

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.009

海上风电场联合送出优化方案研究

常胜¹, 李炬添², 张振², 沈云², 王海龙²

(1. 国家电投集团广东电力有限公司, 广州 510130; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]结合我国广东地区海上风电场布置及典型送出方案,对两个300 MW风电场联合送出的方案进行了探讨。[方法]在电气主接线、海缆选型、可靠性分析、海缆敷设与供货、可比投资等方面进行了分析比较。[结果]最终得出联合风场送出的优化方案,即设2座220 kV海上升压站+1座陆上集控中心,其中1座升压站通过1回 $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 海缆接至另1座升压站GIS,汇流后再通过2回 $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 海缆一并送出至陆上集控中心。[结论]联合送出的优化方案可大大节省投资并减少用海面积,可为后续海上风电场电气设计提供参考。

关键词: 海上风电场; 联合送出; 征海; 载流量

中图分类号: TK89; TM645

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)02-0049-05

Research on Offshore Wind Farm Optimization Scheme for Joint Delivery

CHANG Sheng¹, LI Jutian², ZHANG Zhen², SHEN Yun², WANG Hailong²

(1. SPIC Guangdong Electric Power Co., Ltd., Guangzhou 510130, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] According to the offshore wind farms layout and typical delivery scheme of Guangdong area, the paper discusses the two joint delivery schemes of 300 MW offshore wind farm. [Method] From the aspects of electrical single line diagram, submarined cable's selection, reliability analysis, cable laying and supply, comparable investment and so on were compared. [Result] To provide an optimization for the joint delivery of offshore wind farm, setting two 220 kV offshore booster station and one onshore control center, one of the booster station connect to another with one $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ submarine cable, then sent out with two $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ submarine cable to onshore control center. [Conclusion] The scheme of two joint delivery schemes of 300 MW offshore wind farm can save the investment and reduce the area of sea which offers reference for the prospective electrical design of offshore wind farm.

Key words: offshore wind farm; joint delivery; levy sea; current carrying capacity

广东省省内电源装机以火电机组为主,节能减排压力巨大,大力发展核电、风电等清洁能源产业,是实现电力能源结构优化的必由之路。开发利用广东省近海风能资源,不仅有利于广东能源安全稳定供应和环境保护,且有利于促进风电装备及相关产业链的形成和发展,实现经济社会的可持续发展,为广东打造风电产业基地创造良好条件。按照目前《广东省海上风电发展规划

(2017—2030年)修编》的风场规划以及项目开发情况,装机容量为300 MW是一个海上风电项目较典型的容量^[1-3],主流的高压海缆送出方案为采用双回 $3 \times 500\text{ mm}^2$ 的交联聚乙烯绝缘光纤复合海底电力电缆^[4-5]。如果两个风场共用一个陆上集控中心,再统一送出至电网,则共需4回送出海缆,此方案占用了大量的用海路由,不符合国家集约用海的政策,此外,对于长距离的海缆送出,此方案无论从海缆设备、海缆敷设施工以及配套的电气设备等方面的费用也较高,需要寻求更优的方案以减少用海面积及降低工程总造价。本文拟通过优化高压海缆选型以及优化电气主接

收稿日期: 2019-03-04 修回日期: 2019-04-24

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电场电气系统关键技术及电气设计”(EV02861W)

线方式,提出具体优化方案,为后续同类型工程的电气设计提供参考。

1 项目概况

本文以广东某海上风电项目作为研究基础,项目概况如下:

项目总装机规模 600 MW,分南北两个场址建设,北区规模 300 MW,南区规模 300 MW。场址最近端距离陆岸 20 km,最远端距离陆岸 35 km,本项目同步建设海上升压站、高压送出海底电缆、陆上升压站(风机及海上升压站布置如图 1 所示)。北区风场海上升压站至陆上集控中心路由长度 28.7 km,南区风场海上升压站至陆上集控中心路由长度 38.6 km,南北升压站间路由长度 9.9 km。

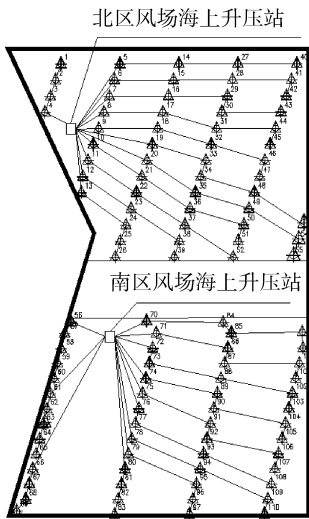


图 1 风场布置图

Fig. 1 Wind farm layout

2 典型送出方案

2.1 海缆选型

根据载流量要求^[6-7],单个风场送出额定电流为 787 A,本文选择单回 $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 以及双回 $3 \times 500\text{ mm}^2$ 海底电缆进行载流量计算^[7-8],并进行方案对比,根据厂家提供的资料,电缆载流量如表 1 所示:

从表 1 可以看出,单回 $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 海缆在滩涂段载流量略低于额定值,需采取一定的特殊措施。两回 $3 \times 500\text{ mm}^2$ 海缆在各段均满足载流量要求。

根据项目风能资源分析报告,测风塔测风数据

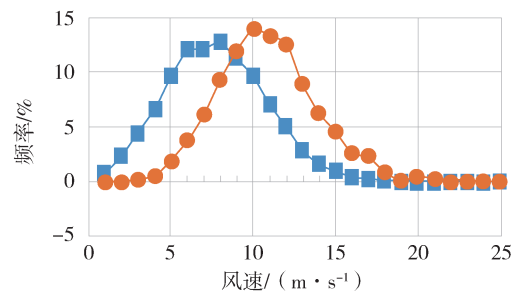
统计分析^[9]以及测风塔在风机轮毂高度处各风速区间的风速、风能频率统计成果如图 2、图 3 所示。

表 1 海缆载流量

Tab. 1 Current carrying capacity of submarine cable

| 参数 | $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 方案 | $3 \times 500\text{ mm}^2$ 方案 |
|-------|----------------------------------|-------------------------------|
| 空气中/A | 946 | 697 |
| 管道中/A | 1 027 | 754 |
| 海床中/A | 888 | 681 |
| 滩涂中/A | 771 | 592 |

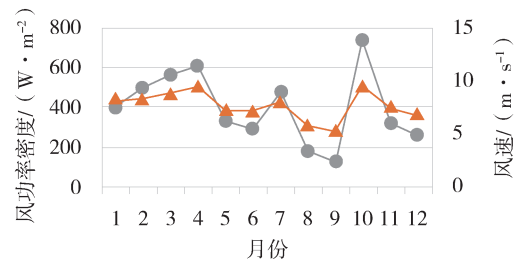
注:上述载流量海床按埋深 2.0 m,滩涂按埋深 1.0 m,热阻系数按 1.0 选择。



注:—■— 风速频率(%); —●— 风能频率(%).

图 2 测风塔风速和风能频率

Fig. 2 Anemometer tower frequency of speed and energy source



注:—●— 风功率密度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); —▲— 风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

图 3 轮毂高度各月平均风速、风功率密度分布

Fig. 3 Average speed and power concentration on hub height

从图 2 可见,轮毂高度风速中频率最大风速约 8 m/s,最大风能频率相应的风速为 10 m/s。从频率分布可见,81.0%集中在 4~11 m/s 区间,区间相应风功率密度占总风能的 60.8%。可见,风场风速主要集中在中低风速带,且风速风能分布比较集中。

从图 3 可见,轮毂高度年平均风速约为 7.70 m/s,平均风功率密度约为 400 W/m^2 。年内分布不均,功率密度变化较大。在年内 10 月至翌年 4 月风速相对较大,其中 10 月平均风速最大为 9.54 m/s

s, 平均风功率密度 735 W/m^2 ; 5~9月风速相对较小, 其中9月风速最小, 仅为 5.24 m/s , 平均风功率密度为 128 W/m^2 。

本工程初步选用某风机厂 5.5 MW 级风机, 风机风速与输出功率的关系如图4所示。

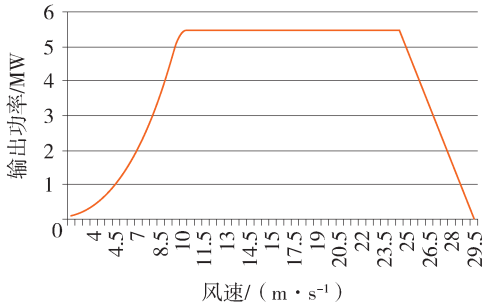


图4 风速与输出功率曲线

Fig. 4 Wind speed and output curve

由以上分析结合图4功率曲线可见, 风机年平均出力为 2.16 MW , 最大风速月份的平均出力为 4.4 MW , 轮毂高度风速中最大风速的出力为 2.64 MW 。可见风场满发的概率很低, 风场常年发电功率为 $55 \text{ MW} \sim 242 \text{ MW}$, 最大风速月份满发比例仅有 15% , 同时满发时间也是间断性的, 而表1海缆载流量计算是基于风场以 300 MW 功率长时间满发且环境因素均按最严格的工况来计算, 实际运行风速达到 10 m/s 以上时, 伴随的是大风、下雨或台风等天气, 此时环境温度以及土壤的热阻等均有较大的降低, 海缆载流量将会大大增加。综上比较可得出, 基于项目实际风能资源情况, 单回 $3 \times 1000 \text{ mm}^2$ 以及双回 $3 \times 500 \text{ mm}^2$ 海缆均可满足项目要求。

2.2 常用送出方案

根据海缆选型分析, 结合国内外工程实例, 目前常用的送出方案主要有以下两种:

常用方案一: 设2座 220 kV 海上升压站+1座陆上集控中心, 2座海上升压站各通过2回 $3 \times 500 \text{ mm}^2$ 海缆送出至陆上集控中心, 如图5所示。

常用方案二: 设2座 220 kV 海上升压站+1座陆上集控中心, 2座海上升压站各通过1回 $3 \times 1000 \text{ mm}^2$ 海缆单独送出至陆上集控中心, 如图6所示。

常用方案一由于南北风场均采用双回 $3 \times 500 \text{ mm}^2$ 海缆送出, 因此当1回电缆故障时, 可以通过另1回电缆送出适当地容量, 约 225 MW , 最大限度地保证了风场电能的送出, 可靠性高。该方案的缺点是4回海缆需要占用了大量的用海面积且路由

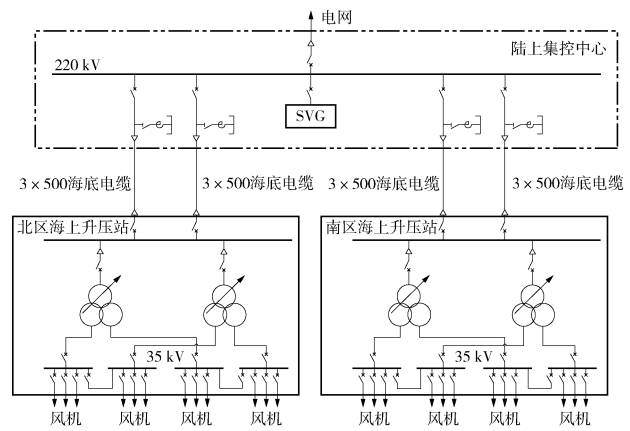


图5 常用方案一

Fig. 5 Common scheme 1

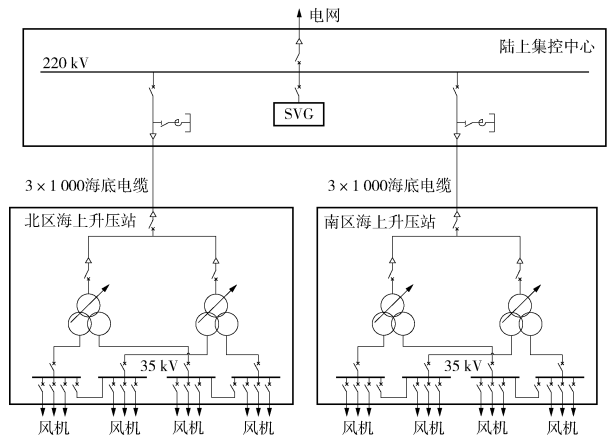


图6 常用方案二

Fig. 6 Common scheme 2

规划复杂, 不符合国家集约用海的政策。

常用方案二由于南北风场均采用单回 $3 \times 1000 \text{ mm}^2$ 海缆送出, 风场间无电的联系, 因此任何1回海缆故障将导致风场停电, 电能无法继续送出, 升压站需启动应急电源, 可靠性一般。

3 优化方案

根据本文2.2节常用送出方案存在的不足, 本文基于节约用海以及降低工程总造价的原则, 同时保证发电可靠性^[9-10], 提出以下两个优化方案:

优化方案一: 设2座 220 kV 海上升压站+1座陆上集控中心, 南部升压站通过1回 $3 \times 1000 \text{ mm}^2$ 海缆接至北部升压站GIS, 汇流后再通过2回 $3 \times 1000 \text{ mm}^2$ 海缆一并送出至陆上集控中心, 如图7所示。

优化方案二: 设2座 220 kV 海上升压站+1座陆上集控中心, 2座海上升压站各通过1回 $3 \times 1000 \text{ mm}^2$ 海缆单独送出至陆上集控中心, 2座升压站通过1

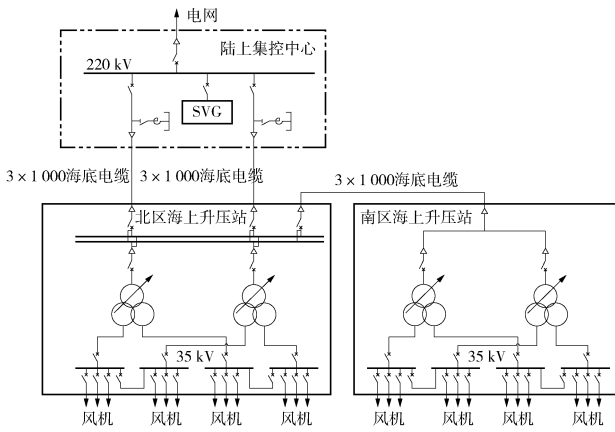


图7 优化方案一

Fig. 7 Optimization scheme 1

回 $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ 海缆进行连接, 如图8所示。

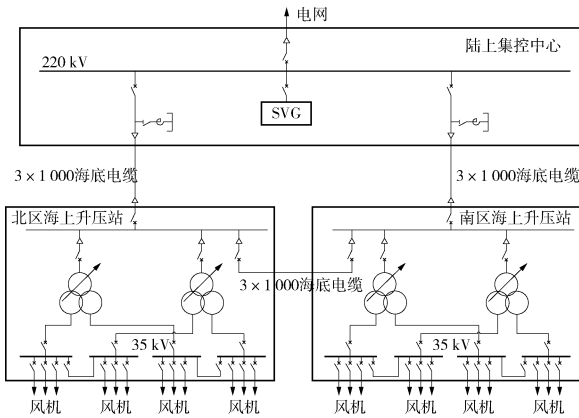


图8 优化方案二

Fig. 8 Optimization scheme 2

优化方案一最大的优点是2座升压站联合送出, 因此任何1回海缆故障的情况下, 仍可保证另1回正常运行, 最大限度地保证了风场电能的送出, 同时不会影响升压站的正常运行, 可靠性高。

优化方案二主要基于常用方案二在可靠性方面存在的不足进行的改进, 该方案在风场正常运行时各自单独送出, 联络开关打开, 任何1回海缆故障的情况下, 联络开关闭合, 故障回路的风场通过联络电缆由另1座升压站送出, 最大限度地保证了风场电能的送出, 同时不会影响升压站的正常运行, 可靠性高。

以上两种优化方案均由2回海缆送出, 与常用方案一相比节约了一半的用海, 体现了国家集约用海的方针^[11], 另外, 基于本工程实际情况, 由于南区风场距登陆点更远, 优化方案二较优化方案一的送出海缆要长约9.9 km, 造价更高。本项目推荐采用优化方案一作为联合送出的方案。如果两个风场属于不同业主, 则可推荐采用优化方案2。

4 可比投资

本节主要对优化方案一以及常用方案一从海缆设备本体费用、施工费、以及海上、陆上主要设备的差异进行可比投资比较, 如表2所示, 常用方案二由于可靠性较低, 优化方案二造价较优化方案一高, 因此不作具体比较。

表2 可比投资

Tab. 2 Comparable investment

| 项目 | 参数 | 优化方案一 | | | 常用方案一 | | |
|----------------|---|-------------|---------------------|--------|-------------|--------------------------|--------|
| | | 单价 | 数量 | 总价/万元 | 单价 | 数量 | 总价/万元 |
| 高压 海底 电缆 | 220 kV 海缆 $3 \times 500\text{ mm}^2$ | — | — | — | 520 万元/km | (28.7 × 2 + 38.6 × 2) km | 69 576 |
| | 海缆终端 | — | — | — | 25 万元/个 | 24 个 | 600 |
| | 施工费 | — | — | — | 150 万元/km | (28.7 × 2 + 38.6 × 2) km | 20 190 |
| | 220 kV 海缆 $3 \times 1\,000\text{ mm}^2$ | 870 万元/km | (28.7 × 2 + 9.9) km | 58 551 | — | — | — |
| | 海缆终端 | 30 万元/个 | 12 个 | 360 | — | — | — |
| | 施工费 | 150 万元/km | (28.7 × 2 + 9.9) km | 10 095 | — | — | — |
| 主变 | 220/35/35 180 MVA | 900 万元/座 | 2 座 | 1 800 | 900 万元/座 | 2 座 | 1 800 |
| GIS | 220 kV 间隔 | 180/90 万元/个 | (9 + 3) 个 | 1 890 | 180/90 万元/个 | (12 + 3) 个 | 2 430 |
| 无功 补偿 | 电抗器 (60 MVar) | 400 万元/个 | 2 个 | 800 | — | — | — |
| | 电抗器 (40 MVar) | — | — | — | 350 万元/个 | 4 个 | 1 400 |
| 土建 部分 | 陆上土建 可比投资 | — | — | 0 | — | — | 1 000 |
| 投资 合计 | — | — | — | 73 496 | — | — | 96 996 |

分析表2可知:由于常用方案一每座升压站均采用双回 $3 \times 500 \text{ mm}^2$ 海缆送出,因此海缆的初始投资以及施工费均较高,同时相应的GIS间隔及并联电抗器数量也更多,整体的可比投资与优化方案一比要高2.35亿元,如进一步考虑征海费用等,则差额将更大,因此,从经济角度考虑,优化方案一明显优于常用方案一。

5 海缆供货及敷设

根据国际大电网会议统计,目前国外供货的最大截面海缆为丹麦的Anholt海上风电项目,采用的是 $3 \times 1\,600 \text{ mm}^2$ 的铝芯海底电缆,路由长度24.5 km。经调研,目前国内主要的几家海缆生产厂均已通过 $3 \times 1\,000 \text{ mm}^2$ 及以上规格海缆的型式试验,均具备生产 $3 \times 500 \text{ mm}^2$ 以及 $3 \times 1\,000 \text{ mm}^2$ 两种规格海缆的能力,生产试验设备均可满足实际工程要求。

对于本项目的海缆重量,经调研海缆生产厂,两种型号的海缆参数及重量如表3所示:

表3 海缆参数及重量

Tab. 3 Cable parameters and weight

| 参数 | $3 \times 1\,000 \text{ mm}^2$ 类型 | $3 \times 500 \text{ mm}^2$ 类型 |
|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| 外径/mm | 260.4 | 246.3 |
| 重量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$) | 134.0 | 112.7 |
| 单回海缆长度/km | 28.7 | 38.6 |
| 单回海缆重量/t | 3 845.8 | 4 350.22 |

由表3可见,海缆单回重量为3 845.8 t及4 350 t,至少需选择施工能力在4 000 t级以上且具有电动转盘的海缆施工船舶。目前国内已建成或在建的多个海上风电场,已培养了一批具有海上风电海缆专业施工经验及资质的施工队伍,这些施工企业均配置了电缆敷设船机设备,地转盘承载均在5 000 t级以上,完全满足项目的需求,同时由于单回 $3 \times 1\,000 \text{ mm}^2$ 海缆长度小于 $3 \times 500 \text{ mm}^2$,因此在船只选择及敷设方面更具优势。

6 结论

本文主要通过对两个容量均为300 MW的海上风电场送出的方案进行了分析比较,最终得出结论如下:

1) $3 \times 1\,000 \text{ mm}^2$ 海缆可满足单个容量为300 MW的海上风电场电能送出。

2) 两个容量均为300 MW的海上风电场联合送出,采用双回 $3 \times 1\,000 \text{ mm}^2$ 海缆,升压站间采用1回 $3 \times 1\,000 \text{ mm}^2$ 进行连接的方案从可靠性、经济性以及海缆供货与敷设等方面均有较大的优势,可大大节省项目投资,同时,该方案也节约了海缆用海面积,体现了集约用海,因此,可作为典型方案进行推广,为后续同类型项目设计提供参考。

参考文献:

- [1] 郑明. 300 MW海上风电场电气主接线设计[J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 62-66.
- [2] 国家能源局. 风电场工程电气设计规范: NB/T 31026—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 靳春旭, 董福贵. 长期风电负荷预测方法比较[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 70-76.
- [4] 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. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [5] 国家能源局. 海上风电场交流海底电缆选型敷设技术导则: NB 31117—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电力工程电缆设计规范: GB 50217—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [7] 国家机械工业局. 电缆载流量计算: JB/T 10181.1 ~ 10181.6—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 导体和电器选择设计技术规定: DL 5222—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [9] 郭亚勋, 刘刚, 江晓锋, 等. 海上风电场内部电气系统过电压仿真[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 23-27.
- [10] 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.
- [11] 陈雨果, 李嘉龙, 刘文涛, 等. 电力市场环境下发电计划关键技术综述[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 8-13.

作者简介:

常胜

1965-, 男, 河北石家庄人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电源项目规划及开发工作(e-mail) zdtcs@126.com。



CHANG S

李炬添(通信作者)

1985-, 男, 广东中山人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电源设计及研究工作(e-mail) lijutian@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)