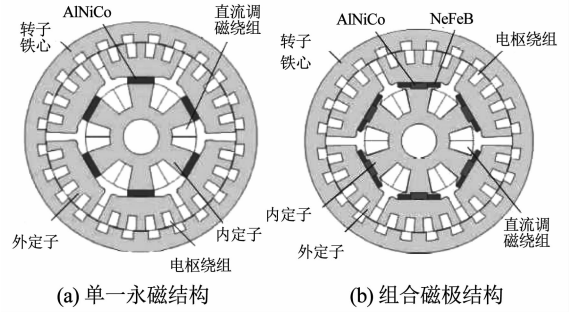


图 13 双凸极可调磁通电机结构^[20-21]

Fig. 13 Structures of double-salient VFMs^[20-21]

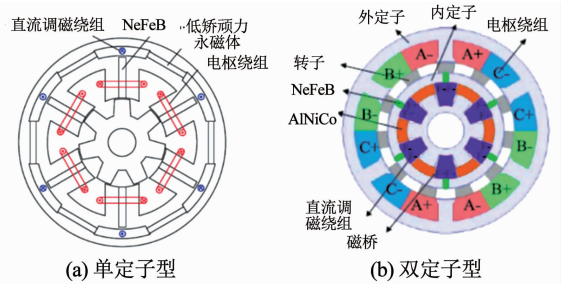


图 14 磁通切换可调磁通电机结构^[22-23]

Fig. 14 Structures of flux switching VFMs^[22-23]

林鹤云等^[24]提出了一种可调磁通游标电机,其结构如图 15 所示, NdFeB 置于外转子上,低矫顽力永磁体及直流调磁绕组置于定子上,由于电机定、转子极数不同且具有独立的调磁绕组,其既具有磁场调制效应,又有较宽的调速范围. 通过建立非线性解析磁滞模型,对电机的电磁性能进行了分析,结果表明当定、转子的极数比为 12/11 时,电机具有较高的转矩密度,且此时转矩波动最低。

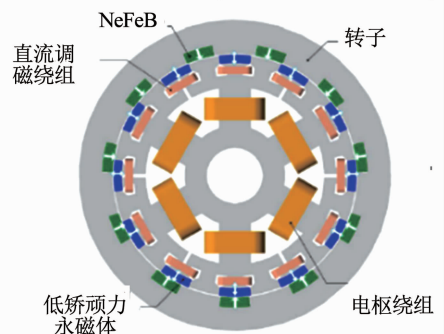


图 15 可调磁通游标电机结构^[24]

Fig. 15 Structure of variable-flux vernier machine^[24]

K. Sakai 等^[25]提出了一种径-轴向磁路可调磁通电机,其结构如图 16 所示, AlNiCo 和 NdFeB 磁在转子上,轴向充磁的 AlNiCo 放置于轴向分段转子之间,正反面的 NdFeB 永磁体极性相反, AlNiCo 磁极

的磁状态可通过置于定子上的直流调磁绕组施加轴向磁场改变,从而调节电机气隙主磁通.该可调磁通电机具有轴向磁路,但电机结构相对复杂,制造困难;调磁绕组所在磁路较长,磁阻较大,增加了驱动器容量.

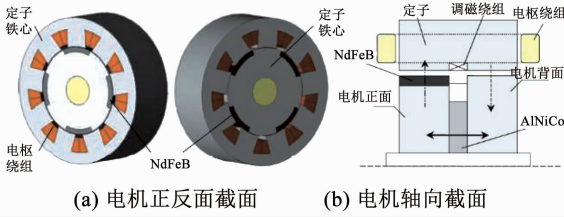


图 16 径-轴向磁路可调磁通电机结构^[25]

Fig. 16 Structure of VFM with radial-axial magnetic circuit^[25]

美国威斯康星大学麦迪逊分校 T. A. Lipo 等^[26]提出了一种轴向磁通可调磁通电机,其结构如图 17 所示,定子由外定子、直流调磁绕组和内定子构成三明治结构,电枢绕组位于内外定子上,转子呈分为内外圈的盘式结构,每一圈由磁化方向相同的 NdFeB 和铁极交替排列构成,内外圈上 NdFeB 磁性相反,可通过改变直流调磁绕组产生的磁场方向调节气隙磁密大小.

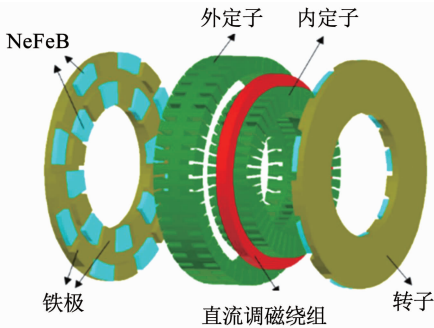


图 17 轴向磁通可调磁通电机结构^[26]

Fig. 17 Structure of axial flux VFM^[26]

瓦莱奥设备公司 A. D. Akemakou 和美国威斯康星大学麦迪逊分校 T. A. Lipo^[27-28]先后提出了如图 18 所示的混合励磁可调磁通电机,其中图 18(a)中励磁绕组和永磁体为并联关系,图 18(b)中的励磁绕组和永磁体为串联关系,通过改变直流励磁绕组中的电流方向就可以调节电机气隙磁密大小.这种转子上添加励磁绕组的电机具有较宽的调磁范围,且控制简单容易实现,但是需要额外的电刷、滑环机构.

1.4 机械调磁型可调磁通电机

哈尔滨工业大学寇宝泉等^[29]提出了一种机械调磁型可调磁通电机,其转子结构如图 19 所示,置于空气开槽两侧的永磁体具有相同的极性,因此二者之间存在斥力,当电机转速逐渐升高时,未被固定

的永磁体会在离心力的作用下逐渐靠近气隙,使得主磁极漏磁路的磁阻降低,漏磁磁通增加,而经过气隙的磁通减少,达到电机高速运行时降低气隙磁密的目的.

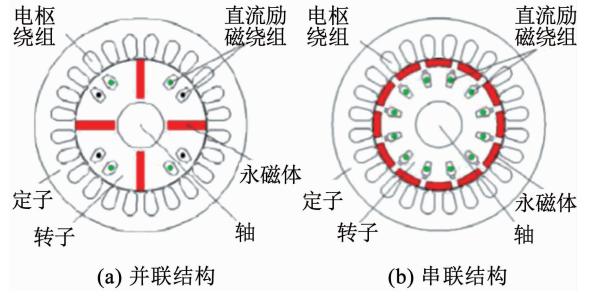


图 18 励磁绕组位于转子上的可调磁通电机结构^[27-28]

Fig. 18 Structures of VFM with excitation windings on rotor^[27-28]

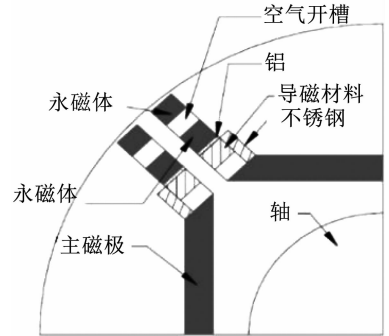


图 19 机械调磁型可调磁通电机结构^[29]

Fig. 19 Structure of mechanical VFM^[29]

日本日立有限公司 G. Zhou 等^[30]提出了一种轴向分段式机械调磁型可调磁通电机,如图 20 所示.该电机通过机械装置调整两个转子的相对位置来调节气隙磁密大小.当电机低速运行时,两个转子极性相同的永磁体在轴向上对齐,二者对气隙贡献的磁通方向相同;当电机高速运行时,两个转子轴向对齐的磁极极性相反,二者对气隙贡献的磁通方向相反,相互抵消,气隙磁密很小,因此该电机具有较大的调速范围.

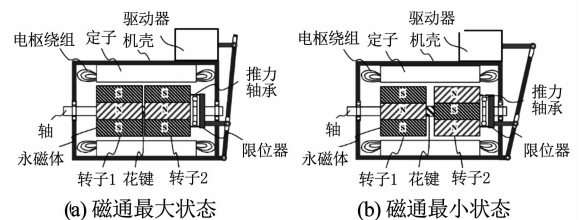


图 20 轴向分段机械调磁型可调磁通电机^[30]

Fig. 20 Mechanical VFM with rotor segmented axially^[30]

1.5 可调磁通电机拓扑总结

机械调磁型可调磁通电机结构复杂且实现困难,目前研究的较少;直流调磁型可调磁通电机结构相对复杂,但是控制简单;交流调磁型可调磁通电机

结构形式与常规永磁同步电机最接近, 在电机设计与优化时可以直接借鉴永磁同步电机成熟的方法理论. 但是也存在一些问题, 较典型的问题有: 永磁体磁状态变化后难以在线估计; 难以实现准确高效的在线调磁; 逆变器电压限制使得电机在调速时遇到困难; 去磁后电机转矩波动较为明显; 以全速域高效率为目标的调速策略实现困难.

2 可调磁通电机控制策略

2.1 磁链观测器

磁链观测器是一种通过搭建数学模型, 由已知的电机参数计算电机定子或转子磁链大小的方法, 磁链观测器由来已久, 但多用于感应电机的无位置控制系统. 由于可调磁通电机在复杂工况下运行时, 其永磁磁链随着电机运行状态的变化而变化, 且电机控制策略需要结合准确的电机模型, 因此需要研究电机关键参数的在线辨识方法, 尤其是磁链观测技术.

R. D. Lorenz 等^[31]提出了一种基于干扰电压状态滤波器的状态观测器对电机定子磁链进行观测, 该磁链观测器可以将电机电感和永磁磁链变化产生的定子磁链观测误差解耦, 使电机定子磁链的观测过程对电机铁心饱和引起的电感变化和温升导致的永磁磁链变化等电机参数变化不敏感, 具有较高的准确度. 利用所提出的磁链观测器, 结合电机的转矩指令, 给出电流指令, 可以实现电机在负载情况下的在线调磁. 实验结果如图 21 所示, 该方法在电机负载运行情况下可实现在线调磁过程中的平滑转矩控制.

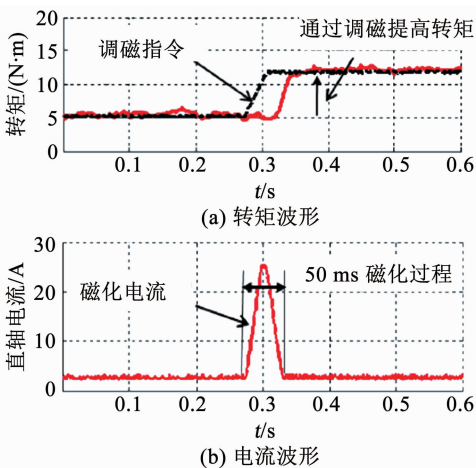


图 21 负载情况下电机在线调磁时的转矩和电流波形^[31]
Fig. 21 Torque and current waveforms of on-line flux-adjustment during on-load operation^[31]

R. D. Lorenz 等^[32]以文献[13]中的电机为研究对象, 提出了一种基于结构化神经网络的磁状态观

测方法, 观测系统的结构框图如图 22 所示. 学者利用基于电机参数之间真实物理关系的基函数和拓扑选择方法搭建了相对紧凑的结构化神经网络, 仿真结果证明所提出的磁链观测系统具有较高的观测精度和响应速度. 但是该方法增加了整个控制系统的复杂度, 实际实施起来较为困难.

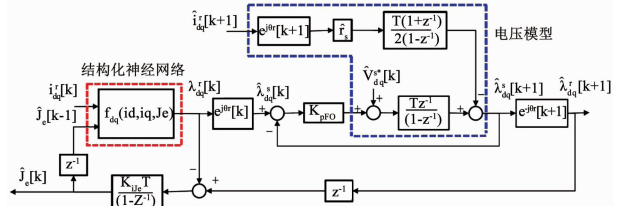


图 22 基于结构化神经网络的磁状态观测系统框图^[32]
Fig. 22 Diagram of flux observer system based on structural neural network^[32]

郑萍等^[33-34]提出了一种用于判断可调磁通电机磁化状态的基于模型参考自适应理论的转子磁链观测器. 所设计的转子磁链观测器以电流作为系统误差变量构建误差方程, 其系统结构框图如图 23 所示, 依此可以得到状态变量误差与转子磁链误差转矩之间的传递函数关系, 从而实现对电机磁链的在线观测. 由于该磁链观测器针对电动汽车应用背景, 电机的电阻和电感等参数在电机高速运行时会发生变化, 因此分析了电机参数扰动对磁链观测器观测精度的影响规律, 分析结果表明电机直轴电感对观测器精度没有影响, 定子电阻对观测器精度影响较小, 而电机交轴电感在高速运行时易受到干扰, 因而对观测器影响较为明显, 因此在电机控制系统中对交轴电感参数进行了补偿, 结果表明所提出的磁链观测器具有较强的抗干扰能力和良好的动态特性, 具有良好的辨识精度.

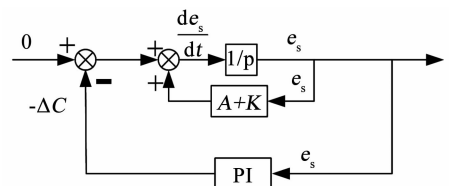


图 23 转子磁链观测器状态变量误差系统^[33-34]
Fig. 23 State variable system of rotor flux observer^[33-34]

2.2 可调磁通电机电流与转矩控制策略

可调磁通电机在负载情况下进行在线调磁一般需要较大的母线电压, 而当母线电压一定时, 随着电机转速的升高, 能够产生的调磁电流幅值将会变小, 电机的调磁能力降低. R. D. Lorenz 等^[35]为解决上述问题, 提出了一种反向旋转电流矢量轨迹的电流控制方法. 该方法通过施加带直流偏置的正余弦充、去磁电流, 使电机电压方程中的部分交直轴电抗压

降相互抵消,从而降低调磁过程所需的母线电压,保证电机在较大的转速范围内具有较强的调磁能力.仿真和实验结果表明,在母线电压一定的情况下,采用该方法可以保证电机在额定转速下依然具有饱和充、去磁的能力,大大降低了端电压对电机调磁能力的限制,但采用该方法调磁时电机的转矩波动较大.

K. Sakai 等^[25]提出了一种提高可调磁通电机负载运行可靠性的电流控制方法.该方法通过在电机负载运行时施加持续的直轴增磁电流,来补偿交轴电流在低矫顽力永磁体上产生的去磁作用,所施加直轴增磁电流的大小与负载电流大小有关.实验结果表明,该方法可有效降低低矫顽力永磁体的退磁风险,保证可调磁通电机负载运行时的转矩输出能力.但该方法会增加损耗,降低电机的运行效率. K. Sakai 等^[25]结合径-轴向磁路可调磁通电机的结构特点提出了一种提高输出转矩的方法.该方法在电机正常运行时,将调磁绕组作为励磁绕组,在调磁绕组中通入正向的直流电流,有效地提高了电机的输出转矩.仿真结果如图 24 所示,当调磁绕组通入 10 倍额定电流时,电机输出转矩提高了 25%.但该方法会导致调磁绕组发热严重,散热条件较差时会损坏电机.

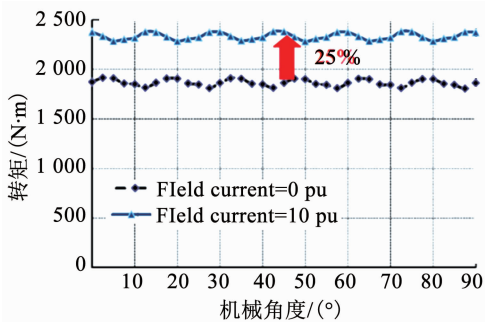


图 24 径轴向磁路混合型可调磁通电机的转矩特性^[25]

Fig. 24 Torque characteristics of VFM with radial-axial magnetic circuit^[25]

曲荣海等^[36]针对文献[11]中的可调磁通电机,提出了一种改进的前馈电流控制策略,用以补偿由于充、去磁操作所导致的电压变化,电机控制系统基于学者所提出的考虑永磁感应电压和电动势变化的改进型永磁同步电机数学模型搭建,仿真和实验结果证明,所提出的控制系统具有响应迅速、精度高等优点.另外,该前馈电流控制系统在不同的工作模式下不需要修改系统 PI 参数,因此降低了 PI 参数调节的难度.

2.3 可调磁通电机调磁与调速控制策略

林鹤云等^[37]提出了一种分级恒转矩的调磁与调速驱动控制策略.其调速系统框图如图 25 所示,

除传统 PI 调节转速环外,还设置了转速判断模块和电流分配模块,由转速判断模块判断是否需要调磁,并由电流分配模块产生所需的调磁电流脉冲和交轴电流.并对电机升速过程中输出转矩、反电动势和交、直轴电流特性进行了仿真测试,结果表明该调速系统保证了电机在低速区的稳态和动态性能,以及在高速区的去磁升速控制.之后,林鹤云等^[38]提出了一种分步调磁控制策略以拓宽电机的调速范围,通过对电机不同磁化状态下电机工作点运行区域进行分析,选取了电机的几种典型磁化状态,在相应的转换速度点通以脉冲电流对电机进行去磁,该方法解决了频繁对永磁充、去磁控制困难以及开关损耗大等问题.

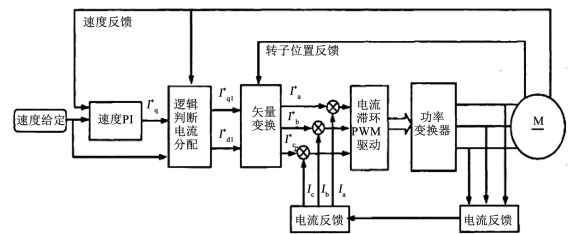


图 25 分级恒转矩调磁调速系统框图^[37]

Fig. 25 Diagram of hierarchical constant-torque speed and flux adjustment system^[37]

加拿大康考迪亚大学 P. Pillay 等^[39]提出了一种磁通增强型可调磁通电机的矢量控制方法,该控制系统由交轴电流限幅模块、直轴电流限幅模块、弱磁模块和调磁触发模块构成,其中交轴和直轴电流限幅模块给出电机当前状态下的最大电流幅值,弱磁模块用于控制电机施加充、去磁电流,调磁触发模块用于判断电机何时进行调磁.研究表明所提出的控制系统能够在电机升速过程中施加去磁电流,使电机磁链下降,实现调磁功能.

江苏大学朱孝勇等^[40]针对双凸极可调磁通电机常见的单相断路故障,提出了电枢磁场重构容错控制策略,仿真和实验结果表明该方法提高了电机的容错运行能力.若电机发生单相断路故障后采用增磁无刷直流电机容错控制,即在非故障相通入幅值不变、相位上偏移一定角度的方波电流,并通过施加持续稳定的直流磁化电流,可使得输出转矩几乎不发生变化.

东南大学林明耀等^[41]提出了一种磁通切换可调磁通电机的分段调磁控制,其系统框图如图 26 所示,学者推导了电机的数学模型,并基于电机磁状态可调的特性,提出了在低速区饱和磁化运行,在高速区采用分段调磁的电机控制策略.仿真与实验结果表明,电机在低速区饱和增磁运行,加速了电机的起

动过程,在相同负载转矩下,减小了定子电流,降低铜耗,进而提高系统效率;高速区采用通过施加调磁脉冲来直接改变电机磁化状态的分段调磁控制策略,根据电机不同的转速对磁链进行分段调节,优化了电机永磁磁链的控制过程。

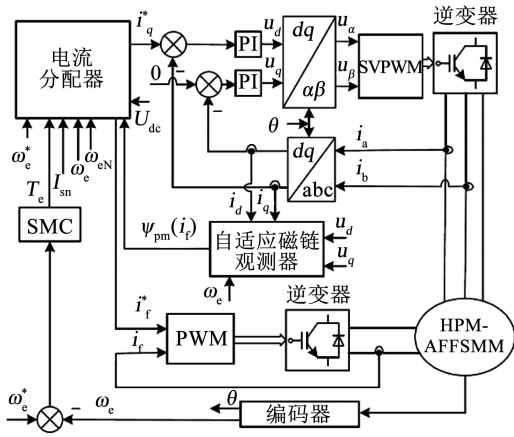


图 26 分段弱磁控制系统框图^[41]

Fig. 26 Diagram of hierarchical flux-weakening control system^[41]

可调磁通电机在复杂工况下运行时,需根据工况频繁改变电机的磁化状态,使电机稳态运行时的损耗最小,但频繁施加调磁电流,会产生较大的调磁损耗,可能会导致电机的总损耗增加. R. D. Lorenz 等^[42]为解决上述问题,结合电动汽车的典型工况提出了一种磁化状态选择控制器,其结构如图 27 所示. 该控制器的输入为各个工况下的理想磁化状态,经过 PI 补偿、比较、采样保持等环节后输出实际的磁化状态,作为电机的调磁指令. 实验结果表明采用该控制策略后,电机在整个运行周期内的总损耗降低,效率提高。

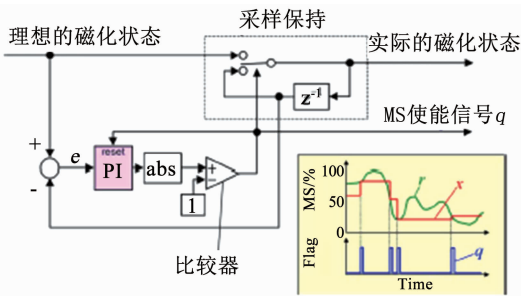


图 27 磁化状态选择控制器^[42]

Fig. 27 Controller of magnetization state selection^[42]

日本东芝公司 S. Maekawa 等^[6]提出了一种适合于分数槽集中绕组可调磁通电机的控制方法,控制系统如图 28 所示. 由于分数槽集中绕组电机电枢磁场的非工作次谐波磁动势含量较大,电机在工作至某个电角度时施加直流电流后的充、去磁效果最好,所以该类电机在调磁时需要在特定的电角度施加调磁电流,而当电机转速较高时,电机工作在特定

电角度的时间很短,需要快速地施加调磁电流. S. Maekawa 等在调磁过程中采用了前馈电压控制的策略,利用电机的数学模型将直轴电流指令转换成直轴电压指令,直接用于控制电机. 实验结果表明该方法能在电机工作于特定电角度时迅速施加充、去磁电流,实现在线调磁,适用于采用分数槽集中绕组的可调磁通电机。

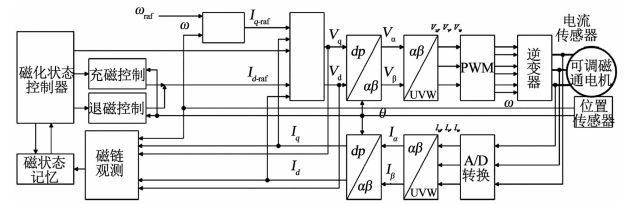


图 28 分数槽集中绕组可调磁通电机的控制系统框图^[6]

Fig. 28 Control system diagram of VFMs with fractional-slot concentrated winding^[6]

2.4 可调磁通电机控制策略总结

相较于传统永磁同步电机,可调磁通电机的永磁磁链可变,具有更多的控制自由度,但这也增加了该类电机的控制难度. 可调磁通永磁同步电机的调磁与驱动控制策略可以分为以下 3 个部分:1) 在每个磁化状态下的电流、转速控制;2) 磁化状态的选择策略;3) 调磁过程中的电流、转矩控制。

可调磁通电机的控制策略值得研究的热点问题包括:1) 电机在复杂工况下运行时,需根据工况频繁改变电机的磁化状态,使电机稳态运行时的损耗最小,而频繁施加调磁电流,会产生较大的调磁损耗,可能会导致电机的总损耗增加,需要结合工况研究合理的磁化状态选择策略;2) 在调磁过程中,需要研究如何保证电机在一定的母线电压限制下仍具有较强的调磁能力和较宽的调磁范围;3) 需要研究具有高动态响应的电流控制策略以完成充、去磁操作,同时由于调磁过程中电流突变,且永磁磁链发生变化,会使电机在调磁过程中产生较大的转矩波动,需要研究相应的转矩控制策略。

3 结论与展望

1) 可调磁通电机因其能够调节气隙磁密的特性,而具有更宽的调速范围和更高的运行效率,适用于电动汽车和数控机床等宽调速范围的应用领域. 根据调磁方式的不同,可调磁通电机发展出了交流调磁型、直流调磁型和机械调磁型等多种拓扑结构。

2) 以探索新型结构、提高调磁能力和提升转矩输出能力等为目标,在新型可调磁通电机研发方面取得以下进展:通过调整永磁体的位置和组合形式、在主磁路中添加磁障以及改进调磁绕组设置方式等

手段提出了多种可调磁通电机拓扑结构,总结了电机关键参数对电机性能的影响规律,并给出了不同可调磁通电机的设计准则。

3)针对可调磁通电机调磁控制时存在的问题,在可调磁通电机控制策略方面取得以下进展:提出了针对电机磁链等关键参数的在线辨识策略;提出了提高调速范围,降低转矩波动的新型电流及转矩控制策略;提出了能够降低调磁损耗、提高电机运行效率并提升系统稳定性的调磁及调速控制策略。

4)随着更多新型拓扑结构的提出,以及电机优化设计方法、加工工艺、控制理论和电力电子器件的不断发展,可调磁通电机在电机设计和控制上存在的问题将逐步被解决,可调磁通电机也有望在更多的领域得到应用与推广。

参考文献

- [1] TIWARI A, JAGA O P. Component selection for an electric vehicle: a review [C]//International Conference on Computation of Power. Melmaruvathur: IEEE, 2018
- [2] 张虎. 我国新能源汽车产业政策研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019
ZHANG Hu. Research on China's new energy automobile industry policy [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019
- [3] 程益川. 浅谈电动汽车核心技术及其发展趋势 [J]. 汽车维修, 2018(6): 4
CHENG Yichuan. On the core technology and development trend of electric vehicle [J]. Vehicle Maintenance, 2018(6): 4
- [4] OSTOVIC V. Memory motors [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2003, 9(1): 52
- [5] LIMSUWAN N, KATO T, KAN A, et al. Design and evaluation of a variable-flux flux-intensifying interior permanent-magnet machine [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1015
- [6] MAEKAWA S, YUKI K, MATSUSHITA M, et al. Study of the magnetization method suitable for fractional-slot concentrated-winding variable magnetomotive-force memory motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4877
- [7] HUA H, ZHU Z Q, PRIDE A, et al. A novel variable flux memory machine with series hybrid magnets [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 4396
- [8] SAKAI K, YUKI K, HASHIBA Y, et al. Principle of the variable-magnetic-force memory motor [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Tokyo: IEEE, 2010: 1
- [9] CHEN Y, YING W, SHEN Y, et al. Magnetic circuit design and finite element analysis of wide-speed controllable-flux PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 157
- [10] CHEN Y, ZHONG W, SHEN Y. Finite element analysis of interior composite-rotor controllable flux permanent magnet synchronous machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 1
- [11] SUN A, LI J, QU R, et al. Magnetization and performance analysis of a variable-flux flux-intensifying interior permanent magnet machine [C]//Electric Machines & Drives Conference. Coeur d'Alene: IEEE, 2016: 369
- [12] ZHOU Y, CHEN Y, SHEN J X. Analysis and improvement of a hybrid permanent-magnet memory motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(3): 915
- [13] ATHAVALA A, SASAKI K, GAGAS B S, et al. Variable flux permanent magnet synchronous machine (VF-PMSM) design to meet electric vehicle traction requirements with reduced losses [C]//Energy Conversion Congress and Exposition. Milwaukee: IEEE, 2017: 1
- [14] YANG H, LYU S, LIN H, et al. A novel hybrid-magnetic-circuit variable flux memory machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(7): 5258
- [15] YANG H, ZHENG H, LIN H, et al. A novel variable flux dual-layer hybrid magnet memory machine with bypass airspace barriers [C]//2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). San Diego: IEEE, 2019: 2259
- [16] ZHANG S, ZHENG P, JAHNS T M, et al. A novel variable-flux permanent-magnet synchronous machine with quasi-series magnet configuration and passive flux barrier [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1
- [17] WANG M, TONG C, ZHENG P, et al. Analysis of a novel hybrid-PM variable-flux machine using new magnet material CeFeB [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7): 1
- [18] WANG M, TONG C, QIAO G, et al. Research on electromagnetic performance of a novel hybrid-PM variable-flux machine [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Harbin: IEEE, 2019
- [19] LIU F, CHENG L, WANG M, et al. Comparative study of hybrid-PM variable-flux machines with different series PM configurations [J]. AIP Advances, 2019, 9(12): 125241
- [20] LI W, CHAU K T, GONG Y, et al. A new flux-mnemonic dual-magnet brushless machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 4223
- [21] LI W, LEE C H T, LIU C. A dual-memory permanent magnet brushless machine for automotive integrated starter-generator application [C]//IECON 2012—38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal: IEEE, 2012: 4076
- [22] WU D, ZHU Z Q, LIU X. Novel external rotor switched flux memory motor with hybrid magnets [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Hangzhou: IEEE, 2015: 3324
- [23] ZHU X, CHEN Y, XIANG Z, et al. Electromagnetic performance analysis of a new stator-partitioned flux memory machine capable of online flux control [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1
- [24] YANG H, LIN H, ZHU Z Q, et al. A dual-consequent-pole vernier memory machine [J]. Energies, 2016, 9(3): 134
- [25] SAKAI K, HASHIMOTO H, KURAMOCHI S. Principle of hybrid variable-magnetic-force motors [C]//Electric Machines & Drives Conference. Niagara Falls: IEEE, 2011: 53
- [26] AYDIN M, HUANG S, LIPO T A. A new axial flux surface mounted permanent magnet machine capable of field control [C]//Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh: IEEE, 2002, 2: 1250
- [27] AKEMAKOU A D, PHOUNSOMBAT S K. Electrical machine with

- double excitation, especially a motor vehicle alternator; US6147429 [P]. 2000-11-14
- [28] LUO X, LIPO T A. A synchronous permanent magnet hybrid AC machine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(2): 203
- [29] KOU B, LI C, CHENG S. A new flux weakening method of permanent magnet synchronous machine [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing: IEEE, 2005, 1: 500
- [30] ZHOU G, MIYAZAKI T, KAWAMATA S, et al. Development of variable magnetic flux motor suitable for electric vehicle [C]//The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA. Sapporo: IEEE, 2010: 2171
- [31] YU C, FUKUSHIGE T, LIMSUWAN N, et al. Variable-flux machine torque estimation and pulsating torque mitigation during magnetization state manipulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3414
- [32] ATHAVALA A, SASAKI K, KATO T, et al. Magnetization state estimation in variable-flux PMSMs [C]//International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Miami: IEEE, 2017: 1
- [33] 陈敬东. 组合磁极式记忆电机磁化模型及转子磁链观测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
CHEN Jingdong. Research on magnetization model and rotor flux observation of combined-magnetic-pole memory motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017
- [34] WANG M, TONG C, ZHENG P, et al. An adaptive rotor flux observer for variable flux machine [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Jeju: IEEE, 2018: 1352
- [35] GAGAS B, FUKUSHIGE T, KATO T, et al. Operating within dynamic voltage limits during magnetization state increases in variable flux PM synchronous machines [C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh: IEEE, 2014: 5206
- [36] CHEN J, LI J, QU R. Analysis, modeling, and current trajectory control of magnetization state manipulation in variable-flux permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5133
- [37] 刘恒川. 可变磁通永磁记忆电机的理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2010
LIU Hengchuan. Theoretical research on variable flux permanent magnet motor[D]. Nanjing: Southeast University, 2010
- [38] 阳辉. 新型磁通切换型可变磁通记忆电机研究[D]. 南京: 东南大学, 2017
YANG Hui. Research on novel variable flux switched flux memory machines[D]. Nanjing: Southeast University, 2017
- [39] MASISI L, PILLAY P. Control strategy for a variable winding synchronous reluctance machine for traction applications [C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Montreal: IEEE, 2015: 1
- [40] 朱孝勇, 朱峰, 张超, 等. 磁通记忆式双凸极非稀土永磁电机单相断路下容错控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4712
ZHU Xiaoyong, ZHU Feng, ZHANG Chao, et al. Open-circuit fault analysis and fault-tolerant control of non-rare-earth flux mnemonic doubly salient permanent magnet motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4712
- [41] 杨公德, 林明耀, 李念, 等. 混合永磁轴向磁场磁通切换记忆电机分段弱磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6557
YANG Gongde, LIN Mingyao, LI Nian, et al. Flux-weakening stage control of hybrid permanent magnet axial field flux-switching memory machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6557
- [42] FUKUSHIGE T, LIMSUWAN N, KATO T, et al. Efficiency contours and loss minimization over a driving cycle of a variable flux-intensifying machine [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 2984

(编辑 魏希柱)