

海上风电机组国产化研究与实践

孙财新, 张波, 唐巍, 周映鸣, 付明志, 秦猛, 郭小江

(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102218)

Research and Practice on Localization of Offshore Wind Turbines

SUN Caixin, ZHANG Bo, TANG Wei, ZHOU Yiming, FU Mingzhi, QIN Meng, GUO Xiaojiang

(Huaneng Clean Energy Research Institute, Changping District, Beijing 102218, China)

摘要: 统计并分析了海上风电机组叶片、主轴、电气系统、控制系统等关键部件和系统的技术现状及国产化状态, 针对目前海上风电机组部件与系统中存在的国产化弱项, 采用理论分析、材料/部件选型、部件研制、测试验证、整体组装的思路, 进行叶片、主轴承、变流器、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)等部件和系统的国产化研制, 并采用研制的国产化部件和系统进行5 MW国产化海上风电机组装配, 该机组的国产化率达到95%以上。结果表明: 海上风电机组的大部分部件与系统具备国产化条件, 部分设计(如叶片设计等)所用工业软件仍依赖进口, 少部分核心元器件国内仍然缺失。

关键词: 海上风电; 国产化; 风电机组; 叶片; 主轴承; 可编程逻辑控制器(PLC)控制系统

ABSTRACT: This paper analyzed the localization status of key components and systems in offshore wind turbines such as blades, spindles, electrical systems, and control systems. In view of the localization weaknesses existing in the components and systems of offshore wind turbines, the localization of blades, main bearings, converters and programmable logic controller (PLC) was carried out by using the ideas of theoretical analysis, material/component selection, component development, test verification and overall assembly, and 5 MW offshore wind turbines were assembled with the developed localization components and systems. The localization rate of the unit was more than 95%. The results show that most of the components and systems of offshore wind turbines have the conditions for localization, but some technologies, such as blade design, still rely on

imports, and a few core components are still missing in China.

KEY WORDS: offshore wind power; localization; wind turbine; blade; main bearing; programmable logic controller (PLC) control system

0 引言

当前, 我国风电机组的核心部件中, 海上风电机组的关键设备主要依赖进口, 在风机大型化发展趋势下, 国产化率较低成为制约我国海上风电发展的重要因素^[1]。海上风电机组亟须在大容量机组方面实现国产化。叶片、主轴承、主控系统、电气系统等是海上风电机组严重依赖进口的关键部件与系统, 需要重点突破。

我国已经具有中小容量风电机组配套叶片的弯扭耦合现象评估能力和气动阻尼的理论基础及设计经验, 拥有小尺寸叶片、全尺寸结构试验的能力和和经验, 可以进行叶片技术的验证, 但是适用于海上风电机组的超长柔性叶片颤振机理、弯扭耦合现象的研究尚不充分, 玻纤、树脂、胶黏剂和芯材等核心材料和部件依赖进口, 设计与工艺耦合迭代不充分。

我国的主轴承技术积累较为薄弱, 目前具备陆上3 MW级风电机组主轴承的设计、制造能力, 5 MW及以上容量风电机组的大直径主轴承很少有应用业绩。海上风电机组主轴承的运行工况更为复杂, 对连续运行的可靠性要求更高, 我国在该方面经验较少, 产品长期运行数据欠缺, 可靠性保证与进口产品存在较大差距。

电气系统方面, 我国已实现系统集成和主要

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1506600); 中国华能集团补短板专项(HNKJ20-H54)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2020YFB1506600); Technology Projects of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H54).

一次设备的小批量国产化,但国产电气系统设备在海上风电工程项目中缺少大规模应用经验,在一些基础电子器件和材料方面与国外品牌存在一定差距,尤其是变流器控制系统中的微控制单元(microcontroller unit, MCU)、数字信号处理(digital signal processing, DSP)、现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)、只读存储器(read-only memory, ROM)、随机存取存储器(random access memory, RAM)以及模拟集成电路等全部依赖进口,变流器主电路中的功率半导体器件绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)几乎被英飞凌、ABB、三菱、富士、西门康等国外厂商垄断,目前国产IGBT尚无在海上风电工程项目中的实际应用案例。此外,5 MW及以上功率发电机轴承、变压器绝缘高性能环氧树脂等也主要依赖进口。

在机组控制方面,我国主要采用传统的机电控制方式,由检测与转换元件对执行过程进行测量并反馈给指令元件,指令元件发送指令给执行元件执行^[2-7]。目前指令元件主要采用可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC),具备逻辑控制、时序控制、模拟控制、多机通信等功能。国内风机厂商已可完成控制策略、算法的编制集成,但是机组采用的PLC控制器主要依赖进口,对于大功率海上风电机组,国产PLC仍处于起步阶段。

1 国产化5 MW高速永磁海上风电机组关键部件研制

1.1 叶片

叶片国产化从叶片气动设计、结构设计、原材料3个角度展开,分别针对国产化存在的关键问题进行解决。根据叶片功率等要求布局翼型,计算核心叶片参数,计算机组运行推力系数、扭矩系数、转速和功率在不同风速下的分布,核算叶片发电能力,进行翼型选择;进行大梁、后缘辅梁、腹板、叶根设计,以及基于给定载荷的有限元校核,实现结构设计;对于制造叶片所需要的玻纤、树脂、结构胶、图层、螺栓进行性能分析和选择,对层合板进行拉伸模量和强度测试,

对胶黏剂进行极限剪切和疲劳剪切测试,对Balsa木进行x、y等方向压缩模量、压缩强度、剪切强度等的测试。完成设计后,进行叶片的刚度分析、强度分析、稳定性分析,然后进行工艺设计。制造完成后开展静力试验、疲劳试验。

本次国产化机组所设计叶片的风轮半径为83.6 m,沿叶展方向,从叶根到叶尖采用DU改型翼型族,含当地翼型弦长的40%、30%、25%、21%、18%五种厚度翼型。叶片本体质量29.1 t,含螺栓及附件总质量为30.2 t,机组轮毂高度设计为105.5 m,额定转速为10.1 r/min,额定功率为5 MW,切入风速为3.5 m/s,切出风速为24.9 m/s,额定风速为10 m/s。

叶片采用双腹板+小腹板+壳体结构,其国产化的主要材料包括玻纤、树脂、胶黏剂和芯材,各材料均按标准进行测试。将测试结果与进口部件进行对比,发现国产化叶片的部件与进口部件的差别主要体现在原材料上,如,国产叶片0°方向拉伸模量达到50.5 GPa,高于进口玻纤0°方向的拉伸模量47.5 GPa。树脂及结构胶、叶片芯材、部分壳体及腹板芯材的性能已不低于进口材料。

叶片按照真空灌注成型工艺生产,为保证叶片结构安全性,本次国产化叶片设计采用GH Bladed及有限元仿真工具,分别从强度、刚度以及稳定性3个方面进行分析。刚度分析利用GH Bladed软件对叶片进行叶尖净空分析,在极限状态下叶片叶尖距离塔壁5.89 m,自然状态下叶尖距离塔壁21.8 m,净空比为27%,满足GL2010标准要求。强度分析结果表明,材料安全系数、纤维强度、纤维间失效(inter fiber fracture, IFF)、黏接分析、纤维疲劳、黏接疲劳均满足标准要求。稳定性分析中,依据给定的载荷,叶片的线性屈曲因子最小为2.18(发生在MinFlap工况),大于GL2010要求的2.041 9,满足安全性要求。

叶片制造后,依据IEC 61400-23完成静力试验和疲劳试验,测试数据分别如表1、2所示。叶片在压力面、吸力面应变水平($<5\ 500\times 10^{-6}$)和疲劳应变水平总体可控($<2\ 000\times 10^{-6}$),试验过程中叶片未出现损伤。

表1 叶片极限试验结果					
Tab. 1 Blade limit test results					
区域	加载位置/m	不同形变率的应变值/ 10^{-6}			
		40%	60%	80%	100%
PS 面	1.5	644	966	1 287	1 612
	10.8	1 474	2 246	3 015	3 808
	22.7	1 663	2 528	3 371	4 208
	30.3	1 822	2 767	3 682	4 578
	41.8	1 945	2 945	3 885	4 758
	49.4	1 726	2 602	3 411	4 132
	60.9	1 564	2 334	3 010	3 548
SS 面	1.5	-669	-1 027	-1 382	-1 752
	10.8	-1 391	-2 101	-2 790	-3 487
	22.7	-1 733	-2 608	-3 431	-4 231
	30.3	-1 796	-2 694	-3 529	-4 321
	41.8	-1 815	-2 717	-3 544	-4 297
	49.4	-1 624	-2 420	-3 138	-3 763
	60.9	-1 446	-2 137	-2 733	-3 197

表2 叶片不同展向摆振应变测试结果	
Tab. 2 Test results of different spanwise sway strains of blades	
叶片展向位置/m	应变值/ 10^{-6}
0	738
5.0	1 712
7.3	1 661
10.8	1 440
15.0	1 325
18.8	1 733
22.7	1 870
26.5	1 961
30.3	1 900
34.1	1 730

1.2 主轴承

机组整体设计为上风向、三叶片、水平轴、双点支撑、齿轮箱传动的高速永磁全功率变频海上风电机组。传动链为单(大)轴承的紧凑型结构，轴承座与主机架集成，采用两点支撑结构，轴承承受除扭矩外其他所有力和弯矩。

目前该设计方案机组的主轴承一般采用从德国进口的三排圆柱滚子轴承。在国产化机组中，主轴承仍采用三排滚子结构，轴承外圈为一个整体，内圈为2片组合式，2根密封条为压板式密封，防止漏油。主轴承含有2排推力滚子、1排径向滚子，能够承受除扭矩外其他所有力及弯矩。内圈注油，外圈下半部分出油。保持架摩擦表面

(内径、外径、端面)设计有储油槽结构，以方便在摩擦表面形成油膜^[8]。国内外主轴承基本参数如表3所示。

表3 国产/国外主轴承基本参数的区别		
Tab. 3 Differences between domestic and foreign main bearing basic parameters		
参数	国产	国外
结构	三排滚子轴承	三排滚子轴承
原材料	钢 42CrMo-改良	钢 42CrMo4
滚子	G20Cr2Ni4A	类同 GCr15SiMn
保持架	铝青铜	黄铜
密封条	丁腈橡胶	丁腈橡胶
推力滚动体直径/mm	80×80,共 180 粒	80×80,共 180 粒
径向滚动体直径/mm	90×130,共 78 粒	90×135,共 72 粒

材料方面，主轴承相对于普通轴承必须具有更大的承载能力，因此其套圈选材及结构上要求更好的强度、耐磨性、化学稳定性及尺寸稳定性。国产化主轴承在普通 42CrMo 的基础上进行适量调整，提高锻件综合力学性能。设计后进行工程校核和有限元校核。工程校核主要进行静态安全系数评估、滚道寿命校核和轴承结构强度、疲劳性能分析，结果符合规范要求^[9]。有限元校核时连接螺栓用梁单元建模，滚动体采用非线性弹簧单元建模，每个滚动体用 3 个弹簧组成的弹簧组模拟滚柱，每个弹簧的两端点分别与接触区域刚性绑定，每个弹簧的刚度与 1/3 滚柱/滚道接触刚度完全相同。刚度曲线通过 Hertz 接触理论求解得到，模型边界条件是轮毂叶根端面与轮毂中心耦合施加载荷，机架下端面约束全部自由度，轴承约束旋转自由度，螺栓沿轴线施加预紧力。施加极限工况载荷如表 4 所示。

表4 极限工况载荷					
Tab. 4 Ultimate condition loads					
载荷 工况	$M_y/$ (kN·m)	$M_z/$ (kN·m)	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN
DLC2.2.4_9.7_0_n_2	-20 217	12 646	71.087 9	50.97	-1 763.9

通过有限元分析，轴向、径向保持架极限受力分别约 134.9、25.9 MPa，铜保持架材料强度≥540 MPa，保持架有足够强度。

制造完成后，主轴承进行空载试验等验证，通过水平测试、立式测试后，拆开轴承，无异常

情况。

1.3 电气系统

电气系统国产化的部件较为庞杂，较为核心的部件是变流器、发电机、环网柜、变压器和电缆终端附件，其中，变流器是需要国产化的最主要电气系统设备，主要由电气一次、二次以及辅助系统组成。一次系统主要包括功率半导体部件、主电路开关、交直流滤波设备、铜排、结构件。二次系统主要由核心控制器、驱动控制板、信号

采集与处理板、各类传感器、保护电路等构成。辅助系统主要包括辅助配电设备、温控设备、电源保障设备等部分。

目前绝大部分部件，如，配电开关、继电器、熔断器、电磁元件、铜排、结构件等均已实现国产化。仍使用进口零部件的器件包括：IGBT、网侧断路器、机侧隔离开关、防雷器。其中，变流器中的 IGBT 是需要国产化的最核心部件^[10-11]，经测试，国内外 IGBT 参数对比如表 5 所示。

表 5 IGBT 参数对比
Tab. 5 IGBT parameter comparison

参数	斯达 IGBT 双管 450 A	斯达 IGBT 双管 600 A	中车 IGBT 双管 450 A	富士 6 管 450 A	富士 2 管 450 A
型号	GD450HFX170C6S	GD600HFX170C6S	TG450HF17M1-S310	6MBI450V-170-56	2MBI450VN-170-50
集电极-发射极电压/V	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700
栅极-发射极电压/V	±20	±20	±20	±20	±20
集电极电流($@T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$)/A	706	1 069	—	600	600
集电极电流($@T_c=100\text{ }^{\circ}\text{C}$)/A	450	600	450	450	450
脉冲集电极电流($t_p=1\text{ m}$)/A	900	1 200	900	900	900
最大功耗($@T_j=175\text{ }^{\circ}\text{C}$)/W	2 542	4 166	2 700	2 500	2 500
最大结温/ $^{\circ}\text{C}$	175	175	175	175	175
运行结温/ $^{\circ}\text{C}$	-40~150	-40~150	-40~150	150	150

从表 5 可以看出，国内斯达和中车的 IGBT 产品除最大功耗略大于国外产品外，其余参数均能达到国外产品的水平。实际应用时，IGBT 的结温不超过 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，器件功耗差距将进一步缩小，国产 IGBT 可以满足实际使用需求。

1.4 PLC 主控系统

国产化 PLC 主控系统包括 PLC 硬件、主控程序 2 部分，在硬件方面，PLC 模块所选用的电子芯片等器件，总体遵循核心器件全国产化、产品整体自主可控的原则，CPU 芯片、存储芯片等实现 100% 国产化。核心软件组件及编程软件采用国产技术自主研发且兼容国产麒麟平台，相关开发工作参照 GJB 9530—2018 开展。在安全方面，依据 GB/T 18336—2015《信息技术 安全技术 信息技术安全评估准则》《CCRC-TR-072-2019 可编程逻辑控制器(PLC 设备)安全技术要求》等标准进行国产化 PLC 开发，采用国密算法、可信计算等信息安全防护措施。

在 PLC 模块中，将需要进行国产化的电子元器件按照技术成熟、技术可行、有待验证 3 个等

级进行划分对比，经分析，约 70% 已达到技术成熟等级，其余 30% 为技术可行等级。在当前技术基础上，将国产化 PLC 集成后，其与国外知名风电品牌倍福的主流 PLC 对标，其硬件性能对比如表 6 所示。

通过对比，国产化 PLC 硬件部分性能指标低于进口 PLC，大部分性能指标与进口 PLC 的指标相当，部分性能指标，如工作温度、电磁兼容标准、防护等级等，高于进口 PLC。但是，国产化 PLC 在长期(3~5 年以上的时间跨度)稳定、可靠运行等方面的表现，有待时间和实践的检验。参照国外同类产品的发展历程，可以预见，国产化 PLC 在稳定性、可靠性等方面，需要较长时间进行优化和迭代更新，同时，国产化 PLC 硬件在产品系列、模块种类等方面，与进口产品存在较大的差距。

软件方面，控制系统的拓扑采用线性结构，简单高效。控制系统程序采用 IEC61131-3 规定的 ST 语言编写，内容完整，结构清晰。与倍福产品相比，国产化 PLC 配套软件所附带的功能块、功

表 6 PLC 国内外参数对比

Tab. 6 Comparison of domestic and foreign PLC parameters

参数	德国倍福	国产化 PLC 模块
模块型号	CX5130-0111	未编号
模块名称	嵌入式控制器	CPU 模块
概述	英特尔凌动处理器、双核，无风扇设计，低功耗	严格遵循国内外的工业标准，采用全国产化设计，实现芯片级自主可控
处理器	Intel Atom™ E3827.1.75 GHz	SPARC V8.32bit, 400 MHz
内核数	2	4
主内存	4 GB DDR3 RAM(不可扩展)	256 MB
永久内存	1 MBCfast 卡	64 MB
接口	2×R145 10/100/1000 Mbit/s, 1×DVI-I, 4×USB 2.0, 1×可选接口(RS232/Profibus/CANopen)	以太网口×2(RJ45.10/100 Mbit/s); EtherCAT 接口×2(RJ45, 100 Mbit/s)
尺寸(W×H×D)	142 mm×100 mm×92 mm	40 mm×135 mm×125 mm
质量	约 960 g	560 g
工作/储藏温度	-25~60 ℃/-40~85 ℃	-40~70 ℃/-55~85 ℃
抗振/抗冲击性能	符合 EN60068-2-6/EN60068-2-27 标准	符合 GJB150.16A/18A 标准
抗电磁干扰/抗电磁辐射性能	符合 EN61000-6-2/EN61000-6-4 标准	符合 GJB151B—2013 标准
防护等级	IP 20	IP30
模块型号	EK1501	未编号
模块名称	EtherCAT 耦合器	双线光耦合模块
概述	用于连接 EtherCAT 与 EtherCAT 端子模块，将来自 100BASE-FX 以太网的传递报文转换为 E-bus 信号	通过 2 路多模光纤分别与 2 个冗余 CPU 进行连接，将光信号转换为电信号并经由背板传输给后端 I/O 及通信网关等模块，同时通过以光纤级联下一级耦合模块，实现从站扩展
数据传输介质	多模玻璃光纤 50/125 m(MM)	G.652 单模玻璃光纤(9/125 μm,1 310 nm)

能库与进口 PLC 存在较大的差距。同时，国产 PLC 还缺乏算法库，该部分能力体现了控制系统的易用性、成熟性，该部分功能的完备需要多年的实践积累、深厚的理论基础。

2 整体集成与施工

2.1 一体化设计

海上风机整体结构受到风-浪-流-土耦合作用，常规方法中，由于主机厂家对全场采用包络载荷进行设计，主机厂家与设计院分割孤立分析，风机的整体支撑结构适用频率区间偏保守等因素导致最终的支撑结构方案刚度不协调、整体性差、冗余度与造价偏高，基础结构的一体化设计可解决该问题。

国外在该方面研究较早，并在实际工程中产生了整体的减重效果^[12-13]。我国在该方面也开展了相关研究，文献[14-17]分别在整体设计方法、仿

真方法、整体支撑结构一体化设计等方面进行了研究。

在此次国产化机组项目中，采用了一体化设计方法进行基础结构设计。设计时，根据场址状况建立了综合随机风载、浪载、流载与土壤约束下的装备平台结构整体非线性时域模型，以此来表征平台结构在受到风、浪和流复杂极端工况作用下的整体动力特性，并统一支撑结构在极限、疲劳、变形、频率、构造要求约束下的优化设计算法。本次国产化系统设计方法流程如图 1 所示。

在此次国产化项目的实施中，通过采用一体化设计方法同时满足了不耽误施工顺序、无须重新备料、加快认证速度、不牺牲发电量的要求。节省了单台风机支撑结构塔架主体钢板 337 t，单桩钢板约 856 t，以 1.4 万元/t 计算，共计节约成本约 1 670 万元。

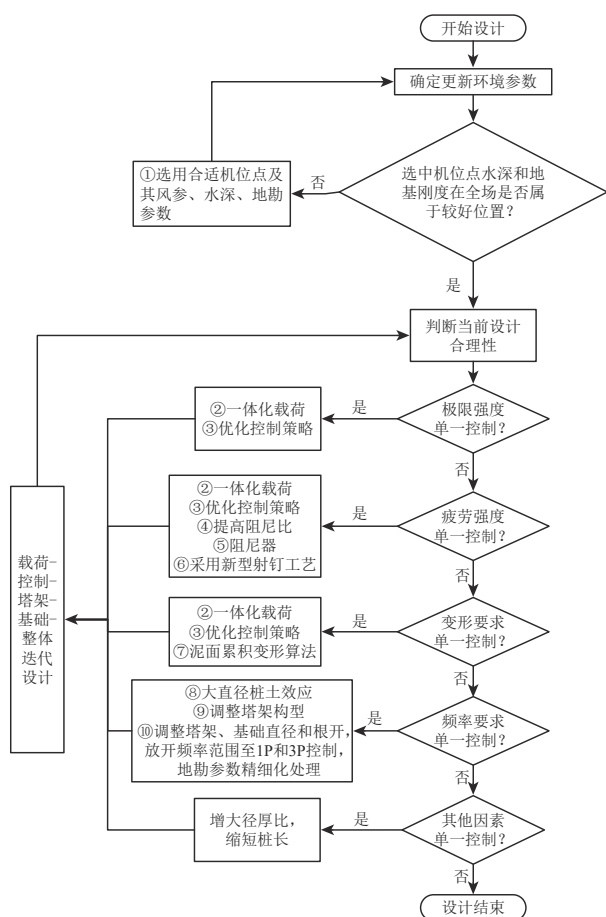


图1 整体化设计技术方案

Fig. 1 Overall design technical scheme

2.2 施工

国产化机组于2021年5月集成下线出运落驳,在2021年6月按照时序完成了塔筒吊装、机舱吊装、轮毂吊装和叶片吊装,如图2所示,于6月



图2 机组施工图

Fig. 2 Wind turbine construction picture

10日施工完毕。

3 结论

5 MW 国产化机组已完成了国产化认证和全景检测,国产化率超过95%,已在华能江苏如东H3海上风电场71#机位吊装完毕,进行示范应用。

通过此次对于海上风电大型机组的国产化研制,在海上大型风电机组的叶片、主轴承、电气系统和PLC主控系统方面进行了理论设计、原材料、制造工艺等全方位的国产化。但是,在此次国产化机组研制中,进行叶片设计等工作时采用的工业软件仍然是进口的,一些甚至无国产可替代,部分核心元器件国内仍然缺失,需要继续加强产业链的协同发展。

参考文献

- [1] 时智勇. “十四五”我国海上风电发展的几点思考[J]. 中国电力企业管理, 2020(5): 40-42.
SHI Z Y. Several thoughts on the development of our country's offshore wind power during the “14th Five-Year Plan” [J]. China Electric Power Enterprise Management, 2020(5): 40-42.
- [2] 张磊, 李继影, 李钦伟, 等. 风力机偏航系统控制策略研究现状及进展[J]. 发电技术, 2021, 42(3): 306-312.
ZHANG L, LI J Y, LI Q W, et al. Status and prospect of yaw system control strategy for wind turbines [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(3): 306-312.
- [3] 蔡葆锐, 杨蕾, 黄伟. 基于惯性/下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 169-177.
CAI B R, YANG L, HUANG W. Frequency coordination control of a variable speed wind turbine based on inertia/droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 169-177.
- [4] 王鑫, 杨德健, 金恩淑, 等. 双馈风电机的虚拟惯性控制优化策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 1-6.
WANG X, YANG D J, JIN E S, et al. Improved virtual inertial control strategy of doubly-fed induction generator[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 1-6.
- [5] 陈刚. 海上风电工程结构监测技术应用[J]. 水利规划与设计, 2018, 31(4): 127-132.
CHEN G. Application of structural monitoring

- technology in offshore wind power engineering[J]. Water Resources Planning and Design, 2018, 31(4): 127-132.
- [6] 廖雪松, 刘楠, 董燕, 等. 基于全域感知的智能风电机组平台应用研究[J]. 风能, 2020(7): 96-101.
LIAO X S, LIU N, DONG Y, et al. Application research of intelligent wind turbine platform based on global perception[J]. Wind Energy, 2020(7): 96-101.
- [7] 高本峰, 王晓, 梁纪峰, 等. 混合型统一潮流控制器抑制风电次同步振荡控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 53-64.
GAO B F, WANG X, LIANG J F, et al. Control strategy of hybrid unified power flow controller to suppress wind power sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 53-64.
- [8] WANG H, HE P Y, PANG B T, et al. A new computational model of large three-row roller slewing bearings using nonlinear springs[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(20): 3831-3839.
- [9] International Organization for Standardization. ISO/TS 16281: 2008, Rolling bearings: methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings[S]. London: British Standards Association, 2008.
- [10] 董文博, 顾秀芳, 陈艳宁. 风电并网价值分析[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 320-327.
DONG W B, GU X F, CHEN Y N. Value analysis of wind power integration[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 320-327.
- [11] 于永军, 王利超, 张明远, 等. 基于阻抗特性多项式拟合的直驱风电机组次同步振荡稳定判据[J]. 发电技术, 2020, 41(4): 429-436.
YU Y J, WANG L C, ZHANG M Y, et al. Stability criterion of subsynchronous oscillation of direct drive permanent magnet synchronous generator based on impedance polynomial fitting[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4): 429-436.
- [12] RAD H, TURAJ A, PAUL L C D V, et al. Integrated multi-disciplinary constrained optimization of offshore support structures[C]//Journal of Physics: Conference Series. Oldenburg, Germany: IOP, 2012: 1-10.
- [13] THEO G, WANG L, ATHANASIOS K. Integrated structural optimization of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm[J]. Applied Energy, 2017, 199(8): 187-204.
- [14] 张博. 海上风机一体化载荷仿真方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
ZHANG B. Study on integrated loads simulation of offshore wind turbine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [15] 周映鸣, 李晓勇, 陈晓庆. 海上风机支撑结构整体优化设计[J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 86-92.
ZHOU Y M, LI X Y, CHEN X Q. Integrated design optimization of offshore support structure[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(4): 86-92.
- [16] 赵向前, 黄松苗, 赵梓杭. 一体化理念在国内海上风电开发建设上的应用探究[J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 1-6.
ZHAO X Q, HUANG S M, ZHAO Z H. Application study of integration concept in domestic offshore wind power construction[J]. Southern Energy, 2014, 1(1): 1-6.
- [17] 田德, 陈静, 罗涛, 等. 基于柔性基础模型的海上风电机组支撑结构优化[J]. 太阳能学报, 2019, 40(4): 1185-1192.
TIAN D, CHEN J, LUO T, et al. Optimization of offshore wind turbine support structures based on flexible foundation models[J]. ACTA Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40(4): 1185-1192.

收稿日期: 2022-10-10。

作者简介:



孙财新

孙财新(1986), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高电压与绝缘技术研究, cx_sun2@qny.chng.com.cn;



郭小江

郭小江(1978), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事新能源发电、电力系统稳定与控制研究, xj_guo@qny.chng.com.cn。

(责任编辑 辛培裕)