

海上升压站设计优化研究

张宾瑞[✉], 王小刚, 苏磊

(中广核工程有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: [目的]近年来我国投运了大量的海上升压站, 积累了丰富的海上升压站建造和运行经验, 综合这些经验发现当前海上升压站的设计存在运行模式分析较为简单、重要设备间空调电源为一般负荷、海上升压站“无人值守”设计理念并不符合实际, 在环保要求方面考虑不周全等问题, 海上升压站设计仍有新的优化空间。[方法]主要分析了近年若干海上风电场在建造和运行阶段出现的经验反馈, 对比分析国内外主要海上升压站设计规范。[结果]对海上升压站的运行模式分析、重要设备间暖通空调负荷分级、海上升压站人员值守形式和环保要求方面提出了设计优化建议。[结论]海上升压站的设计优化建议可为后续新的海上升压站设计提供参考。

关键词: 海上升压站; 设计优化; 运行模式; 暖通; 环保

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)01-0105-07

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Design Optimization of Offshore Booster Stations

ZHANG Binrui[✉], WANG Xiaogang, SU Lei

(CGNPC Engineering Co., Ltd., Shenzhen 51800, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In recent years, China has put into operation a large number of offshore booster stations and accumulated rich experience in the construction and operation of offshore booster stations. Based on these experiences, it is found that the current design of offshore booster stations has certain problems, such as relatively simple analysis of operation mode, general load of air conditioning power supply in important equipment rooms, the "unattended" design concept of offshore booster stations does not conform to reality, and inadequate consideration of environmental protection requirements. The design of offshore booster station still has new optimization space. [Method] The experience feedback of several offshore wind farms in the construction and operation stage in recent years were analyzed and the relevant of standards at home and abroad was studied. [Result] Design optimization suggestions are put forward for the operation mode, HVAC load classification of important equipment rooms, personnel duty form of offshore booster station. [Conclusion] The design optimization suggestions of offshore booster station summarized in this paper can be used as a reference for subsequent design of new offshore booster station.

Key words: offshore booster station; design optimization; operation mode; ventilation and air conditioning; environment protection

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

海上升压站是海上风电场输送电的枢纽, 它的可靠、安全运行对整个海上风电场起着非常重要的作用。通常海上风电场离岸距离超过 10 km, 装机容量超过 100 MW 时需要设置海上升压站, 用于汇集海上风机产生的电能、抬升输出电压、降低输电

损耗^[1-3]。

受益于近年来海上风电补贴政策, 我国海上风电工程的开发和建设迅速。特别是近两年来, 国内又建设和投运了很多新的海上升压站, 海上升压站的各建设和运维单位又积累了丰富的运行经验, 对海上升压站的设计提出了新的优化要求。当前海上

收稿日期: 2022-04-01 修回日期: 2022-06-02

基金项目: 广东省重点领域研发计划(第八批)“大规模海上风电与天然气发电融合多能互补关键技术的研发”(2021B0101230004)

升压站的设计存在运行模式分析较为简单、重要设备间空调电源为一般负荷、海上升压站“无人值守”设计理念并不符合实际,在环保要求方面考虑不周全等问题。

目前国外专门针对海上升压站的标准和规范主要有挪威船级社 2020 年出版的标准 *Offshore substations*(DNV-ST-0145),该标准对升压站结构安全等级、布置原则、结构设计、电气设计、防火防爆、疏散逃生、应急响应、建造以及运维等方面提出了较详细要求^[4]。国内针对海上升压站设计的规范主要是《风电场工程 110 kV ~ 220 kV 海上升压变电站设计规范》(NB/T 31115—2017),该规范结合 2017 年以前国内海上升压站的设计运行经验,对海上升压站的总体布置,电气一二次设计,结构设计,给排水设计,消防设计,暖通设计,逃生与救生设施设计,施工组织设计进行了较为全面地规定^[5]。2019 年中国船级社出版了《海上升压站平台指南》,该指南主要梳理海上升压站相对于固定式海洋油气平台的异同点,总结已建在建海上升压站的功能需求和设计特点,提出了海上升压站各系统结构的设计要求和检验条款^[6]。

针对海上升压站的设计要求和优化建议,国内主要从以下方面进行了研究:文献 [7] 吸收了欧洲海上升压站的设计经验。针对我国海上升压站的具体特点,提出了海上升压站的设计基本要求。文献 [8] 分析了海上升压站与陆上变电站之间的技术差异,综述了当前海上升压站电气系统设计与运维的关键技术。文献 [9] 介绍了海上升压站的构成情况,从设备的安全可靠、布局优化、安装调试以及后期运维等方面,对海上升压站主变压器和高压 GIS 的设计和选型进行了阐述和建议。文献 [10-11] 对海上升压站电气主接线和重要电气设备的联结进行了比较选择。文献 [12] 和文献 [13] 对海上升压站平台布置进行了研究。国内也针对海上升压站的各种技术规范 and 标准以及标准之间的对比进行了研究^[14-15]。

本文主要分析近年若干海上风电场在建造和运行阶段出现的经验反馈,对海上升压站的运行模式分析、重要设备间暖通空调负荷分级、海上升压站人员值守和环保要求方面提出了设计优化建议,可用于对后续新的海上升压站设计提供参考。

1 海上升压站运行模式的设计优化

1.1 海上升压站运行模式的分析

在海上升压站的整个生命周期中,海上升压站实际上存在着建造、调试、试运行、正常运行、例行检修、故障检修或停运等多种运行状态,在不同的状态下要求海上升压站具备不同的运行模式。设计应对不同的运行模式进行充分考虑,将海上升压站建设成为能够适应各种运行状态和环境条件的“韧性”升压站。目前国内规范如《风电场工程 110 kV ~ 220 kV 海上升压变电站设计规范》(NB/T 31115—2017)和中国船级社出版的《海上升压站平台指南》并没有对于海上升压站的运行模式进行明确的定义和规定。挪威船级社 2020 版的 *Offshore substations*(DNV-ST-0145)将海上升压站的运行模式划分为正常模式、(N-1)模式、孤岛模式、应急模式和“黑站”模式。

综合海上升压站建造和运维的经验及挪威船级社的规定,下文对升压站的五种运行模式分别进行分析,以期对后续海上升压站的设计有所启发。

1) 正常模式:海上升压站与电网连接良好,可处于向电网送电或倒送电状态;整体上功能齐全,运行正常。电气一次主设备都处于正常运行状态(并不一定处于满功率状态);电气二次设备软硬件状态良好;与外界通信设备功能正常;辅助系统包括给排水、供暖空调和通风、消防系统功能正常;应急设施包括火警消防,逃生救援设施持续处于可用状态;相关人员临时生活设施状态良好及食品水源储备充足。这种模式一般存在于海上升压站试运行或持续运行期间,设计应充分将正常模式下各种设备的用电负荷考虑周全。

2) (N-1)模式:海上升压站仍与电网连接,海上升压站部分主设备或辅助设备由于故障而丧失功能或由于处于调试阶段而未具备功能,但尚不至于切断与外部电网的联系。例如具有两回海缆的风电场,其中一回因故障而被停用;或者具有两台主变的海上升压站,其中一台主变故障停用。在(N-1)模式下主系统和辅助系统功能应基本正常;与外界通信设备功能基本正常;应急设施包括火警消防,逃生救援设施仍应处于持续可用状态;相关人员临时生活设施及食品水源储备充足。(N-1)模式一般存在于海上升压站调试或故障检修期间,设计之初就应对

海上升压站进行失效模式与影响分析(FMEA),提供适当的设计冗余和裕量,为电厂调试或检修人员提供足够的时间将(N-1)模式转换为正常模式。

3) 孤岛模式:当海上风电场的主登陆海缆损坏或陆上送出的架空输电线路故障时,海上风电场与电网系统断开,海上风电场就处于孤岛模式。在孤岛状态下海上升压站除重要和应急负荷(包括通信电源、监控电源、事故照明、事故通风、消防火灾和逃生救援设备等)处于持续运行状态外,主设备或辅助设备应处于可用状态。相关人员不应在升压站上过夜。孤岛模式一般存在于海上升压站海上调试初期,主送出海缆全部故障或外部电网故障状态。设计应为重要和应急负荷提供充足的柴油发电机、蓄电池等应急电源容量^[16]。

4) 应急模式:海上升压站由于火灾或其他不可抗力而造成整个升压站失去功能。海上升压站应具备可靠的防火分区、防火封堵等被动的防护措施;具备足够的逃生设施,比如配备足够的救生圈、保温衣、救生艇等救生设施。

5) “黑站”模式:海上升压站失去全部电力但并不是处于应急模式。比如海上升压站在吊装到位的初期,长期处于孤岛模式而导致应急电源耗尽等情况。设计应考虑为海上升压站配置可靠的防火分区、防火封堵等被动的防护措施;具备足够的逃生设施,比如配备足够的救生设施和食品;考虑配置小型风光发电装置。

1.2 大孤岛和小孤岛运行模式的优化选择

当风电场正常运行时,海上风电机组通过集电海缆汇集到海上升压站进一步通过登陆海缆接入电网。风电场发电时,电能被从风机输送到电网;风电场不发电时,电网可以对海上升压站倒送电进而向风机供电。当海上风电场的主登陆海缆损坏或陆上送出的架空输电线路故障时,海上风电场与电网系统断开,海上风电场就会处于孤岛状态。

当风电场处于孤岛运行状态时,可以有两种模式选择:一种是小孤岛运行模式,即海上升压站重要关键设备由平台应急柴油发电机供电运行,升压站不向风电机组供电,仅需考虑海上升压站的重要和应急负荷,柴油发电机配置容量和尺寸较小。这种模式下海上升压站的尺寸和重量以及工程成本都可以有较大的优化。另一种是大孤岛运行模式,即不

仅海上升压站内设备由平台柴油机组供电运行,而且升压站与风电机组串之间保持连接,风机内辅助设备同样由柴油发电机组供电运行,柴油发电机配置容量较大。这种模式下海上升压站的尺寸和重量较大,整体造价提高。

一般根据海上风电场厂址附近海域台风专题报告、风机设备厂提供的机组的抗台策略(关注是否需要后备电源及在何种条件下需要后备电源)、风机厂提供的风力发电机组维护手册(关于机组最大允许断线时间),以及项目业主对于工程造价的承受程度综合考虑选择运行模式。

以广东某海上风电场采用 MySE5.5-155 风电机组为例。该风机在不具备并网条件下,可以在海上环境下最大允许断线时间为1个月。在风机未并网投运前,由风机厂负责采取每个月定期运维船运维的方式对风场风机进行维护。由于该海上风电场送出海缆采用2回220kV海缆,2回海缆同时因事故断开的概率极小,不考虑因海缆故障导致风电场处于孤岛运行状态的情况。在该风电场的接入线路存在一般故障时,平均故障修复时间一般数小时内能完成;根据《台风型风力发电机组》(GB/T 31519—2015)附录D.3台风持续时间分析,严重故障时一般两周以内完成^[17]。这意味着海上风电机组可以在小孤岛状态下得到正常维护,同时能够采购成本更低的小型柴油发电机组,因此该风电场最终选择小孤岛运行模式。

2 海上升压站暖通系统的设计优化

2.1 将升压站二次设备间空调设置为应急负荷

目前海上升压站站用电设计依据《风电场工程110kV~220kV海上升压变电站设计规范》(NB/T 31115—2017)^[5]及《海上风力发电场设计标准》(GB/T 51308—2019)^[18],以上规范中“海上升压变电站内的通信电源、监控电源、事故照明、事故通风、消防火灾系统、逃生设备和导航设备为应急负荷;设备操作电源为重要负荷;除应急负荷和重要负荷外的其它负荷为常规负荷。海上升压变电站工作电源应满足应急负荷、重要负荷和常规负荷的供电需求,应急电源应满足应急负荷和重要负荷的供电需求。”2019年中国船级社颁布了指导性文件《海上升压站平台指南》(2019年7月1日后执行)中第4.6站用

电章节也未将空调系统列为应急负荷,但是在 6.4.7 空调及通风系统章节中,增加了重要处所通风系统的应急电源供电需求“平台上重要处所的通风空调系统的电源应满足应急电源的供电要求,如应急开关室、中央控制室、蓄电池室、消防泵房、七氟丙烷间/二氧化碳间。所有暖通空调控制盘的电源亦应满足应急电源的供电要求。”该指导文件非强制性要求,且在广东部分海上风电项目施工完成之后才开始实施。Offshore substations(DNV-ST-0145)5.5 节辅助能源系统中也未将重要设备间暖通空调作为应急负荷。

依据目前国内现行规范设计广东某海上风电场海上升压站,其空调系统尚未设计成重要负荷及应急负荷。该海上升压站于 2020 年 11 月 11 日停电,直至 11 月 16 日才具备窗口期出海登上升压站,在此期间未停二次设备供电。运维人员到达升压站后发现,继保室墙壁温度高达 44.3 ℃,设备柜内温度超过 63 ℃,设备过热老化可闻焦糊味较重,部分通信设备、保护监控后台电脑因高温死机,雾笛系统后备电源电池全部鼓包。休息仓冰箱掉电,冰箱储存的食物腐烂。经初步分析认为继保室空调取电于 PC 段,全站停电后,继保室空调掉电停机,无法制冷;柴油发电机启动,继保室各种保护、通讯等设备正常运行,特别是 UPS 电源、直流系统等设备热量无法排出。由于海上升压站为“无人值守”变电站,220 kV 系统停电期间,继保室高温问题将影响保护装置设备使用寿命,并有火灾风险。休息仓电源也是取电于 PC 段,停电检修时无法制冷。

实际运行过程中由于计划或非计划停电时海况不好,确实会出现升压站停电而人员无法及时登上海上升压站的状态,此时控制室内重要控制设备不停电,设备和房间存在温度过高的情况,将控制室、应急开关室和蓄电池室暖通空调作为应急负荷,接到应急母线上可较好地解决此问题。将休息室内插座回路接到应急电源母线,以便于运行人员确定何时手动向休息室内的空调和冰箱供电。为此建议在《风电场工程 110 kV ~ 220 kV 海上升压变电站设计规范》(NB/T 31115—2017)中将升压站二次设备间通风空调设备设为应急负荷。

同时在应急柴油发电机选型采购时,不仅考虑正式电源失去后,应急柴油发电机供电带应急负荷,

也要考虑海陆联调和倒送电期间需求,选用能够满足要求的应急柴油发电机,适当增加供货合同中供应商负责的维护保养次数。

2.2 优化暖通空调布置,避免通风口距桥架过近

广东某海风项目海上升压站暖通室外机(#1 主变的#1 和#2 空调室外机)通风口离电缆太近,通风口距上部 220 kV 电缆桥架小于 30 cm,暖通空调启动时桥架温度最高时超过 60 ℃。220 kV 电缆厂家根据环境温度 60 ℃ 进行复核,电缆载流量为 735 A,小于载流量要求 862 A,不满足要求。

对于暖通室外机排风口与电缆桥架的距离,国内尚无规范明确规定,在 GB 50217 电缆设计规范里对热力管道与电力电缆之间的距离有要求,见表 1,明敷的电缆不宜平行敷设在热力管道的上部,电缆与管道之间无隔板防护时的允许距离,热力管道与电力电缆平行时,距离要求不小于 1 000 mm,暖通设备的排风口热量排放更集中,距离不应比此标准小。在海上升压站的设计中要求暖通设备的排风口应避开电缆桥架,确实不能避开的,排风口距桥架的距离不应小于 1 500 mm,可留有空间对排风口进行导流。

表 1 电缆与管道之间无隔板防护时允许距离

Tab. 1 Allowable distance between cable and pipeline without partition protection

		mm	
电缆与管道之间走向		电力电缆	控制和信号电缆
热力管道	平行	1 000	500
	交叉	500	250
其他管道	平行	150	100

3 海上升压站的人性化优化设计

3.1 关于“无人值守”理念的设计优化

《风电场工程 110 kV ~ 220 kV 海上升压变电站设计规范》(NB/T 31115—2017)3.0.5 节规定海上升压变电站应按照“无人值守”方式设计,并按照无人驻守平台设计。“无人值守”方式理解为允许运维人员必要时进入海上升压变电站内进行巡视和检修,但不允许运维人员在海上升压变电站内住宿。不设置生活平台的海上升压变电站内应设置避难室,避难室内配备有必要的应急救助设施,当运维人员由于海况等原因无法及时撤离海上升压变电站时,可

在避难室内得到必要的救助。避难室的设计不包括宿舍、食堂、办公室、娱乐室等生活设施和发电机、消防设备、污水处理装置等辅助设施,这些设施都是生活平台的设计需要。因此根据规范海上升压站没有休息室的概念,只有避难室的概念。

在海上升压站安装、运行和维护的过程中,施工和运行人员经常需要在升压站上工作生活数天,这时的避难室实际上成为站上人员的休息室。为此目前海上升压站是按照“无人值守”的理念设计,但是实际都是按“短期有人值守”的状态使用。随着海上风电场离岸越来越远,设计应充分调研和分析建造单位的使用情况,在后续规范中将海上升压站划分为“无人值守”、“短期有人值守”和“长期有人值守”三种形式。特别是在“短期有人值守”设计中将避难室调整为有一定生活功能的临时休息室,与业主运行到位充分沟通休息室的功能需求,对休息室进行合理的布置设计。临时休息间应考虑安装空调、冰箱和通风换气装置。通风换气装置宜为独立的换气系统并具有挡雨和防盐雾的功能。

3.2 通信基站和 WIFI 的设置

在海上升压站上建立通信基站,充分利用送出海缆中复合的光纤,与陆上基站配合,在海上升压站至少覆盖一家通信运营商的信号,实现施工人员的常用通信要求。另外在海上升压站各层可设置无线路由,实现 WIFI 覆盖,便于海上升压站的数字化、信息化管理。

4 海上升压站使用环保要求的设计优化

4.1 在海上升压站增加生活污水处理装置

根据《海上升压站平台指南》11.3.1~11.3.2 规定^[6]:生活污水未经处理不得排入海。如升压站平台所在海域禁止排放生活污水,则生活污水需外运。生活污水的排放应满足国家和地方规定的排放标准。生活污水的排放应进行定量。

广东某海上升压站卫生间原为直排功能且为固定式,根据指南规定要求需增加污水处理装置。主要设计优化内容如下:需要修改卫生间型式并增加污水处理装置和房间,在一层甲板下增加操作平台,对原整体式采购的卫生间模块修改技术要求,由移动式改为固定式,根据固定式卫生间用电设备及污水处理设备的负荷情况增加相应电源及控制回路,

并在操作平台上增加照明灯具,增加污水处理设备的采购要求,根据具体情况增加相应的通风及消防设备。设备方面增加污水处理装置、除臭装置、固定式卫生间、动力箱、控制箱、钢材、辅材、盐雾过滤器等。

4.2 在海上升压站柴油机上增加废气处理装置

海上风电海洋环评对柴油发电机提出环保要求,环评要求如下:备用柴油发电机采取水喷淋处理措施后由专门的烟气管道引至楼顶高空排放,排放的尾气可符合广东省地方标准《大气污染物排放限值》(DB 44/27—2001)^[19]二级标准(第2时段)限值(见表2)。达到以下排放标准需增加颗粒捕集器。在海上升压站初设方案审查中,应关注国家标准和环评报告中对环保的要求,将相关要求落实到设计方案和采购技术规范书中。

表2 广东省地方标准《大气污染物排放限值》
(DB 44/27—2001) 摘录

Tab. 2 Excerpt from Guangdong local standard *Emission limits of air pollutants* (DB 44/27—2001)

标准	SO ₂	NO _x	颗粒物
第2时段二级标准	500	120	120

mg/m³

5 结论

本文主要总结分析了近年若干海上风电场在建造和运行阶段出现的经验反馈,对海上升压站的运行模式、暖通系统、人性化和环保要求方面提出了设计优化建议,主要结论有:

1) 结合海上升压站的运行状态,对海上升压站的五种运行模式进行了分析,应将海上升压站建设成为能够适应各种运行状态和环境条件的“韧性”升压站。对于海上风电场选择小孤岛还是大孤岛运行模式要根据海上风电场厂址风况、风机设备的抗台策略,以及技经分析等多种因素综合分析。

2) 由于实际运行过程中计划或非计划停电同时海况不好,会出现升压站停电而人员无法及时登上海上升压站的情况,建议将海上升压站二次设备间通风空调设备设为应急负荷。为避免暖通散热通道对电气设备和电缆的影响,应关注和优化暖通空调布置。

3) 在海上升压站安装、运行和维护的过程中, 按无人值守理念设计的避难室实际上成为站上人员短期的休息室, 在设计中建议平衡项目建设成本和人性化设施两方面需求, 进一步优化规范中海上升压站“无人值守”的概念, 允许一定的运维人员或建造人员在海上升压变电站上短期住宿和生活。

4) 海上升压站的设计应满足环保要求, 建议在海上升压站增加生活污水处理装置, 在柴油机上增加废气处理装置。

参考文献:

- [1] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(31): 5459-5466. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.31.001.
WANG X F, WEI X H, NING L H, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(31): 5459-5466. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.31.001.
- [2] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(14): 3758-3770. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152756.
CHI Y N, LIANG W, ZHANG Z K, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2016, 36(14): 3758-3770. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152756.
- [3] 郑明, 王长虹. 海上风电场输电方式研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(2): 99-108.
ZHENG M, WANG C H. Research on the transmission mode of offshore wind farm [J]. *Southern Energy Construction*, 2018, 5(2): 99-108.
- [4] Det Norske Veritas. Offshore substations: DNV-ST-0145 [S]. Norway: DNV GL AS, 2020.
- [5] 国家能源局. 风电场工程110 kV~220 kV海上升压变电站设计规范: NB/T 31115—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
National Energy Administration. Code for 110 kV~220 kV offshore substation design of wind power projects: NB/T 31115-2017 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [6] 中国船级社. 海上升压站平台指南 [R]. 北京: 中国船级社, 2019.
China Classification Society. Guidelines for offshore substations [R]. Beijing: China Classification Society, 2019.
- [7] 杨建军, 俞华锋, 赵生校, 等. 海上风电场升压变电站设计基本要求的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(14): 3781-3788. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152761.
YANG J J, YU H F, ZHAO S X, et al. Research on basic requirements of offshore substation design [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(14): 3781-3788. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152761.
- [8] 黄玲玲, 汤华, 曹家麟, 等. 交流海上变电站设计相关研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 1351-1359. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162154.
HUANG L L, TANG H, CAO J L, et al. Analysis and prospects of offshore ac substation design technology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1351-1359. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162154.
- [9] 李德军, 周剑, 钟孝泰, 等. 海上风电场升压站变压器和GIS的设计、应用和展望 [J]. *高压电器*, 2021, 57(1): 1-11. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2021.01.001.
LI D J, ZHOU J, ZHONG X T, et al. Design, application and prospect of transformer and GIS in booster substation for offshore wind farm [J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(1): 1-11. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2021.01.001.
- [10] 和庆冬, 朱瑞军, 梅春. 400 MW海上升压站电气主接线方案探讨 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(4): 80-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.013.
HE Q D, ZHU R J, MEI C. Discussions on the main electrical wiring scheme for a 400 MW offshore substation station [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(4): 80-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.013.
- [11] 谭任深. 海上风电场工程集电系统拓扑设计研究 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(3): 67-71.
TAN R S. Research on the topology design of offshore wind farm collection system [J]. *Southern Energy Construction*, 2015, 2(3): 67-71.
- [12] 张明, 张哲, 叶军. 海上风电场升压平台布置研究初探 [J]. *上海节能*, 2015(2): 80-84. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2015.02.006.
ZHANG M, ZHANG Z, YE J. Research on boost platform layout on offshore wind farm [J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2015(2): 80-84. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2015.02.006.
- [13] 郝鑫, 张哲, 胡君慧, 等. 海上风电场升压变电站电气布置研究 [J]. *供用电*, 2015(1): 64-67. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2015.01.011..
QIE X, ZHANG Z, HU J H, et al. Research on the electric layout of the step-up substation of offshore wind farm [J]. *Distribution & Utilization*, 2015(1): 64-67. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2015.01.011..
- [14] 李红涛, 王宾, 唐广银. 海上风电场设施技术规范综述 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(2): 1-6. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.001.
LI H T, WANG B, TANG G Y. Summary of technical specifications for offshore wind farm facilities [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(2): 1-6. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.001.

- [15] 戚永乐, 史政. 海上升压站平台不同标准对比研究 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(1): 55-65. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.010.
QI Y L, SHI Z. Comparative research on different standards of offshore steel structure platform [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(1): 55-65. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.010.
- [16] 郑明, 杨源, 沈云, 等. 海上风电场孤岛状态下的备用柴油发电机方案研究 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(1): 24-30.
ZHENG M, YANG Y, SHEN Y, et al. Research on the standby diesel generator set scheme of offshore wind farm in the state of island operation mode [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(1): 24-30.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 台风型风力发电机组: GB/T 31519—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Wind turbine generator system under typhoon condition: GB/T 31519-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海上风力发电场设计标准: GB/T 51308—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of offshore wind farm: GB/T 51308-2019 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2019.
- [19] 广东省环境保护局, 广东省质量技术监督局. 大气污染物排放限值: DB 44/27—2001 [S]. 广州: [出版者不详], 2002.
Department of Ecology and Environment of Guangdong Province, Administration of Quality and Technology Supervision of Guangdong Province. Emission limits of air

pollutants: DB 44/27-2001 [S]. Guangzhou: [s.n.], 2002.

作者简介:



张宾瑞

王小刚

1978-, 男, 广东深圳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海上风电工程技术管理工作 (e-mail) wangxiaogang@cgnpc.com.cn。

苏磊

1987-, 男, 广东深圳人, 高级工程师, 学士, 主要从事海上风电工程技术管理工作 (e-mail) sulei@cgnpc.com.cn。

项目简介:

项目名称 大规模海上风电与天然气发电融合多能互补关键技术的研发(2021B0101230004)

承担单位 南方电网科学研究院有限责任公司

项目概述 本项目将针对大规模海上风电与天然气发电融合多能互补技术开展“产-学-研”联合攻关, 从海上风电集群调度、海上风电与天然气结合的虚拟电厂调度、含海上风电的全电力系统实时仿真等多个层面, 开展相关基础理论研究、仿真平台研发和应用示范, 为广东省推动海洋经济高质量发展、建设海洋强省提供重要保障。

主要创新点 提出高可靠性、高集成度、高性价比的海上风电场集电、变电系统优化设计方法, 提出基于大规模海上风电集群汇集特性的送出系统规模优化配置策略, 提出海上风电场交直流并网优化方法。

(编辑 李辉)