

高速电机发展现状以及关键技术综述

肖家锴¹, 郑高峰¹, 刘朋熙¹, 林德强²

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061; 2. 重庆大学 输配电
装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 目前, 高速电机已在众多工业领域中得到了广泛的应用。文中总结和讨论高速电机的发展现状和未来的研究方向。首先对不同类型高速电机的最新研究进展进行了介绍, 并总结了各类高速电机的特点。其次, 详细讨论了铜耗、铁心损耗、风摩损耗以及套管损耗。随后, 介绍了不同轴承的应用特点及转子强度、动态性能的研究现状。最后, 通过在参考文献的基础上进行分析和总结, 明确各类高速电机存在的问题, 展望了高速电机未来的研究方向。

关键词: 高速电机; 铁心损耗; 风摩损耗; 转子强度

中图分类号: TM355 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed20259

Overview for the Development and Key Technologies of High Speed Motors

XIAO Jiakai¹, ZHENG Gaofeng¹, LIU Pengxi¹, LIN Deqiang²

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, Anhui, China; 2. State Key Laboratory of
Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: At present, high-speed electric machines (HSEMs) have been widely used in many industrial fields. The development status and future research directions of high speed motors were summarized and discussed. Firstly, the latest research progress of different types of high-speed motors was introduced, and the characteristics of various high-speed motors were summarized. Secondly, copper loss, core loss, wind and friction loss, and casing loss were discussed in detail. Subsequently, the application characteristics of different bearings, the research status of rotor strength and dynamic performance were introduced. Finally, through the analysis and summary on the basis of the reference literature, the problems of various high-speed motors are clarified, and the future research direction of high-speed motors is prospected.

Key words: high speed electric machines (HSEMs); core loss; wind and friction loss; rotor strength

高速电机具有体积小、功率密度大、可直接驱动、传动效率高和可靠性高等优点^[1]。在涡轮增压器、高速机床、飞轮储能系统、直升机发动机以及气体压缩机等应用领域具有广阔的应用前景,也是当前国内外学者研究的重点方向之一^[2]。

虽然高速电机的设计和分析遵循基本的电磁原理,但是由于电机转速以及交变频率过高,使得高速电机存在转子结构和材料的选取、电机损耗的准确计算、高速轴承系的选择以及转子强度和转子动态性能的研究等问题需要进一步的研究和分析^[3-5]。

综上所述,虽然高速电机的发展和应用越来越成熟,但是依然存在着诸多问题亟待解决。本文首先介绍了国内外学者对各类高速电机研究的最新进展,绘制了到目前为止文献中出现过的样机参数并进行了分析;对不同类型高速电机的极限指标进行了介绍。随后分别介绍了损耗分析、转子强度及动态性能分析的发展现状。最后,讨论了高速电机发展的关键技术和主要研究方向。

1 高速电机发展现状

到目前为止,成功实现高速化的电机类型

有:感应电机、永磁电机、开关磁阻电机、同步单机电机以及爪极电机(Claw)等。对于高速应用,感应电机(IM)永磁电机(PMSM)和开关磁阻电机(SRM)是主要选择。在低功率和200 kr/min以上的速度范围内,PMSM似乎是唯一的选择^[1]。本文系统地叙述了各类高速电机的特点,详细地介绍了各类电机的最新发展现状。

1.1 高速感应电机

感应电机的转动惯量低、结构简单且坚固,可以较长时间地工作于高速状态下,所以具有广阔的应用范围。国内对于高速感应电机的研究较迟,沈阳工业大学、海军工程大学、哈尔滨工业大学以及浙江大学等在近年来进行了许多的研究工作。但是,到目前为止,国内对于高速感应电机的研究和应用要远低于国外。

在高速感应电机中,实心转子比传统的钢板转子坚固得多,常用于大功率高速感应电机(IM)中。此外,固体转子电机可以达到更高的转速。然而,固体转子也有一定的缺点,其中固体转子涡流损耗相对较高。固体转子涡流损耗主要是由时间、空间气隙磁通密度高次谐波引起的。抑制高次谐波是降低转子涡流损耗的关键技术。为了降低绕组受电机主磁场影响产生涡流损耗,文献[2]采用单根直径很小的Litz线绕制。然而,Litz线的高成本阻碍了其在工业应用中的发展。

近年来,对于高速感应电机的研究主要集中于电磁性能和损耗的计算与分析。文献[3]以一台12 kW,45 kr/min的高速感应电机为例对采用开槽实心 and 实心钢2种转子结构时的功率损耗进行了对比。

功率损耗分布如图1所示^[4]。研究表明采用轴向开槽方式时,定子铜耗和转子损耗得到了有效地降低,机械损耗和定子铁心损耗则只有略微的升高。

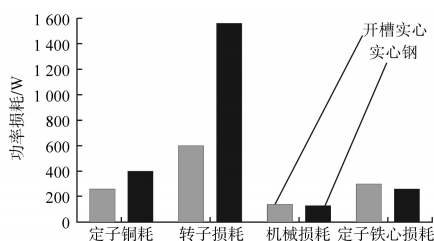


图1 功率损耗分布图

Fig.1 Distribution map of power loss

文献[4]以一台2 MW,12 kr/min的样机为例,

提出两种可能减小转子涡流损耗的定子结构如图2所示^[5],并通过有限元分析加以验证。定子齿凹口结构图如图2a所示,在半闭合定子槽的情况下,可以在定子齿上增加2个特殊的槽形成1个凹口,以补偿定子槽下的磁通密度损失,从而提高了气隙磁通密度。磁性槽楔结构如图2b所示,可以有效地抑制定子槽效应,使气隙磁通密度曲线更加平滑。

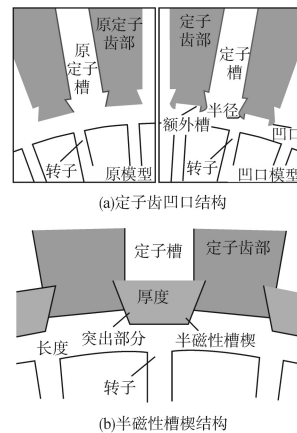


图2 两种定子结构

Fig.2 Two stator structures

通过对图2结构详细地研究发现,定子齿凹口结构虽然可以增加基波气隙磁通密度并降低空载定子电流,但是由于定子开口较宽,所以不能抑制转子涡流损耗。同时,不能很好地改善额定负载下的基波气隙磁通密度。而半磁性槽楔可以有效地抑制定子槽效应,使气隙磁通密度曲线更加平滑。但是,如此设计会增加电机的加工难度以及制作成本,同时也对电机运行时的稳定性提出了要求。

此外,为了获得最佳的电磁性能,文献[5]中设计了一台20.5 kW,23.6 kr/min的轴向开槽实心转子高速感应电机。为了获得最佳的电磁性能,采用有限元法对开槽实心转子的开槽深度和宽度参数进行了优化,仿真结果如图3所示^[5]。

由图3a可以看出,当开槽深度在25~31 mm之间时均可以获得较大的电磁转矩,其中开槽深度为28 mm时电磁转矩最大。图3b中在开槽宽度为1.5 mm时,可以保证最小的输入电流以及最大的电磁转矩。

由此文中得到了所设计样机开槽部分的最佳参数,以保证得到最优的电机性能。但是文中仅对一种难度值的高速感应电机进行分析,并未对其余难度值进行研究,缺乏指导意义。

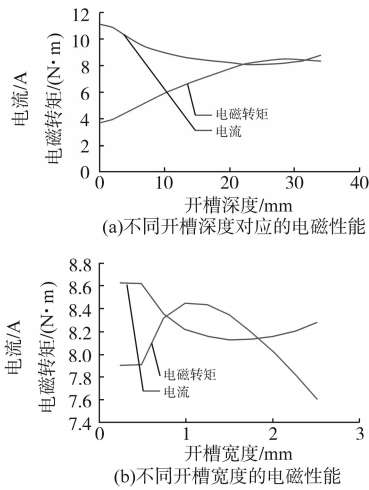


图3 开槽深度和宽度对电磁性能的影响

Fig.3 Effect of slot depth and width on electromagnetic performance

1.2 高速永磁电机

永磁电机因其具有效率高、转速范围大等优点,广泛应用于高速电机领域,如气体压缩机、鼓风机、飞轮储能系统以及高速离心压缩机等。高速永磁电机的结构图^[6]如图4所示。

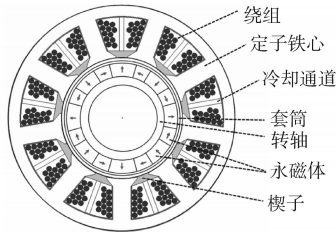


图4 高速永磁电机结构图

Fig.4 Structure of high speed permanent magnet motor

在低速或中速电机中,风摩损耗和涡流损耗等转子能量损失往往可以忽略不计,而在高速永磁无刷电机中,这些能量损失可能非常严重,并可能导致转子出现显著的温升。温升会极大地影响永磁体的性能,设置出现退磁现象。所以准确计算电机温升和对电机散热的设计是高速永磁电机的研究重点^[7]。

浙江大学沈建新教授团队在文献^[6]中以一台 10 kW, 70 kr/min 的高速永磁无刷电机为例。分析了转子护套开周向浅槽对转子涡流损耗、风摩损耗、散热条件以及结构应力的影响。文中得出以下结论:周向开槽是降低转子涡流损耗最有效的方法,对套筒机械强度或转子动平衡的负面影响较小,在实际制造中最容易实现。

文献^[8]中对 150 kW, 17 kr/min 高速永磁电机的电磁损耗模型进行了研究。在考虑谐波和

旋转磁场影响的基础上,采用改进的建模方法对铁损进行了估计,精度较高。并通过实验验证了改进建模方法的有效性。在高速永磁电机的有限元分析中,利用温度相关的PM退磁模型研究了温度变化对机器性能的影响,提出了优化转子结构的方法,并用有限元法对其进行了对比研究,提高了机器在恶劣条件下的抗退磁能力。最后,文中建立了高速永磁电机计算流体动力学(CFD)模型^[8],模型如图5所示。利用该模型对机床温度分布进行了研究。通过将实验测量结果和仿真结果进行对比,验证了高速永磁电机模型建模的有效性。

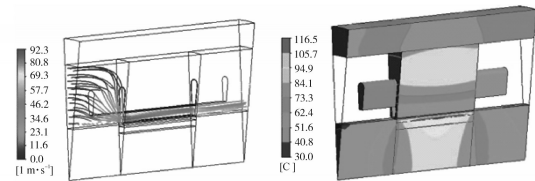


图5 样机额定状态下CFD模型仿真结果

Fig.5 CFD model simulation results under the rated state of the prototype

国内方面,除沈阳工业大学研制了一台 1.12 MW, 18 kr/min 的高速永磁电机以外,其余高校或研究机构对高速永磁电机的研制多集中于中小功率和中低转速阶段,对于 MW 级和超高转速的永磁电机研究较少。

1.3 高速开关磁阻电机

尽管相较于感应电机和永磁电机,开关磁阻电机在高速电机中不太常见,但是已经应用于一些特定的工业领域。更常见的应用领域是低功率(1 kW)、低成本的大规模生产市场,如吸尘器和鼓风机^[9]。这些机器通常是采用四槽两极的配置。

为了满足实际工程需要,文献^[10]提出了一种非线性形状的变气隙转子磁极,以改善任意转子位置的自启动转矩特性。样机实测转速为 30 kr/min,转矩为 0.2 N·M。根据转子的位置,优化了转子磁极形状,减小了转矩脉动。分析结果表明,所提出的高速开关磁阻电机具有平顶且较宽的正转矩范围。

1.4 高速爪极电机

高速爪极电机不仅结构简单、成本低,而且具有效率和功率密度高的优点。该电机的爪极部分采用具有低涡流损耗、各向同性、可加工成任意形状等优点的软磁材料制成。但是,高速爪极电机损耗较大且发热严重。

文献[11]基于有限元软件分析电机内部的磁场特点,建立考虑三维磁场分布的铁耗计算模型并利用三维流体场对转子空气摩擦损耗进行分析。虽然验证了理论的正确性,但是通过计算值与实验值的对比发现,随着频率的增大,计算值与实验值的误差也随之增大。

文献[12]提出一种磁热顺序耦合方法来分析一台采用软磁复合材料的高速爪极电机,采用三维有限元方法计算磁场和热场,此外采用旋转磁化条件下的计算模型进行铁耗计算。并设计了一台2 kW, 20 kr/min的样机对理论分析结果的正确性进行验证。通过试验证明了本文提出的磁热耦合分析方法能够准确地分析电机温度分布。

利用现有文献中出现的高速电机样机参数绘制图6(图中括号内2个数字分别代表电机的转速和功率,单个数字为功率密度),并查阅资料得到现有不同类型高速电机的特点如表1所示。由图6和表1,我们可以得到以下结论。感应电机、永磁电机、开关磁阻电机是高速电机最常用的3种类型。

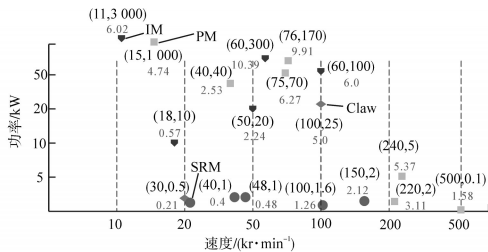


图6 不同电机发展现状

Fig.6 Development status of different motors

表1 各类高速电机特点

Tab.1 Characteristics of various high speed motors

电机类型	感应电机	永磁电机	开关磁阻电机	爪极电机
温度影响	损耗增加。	永磁体退磁。	铜耗和铁心损耗增加。	损耗增加。
优点	无永磁体; 结构坚固 成本低。	高功率密度; 高效率。	无永磁体,转动惯量低; 结构坚固,转子结构简单; 容错率高。	高功率密度; 高效率; 结构简单成本低。
缺点	转子损耗高; 需要冷却系统; 低功率因数; 低效率。	永磁体抗拉强度小,需要保护套; 转动惯量高; 高磁铁涡流损耗。	变频器功率等级高; 控制策略复杂; 高转矩脉动; 噪声大。	磁路结构复杂; 漏磁比较多; 计算相对困难。

文献[13]基于20 kW, 26 000 r/min的高速电机,对采用3种不同类型转子的电机性能进行了

对比,得到永磁电机的效率和功率密度最高,开关磁阻电机的效率居中、功率密度最低的结论。

在所有种类的高速电机中,仅有实心转子高速电机可以使转子表面线速度达到400 m/s且难度值高达 10×10^5 。具有高强度护套的表贴式永磁电机的难度值可达 13.4×10^5 ,转子表面线速度达到314 m/s。使用高强度叠片的感应电机比采用常规叠片感应电机的难度值和转子表面线速度明显高出许多。爪极电机的难度值最低且转子表面线速度也较小。

2 高速电机损耗分析

由于高速运行,高速电机的基频非常高并且随之产生大量的损耗。高速电机中损耗的主要来源有:铜耗、铁心损耗和风摩擦损耗。此外在高速电磁系统中还存在其他损耗原件包括套管损耗。高速电机中的绕组电流和铁心磁通的频率较高,使得定子绕组会产生明显的不可忽略的集肤效应和邻近效应,增大了铜耗;高基波频率增大了铁心损耗;转速的升高使得常规电机中风摩擦损耗明显上升。近年来,国内外众多学者对高速电机的损耗特性进行了细致的研究,下面将根据不同损耗类型进行介绍。

2.1 铜耗

通常,对于使用适当冷却系统的高功率密度应用,增加电负载以实现所需的输出功率。然而,由此产生的铜损导致绕组温度升高,这可能会缩短绝缘寿命并达到机器的热限制。图7为在最高速度下运行时某高速永磁电机损耗的各部分占比图。对于此应用,铜损占机器总损耗的54%。因此,精确计算铜损可以准确地估算机器性能。

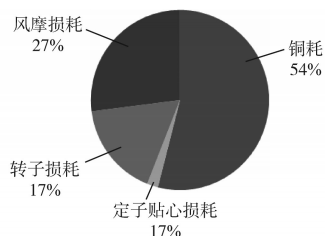


图7 高速永磁电机损耗占比

Fig.7 Loss ratio of high speed permanent magnet motor

电机高速运行时,电机中的铜耗明显增大,主要是受到集肤效应和邻近效应的影响。此外,有槽电机中槽内漏磁以及无槽电机中的主磁场也会在导体内部感应出涡流,增大定子铜耗。集

肤深度(skin depth)定义为

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

式中: ρ 为导体的电阻率; ω 为激励的角频率; μ 为导体的磁导率。

对于圆形导线而言,由于集肤效应产生的电阻可以用下式表示:

$$R_{\text{skin}} = \frac{R_{\text{dc}}\zeta}{2} \left(\frac{\sinh \zeta + \sin \zeta}{\cosh \zeta - \cos \zeta} \right) \quad (2)$$

其中 $\zeta = \frac{\sqrt{\pi} d}{2 \delta}$

式中: R_{dc} 为圆形导线的直流电阻; d 为圆形导线的线径。

与集肤效应相比,邻近效应要更为复杂和难以预测。在以往的多数研究中,邻近效应往往是忽略的。但是当频率和磁导率越高时,电阻系数越小,这种现象则会越明显。因此在高速电机中,高频励磁会在电机绕组中出现较大的邻近效应损耗,不应被忽视。邻近效应产生的电阻近似由下式表示:

$$R_p = \frac{R_{\text{dc}}\zeta}{2} (2m_{\text{ph}} - 1)^2 \left(\frac{\sinh \zeta - \sin \zeta}{\cosh \zeta + \cos \zeta} \right) \quad (3)$$

式中: m_{ph} 为线层数。

通过以上各式可以看出,当激励的频率增大时,绕组的等效交流电阻将会明显增大,出现较大的铜耗。同时,从邻近效应的公式可以看出,由邻近效应产生的电阻会随着线层数的增大而增大。

文献[14]提出了一种综合分析工具,用于估算高转子转速下带集中绕组的表贴式永磁电机定子绕组的总临近损耗。与有限元分析相比,该分析模型的计算速度要快得多。文中通过对一台30 kW, 14 kr/min的表贴式永磁电机的临近损失进行分析对比,确定了该模型精确的计算结果。该模型在改进高速交流电机的设计方面具有优良的前景,特别是在以效率为设计标准的电力牵引应用中具有特殊的重要性。

2.2 铁心损耗

对于高速电机而言,铁心损耗的增大主要是由于高基波频率。计算铁心损耗的Steinmetz公式如下所示:

$$P_c = k_h B^a f + k_{\text{ex}} (Bf)^{1.5} + k_c (Bf)^2 \quad (4)$$

式中: B 为最大磁通密度; f 为磁场交变频率; k_h 为导磁体材料决定的磁滞损耗系数; k_c 为取决于铁

磁材料性质的涡流损耗系数; k_{ex} 为附加损耗系数; a 为Steinmetz系数。

在文献[15-16]中,Steinmetz公式中的系数并非常数,而是最大磁通密度和基波频率的函数。基于可变系数改进的铁心损耗的公式如下所示:

$$P_c = k_h(f,B) B^{\alpha(f,B)} f + k_{\text{ex}}(f,B) (Bf)^{1.5} + k_c(f,B) (Bf)^2 \quad (5)$$

文献[17]中提出采用正交分解模型来简化计算椭圆旋转磁化时的铁心损耗。在考虑谐波影响的前提下,从磁密波形的角度将磁密分解为两个正交分量,再将两个分量进行傅里叶分解,对各次谐波进行叠加,得到铁心损耗计算的正交分解模型如下式所示:

$$P_{\text{Fc}} = k_h f \sum_{k=1}^n k (B_{kr}^2 + B_{k\theta}^2) + k_c f^2 \sum_{k=1}^n k^2 (B_{kr}^2 + B_{k\theta}^2) + k_{\text{ex}} f^{1.5} \sum_{k=1}^n k^{1.5} (B_{kr}^{1.5} + B_{k\theta}^{1.5}) \quad (6)$$

式中: B_{kr} , $B_{k\theta}$ 分别为径向和切向磁密 k 次谐波幅值, T。

利用正交分解模型将椭圆旋转磁场所产生的损耗等效为2个正交分量,并将2种计算方法进行对比如图8所示^[15]。由图8可以看出,正交分解法比有限元直接得到的铁心损耗增加了20%。

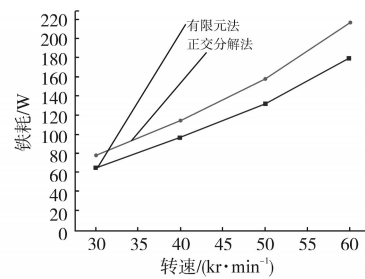


图8 两种铁耗计算方法对比

Fig.8 Comparison of two iron consumption calculation methods

此外,文献[18]提出一种新型高速永磁电机转子的设计方案。文中提出将该转子采用故意设计的漏磁通路径,控制永磁材料的磁化(高速运行时降低磁化状态),能够在高频下降低铁心损耗。

2.3 风摩损耗

风摩损耗是由温度、密度、转子周围流体压强、转子长度、半径以及转子转速等因素产生的损耗。中低速电机中的风摩损耗一般比较小,很少单独计算。但在高速电机的计算中,风摩损耗是不可能忽略的损耗之一,甚至是电机中的主要损耗。

在文献[19]中提出了在同心圆柱内旋转的光滑圆柱体的风阻损失估计的理论方程:

$$P_{\omega} = \pi C_d \rho_f r^4 \omega^3 L \quad (7)$$

式中: ρ_f 为流体密度; r 为转子半径; ω 为角速度; L 为转子长度; C_d 为表面摩擦系数。

表面摩擦系数可由下式计算得到:

$$\frac{1}{\sqrt{C_d}} = 2.04 + 1.768 \ln \left(\omega r \frac{\rho_f}{\mu} \varphi \sqrt{C_d} \right) \quad (8)$$

式中: μ 为冷却液的动态粘度; φ 为气隙长度。

但是,对于转子表面不光滑的电机如开关磁阻电机,上述计算方法并不适用。由于转子表面不光滑,风摩损耗将会大大增加。

2.4 套筒损耗

对于某些高速电磁轴承,有时使用套筒来保持结构的完整性。套筒材料的选用通常是根使用要求而定。该套筒广泛应用于表面永磁电机中,也应用于一些高速感应电机、开关磁阻电机和内部永磁电机中。一些常用的套管材料包括铬镍铁合金、碳纤维、不锈钢、钛、铜铁合金和铜。不同套管材料的损耗会影响HSEMs的冷却效果和效率。因此,在机器设计中也应该仔细考虑套管的损失。

文献[20]以一台117 kW, 60 kr/min高速永磁电机为例,分析了多种材料制成的发电机套筒对发电机输出性能的影响,如图9所示。当转子套筒采用非磁性材料(不锈钢、碳纤维、铜)时,发电机铁心损耗和铜损耗变化不大。但是,当套管采用磁性材料(铜铁合金)时,永磁体的励磁性能和主磁通会降低。这样,定子铁心损耗就会降低。此外,研究表明,铁铜合金套筒损耗占比最高,而碳纤维套筒损耗占比最小。

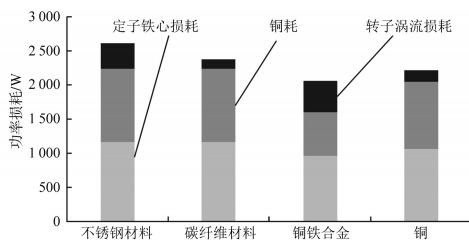


图9 不同材料套筒的各类损耗

Fig.9 Various types of losses for different material sleeves

3 高速电机转子动力学分析

在转子强度分析方面,沈阳工业大学张凤阁、王凤翔等进行了深入研究。文献[21]以一台100 kW, 60 kr/min的高速永磁电机为例,在不同

运行工况下对不同保护套的转子应力分布进行了解析法推导,总结了两种保护措施的设计规律,为高速永磁电机保护套的设计提供了依据。

文献[22]介绍了一台1.12 MW, 18 kr/min高速永磁电机的设计过程,对该电机的转子强度进行分析,并选择机械强度较高的碳纤维材料护套。文献[23]介绍了采用解析法和数值分析有限元法进行高速永磁电机转子强度分析的实用技术,并给出了对一台额定转速为60 kr/min的高速电机永磁转子强度的分析计算结果。此外,文献[24]以一台额定转速10 kW, 120 kr/min的高速永磁同步电机为例,给出了两种常用过盈配合高速电机转子的强度设计方法。

除了满足强度要求以外,高速永磁电机的转子还必须有良好的动态性能。即工作过程中应保证振动平稳。在中低速电机中,转子振动通常不是一个重要的问题,因为运行速度通常远低于第一固有频率。但是对于高速电磁轴承,转子的动力学问题变得更加重要和具有挑战性。HSEMs设计不当会引起共振振动,甚至不能旋转。文献[23,25]对转子动态性能进行了细致地研究。

4 结论

近年来,HSEMs得到了较为明显的发展和应,但是依然存在许多问题需要进一步研究。通过对以上参考文献的分析和总结,高速电机主要存在以下几个方面的问题:

1)在现有的文献基础上,多是通过有限元分析的方式对高速电机进行研究。后续研究应以电磁场、温度场、流体场以及应力场等多物理场耦合为基础进行分析,如此,可以更好地完成HSEMs的设计任务以及性能分析。

2)对于高速感应电机而言,除了需要新型高强度叠片的材料以及转子结构进行研究以外,文中也提到了实心转子结构存在涡流损耗大的问题。文献[5]虽未能完全解决涡流损耗的问题,但是可以通过改变或者优化定子结构的方式减小涡流损耗。此外,根据文献[6]可知,开槽实心转子高速感应电机的开槽深度与宽度均存在一个对应最优电磁性能的最佳值。在后续研究中,应对不同难度值与最佳开槽宽度和开槽深度的关系进行研究。这对于开槽实心转子高速感应电机的设计和优化具有重要的指导意义。

3)虽然高速永磁电机已实现广泛应用,但是

永磁体的抗拉强度依然是限制高速永磁电机的功率等级以及最高转速的主要原因之一。因此,需要对采用不同护套材料的电机进行分析,以确保永磁体在收到良好保护的前提下不会影响损耗和温升等性能。其次,高速永磁电机温度场的分析也至关重要。在后续的研究中,应以提高温度场分析精度、简化操作和降低成本为前提。

4)在损耗分析和计算的研究中,应充分理解不同类型高速电机中存在的不同损耗在高频电磁场下的电磁特性,对各类损耗准确建模、准确计算。对于风摩损耗而言,可以通过一些技术手段以减少风摩损耗。如在转子外部使用转子密封壳,用非磁性材料填充插入凹槽,在整个电机腔内保持恒定压力,平滑电机内部的冷却流路并利用氢气来冷却电机等。此外,风摩损耗的评估可采用计算流体力学(CFD)和实验数据相结合的方法。

5)由于高速电机相较而言体积更小,所以导致其散热较为困难。所以,应对各类电机的各种损耗进行准确建模,明确电机内部温度场的分布情况,优化冷却结构,创新冷却方式,以达到更好地冷却效果。此外,CFD技术虽然提高了计算精度,降低了样机试验和制作成本,但对计算机资源和电机设计人员的操作要求还比较高,有待进一步发展。

参考文献

- [1] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 高速电机发展与设计综述[J]. 电工技术学报,2016,31(7):1-18.
- [2] Schwager L, Tuysuz A, *et al.* Modeling and Comparison of Machine and Converter Losses for PWM and PAM in High Speed Drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014,50(2):995-1006.
- [3] Klima J, Vitek O. The Influence of the Rotor Slits on the Performance of High-speed Solid-rotor Induction Machine[C]//2016 17th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME), Prague, 2016:1-5.
- [4] Di C, Petrov I, Pyrhönen J J. Modeling and Mitigation of Rotor Eddy-current Losses in High-speed Solid-rotor Induction Machines by a Virtual Permanent Magnet Harmonic Machine [J]. in IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(12):1-12.
- [5] Oguz A H, Gülbahce M O, Kocabas D A. Design and Optimization of an Axially-slitted High-speed Solid Rotor Induction Motor[C]//2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, 2015:568-573.
- [6] Shen J X, Hao H, Jin M J, *et al.* Reduction of Rotor Eddy Current Loss in High Speed PM Brushless Machines by Grooving Retaining Sleeve[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7):3973-3976.
- [7] Fang H, Li D, Qu R, *et al.* Rotor Design and Eddy-current Loss Suppression for High-speed Machines with a Solid-PM Rotor[J]. in IEEE Transactions on Industry Applications, 2019,55(1):448-457.
- [8] Zhang Y, McLoone S, Cao W. Electromagnetic Loss Modeling and Demagnetization Analysis for High Speed Permanent Magnet Machine[J]. in IEEE Transactions on Magnetics, 2018,54(3):1-5.
- [9] Lee D H, Pham T H, Ahn J W. Design and Operation Characteristics of Four-two Pole High Speed SRM for Torque Ripple Reduction[J], IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60(9):3637-3643.
- [10] Ahn Jin-Woo, Minh Khoi, Huynh Khac, *et al.* Design and Analysis of High Speed 4/2 SRMs for an Air-blower[C]//in-Proc. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2010:1242-1246.
- [11] 刘光伟,赵新刚,张凤阁,等. 高速永磁爪极电机铁耗与空气摩擦损耗计算[J]. 电工技术学报,2015,30(2):148-154.
- [12] 黄允凯,胡庚生,朱建国. 顾及旋转铁耗的高速爪极电机三维磁热耦合分析[J]. 电工技术学报,2010,25(5):54-60.
- [13] Fodorean D, Popa D C, Minciunescu P, *et al.* Study of a High-speed Motorization for Electric Vehicle Based on PMSM, IM and VRSM[C]//International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, 2014:2577-2582.
- [14] Reddy P B, Jahns T M, Bohn T P. Modeling and Analysis of Proximity Losses in High-speed Surface Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings [C]//in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE'10), 2010:996-1003.
- [15] Ionel D M, Popescu M, Mcgilp M I, *et al.* Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel[J], IEEE Trans. Ind. Appl., 2007, 43(6):1554-1564.
- [16] Ionel D M, Popescu M, Dellinger S J, *et al.* On the Variation with Flux and Frequency of the Core Loss Coefficients in Electrical Machines[J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 2006, 42(3):658-667.
- [17] 鲍海静,梁培鑫,柴凤. 飞轮储能用高速永磁同步电机技术综述[J]. 微电机,2014,47(2):64-72.
- [18] Athavale A, Fukushige T, Kato T, *et al.* Variable Leakage Flux (VLF) IPMSMS for Reduced Losses over a Driving Cycle While Maintaining the Feasibility of High Frequency Injection-based Rotor Position Self-sensing[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, 2014:4523-4530.
- [19] Li S, Li Y, Choi W, *et al.* High-speed Electric Machines: Challenges and Design Considerations [J]. in IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016,2(1):2-13.
- [20] Li W, Qiu H, Zhang X, *et al.* Analyses on Electromagnetic and Temperature Fields of Superhigh-speed Permanent-mag-

况,使未来版本的安规标准更能体现我国的国情,必要时可以修改转化IEC标准。如果SAC/TC60/SC1与IEC/TC22/SC22G同步工作,即IEC在修订相关标准时,SAC/TC60/SC1多提出符合我国国情的建议,让IEC方面考虑并采纳SAC/TC60/SC1的建议,这无疑对国标的标准化工作具有深远的影响。这一点在UL 61800—5—1的标准中也能得到很好的印证。虽然美国的UL和IEC委员会进行了大量的讨论和协商,在UL 61800—5—1这部标准中我们仍能看到许多标识出来的美国的UL和IEC的标准的差异内容。

2)与IEC/UL同步维护安规标准。由于我国的标准工作起步较晚,等同转化而来的国家标准一般滞后于IEC标准,这会造成标准要求上的时间差问题,影响我国的国家标准的权威性,不利于指导行业发展,SAC/TC60/SC1应与IEC/TC22/SC22G同步工作,与IEC的维护工作保持节奏一致,在IEC标准维护的同时,维护我国的国家标准。

3)发展相关认证,保持行业健康发展。纵观欧美等发达国家的标准发展历程,产品的安全认证已经成为社会经济生活的重要一环。产品的安全认证作为人身安全的保证,被保险行业普遍参考,这为保障企业的利益、抵御风险起到了重要的作用。我国的电气传动行业可参照欧洲的

CE认证,发展我国的相关认证,虽然是自声明,但是可以适当提高市场准入门槛,带动相关产品安全性能普遍提高,有利于行业的有序、健康发展,提升我国的国际影响力。

参考文献

- [1] Underwriters Laboratories Inc. UL 508C—2016. Power Conversion Equipment[S]. US: Underwriters Laboratories Inc., 2016.
- [2] Underwriters Laboratories Inc. UL 61800—5—1—2017. Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems—Part 5-1: Safety Requirements—Electrical, Thermal and Energy[S]. US: Underwriters Laboratories Inc., 2017.
- [3] International Electrotechnical Commission. IEC61800—5—1: 2007. Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems—Part 5-1: Safety Requirements—Electrical, Thermal and Energy[S]. CH: International Electrotechnical Commission, 2007.
- [4] International Electrotechnical Commission. IEC 62477—1: 2012. Safety Requirements for Power Electronic Converter Systems and Equipment—Part 1: General[S]. CH: International Electrotechnical Commission, 2012.
- [5] 国家标准化管理委员会第60技术委员会第1分技术委员会. GB/T 12668.501—2013. 调速电气传动系统 第5-1部分:安全要求—电气、热和能量[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.

收稿日期:2019-05-27

修改稿日期:2020-05-07

(上接第9页)

- net Generator with Different Sleeve Materials[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 214, 61(6): 3056-3063.
- [21] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 高速永磁电机转子不同保护措施的强度分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 195-202.
 - [22] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 1.12 MW高速永磁电机多物理场综合设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 171-180.
 - [23] 王继强,王凤翔,鲍文博,等. 高速永磁电机转子设计与强度

分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 140-145.

- [24] 程文杰,耿海鹏,冯圣,等. 高速永磁同步电机转子强度分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 87-94.
- [25] 杜光辉,黄娜,张凤阁,等. 大功率高速永磁电机柔性转子系统模态分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 101-107.

收稿日期:2019-05-11

修改稿日期:2019-06-13