

低速直驱型洋流能发电机的设计、分析与测试

艾程柳, 杨阳*, 王海峰*, 黄元峰, 赵威, 刘腾, 边晖

中国科学院电工研究所, 北京 100190

摘要 针对中国海况, 研究了一种小功率的低速直驱型洋流能发电机, 通过对发电机的长径比、气隙长度、定子内径等关键参数进行设计和优化, 确定了发电机的最终方案。采用2D有限元对发电机的齿槽转矩和变速变载性能进行了仿真计算, 理论上进一步校核了发电机的运行特性。加工制造了样机并进行了详细的厂内测试, 测试结果进一步验证了设计方案的合理性, 确认了发电机能够在额定工况下输出 200 W 功率, 且变速变载运行性能良好。

关键词 洋流能发电; 永磁发电机; 电机设计

海洋面积占地球面积的71%, 全球的海洋可再生能源丰富, 作为一种清洁、可再生的能源, 其理论总量达 7.66×10^5 GW, 具有十分可观的开发前景^[1]。海洋能源主要以洋流、潮汐、波浪、温差、盐差等形式存在^[2]。洋流一般指大洋不同区域温差或由于地球和月球之间引力造成的海水流动现象。洋流能资源作为海洋能源的一个重要组成部分, 其资源蕴含量十分巨大^[3], 中国沿海省份如浙江、台湾、福建等, 蕴含着丰富的洋(潮)流能资源, 总能量超过 10 GW, 但这些区域洋流流速大多小于 2 m/s^[4]。

在海洋用能方面, 海洋无线观测网络有着广泛的供能需求^[5]。现代海洋观测网络融合了物理海洋、海洋化学、海洋地球物理、海洋生态等科学, 可实现从海底到海面全天候、长期、连续、综合、实时、原位观测^[6], 在军事和民用领域均具有重要的实际意义。海洋观测网络按照组网方式可分为有线缆和无线缆2种方式, 其中无线组网方式具有组网经济、部署灵活的优点^[5], 但由于该组网方式通常采用电池进行供电, 有限的能量限制了该网络的使用时间和场合^[7]。因此研制和开发洋流能发电系统

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501905-4); 国家自然科学基金面上项目(51877204); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA13040302, XDA22010401); 国家自然科学基金中英合作项目(51761135014)

作者简介: 艾程柳, 博士, 研究方向为特种电机分析、设计及优化, 电子信箱: aichengliu@mail.iee.ac.cn; 杨阳(通信作者), 研究实习员, 研究方向为电力电子与电力传动, 电子信箱: yangyang@mail.iee.ac.cn; 王海峰(共同通信作者), 研究员, 研究方向为海洋能发电及应用、海洋电气技术、特种电机与驱动控制技术、电机系统蒸发冷却技术, 电子信箱: wanghf@mail.iee.ac.cn

引用格式: 艾程柳, 杨阳, 王海峰, 等. 低速直驱型洋流能发电机的设计、分析与测试[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 77-83; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.011

具有重要的实际意义。

中国海域内蕴含着丰富的海洋能资源,但洋流流速普遍较低,针对这一特点,研究团队有针对性地研制和开发了一种直驱型洋流能发电装置,该装置可实现在低流速下将洋流能转换为电能,从而实现海洋传感器网络的原位供电。如图1所示,发电装置采用直驱结构,整个装置(包括发电机)浸没于海水中,主要由浮体、捕能叶片、发电机、平衡体和系泊杆组成。其中,捕能叶片采用萨沃纽斯结构,由上(叶片1)、下(叶片2)两部分组成;发电机位于两叶片的中间,由叶片直接驱动,中间无增速齿轮箱等结构,发电机直接浸没于海水中;最下方的平衡体保证了发电装置能够保持在垂直状态工作;系泊杆可以旋转,通过流体动力学设计保证其始终位于尾流侧,将其对捕能叶片的影响降低到最小。整个发电装置的工作过程为:浮体支撑发电系统,通过平衡体配重实现系统垂直悬浮于海水中,流动的海水推动萨沃纽斯叶片旋转,从而实现与叶片同轴安装的发电机外转子旋转,发电机输出的电能通过整流和逆变给诸如海洋网络节点等设备进行供电。

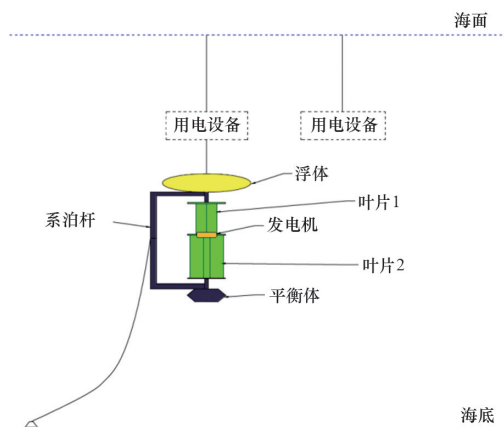


图1 直驱型洋流能发电装置示意

1 发电机设计

1.1 设计指标

发电机是一种将机械能,如旋转或者平动的动能,转换为电能的装置,其通过电磁感应和电磁力作用,将其获得的机械功率转换为电功率输出,在这一过程中,磁场起到了能量转换媒介的关键作

用^[8]。进行发电机设计时,需首先确定其工作转速及电功率的输出情况,即确定发电机的设计指标。

根据中国洋流情况:平均流速可达到0.5 m/s,最大约3 m/s(不包括极端海况)^[4,7],以及合作用户的用电需求(平均功耗20 W),设定发电机在0.5 m/s流速(捕能叶片的最佳转速约10 r/min)的功率大于15 W,发电机在2 m/s流速的(根据捕能叶片的转矩-转速曲线,发电机转速约为60 r/min)输出功率不小于200 W。由于所设计的捕能(萨沃纽斯)叶片在0.1 m/s流速的输出转矩大于1 N·m,发电机的齿槽转矩至少应小于该值。此外,发电机重量应尽可能轻,同时具有较高的运行效率。发电机的设计要求的主要指标见表1。

表1 发电机主要指标参数

参数	指标
输出功率 P_{out}	10 r/min, $P_{out} > 15$ W; (额定点) 60 r/min, $P_{out} > 200$ W
工作温度	< 180 °C
齿槽转矩	< 1 N·m
质量	尽可能小
运行效率	尽可能高

1.2 主要参数设计

考虑到图1所示的发电系统整体结构,发电机采用了外转子、内定子的基本结构。

发电机的主要尺寸,即定子外径和轴向长度,与其线负荷 A' 和 B'_δ 直接相关,则其主要尺寸满足以下关系^[9]:

$$D'_{o1}{}^2 L' = \frac{6.1}{\alpha'_p K'_{Nm} K'_{dp1}} \cdot \frac{1}{A' B'_\delta} \cdot \frac{P'}{n'_r} \quad (1)$$

式中, D'_{o1} 为估算的定子外径; L' 为估算的定子轴向长度; α'_p 为估算的极弧系数,取0.68; K'_{Nm} 为估算的气隙磁场的波形系数,取1.1; K'_{dp1} 为估算的绕组系数,取1; A' 为估算的线负荷; B'_δ 为估算的气隙磁密; n'_r 为估算的额定转速,取60 r/min; P' 为计算功率。

计算功率 P' 与额定功率 P_N 的关系为^[9]

$$P' = \frac{K_E P_N}{\cos \varphi'_N} \quad (2)$$

式中, K_E 为额定负载时感应反电势与输出电压的比值, 假设电压调整率为 10%, 则 $K_E=1.1$; $\cos \varphi'_N$ 为额定功率因数, 这里取 1。

由此可计算出计算功率 $P'=222 \text{ W}$ 。再根据式(1)可计算出发电机轴向长度与定子外径的关系为

$$D_{o1}'^2 L' = \frac{28.8}{A'B'_8} \quad (3)$$

由式(3)可知, 发电机的主要尺寸与其线负荷 A' 和 B'_8 直接相关。考虑到发电机浸泡于海水中, 其线负荷取 10 kA/m , 气隙磁密取 0.65 T , 则:

$$D_{o1}'^2 L' = 0.0044 \quad (4)$$

由式(4)即可得到发电机的主要尺寸定子外径和轴向长度的关系式, 此处初步取电机的轴向长度 $L'=50 \text{ mm}$, 则由该关系式可计算出电机定子外径 $D_{o1}' \approx 300 \text{ mm}$ 。

1.3 极槽配合及绕组结构

对于带变流器的发电机, 极对数的选取应权衡多方面的因素。发电机采用变流器后, 发电机的输出不受频率的限制, 极对数 $p=60f/n$ 没有限制, 但是若电机极对数设计得偏小, 在低速运行状态, 其输出电压频率过低, 与变流器输出的工频偏离较远, 将会造成变流器的开关管损耗较大, 发热严重^[10], 因此发电机的极对数应使其在工作转速范围的输出频率在工频附近。发电机的工作转速偏低, 采用了多极方案, 带来的优点之一为电机的每极磁路变短, 硅钢片的用量变小, 质量减轻^[10], 但发电机的铁芯损耗会随极对数的增加而变大。本项目的洋流能发电机转速较低, 通常在 100 r/min 以内, 铁芯损耗不会很大, 因此极对数应尽可能取较大值, 考虑到实际工艺及加工、装配限制, 选取 68 极方案。

本项目中发电机的齿槽转矩和输出功率是重点关注的设计指标, 这里选择分数槽集中绕组方案。发电机的齿槽转矩 T_{cog} 与其定子槽数 N_1 和转子极数 p 的最小公倍数 $\text{LCM}(N_1, p)$ 密切相关, $\text{LCM}(N_1, p)$ 越大, 对应的齿槽转矩越小^[6]。与此同时, 极槽配合决定了电机的绕组系数, 为了保证电机效率, 应合理选择极槽配合, 保证其绕组系数应尽量接近 1。

此外, 洋流能发电机需具有较强的生存能力, 要求其具备高容错能力。为了提高容错能力, 当发电机一相绕组发生短路故障时, 要求其各相绕组仍能继续工作, 需要发电机各相绕组之间具有很低的互感。同时, 为了降低发电机的短路电流, 需尽可能增加发电机各相绕组的自感。由此可知, 容错能力强的发电机应具有高自感、低互感的特征^[6], 而单层分数槽集中绕组刚好具有这一特征, 因此本项目发电机采用了单层分数槽集中绕组方案。

综合考虑以上各方面的因素, 选择 68 极 72 槽单层集中绕组的方案。

1.4 其他参数设计与优化

基于主要尺寸和极槽配合情况, 根据经典解析计算公式, 可以很方便地计算出发电机的各细节尺寸。发电机的初步方案的主要参数见表 2, 其中发电机额定效率的计算包含估算的电机摩擦损耗, 对应的发电机结构如图 2 所示。

表 2 发电机的主要参数

项目	参数	初始方案	优化方案
主要尺寸	轴向长度 L/mm	50	28.4
	转子外径 D_{o2}'/mm	525	525
	定子外径 D_{o1}'/mm	300	490.4
	定子槽高 h_{s2}'/mm	35	33.6
	绕组形式	单层集中绕组, 三相 Y 连接	
主要性能	额定电压/V	56.9	50
	额定效率/% (含摩擦损耗)	75.2	83.8
	额定功率因数	0.896	0.955
	齿槽转矩幅值/($\text{N}\cdot\text{m}$)	<1	<1

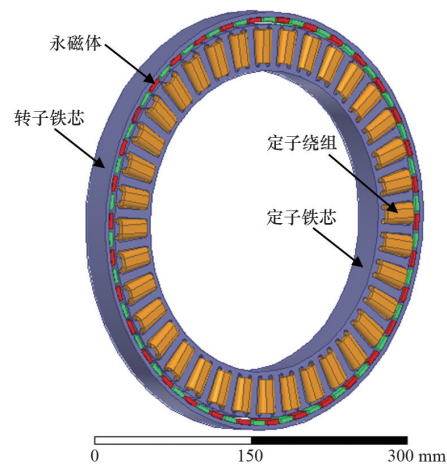


图 2 发电机示意

由于永磁发电机的设计是典型的多变量多目标优化设计问题,为了保证最终方案最佳,对发电机的关键设计参数如气隙长度、转子外径、轴向长度、定子槽高及永磁体厚度等参数进行了优化设计,优化目标为电机额定效率最高和净重最小。优化计算流程如图3所示。具体而言,通过联合 Matlab 和 ANSYS/Maxwell 实现发电机的优化,由 Matlab 实现参数的初始化、求解器设置以及优化算法;而 Maxwell 主要是用于计算各参数下发电机的额定工况的性能,为了缩短优化时间,这里采用了 RMaxprt 进行计算。其中优化算法选用了多种群遗传算法,防止优化早熟的同时提高优化收敛的速度,设置最大遗传代数为 150。优化结果如图4所示,通过优化,发电机的额定效率提高到接近 84%,同时其重量优化到约 12 kg。

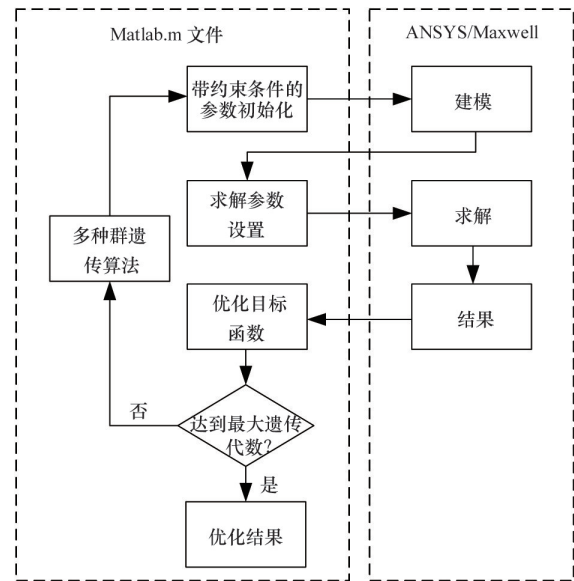


图3 发电机优化流程

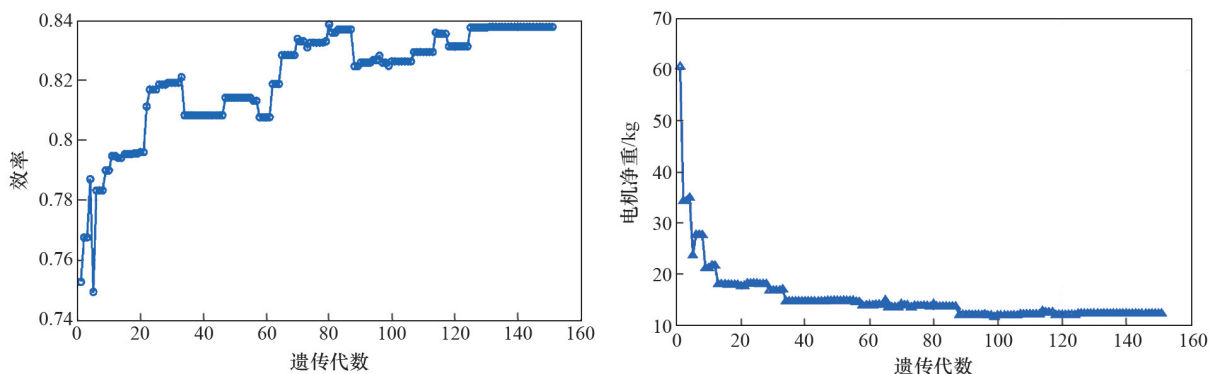


图4 发电机优化结果

2 发电机性能分析

首先计算设计方案的齿槽转矩。发电机的齿槽转矩直接影响了发电机的启动性能,通过选取合理的极槽配合方案减少齿槽转矩。在基于虚功法计算齿槽转矩时,具体通过计算每个位置的静磁场并旋转定子实现,通过自适应网格剖分保证计算精度,由于发电机的理论齿槽转矩较小,需要将气隙及周围的网格剖分得极为精细,通过不断调整单个计算步的剖分迭代次数,发现当网格剖分数量达到约 1200 万时,齿槽转矩计算结果周期收敛,最终计

算的齿槽转矩如图5所示,可以看到齿槽转矩的幅值在 $2 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 以内,远小于要求的 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

采用 ANSYS/Maxwell 2D 计算优化后的发电机方案在不同转速和负载情况下的磁场分布情况以及电流、输出功率等运行性能。图6显示了有限元计算所采用的二维模型、网格剖分情况以及额定状况的磁场分布结果。为了保证计算精度,网格剖分数量约为 4.4 万。负载仿真时,发电机输出接 3 个负载电阻,负载电阻 Y 连接。在额定转速 60 r/min 、负载相电流 2.33 A 时,发电机的电压为 50 V ,输出功率为 200 W ,对应的磁场分布情况如图6所示,

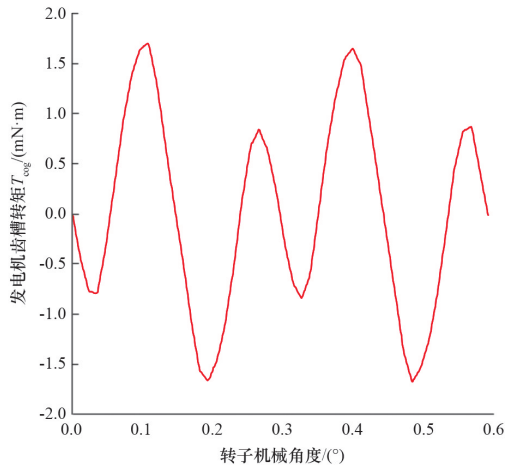


图5 齿槽转矩计算结果

可以观察到,发电机的最大磁密未超过 1.5 T,且漏磁较小,设计合理。

进一步,通过参数化设置,计算发电机在一系列不同转速、不同负载的运行情况,将计算结果汇总于图7,由结果可知,随着转速的增加,发电机的最大输出功率增加,当转速为 90 r/min 时,发电机的最大输出功率接近 800 W;在额定转速 60 r/min,最大输出功率达到 500 W,且不同负载的发电效率均在 80% 以上。此外,在不同转速下的发电机最大输出功率对应的负载相电流均为 8 A 左右,这为今后发电机实际运行的控制提供了指导,即通过电流反馈环实现发电系统的最大功率输出。

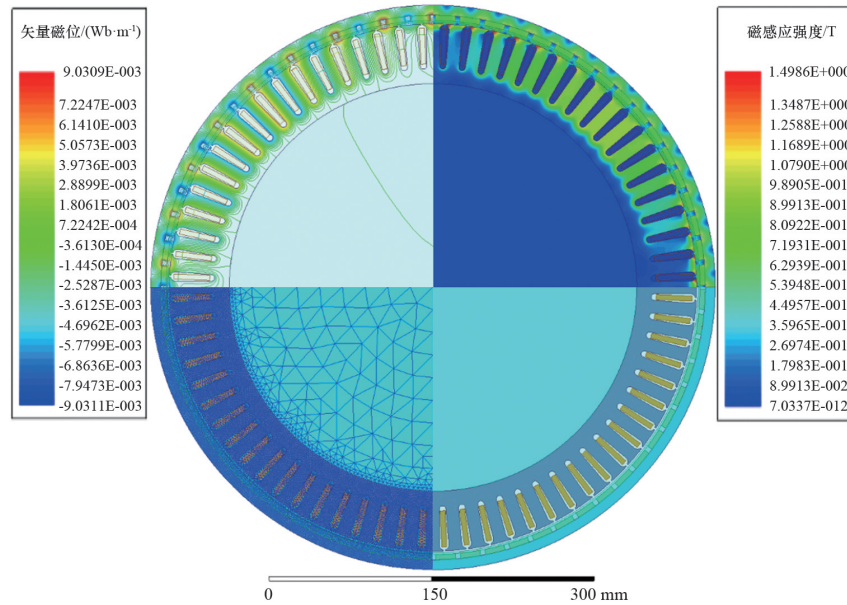


图6 有限元求解模型及额定磁场计算结果

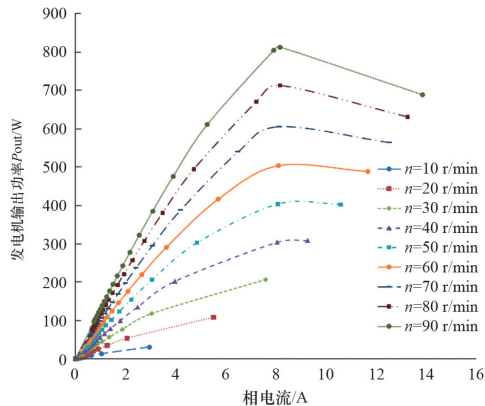


图7 不同转速的输出功率

3 发电机测试

按照设计方案加工制造了样机,并进行了厂内测试,测试场景如图8所示。由于发电机的运行转速低,测试时,电动机通过皮带减速来拖动发电机,电动机由变频器实现调速;发电机三相引出线接负载箱,使用示波器及相应的电压、电流探头,万用表和电流钳测量发电机输出的电压、电流波形及相应数值。实验过程中,不断调整发电机的转速,在特定转速下调整负载相电阻的阻值实现变负载。

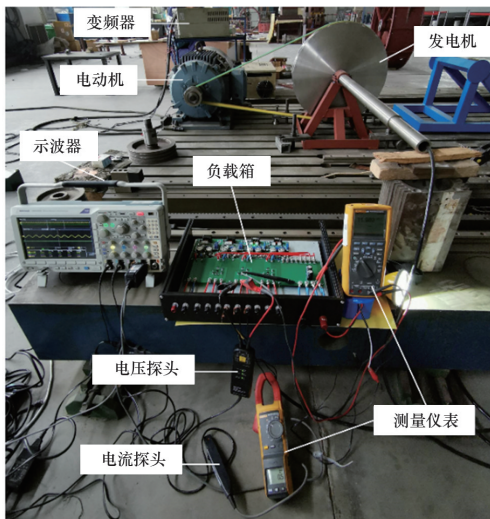


图8 发电机厂内测试照片

测试 62.5 r/min、7.43 Ω 负载的发电机线电压和线电流的示波器波形如图 9 所示,可以观察到此时发电机的电压为 40 V,电流为 3.06 A,输出功率为 208.8 W,已满足了额定功率需求。

图 10 为发电机在不同转速和不同负载下的输出功率测试与计算结果。受限于电动机的输出转矩,测试的发电机的最大负载电流在 5 A 左右,但测试结果足以说明,设计的样机满足了额定 200 W 的输出要求,且具有较强的变速带载能力。输出功率的实测值与计算值也存在着一定偏差,但从结果可以看到,两者的总体趋势是一致的,且在相对低速、小电流区域的结果是较为接近的。

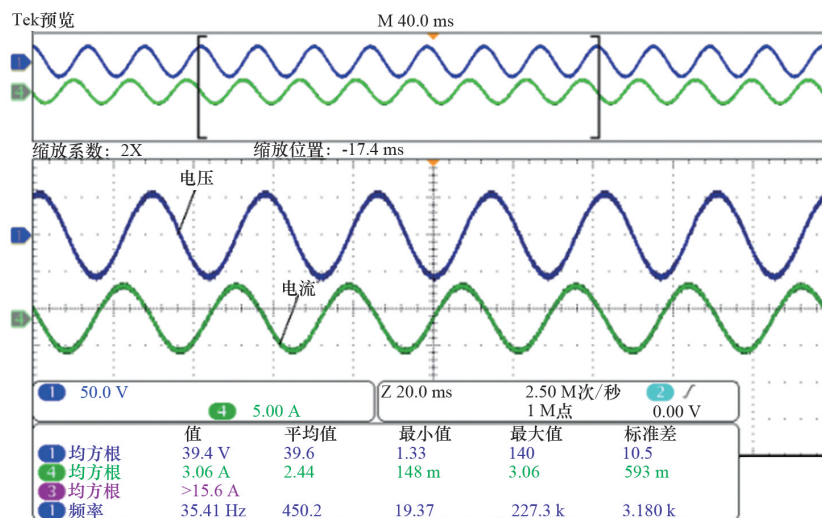


图9 额定状态下示波器波形

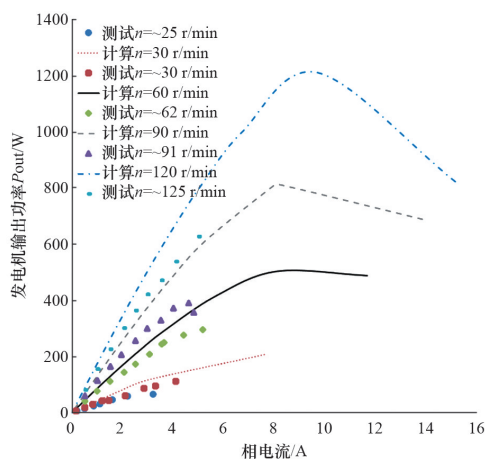


图10 发电机变转速和变负载运行性能

4 结论

针对中国海洋洋流特点,研究了一种低速永磁发电机用于直驱型洋流能发电系统,并研制了样机,通过测试验证了设计理念,可得出以下结论。

1) 多极大径长比的永磁电机适用于洋流能发电,通过合理选择极槽配合,如分数槽集中绕组,及绕组形式,如单层绕组,可提高发电机的过载能力,降低发电机的齿槽转矩。进一步通过优化发电机的重要参数,如气隙长度、长径比、槽高等,可有效提高其运行效率并减少重量。

2) 计算和测试须关注发电机变转速、变负载的运行性能,分析和验证发电机的输出性能,同时为发电机控制提供数据支撑。由于数据点较多,在设计阶段,采用2D有限元计算模型,在保证一定精度的条件下兼顾了计算速度。

参考文献(References)

- [1] 王传崑, 卢苇. 海洋能资源分析方法及储量评估[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [2] Bahaj A S. Generating electricity from the oceans[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 3399-3416.
- [3] Charlier R H. A "sleeping" awakes: Tidal current power[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2003, 7(6): 515-529.
- [4] Wang S, Yuan P, Li D, et al. An overview of ocean renewable energy in China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 91-111.
- [5] 我国迈向海洋强国的又一制造业新机遇[EB/OL]. [2020-08-31]. https://www.sohu.com/a/204594993_99911594.
- [6] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(3): 321-330.
- [7] 徐明奇, 张雪明, 朱挽强, 等. 独立供电海洋监测仪器电能补充技术小型化研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(11): 2045-2050.
- [8] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [9] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [10] Florence M. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2008.

Design, analysis and test of low-speed direct-driven generator for marine energy

AI Chengliu, YANG Yang*, WANG Haifeng*, HUANG Yuanfeng, ZHAO Wei, LIU Teng, BIAN Hui

Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract This paper investigates a low-speed direct-driven small generator for the marine energy under the ocean conditions in China. The final dimensions of the generator are determined by analyzing and optimizing the key parameters, such as the length-diameter ratio, the air-gap length and the inner stator diameter. Then the characteristics of the cogging torque and the varying speed and loads are calculated by the 2D FEM and the analytical formulas to analyze the running performance. Further, a prototype is fabricated and the manufacturing test is conducted to validate the design. The experimental results show that the designed generator can meet the requirements of the rated output power 200 W, and enjoys a good performance under the conditions of the varying speed and loads. This research may serve as a reference for designing and controlling the low-speed direct-driven generators for the marine energy.

Keywords marine energy generation; permanent magnet generator; electrical machine design ●



(责任编辑 刘志远)