

## 新型混合励磁电机技术与进展

张卓然 耿伟伟 戴冀 仲丽丽 王文佳

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

**摘要:**混合励磁电机是对传统单一励磁方式电机的发展,力求综合永磁电机和电励磁电机的优势和特点,有利于减少稀土永磁体用量、拓宽永磁电机调速及调压范围,在航空电源、新能源发电与驱动系统等领域有重要应用前景。本文从励磁结构和磁路原理两个角度对混合励磁电机进行分类和阐述,系统总结了提出的新型转子磁分路混合励磁电机及并列式混合励磁电机的结构原理与运行特点,论述了基于转子磁分路机理发展的混合励磁同步电机不同结构拓扑及其原理,给出了发电/电动运行控制的基本策略与方法。新型混合励磁结构拓扑及控制技术的研究为丰富和发展混合励磁电机技术提供了理论参考与实践指导。

**关键词:**混合励磁电机;无刷励磁;转子磁分路;并列式;永磁电机;发电;驱动控制

**中图分类号:** TM352

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2014)01-0027-10

## Recent Progress of Novel Hybrid Excited Machines

Zhang Zhuoran, Geng Weiwei, Dai Ji, Zhong Lili, Wang Wenjia

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Hybrid excitation machines strive to combine the advantages of permanent magnet (PM) machines and wound field synchronous machines, which benefits to reduce the magnet consumption and widen the regulation capability of operating speed or output voltage. Therefore, there are important application value and prospects in the aircraft power and electric vehicles. The existing topologies of hybrid excitation machines are summarized according to the configuration and magnetic circuit. The structural principle and operating characteristics of the rotor-magnetic-shunt hybrid excitation synchronous machine (HESM) and parallel hybrid excitation machine (PHEM) are introduced systematically. The development progress in the rotor-magnetic-shunt HESM is presented, and the basic strategies of generator/motor control are discussed. The new topologies of hybrid excitation machines provide the theory reference and the practice instruction in the development of hybrid excitation machines.

**Key words:** hybrid excitation machine; brushless excitation; rotor-magnetic-shunt; parallel excitation; permanent magnet machine; generation; drive control

**基金项目:**国家自然科学基金(51277096)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2011731)资助项目;教育部“新世纪优秀人才”资助项目;江苏省“青蓝工程”资助项目。

**收稿日期:** 2013-10-25; **修订日期:** 2013-12-26

**作者简介:**张卓然,男,博士,教授,博士生导师,1978年12月生;研究方向:航空电源起动发电技术、新能源发电与驱动系统技术;研究成果:先后主持国家自然科学基金、江苏省科技成果转化专项资金、航空科学基金、江苏省自然科学基金、航空企业委托开发等20余项国家和省部级项目,作为主要学术骨干完成“973计划”项目、国家自然科学基金重点项目等,发表学术论文60余篇,合作出版学术专著1部,获授权国家发明专利17项,作为主要完成人获国家技术发明二等奖、国防技术发明一等奖、日内瓦国际发明金奖等,入选教育部“新世纪优秀人才计划”、江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人和“台达高级访问学者”等。

**通信作者:**张卓然, E-mail: apsc-zzr@nuaa.edu.cn.

高剩磁密度、高磁能积的稀土永磁体逐渐在永磁电机中得到广泛应用,提高了永磁电机的转矩/功率密度和效率。然而,稀土永磁材料的价格变化直接影响永磁电机的成本,导致高性能永磁电机推广和应用受到限制<sup>[1-2]</sup>。少稀土永磁材料或无稀土永磁材料的高性能无刷电机,在独立电源、分布式发电和高性能驱动领域日益受到学术界和工业界的重视。混合励磁电机技术也是其中的一个典型代表。

相比于永磁电机和电励磁电机,混合励磁电机的主要特点是永磁体产生的磁势和励磁电流产生的磁势共同影响电机内气隙磁场,利用励磁电流可调的优势实现气隙磁场灵活调节。在永磁体产生的励磁磁场上引入电励磁磁场可以克服永磁电机磁场调节困难的问题,对于拓宽调速电机的运行范围、改善发电机电压调节性能和故障保护能力有重要意义。从控制角度来看,励磁电流变量的引入,使得永磁电机弱磁控制增加了可控量,不再单独依赖于电枢绕组中直轴电流分量进行弱磁控制,有利于驱动系统的解耦控制和效率优化。

混合励磁电机最早由美国学者提出<sup>[3]</sup>,作为一种综合了永磁电机和电励磁电机优点的新型电机,引起国内外学者的广泛关注。目前,各国学者在其结构拓扑、参数设置、优化和控制等方面进行了深入的研究,并且在风力发电、飞机和车载电源等独立发电领域和电动汽车驱动等领域的应用取得了诸多进展<sup>[4-7]</sup>。

混合励磁电机结构形式多样,对于该类新型电机命名和定义也不尽相同,主要有混合励磁电机、双励磁电机、组合励磁电机和具有轴向励磁绕组的永磁电机等。从不同研究角度针对混合励磁电机有不同的分类方法,根据永磁体的安装位置可分为定子永磁型和转子永磁型<sup>[5]</sup>;从磁路原理角度将混合励磁电机可分为串联磁路、并联磁路和复合磁路等<sup>[6]</sup>。本文结合混合励磁电机中励磁绕组的结构特点以及磁路特性对混合励磁电机进行分类归纳和论述;介绍了新型转子磁分路机理下混合励磁电机结构拓扑的发展思路和性能特点,以及并列式混合励磁电机结构新拓扑;给出了新型混合励磁电机发电系统及驱动系统的控制策略和实验验证。

## 1 混合励磁电机的分类及磁路特性

### 1.1 混合励磁电机分类

混合励磁电机在永磁电机的基础上引入电励磁绕组,结构灵活多样,励磁绕组和永磁体的安装

位置直接影响混合励磁电机的结构形式、磁场调节性能和输出特性。从永磁体和励磁绕组的位置角度出发,可以将混合励磁电机结构分类如图1所示。

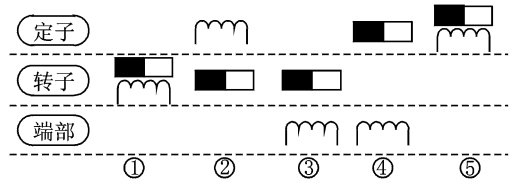


图1 励磁绕组和永磁体安装位置示意图

Fig. 1 Installation configurations of field windings and permanent magnets in hybrid excitation machines

根据图1分类,列举典型拓扑结构如下:

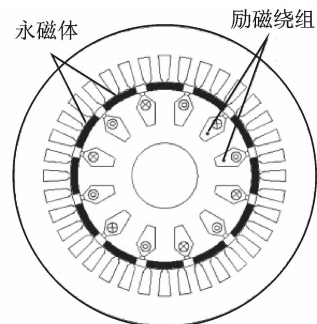
(1)图2(a)给出了一种混合励磁电机<sup>[7]</sup>,对应图1中的第一种结构,永磁体和励磁绕组都安装在转子上,由于转子上安装了励磁绕组,电机难以实现无刷励磁。

(2)转子磁极分割型混合励磁同步电机(Hybrid excitation synchronous machine, HESM)<sup>[8]</sup>如图2(b)所示。转子表面存在两种磁极,一种是永磁磁极,一种是铁心磁极,N极、S极和铁心磁极交错排列,定子铁心被定子环形直流励磁绕组分为两段。从结构上来看,其励磁绕组安装在定子上,永磁体安装在转子上。

(3)日本学者Kosaka等提出了一种采用软磁复合材料(Softmagnetic composite, SMC)的HESM<sup>[9-10]</sup>,如图2(c)所示。该结构中轴向充磁的永磁体在转子上,嵌放在N和S极永磁体的中间;励磁绕组安装在电机的端部,通过导磁桥形成轴向磁路,从而调节主气隙磁通。

(4)图2(d)为一种新型混合励磁双凸极电机<sup>[11]</sup>,永磁体安装在定子上,在电机端部放置电励磁绕组,引入轴向电励磁磁场,实现电机的励磁无刷化。

(5)图2(e)为混合励磁双凸极电机<sup>[12]</sup>,永磁体



(a) 串联磁势式(HESM)

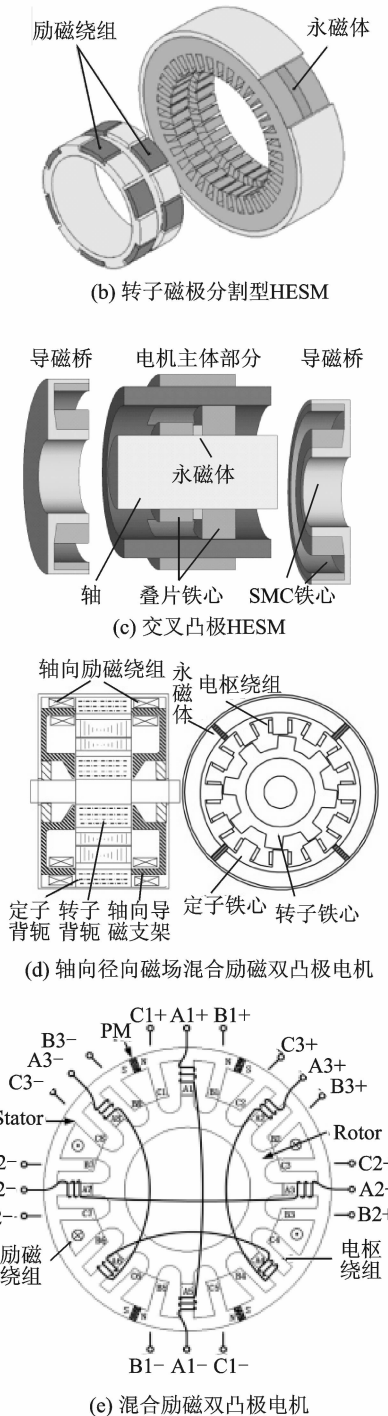


图 2 混合励磁电机结构拓扑

Fig. 2 Topologies of hybrid excitation machines

安装在定子上,在电机定子上同时嵌绕励磁绕组,电机转子上无绕组和永磁体,结构简单可靠。

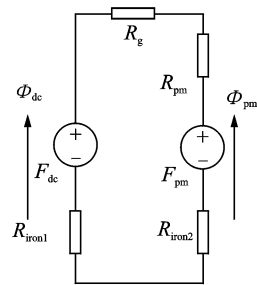
### 1.2 混合励磁电机磁路模型

混合励磁电机内同时存在两个磁势源,即永磁磁势和电励磁磁势,因此两个磁势的相互作用关系直接决定了混合励磁电机的永磁体用量和电励磁绕组的安匝数,进而影响励磁调节效率和气隙磁

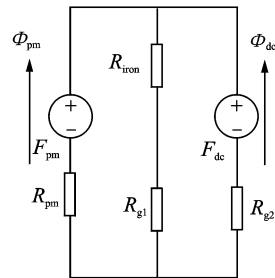
密。依据磁路原理,混合励磁电机的永磁磁势和电励磁磁势关系可以归类为串联磁势、并联磁势、串并联磁势和并列磁势。

如图 3 所示,分别给出了以上 3 类混合励磁电机的等效磁路原理图。串联磁势的永磁磁势和电励磁磁势串联作用于气隙磁场,图 2(a)所示混合励磁电机即属于串联磁势型,其磁路原理如图 3(a)所示。电励磁磁通必须要穿过永磁体,由于永磁体磁导很低,因此直接导致励磁效率降低。

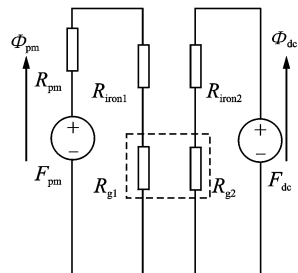
并联磁势型的永磁磁势和电励磁磁势并联作用于气隙磁场,两部分磁路相互有耦合,电励磁磁通不必穿过永磁体,磁路原理如图 3(b)所示,而对应的混合励磁电机如图 2(b~d)所示。



(a) 串联磁势



(b) 并联磁势



(c) 并列磁势

图 3 混合励磁电机磁路原理

Fig. 3 Magnetic circuit principle of hybrid excitation machines

串并联磁势的原理实际上是在电机内部既有一部分气隙磁密由永磁磁势和电励磁磁势串联相互作用产生的气隙磁密,又有两者并联作用产生的气隙磁密,对应的混合励磁电机如图 2(e)所示。

图3(c)所示为并列磁势原理图,永磁磁场和电励磁磁场是分开的,相互独立没有磁路上的耦合,整个气隙磁密由两部分形成,即电励磁部分和永磁部分。这类磁路从原理上分离了永磁部分和电励磁部分,有效阻断了电励磁磁势对永磁体工作点的变化,同时提高了电励磁部分的励磁效率。这种磁路原理的混合励磁电机的具体结构和特性将在后面进行介绍。

从上述分类看出,混合励磁电机内除传统电机的径向磁通外,多数还有轴向磁场,两者的磁通路径相互耦合、相互影响,电磁特性复杂;励磁绕组的引入对混合励磁电机的整体拓扑结构需要重新考虑,特别是功率密度和调磁范围的协调以及永磁体用量的优化。更为重要的是,混合励磁的调磁特性有别于电励磁电机,应该充分发挥其双向励磁调节特点,实现整个电机系统的优化设计。

## 2 转子磁分路混合励磁机理及新型混合励磁电机结构拓扑

### 2.1 基本结构与原理

传统永磁同步电机中,忽略漏磁通影响和端部效应,永磁磁势完全提供气隙磁通。如果能够引入附加磁路,为永磁磁势提供“旁路”路径,使得正常情况下电机气隙处于弱磁状态,而在“旁路”中利用电励磁磁势对旁路磁通进行调节,则能够实现对气隙磁通的有效调节。转子磁分路混合励磁同步电机正是依据这个原理给出的一种新型混合励磁电机结构拓扑。

如图4所示,转子磁分路混合励磁同步电机在传统的切向磁钢永磁同步电机的结构基础上,将转子的N和S极导磁体分别沿轴向延伸,N极延伸后集合于圆环形极靴,S极延伸后集合于外径较小的圆柱形极靴,两个极靴中间设置圆环形的导磁桥,导磁桥内嵌绕励磁绕组,这种结构也是通过改变励磁电流来控制轴向磁通进而控制主气隙磁通<sup>[13]</sup>。混合励磁电机内部同时存在轴向磁通和径向磁通,从图中可以看出,环形导磁桥内的励磁绕组没有励磁电流时,由于附加气隙相对于主气隙较小,永磁体磁通主要由轴向磁路经过附加气隙,主气隙中磁通较少,电机处于弱磁状态;励磁绕组通入某一方向励磁电流时,励磁磁场可以阻碍永磁体产生的轴向磁通,从而增大主气隙磁通;励磁绕组通入反方向电流时,可以进一步弱磁。

有限元静磁场分析结果表明,转子磁分路混合励磁电机具有宽广的磁场调节范围,如图5所示,

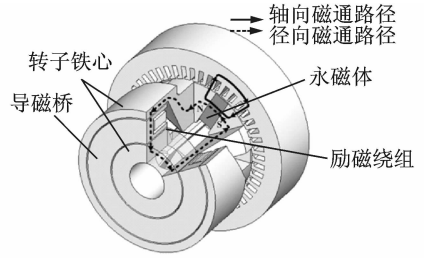


图4 转子磁分路混合励磁同步电机

Fig. 4 Hybrid excitation synchronous machines with rotor-magnetic-shunt

气隙磁密可以从0.3 T到0.7 T。其具有明显的励磁双向调节特点,但由于轴向磁路的过饱和,随着反向励磁磁势增大,轴向漏磁的增大,导致反向弱磁效果没有正向增磁效果明显,双向励磁作用是非对称的。

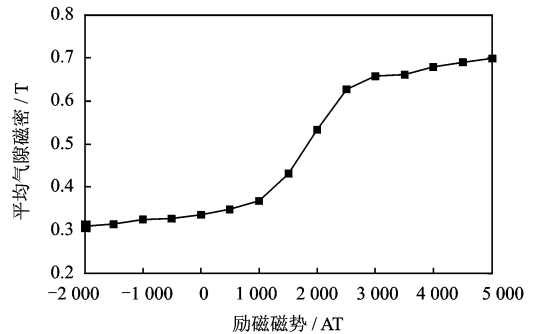


图5 主气隙磁密随电励磁磁势变化情况

Fig. 5 Main air-gap flux density versus electrical MMFs

### 2.2 拓扑发展与优化

#### 2.2.1 双端转子磁分路 HESM

考虑转子磁分路 HESM 在长径比较小情况下磁分路效果较好,为了进一步拓宽其应用范围,提出一种双向转子磁分路混合励磁电机<sup>[14]</sup>,其转子结构如图6所示。双端转子磁分路的定子部分依然沿用传统的永磁同步电机的定子铁心,转子上可看成由两段单端转子磁分路混合励磁电机的转子对接而成,这样就形成了两条轴向磁路,在同样的定子内外径情况下,定子铁心长增加了一倍,在长径比增加的情况下同样能保证其调磁性能。此外,两套励磁绕组既可以串联,也可以并联,还可独立进行控制,其连接方式可灵活选择,采取并联式的连接方式可以在一套绕组发生开路故障时保证电机的正常工作,提高了电机的可靠性。

根据有限元静磁场仿真分析的结果,得到了从-2 000 AT到4 000 AT之间的7个典型励磁磁势作用下主气隙的平均气隙磁密的大小如图7所

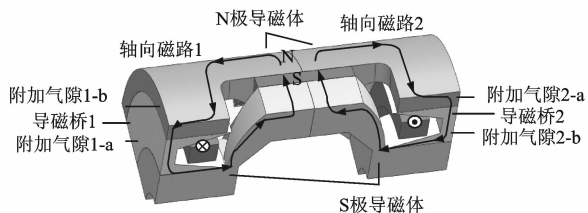


图 6 双端转子磁分路 HESM 的轴向磁路示意图

Fig. 6 Axial magnetic circuit of HESM with dual-direction rotor-magnetic-shunt

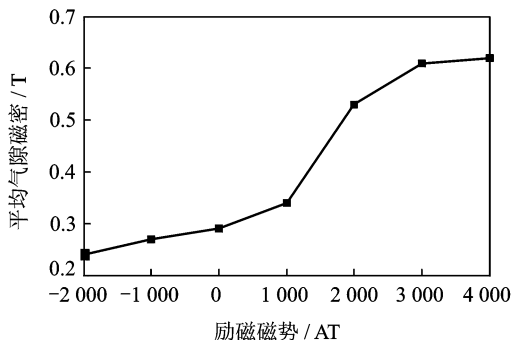


图 7 双端转子磁分路 HESM 磁场调节特性

Fig. 7 Field regulation performance of HESM with dual-direction rotor-magnetic-shunt

示,正向励磁可以增大气隙磁通,反向励磁可以减弱气隙磁通。

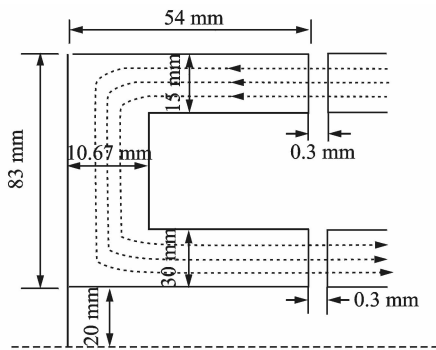
当电机的定子外径确定后,在保证调磁性能的同时,双端转子磁分路 HESM 可允许定子铁心长度设计得更长,克服了长径比对于单端转子磁分路 HESM 设计的限制,较宽的调磁范围使其在电动汽车和航空起动发电系统具有重要的应用价值。

### 2.2.2 轴向附加气隙 HESM

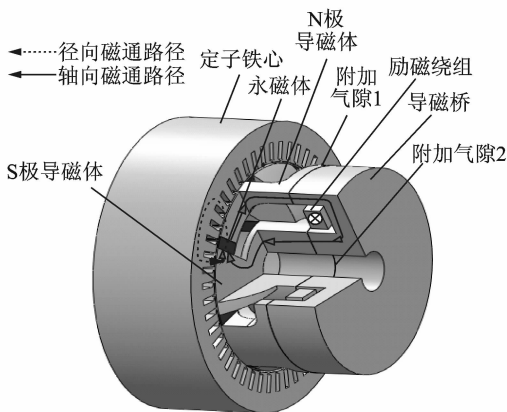
虽然转子磁分路 HESM 的轴向磁路仅经过转子的 N 极导磁体、S 极导磁体以及导磁桥,结构简单,轴向磁路短,轴向磁通较容易调节。但是为了保证轴向导磁体磁路方向上的截面积以及导磁桥内嵌绕励磁绕组的空间,N 极或 S 极导磁体延伸端需要向外扩张,这样延伸段必须避开定子绕组端接部分的长度,使得电机轴向长度偏长,而且导磁桥的窗口截面积有限,使得励磁磁势较小,影响电机的磁场调节范围。因此,在该结构的基础上提出了轴向附加气隙转子磁分路 HESM<sup>[15]</sup>。

轴向附加气隙转子磁分路混合励磁电机的设计是在原先径向附加气隙转子磁分路混合励磁电机的基础上通过改进导磁桥结构得到的。如图 8(a)所示为改进后的导磁桥示意图,其整个电机结构如图 8(b)所示。对比径向和轴向附加气隙磁场

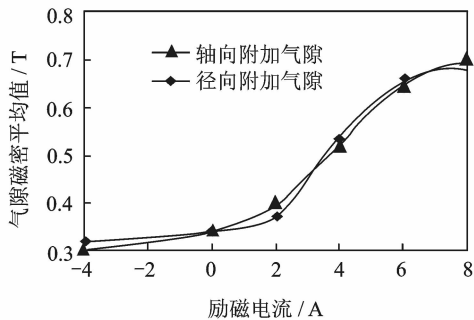
调节特性,如图 8(c)所示,两种结构的调节范围和效果基本一致。然而,轴向附加气隙 HESM 的导磁桥的内部空间得到了明显的增大(增加了约 41%),减小了励磁绕组的发热和损耗。



(a) 导磁桥示意



(b) 3D结构示意图



(c) 磁场调节特性对比

图 8 轴向附加气隙转子磁分路混合励磁电机

Fig. 8 HESM with rotor-magnetic-shunt and axial auxiliary air-gaps

### 2.2.3 轴向非均匀气隙 HESM

为了实现转子磁分路 HESM 能够实现高效灭磁,提高电励磁在电机中的作用,增加调磁范围,因此考虑并列结构的转子磁分路 HESM。通过减小转子磁分路 HESM 中的永磁体的轴向长度,这样电机的有效部分就分为有永磁体的永磁侧和没有

永磁体的电励磁侧,电励磁侧在转子的延伸方向。一方面由于永磁体减小,在没有励磁电流时电机中的磁场减小了;另一方面在电励磁侧可以实现磁通的双向调节,提高了整个电机的弱磁能力,通过调节永磁侧和电励磁侧的长度比例以及两部分对应的主气隙大小,可以实现电机的完全弱磁甚至出现反向。文献[15]提出一种轴向非均匀气隙转子磁分路 HESM,如图 9(a)所示。图 9(b)是原理样机定转子实物图。

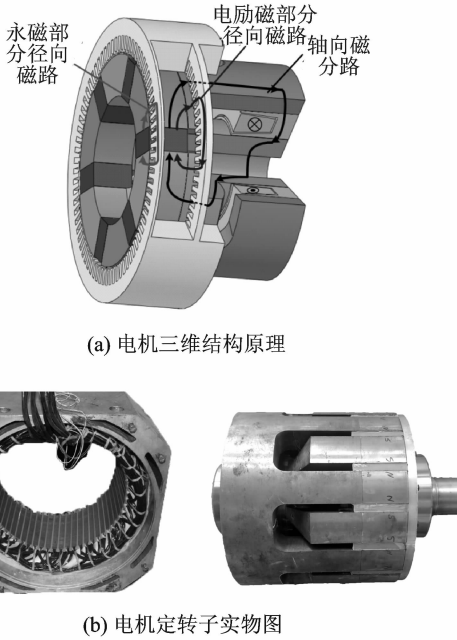


图 9 轴向非均匀气隙转子磁分路混合励磁电机  
Fig. 9 HESM with rotor-magnetic-shunt and axial non-uniform air-gaps

电机在无励磁电流时,由于电励磁部分的气隙较小,永磁磁通一部分经过轴向磁分路闭合,另一部分经过电励磁部分的径向磁路闭合,此时电机处于弱磁状态;加入正向的励磁电流后,电励磁产生的磁通在轴向磁路上阻碍了永磁磁通,使得永磁磁通由永磁部分径向磁路和电励磁部分的径向磁路闭合;继续增大电流,排除过渡段饱和的影响,电励磁产生的磁通将由轴向磁路流经电励磁部分的主气隙闭合,永磁磁通将全部从永磁部分的径向磁路闭合,此时电机处于增磁状态;实际情况下,考虑到过渡段饱和的影响,电励磁磁通不足以使电励磁部分的铁心饱和,所以永磁磁通仍有一部分从电励磁部分的径向磁路闭合,因此永磁部分的最大气隙磁密将偏低;励磁绕组中通入反向电流时,电励磁磁通经永磁部分和电励磁部分的径向磁路闭合,且在主气隙中的方向和永磁磁通方向相反,这样就

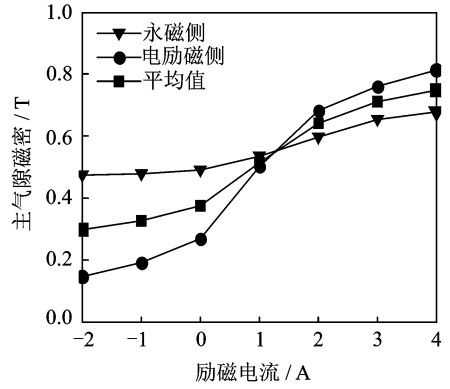


图 10 轴向非均匀气隙转子磁分路 HESM 磁场调节  
Fig. 10 Field regulation capability of HESM with rotor-magnetic-shunt and axial non-uniform air-gaps

阻碍了永磁磁通沿径向磁通闭合,而使之沿轴向磁分路闭合,达到弱磁效果。如图 10 所示为励磁电流变化对永磁部分和电励磁部分气隙磁密的影响,通过电励磁部分气隙的改变,电机气隙磁密平均值进一步提高,磁场调节范围增大。

### 3 并列式混合励磁电机

另外一种典型的混合励磁电机为永磁和电励磁并列式结构。为探索永磁电机与磁阻类电机并列运行的可行性,文献[16]研究了一种并列式混合励磁无刷直流电机,由于电励磁部分励磁绕组安装在定子上,实现了混合励磁的无刷化,可以称之为永磁同步/双凸极并列式混合励磁电机,属于并列磁势型混合励磁电机。

图 11 所示为永磁同步/双凸极并列式混合励磁电机的定转子冲片和整个原理样机的定转子。

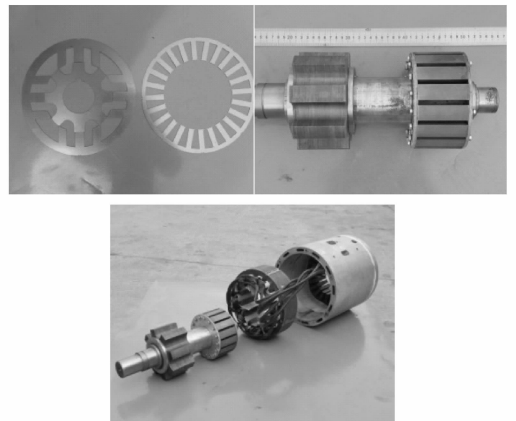


图 11 永磁同步/双凸极并列式混合励磁电机  
Fig. 11 Parallel hybrid excitation machine constituted by PMSM and DSEM

由于双凸极电机波形非正弦,通过增大转子极宽,可以优化双凸极部分的电动势波形近似于梯形波,从而永磁同步部分和双凸极部分的电动势波形可以高效叠加。

图 12 所示为永磁同步/双凸极并列式混合励磁电机不同励磁下空载三相实验波形,和作为无刷直流发电机时励磁 20 A 带载(励磁 20 A,输出直流电流 65 A)的三相电压和全桥整流输出电压波形。一个值得注意的问题是换相重叠时间的变化,在正负半个周期的换相重叠时间不一样,正半周期换相重叠时间较负半周期明显短,其与双凸极电机的规律是类似的。

另外,电励磁部分和永磁部分的功率叠加也是该类并列式混合励磁电机的关键技术问题。发电运行状态,应该尽量保证永磁部分的最大功率点和电励磁部分在额定励磁下的最大功率点相同,从而充分发挥两类电机的输出功率优势。发电实验表明,经过合理的设计,可以使得该类并列式混合励磁电机的输出功率为永磁和电励磁部分的输出功率合成,如图 13 所示。

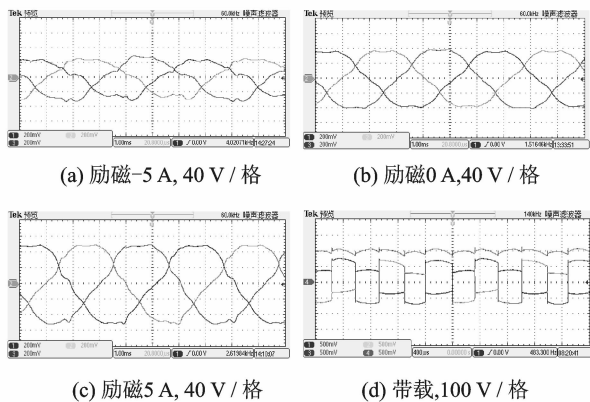


图 12 永磁同步/双凸极并列式混合励磁电机三相电压波形

Fig. 12 Three-phase voltage waveforms of PHEM

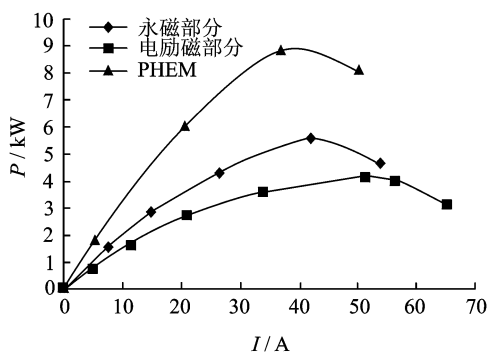


图 13 并列式混合励磁电机功率特性

Fig. 13 Output power characteristics of PHEM

永磁同步/双凸极并列式混合励磁发电机的工作模式同时受到负载大小和励磁电流大小的影响,如图 14 所示,永磁同步/双凸极并列式混合励磁发电工作模式分为 3 个状态:

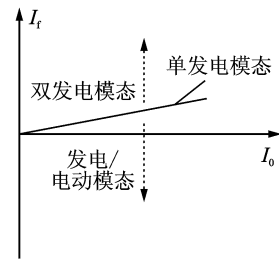


图 14 并列式混合励磁电机运行模式

Fig. 14 Operation modes of PHEM

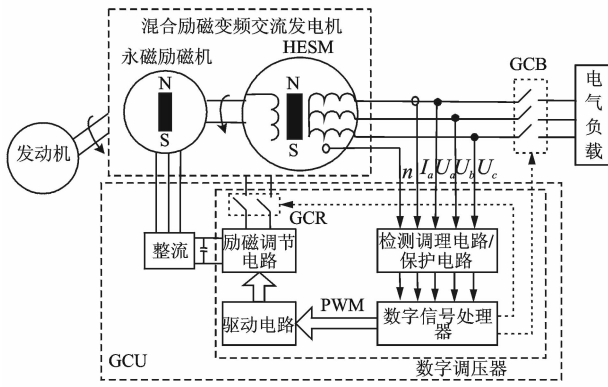
- (1)发电/电动模式——永磁部分处于发电状态,电励磁部分处于电动状态;
- (2)单发电模式——只有永磁部分处于发电状态;
- (3)双发电模式——永磁和电励磁部分都处于发电状态。

## 4 HESM 发电与驱动控制技术

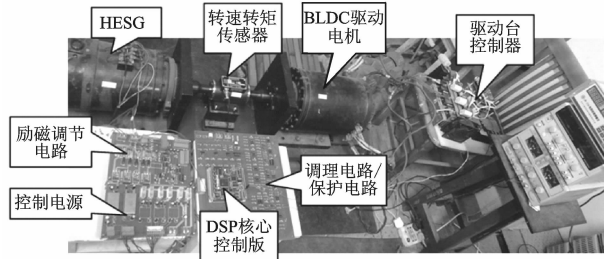
### 4.1 混合励磁变频交流发电系统

如图 15(a)所示,转子磁分路混合励磁变频交流发电系统由一个混合励磁变频交流发电机和一个发电机控制器(包括整流滤波单元和励磁控制继电器(Generator control relay, GCR))构成。混合励磁变频交流发电机内包含一个小功率永磁励磁机,两者同轴安装在同一个机壳里(相当于三级式电励磁同步电机的永磁副励磁机,但功率需求要较大一些),为两级式结构,省略了三级式电励磁同步电机内的励磁机和旋转整流器环节。发电机控制器可以通过励磁电流调节器调节励磁电流,以调节发电机的输出电压大小,通过控制 GCR 和发电机输出断路器(Generator control breaker, GCB)的开关保护发电机和电网。

与三级式变频交流发电系统相比,混合励磁变频交流发电系统具有以下几个显著的特点:由于电机本身的无刷励磁结构,不再需要旋转整流器,简化了电机的结构,提高了电机的可靠性;同时只需要一级永磁励磁机,相比较三级式电机中的两级励磁结构省去了一级励磁机,有效地减小了电机的体积重量;而且混合励磁电机作为起动发电机时由于永磁体的存在,可以直接起动,简化了三级式起动发电机起动时复杂的控制方式。

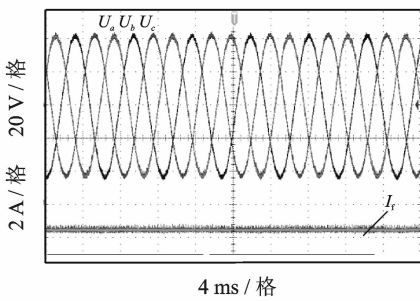


(a) 发电系统原理框图

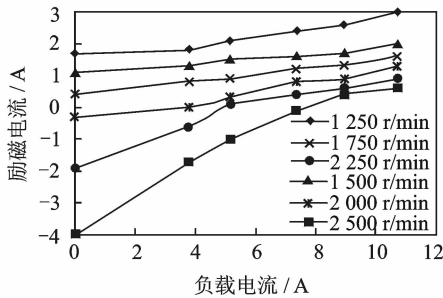


(b) 发电系统实验平台

图 15 转子磁分路混合励磁同步电机变频交流发电系统  
Fig. 15 Variable frequency AC generation system of HESM with rotor-magnetic-shunt



(a) 转速为 2500 r/min 时三相电压和励磁电流波形



(b) 不同转速下 HESM 发电机系统调节特性

图 16 转子磁分路混合励磁同步电机变频交流发电系统输出特性

Fig. 16 Output characteristics of VFAC power system of HESM with rotor-magnetic-shunt

研制了混合励磁发电机数字电压调节器，混合励磁同步电机发电系统实验平台如图 15(b) 所示。

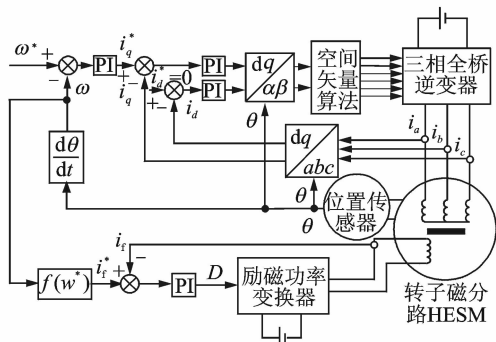
图 16(a) 所示为转速为 2500 r/min 时稳态下励磁电流波形和三相电压波形，输出的三相电压对称，正弦度高，充分表明转子磁分路 HESM 适用于交流发电与驱动系统。图 16(b) 给出了不同转速下混合励磁发电系统的调节特性，转速较低时，相同的负载需要的励磁电流较大，转速在 1500 ~ 2000 r/min 时，每个转速下的调节特性曲线基本保持平行，说明在这个转速和负载范围内，电机内磁场未进入饱和区，工作在线性区域；在转速为 1250 r/min 时，负载越大，励磁电流变化量越大。转速达到 2000 r/min 以上时，由于稳压输出需要反向励磁，所以需要的反向励磁电流较大。

### 4.2 混合励磁驱动控制系统

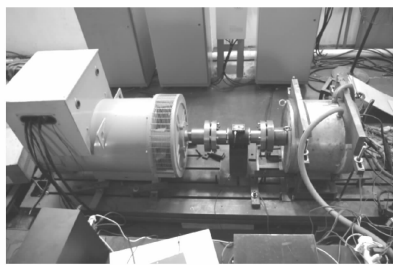
HESM 驱动控制系统中的关键问题在于励磁电流  $I_f$  与交直流电流  $i_d, i_q$  间的协调控制，这与电机的输出转矩和效率有着密切的关系。励磁电流的大小影响励磁损耗、铁耗和电机的输出转矩，交、直流电流影响电机的输出转矩和铜耗。因此，需要结合系统的要求综合考虑，必须兼顾系统效率和输出转矩这两方面的要求。转子磁分路 HESM 驱动系统为转速和电流双闭环调速系统，如图 17(a) 所示，综合了  $i_d=0$  的矢量控制方法和励磁电流的闭环控制方法。转速作为外环，内环有两部分，即交轴电流闭环、直轴电流闭环。转速给定与转速反馈比较后经 PI 转速调节器得到交轴电流给定，由于采用了  $i_d=0$  的矢量控制方法，所以直轴电流给定为零，而励磁电流的给定则是依据工作转速和负载转矩的大小确定的。检测两相电流，然后依据  $i_a + i_b + i_c = 0$  的关系计算出 c 相电流后进行坐标变换得到交、直轴电流的反馈。交直流电流给定与其相应的反馈值进行比较后经 PI 计算得到  $U_d, U_q$ ，将  $U_d, U_q$  进行 Park 反变换得到  $U_\alpha, U_\beta$ 。依据  $U_\alpha, U_\beta$  按照空间矢量算法可得到三相逆变器所需的 6 路 PWM 信号。励磁给定与励磁反馈比较后经 PI 调节器计算后得到励磁控制电路所需的 PWM 信号。

实际上，转子磁分路混合励磁电机驱动系统可控励磁电流变量的引入，系统增加励磁电流分配控制器和励磁电流控制器对励磁电流进行调节与控制，控制手段更加灵活。图 17(b) 为转子磁分路混合励磁电机驱动控制实验平台，图 17(c) 给出了初步实验验证的运行效率图。电机输出转矩达到了额定值，有效实现了恒转矩和恒功率运行，宽转速范围下效率保持在 80% 以上。

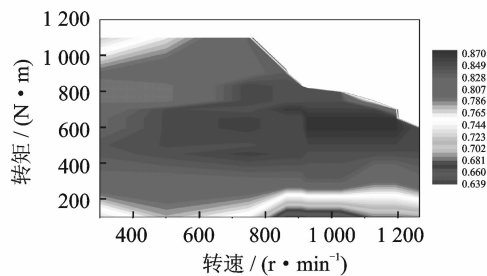




(a) 驱动控制策略框图



(b) 控制器与实验平台



(c) 系统效率图

图 17 转子磁分路混合励磁同步电机驱动系统

Fig. 17 Drive system of HESM with rotor-magnetic-shunt

## 5 结束语

混合励磁电机继承了永磁电机高效、高功率密度等优点,同时利用励磁电流实现气隙磁场的平滑调节。混合励磁电机发电运行,电压调节范围宽广;电动运行,弱磁控制可以增大恒功率运行的转速范围。混合励磁电机本体拓扑的优化和控制技术是混合励磁电机技术发展的主要方向和难点。本文针对转子磁分路混合励磁电机,系统总结了其电机拓扑发展及优化,讨论了转子磁分路混合励磁电机变频交流发电技术和混合励磁电机的驱动控制技术,为转子磁分路混合励磁电机在航空和电动汽车等领域的应用打下基础。另外,介绍了并列式混合励磁电机的基本结构原理和实验验证,实验表明其继承了永磁电机和电励磁双凸极电机的优势,

具有无刷励磁,转子结构简单可靠,励磁调节能力好、功率密度较高的特点。

混合励磁电机系统技术无论从电机结构形式还是从控制技术方面来看都值得进一步发展和优化。本文讨论的新型转子磁分路 HESM 及并列式混合励磁电机对于丰富混合励磁电机的研究方向有重要理论和实践价值,有助于实现新型航空起动发电系统和高效电动汽车驱动系统。

## 参考文献:

[1] Hayashi H, Nakamura K, Chiba A, et al. Efficiency improvements of switched reluctance motors with high-quality iron steel and enhanced conductor slot fill [J]. IEEE Trans on Energy Convers, 2009, 24 (4):819-825.

[2] Chiba A, Takano Y, Takeno M, et al. Torque density and efficiency improvements of a switched reluctance motor without rare-earth material for hybrid vehicles [J]. IEEE Trans Ind Appl, 2011, 47 (3):1240-1246.

[3] McCarty F B. Hybrid excited generator with flux control of consequent-pole rotor; United States, 4656379[P], 1985.

[4] Wang Y, Deng Z. Hybrid excitation topologies and control strategies of stator permanent magnet machines for DC power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12):4601-4616.

[5] 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,2008,23(1):30-39. Zhu Xiaoyong, Cheng Ming, Zhao Wenxiang, et al. An overview of hybrid excited electric machine capable of field control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1):30-39.

[6] Nedjar B, Hlioui S, Amara Y, et al. A new parallel double excitation synchronous machine [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2011, 47(9):2252-2260.

[7] Henneberger G, Hadji-Minaglou J R, Ciorba R C. Design and test of permanent magnet synchronous motor with auxiliary excitation winding for electric vehicle application[C]//Proc European Power Electronics Chapter Symp. Lausanne, Switzerland: EPEA, 1994:645-649.

[8] Aydin M, Huang Surong, Lipo T A. A new axial flux surface mounted permanent magnet machine capable of field control[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. [S. l.]: IEEE, 2002: 1250-1257.

[9] Kosaka T, Sridharbabu M, Yamamoto M, et al. De-

- sign studies on hybrid excitation motor for main spindle drive in machine tools [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3807-3813.
- [10] Ozawa I, Kosala T, Matsui N. Less rare-earth magnet-high power density hybrid excitation motor designed for hybrid electric vehicle drives [C]//The 13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain;EPEA, 2009: 1-10.
- [11] Yi Longfang, Hu Qiansheng, Yu Li. Static characteristics of a novel two-way hybrid excitation brushless motor [C]//ICEMS2005. Nanjing, China: IEEE IAS, 2005: 710-713.
- [12] Zhang Zhuoran, Tao Yangyang, Yan Yangguang. Investigation of a new topology of hybrid excitation doubly salient brushless DC generator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2550-2556.
- [13] Zhang Zhuoran, Yan Yangguang, Yang Shanshui, et al. Principle of operation and feature investigation of a new topology of hybrid excitation synchronous machine [J]. IEEE Transactions of Magnetics, 2008, 44(9): 2174-2180.
- [14] Han Jianbin, Zhang Zhuoran, Ma Shengjie. Investigation of field regulation performance of a new hybrid excitation synchronous machine with dual-direction magnetic shunt rotor [C]//Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China;IEEE IAS,2011:1-5.
- [15] Ma Shengjie, Zhang Zhuoran. Investigation of field regulation characteristic of a new hybrid excitation synchronous machine with axial auxiliary air-gaps [C]//International Conference on Electric Machines and Systems (ICEMS). Sapporo, Japan: IEEE IAS, 2012:1-6.
- [16] 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 Weiwei, Zhang Zhuoran, Yu Li, 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.

