

永磁风力发电机变负载工况温升特性研究

杨 波^{1,2}, 钟 永^{1,2*}, 张清小^{1,2}, 谭 诤³, 刘中华³, 龚勇镇⁴

(1. 湖南理工职业技术学院 新能源学院, 湖南 湘潭 411104;

2. 湖南理工职业技术学院 光伏发电系统控制与优化湖南省工程实验室, 湖南 湘潭 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 长沙 410082;

4. 广东石油化工学院 机电工程学院, 广东 茂名 525000)

Research on Temperature Rise Characteristics of Permanent Magnet Wind Generator under Varying Load Conditions

Yang Bo^{1,2}, Zhong Yong^{1,2*}, Zhang Qingxiao^{1,2}, Tan Zheng³,

Liu Zhonghua³, Gong Yongzhen⁴

(1. School of New Energy, Hu'nan Vocational Institute of Technology, Xiangtan 411104, China;

2. Photovoltaic System Control and Optimization of Hu'nan Province Engineering Laboratory,

Hu'nan Vocational Institute of Technology, Xiangtan 411104, China;

3. State Key Laboratory of Offshore Wind Power Equipment and Efficient Utilization of Wind Energy, Changsha 410082, China;

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

Abstract: [Objective] Wind resource parameters such as wind speed, ambient temperature and humidity, exhibit prominent time-varying characteristics, and their dynamic fluctuations directly affect the output power and temperature rise of wind generators. Addressing this issue, this paper investigates the operating characteristics of permanent magnet wind generator (PMWG) under varying load conditions, aiming to realize fast and accurate monitoring of generator temperature state. [Methods] A 6 MW high power PMWG was taken as the research object. The finite element method was employed to construct the electromagnetic simulation model, and key loss parameters including winding loss, core iron loss and permanent magnet eddy current loss were obtained. Afterwards, thermal network model for the PMWG was established using the thermal network method.

Considering the stochastic variation characteristics of wind load during wind turbines operation, constant load and varying load conditions were designed, and the temperature rise characteristics under corresponding conditions were investigated. Finally, the relevant operating conditions were validated using factory type test data and wind farm field test data of the PMWG. [Results] The comparison between the factory type test data of the PMWG and the simulation results showed that the average relative error of each sampling point in the motor temperature rise process under rated load operating condition was 5%, which verified the reliability and accuracy of the thermal network model for the PMWG. The comparison between the measured wind farm operation data and the simulation results indicated that the percentage of average temperature difference under varying load condition was 4.5%. [Conclusion] This study reveals the temperature rise characteristics of high power PMWG under varying load conditions, and provides a reference for temperature rise prediction, early warning of each generator component as well as the setting of control parameters for thermal management systems of PMWG operating in wind farm scenarios.

Key words: permanent magnet wind generator; varying load condition; thermal network method; temperature rise

基金项目: 湖南省自然科学基金(2024JJ8045); 湖南省教育厅科学研究项目(25C1151, 25C1152); 茂名市科技计划项目(2023013)

Natural Science Foundation of Hu'nan Province, China (2024JJ8045); Scientific Research Project of Hu'nan Provincial Education Department (25C1151, 25C1152); The Science and Technology Plan Project of Maoming (2023013)

characteristics

摘要:【目的】风速、环境温度和湿度等风资源参数具有显著的时变特性,其动态波动直接影响风力发电机的输出功率与温升。针对此问题,本文开展永磁风力发电机(PMWG)变负载工况下的特性研究,旨在实现对发电机温度状态的快速、精准监测。【方法】本文以一台以6 MW大功率PMWG为研究对象,采用有限元法建立其电磁仿真模型,得到绕组损耗、铁心铁耗和永磁体涡流损耗等关键损耗参数。然后,采用热网络法建立PMWG热网络模型。结合风电机组运行过程中风能载荷的随机变化特性,设计恒定负载工况和变负载工况,并进行相应工况的温升特性研究。最后,通过PMWG厂内型式试验数据和风电场运行测试数据对相关工况进行验证。【结果】对比PMWG厂内型式试验数据与仿真计算结果可得,额定负载工况下电机温升过程各采样点的平均相对误差为5%,验证了PMWG热网络模型的可靠性与准确性。对比风电场运行实测数据与仿真计算结果可得,变负载工况下平均温差百分比为4.5%。【结论】本研究揭示了大功率PMWG变负载工况下的温升特性,为PMWG在风电场运行场景下发电机各部件温升预测、预警及热管理系统控制参数设置提供参考。

关键词: 永磁风力发电机;变负载工况;热网络法;温升特性

0 引言

永磁发电机具有高功率密度、高效率、高可靠性和低维护成本的特点,被广泛应用于风力发电领域^[1]。永磁发电技术是当前最具发展前景的海上风电技术,风电企业纷纷对10 MW及以上的大功率永磁风力发电机组^[2-7]投入研制。在国内外整机企业的推动下,永磁发电机在风电行业已具有十分优异的商业应用业绩^[8-9]。

针对永磁发电机在电磁、结构和热等多物理场共同作用下的复杂运行过程,学者们开展了深入研究。文献[10-13]利用有限元法对大功率永磁电机进行电磁仿真分析,研究电机运行工况下的铁心损耗、永磁体涡流损耗和绕组损耗等电磁损耗;文献[14-17]建立了永磁风力发电机(Permanent Magnet Wind Generator, PMWG)二维偏心有限元模型,采用参数化仿真,得到不同偏心程度下气隙磁密和磁拉力的变化规律;文献[18]针对风电机组永磁发电机温度场疲劳计算问题,提出一种发电机母材及焊缝温度场疲劳计算的新

方法;文献[19-22]搭建了永磁电机的流固耦合分析模型,对电机额定工况的流场、温度场进行仿真分析,获得了电机流场特性和主要部件的温度分布特征,并通过温升试验验证了仿真分析的准确性和发电机散热系统设计的合理性。

目前,PMWG方面的研究工作主要集中在永磁电机的电磁设计与优化、流-热耦合分析以及电磁-热-结构研究等方面,且现有研究往往聚焦于电机额定工况下的性能分析。但实际上风力发电机组常处于变负载运行工况,外部风载荷和环境因素都会影响风力发电机的运行^[23]。因此,在考虑风力发电机运行可靠性和经济性的基础上,研究变负载运行工况下PMWG的温升特性,并进一步优化发电机的热管理控制参数,匹配发电机温升与热管理系统的运行模式,有效控制PMWG系统的运行维护成本,对于风电场的持续稳定高效运行具有重要意义。

本文以一台6 MW大功率PMWG为研究对象,通过电磁仿真计算得到发电机各部分损耗,采用热网络法建立发电机热网络模型进行热仿真分析。结合PMWG在风电场运行过程中风载荷不断变化的特征与发电机型式试验标准,设计变负载、恒定轻载以及额定负载等仿真工况,实现了PMWG的温度预测,并通过发电机厂内试验数据和风电场现场运行测试数据对相关工况进行验证。本文可为PMWG在实际运行场景下的温升预测、预警及热管理系统控制参数设置提供参考。

1 电磁损耗与热特性基础

1.1 PMWG基本参数

本文以一台额定功率为6 MW、额定转速为650 r/min的PMWG为研究对象。该发电机采用轴向与径向通风相结合的冷却方式。PMWG参数如表1所示。

1.2 PMWG损耗组成

PMWG是风电机组将捕获的风能转化为电能的核心设备。PMWG运行时,其内部电磁场、线圈电流、导体及磁性材料相互耦合作用,产生各类损耗。PMWG的总损耗 P_{loss} 主要由绕组损耗 P_{Cu} 、铁心损耗 P_{Fe} 、永磁体涡流损耗 P_{eddy} 、机械损耗 P_{m} 和杂散损耗 P_{add} 组成,如式(1)所示:

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{eddy}} + P_{\text{m}} + P_{\text{add}} \quad (1)$$

表 1 PMWG 参数
Tab. 1 PMWG parameters

参数名称	参数值
额定电压/V	1 380
额定功率/MW	6
功率因数	0.93
额定转速/(r · min ⁻¹)	650
效率	0.95
冷却方式	IC26
绝缘等级	H

1.2.1 绕组损耗

PMWG 采用矩形导体绕制成线圈,且单个定子槽内导体数较多,定子槽内处于不同高度的导体在不同漏磁场作用下产生不同的漏磁感应电势,最终在各导体回路中生成环流,环流作用在导体上产生涡流损耗^[24]。由于研究对象为中速 PMWG,考虑发电机频率对导体趋肤效应和临近效应的影响, P_{Cu} 可由式(2)表示^[25]:

$$P_{Cu} = P_{dc} + P_{ac} = mI^2R + \frac{\pi\omega_e^2 B_m^2 l_c d_c^4}{128\rho_e} \quad (2)$$

式中: P_{dc} 为直流铜耗; P_{ac} 为涡流铜耗; m 为绕组相数; I 为相电流有效值; R 为相直流电阻; ω_e 为磁通密度角频率; B_m 为磁通密度幅值; l_c 为导体长度; d_c 为导体直径; ρ_e 为导体电阻率。

1.2.2 铁心损耗

磁场在铁心中会产生磁滞效应和涡流效应,从而产生磁滞损耗和涡流损耗。此外,磁后效、微观结构不均匀性也会导致额外损耗。这些损耗未被涵盖在经典涡流理论中,故称为附加损耗。其数学关系可用 Bertotti 经典铁耗理论模型表达^[26],如式(3)所示:

$$P_{Fe} = k_h f B_m^2 + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1.5} \quad (3)$$

式中: f 为发电机频率; k_h 、 k_c 和 k_e 分别为磁滞损耗系数、涡流损耗系数和附加损耗系数。

1.2.3 永磁体涡流损耗

永磁体涡流损耗是大功率 PMWG 设计环节中的重要考核指标。一方面,由于 PMWG 转子拓扑结构,散热更为困难;另一方面,过高的转子磁钢温度需要更高热等级的磁钢材料来匹配,从而进一步提高了 PMWG 的成本。PMWG 转子永磁体涡流损耗表达式为^[27]

$$P_{eddy} = \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dV = \int_V \frac{|\mathbf{J}|^2}{\sigma} dV = \int_V \rho |\mathbf{J}|^2 dV \quad (4)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为涡流电场强度; $\mathbf{J}$ 为涡流密度; σ 为永磁体电导率; ρ 为永磁体电阻率; V 为永磁体体积。

1.3 PMWG 的换热

在风电机组运行中,随着 PMWG 输出功率的增大,其温度快速升高,过高的温升对发电机的运行性能和使用寿命有较大影响。有效管理 PMWG 温升对于保障发电机稳定运行和延长其使用寿命至关重要。

1.3.1 PMWG 的热模型

PMWG 在运行过程中产生的损耗以热量的形式通过热传导、热对流和热辐射在发电机内部传递。其中辐射换热量过低,本文不考虑。因此,PMWG 传热数学模型为^[28]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_v \\ \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_1} = 0 \\ -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_2} = h(T - T_f) \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ_x 、 λ_y 和 λ_z 分别为 x 、 y 和 z 方向上的导热系数; q_v 为体积热源密度; S_1 、 S_2 分别为绝热边界、对流换热边界; n 为边界法向方向; h 为对流换热系数; T 为 PMWG 部件温度; T_f 为冷却介质温度。

1.3.2 PMWG 的热管理

为了确保 PMWG 的运行安全性,热管理系统依据发电机运行负载工况下的热损耗来调整和控制冷却介质的流量,实现发电机各部件温度均匀分布,有效控制与降低换热系统的运行能耗。热平衡表达式如式(6)所示:

$$P_{loss} = \rho_f F_v c (T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

式中: ρ_f 为冷却介质的密度; F_v 为冷却介质的流量; c 为冷却介质的比热容; T_{out} 、 T_{in} 分别为冷却介质的出口、入口温度。

2 热网络模型的建立

将 PMWG 细分为若干个单元节点,各个节点看成具有集总参数的单元,节点之间用热阻代替,

进而形成热网络^[29]。根据能量守恒定律,即单位时间内流进某个节点的热量与流出该节点的热量相等,建立热平衡方程组求解该节点的温度。

2.1 热阻分析

由于 PMWG 各部件的结构尺寸和材料性能存在差异,在热量传递过程中产生的影响可用热阻来表示。节点热阻与零件物性参数之间的关系可表示为^[30]

$$R_1 = \frac{L}{\lambda A} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{1}{hA} \quad (8)$$

其中: R_1 、 R_2 分别为传导热阻、对流热阻; A 为热量传递接触面积; L 为导热路径厚度; λ 为材料导热系数; h 为表面对流换热系数。

PMWG 各零件材料热性能参数如表 2 所示。

表 2 PMWG 零件材料热性能参数

Tab. 2 Thermal performance parameters of PMWG component materials

参数名称	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K)
绕组铜导体	401	385
绕组绝缘	0.2	1 700
槽楔	0.2	1 200
定子铁心	30	460
永磁体	6.4	460
转子铁心	30	460
电机机座	25	450

2.2 等效热网络模型

根据本文研究的 PMWG 本体结构,建立包含发电机定子、转子以及径向通风道等结构的求解域物理模型,忽略发电机外部通风设备及风道。PMWG 的风路结构如图 1 所示。

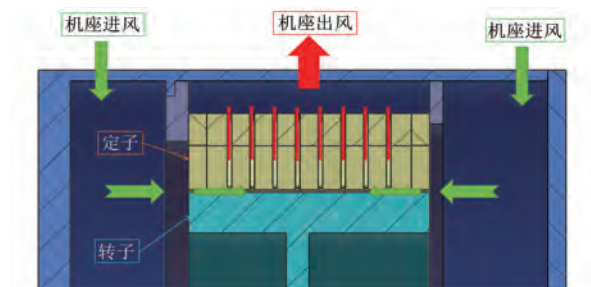


图 1 PMWG 的风路结构

Fig. 1 Air duct structure of PMWG

依据定子铁心槽内线圈中铜导体与绝缘材料的不同导热特性,考虑铜导体线规以及绝缘厚度等参数,将定子线圈等效为一个径向、轴向导热系数不同的整体,搭建 PMWG 热网络模型。

3 恒定负载工况温升特性分析

基于风电场风资源的随机性,风速在时间尺度上不断变化。随着风速的变化,PMWG 输出功率在部分功率到额定功率间不断调整。为研究不同负载工况下 PMWG 的稳态温升特性,本文设计了 50% 额定负载工况、75% 额定负载工况、90% 额定负载工况和额定负载工况四个恒定负载工况进行分析。为验证热网络模型的正确性,对 PMWG 额定负载工况的厂内温升试验和仿真计算结果进行对比。

3.1 仿真模型的构建

为了研究 PMWG 在不同负载工况下的温升特性,以表 1 所示的 PMWG 基本参数为基础,结合发电机基本结构参数,通过 ANSYS Maxwell 构建 PMWG 电磁仿真模型,如图 2(a) 所示。应用 ANSYS 软件平台,设定发电机定子铁心、转子铁心、定子线圈以及永磁体等部件材料的电阻率、热导率和比热容等参数。根据 PMWG 的风路结构,并结合其在风电机组中的实际运行环境,设定合理的进风温度、冷却流量等散热边界条件,搭建 PMWG 热仿真模型,如图 2(b) 所示。

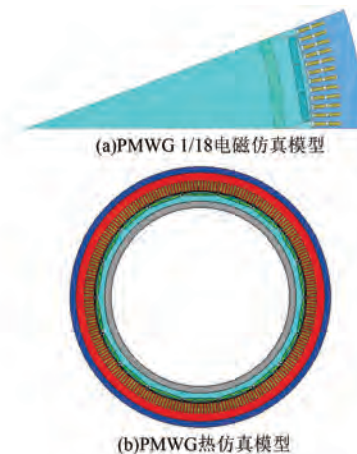


图 2 PMWG 仿真计算模型

Fig. 2 Simulation calculation models of PMWG

3.2 恒定负载工况温升特性分析

依据 PMWG 电磁仿真分析,将发电机各部分

损耗加载到热网络模型中。冷却系统采用轴向和径向的混合式风冷结构,内风路结构如图 1 所示,冷却风量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由于 PMWG 安装在风电机组机舱内,考虑到机舱内部电气设备发热对 PMWG 进风温度的影响,设定进风温度为 45°C 。对 PMWG 负载工况进行热网络法分析,得到电机定子线圈的温升情况如图 3 所示。

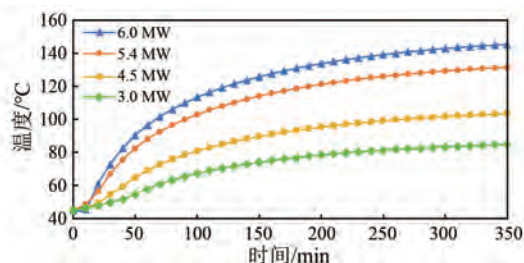


图 3 不同负载工况下定子线圈的温升特性曲线

Fig. 3 Temperature rise characteristic curves of stator coil under different load conditions

由图 3 可知,起始温度为 45°C ,随着 PMWG 运行时间增加,不同负载工况下的定子线圈温度逐渐提高,其中额定负载工况下定子线圈温升最快,最终的热平衡温度为 145°C ;90%、75% 和 50% 额定负载工况下,定子线圈的热平衡温度分别为 131°C 、 101°C 和 81°C 。在相同散热条件下,50% 额定负载工况下定子线圈温升为 36°C ,而额定负载工况下定子线圈温升达到 100°C 。可见,在轻载工作区间,电机输出功率与冷却流量供需不匹配问题被充分凸显。

3.3 温度限定下不同负载工况冷却量分析

为了分析 PMWG 在不同负载工况下达到相同温升的热管理系统参数,本文设计环境温度为 25°C ,发电机定子线圈最高运行温度为 118°C 。通过热网络模型计算得到 PMWG 主要负载工况下输出功率与冷却风量的关系,如图 4 所示。

由图 4 可知,在低负载工况下,电机的电流较小,定子铜耗小,50% 额定负载工况下的冷却风量仅为额定负载工况下的 $1/3$ 。从功率和冷却风量的趋势线来看,冷却风量的增速小于输出功率的增速。

3.4 额定工况温升仿真与试验对比

为验证热网络模型的正确性,建立与 PMWG 厂内温升试验初始条件相同的热分析模型。设定额定负载工况下热网络模型初始参数为:环境温

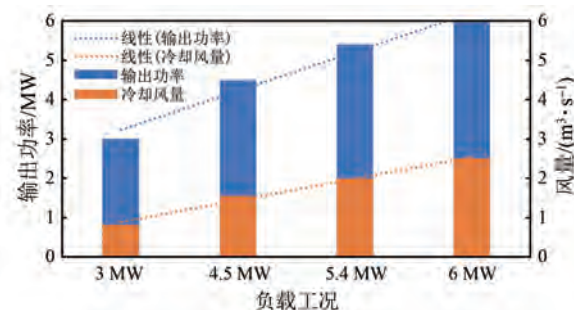


图 4 输出功率与冷却风量的关系

Fig. 4 Relationship between output power and cooling air volume

度 19°C ;定子线圈温度 76°C 。额定工况下,仿真温升与试验温升结果对比如图 5 所示。

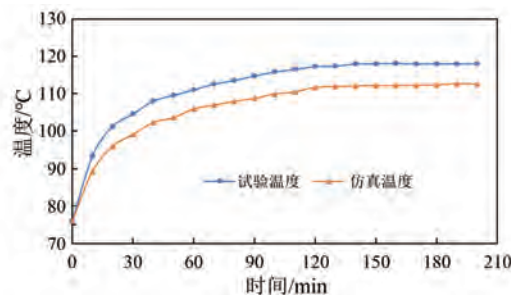


图 5 额定负载工况下仿真温升与试验温升对比

Fig. 5 Comparison of simulated temperature rise and experimental temperature rise under rated load condition

由图 5 可知,整体温升曲线呈现开始阶段温升速率较快,最后缓慢达到热平衡的趋势。热网络计算方法得到的各采样点上的定子线圈温度均低于试验测量值,整体温升过程各采样点平均相对误差为 5%,热平衡点两者相对误差为 4.6%。

4 变负载工况温升特性研究及测试

为进一步研究热网络模型在变负载工况下仿真计算的合理性和准确性,在风力发电机组上连续采集 100 多个小时的整机 SCADA 数据,单个采样点数据为采样传感器的 10 分钟平均值。对数据进行订正后得到发电机功率、发电机定子温度和风速曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,从采样点 114 到采样点 137 的三个多小时内,在风电场 12 m/s 的平均风速下,PMWG 的输出功率从 3 MW 直接降到 0,发电机定子温度从 86°C 降到 43°C 。到采样点 138 后机组恢复运行,PMWG 以 4 MW 的输出功率运行十分钟

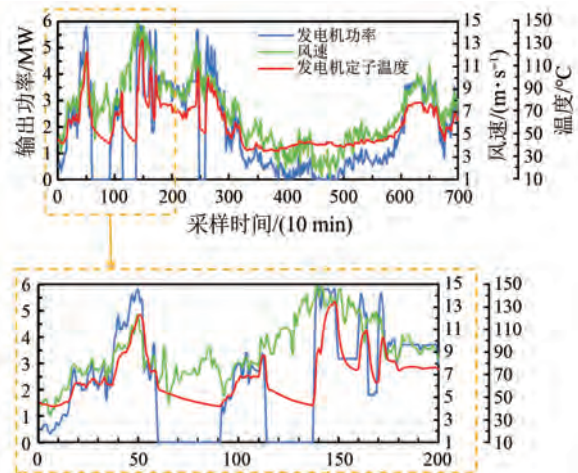


图 6 风电机组现场运行采样数据

Fig. 6 On-site operation sampling data of wind turbines 后,发电机定子温度迅速从 43 °C 升到 53 °C。发电机功率、发电机定子温度和风速三个参数的随动性变化,验证了 SCADA 采样数据各参数之间关联关系的正确性。

从图 6 中选取采样点 138 到采样点 218 作为典型变负载工况段进行详细分析,如图 7 所示。该段运行工况包括了额定负载、50% 额定功率负载以及小功率负载等多种负载形式的组合,且在输出功率随风速变化的同时,环境温度也在不断变化,可以很好地反映风电机组在风电场中运行的普遍状态。

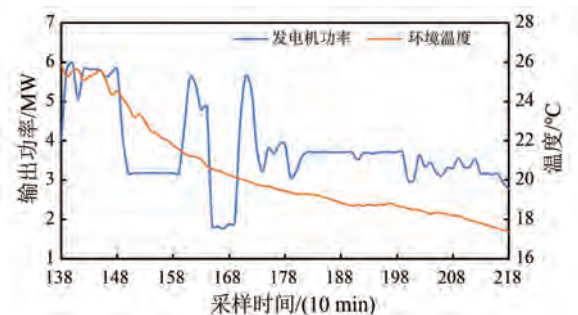


图 7 典型变负载工况运行曲线

Fig. 7 Typical varying load operating curve

根据图 7 中 PMWG 输出功率,将功率值 ± 50 kW 以内的数据规整合并为其中间值,设定 20 个工况,通过电磁计算,并考虑温度对定子铜耗、磁钢性能的影响,获得每个工况的热损耗,输入热网络模型,同时将每个工况下的环境温度作为初始条件带入模型进行热分析。

根据图 7 中的各工况进行仿真计算,将得到

的定子温度数据与 SCADA 现场测试温度数据进行对比,如图 8 所示。部分采样点现场测试温度与仿真温度对比如表 3 所示。

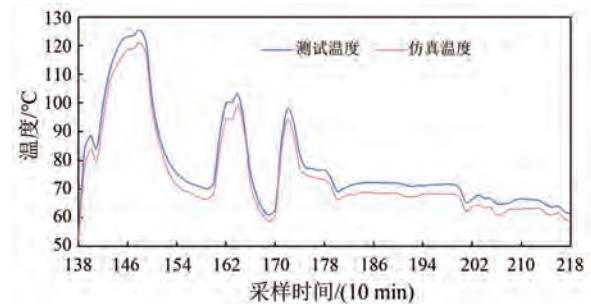


图 8 变负载工况下定子温度的仿真与测试结果对比

Fig. 8 Comparison of simulation and testing results of stator temperature under varying load conditions

表 3 PMWG 仿真与测试温度对比

Tab. 3 Comparison of PMWG simulation and test temperatures

采样点	仿真温度/°C	测试温度/°C	温差百分比/%
142	93.3	99.2	5.9
143	106.7	110.4	3.4
144	112.1	117.1	4.3
145	115.8	121.5	4.7
146	118.6	123.1	3.7
147	119.0	123.5	3.6
148	121.0	125.4	3.5

由图 8 和表 3 可知,仿真温度与测试温度有较好的跟随性,在最高温度点两者相差 4.4 °C。如图 8 所示,在采样时间段内,仿真与测试的最大温差百分比为 6%,平均温差百分比为 4.5%,验证了热网络模型的合理性和准确性。

5 结语

本文以 6 MW PMWG 为例,搭建 PMWG 热网络模型,完成了部分负载、额定负载等恒定负载工况以及变负载工况下 PMWG 瞬态和稳态的温升特性仿真计算。分析了 PMWG 绕组温升与热管理参数的变化规律,并与厂内型式试验数据和现场 SCADA 系统监测数据进行对比分析,得到如下结论。

(1) 通过 PMWG 热网络模型可以快速获取其瞬态和稳态温升特性。额定负载工况下,温升过程中各采样点的仿真与试验平均相对误差为

5%,热平衡时两者相对误差为 4.6%,验证了 PMWG 热网络模型的准确性。

(2)通过热网络法,分析了不同负载工况下 PMWG 定子线圈的温升情况。在相同冷却风量下,50%额定负载工况下的定子线圈温升为额定负载工况下温升的 36%。在定子线圈最高运行限制温度相同的条件下,50%额定负载工况下的冷却风量仅为额定负载工况下的 1/3。

(3)在变负载工况仿真与测试对比分析中,仿真数据曲线与测试数据曲线有较好的随动性,在最高温度采样点两者相差 4.4℃,整个采样周期内,仿真温度与测试温度的平均温差百分比为 4.5%。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

杨波进行了方案设计、内容总结与论文撰写,谭净、刘中华进行了风电机组现场运行测试数据的采集,钟永、张清小进行了现场实测数据的分析与处理,龚勇镇参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Yang Bo. The collection of on-site operation test data for wind turbine generator was conducted by Tan zheng and Liu Zhonghua. The analysis and processing of the on-site measured data were conducted by Zhong Yong and Zhang Qingxiao. The manuscript was reviewed and revised by Gong Yongzhen. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 黄守道, 张一凡, 冯垚径, 等. 永磁风力发电机技术发展综述[J]. 电气工程学报, 2025, 20(4): 22-42.
Huang S D, Zhang Y F, Feng Y J, et al. Review of the technological development of permanent magnet wind generator [J]. Journal of Electrical

- Engineering, 2025, 20(4): 22-42.
- [2] 夏云峰. 从 CWP2023 看全球风电产业发展趋势[J]. 风能, 2023(11): 62-65.
Xia Y F. Observing the development trend of the global wind power industry from CWP 2023 [J]. Wind Energy, 2023(11): 62-65.
- [3] 缠东辉, 任韶华, 王桢, 等. 14 MW 半直驱中速永磁风力发电机温度场分析和冷却结构优化[J]. 大电机技术, 2025(2): 78-85.
Chan D H, Ren S H, Wang Z, et al. Temperature field analysis and cooling structure optimization of a 14 MW hybrid drive medium speed permanent magnet wind generator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(2): 78-85.
- [4] 周宏林. 10 MW 海上风电双绕组永磁电机建模与工况研究[J]. 电气传动, 2020, 50(9): 8-14.
Zhou H L. Modeling and operation research on the 10 MW two-winding PMSG of offshore wind turbines [J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 8-14.
- [5] 李亮, 涂章, 李锐, 等. 大型永磁风力发电机整体充磁系统设计与应用[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6596-6608.
Li L, Tu Z, Li R, et al. Design and application of the post assembly magnetization system for large permanent magnet wind generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(24): 6596-6608.
- [6] 张程远, 项建强. 10 MW 海上风力发电机组风轮吊装技术研究[J]. 水电与新能源, 2022, 36(5): 48-51.
Zhang C Y, Xiang J Q. On the hoisting installation technology of wind turbine of 10 MW offshore wind power generator unit [J]. Hydropower and New Energy, 2022, 36(5): 48-51.
- [7] 李香锐, 林鹤云, 李如海, 等. 大型半直驱永磁风力发电机多目标优化设计[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(12): 33-42.
Li X R, Lin H Y, Li R H, et al. Multi-objective optimization design of large-scale semi-direct drive permanent magnet wind generator [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(12): 33-42.
- [8] 姚钢, 杨浩猛, 周荔丹, 等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 33-47.
Yao G, Yang H M, Zhou L D, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore

- wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33-47
- [9] 王立忠,王立林,洪义,等. 海上风电技术发展趋势[J]. 能源工程, 2024, 44(6): 3-12.
- Wang L Z, Wang L L, Hong Y, et al. Offshore wind power technology development trends [J]. Energy Engineering, 2024, 44(6): 3-12.
- [10] 杨波,贺建湘,刘中华,等. 大功率中速永磁风力发电机设计及性能研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(7): 35-38+47.
- Yang B, He J X, Liu Z H, et al. Design and performance research of high-power medium-speed permanent magnet wind power generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(7): 35-38+47.
- [11] 周志勇,程祥,张炳义. 基于多支路港口大功率永磁直驱电机优化设计[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(11): 1205-1214.
- Zhou Z Y, Cheng X, Zhang B Y. Optimal design of a high-power permanent magnet direct-drive motor with multi-branch configuration for port applications [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(11): 1205-1214.
- [12] 郝子璐,程祥,张炳义. 基于联合仿真的磨机直驱永磁同步电机设计与损耗分析[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(12): 1327-1337.
- Hao Z L, Cheng X, Zhang B Y. Design and loss analysis of direct drive permanent magnet synchronous motor of mill based on joint simulation [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(12): 1327-1337.
- [13] 王建春,杨波,冯玉洁,等. 面向矿区风电大基地的大功率永磁发电机设计研究[J]. 矿业研究与开发, 2026, 46(2): 303-310.
- Wang J C, Yang B, Feng Y J, et al. Research on design of high-power permanent magnet generator for large-scal wind power bases in mining areas [J]. Mining Research and Development, 2026, 46(2): 303-310.
- [14] 王巍,裴埏,魏钰桀,等. 气隙非均匀分布的内置式永磁同步电机振动噪声分析[J]. 电机与控制应用, 2026, 53(4): 382-390.
- Wang W, Pei Y, Wei Y J, et al. Analysis of vibration and noise of interior permanent magnet synchronous motors with non-uniform air gap distribution [J]. Electric Machines & Control Application, 2026, 53(4): 382-390.
- [15] 陆海玲,乌兰. 内置式永磁同步电机振动噪声分析与优化[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(12): 1307-1316.
- Lu H L, Wu L. Vibration and noise analysis and optimization of interior permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(12): 1307-1316.
- [16] 季洁,何山,王维庆,等. 大型永磁风力发电机偏心故障计算与分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(10): 96-101.
- Ji J, He S, Wang W Q, et al. Calculation and analysis of large permanent magnet wind power generator with eccentricity [J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(10): 96-101.
- [17] 张存,沈意平,阳雪兵,等. 气隙偏心下永磁风力发电机定子电磁振动特性分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(4): 53-59.
- Zhang C, Sheng Y P, Yang X B, et al. Electromagnetic vibration characteristics analysis of permanent magnet wind generator under air gap eccentricity [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(4): 53-59.
- [18] 晁贯良. 风电机组永磁发电机温度场疲劳仿真研究[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(3): 29-33.
- Chao G L. Simulation analysis on the temperature fatigue of permanent magnet generator for wind turbine [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2024, 53(3): 29-33.
- [19] 段志强,王紫媛,俞文斌,等. 大功率集成型风力发电机散热系统设计及数值模拟研究[J]. 微电机, 2024, 57(12): 47-52+59.
- Duan Z Q, Wang Z Y, Yu W B, et al. Design and numerical simulation of cooling system for high-power wind generator [J]. Micromotors, 2024, 57(12): 47-52+59.
- [20] 施宁强,魏敏,张新旺,等. 2.5 MW 直驱永磁风力发电机温度场的耦合研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(11): 92-96+249.
- Shi N Q, Wei M, Zhang X W, et al. Calculation and analysis of three-dimensional temperature field coupling of 2.5 MW permanent magnet wind turbine [J]. Computer Simulation, 2020, 37(11): 92-96+249.
- [21] 曾湘黔,柳印,刘勇辉,等. 半直驱永磁风力发电

- 机温度场仿真[J]. 船电技术, 2022, 42(9): 50-55.
- Zeng X Q, Liu Y, Liu Y H, et al. Temperature field simulation of semi direct drive permanent magnet wind turbine [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2022, 42(9): 50-55.
- [22] 于添昊, 李明, 伦淑娴. 屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁场和温度场的影响研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 90-101.
- Yu T H, Li M, Lun S X. Study on the influence of can sleeve material on the electromagnetic field and temperature field of canned permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 90-101.
- [23] 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 X L, Han X C, Wan S T. Fault characteristics analysis of permanent magnetic wind turbines considering wind speed distribution differences [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(2): 123-132.
- [24] 邹应冬, 王峰军, 周羽. 半直驱永磁风力发电机电磁损耗分离计算研究[J]. 电气传动, 2025, 55(8): 25-32.
- Zou Y D, Wang F J, Zhou Y. Research on electromagnetic loss separation calculation of semi-direct driven permanent magnet wind generator [J]. Electric Drive, 2025, 55(8): 25-32.
- [25] 张超, 司马秉奇, 王凯东, 等. 高速永磁电机的三维集总参数热网络模型研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(22): 7193-7203.
- Zhang C, Sima B Q, Wang K D, et al. Research of the three-dimensional lumped parameter thermal network model for high-speed permanent magnet motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(22): 7193-7203.
- [26] 吴攀, 王淑红. 基于场路耦合的调速永磁同步电机损耗及温度场分析[J]. 微电机, 2022, 55(3): 16-20.
- Wu P, Wang S H. Analysis of loss and temperature field of speed regulating permanent magnet synchronous motor based on field circuit coupling [J]. Micromotors, 2022, 55(3): 16-20.
- [27] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- Ni G Z. Principles of Engineering Electromagnetic Fields [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [28] 周宁, 吴华伟, 李智, 等. 基于磁热耦合扁线电机温升计算及影响因素分析[J]. 微电机, 2024, 57(5): 39-45.
- Zhou N, Wu H W, Li Z, et al. Calculation of temperature rise and analysis of influencing factors based on magnetic-thermal coupling flat wire motor [J]. Micromotors, 2024, 57(5): 39-45.
- [29] 丁树业, 江欣, 朱敏, 等. 基于集总参数热网络法的永磁同步电机启动及稳态温升分析[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(5): 143-150.
- Ding S Y, Jiang X, Zhu M, et al. Starting and steady temperature rise investigation for permanent magnet synchronous motor based on lumped-parameter thermal-network [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(5): 143-150.
- [30] 吴胜男, 郝大全, 佟文明. 基于等效热网络法和CFD法高速永磁同步电机热计算研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(7): 29-36.
- Wu S N, Hao D Q, Tong W M. Thermal calculation of high speed permanent magnet synchronous motor based on equivalent thermal network and CFD method [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(7): 29-36.

收稿日期:2026-05-09

收到修改稿日期:2026-07-01

作者简介:

杨波(1982—),男,硕士,高级工程师,研究方向为永磁风力发电机及风电主传动链系统设计与应用, 251706741@qq.com;

*通信作者:钟永(1989—),男,硕士,高级工程师,研究方向为微电网控制策略,413302970@qq.com。