

大型海上风电项目中的集电海缆研究

崔东岭^{1,✉}, 江春², 史忠秋³, 刘玢⁴, 孙宏达⁵

(1. 中国大唐集团新能源科学技术研究院, 北京 100040; 2. 亨通电力产业集团, 苏州 215000;
3. 广东粤电阳江海上风电有限公司, 阳江 529500; 4. 国家电网吉林供电公司, 吉林 132001;
5. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 昆明 650000)

摘要: [目的] 从2017年开始广东省海上风电进入了高速发展的时期, 随着近海浅水区风电场开发的趋于饱和, 近海深水区大型海上风电场的建设即将开始。在整个海上风电的设计过程中集电海缆是极为重要的一环, 连接风机与升压站的集电线路通过合理的设计可以有效降低电能损耗, 减少项目初始投资, 提高运行的可靠性。针对海上风电从常规化向大型化的转变, 集电海缆的设计亦需要同步做出调整。[方法] 基于此, 通过技术经济分析, 论述了在大型海上风电项目中采用66 kV集电海缆的可能性。[结果] 经过对比分析当风机容量达到10 MW及以上, 风电场整体装机容量达到1 000 MW时, 66 kV集电系统的技术、经济效果明显好于目前采用的35 kV系统。[结论] 虽然目前国内海上风电领域暂无66 kV集电海缆投运的实际案例, 但随着海上风电开发容量的不断增加, 中国海上风电的集电系统势必会像英国、德国一样, 向着更高电压等级的方向迈进。

关键词: 近海深水区; 大型海上风电; 集电系统

中图分类号: TM614; TK89

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0098-05
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Array Submarine Cables in Large Offshore Windfarm

CUI Dongling^{1,✉}, JIANG Chun², SHI Zhongqiu³, LIU Bin⁴, SUN Hongda⁵

(1. China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100400, China;
2. Hengtong Electric Power Industry Group, Suzhou 215000, China; 3. Guangdong Yuedian Yangjiang Offshore Windpower Co., Ltd., Yangjiang 529500, China; 4. State Grid Jilin Power Supply Company Co., Ltd., Jilin 132001, China;
5. Kunming Power Supply Company of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: [Introduction] Since 2017, offshore wind power in Guangdong province has entered a period of rapid development. As the development of shallow water windfarms tends to be saturated, the construction of large-scale offshore windfarms in deep water areas is about to start. The array submarine cable is an important link in the whole design process of offshore wind power. The array cable connecting the WTG with the offshore substation can effectively reduce the power loss, the initial investment of the project and improve the reliability of operation through reasonable design. In view of the transformation from conventional offshore windfarm to large-scale offshore windfarm, the design of Array submarine cable also needs to be adjusted simultaneously. [Method] Based on this, this paper discussed the possibility of using 66 kV submarine cable in large offshore windfarms with technological and economic analysis. [Result] After comparative analysis, when the WTG capacity reaches 10 MW or more and the wind farm's overall installed capacity reaches 1 000 MW, the technical and economic effects of 66 kV array system is obviously better than that of the current 35 kV system. [Conclusion] Although there is no real 66 kV submarine cable case in the current domestic offshore windfarm, with the increasing of offshore windfarm capacity, China's offshore wind array system is bound to move like the UK, Germany, toward a higher voltage class direction.

Key words: large offshore windfarm; array submarine cable; 66 kV

收稿日期: 2020-05-18 修回日期: 2020-05-28
基金项目: 中国能建广东院科技项目“预制舱式模块化海上升压站技术研究”(EV05541W)

目前我国沿海区域开发的海上风电项目中, 单体开发容量以200 MW~500 MW居多, 针对1 000 MW

容量及以上的海上风电开发相对较少。然而海上风电开发的大型化是我国海上风电事业未来发展的方向, 用于连接风机与升压站的集电海缆又是海上风电项目中极为重要的一环, 因此提前研究 1 000 MW 容量大型海上风电中的集电海缆十分必要。目前我国关于 66 kV 集电海缆的国家标准、设计规范、生产要求等并不完善, 实际使用的经验亦不算丰富。基于此, 本文通过对 35 kV 与 66 kV 集电海缆进行技术、经济对比分析, 论证未来在 1 000 MW 容量的海上风电项目中使用 66 kV 海缆的技术可能性与经济优越性, 希望能为未来大容量海上风电的开发提供一些参考。

1 我国集电海缆的现状

目前我国开发的近海浅水区海上风电项目中绝大部分的单体开发容量在 200 MW 至 500 MW 之间。以广东为例, 从东部汕头的勒门 I 项目至西部徐闻的外罗项目, 广东省近海浅水区的单体开发规模均在 200 MW 至 500 MW 区间, 近海浅水区域的海上风电场开发目前正如火如荼地进行, 近海深水区域的项目则仍在规划或项目前期阶段,

场址容量一般在 500 MW 至 1 000 MW 之间。

我国海上风电项目中集电海缆的设计范围一般以海缆两端的电缆终端头为界, 主要涉及集电海缆在风电场场址区域内的路由设计、海缆选型、参数计算、施工方案、保护方案等。针对常规容量的海上风电项目高电压等级的交流海底电缆其绝缘介质可分为充油式和交联聚乙烯两种型式, 35 kV 等级的中压集电海缆的绝缘型式主要有乙丙橡胶绝缘和交联聚乙烯绝缘两种。其中交联聚乙烯绝缘在海上风电领域使用的频次更高, 应用的更为广泛。相对于单芯电缆, 三芯 XLPE 海底电缆在运行过程中损耗更小, 更节省生产、敷设及运维过程中的成本^[1]。

现阶段国内主流的海缆生产厂家主要有宁波东方、中天科技、江苏亨通, 青岛汉缆等, 上述四个主流海缆厂家生产的 35 kV 集电海缆截面范围主要在 $3 \times 70 \text{ mm}^2 \sim 3 \times 400 \text{ mm}^2$, 在个别工程中也有 $3 \times 500 \text{ mm}^2$ 和 $3 \times 630 \text{ mm}^2$ 的应用案例, 但使用频次相对较低。表 1 为国内调研收资后, 得到的某国产海缆厂生产的集电海缆主要参数:

表 1 35 kV 集电海缆参数表

Tab. 1 Parameter list of 35 kV submarine cables

| 电缆型号 | 屏蔽截面/ mm^2 | 导体电阻 DC90 $/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$ | 屏蔽电阻 DC20 $/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$ | 电容/ $(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$ | 电感/ $(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$ |
|----------------------------|---------------------|---|---|--|--|
| 26/35 3×70 ZS-YJQF41+OFC1 | 199.2 | 0.342 | 1.07 | 0.134 | 0.483 |
| 26/35 3×95 ZS-YJQF41+OFC1 | 220.5 | 0.246 | 0.97 | 0.146 | 0.461 |
| 26/35 3×120 ZS-YJQF41+OFC1 | 228.5 | 0.196 | 0.94 | 0.156 | 0.445 |
| 26/35 3×150 ZS-YJQF41+OFC1 | 236.4 | 0.159 | 0.91 | 0.166 | 0.431 |
| 26/35 3×185 ZS-YJQF41+OFC1 | 260.8 | 0.127 | 0.82 | 0.178 | 0.415 |
| 26/35 3×240 ZS-YJQF41+OFC1 | 274.0 | 0.097 6 | 0.78 | 0.193 | 0.399 |
| 26/35 3×300 ZS-YJQF41+OFC1 | 302.8 | 0.077 8 | 0.71 | 0.209 | 0.385 |
| 26/35 3×400 ZS-YJQF41+OFC1 | 345.7 | 0.061 4 | 0.62 | 0.234 | 0.374 |

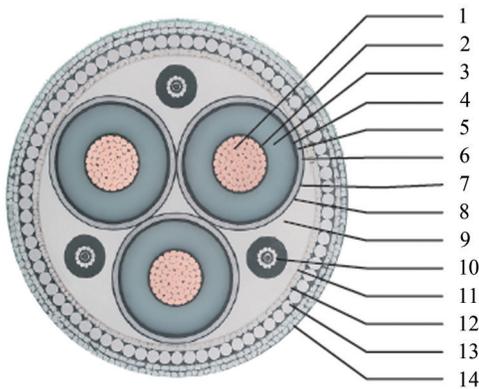
35 kV 交联聚乙烯三芯海底电缆的基本结构包括导体线芯、导体屏蔽、主绝缘 (XPLE)、缆芯屏蔽、铅包 (套)、金属护套、聚乙烯粘接护套、光纤、填充物、包扎带、衬垫、铠装、外被层。现有的国内集电海缆导体材料可以根据项目载流量的需求选择铜或者铝, 光纤可以根据通信控制需求选择单股或者双股, 铠装层可以根据当地实测的热阻系数分段选择钢丝铠装或者铜丝铠装, 35 kV 集电海缆的截面结构图如图 1 所示。

2 大型海上风电项目中集电海缆的设计

目前国内 66 kV 集电系统尚未在国内海上风电

项目中进行应用, 整体来看 66 kV 集电系统在国内尚处于研发论证, 技术储备阶段。相应的国家、行业标准不是很完备; 设备厂的产品设计、型式认证等正在进行中, 部分工作尚未全部完成。国内海上风电领域主流的设计单位, 如广东院、华勘院、上勘院等; 国内高校, 如华南理工、西安交大、武汉大学等; 国内科研单位, 如南方电网科研院等均针对 66 kV 系统进行了一定程度的研究分析与产品研发, 但尚无施工图深度完备的 66 kV 设计方案。国内 66 kV 集电系统的研发模式可以参考、借鉴英、德两国在欧洲大型海上风电项目上的模式与经验。

海底电力电缆在研究开发、鉴定、制造和安装



注：1—阻水导体；2—导体屏蔽；3—XLPE绝缘；4—绝缘屏蔽；5—半导体阻水带；6—铅套；7—防腐层；8—PE护套；9—填充；10—光纤单元；11—绑扎带；12—内衬层；13—镀锌钢丝；14—外被层。

图1 35 kV集电海缆结构图

Fig. 1 35 kV submarine cable structure

时要经受全面的试验。这些不同种类的试验都为了一个最终的目标：确保在特定环境下的电缆的无故障运行。目前海缆相关试验标准主要参考IEC标准及国际大电网会议规定。国内也由上海电缆所牵头，组织国内相关制造企业、设计院和用户联合制定了关于《额定电压66 kV ($U_m=72.5$ kV) 交联聚乙烯绝缘大长度交流海底电缆及附件》的国家电线电缆质量监督检测中心技术规范，将于近期发布，规范共3部分：分别为试验方法和要求；大长度交流海底电缆；海底电缆附件。

研究开发新的海缆类型品种或者已有海缆类型扩充规格截面或额定电压，都需要对材料、组分以及生产工艺进行全面的测试。在应用到海底电缆之前，很多新材料和理念都已经在地下电缆中完成研究开发。要继续对此进行研究试验的原因就是因为与陆上电缆同样的故障相比，海底电缆出现故障时修复成本高的多并且停运时间更长。

电缆的聚合物材料在不断改进。材料供货商开发的新的聚合物配方需要在海底电力电缆特定的使用条件下进行评估。介电强度、介质损耗角、泄漏电流和介电性能试验，这些试验用来评定和筛选绝缘材料。为避免制造昂贵的真实尺寸的电缆通常使用样品或模型电缆来完成上述试验。老化性能试验在不同的温度和环境下进行。交联材料的交联工艺能够采用试验交联度的方法进行评估。

海底电力电缆的聚合物护套材料有时候进行下列性能试验：水蒸气渗透性、盐水中稳定性、耐磨

试验、炭黑含量等。但在大多数情况下，制造商使用的是经过充分证明不需要改变的护套材料。

即使金属成分材料的多数性能已在教科书中列出，但还是有一些性能需要进行评估。考虑到制造方法，护套铅合金的耐疲劳性能必须通过试验进行彻底的评定为确保在海底电缆寿命期内的无故障运行，对其他金属护套材料也必须进行疲劳性能试验。另一组研究试验是海底电缆所有金属材料的耐腐蚀性能。金属材料分别进行试验，但是也需要结合研究其电化腐蚀性能。

成品海底电缆的机械性能是设计用来检验电缆耐受在安装和运行中出现的所有应力和事故的能力。机械试验包括张力、弯曲、受压和冲击等。此外海底电缆在外部水压影响下的性能也是很重要的。

了解66 kV电压等级海缆设计的重点和要点以及知道要进行哪些试验以通过合格鉴定，制造商在研究开发计划中都有自己的试验项目。为了快速筛选，有时会设计一些简捷试验来在短时间内得到可信赖的结果。对电缆材料的老化性能特别需要设计这样的试验。进行标准化的长时间合格鉴定试验前，电缆制造商会对新开发的电缆进行预试验。

一旦一种电缆类型开发完成或投入应用，就需要进行型式试验。因为许多大型的海底电力电缆工程都有特定的设计要求，很多购买合同还是需要进行型式试验。但是，由于型式试验增加了相当多的费用和工程时间，通常如果有证据表明一个确定的电缆设计符合本工程的要求，则可以用以前相似电缆类型的型式试验来替代。

型式试验的目的是证明电缆系统的设计和制造能够满足特定使用的环境条件。电气设备的型式试验通常按照国家当局机构或者专业组织如美国电气电子工程师学会(IEE)、美国爱迪生照明协会(AEC)、美国国家标准学会(ANS)或者国际大电网会议(CIGRE)发布的试验标准进行。大多数电力电缆的试验标准仅包括地下陆上电缆，一些标准的使用范围明确不适用于海底电力电缆。因此，海底电力电缆适用的试验标准是很少的，66 kV海缆的试验标段还有待进一步的发展。

不同于国内目前使用的35 kV集电系统，英、德两个海上风电强国均采用66 kV作为其集电系统的电压等级。一方面66 kV在技术性能上要优于35 kV，在相同截面下可以输送更多的电能且其阻抗

值更小, 产生的电能损耗更小; 另一方面和欧洲电力系统中常用的电压等级、风电场的开发规模也有一定的关系。欧洲的66 kV集电系统方案除了电压等级与国内不同外, 拓扑结构与国内常用的方法也不相同。相比于国内的链式、树状式结构, 欧洲主流的集电系统布置通常采用环形的方式, 即在每两个风机回路的尾端进行连接, 形成环路。以英国的IC海上风电场为例, 其集电拓扑结构如图2所示。

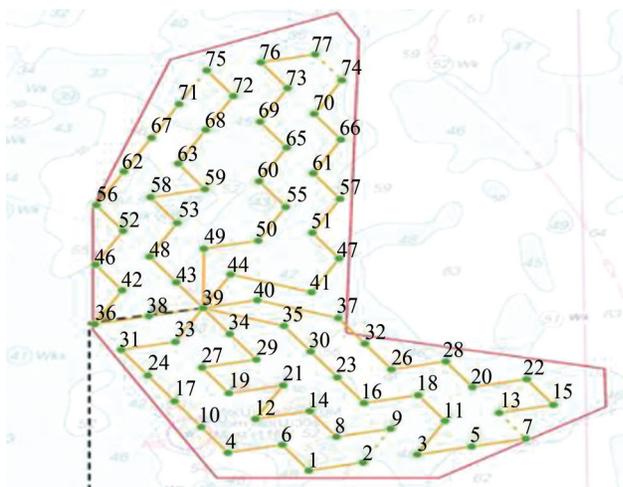


图2 66 kV集电线路拓扑结构图

Fig. 2 The topology of 66 kV submarine cables

从图中可见72台9.5 MW的风机通过8个66 kV集电回路进行连接, 同时每个回路的尾端风机处通过海缆同邻近回路的尾端风机进行连接, 如图中所示的2号风机与9号风机。每串回路中靠近升压站位置的前2台风机采用66 kV $3\times 800\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆, 其余风机间的连接电缆采用66 kV $3\times 500\text{ mm}^2$ 截面的海缆。大截面海缆的额定载流量为755 A, 小截面海缆的额定载流量为590 A。在导体芯数方面, 三芯电缆具有平衡的负载, 在铠装层中没有感应的循环电流, 敷设费用也低^[2]。

针对大型海上风电项目, 使用更高电压等级的集电系统可以减少电缆的回路数, 减少征海使用面积, 减少海缆施工工作量等。在单机容量越大以及项目总装机容量越大的情况下, 66 kV集电海缆的优势就越明显。通过下面的案例来对35 kV与66 kV集电海缆进行一下定量的对比分析: 假定未来某近海深水区开发的海上风电项目总装机容量为1 000 MW, 布置100台10 MW的风力发电机组。按照35 kV集电海缆去设计的话, 至少需要34个集电海缆回路, 每个集电回路最多输送的电能大约在30 MW。连接

首台风机对应的海缆载流量为194 A, 采用 $3\times 70\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆; 连接2台风机对应的海缆载流量为388 A, 采用 $3\times 240\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆; 连接3台风机对应的载流量为582 A, 采用 $3\times 500\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆。整个项目所需的35 kV集电海缆总长约为330 km, 35 kV集电方案对应的海缆采购费用约为人民币6.6亿元, 海缆施工与征地费用约为人民币3亿元。如若采用66 kV集电系统则总的用量和总的价格将会大幅降低, 在66 kV集电方案下, 集电海缆总回路数为17回, 每回路可输送的电能为60 MW。连接首台风机所需的海缆载流量为103 A, 对应选用 $3\times 95\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆; 连接2台风机所需的海缆载流量为206 A, 对应选用 $3\times 95\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆; 连接3台风机所需的海缆载流量为309 A, 对应选用 $3\times 150\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆; 连接4台风机所需的海缆载流量为412 A, 对应选用 $3\times 240\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆; 连接5台风机所需的海缆载流量为515 A, 对应选用 $3\times 400\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆; 连接6台风机所需的海缆载流量为618 A, 对应选用 $3\times 630\text{ mm}^2$ 截面的集电海缆。在66 kV电压等级下所需的集电海缆总长为140 km, 集电海缆总采购价格约为人民币4.2亿元, 对应的海缆征地与施工费用约为人民币1.4亿元。

由此可见66 kV集电系统在1 000 MW级大型海上风电项目中, 其海缆总用量, 采购、征海、施工总造价方面相较于35 kV集电海缆均有着较大的优势。相信随着海上风电项目开发的大型化, 66 kV集电系统设计、研发、生产的规范化, 市场对高电压等级集电海缆的需求会愈发的强烈。

3 结论

通过上述分析可知在单机容量为10 MW总装机容量为1000 MW的大型海上风电项目中, 采用35 kV集电海缆需要34回, 单回海缆输送容量为30 MW, 海缆总长约为330 km, 海缆相关的总投资费用约为人民币9.6亿元; 采用66 kV集电海缆需要17回, 单回输送容量为60 MW, 海缆总长约为140 km, 海缆相关的总投资费用约为人民币5.6亿元。由此可见66 kV海缆的单回输送容量约为35 kV集电海缆的2倍, 工程所需总用量约为35 kV集电海缆的42.4%, 工程所需总造价约为35 kV集电海缆的58.3%。因此在我国即将开始开发的1 000 MW级大型海上风电项目中, 66 kV集电海缆将

具有较大的技术与经济优势,值得推广与应用。

参考文献:

- [1] 高鑫. XLPE绝缘海底电缆的应用及试验监测技术研究[J]. 中国新技术新产品,2018(18):73-74.
- [2] 许新鑫,赵陆尧. 探究66 kV集电海缆在我国大型海上风电项目中的应用[J]. 机电信息,2019(30):23-24.

作者简介:



崔东岭

崔东岭(通信作者)

1969-,男,河南太康人,中国大唐集团新能源科学技术研究院,高级工程师,东北电力学院,学士,主要从事新能源发电研究方向(e-mail) yuan-fenc68@126.com。

江春

1974-,男,江苏苏州人,亨通电力产业集团,工程师,主要从事海缆相关业务。

史忠秋

1985-,男,吉林农安人,广东粤电阳江海上风电有限公司,工程师,东北电力大学,学士,主要从事海上风力发电开发与运行业务(e-mail) shizhongqiu@geg.com.cn。

刘玢

1989-,女,吉林吉林人,国家电网吉林供电公司,工程师,东北电力大学,硕士研究生,主要从事电网调度相关工作(e-mail) 4141557512@qq.com。

孙宏达

1989-,男,吉林吉林人,云南电网有限责任公司昆明供电局,工程师,东北电力大学,学士,主要从事电网运维相关的工作(e-mail) 258070260@qq.com。

(责任编辑 郑文棠)

