面向矿区风电大基地的大功率永磁发电机设计研究*

王建春[1,2],杨波[1,2],冯玉洁[1,2],阳雪兵[3],张雅[4]

(1.湖南理工职业技术学院, 湖南 湘潭市 411104;
2.复杂环境特种机器人控制技术与装备湖南省工程研究中心, 湖南 湘潭市 411104;
3.海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室, 湖南 湘潭市 411101;
4.北京航天石化技术装备工程有限公司, 北京 100176)

摘要:针对矿区大型风电大基地风资源时空随机性对大功率风力发电机设计提出的挑战,以内蒙古某矿区风场实测数据为基础,开展了6.0 MW永磁风力发电机的适应性设计与优化研究。基于多维测风数据挖掘,量化了风速、温度及持续时间的联合概率分布,构建了反映实际风况的动态负荷谱模型,以提升电磁性能与降低材料成本为目标,对线圈尺寸与永磁体尺寸进行了协同优化设计。通过有限元仿真验证了电磁方案,实现了效率98%的设计目标。试验结果表明,研制的两台样机的空载及负载特性与仿真结果的误差均在3%以内,验证了模型的高精度;温升试验揭示了发电机在复杂运行条件下的温度场分布规律,并据此制定了热管理控制策略;研究形成了一套"数据驱动建模—多目标优化—仿真验证—样机测试"的完整技术链,不仅为特定风场提供了解决方案,也为大功率永磁风力发电机在风电大基地的工程应用提供了参考。

关键词:矿区;风电大基地;永磁发电机;电磁特性;仿真分析

中图分类号:TD612 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0303-08

Research on Design of High-Power Permanent Magnet Generators for Large-Scale Wind Power Bases in Mining Areas

WANG Jianchun[1,2], *YANG Bo*[1,2], *FENG Yujie*[1,2], *YANG Xuebing*[3], *ZHANG Ya*[4]

(1.Hunan Vocational Institute of Technology, Xiangtan, Hunan 411104, China;
2.Hunan Engineering Research Center for Complex Environment Special Robot Control Technology and Equipment, Xiangtan, Hunan 411104, China;
3.National Key Laboratory for Offshore Wind Power Equipment and Efficient Wind Energy Utilization, Xiangtan, Hunan 411101, China;
4.Beijing Aerospace Petrochemical Technology & Equipment Engineering Corporation Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: Aiming at the challenges posed by the spatiotemporal randomness of wind resources in large-scale wind power bases in mining areas to the design of high-power wind turbine generators, based on the measured data of a wind farm in a mining area of Inner Mongolia, the adaptive design and optimization research on the 6.0 MW permanent magnet wind turbine generator was conducted. Based on multi-dimensional wind measurement data mining, the joint probability distribution of wind speed, temperature and duration was quantified, a dynamic load spectrum model reflecting the actual wind conditions was established, and with the objectives of improving electromagnetic characteristics and reducing material costs, the coordinated optimal design of coil size and permanent magnet size was carried out. The electromagnetic scheme was verified by finite element simulation, and the design target of 98% efficiency was achieved. The test results show that the errors between the no-load and load characteristics of the two developed prototypes and the simulation results are all within 3%, which verifies the high accuracy of the model. The temperature rise test reveals the temperature field distribution law of the generator under complex operating conditions, and the thermal management and control strategy is formulated accordingly. The study forms a complete technical chain consisting of "data-driven modeling-multi-objective optimization-simulation verification-prototype testing", which not

* **收稿日期**:2025-08-13
基金项目:湖南省自然科学基金项目(2024JJ8045)
作者简介:王建春(1974—),男,湖南新化人,硕士,正高级工程师,主要从事风力发电技术传动与控制研究。E-mail:1289480946@qq.com
通信作者:张雅(1980—),女,湖南长沙人,硕士,高级工程师,主要从事流体机械方面的研究。E-mail:13975228324@163.com

only provides solutions for specific wind farms, but also offers references for the engineering application of high-power permanent magnet wind turbine generators in large-scale wind power bases.

Key words: Mining area, Large-scale wind power base, Permanent magnet generator, Electromagnetic characteristic, Simulation analysis

0 引言

在构建以新能源为主体的新型电力系统的能源政策指导下,风电和光伏迎来了新一轮的快速增长[1-2]。截至2024年底,风电累计装机容量突破5亿千瓦,为实现碳达峰、碳中和目标,到2030年中国风电累计装机容量需要达到10亿千瓦以上,到2050年需要达到30亿千瓦以上[3]。

然而,随着风电、光伏等新能源项目的持续发展建设,土地和生态红线的问题越来越限制项目的规划和立项。我国西部和北部风资源优势明显的新疆、内蒙古、甘肃、青海、宁夏、陕西等6省,面积约占我国国土面积的45%。其中,沙漠、戈壁、荒漠的面积高达130万 km^2,区域内的风能和太阳能资源丰富,且基本不存在土地和生态红线限制的问题[4]。因此,《"十四五"现代能源体系规划》提出有序推进风电和光伏发电集中式开发,加快推进以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电和光伏基地建设。而对于没有其他重工业的沙漠、戈壁、荒漠地区,大型采矿区是消纳绿电的重点用户,大型矿区在开采运营过程中,为了保证低成本的电力配套,避免远距离电网变电输电,就地建设大型新能源发电基地供电已成为风、光资源丰富的大型矿区用电首选,这为大型风电和光伏基地建设提供了广阔的市场前景。

基于"平价上网""竞价上网"政策的推进,对地处偏远沙戈荒大矿区的新能源大基地建设的技术经济性也提出了更高的要求[5]。王秋源[6]通过工程技术经济性对比了多种风光大基地多级电压拓扑接线方案,给出了适用于"沙戈荒"大矿区新能源大基地的汇集升压方式。刘二伟等[7]针对沙戈荒大基地风电项目的特殊气候和地质条件及大型矿区用电特性,对集电线路的选型进行了优化。张仲香等[8]对沙戈荒大矿区环境下风电叶片中复合材料进行了试验研究,对预测风电叶片在沙戈荒环境下的服役寿命有一定的指导作用。张乃康等[9]以内蒙古四大沙漠的风速、温度等自然条件为基础,对多款风机进行经济性分析和比选,获得了经济性指标优异的机组选型方案。目前,主要的研究工作集中在沙戈荒大基地的综合经济性计算分析、大矿区新能源电力消纳研究,以及叶片、集电线路等部件系统的研究和优化设计上[10]。在西北大矿区的陆上风电场站建设过程中,其设备购置费占风电场站项目投资总费用的75%[11]。发电机作为风力发电机组的核心部件,尤其是大功率风力发电机,在解决了转子滑环因间隙配合不当在高速运转下而导致温升的技术难题后[12],外部随机的风载荷和环境等因素对它的设计和运行具有重要影响[13]。因此,在项目经济性核算越来越精细的背景下,进一步优化沙戈荒环境下大矿区风电大基地的风力发电机设计,有效控制设备一次成本,对于保障大矿区风电基地的性价比及持续稳定发展具有重要的意义。

本研究以内蒙古乌兰察布某偏远大型矿区的风电大基地的测风数据为基础,考虑到风资源随时间和空间变化的随机特性,对直接影响发电机组运行的风速、温度、持续时间等关键参数进行数据挖掘和统计分析,获取风电场的风能负荷特性。提出发电机系统全运行工况的负载特性与典型风能资源的匹配设计方法。以大型矿区风电大基地的项目经济性和环境适用性为依据,对6.0 MW永磁风力发电机进行了深入研究,以期为永磁风力发电机在沙戈荒矿区大基地场景下的匹配应用提供参考。

1 大基地风能资源特性分析

由于风能随时间和空间分布的随机特性,风电机组叶轮捕获的风能也随时间在不断地变化,这使得风力发电机时刻处在一个变负荷的运行状态下。风资源的特性分析主要以影响发电机组运行的风速、温度、持续时间等相关参数为研究对象,而通常将风向仪、风速仪所测得的风资源基础数据及有效风速分布情况作为大型矿区风电场建设的重要原始依据,从而为矿区大型发电机的优化设计提供准确的输入条件。基于图1目标机型的风力发电机组功率曲线,对风资源数据进行分区间统计分析。

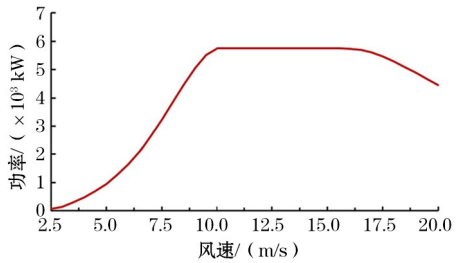


图 1　风力发电机组功率曲线

Fig.1　Power curve of wind turbine generator set

根据大基地项目测风塔数据，并综合考虑大叶轮机组安装高度。统计分析结果显示，测风塔 100 m 高度年平均风速达到 7.8 m/s，表明区域风资源可开发优势明显。该区域测风塔月平均风速变化曲线如图 2 所示。

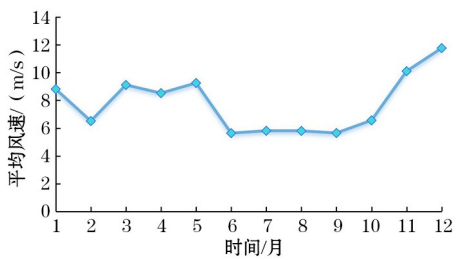


图 2　测风塔月平均风速变化曲线

Fig.2　Monthly average wind speed variation curve of the wind measurement tower

项目区域的环境温度对发电机组的运行，特别是在发电机的温升及控制方面起着重要作用。由测风数据统计得到的大基地项目区域月平均环境温度变化情况如图 3 所示。

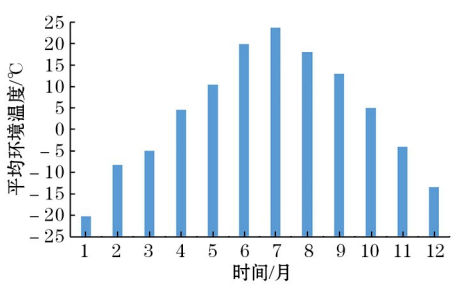


图 3　项目区域月平均环境温度变化情况

Fig.3　Monthly average ambient temperature variation in the project area

由于自然界风速的时变性，发电机各部分的运行温度与风力发电机组的实时输出功率、持续时间、外部环境温度等参数直接相关。根据风力发电机组的功率曲线，从测风塔数据提取风速在 9～17 m/s 之间的持续时间与环境温度分布情况，如图 4 所示。此时发电机处于满负荷或接近满负荷的运行状态，热负荷引起的发电机各部分温升是整机运行的一个重要监测和控制指标。



图 4　高负荷风速持续时间与环境温度

Fig.4　Duration of high-load wind speed and ambient temperature

综合图 2、图 3、图 4 所示的统计结果可以看出，该大基地每年上半年的 1 月、3 月、4 月、5 月、6 月多为大风期，有效风速持续时间较长，此时环境温度多在－20～＋10 ℃之间，而低温的 11 月、12 月，风速与持续时间基本达到年度最佳，有利于风机散热与热平衡管理；在小风期 7 月、8 月、9 月、10 月期间，即使 7 月环境温度接近 27 ℃，项目仍具备可连续满发 16 h 的风资源。因此，在保证发电机一次成本与发电性能的基础上，需综合评估并控制上述工况对发电机运行的影响。

2　永磁风力发电机设计分析

随着陆上风电大基地和海上风电项目开发的不断深入，风力发电机组的单机容量也在不断增大。中速永磁风力发电组以其高功率密度、高效率、高可靠性、低维护成本的“三高一低”的特点，使其成为当前大功率陆上风力发电机组和海上风力发电机组研究和应用的热点方向[14-15]。

本文以 6.0 MW 中速永磁风力发电机为研究对象，以乌兰察布大基地风资源情况为条件，对永磁发电机进行电磁设计和适用性分析，包括空载特性、负载特性、温升特性等。6.0 WM 永磁发电机参数见表 1。

表 1　6.0 MW 永磁风力发电机参数

Table 1　Parameters of 6.0 MW permanent magnet wind turbine generator

额定线电压/V	额定电流/A	额定输出功率/kW	额定转速/(r/min)	效率/%	温升/K
1 380	2 790	6 000	650	95	105

以发电机性能和电磁主要材料成本为优化目标，对发电机的定子线圈尺寸与转子永磁体尺寸进行参数优化设计，以获得两者的优化匹配方案。考

虑到发电机生产过程中模具和工装的通用性,对发电机定子内径尺寸和槽数进行约束,将定子线圈的优化限定在厚度方向的尺寸上,同样地,永磁体也仅针对厚度尺寸方向上的参数进行优化,发电机参数设计及优化结果见表 2。

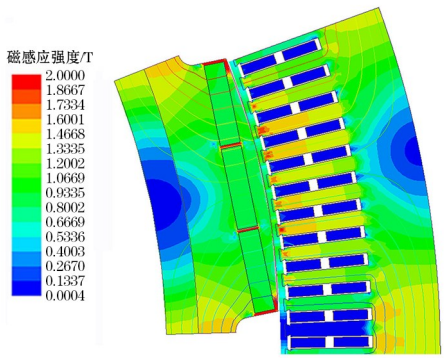
表 2 发电机参数设计及优化

Table 2 Design and optimization of generator parameters

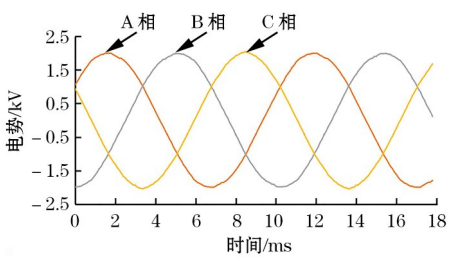
项目	厚度尺寸/mm	优化范围/mm	参数化步长/mm
定子线规	1.6	1.6～2.4	0.1
磁钢尺寸	15.0	15～25	1.0

2.1 空载特性分析

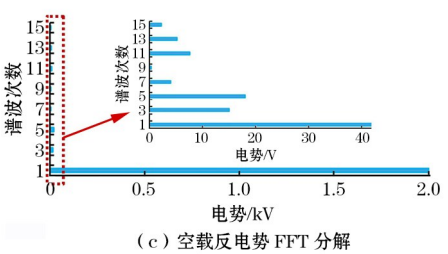
根据电机结构的对称性,建立永磁发电机有限元分析模型,并对优选的发电机电磁方案进行进一步的仿真分析。获取电机磁力线和磁场分布、空载反电势、空载反电势谐波、齿槽转矩等参数。发电机空载特性如图 5 所示。



(a) 空载磁力线分布



(b) 空载反电势波形



(c) 空载反电势 FFT 分解

图 5 发电机空载特性

Fig.5 No-load characteristics of the generator

由图 5(a)可知,永磁体产生的磁通绝大部分以主磁通的形式通过气隙参与能量的转化,由于转子磁极隔磁桥的设计,永磁体端部的漏磁很小,电机的磁路结构设计合理。

永磁发电机的槽极配合采用整数槽,定子铁芯采用斜槽以抑制和消除谐波。由图 5(b)可知,空载线电压有效值为 1 416 V,满足设计要求。为了进一步了解发电机电磁设计方案的谐波控制指标,对空载电势波形进行快速傅里叶变换(FFT)分解,如图 5(c)所示,可以发现该发电机的基波电势占比很高,仅有少量的 3 次谐波和 5 次谐波,其空载反电势波形畸变率为 1.42%。

永磁体磁场与定子齿槽的相互作用会产生齿槽转矩。齿槽转矩的存在会导致发电机运行过程中的振动和噪声。该转矩引起的振动指标不仅影响发电机的运行,也对全集成的中速永磁主传动链上的齿轮箱、主轴承的运行稳定性带来影响[16]。因此,有效地控制和减小齿槽转矩对全集成的中速永磁发电机设计具有重要意义。

本设计采用斜槽及优化极弧系数以减少齿槽转矩。发电机齿槽转矩如图 6 所示。从图 6 的仿真结果来看,发电机的齿槽转矩约为 150 N·m,发电机额定转矩为 80 kN·m,齿槽转矩占额定转矩的比例不到 0.2%,有效地控制了发电机的振动和噪声,并显著降低了发电机运行过程中对主齿轮箱和主轴承的影响。

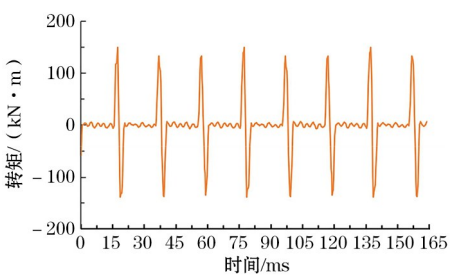


图 6 发电机齿槽转矩

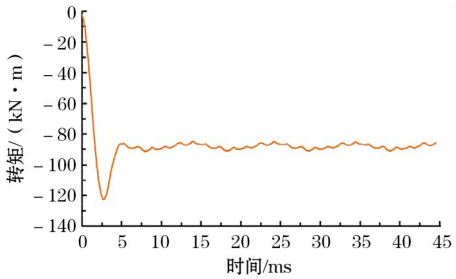
Fig.6 Cogging torque of the generator

2.2 负载特性分析

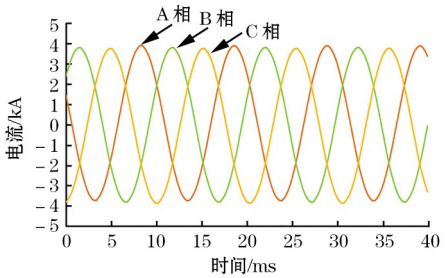
永磁发电机负载运行时,电枢绕组中电流产生的电枢磁场会影响发电机气隙磁场的分布和永磁体的工作状态,电枢反应对永磁电机性能影响很大。发电机负载特性如图 7 所示。

由图 7(a)可知,永磁发电机在 88 kN·m 的额定负载电磁转矩工况下,其负载电流波形如图 7(b)

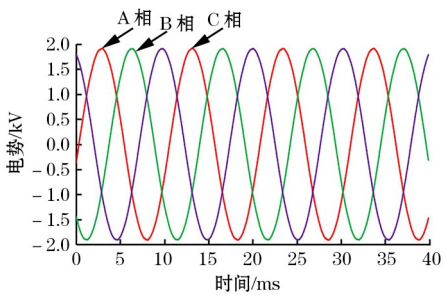
所示,其负载电流为 2 681 A。由图 7(c)可知,发电机负载工况下的线电压有效值为 1 349 V,较空载工况有所减小。



(a) 负载电磁转矩



(b) 负载电流波形



(c) 负载反电势波形

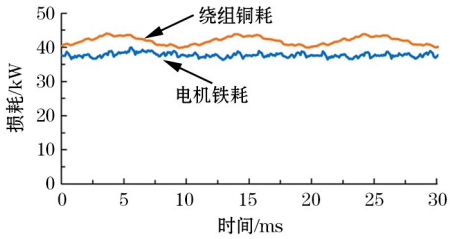
图 7 发电机负载特性

Fig.7 Load characteristics of the generator

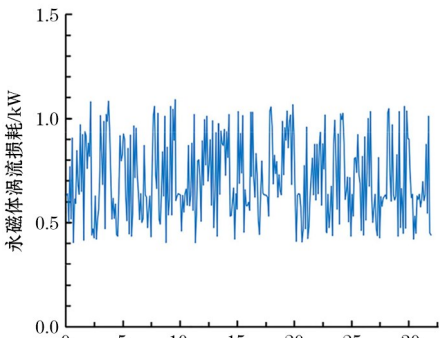
2.3 电机损耗分析

永磁发电机温升控制和热管理的基础是获得发电机各部分的损耗。在机组运行于各种工况时,连续额定工况下发电机的定子和转子温度控制要求最为严苛。对于大功率风力发电机组,在额定功率运行、外界温度为 20 ℃时,温升维持在 95 K 左右,则散热速率与发热达到稳定平衡,有利于磁通与瞬态稳定[17]。

永磁发电机的损耗由绕组铜耗、电机铁耗、永磁体涡流损耗、机械损耗和杂散损耗等组成。通过发电机有限元分析模型进行仿真分析,得到绕组铜耗、电机铁耗和永磁体涡流损耗的分布如图 8 所示。



(a) 电机铁耗和绕组铜耗



(b) 永磁体涡流损耗

图 8 发电机损耗随时间变化曲线

Fig.8 Variation curves of generator losses with time

通过综合仿真分析结果得到永磁发电机损耗的分布,见表 3。通过有限元仿真验证了电磁方案,实现了效率 98%的设计目标。

表 3 发电机损耗分布

Table 3 Distribution of generator losses

绕组铜耗/kW	电机铁耗/kW	永磁体涡流损耗/kW	杂散损耗/kW	机械损耗/kW	总损耗/kW	效率/%
42	37.3	0.7	25	15	128	98

3 样机试验验证

为了进一步验证仿真设计的合理性和准确性,基于以上分析计算,设计和制造了两台永磁电机,并搭建了试验平台,如图 9 所示。

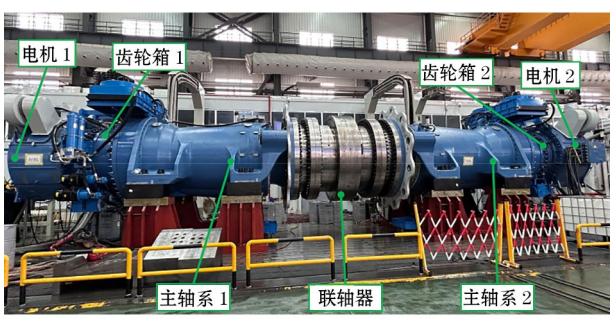


图 9 发电机试验平台

Fig.9 Test platform of the generator

3.1 电磁特性分析验证

通过发电机厂内的测试,获取了发电机在空载和负载工况下的试验数据,并将仿真结果与试验结果进行对比分析。表 4 为发电机仿真结果与试验结果对比。由表 4 可知,发电机空载运行工况下的反电势试验值为 1 385 V,仿真计算结果为 1 416 V,理论计算与试验值的偏差约为 2.24%。

表 4 发电机仿真结果与试验结果对比

Table 4 Comparison of simulation results and test results of the generator

项目	空载反电势(热态)/V	空载电压波形畸变率/%	负载反电势/V	负载电流/A	负载电流波形畸变率/%
仿真结果	1 416	1.42	1 349	2 681	0.44
试验结果	1 385	1.20	1 342	2 885	1.25

负载工况下,在电流通过定子线圈的过程中将产生一定的内压降,这将导致负载电势的下降。从负载试验结果来看,其负载反电势为 1 342 V,较空载试验时的参数下降了 43 V,理论计算负载反电势与试验值的偏差约为 0.52%。另外,负载反电势会随着定子线圈温度的升高而减小[18]。根据试验结果的对比分析,该永磁发电机电磁参数的测试结果与仿真计算结果误差≤3%,验证了设计分析的合理性和准确性。

3.2 温升特性分析验证

矿区风电大基地项目一般规划容量大,连片开发。在满足发电机组正常稳定运行的基础上,有效地控制设备投资成本是项目开发和运营过程中主要考量的内容。本典型矿区风电项目风资源分析结果显示,场址年平均风速高,风资源丰富,因此,需在研制过程中对风力发电机的温升特性进行试验验证。

永磁发电机为双 Y 绕组结构,定子绕组中安装了 6 个温度传感器,用于实时监测各相定子绕组的温度情况。通过搭建发电机厂内型式测试平台,在环境温度 20 ℃的情况下,测得满负荷工况下发电机各定子绕组温度数据变化情况,如图 10 所示。由图 10 可知,定子绕组的最小温升值为 88.6 K,最大温升值为 100 K,平均温升值为 96 K。

就风力发电机的现场运行而言,对发电机温度影响最大且要求最严苛的工况,是当风力发电机组外部环境温度最高且风速条件允许机组长时间保持满功率运行的状态。由图 4 可知,目标风电大基地项目在 7 月环境温度为 27 ℃的情况下,具备连续满发 16 h 的风资源,此工况为本项目一年中对发电机温升影响最严苛的工况。结合发电机厂内温升试验情况,在本工况下连续运行的风力发电机,其定子绕组最高点温度预计可达 127 ℃,定子绕组最低点温度为 115 ℃。发电机定子绕组采用 H 级绝缘等级,因此,定子绕组运行温度仍具有相当的安全裕量,发电机样机能够覆盖目标大基地风资源的全部工况。通过结合大基地项目风资源分析结果与发电机厂内试验数据,验证了发电机在大基地项目的适用性,并为下一阶段的发电机热管理系统设计及智能控制提供基础。

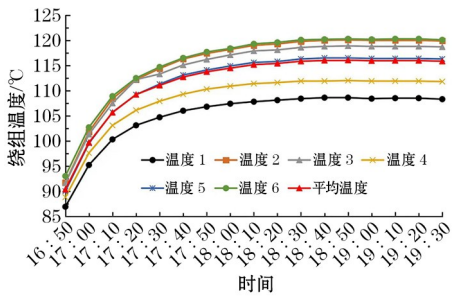


图 10 定子温升试验曲线

Fig.10 Stator temperature rise test curves

综上,通过搭建样机试验平台并进行测试,验证了设计仿真结果的准确性。

4 结论

本文以内蒙古某矿区风电大基地的测风数据为基础,通过数据挖掘和统计分析,获取了该风电大基地的风能负荷特性。建立了发电机的有限元仿真分析模型,对线圈尺寸与永磁体尺寸进行参数优化设计,得到了兼顾经济性和性能参数的发电机设计方案,并通过分析验证后得出以下主要材料成本结论。

(1) 以大功率发电机的性能和电磁主要材料成本为优化目标,实际结果为发电机空载运行工况下的空载反电势理论计算与试验值的偏差约为 2.24%;负载试验工况下,理论计算负载反电势与试验值的偏差约为 0.52%,电磁参数的测试结果与仿真计算结果误差≤3%。

(2) 通过对比大功率风力发电机组温升试验结果与大基地项目风资源分析结果,得出发电机在矿

区大基地项目的平均温升为96 K时,热平衡适用性最好。

(3) 研究结果可为西北偏远地区的大型矿区建设大风电基地匹配大功率永磁风力发电机的设计、应用及运行热管理控制提供参考。

参考文献(References):

[1] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(18):6245-6259.

[2] 姜红丽,刘羽茜,冯一铭,等.碳达峰、碳中和背景下"十四五"时期发电技术趋势分析[J].发电技术,2022,43(1):54-64.
JIANG Hongli, LIU Yuxi, FENG Yiming, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th five-year plan under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Power Generation Technology,2022,43(1):54-64.

[3] 秦海岩.2024,中国风电向上生长[J].风能,2024(12):1.
QIN Haiyan. 2024,China's wind power upward growth[J]. Wind Energy,2024(12):1.

[4] 肖玲娟,蒋海波,刘长栋.我国沙戈荒区域新能源外送基地经济性分析[J].煤质技术,2023,38(1):21-26.
XIAO Lingjuan, JIANG Haibo, LIU Changdong. Economic analysis of the new energy export base in the gobi and desert areas of china[J]. Coal Quality Technology, 2023, 38(1): 21-26.

[5] 徐进,王健,王范华,等.全寿命周期管理在大型风电基地项目的应用研究[J].西北水电,2020(4):113-116.
XU Jin, WANG Jian, WANG Fanhua, et al. Application study of life cycle management in large-scale wind power base[J]. Northwest Hydropower,2020(4):113-116.

[6] 王秋源."沙戈荒"新能源大基地多种汇集升压方式技术经济优选[J].电工技术,2023,53(10):52-54+58.
WANG Qiuyuan. Technical and economic optimization of multiple collection and boosting modes of renewable energy base in the "Desert, Gobi and Desertification Land"[J], Electric Engineering,2023,53(10):52-54+58.

[7] 刘二伟,苏桂晓,贾天翼,等.沙戈荒大基地风电项目集电线路选型及优化研究[J].科技资讯,2024(7):59-61.
LIU Erwei, SU Guixiao, JIA Tianyi, et al. Research on the selection and optimization of the current collection lines for wind power projects in the general desert-gobi-huangriness base[J]. Science & Technology Information, 2024(7): 59-61.

[8] 张仲香,刘宝锋,方晨鑫,等.沙戈荒环境下风电叶片中复合材料耐高温性能研究[J].复合材料科学与工程,2024(3):103-107.
ZHANG Zhongxiang, LIU Baofeng, FANG Chenxin, et al. Study on high temperature resistance of composite materials in wind blades under desert environment[J]. Composites Science and Engineering,2024(3):103-107.

[9] 张乃康,应华冬,罗勇水,等.内蒙古四大沙漠地区风电大基地机组选型分析[J].内蒙古电力技术,2024,42(4):42-47.
ZHANG Naikang, YING Huadong, LUO Yongshui, et al. Wind turbine lectotype analysis of wind power base in Inner Mongolia four-desert areas[J]. Inner Mongolia Electric Power,2024,42(4):42-47.

[10] 李帅虎,欧阳中,孙杰懿,等.面向沙戈荒区域新能源消纳的电力系统日前低碳调度策略[J].太阳能学报,2024,45(7):82-91.
LI Shuaihu, OUYANG Zhong, SUN Jieyi, et al. Day-ahead low-carbon dispatching strategy of power system for new energy consumption in desert, gobi and desertification land [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2024,45(7):82-91.

[11] 吴界辰,韩晓男,高源,等.沙戈荒基地外送全环节经济性测算及市场竞争力分析[J].科技和产业,2024,24(6):272-281.
WU Jiechen, HAN Xiaonan, GAO Yuan, et al. Analysis on the eeonomic and market competitiveness of the base export projectin the gobi and desert areas of china considering multiple influencing factors[J]. Science Technology and Industry,2024,24(6):272-281.

[12] 王建春,张雅,张俊.永磁发电机转子滑环结构有限元分析与研究[J].化工设备与管道,2024,61(1):76-86.
WANG Jianchun, ZHANG Ya, ZHANG Jun. Finite element analysis and research on the rotor slip ring structure of permanent magnet generator[J]. Process Equipment & Piping,2024,61(1):76-85.

[13] 绳晓玲,韩旭超,万书亭.风速分布差异对永磁风力发电机组故障特性的影响分析[J].太阳能学报,2023,44(2):123-132.
SHENG Xiaoling, HAN Xuchao, WAN Shuting. Fault characteristics analysis of permanent magnetic wind turbines considering wind speed distribution differences[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2023,44(2):123-132.

[14] 张世福,李斐斐,何海涛.永磁技术在大型风力发电机组中的研究与应用[J].微特电机,2022,50(11):61-65.
ZHANG Shifu, LI Feifei, HE Haitao. Research and application of permanent magnet technology in large wind turbine[J]. Small & Special Electrical Machines,2020,50 (11):61-65.

[15] 段志强,何庆峰,项尚,等.海上半直驱永磁风力发电机电磁设计与温度场分析[J].微电机,2024,57(4):66-70.
DUAN Zhiqiang, HE Qingfeng, XIANG Shang, et al. Electromagnetic design and temperature field analysis of offshore semi-direct drive permanent magnet wind turbine [J]. Micromotors,2024,57(4):66-70.

[16] 孙义忠,朱才朝,陶立壮,等.大型风电机组集成式传动链动态特性研究[J].机械工程学报,2025,61(11):106-118.

SUN Yizhong, ZHU Caichao, TAO Lizhuang, et al. Research on dynamic characteristics of integrated drivetrain for large wind turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering,2025,61(11):106-118.

[17] 王建春,陈蓓,张俊,等.大型矿区风力发电机瞬态负序能力研究[J].矿业研究与开发,2024,44(3):209-214.
WANG Jianchun, CHEN Bei, ZHANG Jun, et al. Research on transient negative sequence capability of wind turbines in large mining areas[J]. Mining Research and Development,2024,44(3):209-214.

[18] 李进泽,梅恬语,赵震,等.不同工况下 3.3 MW 永磁直驱风力发电机电磁场仿真分析及损耗修正[J].可再生能源,2022,40(3):338-343.
LI Jinze, MEI Tianyu, ZHAO Zhen, et al. Electromagnetic field simulation analysis and loss correction for 3.3 MW permanent mag-net direct drive wind generator under different working conditions [J]. Renewable Energy Resources,2022,40(3):338-343.