

[集电线路]

基于LCC海上风电半容量环形接线型式分析

文/韩超杰 李远
上海勘测设计研究院有限公司

在考虑经济性、集约用海及提高运行可靠性的前提下，提出半容量环形接线的集电线路型式。首先利用相关数据，将半容量环形接线型式与普通环进环出接线型式、全容量环形接线型式应用在同一风电场内。然后基于全寿命周期成本（LCC）的电气设备可比综合投资进行分析。最后得出在年利用小时数较高的情况下，集电线路采用半容量环形接线型式具有一定优势，对后续海上风电项目具有借鉴意义。

我国海上风电开发潜力巨大，海上风电清洁低碳，靠近沿海负荷中心，消纳方便，而且发展海上风电可以积极响应碳达峰、碳中和政策，因此海上风电成为一种趋势。与陆上风电相比，海上风电具备平均风速高、单机容量大、节约土地和年利用小时数高等优势^[1-3]。如已建设项目中三峡山东牟平BDB6#一期（300 MW）海上风电项目年利用小时数为3 582 h；漳浦六鳌海上风电场二期项目年利用小时数为3 880.91 h；三峡阳江青洲六海上风电场项目风电场年利用小时数为3 610 h。同时海上风电项目面临环境复杂多变，运行条件严酷，极端恶劣天气频发，海水腐蚀性强，增大了电气设备故障率，而海上维修可进入性差，维护难度大，运维成本高，维修周期长^[1-2]，从而造成全寿命周期内风电场故障损失增大。

根据国内外海上风电场建设经验分析，风电场存在海缆故障、风电场输变电系统设备故障情况，同时海上风电元件的故障率和修复时间会受海洋天气，特别是恶劣天气条件的影响，导致海上风电机组运行与维护困难、费用高^[2]。

某海上风场的可利用小时数为3 694 h，普通环进环出接线的集电线路型式产生故障时，在全寿命

周期成本损失较大，且需及时进行维护。本文提出半容量环形接线的集电线路型式，通过实例验证，可以有效降低故障期间损失，对后续工程具有借鉴意义。

风电场集电线路接线型式介绍

目前，海上风电场集电线路接线型式分为普通环进环出型式（链式或链式放射式组合）、全容量环形和星形3种型式。

（1）全容量环形接线型式

该接线型式为在两个相邻集电线路回路最末端的两台风电机组通过一根联络海缆连接。海缆截面选择应满足任何一根海缆故障，所有风电机组所发电能均可通过故障海缆两侧未故障海缆送至升压站，单根海缆故障不会影响风电机组出力。

（2）星形接线型式

某台或某段风电机组及海缆故障不影响其他机组运行，可靠性稍高。但是要根据机组布置情况进行分组，难度大，投资较高；同时，星形接线的节点机组（即有三回或以上进出线的机组），无法有选择性地切除进线侧风电机组，可能导致故障扩大化。

(3) 普通环进环出（链式或链式放射式组合）
接线型式

普通环进环出接线型式的特点是结构简单，投资成本较低。如回路中某段海缆发生故障，该段海缆所连接风电机组全部停运。

针对上述3种接线型式的缺点，提出半容量环形接线型式，该接线型式在两个相邻集电线路回路最末端的两台风电机组通过一根联络海缆连接。集电线路海缆截面选择满足任何一根海缆故障，所有风电机组至少一半容量发电能均可通过故障海缆两侧未故障海缆送至升压站，单根海缆故障不会影响风电机组出力。半容量环形接线型式相对于全容量环形接线型式经济性差、冗余度高与普通环进环出接线型式存在可靠性较低的缺点有明显改善。

案例描述及分析

本文参考某海上风电项目数据作为算例，风电场主要参数见表1。

表1 风电场主要参数配置

名称	参数
风机功率/MW	8.5
风机台数/台	12
上网电价/元	0.415 5元
风电场利用小时数/h	3 694 h
征海费用/（公顷/年）	7 000元
折现率	0.08
项目周期/年	25
66 kV海缆造价（3×95）/（万元/km）	115
66 kV海缆造价（3×150）/（万元/km）	140
66 kV海缆造价（3×240）/（万元/km）	170
66 kV海缆造价（3×300）/（万元/km）	190
66 kV海缆造价（3×500）/（万元/km）	260
66 kV海缆敷设费用/（万元/km）	65

本文算例采用陆上升压站形式，场区内采用66 kV集电线路。66 kV海缆载流量按照海缆进入风电机组塔筒底部，进入升压变电站的海缆通道，海缆登陆穿越大堤时顶管敷设及海缆在土壤管道中敷设等各种工况下的最小值来确定。

结合工程实际风机布置情况，选取其中的12台风机，集电线路接线型式分别按照普通环进环出型式、半容量环形接线型式和全容量环形接线型式进

行布置。以下对三种集电线路接线型式进行分析。

集电线路接线型式分析

1. 集电线路接线型式介绍

(1) 方案一：普通环进环出型式路由平面布置图如图1所示。

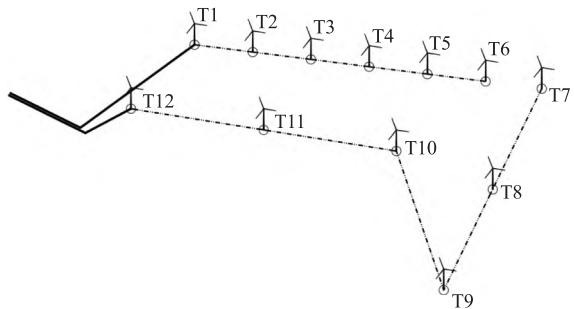


图1 海上风电场集电线路路由平面布置图（方案一）

风电机组采用66 kV集电线路接入陆上升压站66 kV母线，12台风机分为2组。

- 1) 第一组风机组：T6、T5、T4、T3、T2、T1，共6台风电机组。
- 2) 第二组风机组：T7、T8、T9、T10、T11、T12，共6台风电机组。

每组风机采用普通环进环出型式，海缆截面积第一台～第三台采用3×95，第四台采用3×150，第五台采用3×240，第六台（登陆段海缆）采用3×500。

(2) 方案二：半容量环形接线型式路由平面布置图如图2所示。

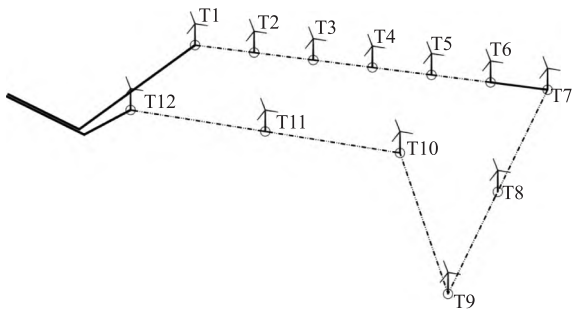


图2 海上风电场集电线路路由平面布置图（方案二）

风电机组采用66 kV集电线路接入陆上升压站66 kV母线，12台风机分为2组。

- 1) 第一组风机组：T6、T5、T4、T3、T2、T1，共6台风电机组。
- 2) 第二组风机组：T7、T8、T9、T10、T11、

T12，共6台风电机组。

第一组和第二组风机采用半容量环形接线型式，海缆截面积第一台~第五台统一选择 3×300 ，第六台（登陆段海缆）采用 3×500 。

（3）方案三：全容量环形接线型式路由平面布置如图3所示。

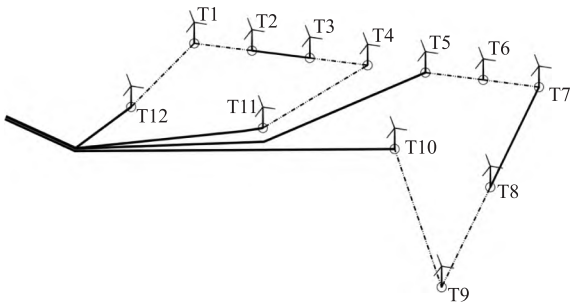


图3 海上风电场集电线路路由平面布置图（方案三）

风电机组采用66 kV集电线路接入陆上升压站66 kV母线，12台风机分为4组。

- 1）第一组风机组：T2、T1、T12，共3台风电机组。
- 2）第二组风机组：T3、T4、T11，共3台风电机组。
- 3）第三组风机组：T7、T6、T5，共3台风电机组。
- 4）第四组风机组：T8、T9、T10，共3台风电机组。

第一组~第四组风机采用全容量环形接线型式，第1台~第3台风机选用 3×300 ，第4台风机（登陆段海缆）选用 3×500 。

2. 集电线路全寿命周期内综合投资经济分析

方案一~方案三的电气可比投资费用见表2。

表2 电气方案可比综合投资经济分析

（单位：万元）

项目	方案一	方案二	方案三
66 kV海缆			
海缆造价	9 465.46	10 497.95	19 512.36
敷设费用	2 830.39	2 894.45	5 117.91
电能损耗运行期折现	1 950.79	1 633.42	789.79
海缆征海费用造价	210.48	221.58	1 872.53
合计	14 457.12	15 247.40	27 292.59
投资差额比较	基准	790.28	12 835.47

通过对3个电气方案的综合投资分析，考虑该

3种接线型式仅在场内集电线路不同，风电机组设备、陆上升压站建设及设备费用均相同，因此费用比选仅海缆部分进行综合投资比较。可知方案二（半容量环形接线型式）比方案一（普通环进环出型式）综合投资增加790.28万元。方案三（全容量环形接线型式）比方案一（普通环进环出型式）综合投资增加12 835.47万元。

3. 主海缆故障率对全寿命周期成本影响

关于交联聚乙烯绝缘海底电缆故障率的取值，国际大电网会议2009年报告中的交流高压交联聚乙烯海缆的故障率统计数据为0.070 6[次/（年·100回km）]，而从国内调研的数据来看国内海缆的故障率要远远高于这一数据^[4]。考虑电气故障和开关配置方案的海上风电场集电系统可靠性及灵敏度研究中海底电缆故障率为0.015（次/年/km）^[3]。并网海岛微电网容量优化配置研究中通过云模型及蒙特卡洛模拟验证，海底电缆的年平均故障率为0.49次/年/100 km^[5]。本文海缆故障率采用中间值0.004 9（次/年/km）进行计算分析。

对方案一~方案三中风机集电路海缆回路故障情况电量开展损失评估。

按整个风场的可利用小时数3 694 h，海缆损坏一次修复需1 440 h计算^[6]，电价按0.415 5元/（kW·h）考虑，海上风电场运行期25年，折现率为8%。依据风机功率曲线与风频曲线风速达到7.04 m/s时，约有5 043 h风电场达到半容量送出。方案一、方案二：2回主海缆共长29.30 km；方案三：4回主海缆共长65.03 km。主海缆故障损失差额比计算结果详见表3。

表3 主海缆故障损失差额比较

项目	方案一	方案二	方案三
单次电量损失/（万 kW·h）	3 096.89	1 782.83	0.00
故障主海缆长度/km	29.30	29.30	65.03
年均故障次数/次	0.14	0.14	0.32
年均损失电量/（万 kW·h）	444.62	255.96	0.00
年均损失电量费/万元	184.74	106.35	0.00
主海缆故障 25年损失电量折现/万元	1 972.05	1 135.28	0.00
故障损失差额比较/万元	基准	-836.77	-1 972.05

将故障损失差额（考虑25年损失电量折现）与全寿命周期内海缆可比综合投资经济，以方案一为基准，费用差额进行计算，详细计算结果见表4。

表4 差额分析
(单位: 万元)

项目	方案一	方案二	方案三
投资差额比较	基准	790.28	12 835.47
故障损失差额比较	基准	- 836.77	- 1 972.05
最终差额比较	基准	- 46.49	10 863.42

通过表4可知当主海缆发生故障时, 方案三(全容量环形接线型式)经济性较差, 相对于方案一(普通环进环出型式)可比综合投资增加10 863.42万元, 采用方案二(半容量环形接线型式)挽回损失的费用相对于方案一(普通环进环出型式)减少46.49万元, 完全可以抵消方案一(普通环进环出型式)的电气方案可比综合投资。同时考虑到风电场还存在分支海缆故障、风电场输变电系统设备故障情况, 海上风电场发生故障的情况会更多, 半容量环形接线型式相对于普通环进环出型式具有更多的优势。

结束语

本文通过分析不同集电线路型式主海缆故障对电气可比综合投资的影响, 验证了海上风电场年利用小时数较高时, 如考虑海缆及风电场输变电系统设备故障, 采用半容量环形接线型式在全寿命周期成本较低。同时, 半容量环形接线型式相较全容量环形接线型式可减少集电线路回路数, 在海缆用海

面积和海缆投资方面均有明显下降, 最终验证了在考虑经济性、集约用海以及提高运行可靠性的前提下, 半容量环形接线型式的可行性, 对后续工程具有借鉴意义。EA

(收稿日期: 2024-05-24)

参考文献

[1] 孙瑞娟, 梁军, 王克文, 等. 海上风电集电系统研究综述[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 105-115.

[2] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3691-3703.

[3] 谭任深, 杨苹, 贺鹏, 等. 考虑电气故障和开关配置方案的海上风电场集电系统可靠性及灵敏度研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2264-2270.

[4] 曹京荣. 基于LCC近海风电场高压交流XLPE绝缘海底电缆选型的优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

[5] 任岷. 并网海岛微电网容量优化配置研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.

[6] 王邦彦, 王秀丽, 宁联辉. 海上风电场集电系统开关配置最优化及可靠性评估[J]. 供用电, 2021, 38(4): 43-51.

