

新能源汽车驱动电机技术现状及混合励磁研究进展

顾浩浩¹, 吴杞康¹, 鲍久圣^{1*}, 闫晴晴², 王松², 委福祥³, 张磊¹

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏淮海新能源股份有限公司, 江苏 徐州 221100;

3. 中国矿业大学 材料与物理学院, 江苏 徐州 221116)

Current Status of New Energy Vehicle Drive Motor Technology and Research Progress on Hybrid Excitation

XIE Haohao¹, WU Qikang¹, BAO Jiusheng^{1*}, YAN Qingqing², WANG Song²,
WEI Fuxiang³, ZHANG Lei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Huaihai New Energy Co., Ltd., Xuzhou 221100, China;

3. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: [Objective] With the increasing depletion of non-renewable resources and the worsening environmental pollution, new energy vehicles have become an important development direction in the automotive industry. Drive motors are the key components that determine the performance of new energy vehicles. [Methods] This paper provides an overview of the current status of drive motor technology for new energy vehicles, introduces the new hybrid excitation technology and its application in drive motors for new energy vehicles, and offers a prospect for the future development of this technology. [Results] First, four existing types of drive motors for new energy vehicles-DC motor, AC asynchronous motor, switched reluctance motor and permanent magnet synchronous motor-were introduced. Based on an analysis of the advantages and disadvantages of the existing drive motors, the hybrid excitation motor, which offers higher performance and compatibility with new energy vehicles, was introduced. Second, the driving principle of the hybrid excitation motor was explained. This motor features both permanent magnet excitation and electromagnetic excitation as two magnetic flux

sources, which jointly control and regulate the motor's air-gap magnetic field. It has advantages such as diverse structural forms, high power density, and a wide speed range, making it highly valuable in fields like wide-range magnetic field regulation for drive motors of new energy vehicles. Third, from the perspective of permanent magnet placement, the two different structures of hybrid excitation motors-rotor permanent magnet type and stator permanent magnet type were discussed in detail. Based on this, the control strategies for hybrid excitation technology were summarized, and its application in new energy vehicles was briefly described. Finally, the future development trends of drive motors for new energy vehicles were analyzed and prospected. [Conclusion] Based on the analysis of the advantages and disadvantages of the four commonly used motors for new energy vehicles and the current status of hybrid excitation technology, it is concluded that hybrid excitation technology has strong application prospects in the field of drive motors for new energy vehicles.

Key words: new energy vehicle; drive motor; excitation technology; hybrid excitation; control strategy

基金项目: 徐州市重点研发计划资助项目(KC21082); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

Xuzhou Key R&D Program Funded Project (KC21082); Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

摘 要: [目的] 随着不可再生资源的日益枯竭以及环境污染问题的不断加剧, 新能源汽车成为当下汽车行业的重要发展方向, 而驱动电机是决定新能源汽车性能好坏

的关键部件。【方法】本文概述了新能源汽车驱动电机技术现状,介绍了新型混合励磁技术及其在新能源汽车驱动电机上的应用,并对新能源汽车驱动电机技术发展进行了展望。【结果】首先,介绍了直流电机、交流异步电机、开关磁阻电机以及永磁同步电机四种现有的新能源汽车驱动电机,在对现有驱动电机优缺点分析的基础上引出了性能更高、更加适配新能源汽车的混合励磁电机;其次,对混合励磁电机驱动技术原理进行了介绍,混合励磁电机内同时存在永磁励磁和电励磁两种磁势源,二者共同控制和调节电机的气隙磁场,具有结构形式多样、功率密度高和转速范围宽的优势,在新能源汽车驱动电机等宽范围调磁领域具有重要的应用价值;再次,从永磁体放置位置出发,对转子永磁型和定子永磁型两种不同结构的混合励磁电机进行了详细阐述,在此基础上,归纳出混合励磁技术的控制策略,并对其在新能源汽车上的应用进行了简述;最后,对新能源汽车驱动电机未来的发展趋势进行了分析与展望。【结论】综合对四种新能源汽车常用电机优缺点的分析以及混合励磁技术的现状,表明混合励磁技术在新能源汽车驱动电机领域有很强的应用前景。

关键词: 新能源汽车; 驱动电机; 励磁技术; 混合励磁; 控制策略

0 引言

汽车已成为当今世界最重要的交通运输工具,其对社会的重要性不言而喻,但传统汽车对化石燃料依赖较大,带来的废气污染的问题也十分突出,对地球生态环境造成了严重破坏,导致全球变暖现象日益加剧^[1-2]。除此之外,石油等化石燃料属于不可再生能源,在国家大力推动“碳达峰、碳中和”的背景下,使用清洁能源作为动力来源的新能源汽车逐渐受到了人们的青睐^[3-5]。

新能源汽车可分为纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车等^[6]。驱动电机作为新能源汽车驱动系统的关键部件,其性能的优劣对整车的驾驶性能有着至关重要的影响。由于工作环境复杂多样,需要频繁地进行启动、加速和停止等操作,新能源汽车对驱动电机有一系列特定要求,要求其具有瞬时功率大、功率密度高、调速范围宽、噪音低和轻量化等特点,同时在连续工作时需要保持较高效率以提高续航里程。近年来新能源汽车井喷式的发展,也为汽车驱动电机行业的发展提供了良好机遇^[7-8]。

1 新能源汽车驱动电机技术发展现状

新能源汽车经过几十年的不断发展,其驱动电机也在不断地更新换代。早期以直流电机驱动技术为主,随着电机技术的发展,目前国内外主流新能源汽车主要采用交流异步电机、开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)以及永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)三种驱动技术^[9]。

1.1 直流电机驱动技术

直流电机和交流异步电机都属于电励磁电机。电励磁电机的优势在于可通过改变励磁电流的大小调节电机气隙磁场,同时也具有灭磁功能,可在电机短路或故障时断开励磁电流,安全性能高;其缺点在于励磁绕组线圈电阻损耗较高,连续工作时热损耗较大,影响电机的工作效率,难以实现高功率密度^[10]。

直流电机驱动技术发展较早,技术较为成熟。直流电机具有结构简单、制造成本低、控制和驱动电路设计容易以及调速性能优等优势。直流电机在起步加速时能产生较大扭矩,符合新能源汽车高速低转矩及低速高转矩的工作要求,曾被用作新能源汽车的主流驱动电机。2007 年雪佛兰推出的 VOLT 系列,是全球最早量产的增程式插电式混合动力汽车之一,其驱动系统包括一台直流电机和一台发动机,在电量充足时通过直流电机驱动,而在电池电量耗尽时切换为内燃发动机驱动。宝马旗下的电动汽车 E30 采用了直流串励电机,日本企业 TAKEOKA 生产的 Reva 电动汽车则是采用直流并励电机^[11]。直流电机通常体积较大,且存在电刷和换向器,不但限制了电机转速和扭矩的提升,而且在高速运转时会产生电火花从而造成电磁干扰,降低了电机工作时的可靠性,并且其维护量大、成本较高。因此,直流电机在新能源汽车领域逐步被交流电机所取代。

1.2 交流异步电机驱动技术

交流异步电机也被称为交流感应电机,其功率因数高、转动惯量小且运行整体效率高,常用于大功率或对调速性能要求较高的场合。此外,交流异步电机还具有过载能力强、调速范围宽、环境适应性强、结构简单和使用寿命长的优点,使其在新能源汽车领域得到应用^[12]。欧美各国由于稀

土资源较为匮乏,生产的新能源汽车大多搭配交流异步电机,如特斯拉公司生产的 Model S P85D 后置电机采用三相四极大功率交流异步电机,最大功率可达 493 kW,百公里加速仅需 3.4 s,但在高速运转时扭矩会有所降低,需通过额外的辅助电机进行功率补偿。在国内,吉利全球鹰与众泰云 100 系列车型的驱动电机均采用了三相交流异步电机^[13]。然而,交流异步电机用于新能源汽车驱动系统时需连接减速装置,不仅传动链长,还存在耗电量大、转子部分散热性差以及控制系统复杂等缺点,现如今主要应用在对性能和速度要求不高的电动客车、商用车等车型中。

1.3 SRM 驱动技术

SRM 是近些年来新起的一款电机,主要由开关电路和磁阻电机组成。基于磁阻最小原理,SRM 的转子结构较为简单且可靠性高,在较宽转速范围内仍能保持较高的运行效率,直流调速系统的可控性也很好^[14]。但 SRM 固有的双凸极结构使其在高速运转时产生的转矩脉动和噪声较大,非线性系统特性也导致其控制策略较为复杂,这些无法克服的自身劣势使得 SRM 在新能源汽车中的应用还处于研究阶段。

国外学者对 SRM 的研究可追溯到上世纪七十年代,2000 年,澳大利亚霍顿汽车公司在墨尔本汽车展上首次展出了 ECOmmodore 汽车,该车的驱动系统由一台 50 kW 的 SRM 和一台四缸铝合金汽油发动机组成^[15]。在工程车辆领域,美国勒图尔勒公司旗下的 L-1350 电传动装载机采用 SRM 驱动,大大提升了车辆的动力性能^[16]。我国对 SRM 的研究较晚,得益于国外的研究基础以及国家政策的支持,近年来 SRM 在履带传送、纺织机械等领域迅速发展。华中科技大学在“九五”期间研制出了 SRM 驱动的纯电动轿车,“十五”期间又与北京中纺公司联合推出了以 SRM 为核心的东风混动客车,实际运行效果不俗^[17]。作为电动汽车的领军人,特斯拉已经开展了 SRM 的相关研究,并准备将其应用于实际,以进一步提高效率、降低成本以及扩展续航^[18]。

1.4 PMSM 驱动技术

PMSM 是目前新能源汽车驱动电机领域的一款主流产品。PMSM 不需要励磁绕组,而是通过高磁能密度的永磁体提供磁场,电机结构更加简

单,产生的扭矩也显著增强,加以合理的控制技术,可使 PMSM 很好地满足低转速、大转矩负载的运行工况^[19]。同时定子电流与电阻损耗也大大降低,长时间工作过程中产生的温升也较小,在显著提高电机功率因数的同时也节约了大量电能,这不仅延长了电机的使用寿命,还使 PMSM 在 20% ~ 125% 额定负载范围内均可保持较高的效率和功率因数,这一优势十分适合长时间工作的设备^[20]。目前 PMSM 正朝着大功率、大转矩、高精度、高智能、高耐热性轻型化以及机电一体化方向发展。

PMSM 突出的优势使其在新能源汽车领域得到了广泛应用,日本在 PMSM 驱动领域中处于全球领先地位。丰田是全球最早开始研究新能源汽车的企业之一,旗下的 Prius 系列先后已有三代产品问世。1997 年问世的第一代 Prius,其 PMSM 转子结构呈“一”字型;2004 年推出的第二代 Prius,其 PMSM 转子结构改为内置“V”字型,并在绕组中增加了一条串联支路;为提高转子凸极率、降低转子损耗,2010 年推出的第三代 Prius,其 PMSM 转子采用双层“U”型结构,大大提高了弱磁调速的效率^[21-22]。2007 年生产的 Camry 系列峰值功率可达 105 kW^[23],2008 年问世的 Lexus Ls600h 最大功率更是达到了 165 kW。由此可见,PMSM 大功率、大转矩的优势使其在新能源汽车驱动电机领域备受青睐。Prius 系列和 Camry 系列的 PMSM 转子结构如图 1 所示。

与日本相比,欧美国家对 PMSM 的研究起步较晚,这主要是由于欧美国家稀土产量较低,其对新能源汽车驱动电机的选择主要集中在交流异步电机上,进入二十一世纪后,他们改变了发展方向,也有几款成功的产品问世。奥迪 Q5 e-tron 典藏版驱动电机采用前交流异步电机后 PMSM 的配置形式,可提供单电机后驱、双电机四驱两种动力配置,综合最高功率可达 225 kW。近年热度较高的特斯拉 Model 3 的驱动系统将驱动电机、电机控制器与单档变速箱三合一,集成度高,其后轮搭载 PMSM,最大功率可达 220 kW。宝马 i3 系列充分发挥了内置式 PMSM 的优势,电机总重为 42 kg,最大功率可达 125 kW,其转子通过特殊的磁钢布局和槽形结构减少了工作时产生的磁链,显著提升了电感凸极率。



图 1 PMSM 转子结构图

Fig. 1 Rotor structure of PMSM

基于我国对新能源汽车的政策支持以及我国稀土资源得天独厚的优势,国内现有新能源汽车大都搭配 PMSM^[24]。早期的产品有一汽奔腾 B70、奇瑞 A3 和长安杰勋等,但其电机最大功率都不超过 20 kW。近年来,随着电机技术的革新,车用 PMSM 的功率有了较大提升,例如:比亚迪推出的 2025 款海豹 07 插电式混合动力汽车,其驱动电机采用单电机前置式 PMSM,电机总功率可达 200 kW;华为和塞力斯汽车联合推出的 2024 款问界 M9 纯电 Ultra 版,其驱动电机采用前交流异步电机、后 PMSM 的配置,电机总功率可达 390 kW,大大提升了新能源汽车的性能。

但是,搭载 PMSM 的新能源汽车也存在自身固有的设计缺陷。PMSM 在制成后其气隙磁场基本保持不变,且目前没有较好的办法来调节磁场,使得新能源汽车弱磁增速运行时控制复杂,恒功率运行范围受到限制;同时汽车过载运行时,PMSM 需通过增加电枢电流来提高输出转矩,在降低电机寿命的同时会产生高温,永磁体在高温状态下会出现不可逆退磁的现象,极大地影响了新能源汽车长时间高速行驶时的可靠性。除此之外,制造永磁体的稀土资源属于不可再生资源,稀土价格昂贵且全球含量极少,目前并没有研发出其他可代替稀土的高性能永磁材料,导致 PMSM 的制造成本较高。

2 混合励磁技术及其在新能源汽车上的应用

直流电机、交流异步电机、SRM 以及 PMSM 均具有作为新能源汽车驱动电机的条件,在历史的进程中也都有很多实际的应用,但他们在部分工况下的缺点和应用壁垒也十分突出。随着人们对汽车动力性、安全性和舒适度的要求不断提高,性能更高、更加适配新能源汽车的混合励磁电机 (Hybrid Excitation Machine, HEM) 逐渐成为了新的发展方向。

HEM 在保证永磁电机高功率密度的同时,通过合理改变永磁电机的结构引入电励磁,使得 HEM 内同时存在永磁励磁和电励磁两种磁势源,电机励磁源主要由前者提供,后者主要用来调节主磁路磁通,二者共同控制和调节电机的气隙磁场,实现了对单一励磁方式的衍生。与 PMSM 相比,HEM 具有良好的气隙磁场调节能力;与电励磁同步电机相比,由于利用了永磁体,HEM 能够提供更高的转矩密度与功率密度。HEM 综合了电励磁电机气隙磁场可调和 PMSM 功率密度大的优点,在新能源汽车驱动等输出功率大、调速范围宽的领域有着良好的应用前景^[25]。

2.1 HEM 结构类型

HEM 结构灵活多样,分类方法如图 2 所示^[26]。其中混合励磁同步电机的结构与 PMSM 的结构类似,混合励磁双凸极电机的结构与磁阻式双凸极电机的结构类似。

串联磁势式 HEM 的电励磁磁势和永磁磁势在磁路上相互串联,永磁体一般位于转子上。根据励磁绕组位置的不同,其结构可分为两种:第一种励磁绕组位于转子上,且通常位于永磁体下方,空间利用率高,需电刷和滑环辅助励磁绕组工作,电机能达到的最大转速更高,但在这种结构中励磁绕组的磁路与永磁体主磁通磁路重合,且都会穿过永磁体,致使电励磁回路的磁阻增大,在增大损耗的同时也可能会导致永磁体发生退磁;第二种励磁绕组位于定子上,这种结构取消了电刷和滑环,可靠性高且结构简单。

并联磁势式 HEM 的电励磁磁势和永磁磁势在磁路上相互并联。在这种结构中存在径向和轴向两种磁路,电励磁磁路与永磁磁路相互独立,只

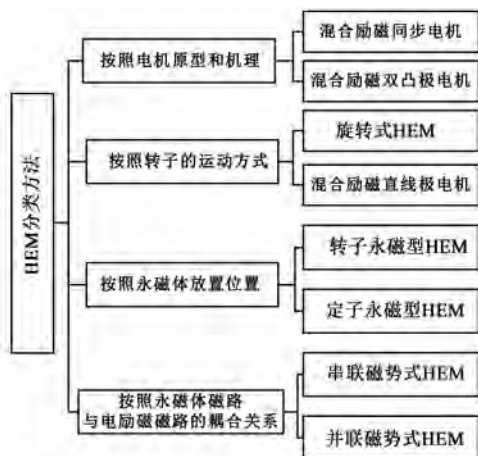


图2 HEM分类方法

Fig. 2 HEM classification method

在气隙中相互作用。相较于串联磁势,并联磁势弱磁能力更强、结构形式更灵活,同时励磁绕组的磁路不会穿过永磁体,对永磁体磁化强度的影响较小,一定程度上预防了永磁体的退磁现象^[27]。

为了更好地归纳总结,进一步根据永磁体放置位置的不同,对转子永磁型和定子永磁型两种典型结构的HEM进行介绍。

2.1.1 转子永磁型HEM

PMSM、同步磁阻电机、无刷直流电机以及爪极式电机都是较为典型的转子永磁型电机,这类电机是目前商用电动汽车中应用最广泛的永磁驱动电机,但都因自身结构特点限制了其在某些领域的应用。转子永磁型HEM将电励磁绕组附加到原有PMSM转子上,是一种具有高功率密度、高转矩密度的新型HEM。转子永磁型HEM主要有串联型与并联型两种结构,二者主要区别是串联型励磁绕组产生的磁力线会经过永磁体,而并联型则不会,因此并联型退磁风险更小、调磁能力更好。但不论哪种结构的转子永磁型HEM,其励磁绕组均位于转子上,设计时不得使用电刷、滑环等装置,导致电机的效率和可靠性降低。因此如何实现无刷化,是当前急需解决的问题^[28]。

国内外学者对如何实现转子永磁型HEM的无刷化进行了大量研究。文献[29]将一种谐波感应技术应用到HEM中,将含有一定谐波成分的电流通入定子电枢绕组中,与转子上的谐波绕组感应出谐波电动势,整流后供给励磁绕组,从而实现无刷化。文献[30]利用电机本身存在的齿谐波磁场,提出了一种基于齿谐波磁场的HEM,电

机截面如图3(a)所示。文献[31]在多相和容错齿结构的基础上,提出了通过永磁体和谐波励磁绕组共同进行直流励磁的方法,实现了转子永磁型HEM的无刷化以及容错运行,电机结构如图3(b)所示。文献[32]对转子永磁型HEM进行转子磁路分流设计,电机结构如图4所示,利用旁路轴向磁路,使得位于静止磁桥上的励磁绕组可以改变电机的轴向磁通,在实现无刷化的同时达到了磁场调节的目的。

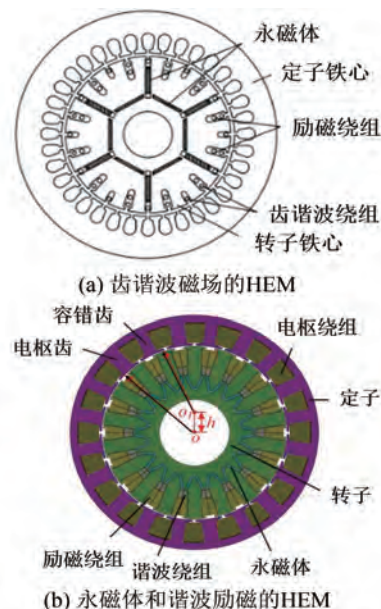


图3 两种基于谐波励磁的转子永磁型HEM

Fig. 3 Two types of rotor permanent magnet HEM based on harmonic excitation

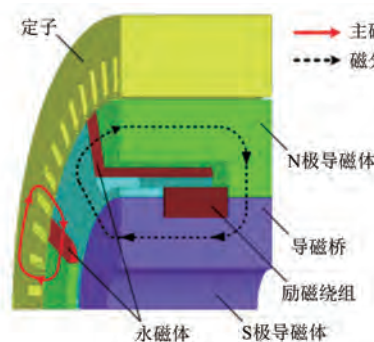


图4 转子永磁型HEM新型结构拓扑示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the new structure topology of the rotor permanent magnet HEM

文献[33]提出了一种轴向导磁型转子永磁无刷HEM,其结构如图5所示,利用软磁复合材料(Soft Magnetic Composite, SMC),将由SMC制成的励磁绕组安装于电机端部,通过导磁桥形成

轴向磁路以调节主气隙磁通,从而实现无刷化。文献[34]提出了一种爪极无刷 HEM,利用转子爪极的磁路引导使得每块爪极的磁性不变,通过直流励磁线圈来控制爪极下的磁通大小,从而实现无刷混合励磁,电机结构如图 6 所示。

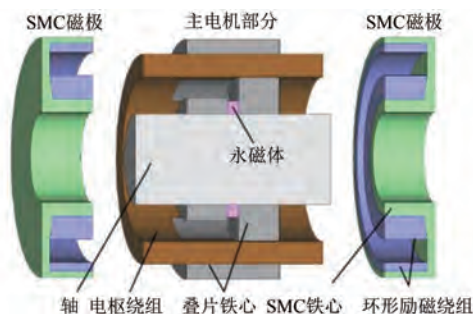


图 5 轴向导磁型转子永磁无刷 HEM

Fig. 5 Axial magnetic guiding rotor permanent magnet brushless HEM

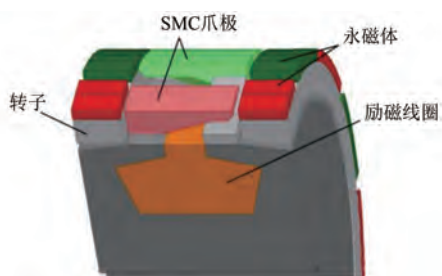


图 6 爪极无刷 HEM

Fig. 6 Claw-pole brushless HEM

综上所述,转子永磁型 HEM 若要实现无刷化,必须通过增加附加装置来实现,而附加装置的引入使该类电机的结构更加复杂,不但影响其可靠性,而且大大限制了输出转矩和功率密度的提升。

电励磁爪极电机具有结构简单、成本低、气隙磁场调节便捷以及技术成熟的优势,但其通常为有刷结构,励磁损耗大、工作效率低;永磁爪极电机通过永磁材料建立磁场,实现了无刷化,但具有永磁体气隙磁场难以调节的壁垒。将混合励磁的思想引入爪极电机可以很好地结合二者的优势,混合励磁爪极电机主要分为串联式和并联式两种。

文献[35]在电励磁爪极同步电机的基础上提出了一种串联式混合励磁爪极电机,其永磁体设计为环形并放置在相邻转子爪极轭之间,采用轴向充磁,励磁绕组套于转子爪极轭上,但该电机结构为串联,调节磁场所需的励磁电流较大,同时该拓扑结构的电机存在滑环和电刷。为了克服串

联式混合励磁爪极电机的不足,文献[36]提出了一种并联式混合励磁无刷爪极电机,其结构如图 7 所示,该电机定子结构与普通三相交流电机结构相同,转子由两个爪极组成,永磁体放置在爪极间隔中,在增加气隙磁通的同时也减少了漏磁通,可实现在不增加励磁电流的情况下提升气隙磁密,同时避免了电刷的使用,增强了电机的可靠性。

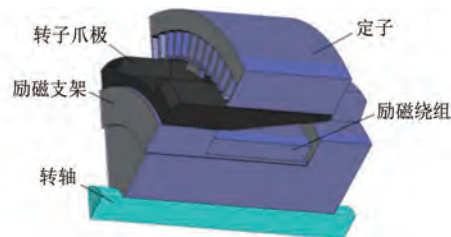


图 7 并联式混合励磁无刷爪极电机

Fig. 7 Parallel hybrid excitation brushless claw-pole motor

文献[37]将爪极形状由传统的等腰梯形改为直角梯形,永磁体的 N、S 极交错放置在爪极的直角边上,并将转子的电励磁绕组直接焊接在电机的端盖上,从而实现无刷化,电机结构如图 8 所示。文献[38]根据混合动力汽车对电机的特殊要求,通过试验与三维有限元仿真设计了一台 2.5 kW 的混合励磁爪极电机,与传统电机转子结构有所不同,该电机转子结构充分利用了电机的端部空间,永磁体采用轴向充磁的方式,大大提升了电机的功率密度和输出转矩。

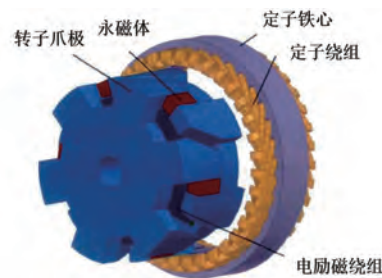


图 8 新型混合励磁爪极电机

Fig. 8 New hybrid excitation claw-pole motor

2.1.2 定子永磁型 HEM

双凸极永磁电机、磁通切换电机以及磁通反向电机等均为典型的定子永磁型电机。该类电机凭借其结构简单、控制方式简便、功率密度高和容错性高等优点,在航空航天、新能源汽车以及水利水电等领域得到了一定应用。然而气隙磁场难以调节也是定子永磁型电机的研究难点之一,因此

将混合励磁思想引入定子永磁型电机具有很大的应用价值。具体方法为:将一套励磁绕组通过特殊的结构设计附加在定子永磁型电机的定子上,从而实现气隙磁场的调节。因为励磁绕组位于定子上,因此可省去电刷和滑环,在实现无刷化的同时还有助于散热。为了使磁力线更好地从定子传递到转子,电机通常设计为双凸极结构即转子与定子齿均为凸极结构。定子永磁型 HEM 的转子上无永磁体和励磁绕组,具有结构简单、转动惯量小和动态响应特性好的优点。

为拓宽定子永磁型 HEM 的应用场合,国内学者对其进行了深入研究。文献[39]基于磁通切换 HEM 的结构,提出了“U”型与“E”型两种新型结构的定子铁心,如图 9 所示,并将其应用到磁通切换 HEM 中,其励磁绕组位于定子槽靠近转子侧,并分别对两种定子结构的控制策略、散热能力和电磁性能进行仿真分析。

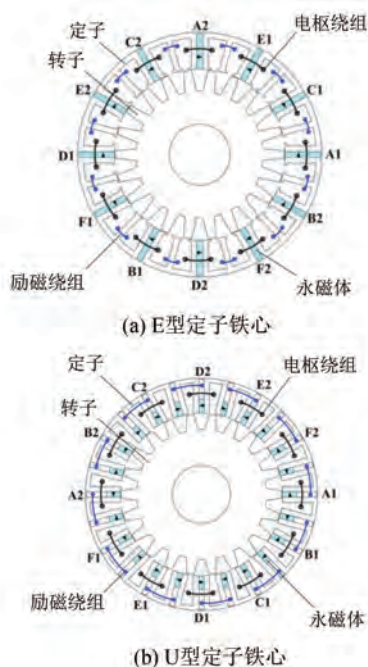


图 9 两种磁通切换 HEM

Fig. 9 Two types of flux-switching HEM

文献[40]对磁通反向 HEM 展开研究,在定子上安装电枢绕组与励磁绕组,确保每块定子齿上永磁体的磁化方向一致,从而提高了磁通反向电机的低速过载能力和高速弱磁能力,电机结构如图 10 所示。同样基于磁通反向原理,文献[41]研发了一种直线型磁通反向定子永磁型

HEM,如图 11 所示,与文献[40]不同,该电机通过模块化设计,使电枢绕组和励磁绕组不在同一个定子齿上,试验结果表明,该结构的电机磁场调节能力更优,同时永磁体插入定子中可缓解永磁体退磁的风险。

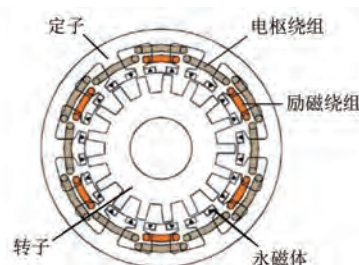


图 10 磁通反向 HEM

Fig. 10 Magnetic flux-reversal HEM

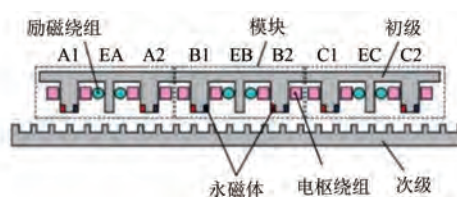


图 11 直线型磁通反向定子永磁型 HEM

Fig. 11 Linear flux-reversal stator permanent magnet HEM

混合励磁双凸极电机是在双凸极永磁电机的定子上附加一套励磁绕组而形成的一类定子励磁型 HEM。1995 年国外学者 Lipo 教授发表了关于混合励磁双凸极电机的论文,但其设计的电机在励磁电流过大时,会导致永磁体产生不可逆的退磁现象。东南大学程明教授^[42]是国内较早对此展开研究的学者,提出了一种磁桥式混合励磁双凸极电机,将装有导磁桥的定子铁心置于永磁体与励磁绕组之间,可以实现用较小的直流励磁获得更大的气隙磁场调节范围,提高了电机效率。文献[43]将永磁磁路与电励磁磁路设计为并联结构,提出了一种 18/12 极混合励磁双凸极电机,并联结构的设计在优化磁场调节方式的同时,减少了永磁体退磁的风险。

对于定子永磁型 HEM 来说,由于励磁绕组与永磁绕组都位于定子中,二者之间耦合较大,十分容易产生磁源空间矛盾,有限的定子空间也无法容纳更多的励磁绕组,无法进一步增加电机输出功率,且存在温度过高等问题。针对此问题,谢菲尔德大学诸自强教授提出了分区定子的设想,将

电机设计为内外双定子的结构, 永磁体与电励磁绕组分别放置在两个定子中, 彼此相互独立, 这种结构在解决定子永磁型 HEM 共性问题的同时, 减小了永磁体退磁风险, 提高了调磁效率。

基于分区定子的思想, 文献[44]提出了一种带有导磁桥的双定子混合励磁磁通切换电机, 其结构如图 12 所示, 外定子为齿槽结构, 励磁绕组分布在相邻齿槽中, 内定子为经导磁桥连接的“工”形定子铁心, 具有内外两层永磁体, 该电机具有高正弦度的反电势波形, 输出转矩平滑。文献[45]将分区定子的思想用于混合励磁双凸极电机, 其结构如图 13 所示, 电励磁绕组位于内、外定子齿上, 永磁体位于内定子上, 永磁磁势与电励磁磁势在空间上并联, 减小了退磁的风险。但该电机存在漏磁问题, 电机功率密度较低。



图 12 双定子混合励磁磁通切换电机

Fig. 12 Dual-stator hybrid excitation flux-switching motor

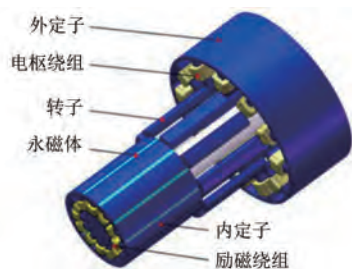


图 13 双定子混合励磁双凸极电机

Fig. 13 Dual-stator hybrid excitation double salient-pole motor

在转子永磁型 HEM 和定子永磁型 HEM 的基础上, 衍生出了一种新型电机结构, 称为并列式 HEM。该电机永磁和电励磁相并列且两部分磁路相互独立, 这种结构设计避免了并联式结构中两磁路存在耦合、相互影响的缺陷; 同时并列式 HEM 永磁部分结构较为灵活, 能实现励磁电流的双向调节^[46]。并列式 HEM 通常结构较为复杂, 但其应用范围广、调磁能力优秀以及输出转矩大

的优势也吸引了国内外众多专家学者对其展开研究。文献[47]研究了一种并列式混合励磁无刷直流电机, 结构如图 14 所示, 该电机基于 PMSM 和电励磁双凸极电机两种电机结构, 励磁绕组放置在定子上, 实现了无刷化, 可以称之为永磁同步/双凸极并列式 HEM。文献[48]将双定子结构应用于并列式 HEM 中, 定子分为内定子和外定子, 永磁体和励磁绕组在空间上交叉分布, 在内定子上, 二者有不同的空间磁路, 通过旋转转子铁心来闭合磁路。也有将两种不同类型的电机并列组成 HEM 的设计, 如文献[49]提出将一种内置式 PMSM 与变磁阻电机并列组合的并列式 HEM。

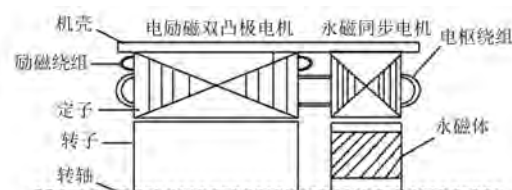


图 14 并列式混合励磁无刷直流电机结构

Fig. 14 Parallel hybrid excitation brushless DC motor structure

2.2 HEM 控制策略

由于永磁磁场难以调节, HEM 的控制主要通过改变电流大小来实现的, 因此其控制策略的重点可概括为: 根据电机负载情况调节电枢绕组和励磁绕组电流的大小、方向, 使电机达到在恒定功率运行下获得更高转速以及在额定转速运行下获得更高转矩的目的。常用的控制方法主要有 $\cos\varphi = 1$ 控制、 $i_d = 0$ 控制、最小铜耗控制、效率最优控制以及分区控制等。 $\cos\varphi = 1$ 控制即单位功率因数控制, 这种控制方法的优势在于可以使无功功率降为 0, 但相同转矩下需要更多的电流, 导致电机效率较低。 $i_d = 0$ 控制即在电机工作过程中, 保持 d 轴电流恒为 0, 这种控制方式较为简单、运算量小, 但没有充分利用磁阻转矩。

2.2.1 弱磁控制

弱磁控制是为了拓宽电机的恒功率调速范围, 设计合理的弱磁控制方法是使 HEM 达到最大效率及拥有宽调速范围的关键。文献[50]提出了一种闭环弱磁控制方法, 转速、磁链和电压三个外环分别对应交轴电流、直轴电流和励磁电流三个内环, 两两之间可以相互反馈, 通过外环来给定内环电流的大小, 同时给出了调节器具体参数的

选取依据。文献[51]针对转子磁分路 HEM,提出了一种无直轴电流的最大转矩电流比控制方法,还提出了一种直轴电流与励磁电流协调控制的策略,该策略大大提高了弱磁区的效率,同时实现了低速大扭矩、恒功率运行的工作状态。

2.2.2 最小铜耗控制

HEM 工作时,电枢绕组和励磁绕组均会产生铜耗,最小铜耗控制的原理是:应用拉格朗日乘数法,在输出转矩一定时,协调控制电枢绕组电流与励磁绕组电流的大小,使其在单位转矩下始终保持铜耗最小,以提高电机效率。

国外学者较早对最小铜耗控制展开研究,文献[52]以隐极 HEM 为研究对象,基于动态矢量模型,提出了一种 $i_d = 0$ 的最小铜耗控制策略,该策略提高了励磁电流的利用率,但并没有发挥直轴电流的弱磁作用,也没有充分利用电机的磁阻转矩。文献[53]以电机铜耗最小化为目标提出了一种弱磁调速控制方法,该方法以矢量控制和速度分区为基础,结合最小铜耗控制算法,通过自适应控制调节弱磁基速系数,对电枢绕组和励磁绕组电流进行合理配置,实现了对电机性能的最优控制,其控制系统如图 15 所示。

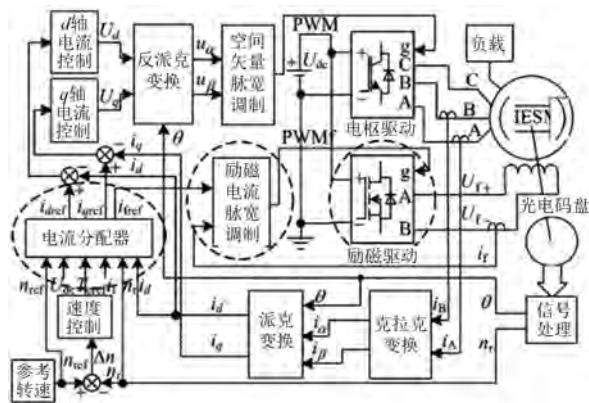


图 15 混合励磁直线电机控制系统框图

Fig. 15 Block diagram of the hybrid excitation linear motor control system

针对新能源汽车驱动系统需具有调速范围宽、运行可靠的特点,文献[54]结合最小铜耗控制与混合超前角弱磁控制,提出了一种宽速域电流高效控制策略,确保其在逆变器工作范围内始终处于铜耗最小控制,并以交替极无刷 HEM 为研究对象,仿真结果表明该控制方法显著提高了电机的弱磁控制能力与鲁棒性,控制

系统如图 16 所示。

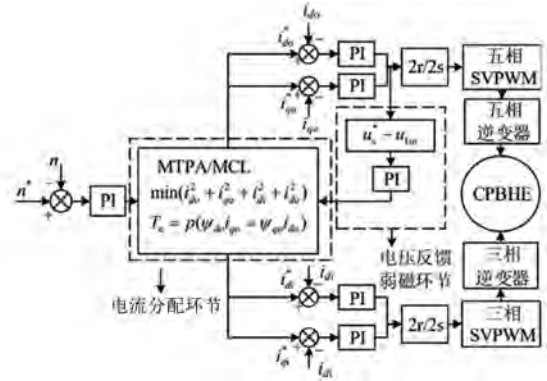


图 16 交替极无刷 HEM 控制系统框图

Fig. 16 Block diagram of the alternating-pole brushless HEM control system

对于气隙磁场谐波含量较高的电机来说,铜耗最小控制策略在利用拉格朗日乘数法求解的过程中,需引入罚函数,不仅使求解过程复杂化,而且容易使得到的电流值超过极限,导致无法在给定区间内求取最优解。针对此问题,文献[55]以定子分区 HEM 为研究对象,结合速度分区原理,提出了一种铁耗最小控制策略,其核心是在不同速度分区下建立铁耗最小控制的目标函数与约束条件,通过序列二次规划 (Sequential Quadratic Programming, SQP) 算法进行求解,解决了拉格朗日乘数法求解复杂的问题,通过试验和仿真验证了该策略可以有效降低电机损耗, SQP 算法流程如图 17 所示。

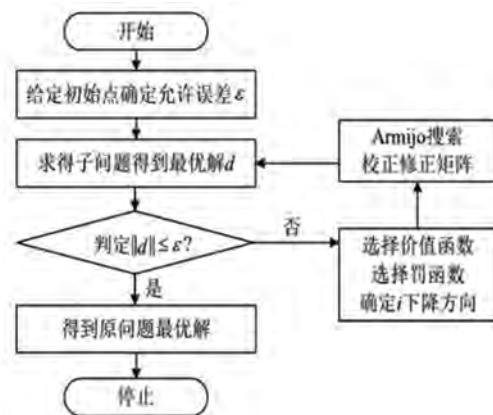


图 17 SQP 算法流程图

Fig. 17 Flowchart of the SQP algorithm

2.2.3 效率最优控制

效率最优控制的原理是协同控制电机的励磁电流和电枢电流,使电机在不同的工作条件和负

载下运行在最高效率点,从而最大程度地减少能源损耗。文献[56]综合考虑 HEM 运行中产生的铜耗和铁耗,提出了一种铜耗和铁耗最小的效率最优控制方法,该方法虽然有效提高了电机效率,但其控制精度较差。文献[57]以混合励磁双凸极电机为研究对象,提出了一种电枢电流和励磁电流协同控制的方法,仿真结果表明在电枢绕组与励磁绕组产生的铜耗相等时,电机将处于效率最优状态。文献[58]基于模糊控制(Fuzzy Control, FC)原理,提出了一种 HEM 效率最优控制策略,该策略以转矩偏差和速度偏差为目标函数,得到了效率最优条件下电枢电流与励磁电流的分配量,从而使电机运行在效率最高点。

2.2.4 分区控制

HEM 分区控制原理指在不同的运行区域内采用不同的控制策略,使电机在整个运行范围内均能保持较优的性能和较高的效率。通常将 HEM 区域分为低速区、中速区及高速区,低速区需较大的启动转矩,通常采用最大转矩电流比控制策略;中速区运行平稳,通常采用 $i_d = 0$ 控制策略;高速区对效率要求较高,通常采用使无功功率为 0 的 $\cos\varphi = 1$ 控制策略。

文献[59]为了更好地分配电枢电流和励磁电流,利用分区控制技术,将混合励磁双凸极电机运行状态分为 4 个区域,通过扩大拉格朗日定理,来寻求电流最佳的分配方案,提高电机效率。文献[60]将分区控制技术应用到了非对称交错 HEM 中,通过对电流分配器进行优化,使电机能够更好地在高中低速域内进行切换,同时在低中速区采用无励磁或增磁控制策略,提高了电机的转矩输出能力,但该方法的理论数学模型与实际物理模型存在一定误差,导致控制精度较低。文献[61]将分段弱磁策略与分区控制相结合,针对混合励磁双凸极电机提出了一种控制策略,该策略将高速区的弱磁调速过程划分为两阶段;电机弱磁调速过渡阶段采用 FC 算法对电流进行初步调节,使其快速获得较高的动态性能;第二阶段采用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对电流进行优化从而提高电机效率,两种算法相结合,使电机的动、静态特性均得到提高,FC-PSO 控制系统框图如图 18 所示。

目前 HEM 的控制方法大都为矢量控制,矢量

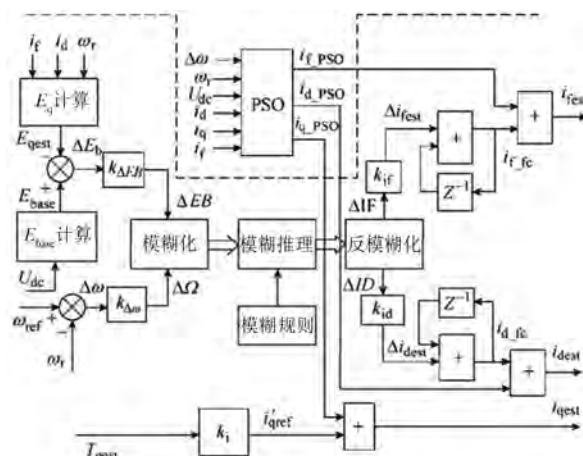


图 18 FC-PSO 控制系统框图

Fig. 18 Block diagram of the FC-PSO control system

控制涉及到传感器的使用,存在成本高和可靠性较差的缺点。近年来,无位置传感器控制策略以其极高的容错能力,受到了一定关注。文献[62]以 12 槽 10 极混合励磁磁通切换电机为研究对象,提出了一种适用于低速域的基于励磁绕组高频信号注入的无位置传感器控制方法,该方法通过励磁绕组与电枢绕组之间的互感来检测转子位置,实现了对转子位置的跟踪检测,在不依赖转子凸极特性的同时保证了检测精度。

2.3 HEM 在新能源汽车上的应用

国外对 HEM 的研究较早,技术也较为成熟,与国外相比,我国混合励磁技术发展起步较晚,同时,我国电机制造技术相对落后,种种原因导致我国 HEM 技术研发水平和力度不高,可实际应用的产品较少。

目前,国内外已有学者将 HEM 应用到新能源汽车中,美国 TIMKEN 公司研发了一种盘式车轮转子磁极分割型 HEM,已在电动汽车领域得到应用。文献[63]设计了一款最高转速 6 000 r/min 的车用 HEM,制造了如图 19 所示的样机,并对其控制策略进行了研究,绘制了不同速度下 HEM 与传统 PMSM 的效率分布图。试验结果表明,HEM 通过利用自身的额外调磁自由度,可提升系统的效率,拓宽高效率区间,更加适配于新能源汽车。

文献[64]提出了一种适用于新能源汽车的双转子 HEM,电机转子由组合磁极永磁转子和无刷电爪转子组成,二者并排共用同一个定子,试验结果表明该电机额定转矩为 15.8 N·m,最大效率可达 90.1%。文献[65]设计了一款基于 HEM 的

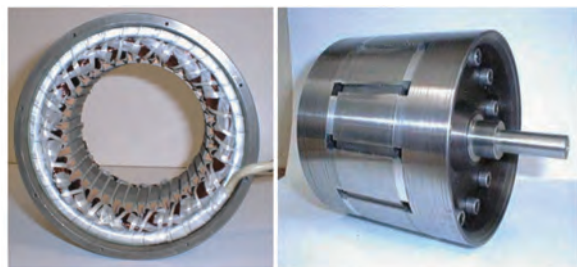
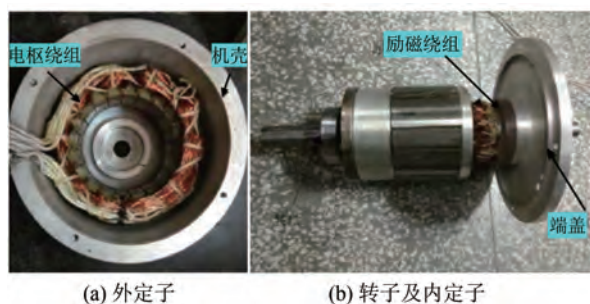


图 19 车用 HEM 样机

Fig. 19 HEM prototype for vehicles

电动汽车驱动系统,并从外加励磁电流的角度为 HEM 划分了 3 个工作区间,提出一种分区控制策略,以一台 15 kW 三相 8 极 HEM 为试验对象,验证了所设计的驱动系统以及控制策略的可行性。文献[66]提出了一种用于新能源汽车的 HEM,将缠绕有励磁绕组的导磁支架安装在电机定子内,在简化定子结构的同时,降低了定子铁心的加工难度,有效提高了电励磁的比例。文献[67]提出了一种新能源汽车用聚磁式组合磁极 HEM,通过不对称 V 形结构来组合不同形状的永磁钢,提高了电机的输出功率,同时设置磁旁路和隔磁槽,减小了电机电枢反应,增强了抗去磁能力。文献[68]提出了一种由永磁转子与无刷电励磁转子组合的汽车用 HEM,其中永磁转子采用六边形隔磁气隙以减少端部漏磁,电励磁转子为低故障率、高功率密度的无刷爪极结构,组合式结构转子的设计使电机聚磁效果显著、励磁损耗较低,具有一定的应用前景。文献[69]提出了一种用于电动汽车的新型双定子双馈 HEM,其转子结构为铁心极与永磁极交替排布,内外双定子分别放置电枢绕组与励磁绕组,并制造了一台如图 20 所示的 2 kW 试验样机来研究其各项性能。



(a) 外定子

(b) 转子及内定子

图 20 新型双定子双馈 HEM 试验样机

Fig. 20 Experimental prototype of new double-stator doubly-fed HEM

3 新能源汽车驱动电机发展展望

随着全球各国对新能源的重视以及人们对汽车安全性、舒适性等性能要求的不断提高,新能源汽车驱动电机的发展存在很多制造工程问题以及科学问题需要突破。

(1) 更高功率密度的结构。使用更高功率密度的驱动电机是新能源汽车发展的必然趋势。与传统圆线电机相比,扁线电机具有高功率密度、高性能和高槽满率等优势,但其生产过程十分复杂且严重依赖高端设备。若能简化扁线电机的生产过程,在工艺上取得突破,那么扁线电机在新能源汽车驱动电机领域将会掀起一股浪潮。2024 年 3 月小米发布了旗下首款新能源汽车小米 SU7,搭配了其自主研发的小米超级电机 V8s,该电机定子采用扁线绕组设计,最高转速可达 27 200 rpm,最高功率可达 425 kW,带来了电机转速史无前例的飞跃。

(2) 效率更高的驱动方式。基于轮毂电机的分布式驱动也是未来驱动系统发展的主流方向。分布式驱动系统取代了集中式驱动的传统底盘部件,搭配的轮毂电机直接将电机安装在车轮内,每个电机直接驱动一个车轮,各电机独立可控,可以实现各车轮扭矩的独立精确控制,同时不存在能量转化,力矩响应更为迅速,乘坐舒适度更高,具有传动链短、传动效率高以及易于实现底盘模块化设计与主动安全控制等特点。但轮毂电机对电控策略要求极高,制动时需机械制动配合,制动能耗高、轮胎散热性能差,同时会使车辆簧下质量增加、稳定性较差,电机防震、防水和防尘难度较大,对电机设计要求较高。目前轮毂电机高成本和高系统复杂度的问题尚未解决,相关技术仍需不断突破。

(3) 电机控制系统高度数字化。随着高性能的数字控制芯片的使用,电机控制系统迎来了一个全数字化的时代,在此基础上,高性能的控制算法及控制理论得以实现。同时用户可通过数字化芯片进行可视化编程,通过代码转化和下载直接进行微处理,大大提高了编程的效率和可调试性。在人工智能技术快速发展的潮流下,若能将机器学习与深度学习等 AI 算法应用于电机数字化控制系统,则能够实现更为智能的自适应控

制,提高控制系统的灵活性与效率。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

颀浩浩进行了文献查询、内容总结与论文撰写,吴杞康进行了文献查询及框架指导,鲍久圣进行了写作指导及文章润色,闫晴晴、王松、委福祥和张磊参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Xie Haohao conducted literature search, content summary and paper writing. Wu Qikang conducted literature search and framework guidance. Bao Jiusheng conducted writing guidance and article polishing. Yan Qingqing, Wang Song, Wei Fuxiang and Zhang Lei participated in the review and revision of the paper. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 王震坡,黎小慧,孙逢春. 产业融合背景下的新能源汽车技术发展趋势[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(1): 1-10.
WANG Z P, LI X H, SUN F C. Development trend of new energy vehicle technology under industrial integration [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(1): 1-10.
- [2] 车帅,时玉正. 中国新能源汽车产业发展现状与建议[J]. 汽车电器, 2022, (10): 16-19.
CHE S, SHI Y Z. Development status and suggestions of our country new energy automobile industry [J]. Auto Electric Parts, 2022, (10): 16-19.
- [3] 唐葆君,王翔宇,王彬,等. 中国新能源汽车行业发展水平分析及展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, (2): 6-11.
TANG B J, WANG X Y, WANG B, et al. Analysis and prospect of China's new energy vehicles industry development level [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019, (2): 6-11.
- [4] 罗桂成,盛春龙. 浅析新能源汽车的未来发展趋

势[J]. 时代汽车, 2022, (21): 105-107.

LUO G C, SHENG C L. Analysis of the future development trend of new energy vehicles [J]. Auto Time, 2022, (21): 105-107.

- [5] 冯浩,熊兆钦. “双碳”背景下新能源汽车产业机遇及发展战略思考[J]. 决策与信息, 2022, (5): 68-76.

FENG H, XIONG Z Q. Opportunities and development strategies of new energy vehicle industry under the background of "Double Carbon" [J]. Decision & Information, 2022, (5): 68-76.

- [6] 汪善进,程远. 欧洲新能源汽车现状与发展趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(2): 135-149.

WANG S J, CHENG Y. Current status and development trends of European new energy vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(2): 135-149.

- [7] 吕龙. 绿色发展理念下新能源汽车电机控制技术及其性能优化策略[J]. 内燃机与配件, 2024, (14): 109-111.

LV L. Exploring new energy vehicle motor control technology and performance optimization strategies under concept of green development [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2024, (14): 109-111.

- [8] 韩雪峰. 新能源汽车中的驱动电机种类及未来发展趋势[J]. 防爆电机, 2024, 59(4): 98-102.

HAN X F. Types and future development trends of drive motors in new energy vehicles [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2024, 59(4): 98-102.

- [9] 贾广隆,鞠孝伟,赵泽,等. 电动汽车用集中驱动电机技术发展综述[J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46(5): 526-540.

JIA G L, JU X W, ZHAO Z, et al. Review on technology development of centralized driving motors used for electric vehicles [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(5): 526-540.

- [10] 郑吉,王学普. 无刷直流电机控制技术综述 [J]. 微特电机, 2002, (3): 11-13.

ZHENG J, WANG X P. The summary of the control technology of brushless DC motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2002, (3): 11-13.

- [11] 曲荣海,秦川. 电动汽车及其驱动电机发展现状与展望[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 82-86+8.

QU R H, QIN C. Development status and prospect of

- electric vehicles and their drive motors [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 82-86+8.
- [12] 程启明, 程尹曼, 王映斐, 等. 交流电机控制策略的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 145-154.
- CHENG Q M, CHENG Y M, WANG Y F, et al. Overview of control strategies for AC motor [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 145-154.
- [13] 严蓓兰. 新能源汽车电机发展趋势及测试评价研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 109-116.
- YAN B L. Development trend and test evaluation research of new energy vehicle motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(6): 109-116.
- [14] 吴红星, 嵇恒, 倪天, 等. 新型开关磁阻电机发展综述[J]. 微电机, 2011, 44(1): 78-83.
- WU H X, JI H, NI T, et al. Summary of novel switched reluctance motor development [J]. Micromotors, 2011, 44(1): 78-83.
- [15] 冉维斌. 电传动工程车辆开关磁阻电机运行特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- RAN W B. Research on the operating characteristics of switched reluctance motor for electric drive engineering vehicles [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.
- [16] CELIK T. Segmental rotor switched reluctance drives [D]. Newcastle: Newcastle University, 2011.
- [17] 赵铁军. 太阳能光伏混合动力汽车用开关磁阻电机系统控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHAO T J. Research on control strategy of switched reluctance motor system for solar PV hybrid electric vehicle [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [18] 陈正浩. 电动汽车开关磁阻电机宽转速范围驱动系统研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- CHEN Z H. Research on a wide speed range drive system for switched reluctance motors in electric vehicles [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [19] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 1-13.
- ZHANG G Q, DU J H. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous Motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 1-13.
- [20] 黄依婷, 王云冲, 史丹, 等. 永磁同步电机伺服控制(连载之一)国内外研究现状与发展趋势概述[J]. 微电机, 2022, 55(8): 1-7.
- HUANG Y T, WANG Y C, SHI D, et al. Servo control of permanent magnet synchronous motor (Part 1): A brief review [J]. Micromotors, 2022, 55(8): 1-7.
- [21] AYERS C W, HSU J S, MARLINO L D, et al. Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system interim report [R]. ORNL, 2004: 12-22.
- [22] HSU J S. Report on Toyota Prius motor thermal management [R]. ORNL, 2005: 5-25.
- [23] 李新华, 韩昱, 章国光. CAMRY 与 PRIUS 永磁同步电动机比较[J]. 汽车电器, 2011(10): 27-30.
- LI X H, HAN G, ZHANG G G. Comparison of permasyn motors on CAMRY and PRIUS [J]. Auto Electric Parts, 2011(10): 27-30.
- [24] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- TANG R Y. Theory and Design of Modern Permanent Magnet Motor [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [25] 赵纪龙, 林明耀, 付兴贺, 等. 混合励磁同步电机及其控制技术综述和新进展 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5876-5887.
- ZHAO J L, LIN M Y, FU X H, et al. An overview and new progress of hybrid excited synchronous machines and control technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5876-5887.
- [26] 朱孝勇, 程明, 赵文祥, 等. 混合励磁电机技术综述与发展展望[J]. 电工技术学报, 2008(1): 30-39.
- ZHU X Y, CHENG M, ZHAO W X, et al. An overview of hybrid excited electric machine capable of field control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, (1): 30-39.
- [27] 华邦杰. 新型磁路串联混合励磁复合电机的设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- HUA B J. Design and research of a novel series hybrid excitation compound motor [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [28] 邬博骋. 新型交替极永磁直线同步电机研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- WU B C. Research on novel consequent-pole

- permanent magnet linear synchronous machines [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [29] SUN L Z, GAO X L, YAO F, et al. A new type of harmonic current excited brushless synchronous machine based on an open winding pattern [C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Pittsburgh, 2014.
- [30] 夏永洪, 龚文军, 黄劭刚, 等. 基波电枢磁动势对转子齿谐波电动势的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2304-2309.
- XIA Y H, GONG W J, HUANG S G, et al. Influences of fundamental armature MMF on tooth harmonic EMF of the rotor [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2304-2309
- [31] ZHANG L, FAN Y, LORENZ R D, et al. Design and analysis of a new five-phase brushless hybrid-excitation fault-tolerant motor for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3428-3437.
- [32] 戴冀, 张卓然, 沐杨, 等. 转子磁分路混合励磁同步电机电枢反应磁场与电感特性研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (12): 276-283.
- DAI J, ZHANG Z R, MU Y, et al. Armature reaction field and inductance feature analysis of a hybrid excitation synchronous machine with magnetic shunting rotor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (12): 276-283.
- [33] KOSAKA T, SRIDHARBABU M, YAMAMOTO M, et al. Design studies on hybrid excitation motor for main spindle drive in machine tools [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (11): 3807-3813.
- [34] BURKHARDT Y, SCHLEICHER K, KLOEPZIG M. A novel hybrid excited synchronous machine for (H) EV applications [C]//2014 International Conference on Electrical Machine, Berlin, 2014.
- [35] 赵朝会. 串联磁路混合励磁爪极发电机的结构设计和特性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 1-6+12.
- ZHAO C H. Structure designing and characteristic study of HECPG which magnetic circuit series connection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 1-6+12.
- [36] 乔东伟, 王秀和, 朱常青. 新型混合励磁无刷爪极发电机的磁场调节特性分析及试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 115-121.
- QIAO D W, WANG X H, ZHU C Q. Investigation of flux regulation performance and experimental validation of novel hybrid excitation brushless claw-pole alternators [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 115-121.
- [37] 从敏. 新型混合励磁爪极电机及其弱磁调速研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- CONG M. Study on novel hybrid excitation claw pole machine and flux-weakening speed regulation [D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [38] 孟恒. 车用混合励磁爪极电机设计与优化 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- MENG H. Design and optimization of hybrid excitation claw pole motor for vehicle [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [39] ZHANG G, HUA W, CHENG M, et al. Design and comparison of two six-phase hybrid-excited flux-switching machines for EV/HEV applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 481-493.
- [40] GAO Y T, LI D W, QU R H, et al. A novel hybrid excitation flux reversal machine for electric vehicle propulsion [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(1): 171-182.
- [41] XU L, ZHAO W X, JI J H, et al. Design and analysis of a new linear hybrid excited flux reversal motor with inset permanent magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50 (11): 8202204.
- [42] 朱孝勇, 程明, 花为. 新型混合励磁双凸极永磁电机磁场调节特性分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 90-95.
- ZHU X Y, CHENG M, HUA W. Investigation of flux regulation performance and experimental validation for a novel hybrid excited doubly salient permanent magnet machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 90-95.
- [43] CHEN Z H, WANG B, CHEN Z, et al. Comparison of flux regulation ability of the hybrid excitation doubly salient machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3155-3166.
- [44] 汪奇, 杜恽, 卢伟, 等. 双定子混合励磁磁通切换电机及其电磁性能分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 68-73.
- WANG Q, DU Y, LU W, et al. Electromagnetic performance analysis of dual stator hybrid excitation

- flux switching motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(8): 68-73.
- [45] DU Y, LU W, ZHU X Y, et al. Optimal design and analysis of partitioned stator hybrid excitation doubly salient machine [J]. IEEE Access, 2018, 6: 57700-57707.
- [46] 缪周. 并列式混合励磁电机电动特性及控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
MIAO Z. Research on motoring characteristics and control technology of parallel hybrid excitation machine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [47] 耿伟伟, 张卓然, 于立, 等. 新型并列式混合励磁无刷直流电机结构原理及其磁场调节特性[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 131-137.
GENG W W, ZHANG Z R, YU L, et al. Operation principle and flux regulation characteristics of a new parallel hybrid excitation brushless DC machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 131-137.
- [48] HUA H, ZHU Z Q. Novel parallel hybrid excited machines with separate stators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(3): 2012-2020.
- [49] GENG W W, ZHANG Z R, JIANG K, et al. A new parallel hybrid excitation machine: Permanent-magnet/variable-reluctance machine with bidirectional field-regulating capability [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1372-1381.
- [50] BOROCCHI G, CAPPONI F G, DE D G, et al. Closed-Loop flux weakening control of hybrid-excitation synchronous machine drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2017, 53(2): 1116-1126.
- [51] ZHANG Z R, LIU Y, TIAN B, et al. Investigation and implementation of a new hybrid excitation synchronous machine drive system [J]. IET Transactions on Electric Power Applications, 2017, 11(4): 487-49.
- [52] SHINNAKA S, SAGAWA T. New optimal current control methods for energy-efficient and wide speed-range operation of hybrid-field synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2443-2450.
- [53] 林鹤云, 黄明明, 陆婉泉, 等. 混合励磁同步电机铜耗最小化弱磁调速控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 889-896.
- LIN H Y, HUANG M M, LU W Q, et al. Copper loss minimization flux weakening control for hybrid excitation synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 889-896.
- [54] 樊英, 雷宇通, 张秋实. 新型交替极混合励磁电机宽速域电流高效协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7918-7927+8229.
- FAN Y, LEI Y T, ZHANG Q S. Wide speed area and efficient current coordinated control of new consequent-pole hybrid excitation motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7918-7927+8229.
- [55] 杜桦, 康柯柯, 肖凤, 等. 基于铁耗占比的混合励磁电机速度分区损耗最小控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5730-5740.
- DU Y, KANG K K, XIAO F, et al. Speed partition minimum loss control strategy based on iron loss ratio for hybrid excitation motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5730-5740.
- [56] MBAYED R, SALLOUM G, VIDO L, et al. Hybrid excitation synchronous motor control in electric vehicle with copper and iron losses minimization [C]//2012 IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, 2012.
- [57] CHAN C C, ZHANG R J, CHAU K T, et al. Optimal efficiency control of PM hybrid motor drives for electrical vehicles [C]//1997 Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference, St Louis, 1997.
- [58] POTHI N, ZHU Z Q, REN Y. Comparison of flux-weakening control strategies of novel hybrid-excited doubly salient synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3589-3597.
- [59] MBAYED R, SALLOUM G, VIDO L, et al. Hybrid excitation synchronous machine control in electric vehicle application with copper losses minimization [C]//2012 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Bristol, 2012.
- [60] 黄明明, 林鹤云, 金平, 等. 新型混合励磁同步电机分区控制系统分析与设计[J]. 中国电机工程学报. 2012, 32(12): 120-125.
- HUANG M M, LIN H Y, JIN P, et al. Design and

- analysis on stage control systems for a novel hybrid excitation synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 120-125.
- [61] 黄明明, 周成虎, 郭健. 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.
- HUANG M M, ZHOU C H, GUO J. Flux-weakening stage control of hybrid excitation synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 52-60.
- [62] 牛大强. 混合励磁电机低速区无位置传感器控制系统研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- NIU D Q. Research on sensorless control for hybrid excited machine in low speed [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [63] AMARA Y, VIDO L, GAB63SI M, et al. Hybrid excitation synchronous machines: Energy-efficient solution for vehicles propulsion [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(5): 2137-2149.
- [64] 韦富艺, 姚世兴, 吕俊标, 等. 新能源汽车新型混合励磁驱动电机的优化设计[J]. 时代汽车, 2024, (5): 115-117.
- WEI F Y, YAO S X, LV J B, et al. Optimized design of new hybrid excitation drive motor for new energy vehicles [J]. Auto Time, 2024, (5): 115-117.
- [65] 汪洋, 李优新, 黎勉, 等. 电动汽车用混合励磁电机数字驱动系统的研究[J]. 机械工程与自动化, 2012, (5): 145-147.
- WANG Y, LI Y X, LI M, et al. A new hybrid excitation machine digital drive system for electric vehicles [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012, (5): 145-147.
- [66] 刘健宁, 杨晓琴, 张静, 等. 一种用于新能源汽车的混合励磁电机: CN201810529473.9 [P]. 2024-04-30.
- LIU J N, YANG X Q, ZHANG J, et al. Hybrid excitation motor for new energy vehicles: CN201810529473.9 [P]. 2024-04-30.
- [67] 胡文静, 尹红彬, 张军, 等. 新能源汽车用聚磁式组合磁极混合励磁驱动电机: CN202310740030.5 [P]. 2024-01-26.
- HU W J, YIN H B, ZHANG J, et al. Hybrid excitation drive motor with concentrating combined pole for new energy vehicles: CN202310740030.5 [P]. 2024-01-26.
- [68] 耿慧慧, 张学义, 胡文静, 等. 汽车用组合式永磁与无刷电磁混合励磁发电机: CN202110278938.X [P]. 2024-06-11.
- GENG H H, ZHANG X Y, HU W J, et al. Combined permanent magnet and brushless electromagnetic hybrid excitation generator for automobiles: CN202110278938.X [P]. 2024-06-11.
- [69] 谭超. 电动汽车用新型双定子双馈混合励磁电机的设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- TAN C. Research on design of a new dual stator doubly-fed hybrid excitation machine applied in electric vehicles of master thesis [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

收稿日期:2024-07-14

收到修改稿日期:2024-11-04

作者简介:

颜浩浩(2000-),男,硕士研究生,研究方向为矿山智能运输,TS22050135P31@cumt.edu.cn;

*通信作者:鲍久圣(1979-),男,博士,教授,研究方向为矿山运输及其智能化,cumtbjs@cumt.edu.cn。