

专  
稿

# 永磁同步传动系统现状及应用

郭淑英

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 郭淑英(1957-), 女, 高级工程师(教授级), 南车首席技术专家, 长期从事轨道机车牵引电机、电动汽车电机驱动系统的研发工作。

**摘 要:** 概述了永磁同步电机(PMSM)的分类及研究现状, 分析了永磁同步电机的特点和不足, 重点介绍了永磁同步电机控制技术现状和研究热点, 对永磁同步传动系统的应用领域和发展趋势进行综合论述, 认为采用永磁同步直驱传动系统, 发挥永磁同步电机的终极优势, 是动力传动系统的未来发展趋势。

**关键词:** 永磁同步电机; 永磁同步电机控制; 直驱传动系统; 技术现状; 研究热点; 技术应用; 发展趋势

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2014)03-0001-05

## Current Situation and Application of PMSM Driver System

GUO Shu-ying

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** Classification and current researching situation of PMSM was reviewed. Characteristics and shortages of PMSM were analyzed, and situation and focus of PMSM control technology was introduced in emphasis. Application field and development trend of PMSM driver system was discussed, and a viewpoint was carried out that PMSM direct-driving system was the development trend of PMSM driver system, which exploited the ultimate advantaged of PMSM.

**Keywords:** PMSM; PMSM control; direct-driving system; current technology situation; study focus; technology application; development trend

### 0 引言

永磁同步电机以其高效率、高功率密度、强过载能力、结构多样化等优点而备受青睐。近十几年来, 永磁同步电机凭借其优越性能在轨道交通、电动汽车、伺服系统、风力发电、船舶推进、航天航空、工程机械、国防等领域得到广泛应用, 功率等级覆盖几百瓦到数兆瓦。而关于永磁同步传动系统设计、永磁同步电机设计及永磁同步电机控制等各个方面的研究工作, 在学术研究领域也获得了蓬勃发展。

### 1 永磁同步电机研究现状

#### 1.1 永磁同步电机概述<sup>[1-2]</sup>

永磁同步电机即是以永久磁铁励磁的同步电机。随着以钕铁硼为代表的永磁材料的性价比不断提高,

永磁同步电机及其相关技术的应用和开发获得广泛关注。

经过多年来的技术发展和演变, 永磁同步电机根据气隙磁场方向大体可以分为径向磁通式、横向磁通式和轴向磁通式3种类型。图1为应用最为普遍的几种典型的径向磁通式结构剖面图。

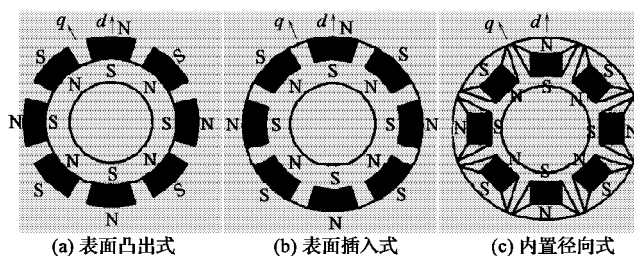


图1 典型永磁同步电机结构剖面图

#### 1.2 永磁同步电机研究现状<sup>[3-4]</sup>

近年来永磁同步电机设计技术进步非常明显,

收稿日期: 2014-04-08

研究者们一直在持续不断地努力致力于提高永磁同步电机的效率、功率密度,降低转矩脉动,提高其性价比。

首先,许多高性能的绝缘材料、导磁材料和永磁材料被引入永磁同步电机设计中,以提高永磁同步电机的性能。如为了提高效率,许多学者开始研究用非晶态金属材料来代替硅钢片制作铁心,这种材料的磁导率更高,损耗却只有硅钢的十分之一。日本日立公司的一项研究中,使用非晶材料制作铁心,在采用铁氧体永磁体励磁的情况下,电机效率仍然达到了93%,使得电机性价比大幅提高。

其次,在电机绕组设计方面进行优化。如为了减小电机端部尺寸,减小齿槽转矩,获得更好性能指标,分数槽集中绕组永磁同步电机获得青睐,并取得了一些研究成果。

另外,为了充分发挥永磁同步电机结构多样性的特点,各国学者们在电机结构设计方面大胆创新,出现了不少新颖的电机结构,以应对不同的技术需求。如采用双定子结构,在高低两个不同转速段分别使用,最大限度利用永磁体,提高弱磁扩速能力等。其中另一类值得一提的新型永磁电机是混合励磁永磁电机。

混合励磁永磁电机的特点是将绕组和永磁体都安装在定子上,这不同于将永磁体安装在转子上的传统永磁电机。以永磁体安装方式划分,可以将混合励磁电机分为双凸极永磁电机、磁通反向电机和开关磁链电机等3类。前2类由于转矩谐波、转矩脉动及功率密度等方面的缺陷,不适合于高性能的传动系统。图2所示为开关磁链电机的结构示意图,其采用低磁能积和低成本永磁体获得与传统永磁同步电机相同的功率密度,绕组和永磁体在磁路上并联,电枢电流产生的电枢反应几乎不会影响永磁体的工作点。由于其结构简单,涡流损耗低等特点,开关磁链电机已经成为电机设计领域的一个研究热点。

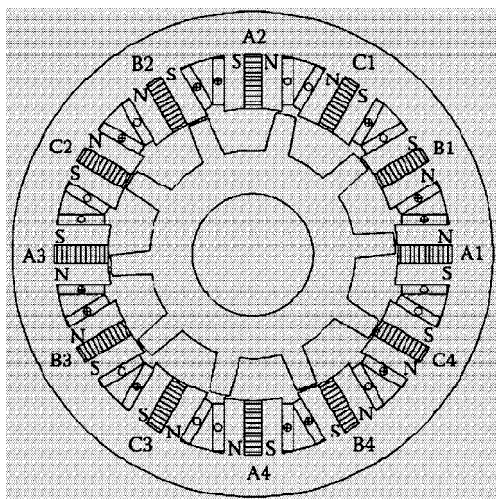


图2 开关磁链电机剖面图

## 2 永磁同步电机特点及控制技术研究

### 2.1 永磁同步电机特点<sup>[5]</sup>

永磁同步电机采用永磁体励磁,结构简单,具有以下优点:①功率因数高、效率高,相比同规格异步牵引电机,效率提高3%~5%;②体积小,重量轻(以同样的冷却方式为前提,减小25%);③结构多样化,应用范围广;④低速电制动性能好;⑤噪声低,可靠性高。

同样,永磁同步电机也存在一些不足:①由于逆变器尺寸受限,高速区需要弱磁运行,必然带来更高的铜耗;②按同步电机特性要求,必须采取逆变器和电机一一对应的控制模式;③运行温度过高或弱磁过深,可能导致永久退磁;④由于永磁体的存在,电机定子绕组发生匝间短路故障时,如果电机正在旋转,会产生内部环流,严重时,存在烧毁危险。

正是为了克服永磁同步电机的这些不足之处,学者们正不断地对永磁同步传动系统进行研究,取得了很多科研成果,也促进了永磁同步传动系统不断发展。

目前,在永磁同步传动系统方面主要的研究热点如下:①无位置传感器控制;②电机热模型研究;③永磁电机故障诊断研究;④低载波比下永磁同步电机控制等。

### 2.2 永磁同步电机控制技术研究现状

就高性能永磁同步电机控制技术而言,无论矢量控制还是直接转矩控制都已经相当成熟。目前,国内外对永磁同步电机控制的研究主要集中在弱磁控制和无位置控制2个方面。

#### 2.2.1 弱磁控制

经过多年来的发展,永磁同步电机的弱磁控制技术研究已经取得很多成果。Morimoto 等人结合电流矢量控制和前馈解耦补偿,实现了恒定逆变器容量下的IPMSM的弱磁控制,该控制策略中弱磁电流的大小由电机的数学模型计算得出,因而其性能受到电机参数的影响,对运行条件敏感<sup>[6-7]</sup>。Y. S. Kim, J. M. Kim和J. H. Song等人提出了利用可获得的最大输出电压和电压指令之间的误差信号来调节d轴弱磁电流的弱磁控制方法<sup>[8]</sup>。目前正在开展的研究主要集中在如何提高电压利用率,如何在过调制区、方波区获得良好的动静态性能等方面。另外,针对低载波比、低开关频率的应用领域,同步调制策略正在被引入永磁同步电机控制中<sup>[9]</sup>。

#### 2.2.2 无位置控制

永磁同步电机无位置传感器控制技术是目前的研究热点之一。按照位置估算原理,永磁同步电机位置估算方法可以分为基波励磁估算法、人工智能估算方法以及基于电机电感凸极性估算等3类,每类方法又可以继续细分,如图3所示。其中人工智能方法是采用模糊逻辑、神经网络等人工智能方法实现位置估算,

好处是对参数不敏感<sup>[10]</sup>。

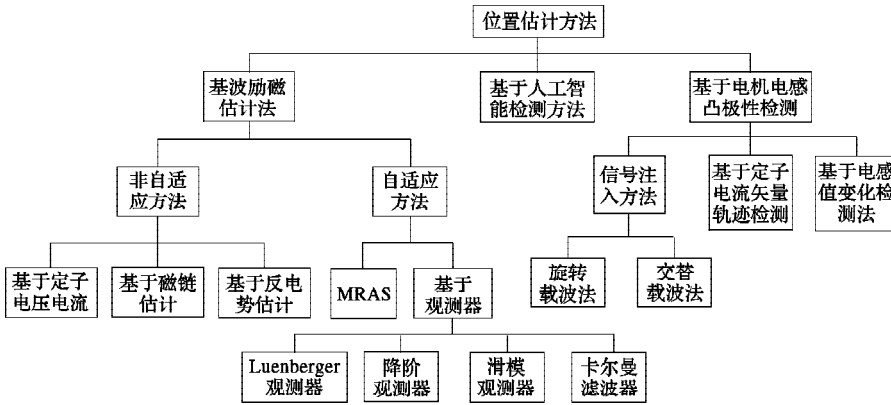


图3 无位置算法分类

### 1) 基波励磁估算方法

基波励磁估算方法是以电机动态模型为基础的，其实现方法可以通过电机电压模型或磁链模型的计算，也可以是自适应观测器方法。该方法动态性能好，但十分依赖电机参数，计算量偏大，在低速区误差较大，主要适用于中、高速段运行。该方法中最具有代表性的就是扩展反电势法，采用扩展电势法时的电机数学模型可以表示为：

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_d & (L_d - L_q)\omega \\ -(L_d - L_q)\omega_c & pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} -\sin\theta_c \\ \cos\theta_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $\lambda = (L_d - L_q)(\omega_c i_d - i_q) + \varphi_f \omega_c$ 。

定义  $\bar{e}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \bar{e}_\alpha \\ \bar{e}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda \sin\theta_c \\ -\lambda \cos\theta_c \end{bmatrix}$  为扩展反电势矢量，通过对扩展反电势的角度值计算或锁相基本可以完成对转子的位置角与转速的求取。

### 2) 基于电机电感凸极性估算方法

基于电机电感凸极性估算方法，借助于永磁同步电机的凸极性来实现。该方法以高频谐波注入法、INFORM等方法较为实用，由于对电机参数依赖性较小，特别适合于低速区采用。高频谐波注入法的应用已经比较广泛，这里重点介绍INFORM方法，其特别适用于牵引传动领域永磁同步电机低速区的控制应用。

由于永磁电机定子绕组的电感值是转子位置的函数，INFORM方法的基本思想就是：从不同方向对电机端施加电压矢量，通过测量它们的电流响应来估计转子位置<sup>[11]</sup>。式(2)描述了电流变化率与施加的电压矢量之间的关系，从式中可以看出转子位置角和电机电感的关系。

$$\frac{d\bar{i}_s}{dt} = [\bar{L}_s(\theta_c)]^{-1} \bar{u}_s \quad (2)$$

式中：

$$[\bar{L}_s(\theta_c)]^{-1} = \frac{1}{L_0^2 - \Delta L^2} \begin{pmatrix} L_0 - \Delta L \cos 2\theta_c & -\Delta L \sin 2\theta_c \\ -\Delta L \sin 2\theta_c & L_0 + \Delta L \cos 2\theta_c \end{pmatrix}.$$

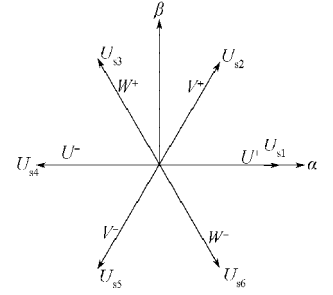


图4 空间电压矢量图

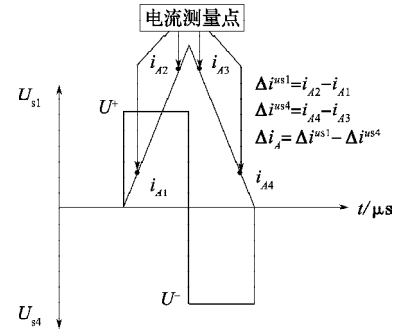


图5 电流测量点示意图

对于如图4所示的两电平拓扑结构的6个有效电压矢量，根据其对应定子电流变化的影响，分为3类。在INFORM中，分别沿着ABC绕组的轴线，从正反2个方向上交替施加电压矢量。例如对于A轴，可施加 $\bar{u}_{s1}$ 和 $\bar{u}_{s4}$ ，如图5所示，有

$$\Delta i_A = \Delta i_A^{u_{s1}} - \Delta i_A^{u_{s4}} = \frac{|\bar{u}_s|}{L_d L_q} \left[ (L_d + L_q) - (L_d - L_q) \cos 2\theta_c \right] \Delta t \quad (3)$$

式中： $\Delta t$ 为测量间隔时间。

$$\Delta i_B = \frac{|\bar{u}_s|}{L_d L_q} \left[ (L_d + L_q) - (L_d - L_q) \cos 2(\theta_c - 4\pi/3) \right] \Delta t \quad (4)$$

$$\Delta i_C = \frac{|\bar{u}_s|}{L_d L_q} \left[ (L_d + L_q) - (L_d - L_q) \cos 2(\theta_c - 2\pi/3) \right] \Delta t \quad (5)$$

可将定子三相电流偏差表示为空间矢量形式  $f(\Delta \bar{i}_s)$ ，即有

$$f(\Delta \bar{i}_s) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ \Delta i_A + \Delta i_B e^{j\frac{2\pi}{3}} + \Delta i_C e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{L_d L_q} (L_d - L_q) |\bar{u}_s| \Delta t e^{j(2\theta_c - \pi)} \quad (6)$$

通过对定子三相电流的检测，由式(6)可以计算出  $f(\Delta \bar{i}_s)$ ，便可估计转子位置角 $\hat{\theta}_c$ ，即

$$\hat{\theta}_c = \frac{\arg(f) - \pi}{2} \quad (7)$$

## 3 永磁同步传动系统应用及发展趋势

在伺服系统、电梯等领域，永磁同步传动系统的应用已经相当普遍，不再赘述。这里主要介绍一下正在蓬勃发展的永磁同步传动系统在轨道交通、电动汽车、电力推进及风力发电等领域的应用。

### 3.1 轨道交通领域<sup>[12-17]</sup>

在铁道车辆牵引系统领域,自2007年法国阿尔斯通宣称其创造世界第1速的AGV列车搭载了永磁牵引系统以来,永磁同步传动系统在该领域的应用和研究获得广泛关注。目前,已经开始商业运营的永磁同步牵引系统如表1所示,基本集中在欧洲和日本市场,以阿尔斯通、庞巴迪和东芝的永磁牵引系统为代表。另外,表2提供了一些在研究过程中的原型机和试验样车,其中南车株洲电力机车研究所有限公司(简称南车株洲所)于2011年11月在沈阳地铁2号线完成了首台国产地铁永磁牵引系统的上线装车试验,载客运营60 000 km;针对高速动车组完成了600 kW永磁同步牵引系统样机的试制,预计今年实现装车;同时针对低地板车辆也完成了120 kW永磁同步牵引系统的地面验证。

表1 PMSM商业运营

| 运营商      | 车型            | 生产商      |
|----------|---------------|----------|
| 意大利 NTV  | 25 列 AGV      | 阿尔斯通     |
| 瑞士联邦铁路   | 59 列双层列车      | 庞巴迪      |
| 法国国家铁路公司 | 31 列有轨电车      | 阿尔斯通     |
| 法国国家铁路公司 | Regiolis EMUs | 阿尔斯通     |
| 法国国家铁路公司 | Omneo EMUs    | 庞巴迪      |
| 布拉格      | 低地板           | 斯柯达      |
| 东京地铁     | 16000 系列车辆    | 日立, 川崎重工 |
| JR 东日本   | E331 系列       | 东芝       |
| 圣保罗      | 单轨车           | 庞巴迪      |

表2 PMSM原型机和样车

| 运营         | 车型                    | 生产商   |
|------------|-----------------------|-------|
| 慕尼黑 U-Bahn | C19 地铁 (Syntegra 转向架) | 西门子   |
| 中国         | 地铁车辆                  | 南车株洲所 |
| 中国         | 高速列车                  | 中国南车  |
| 土耳其        | 低地板                   | 阿尔斯通  |
| 日本         | E954/E955 系列机车        | 东芝    |

### 3.2 电动汽车领域<sup>[18-19]</sup>

永磁同步驱动系统被认为是最具竞争力的电动汽车电传动系统,能全面满足电动汽车对其驱动电机的效率、尺寸、质量等较高的要求。日本丰田于1997年2月发布的混合动力汽车“Prius”是世界上最早采用PMSM作为驱动系统的电动汽车。近十年来,丰田又相继推出了LS 600h EV和Camry EV等多款装载PMSM的混合动力汽车。2010年日产推出了全球第一款量产纯电动汽车Leaf,其续航里程大于160 km,采用的也是PMSM。事实上,世界各大汽车公司在这几年推出的电动汽车都纷纷采用永磁同步驱动系统,如表3所示。南车株洲所已经完成了15~150 kW全系列永磁同步电机驱动系统的开发,并且实现了3 000多台套的商业运营,最高已实现了80万km的运营。

表3 最近推出电动汽车PMSM对比

| 汽车型号              | 电机种类 | 额定转矩 /N · m | 额定功率 /kW |
|-------------------|------|-------------|----------|
| 本田 2010 Prius     | PMSM | 138         | 60       |
| 尼桑 LEAF           | PMSM | 280         | 80       |
| 大众 Audi A8 Hybrid | PMSM | 120         | 34       |
| 比亚迪 F3            | PMSM | 400         | 50       |
| 标志 Sr1            | PMSM | 178         | 70       |
| 长安 S460           | PMSM | 130         | 35       |

### 3.3 船舶电力推进<sup>[20-21]</sup>

永磁同步电动机的优点使得其非常适用于目前先进的吊舱式船舶推进系统(POD)。采用永磁电力推进系统,能实现船舶机动性更好,振动噪声小,推进效率高,全寿命费用更低,并且其可靠性、可维护性大大增加。西门子和肖特尔特公司联合开发的吊舱式推进系统SSP以及ABB推出的Compact Azipod吊舱式推进系统采用的都是永磁同步电动机。

DRS公司在美国海军新一代驱逐舰DD(X)计划中,为美国海军DDG-1000战舰开发了18 MW 永磁同步电机(图6),并于2007年通过测试。2014年初,DRS公司获得韩国新一代“仁川”级多功能护卫舰机电混合推进系统合同,其中的永磁推进电机由DRS电力技术公司完成,预计2015年交付。



图6 DRS公司18 MW 永磁电推电机

### 3.4 永磁直驱风力发电机组<sup>[22-23]</sup>

永磁直驱风力发电机拥有更强的电网兼容性,具备较强电容补偿、低电压穿越能力,对电网冲击小,省去齿轮箱,维护费用低,噪声更低,与双馈发电机相比,发电效率平均能够提高5%~10%。Prokon Nord为海上风力发电开发了5 MW的风力发电机组(如图7),其最高转速147 r/min,已经运行于北海和诺曼底海岸的3个风场。中国国内,湘潭电机集团已经量产2 MW直驱式永磁风力发电整机机组,并开发出5 MW直驱型永磁风机;金风科技已将1.5 MW和2.5 MW永磁直驱机组批量生产。南车株洲所已经完成2.5 MW风力发电永磁同步驱动系统的开发,并完成了地面验证。

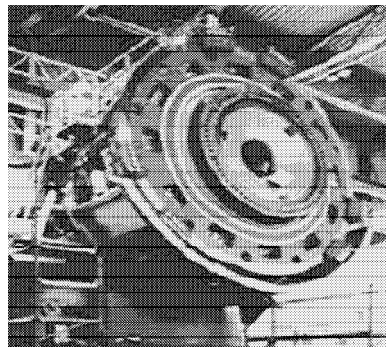


图7 Prokon Nord 5 MW 永磁风力发电机

### 3.5 永磁同步传动系统的发展趋势

采用永磁同步直驱传动系统,发挥永磁同步电机

的终极优势,必然是动力传动系统的未来发展趋势。

目前看来,永磁直驱风力发电系统已经是风力发电领域的一个主要方向。而在轨道交通领域,永磁直驱牵引系统具有启动牵引力大、无齿轮箱、免维护、损耗低及转向架设计灵活等优点,已经成为研究热点。日本正计划将在现有新干线上采用以永磁同步电机直接驱动的新型高速列车DDM。

除了风力发电、轨道交通领域,永磁直驱系统在电动汽车、直驱电梯传动、流程工业、洗衣机等需要低速大扭矩的领域都有很大应用前景。如图8所示,在有的电动汽车中,采用外转子式的轮毂电机,将永磁电机做在车轮中,使得车轮的转速和电机相同,一般最高转速在1 000~1 500 r/min,这样可以省略大量部件,使车辆结构更简单,可实现多种复杂的驱动方式。如图9所示为Kone公司电梯传动用直驱电机,其为双盘式结构,功率350 kW,转速214 r/min。

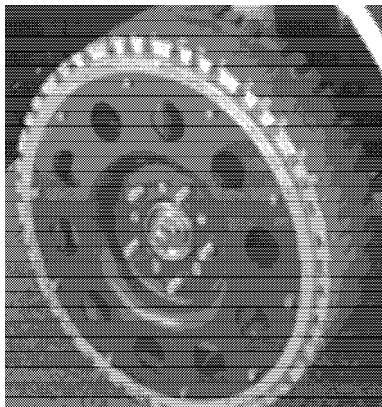


图8 三菱外转子轮毂电机

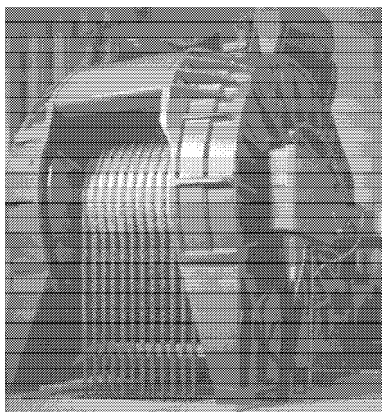


图9 Kone 电梯传动电机

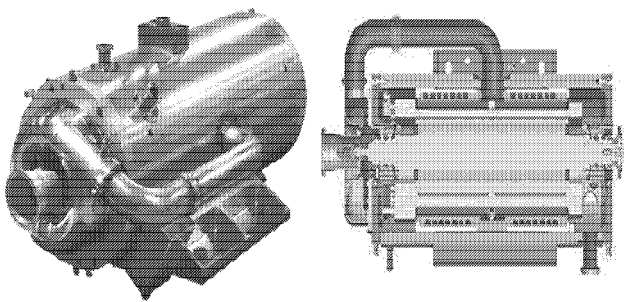


图10 高速压缩机及其剖面图

前面介绍的永磁直驱传动系统的一个共同特点就是低速大转矩,实际上另一类高速直驱永磁电机的发展和应用也值得关注。这类系统最典型的应用就是高速压缩机驱动系统。如图10所示为一个高速压缩机的示意图,其中采用的永磁电机功率2 MW,转速22 500 r/min,相比传统系统,质量和体积都减小了20%。目前,格力正在推出的中央空调离心机组就是采用高速直驱模式,最高电机转速为12 000 r/min,由南车株洲所提供传动系统。

## 4 结语

应该看到,随着人类对社会环境的关注增强,永磁同步传动系统必然获得更多的应用空间。虽然对永磁同步牵引传动系统的研究已经取得了一定进展,但是还有许多技术问题有待解决,特别是在永磁同步电机在低速直驱和高速直驱系统应用。尤其在永磁同步电机系统、多电机永磁同步电机系统设计方法,永磁同步电机转子磁路的设计方法,气隙磁场优化方法,永磁同步电机的制造工艺及永磁同步电机高效率控制策略等方面,应特别重视并加大研究,实现与国外先进技术的同步,在新一轮的技术竞争中获得优势,使我国在永磁同步传动技术领域占据领先优势,从而为我国的低碳化做出贡献。

## 参考文献:

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 许峻峰, 冯江华. 永磁同步传动系统的应用概况[J]. 大功率变流技术, 2009(1): 38-43.
- [3] Krishnan R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
- [4] 温有东. 电动汽车永磁同步电机的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [5] Juliette Soulard. System analysis of Permanent Magnet Traction Drives[R]. Stockholm: KTH, 2012.
- [6] Morimoto S, Sanada M, Takeda K. Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high-performance current regulator[J]. IEEE Trans. Ind. Applicat., 1994, 30(4): 920-926.
- [7] Morimoto S, Takeda Y, Hirasaka T, et al. Expansion of operating limits for permanent magnet by current vector control considering inverter capacity[J]. IEEE Trans. Ind. Applicat., 1990, 26(5): 866-871.
- [8] Kim J M, Sul S K. Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation[J]. IEEE Trans. Ind. Applicat., 1997, 33(4): 43-48.
- [9] 郭新华, 王永兴, 赵峰, 等. 基于SHEPWM的中压大功率牵引永磁同步电机两电平控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 76-82.
- [10] Benjak O, Gerling D. Review of position estimation methods for IPMSM drives without a position sensor Part II: adaptive methods[C]. Rome: ICEM, 2010.
- [11] Benjak O, Gerling D. Review of position estimation methods for IPMSM drives without a position sensor Part III: methods based on saliency and signal injection[C]. Incheon, Korea: ICEMS, 2010.
- [12] 冯江华. 城轨车辆永磁同步电机牵引系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [13] Matsuoka K. Development Trend of the Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Traction[J]. IEEE Trans., 2007(2): 154-161.
- [14] Alstom Makes Advances In Traction Power[J]. IRJ, 2004, 44(4): 32.

(下转第13页)

