

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.05.011

66 kV 海上风电交流集电方案的研究与发展前景

Research and prospects of 66 kV offshore wind power AC collection scheme

王峰¹, 芮守娟², 王小合², 王怀明¹, 王羲维², 董习斌³, 王伟³, 余浩³
WANG Feng¹, RUI Shoujuan², WANG Xiaohu², WANG Huaiming¹, WANG Yixiwei²,
DONG Xibin³, WANG Wei³, YU Hao³

(1. 华电重工股份有限公司天津分公司, 天津 300010; 2. 华电重工股份有限公司, 北京 100070;
3. 中国华电集团有限公司浙江公司, 杭州 310021)

(1. Tianjin Branch, Huadian Heavy Industry Company Limited, Tianjin 300010, China; 2. Huadian
Heavy Industry Company Limited, Beijing 100070, China; 3. Zhejiang Company,
China Huadian Corporation Limited, Hangzhou 310021, China)

摘要: 随着海上风电单机容量和规模的不断增大, 常规的 35 kV 交流集电方案的局限性表现得十分明显, 可互联的风机数量越来越少, 海缆长度越来越长, 单位成本不断增加。提出了高电压等级的 66 kV 交流集电方案, 相比于 35 kV 交流集电方案在技术和经济上更有优势, 不仅能输送大容量电能, 而且可节约投资、降低运行费用。对 66 kV 交流集电方案的设备进行了调研并结合海上风电的发展趋势讨论了 66 kV 交流集电方案的发展前景。

关键词: 海上风电; 交流集电; 电压等级; 海缆; 35 kV; 66 kV

中图分类号: TM 722 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2020)05-0061-05

Abstract: With the continuous increase in the capacity and scale of offshore wind power units, the limitations of conventional 35 kV AC power collection schemes emerge, which are fewer interconnection wind turbines, longer submarine cables and increasing costs per unit. A 66 kV AC power collection scheme with a high voltage level is proposed. Compared with the 35 kV AC power collection scheme, it has more technical and economic advantages. It can not only transmit large-capacity power, but can also save investment and operating costs. The equipment for 66 kV AC power collection scheme is investigated and its prospect is discussed in combination with the development trend of offshore wind power.

Keywords: offshore wind power; AC current collection; voltage level; submarine cable; 35 kV; 66 kV

0 引言

“十三五”期间, 我国经济发展进入新常态, 为保证我国经济长期平稳发展, 必须改变生产发展方式, 调整供给侧经济结构, 采取去产能、去库存、去杠杆、降成本、补短板的应对策略。2016 年经济领域深化改革取得了显著成效, 煤炭、钢铁、石化、玻璃、水泥等过剩产能都得到了削减, 能源结构调整势在必行。可再生能源是能源供应体系的重要组成部分, 可再生能源开发利用规模不断扩大, 应用成本快速下降, 发展可再生能源已成为能源转型的核心内涵和主导方向。

作为重要的可再生能源之一, 风能在优化能源结构、转变发展方式、治理大气环境、应对气候变化

等方面具有重要意义, 将是未来社会能源利用的重要形式和发展趋势。我国在过去 50 年风能事业取得辉煌成就的基础上必将实现可持续发展, 并为我国的经济社会发展做出不可或缺贡献^[1]。

海上风能资源具有风速大、运行稳定、对电网友好等特点^[2]。通过调整全国海洋功能区划, 完善海上风电发展规划, 促进技术升级和完善相关政策机制, 中国海上风电未来可望实现跨越式发展。东南沿海地区, 包括福建、广东、江苏、山东、浙江和上海, 近海风能资源丰富, 经济发展水平较高, 也是中国电力需求最大的地区, 可作为海上风电开发的重点地区。

我国海上风电起步较晚, 上海东海大桥海上风电项目一期是我国第 1 个大型海上风电示范项目, 2009 年该项目第 1 批样机并网, 2010 年正式投产, 拉开了我国海上风电建设发展的序幕。在政策支

持和技术进步的双重推动下,2014年以来我国海上风电发展速度显著加快,装机增速维持在50%以上。海上风电开发范围也逐步从近海、浅海向远海、深海发展。

海上风电从3~4 MW时代发展到6~7 MW时代,只花了数年时间。西门子歌美飒可再生能源股份公司2019年1月宣布其正在8 MW机型基础上开发10 MW风机。2019年9月25日,我国首台10 MW海上风力发电机组在中国东方电气集团有限公司生产基地顺利下线,海上风电发展到9~10 MW时代预计只需要2~3年的时间。未来,单机容量还将迅速提高^[3]。

为此,我们需要发展风资源精细评估、风电场优化布局和海上风电技术,大幅提高风力发电的效率,以进一步降低海上风电的开发成本。

海上风电在海上区域的功率输送一般依靠交流海缆,采用“干线式”接线方式^[4],在海缆载流量和热动力允许的条件下,以尽可能多的数量连接风机机组,交流集电后分成几组输送到海上升压站或在离岸比较近的情况下直接输送到陆上升压站^[5]。

海上风电交流集电方式有2种:35 kV交流集电和66 kV交流集电。目前,35 kV交流集电方案是海上风电的常规方案。但是,随着海上风电单机容量和规模的不断增大,35 kV交流集电方案的局限性在生产中表现得愈发明显:可互联的风机数量越来越少,35 kV海缆越来越长,单位成本不断增加等。

66 kV交流集电方案在欧洲风电市场已得到初步应用^[6]。丹麦西北部 Thyborøn 海域的 Nissum Bredning 海上风电场安装了4台机组,总装机容量为28 MW,该风电场使用66 kV的输电系统。Blyth海上示范风电场位于英国东北部,离岸5.7 km,使用MHI Vestas 8.3 MW风机,风电场不设海上升压站,5~6台风机通过66 kV电缆汇集后,以同样的电压等级输送到陆上变电站。其中海底电缆总长11.0 km,陆上电缆长1.5 km。

66 kV交流集电方案在我国还未开展项目应用,无相应建设经验和运行经验。浙江华电台州玉环一期300 MW海上风电项目拟采用此方案。

随着海上风电向远海、深海发展,在输电功率和输电距离逐步增大以及风机机组单机容量越来越大的情况下,66 kV交流集电方案具有广阔的发展前景。

1 66 kV 交流集电方案研究

海缆在输送同样功率时,较高的电压意味着较低的电流,同时也意味着较低的输送损耗。一般情

况下,输电线路电压降控制在5%以内^[7]。

66 kV 高电压等级的应用,提高了海缆的载流能力,与35 kV方案相比,极限情况下,当电网侧海缆导体截面积相同时,66 kV海缆最多可连接风机的数量为35 kV海缆的2倍,如图1、图2所示。

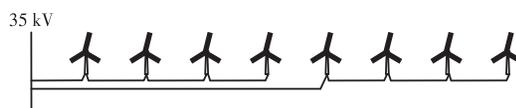


图1 35 kV 交流集电线路

Fig. 1 35 kV AC collector line



图2 66 kV 交流集电线路

Fig. 2 66 kV AC collector line

电力输送时,根据海上风电场离岸距离的不同和对海缆允许电压降、载流量以及短路热稳定的要求,针对电压等级和截面积对海缆进行选型^[8]。距离较远时,还要考虑是否设置海上升压站交流升压到220 kV送出或是否设置海上换流站高压直流送出。根据不同的情况,66 kV交流集电方案的应用情景可分为以下几种。

情景1:无海上平台(海上升压站或海上换流站)的交流近距离输电,考虑线损、海缆长度和线路复杂程度等因素,采用66 kV海缆会比电压等级小于等于35 kV的海缆更合理,安全性、可靠性更高。

情景2:高压远距离输电(采用海上升压站高压交流输送或海上换流站高压直流输送^[9-11])且风电机组单机容量较大,风机之间以及站前海缆若采用电压等级小于等于35 kV的海缆会导致海缆数量太多,安全性、经济性差。

情景3:离岸距离在10 km左右,采用35 kV交流集电方案需设置海上升压站(如图3所示)。但采用66 kV交流集电方案可取消海上升压站,成为与情境1相同的形式,实现了设计工作的优化,同时还降低了建造成本、运维成本和损耗,技术性和经济性非常明显,如图4所示。

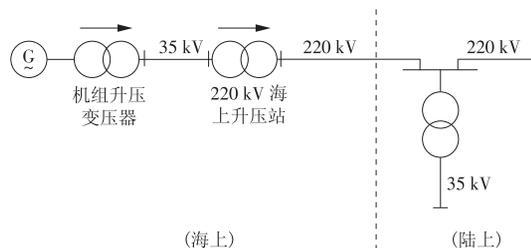


图3 35 kV 交流集电方案系统

Fig. 3 35 kV AC collection scheme system

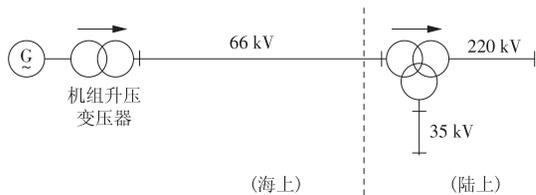


图 4 66 kV 交流集电方案系统

Fig. 4 66 kV AC collection scheme system

2 方案对比

以浙江华电台州玉环一期 300 MW 海上风电项目为例,对 35 kV 交流集电方案和 66 kV 交流集电方案进行详细对比分析。

2.1 技术性对比

浙江华电台州玉环一期 300 MW 海上风电项目离岸距离较近,最近处约 8 km,较远处约 16 km,若集电线路采用 35 kV 方案且不用海上升压站的话,场内 35 kV 海缆长度增加,损耗较大,线路压降大于 5%^[12],因此可考虑 66 kV 交流集电方案。

近海风电场的升压变电站设置可以考虑 2 种形式:陆上升压站形式、海上升压站+陆上集控中心(或陆上升压站)形式。

方案 1:设置海上升压站+陆上集控中心。配套机组升压变为 35 kV 系统,集电线路设置 12 回 35 kV 海缆。海上升压站内配 2 台主变压器、220 kV 气体绝缘金属封闭开关(GIS)(2 进 2 出),最后通过 2 回 220 kV 的 3×500 mm² 海缆登陆转陆缆后连接至陆上集控中心。陆上集控中心配置 220 kV GIS(4 进 1 出),2 回 220 kV 电缆进线侧配置高抗设备,站内配置无功补偿等设备^[13-14]。35 kV 集电线路路径如图 5 所示。

方案 2:设置陆上升压站,中压系统采用 66 kV 方案。配套机组升压变为 66 kV 系统,集电线路设置 6 回 66 kV 海缆登陆后转陆缆连接至陆上升压站。升压站内配置 66 kV GIS、2 台三绕组变压器^[15-16]、220 kV GIS(2 进 1 出)、无功补偿等设备。66 kV 集电线路路径如图 6 所示。

2.2 经济性对比

随着海上风电逐步向深海、远海发展,基础工程和送出工程等方面的成本将逐渐增大,对运维服务的要求也不断提高,运维成本将会随之增大^[17]。

集中的路由规划和送出使得海上风电更具经济性^[18-19]。66 kV 交流集电方案与 35 kV 交流集电方案的经济性差别主要体现在海缆、机组升压设备(变压器+高压开关柜)、海上升压站、陆上设备、陆上土建可比部分和征地可比部分。

针对上述配置,对 2 种方案的经济性进行对比。

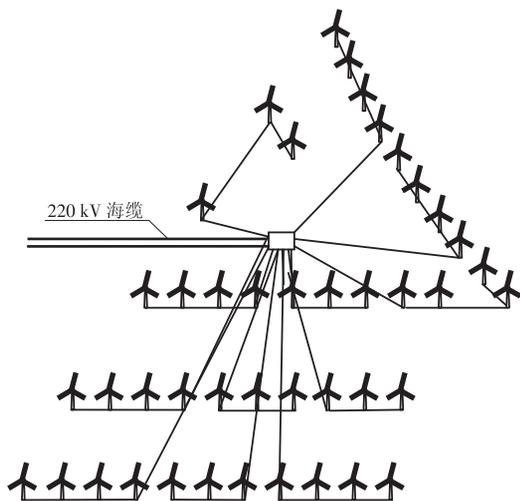


图 5 35 kV 集电线路路径

Fig. 5 35 kV collector circuit

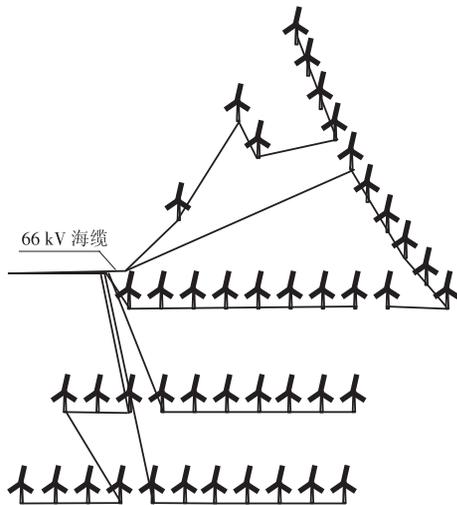


图 6 66 kV 集电线路路径

Fig. 6 66 kV collector circuit

方案 1 (35 kV)海缆费用见表 1,方案 2(66 kV)海缆费用见表 2,综合经济性对比见表 3。

从上述对比可以看出,方案 2 取消了海上升压站,其综合造价比方案 1 减少约 8 100 万元。

66 kV 交流集电方案取消了海上升压站,采用 66 kV 交流海缆直接登陆,极大地降低了投资成本和运维成本。该方案在浙江华电台州玉环一期 300 MW 海上风电项目的应用必将给我国海上风电事业带来重要的示范意义和参考价值。

3 66 kV 相关设备调研

3.1 66 kV 风电机组变压器

目前国内市场暂时没有 66 kV 集电线路的风电项目,但在国外有类似的经验。

ABB 公司自 2014 年起与 MHI-Vestas 公司保持密切合作,为全球最大的 66 kV 海上风电机组提供变压器,其变压器具有结构紧凑、质量小等特点,现

表 1 方案 1(35 kV)海缆费用

Tab. 1 Submarine cable cost of scheme 1 (35 kV)

项目	规格	单价/万元	数量/km	费用/万元
35 kV 海底电缆(含敷设)	3×95 mm ² 26/35 kV	148.70	19.97	2 969.54
	3×185 mm ² 26/35 kV	193.70	20.60	3 990.22
	3×400 mm ² 26/35 kV	286.04	24.24	6 933.61
220 kV 海底电缆(含敷设)	3×500 mm ² 127/220 kV	726.99	21.00	15 266.79
220 kV 陆缆(含敷设)	1×500 mm ² 127/220 kV	84.50	15.00	1 267.50
顶管		380.00	0.82	311.60
海缆登陆工程		160.00	2.00	320.00
海域使用		0.70	1 716 200.00	1 385.15
损耗		0.85	2 853.00	27 960.83
合计				60 405.24

表 2 方案 2(66 kV)海缆费用

Tab. 2 Submarine cable cost of scheme 2 (66 kV)

项目	规格	单价/万元	数量/km	费用/万元
66 kV 海底电缆(含敷设)	3×95 mm ² 48/66 kV	188.70	14.21	2 681.43
	3×185 mm ² 48/66 kV	233.70	11.48	2 682.88
	3×240 mm ² 48/66 kV	286.04	24.24	6 933.61
	3×400 mm ² 48/66 kV	326.04	57.15	18 633.19
66 kV 陆缆(含敷设)	3×500 mm ² 48/66 kV	376.00	8.34	3 135.84
	1×400 mm ² 48/66 kV	68.00	30.00	2 040.00
	1×630 mm ² 48/66 kV	90.00	6.00	540.00
顶管		380.00	2.46	934.80
海缆登陆工程		180.00	2.00	360.00
海域使用		0.70	1 935 200.00	1 561.90
损耗		0.85	2 861.00	28 039.23
合计				67 542.88

已为英国水域的 2 个风电项目交付了 16 台 66 kV 变压器,2019—2020 年还有 177 台的合同业绩。

西门子公司为了满足海上风电场大功率风机的应用和集电系统电压的升级要求,结合多年的研究和试验推出了一套基于环保设计理念的专门用于大功率风机的交流 66 kV 电气系统技术方案。该技术方案包括了一款可装于风机机舱或风塔内部的 66 kV/8~10 MW 油浸式变压器(FITformer REN),采用可自然降解的合成酯而不是常规的矿物油作为绝缘介质。

表 3 综合经济性对比

Tab. 3 Comprehensive economic comparison

项目	单价/万元	数量	费用/万元	
			方案 1 (35 kV)	方案 2 (66 kV)
海缆部分			60 405.24	67 542.88
机组升压可比部分	40	43	0	1 720
海上升压站(结构+电气设备)	18 000	1	18 000	0
主变压器	650	2	0	1 300
陆上设备	200	2	400	0
220 kV GIS 可比部分(断路器间隔)	240	2	480	0
66 kV GIS 间隔	70	9	0	630
高抗	300	2	600	0
集控中心土建可比部分			0	354
征地可比部分			0	236
总差值				-8 102.12

3.2 66 kV 高压开关柜

ABB 公司的高压开关型号为 PASS M00,配置电机驱动器(MD),目前无海上风电业绩。陆上项目应用了 PASS M00+MD,适应恶劣运行环境,耐受高温、低温、潮湿、腐蚀及地震;三相独立设计,从根本上避免了相间短路;尺寸较小,减少了占地面积,能经由塔筒门整体、分相进出风机;采用工厂化的整体解决方案,工厂预装后整体调试、试验,整体运输,现场可不作高压试验;采用数控伺服电机装置,可直接驱动断路器触头,具有非常高的准确性和可靠性^[20]。

西门子公司可安装在塔筒内部的 66 kV/25 kA 紧凑型 GIS(8VM1)与基于 SF₆ 技术的 GIS 不同,它采用了洁净空气($\varphi(\text{N}_2)=79.5\%$, $\varphi(\text{O}_2)=20.5\%$)绝缘技术和真空断路器灭弧技术,不会出现任何温室气体的排放和泄漏。这些环境友好型的设计使得整个电气系统完美契合了风电作为一种清洁能源的环保理念。

3.3 66 kV 交流海缆

目前,国内 66 kV 海缆没有应用业绩,相关规范也不完善。国内以中天科技、亨通光电、东方电缆、汉缆股份为代表的海缆生产企业均具备 500 kV 及以下交流海缆研发、生产能力,主流产品有 35, 110, 220, 500 kV 等。

各海缆生产企业均表示具备生产 66 kV 交流海缆的能力,上海国缆检测中心牵头起草的 66 kV 交流海缆及其附件标准已于 2019 年 11 月 18 日发布,并于 2019 年 12 月 18 日实施,可为 66 kV 海缆生产提供技术支持。

4 结束语

随着海上风电单机容量的不断增长,以35 kV作为场内海缆的电压等级逐渐成为制约海上风电发展的瓶颈。海上风电应用66 kV系统,可以减少风机回路数,从而降低海上升压站接线的复杂程度,甚至可以减少海上升压站数量或取消海上升压站;同时,还可以减少海缆用量,极大地降低线路损耗,进一步提高系统的安全性和可靠性。

因此,66 kV交流集电方案是海上风电发展的必然趋势,具有广阔的发展前景。

致谢:本文试验方案的制订和试验数据的测量记录工作是在北京海瑞兴能源科技有限责任公司董利军等工作人员的大力支持下完成的,在此向他们(她)们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1]李家春.中国风能可持续发展之路[M].北京:科学出版社,2018:89-95.
- [2]张庆阳,郭家康.世界风能强国发展风电的经验与对策[J].中外能源,2015,20(6):25-34.
ZHANG Qingyan, GUO Jiakang. Major wind power using countries' experience and countermeasures in developing wind energy[J]. Sino-Global Energy, 2015, 20(6): 25-34.
- [3]RIPPLE D, JATHE N, BECKER M, et al. A review on the planning problem for the installation of offshore wind farms[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13).
- [4]李林川.电力系统基础[M].北京:科学出版社,2009:7-8.
- [5]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.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [6]蔡蓉,张立波,程濛,等.66 kV海上风电交流集电方案技术经济性研究[J].全球能源互联网,2019,2(2):155-162.
CAI Rong, ZHANG Libo, CHENG Meng, et al. Technical and economic research on 66 kV offshore wind power AC collection solution [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 155-162.
- [7]FARAHMAND H, WARLAND L, HUERTAS-HERNANDO D. The impact of active power losses on the wind energy exploitation of the North Sea [J]. Energy Procedia, 2014, 53.
- [8]施泰.长乐外海风电场集电线路电压选择探讨[J].能源与环境,2019(1):61-62.
- SHI Tai. Discussion on the voltage selection of the collecting line of Changle Offshore Wind Farm [J]. Energy and Environment, 2019(1): 61-62.
- [9]罗亚桥.电能质量技术手册[M].北京:中国电力出版社,2016:215-218.
- [10]苟锐锋.柔性直流输电及其试验测试技术[M].北京:科学出版社,2017:67-70.
- [11]水利电力部西北电力设计院.电力工程电气设计手册电气一次部分[M].北京:中国电力出版社,1989:178-181.
- [12]纪雯.电力系统设计[M].北京:中国电力出版社,1998:78-80.
- [13]包明.66 kV变电站无功功率计算分析及补偿方案[J].电世界,2018,59(4):9-11.
BAO Ming. Reactive power calculation analysis and compensation scheme of 66 kV substation [J]. Electrical World, 2018, 59(4): 9-11.
- [14]吴钢,王保东,刘树枫,等.66 kV串联补偿装置研究与设计[J].自动化与仪器仪表,2019(7):77-79,83.
WU Gang, WANG Baodong, Liu Shufeng. Research and design of 66 kV series compensation device [J]. Automation & Instrumentation, 2019(7): 77-79, 83.
- [15]尹克宁.变压器设计原理[M].北京:中国电力出版社,2003:156-157.
- [16]张殿生.高压送电线路设计手册[M].北京:中国电力出版社,2005:134-135.
- [17]徐进,金逸,胡从川,等.海上风电集群电能组合输送方式研究[J].电网与清洁能源,2016,32(11):107-113.
XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. Research on combined power transmission scheme for offshore wind farm cluster [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2016, 32(11): 107-113.
- [18]吴迪.如何优化海缆布局,节省千万元成本?[J].风能,2019(4):52-54.
WU Di. How to optimize the layout of submarine cables and save ten million yuan? [J]. Wind Energy, 2019(4): 52-54.
- [19]WOO J, KIM D, NA W. Safety analysis of rock berms that protect submarine power cables in the event of an anchor collision [J]. Ocean Engineering, 2015, 107(10): 204-211.
- [20]贺家李.电力系统继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,2010:173.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

王峰(1990—),男,河北保定人,工程师,从事发输变电方面的研究(E-mail:wangf01@hhi.com.cn)。