

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

徐翌翔,鲍晓华,许东滢,朱庆龙.
潜水永磁辅助同步磁阻电机转子
电磁方案设计.
电机与控制应用,2021,48(8):44.

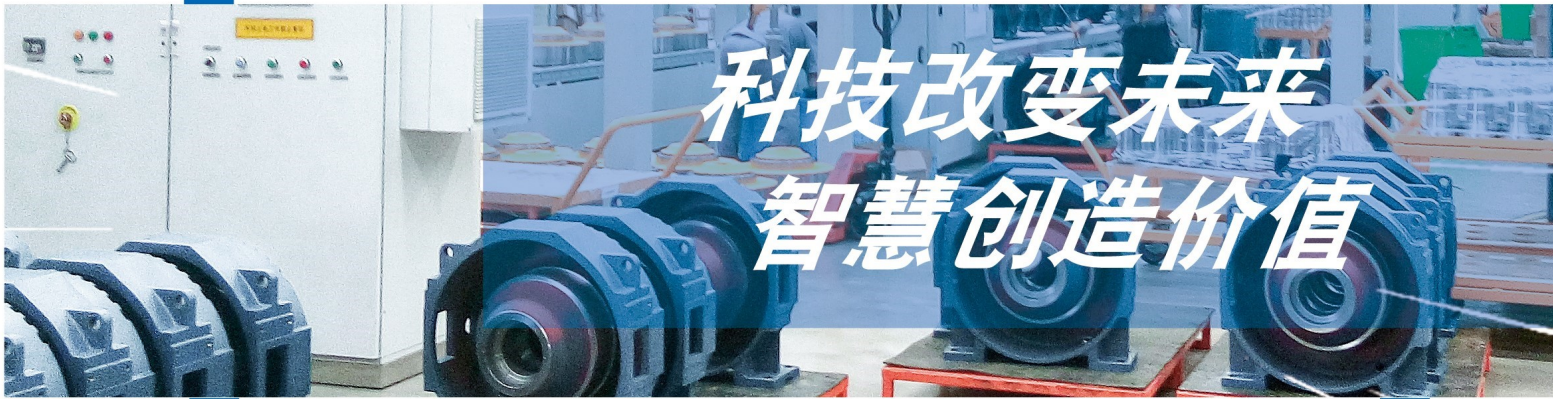


SEARI
上电科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

潜水永磁辅助同步磁阻电机转子电磁方案设计*

徐翌翔¹, 鲍晓华^{1,2}, 许东滢¹, 朱庆龙³

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学智能制造技术研究院, 安徽 合肥 230009;

3. 大型潜水电泵及装备安徽省重点实验室, 安徽 合肥 231131)

摘要: 为了满足最新电机能效等级国家标准的要求, 提高电机的运行效率, 以一台 55 kW 的充水式潜水电机为例, 提出了一种永磁辅助同步磁阻电机(PMASRM)转子电磁设计方法, 结合转子再制造技术, 取代传统的潜水感应电机转子, 将其改造成为潜水 PMASRM。设计的潜水 PMASRM 和传统的潜水感应电机具有相同的定子铁心结构和绕组形式, 提高了材料的利用率, 降低了制造成本。有限元仿真结果表明, 改造后的潜水 PMASRM 效率比潜水感应电机得到有效提高。

关键词: 潜水电机; 永磁辅助同步磁阻电机; 电磁设计; 转子再造

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)08-0044-06

doi: 10.12177/emca.2021.066

Design of Rotor Electromagnetic Scheme for Submersible Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor*

XU Yixiang¹, BAO Xiaohua^{1,2}, XU Dongying¹, ZHU Qinglong³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Intelligent Manufacturing Institute of Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

3. Anhui Province Key Laboratory of Large-Scale Submersible Electric Pump and Accoutrements, Hefei 231131, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the latest national standard of motor energy efficiency grade and improve the operation efficiency of the motor, a 55 kW wet submersible motor is taken as an example, and a rotor electromagnetic scheme design method of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASRM) is proposed. Combined with rotor remanufacturing technology, the rotor of traditional submersible induction motor is replaced and transformed into submersible PMASRM. The designed submersible PMASRM has the same stator core structure and winding form as the traditional submersible induction motor, which improves the utilization rate of materials and reduces the manufacturing cost. The finite element method results show that the efficiency of the modified submersible PMASRM is improved effectively compared with the submersible induction motor.

Key words: submersible motor; permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASRM); electromagnetic design; rotor remanufacturing

收稿日期: 2021-04-19; 收到修改稿日期: 2021-06-27

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51977055); 安徽省科技重大专项项目(201903a05020042)

作者简介: 徐翌翔(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电机与特种电机设计。

鲍晓华(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计理论及技术、电机电磁场理论分析和计算、大型电机及高速电机的可靠性技术。(通信作者)

0 引言

潜水电泵广泛应用于国家安全防治水工程领域,主要包括“机”与“泵”2部分,由潜水电机与潜水泵组成^[1]。作为潜水电泵系统的核心部件,目前广泛使用的潜水电机类型主要以直接接电网运行的三相感应电机为主。感应电机应用时间长、范围广,据相关统计,电力系统中60%的负载与感应电机相关^[2]。随着最新电动机能效等级强制性国家标准的提出和施行^[3],进一步提高电机效率势在必行。在IEC标准中,认为三相感应电机达到IE4标准或者IE5标准是一件非常困难甚至不可能的工作^[4]。上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司、云南铜业压铸科技有限公司、安徽皖南电机股份有限公司等联合攻关,成功制作出一批满足IE5标准的三相感应电机,但是工艺难度较高,并且消耗的材料大大增加^[5]。永磁辅助同步磁阻电机(PMASRM)是近年来逐渐受到关注的一种新型的电机^[6]。其定子铁心结构与绕组形式和感应电机高度相似,绝大多数场合可以通用,但是转子侧没有导条,比感应电机少了铝(铜)耗,理论上具有更高的效率,普遍被认为是一种对标IE5等级的电机^[7-8]。将PMASRM应用于潜水电机领域,一方面可以提高电机本身的效率,另一方面也可以通过变频调速运行的方式,改变潜水电泵的性能曲线,大大提高潜水电泵系统效率^[9-10]。

本文针对一款55 kW的充水式潜水感应电机,在保留定子与绕组不变的前提下,重新对转子进行电磁设计,将其改造成潜水PMASRM,研究了转子磁障的层数、结构和永磁体方案对电机性能的影响。有限元仿真结果表明,改造后的潜水电机具有更高的效率和功率因数。

1 潜水电机模型及参数

本文研究的某55 kW定子36槽4极充水式潜水感应电机在有限元中的仿真模型及网格剖分如图1所示,基本参数如表1所示。充水式潜水电机定子绕组为单层同心式,采用特制的耐水型电磁线,线径为3.55 mm,绝缘厚度为1 mm,并绕根数为1。较大的绝缘厚度使定子槽内含铜量偏低,良好的散热条件使定子电密取值较高。

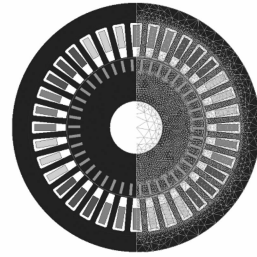


图1 潜水感应电机仿真模型及网格剖分

表1 电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	380	定子外径/mm	400
额定频率/Hz	50	定子内径/mm	225
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 460	转子内径/mm	85
极对数	2	铁心长度/mm	180
气隙长度/mm	1	每槽导体数	19
接法	Y	并联支路数	1

充水式潜水电机的水磨耗和气隙附近的结构密切相关。为了减小运行时的水磨耗,充水式潜水电机定转子通常做成闭口槽。而对于PMASRM来说,定子采用闭口槽可以降低电机转矩脉动,转子外圆存在增强机械强度的切向磁肋,实际上也类似于闭口槽,因此非常适合充水式潜水电机的应用需求。

2 PMASRM 原理

采用永磁同步电机(PMSM)分析逻辑定义转子 d 、 q 轴,典型的PMASRM转子结构如图2所示。

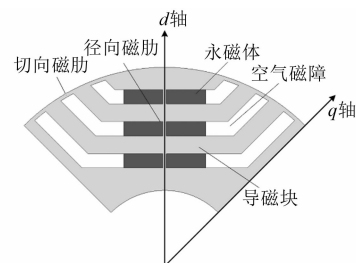


图2 PMASRM 转子结构

在稳态时,PMASRM电磁转矩式为

$$T_{em} = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = p[\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] =$$

$$p\psi_{pm}i_q + p(L_d - L_q)i_d i_q = p\psi_{pm}i_s \sin \beta + \frac{1}{2}p(L_d - L_q)i_s \sin^2 2\beta \quad (1)$$

式中： ψ_{pm} 为永磁磁链； ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 轴和 q 轴磁链； L_d 、 L_q 分别为 d 轴和 q 轴电感； i_d 、 i_q 分别为 d 轴和 q 轴电流； R_s 为定子绕组电阻； ω_e 为电同步角速度； i_s 为定子电流，与定子合成磁动势对应； β 为定子电流空间矢量与转子 d 轴的夹角，也称为电流角。

PMASRM 转矩构成包含了 2 部分：(1) 与永磁磁链 ψ_{pm} 有关的永磁转矩；(2) 与 d 、 q 轴电感差 ($L_d - L_q$) 有关的磁阻转矩。

PMASRM 的永磁体主要起助磁作用，通常以铁氧体为主，剩磁比使用稀土永磁体的 PMSM 低很多，永磁转矩占整个转矩比例的较小，电磁转矩主要以磁阻转矩为主。电机 d 、 q 轴电感又可以以磁阻的形式表示为

$$\begin{cases} L_d = (k_w N)^2 \frac{1}{R_{md}} \\ L_q = (k_w N)^2 \frac{1}{R_{mq}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： R_{md} 和 R_{mq} 分别为电机 d 轴等效磁路总磁阻和 q 轴等效磁路总磁阻； k_w 为绕组系数； N 为每相串联匝数。

电机 d 、 q 轴磁路的磁阻直接影响着电机的磁阻转矩，而磁阻又与磁路各部分的尺寸和铁心的饱和程度有关。由于转子磁障数多、结构复杂，转子结构对电机性能影响较大。

3 转子电磁设计

对于充水式潜水电机，气隙长度不仅仅影响电机的电磁性能，也会影响电机的水磨耗。气隙长度越大，水磨耗越低，电机的效率则可能越高^[11]。电机的气隙长度保持不变，依然和原先的潜水感应电机一样选择 1 mm。磁肋宽度均为 2 mm，永磁体类型为铁氧体永磁体，牌号为 TDK 的 FB6H。

常见的具有多层磁障的转子结构类型有“V”型、“C”型和“U”型等^[12-13]，其中“V”型和在此基础上改良的结构通常应用于稀土 PMSM 中，“C”型结构常见于同步磁阻电机中，“U”型结构由于中间磁障的形状为矩形，便于放入永磁体助磁，经

常应用于 PMASRM 中。因此本文选择“U”型磁障结构并在此基础上进行优化和设计。具有多层磁障结构的转子磁路非常复杂，应用磁路法分析计算的传统设计方法十分困难，所以直接采用有限元法进行仿真设计。在设计阶段有限元仿真时均采用理想相电流，有效值为 120 A，控制策略为最大转矩电流比控制。

3.1 磁障层数选择

在文献[14]中，针对 PMASRM 磁障层数对电机性能的影响做了大量仿真和试验研究，得出在相同电枢电流下，磁障层数 ≥ 3 ，电机 d 、 q 轴电感差异基本不变，而磁障数越多转子结构强度则会下降，所以 3 层磁障和 4 层磁障的 PMASRM 最为常见。转子磁障末端类似于闭口槽会对气隙磁场的谐波成分产生影响，磁障数决定了磁障末端的数量，进而会影响气隙磁场导致电机转矩脉动。图 3 显示了采用 3 层磁障和 4 层磁障时的转矩曲线，可以看出选择 3 层磁障时的转矩脉动远大于 4 层磁障，因此对于本文 36 槽 4 极的定子，选择 4 层磁障更为合适。

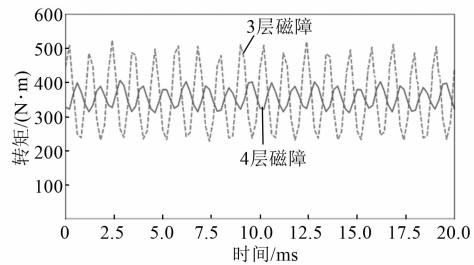


图 3 磁障数为 3 和 4 时的转矩曲线

3.2 磁障结构设计

磁障和导磁块的厚度对 d 、 q 轴电感影响较大，中间磁障的尺寸也决定了能够放入永磁体的尺寸。决定磁障和导磁块尺寸和位置的参数较多，设计自由度高，为了快速建立转子的结构，采用均匀分布磁障的形式，选择的设计参数如图 4 所示，并利用 d 轴绝缘率的概念^[15]对磁障和导磁块的厚度进行设计。

d 轴绝缘率定义为沿 d 轴方向磁障总厚度，也为永磁体的总厚度，和 d 轴导磁块总厚度之比。 x 为每层磁障的厚度， y 为每层导磁块的厚度，则 d 轴绝缘率为

$$k_{wd} = \frac{4x}{5y} \quad (3)$$

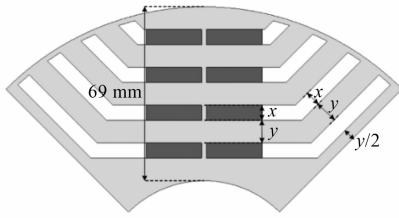


图4 磁障设计参数示意图

并有以下的尺寸约束关系:

$$4x + 5y = 69 \text{ mm} \quad (4)$$

绝缘率过低意味着 d 轴磁障厚度不足, 磁阻较小, 助磁的永磁体总厚度较低致使永磁体工作点下降, 提供的磁通减少, 并且有可能导致永磁体出现不可逆退磁。绝缘率过高则会导致 q 轴导磁块的空间被挤占, 饱和程度上升, 凸极比降低, 减少磁阻转矩。在有限元软件中对 x 取 $5 \sim 8 \text{ mm}$ 范围, 间隔 0.5 mm 进行仿真分析, 即绝缘率 k_{wd} 在 $0.41 \sim 0.86$ 之间, 平均输出转矩结果如图 5 所示。

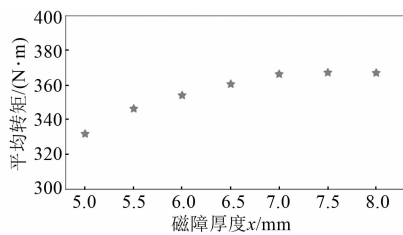


图5 不同磁障厚度下的平均输出转矩

当磁障厚度较低时, 增大磁障厚度, 可以显著地提高平均输出转矩。但是每层磁障厚度达到 7 mm 以后时, 提高磁障的厚度难以再使转矩显著提高, 甚至导致有所下降。尽管此时永磁体的用量仍在提高, 但是电机的磁阻转矩分量在减少, 再增加永磁体的用量并不是合理的方式, 选择每层磁障的厚度为 7 mm , 则磁障的总厚度为 28 mm , 此时的平均输出转矩为 $366.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

3.3 永磁体方案设计

在 PMASRM 中, 磁障空间内均可以放入助磁的永磁体。常见的形式为在中间磁障内放入永磁体, 少部分设计将两侧磁障内也放入永磁体, 也有部分 PMASRM 最外层磁障尺寸较小, 无径向磁肋, 磁障空置不放入永磁体。

在中间磁障均放入永磁体时, 有每层放入相同宽度永磁体和不同宽度永磁体的选择。放入相

同宽度永磁体时, 永磁体宽度主要取决于最外侧中间磁障的宽度。放入不等宽度永磁体时, 每层永磁体宽度选择较为灵活, 最大可以为每层中间磁障的宽度。2 种情况如图 6 所示。

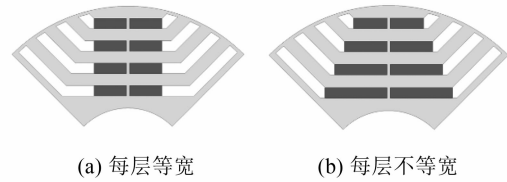


图6 永磁体方案

前述均建立在等宽永磁体的情况下, 当每层永磁体宽度不等时, 选择最大尺寸的永磁体, 即等于中间磁障的宽度和厚度, 有限元仿真结果如图 7 所示。

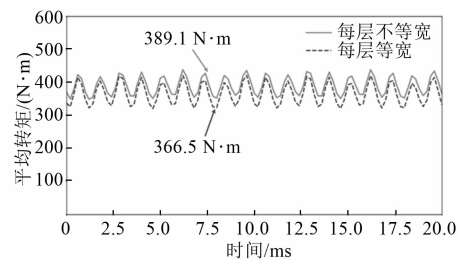


图7 2种永磁体设计方案的有限元仿真结果

每层不等宽度方案的永磁体用量更多, 平均输出转矩提高是显而易见的结果。但是在相同电流下转矩提升的百分数为 6.17% , 而永磁体的用量却增加了 42.0% 。单位电流输出转矩增加意味着在恒功率或者恒转矩输出时可以有更高的效率, 永磁体用量增加则使总成本上升, 具体设计方案需要根据实际情况取舍, 本文使用每层等宽永磁体的方案。

3.4 转矩脉动优化

对于铁氧体助磁的充水式潜水 PMASRM, 绕组不通电时气隙里的剩磁较少, 并且定子采用闭口槽设计, 齿槽转矩较小, 引起的转矩脉动可以忽略。转矩脉动的主要类型为磁阻转矩脉动。转子上多层空气磁障末端的存在会产生转子磁导谐波, 与气隙基波磁动势相互作用则会在气隙中产生一系列磁场谐波:

$$B_{gr\Lambda}(\theta, t) = [F_{sf}(\theta, t) + F_{rt}(\theta, t)] \cdot \sum_{\mu} A_{\mu}(\theta, t) \quad (5)$$

式中： $F_{st}(\theta, t)$ 为定子绕组基波磁动势； $F_r(\theta, t)$ 为转子侧基波磁动势，由助磁的永磁体提供； $A_{qm}(\theta, t)$ 为转子磁导谐波，取决于转子磁障结构。

受转子磁导影响产生的气隙磁场谐波如果与定子绕组磁动势产生的幅值较大的气隙磁场谐波具有相同的极对数，则会导致较大的转矩脉动。通过优化磁障末端的结构和位置，可以削弱转子磁导导致的气隙磁场谐波的影响，从而降低转矩脉动。

选取如图 8 所示的结构参数变量，在有限元软件 Ansys Maxwell 里采用自适应单目标优化算法进行优化设计，其主要由 3 个部分组成：最优空间填充试验设计、Kriging 响应面模型和混合整数序列二次规划法。对变量的取值范围进行一定限制，优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \{ K_r \} \\ \text{s. t. } & 40^\circ \leq \alpha_1 \leq 60^\circ, \\ & 40^\circ \leq \alpha_i \leq 50^\circ, (i = 2, 3, 4) \end{aligned}$$

$$2.0 \text{ mm} \leq w_i \leq 8 \text{ mm}, (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

其中 K_r 为转矩脉动系数。最多进行 200 次仿真计算，当超出最大的仿真次数限制后，取结果最优的变量组合。同时，采取转子轴向分段的方法，分成上下 2 段，角度错开一个定子齿距，其结构如图 9 所示。转矩仿真结果如图 10 所示，优化前后参数见表 2，转矩脉动系数 K_r 定义为转矩曲线上最大值和最小值的差除以最大值和最小值的和^[16]。

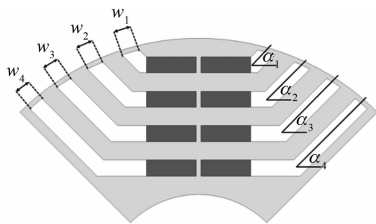


图 8 转矩脉动优化选取的结构参数变量

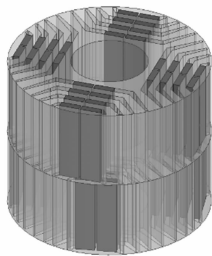


图 9 转子轴向分段错开

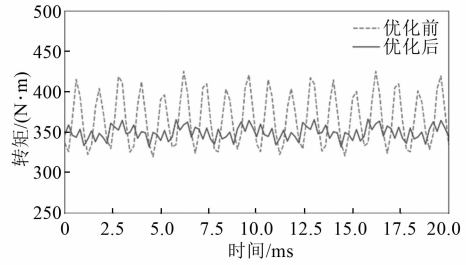


图 10 优化前后转矩曲线

表 2 优化前后变量取值

参数名称	优化前	优化后
$\alpha_1 / (^\circ)$	45	46.7
$\alpha_2 / (^\circ)$	45	44.4
$\alpha_3 / (^\circ)$	45	48.4
$\alpha_4 / (^\circ)$	45	46.8
w_1 / mm	8.0	4.1
w_2 / mm	7.5	4.3
w_3 / mm	7.2	2.9
w_4 / mm	7.0	2.8

优化前转矩脉动为 14.2%，优化后转矩脉动为 4.97%。由于两侧磁障的宽度减小，磁障末端处的漏磁增加，电机的平均输出转矩也略有下降。

3.5 永磁体退磁分析

铁氧体的矫顽力温度系数为正，在低温下矫顽力降低，如果外加磁场过大可能会发生不可逆退磁。水泵类负载转矩与转速成二次方关系，工作时负载发生突变的可能性较低，所以在相电流为 120 A rms 的情况下对永磁体进行退磁校核。

为了防止电机出现局部不可逆退磁，如图 11 所示，在每块永磁体上选取一个微小的剖面，分析该剖面的平均磁场强度大小在一个电周期内随时间变化的关系。最外层的永磁直接受到 d 轴电枢反应的影响，因此在永磁体上选择多个剖面进行分析。

外加的磁场强度幅值在一个电周期内随时间变化曲线如图 12 所示。在 -60°C 的极端情况下时 FB6H 铁氧体的内禀矫顽力仍可以达到 250 kA/m，而所有分析的剖面在一个周期出现的最大的外加磁场强度大小约为 180 kA/m，因为距离退磁曲线的拐点仍有较大裕度，所以认为不会发生不可逆的退磁现象。

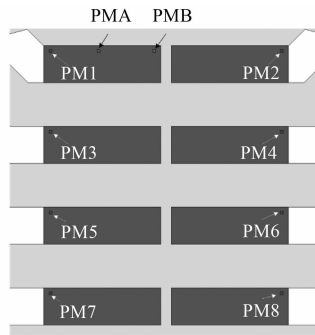


图 11 退磁分析选择剖面

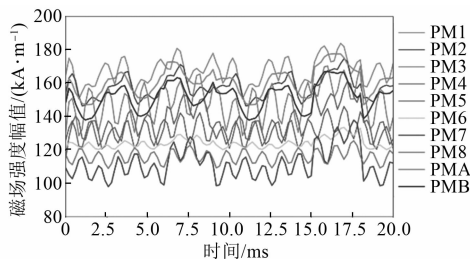


图 12 磁场强度幅值随时间变化曲线

4 电机性能对比

改造后的潜水 PMSRM 与感应电机转速接近,则在输出额定功率的情况下比较两者的主要电磁参数和性能。充水式潜水电机的工作条件使其效率比一般电机偏低,对水磨耗等特有的损耗取电机总输出功率的 2.5%。则改造前后利用有限元仿真的电机主要电磁参数和性能如表 3 所示。

表 3 主要电磁参数和性能对比

参数名称	改造前	改造后
定子电密/($A \cdot mm^{-2}$)	5.77	5.81
线负荷/($A \cdot m^{-1}$)	55 253.5	55 640.6
基波气隙磁密/T	0.772	0.842
功率因数	0.774	0.782
效率/%	90.8	92.9
效率(50%负载)/%	92.3	93.2

助磁的铁氧体永磁体剩磁较低,能够提供的总磁通有限,并且本文中的电机切向和径向磁肋宽度较大,为了达到深度饱和状态需要定子侧提供较多的磁化电流,从而影响电机的功率因数,使用铁氧体助磁后功率因数的提升并不像稀土

PMSM 可以达到一个极高的水平。即使如此,潜水 PMSRM 仍然具有更高的功率因数和效率,并且在半载的情况下依然可以有较高效率。两者的定子电密和线负荷的乘积,即热负荷大小非常接近,但是 PMSRM 转子侧没有导条,因此转子侧没有主要的发热源,实际上的发热和散热情况也要优于潜水感应电机。

5 结 语

本文针对传统潜水感应电机,研究了通过重新设计转子电磁方案将其改造成潜水 PMSRM 的可行性。以一台 55 kW 充水式潜水电机为例,研究了转子磁障设计、永磁体方案,针对转矩脉动进行优化,并对永磁体进行了退磁校核。有限元仿真结果表明,潜水 PMSRM 比潜水感应电机功率因数和效率更高。此外,因为 2 种电机共用定子铁心和绕组,对于感应电机是较优的方案,但是对于 PMSRM 并非最佳设计,所以潜水 PMSRM 仍有性能提升的余地。

【参考文献】

- [1] 李圣年. 潜水电泵与潜水电机的分类[J]. 电机技术, 2001(4): 52.
- [2] 黄国治, 傅丰礼. Y2 系列三相异步电动机技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 国家标准化管理委员会. GB 18613—2020. 电动机能效限定值及能效等级[S]. 2020.
- [4] International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60034-30-1:2014. Rotating electrical machines—Part 30-1. Efficiency classes of line operated AC machines (IE-code)[S]. 2014.
- [5] 黄坚, 顾卫东, 杨旭, 等. IE5 能效等级三相异步电动机的研制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 73.
- [6] 徐媚媚, 刘国海, 陈前, 等. 永磁辅助同步磁阻电机设计及其关键技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 245.
- [7] PRAKHT V, DMITRIEVSKII V, KAZAKBAEV V. Mathematical modeling ultra premium efficiency (IE5 class) PM assisted synchronous reluctance motor with ferrite magnets [C] // 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), 2018.

(下转第 71 页)

量,提高了产品附加值;在高效、高功率密度、结构紧凑轻量化、低振动、低噪声等方面取得了创新式突破,填补了压缩冷冻机专用电机领域的空白。为国家节能减排、电动机行业技术进步贡献了一份力量。

【参考文献】

- [1] 中国机械工业联合会. JB/T 8541—2013: 容积式压缩机机械振动分级[S]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [2] 赵素丽. 空气压缩机噪声控制[J]. 太原科技, 2005(6): 62.
- [3] 吴华根, 罗江锋, 聂娟, 等. 螺杆空压机用消声器的设计和优化[J]. 压缩机技术, 2014(1): 1.
- [4] 石芳. 往复式压缩机的振动控制及气流脉动方法的应用[J]. 工程建设与设计, 2018(15): 83.
- [5] 梁艳萍, 陈晶, 刘金鹏. 磁性槽楔对高压感应电动机电磁参数和性能的影响[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(3): 1.
- [6] MIKAMI H, IDE K, ARAI K, et al. Dynamic harmonic field analysis of a cage type induction motor when magnetic slot wedges are applied [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12(4): 337.
- [7] FENG Q, YANG J, LIU Y, et al. Simultaneously enhanced cryogenic tensile strength, ductility and impact resistance of epoxy resins by polyethylene glycol [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014(1): 90.
- [8] 李隆年. 电机设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [9] 苏湘君. 电动机轴承异常分析及处理[J]. 华电技术, 2009, 31(1): 47.
- [10] 陈辉, 乔建伟, 吴琼, 等. 释压式高压电机主接线盒短路容量研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 61.
- [11] 赵万星, 王刚, 王友建, 等. 浅谈电机能效标准及其测试技术[J]. 电动工具, 2017(1): 20.
- [12] 强雄. 高效电动机效率测试方法的研究[J]. 电机控制与应用, 2016, 43(7): 95.
- [13] 中国电器工业协会. GB/T 1032—2012: 三相异步电动机试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [14] 国家发展和改革委员会资源节约与环境保护司, 工业和信息化部节能与综合利用司. GB 30254—2013: 高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [8] 王瑾, 李岩, 贾建国, 等. 反电动势和凸极率对高效永磁同步磁阻电机稳态特性影响分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4688.
- [9] 胡然, 阮治杰, 孟献金. 变频调速技术在风机、水泵节能改造中的应用[J]. 化工管理, 2020(6): 103.
- [10] 金传伟, 毛宗源. 变频调速技术在水泵控制系统中的应用[J]. 电子技术应用, 2000(9): 38.
- [11] 王灵沼. 充水式潜水电机转子水磨耗的计算方法[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 92.
- [12] BURRESS T A, COOMER C L, CAMPBELL S L, et al. Evaluation of the 2007 Toyota Camry hybrid synergy drive system [R]. Oak Ridge National Laboratory, United States, 2008.
- [13] 沈建新, 蔡顺, 郝鹤, 等. 同步磁阻电机分析与设计(连载之七) 转子不均匀分布磁障的对比分析[J]. 微电机, 2017, 50(1): 83.
- [14] 黄辉, 胡余生. 永磁辅助同步磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [15] MOGHADDAM R R, GYLLENSTEN F. Novel high-performance synrm design method: an easy approach for a complicated rotor topology [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 5058.
- [16] 中国电器工业协会. GB/T 30549—2014. 永磁交流伺服电动机通用技术条件[S]. 2014.

(上接第 49 页)