

深井泵用永磁同步潜水电机性能分析与 成本计算

马鹤林¹, 安 辉¹, 陆艳君², 田玉宝¹, 邓文宇³, 齐丽君^{3*}, 安跃军^{1*}

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳芯源微电子设备股份有限公司, 辽宁 沈阳 110169;

3. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

Performance Analysis and Cost Calculation of Permanent Magnet Synchronous Submersible Motor for Deep Well Pumps

MA Helin¹, AN Hui¹, LU Yanjun², TIAN Yubao¹, DENG Wenyu³, QI Lijun^{3*}, AN Yuejun^{1*}

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110169, China;

3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Abstract: Submersible induction motors are currently more widely used in the deep well pump market, but they are generally large and inefficient, resulting in serious pump energy consumption. Permanent magnet synchronous motors have the advantages of high efficiency, high power factor and high power density. Therefore, the use of permanent magnet synchronous motors instead of induction motors as the drive equipment for deep well pumps can not only improve the performance of the motor, but also save energy to reduce electricity costs, in response to the national “carbon emission reduction” call. In order to meet the requirements of the latest national standards for motor energy-efficiency rating, according to the special requirements of deep-well pumps for their supporting motors, a 22 kW water-filled submersible induction motors on the market, a same of water-filled permanent magnet synchronous submersible motors is designed. The finite element analysis calculation is used to compare and analyze the performance parameters and the data of various loss and induction motors under rated working conditions, and the temperature field simulation of the designed permanent magnet synchronous motor is carried out to verify its rationality. The production cost and energy consumption of the two motors are evaluated for economic

benefits. And it can be seen that the designed permanent magnet synchronous submersible motor can complete the cost recovery of the motor within a certain period of time, which is cost-effective and superior. And at the same time, it provides a reference for designing and analyzing motors for similar deep-well pumps.

Key words: deep well pump; permanent magnet synchronous submersible motor; temperature field calculation; cost recovery

摘 要: 目前在深井泵市场中,感应潜水电机的应用较为广泛,但是普遍体积大、效率低,水泵耗能严重。永磁同步电机具有高效率、高功率因数以及大功率密度等优点。因此用永磁同步电机代替感应电机作为深井泵的驱动设备,既能提高电机的性能,又能节能减费,响应国家“碳减排”的号召。为了满足最新电机能效等级的要求,根据深井泵对其配套电机要求的特殊性,针对市面上的一款 22 kW 的深井泵用感应潜水电机,设计出一款相同型号的永磁同步潜水电机。运用有限元分析计算,对其在额定工况下性能参数以及各类损耗和感应电机的数据进行对比分析,并对所设计的永磁同步电机进行温度场仿真验证其合理性。对两种电机生产成本以及能耗值进行经济效益评估,计算结果证明所设计的永磁同步潜水电机在一定的时间内便可以完成电机的成本回收,性价比优越,同时为同类深井泵用电机的设计分析提供参考。

关键词: 深井泵; 永磁同步潜水电机; 温度场分析; 成本回收

基金项目: 辽宁省“揭榜挂帅”科技计划项目(2023JH1/11100010)

Liaoning Province Open Bidding for Selecting the Best Candidates
Science and Technology Program Project (2023JH1/11100010)

0 引言

深井电泵是排出地下水的主要设备,被广泛应用于工厂、矿业、地质勘探和地热能开发等方面^[1]。深井电泵主要包括“机”和“泵”两部分,由潜水电机与深井泵组成^[2]。其中潜水电机通常采用感应潜水电机,大多都在较低的功率因数下运行,而且这些电动机的效率往往偏低^[3]。电动机的能量效率是当今世界主要关注的问题之一^[4],因此如何改善潜水电机的性能以提高运行效率,是潜水电机发展的一个重要方向。永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)相比感应电机具有体积小、效率高等优点,是深井泵的理想驱动电机,永磁同步潜水电机的研制具有一定的科研应用价值。文献[5]实现了对大型充水式电机端部绕组电磁力应力的计算,对潜水电机的设计和性能评估提供参考。分数槽绕组会使杂散损耗与谐波漏抗有所降低,最后使电机的效率、最大转矩与堵转转矩均有所提高。文献[6]以潜电机的工作原理为基础,实现了用简便和快捷的表格法来确定分数槽绕组的排列。充水式潜水电机转子水磨耗占电机机械损耗的绝大部分,文献[7]研究并总结了比较实用的转子水磨耗的计算方法。转子的水磨耗会产生大量的热量,可能会造成永磁体退磁,所以对电机的温度场分析是有必要的。文献[8]根据牛顿换热定律计算了充水式潜水电机的平均温升并总结了降低温升的方法。文献[9]以有限元法为研究基础,提出了一种适用于潜水电机的温度场磁热流耦合设置方法,提高了计算结果准确性。潜水电泵的节能化和可持续发展也是当前电机生产领域的热点之一^[10],文献[11]分析了高效异步电机在泵站中的经济性和节能效果。文献[12]通过对比永磁同步电机和异步电机的测试数据和用户使用效果总结永磁同步电机节能情况。

由上述文献可知,目前对于潜水电机的研究多集中于感应电机,而关于永磁同步潜水电机的研究较少。对于电机经济性的研究大多集中在电机运行成本的计算和节能分析,并未对电机生产成本进行测算。

本文首先根据一台实际的感应潜水电机设计了一台具有相同基座号的永磁同步潜水电机,通

过有限元仿真计算得到了电磁参数和各部分损耗,并进一步计算得到了电机的内热源激励。然后在某商业软件中搭建好温度场仿真模型,并对电机进行三维温度场仿真。最后分析计算了两台电机的生产成本以及永磁同步潜水电机的成本回收情况。

1 深井泵用潜水电机模型

1.1 电机基本参数

本文选取市面上某 22 kW、2 极 24 槽的深井泵用作感应潜水电机,其有限元仿真模型如图 1 所示。设计了一款深井泵用永磁同步潜水电机,其有限元仿真模型如图 2 所示,选定极数为 8 极、定子槽数为 36 槽。由于闭口槽能够减小转子的水摩擦损耗,因此电机槽口采用闭口槽结构。槽形采用槽底为半圆形的梨形槽,有利于槽绝缘纸与半圆槽底更好地贴合,不仅可以提高槽满率,还可以降低槽内线圈与定子铁心的接触热阻,从而提升电机的散热能力,降低绕组温升。定子绕组采用双层分布绕组结构,具有端部短、绕组分布规律的特点。永磁同步电机内部采用 V 字形转子结构,磁钢牌号为 NdFeB35,同一磁极下磁钢沿转子轴向分为两段,可有效降低磁钢涡流损耗。电机冷却方式是水冷却,定子绕组采用特制的绝缘耐水型电磁线。较大的绝缘厚度使定子槽内含铜量减少,因为电机工作在井水中,散热条件良好,所以定子的电流密度取值较高。

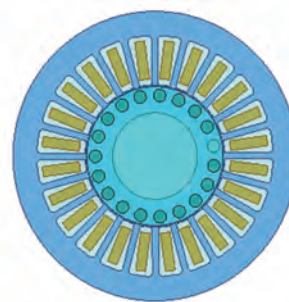


图 1 深井泵用感应潜水电机模型

Fig. 1 Induction submersible motor model for deep well pumps

深井泵用永磁同步潜水电机与感应电机的主要电磁和性能参数如表 1 所示。

根据两种电机的仿真分析结果并通过相应计算得到电机的损耗数值。由于充水式电机结构的

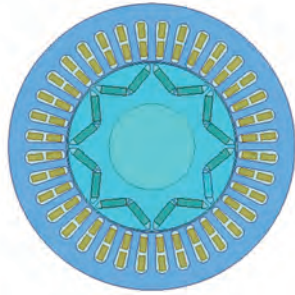


图2 深井泵用永磁同步潜水电机模型

Fig. 2 Permanent magnet synchronous submersible motor model for deep well pumps

特殊性,电机运行时存在转子水磨耗,永磁同步电机的水磨耗大小为 528.86 W,感应电机的水磨耗大小为 793.06 W。本文将转子水磨耗算入电机的机械损耗中,两种电机各部分的损耗值如表 2 所示。

表1 两种电机主要参数表

Tab. 1 Main parameters of the two motors

参数名称	永磁同步电机	感应电机
额定功率/kW	22	22
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	2 900
额定电压/V	380	380
频率/Hz	200	50
额定电流/A	38.5	49
定子外径/mm	171	171
定子内径/mm	102	83
转子内径/mm	51	51
铁心长度/mm	240	500
额定效率	92%	85%
额定功率因数	0.95	0.79

表2 两种电机的损耗

Tab. 2 Losses of the two motors

参数名称	永磁同步电机	感应电机
铁心损耗	333.7	317.25
转子铜耗	0	1 286.96
定子铜损耗	525.9	1 127.78
永磁体损耗	4.34	0
机械损耗	728.86	1 002
杂散损耗	107	132

由表 2 可知永磁同步电机的损耗为 1 699.8 W,感应电机的损耗为 3 865.99 W,永磁同步电机的损耗低于感应电机。

2 永磁同步潜水电机温度场仿真分析

本文所设计的深井泵用永磁同步潜水电机工作于井下,浸泡在水中。为了使结果接近于真实,

本文在电机外壳部分建立流体域,模拟水井中的水自然流动。电机为充水式,腔内充满清水,电机的表面有自然对流散热。

2.1 基本假设条件

在对电机温度场建立模型之前,为了简化计算、降低求解难度以及缩短求解时间,对电机做出以下假设^[13-16]:

(1) 电机的传热方式为热对流、热传导和热辐射,其中热辐射对结果影响很小,可忽略不计;

(2) 在计算的过程中只考虑定子的铁耗和铜耗、转子铁耗、永磁体损耗、杂散损耗以及机械损耗。电机中损耗分布均匀并全部转换成热量,作为温度场计算的热源。

2.2 温度场数值计算模型

根据传热学的基本原理,将电机内部换热过程用微分方程式(1)描述^[17]:

$$K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K_x 、 K_y 、 K_z 分别为电机介质沿坐标轴 x 、 y 、 z 方向的导热系数; T 为介质温度; q 为热流密度; ρ 为物体密度; t 为时间; c 为比热容。

在求解导热微分方程时,需要确定导热边界条件,电机在直角坐标系下求解域内的边界条件由式(2)表示为^[18]

$$\begin{cases} T = T_0 \\ k \frac{\partial T}{\partial n} = -q_0 \\ k \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_0 为边界已知温度; n 为边界法向量; q_0 为通过边界面的热流密度; k 为导热系数; α 为散热系数; T_e 为周围介质温度。

电机定子铁心与转子铁心由硅钢片叠压而成,硅钢片之间涂有绝缘漆,为简化定转子铁心导热系数计算,将硅钢片和硅钢片间的绝缘等效成一个整体。其中定转子铁心的轴向导热系数 K_z 和径向导热系数 K_x 、 K_y 可根据式(3)得出^[19]:

$$\begin{cases} K_x = K_y = \frac{\delta_{Fe} K_1 + \delta_0 K_0}{\delta_{Fe} + \delta_0} = \lambda_{Fe} K_1 + (1 - \lambda_{Fe}) K_0 \\ K_z = \frac{\delta_{Fe} + \delta_0}{\frac{\delta_{Fe}}{K_1} + \frac{\delta_0}{K_0}} = \frac{1}{\frac{\lambda_{Fe}}{K_1} + \frac{1 - \lambda_{Fe}}{K_0}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: δ_{Fe} 为硅钢片厚度; δ_0 为硅钢片绝缘漆的厚度; K_1 为绝缘介质的导热系数; K_0 为硅钢片的导热系数; λ_{Fe} 为硅钢片的叠压系数。

温度场仿真分析的目的是观察电机模型内部的温度分布情况。根据损耗计算出电机各部分的发热功率,将其加载在电机的温度场计算模型中,电机的发热功率可由式(4)得出:

$$Q = \frac{W_q}{V} \quad (4)$$

式中: Q 为电机的生热率; W_q 为电机各部件的损耗; V 为电机部件的体积。

在电机中进行热传导和热激励设置后,进行温度场仿真计算。

2.3 温度场仿真结果分析

本文对永磁同步潜水电机的稳态导热过程求解,不考虑时间条件,采用加热源方法,将相应的生热率加到电机的各个生热部件上,得到电机关键零件的温度分布图,如图 3~图 6 所示。

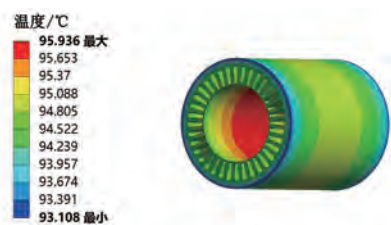


图 3 电机定子铁心温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution of the motor stator core

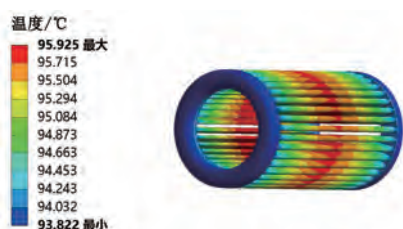


图 4 电机定子绕组温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution of the motor stator winding

由图 3 和图 4 可知,定子铁心和定子绕组的最低温度分别为 93.1 °C 和 93.82 °C,分布在电机左侧进水口处。定子铁心的最高温度为 95.93 °C,定子绕组最高温度为 95.92 °C,最高温度分布在电机轴向两端的中心位置。因为水温沿着水流方向逐渐增加,散热能力相应下降,所以定子铁心和定子绕组温度沿着水流方向增大,而电机轴向

两端与水接触,散热效果较好,因此最高温度出现在电机轴向中心位置附近。

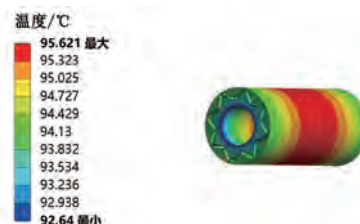


图 5 电机转子铁心温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution of the motor rotor core

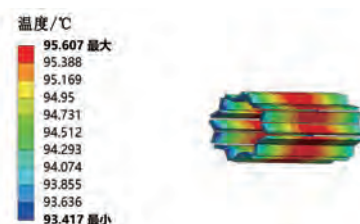


图 6 电机永磁体温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution of permanent magnet of the motor

由图 5 可知在变频供电的情况下,永磁同步电机的转子部分整体温度较高,转子铁心的最高温度为 95.62 °C。图 6 中永磁体的最高温度为 95.6 °C,本文采用的 NdFeB35 永磁体的退磁温度为 180 °C,远没有达到永磁体的退磁温度。

3 电机成本计算及节能分析

本文从电机的生产成本和节能效果两个方面分别对深井泵用永磁同步潜水电机和感应潜水电机进行计算和分析。

3.1 电机的生产成本

永磁同步电机的生产成本主要包括定子铁心、转子铁心、永磁体和定子绕组四个部分的材料成本以及永磁同步电机生产加工费,感应电机的材料成本主要包括定子铁心、转子铁心、转子绕组和定子绕组四个部分的材料成本以及感应电机生产加工费。其中,永磁同步电机采用的硅钢片为 50W470,永磁体为 NdFeB35;感应电机采用的硅钢片为 50W600。材料价格如表 3 所示,依据时间为 2023 年 12 月。

电机设计中电负荷和磁负荷在数值上的选取决定了铜和永磁材料的用量,从而决定了电机的

材料总成本。电机材料中稀土永磁体的价格最贵,铜线次之,硅钢片和铝材价格相对较低。两种电机的生产成本如表4所示。

表3 电机材料价格

Tab. 3 Motor material price		元·kg ⁻¹
材料	价格	
硅钢片 50W470	5.8	
硅钢片 50W600	5.2	
铝材转子	2.1	
铜线绕组	74	
稀土永磁体 NdFeB35	450	

表4 电机生产成本

Tab. 4 Motor production costs		
材料用量	永磁同步电机	感应电机
电枢铜质量/kg	2.33	6.46
电枢铁心钢质量/kg	18.38	37.61
转子铁心钢质量/kg	8.06	8.78
永磁体质量/kg	2.44	0
转子铸铝质量/kg	0	1.24
生产加工费/元	1 800	300

综上所述,感应电机的生产成本为1 021.86元,永磁同步电机的生产成本为3 223.77元。可见,本文所设计的深井泵用永磁同步潜水电机的生产成本高于感应电机。

3.2 电机节能分析

在额定工况下进行两种电机节能分析与计算,电机输入功率如式(5)所示^[20]:

$$\begin{cases} P_1 = \sqrt{3} UI \cos\theta \\ Q_1 = \sqrt{3} UI \sin\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_1 为输入有功; Q_1 为输入无功; U 为电机线电压; θ 为电机角。

根据表1的数据,通过式(5)计算可得感应电机的输入有功为25.4 kW,输入无功为19.77 kvar;永磁同步电机的输入有功为24.07 kW,输入无功为7.91 kvar。所以有功节电为1.33 kW,无功节电为11.86 kvar。

根据综合节电率计算式可得:

$$\begin{cases} \Delta P_c = \Delta P + K_Q \times \Delta Q \\ \Delta E_c = \frac{\Delta P_c}{P_g} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ΔP_c 为综合节电; ΔP 为综合有功节电; ΔQ 为综合无功节电量; K_Q 为无功折算系数,取0.02; ΔE_c 为综合节电率; P_g 为感应电机输入有功。

永磁同步电机的综合节电功率为1.56 kW,综合节电率为6.14%。按照小工业用电收费标准,电价为0.5元/kW·h。如果两台电机按照每台每年工作365天,每天运行8 h来计算,那么永磁同步电机相比感应电机每年将节约4 555.2 kW·h电能,节省2 277.6元。

根据国家生态环境部发布的《企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施》,生产10 000 kW·h电能需要消耗标准煤3吨,每吨标准煤排放2.72吨二氧化碳^[21]。经计算该项目产生的节能环保效益,每年可节省标准煤约1.36吨,减少二氧化碳排放量约3.71吨。

3.3 电机成本回收

本文设计的深井泵用永磁同步电机成本回收测算如表5所示。

表5 电机成本回收测算

Tab. 5 Motor cost recovery measurement		
参数名称	永磁同步电机	感应电机
额定功率/kW	22	22
效率	92%	85%
额定输入功率/kW	24.07	25.4
生产成本差值/元	2 201.91	
节电功率/kW	1.56	
综合节电率	6.14%	
月节电量/(kW·h)	374.4	
月节省电费/元	187.2	
投资回报时间/月	11.7	

综上所述,深井泵用永磁同步潜水电机成本回收时间约为1年。

4 结语

(1) 永磁同步电机适用于驱动深井泵,分析表明,用同基座号、同功率的永磁同步潜水电机代替感应潜水电机,转子水磨耗减小,总体性能得到提升。

(2) 通过温度场分析,额定运行时永磁同步电机最高温度为95.92℃,温升为70℃;永磁体的最高温度为95.6℃,永磁体未达到退磁温度,仍留有余量。

(3) 永磁同步潜水电机按每日运行8小时计算,与感应电机相比,节电率达到6.14%。深井泵用永磁同步潜水电机的购置费高于同功率感应电机,可在1年内从节省的电费中回收,经济性好,益于节能环保。

参考文献

- [1] 张傲然, 叶欣磊, 陈梓明, 等. 深井泵交流电机调速系统的设计[J]. 中国新技术新产品, 2019, 15: 13-14.
ZHANG A R, YE X L, CHEN Z M, et al. Design of AC motor speed control system for deep well pump [J]. New Technology & New Products of China, 2019, 15: 13-14.
- [2] 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.
- [3] 张东星. 永磁潜油电机的发展现状与应用分析[J]. 科技与创新, 2020, 19: 152-153.
ZHANG D X. Development status and application analysis of permanent magnet submerged oil motor [J]. Science and Technology & Innovation, 2020, 19: 152-153.
- [4] BAKA S, SASHIDHAR S, FERNANDES B G. Multi-barrier two-pole line-start synchronous reluctance motor with high saliency for a bore-well submersible pump [C] // 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology, Lyon, 2018.
- [5] GEDKPINAR M. Design and implementation of a self-starting permanent magnet hysteresis synchronous motor for pump applications [J]. IEEE Access, 2019, 7: 186211-186216.
- [6] 胡薇, 金雷. 分数槽绕组在潜水电机中的运用[J]. 电机技术, 2014, 3: 4-5+11.
HU W, JIN L. Application of the fraction-slot winding into the submersible motor [J]. Electrical Machinery Technology, 2014, 3: 4-5+11.
- [7] 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): 92-95.
WANG L Z. Calculation method of water abrasion of the rotor in water-filled submersible motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(4): 92-95.
- [8] 王灵沼. 充水式潜水电机按温升进行优化设计的新方法及其应用[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(10): 9-11+16.
WANG L Z. New method and application to optimize design of water-filled submersible motors by temperature rise [J]. Electric Machines & Control Application, 2013, 40(10): 9-11+16.
- [9] 张琦, 李增亮, 张乐, 等. 潜水电机温度场研究方法及影响因素分析[J]. 微特电机, 2019, 47(6): 1-5+9.
ZHANG Q, LI Z L, ZHANG L, et al. Research methods and influencing factors of temperature field for submersible motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(6): 1-5+9.
- [10] 米勇, 范卫兵, 吴刚. 潜水电泵的节能设计与效果评估[J]. 装备维修技术, 2023, 2: 78-82.
MI Y, FAN W B, WU G. Energy saving design and effectiveness evaluation of submersible electric pumps [J]. Equipment Technology, 2023, 2: 78-82.
- [11] 郭栋, 于辉, 黄志超, 等. 高效异步电机在自来水泵站节能改造中的应用[J]. 供水技术, 2023, 17(4): 45-47.
GUO D, YU H, HUANG Z C, et al. Application of high-efficiency asynchronous motor in energy-saving reconstruction of tap water pumping station [J]. Water Technology, 2023, 17(4): 45-47.
- [12] 范军, 孙宏昌, 林静, 等. 永磁同步电机在工业领域的节能技术研究[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(增刊1): 46-49.
FAN J, SUN H C, LIN J, et al. Research on energy-saving technology of PMSM motors in industrial field [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(S1): 46-49.
- [13] 闫浩安, 李建冬. 基于改进神经网络 PID 的永磁同步电机控制研究[J]. 现代防御技术, 2021, 49(4): 43-48.
YAN H A, LI J D. Research on PMSM control based on optimized neural-net PID [J]. Modern Defense Technology, 2021, 49(4): 43-48.
- [14] 王林森. 潜水泵用永磁同步电机的转子摩擦损耗研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
WANG L S. Research on rotor friction loss of permanent magnet synchronous motor for submersible pump [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [15] 李佳欣. 充水式潜水电机优化设计与温度场分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
LI J X. Optimized design and temperature field analysis of the water-filled submersible motor [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
- [16] 马鑫, 郑庆华, 韩雪岩, 等. 全封闭永磁电机流体场和温度场的计算分析[J]. 电机技术, 2023, 5: 1-6+16.
MA X, ZHENG Q H, HAN X Y, et al.

- Computational analysis of fluid field and temperature field of totally enclosed permanent magnet motors [J]. *Electrical Machinery Technology*, 2023, 5: 1-6+16.
- [17] 韩世琦, 安辉, 陆艳君, 等. 电动汽车驱动电机绕组端部喷淋冷却温度场分析[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(6): 52-58+65.
- HAN S Q, AN H, LU Y J, et al. Temperature field analysis of winding end spray cooling of electric vehicle drive motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(6): 52-58+65.
- [18] 李金龙, 安辉, 陆艳君, 等. 真空干泵用两种驱动电机热特性对比分析[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(6): 66-70+87.
- LI J L, AN H, LU Y J, et al. Comparative analysis of thermal characteristics of two kinds of drive motors for vacuum dry pump [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(6): 66-70+87.
- [19] 张世斌. 深井救灾排水系统潜水电机内流体流动与温升特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- ZHANG S B. Research on fluid flow and heat transfer characteristics of submersible motor from relief drainage system in deep well [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.
- [20] 孙洁, 关世海. 永磁同步电动机的节能计算[J]. *上海大中型电机*, 2021, 2: 10-12+53.
- SUN J, GUAN S H. Energy saving calculation of permanent magnet synchronous motor [J]. *Shanghai Medium and Large Electrical Machines*, 2021, 2: 10-12+53.
- [21] 谢社平, 吴桂珍. 高效永磁同步电机在泵站节能改造中的应用[J]. *给水排水*, 2021, 57(增刊1): 34-37.
- XIE S P, WU G Z. Application of high-efficiency permanent magnet synchronous motor in energy-saving reconstruction of pumping station [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 57(S1): 34-37.

收稿日期:2024-01-14

收到修改稿日期:2024-01-30

作者简介:

马鹤林(1997-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机及控制,3321779896@qq.com;

* 通信作者:齐丽君(1981-),男,硕士,高级工程师,研究方向为稀土永磁材料,lijun_qi@zbmag.com。

Performance Analysis and Cost Calculation of Permanent Magnet Synchronous Submersible Motor for Deep Well Pumps

MA Helin¹, AN Hui¹, LU Yanjun², TIAN Yubao¹, DENG Wenyu³, QI Lijun^{3*}, AN Yuejun^{1*}

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110169, China;

3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Key words: deep well pump; permanent magnet synchronous submersible motor; temperature field calculation; cost recovery

Submersible induction motors (IMs) are currently more widely used in the deep well pump market, but they are generally large and inefficient, resulting in serious pump energy consumption. Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) have the advantages of high efficiency, high power factor and high power density. Therefore, the use of permanent magnet synchronous motors instead of induction motors as the drive equipment for deep well pumps can not only improve the performance of the motor, but also save energy to reduce electricity costs, in response to the national “carbon emission reduction” call. In this paper, in order to meet the requirements of the latest national standards for motor energy-efficiency rating, according to the special requirements of deep-well pumps for their supporting motors, a 22 kW water-filled submersible induction motors on the market, a same water-filled permanent magnet synchronous submersible motor is designed, as shown in Fig.1.

The use of finite element analysis calculations, the performance parameters in the rated operating conditions and various types of loss comparative analysis, and the temperature field simulation of the designed permanent magnet synchronous motor is carried out to verify its rationality. The production cost and energy consumption of the two motors are

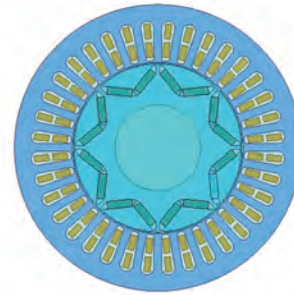


Fig. 1 Submersible permanent magnet synchronous motor model for deep well pumps

evaluated for economic benefits, and it can be seen that the designed permanent magnet synchronous submersible motor can complete the cost recovery of the motor within a certain period of time, which is cost-effective and superior. And at the same time, it provides a reference for designing and analyzing motors for similar deep-well pumps.

Tab. 1 Motor cost recovery measurement

Parameter name	PMSM	IM
Rated power/kW	22	22
Efficiency	92%	85%
Rated Input Power/kW	24.07	25.4
Production cost differentials/ ¥	2 201.91	
Power saving/kW	1.56	
Combined power savings	6.14%	
Monthly electricity saving/(kW·h)	374.4	
Monthly electricity cost savings/ ¥	187.2	
Payback time/month	11.7	