

DOI: 10.7667/PSPC161819

## 基于全生命周期成本的海上风电并网方案优选分析

张昭丞<sup>1</sup>, 郭佳田<sup>2</sup>, 诸浩君<sup>2</sup>, 艾芊<sup>1</sup>, 高扬<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海绿色环保能源有限公司, 上海 200090)

**摘要:** 针对海上风电并网方式选择问题, 建立了基于全生命周期(LCC)成本的并网方式优选模型。通过一个装机容量 250 MW、离岸距离 70 km 的海上风电场算例, 比较分析了交流并网方式和柔性直流并网方式的 LCC 成本经济性优劣。结果表明, 尽管交流并网方式初始投资高于柔性交流并网方式, 但运营过程中的成本明显小于柔性直流方式, 因而在算例项目中采用交流并网方式更具经济性。在此基础上, 综合考虑经济性和传输能力因素, 建立并网方式优选模型, 为实际工程中并网方式选择提供参考。

**关键词:** 海上风电; 柔性直流; 全生命周期成本; 优选模型

### Optimization scheme of offshore wind power grid connection based on LCC model

ZHANG Zhaocheng<sup>1</sup>, GUO Jiatian<sup>2</sup>, ZHU Haojun<sup>2</sup>, AI Qian<sup>1</sup>, GAO Yang<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
2. Shanghai Green Environment Protection Energy Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

**Abstract:** For the scheme selection of offshore wind power grid connection, an economical comparison model based on the life cycle cost (LCC) is established. A comparative analysis of the pros and cons of HVAC and VSC-HVDC using an offshore wind farm with capacity of 250 MW and 70 km distance from the shore. The results show that, although initial investment of the HVAC is much higher, but in the operation cost the HVAC significantly less than the VSC-HVDC, so it's a better choice using the HVAC in this project. Furthermore, considering the factors of economy and transmission capacity, the optimization scheme of offshore wind power grid connection based on LCC model is established, which can provide reference for the actual project in the future.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577115).

**Key words:** offshore wind power; VSC-HVDC; life cycle cost; model of optimization selection

## 0 引言

海上风电场具有风速高、风力稳定、利用小时数高、空间广阔、适宜大规模开发等特点, 其开发和利用受到了广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。我国海上风力资源丰富, 且大多集中在东南沿海一带, 靠近负荷中心, 因此开发海上风电对我国具有重要的现实意义。

目前, 海上风电并网方式可分为高压交流输电方式(High Voltage Alternating Current, HVAC)、高压以及其他输电方式<sup>[3]</sup>。HVAC 系统是海上风电并网直流输电技术(High Voltage Direct Current, HVDC)方式中发展较为成熟的一种技术, 具有结构简单、

工程造价低等特点, 目前大多数建成的海上风电场均采用这种并网方案<sup>[4]</sup>, 但是由于高压交流电缆电容充电电流的问题, 方案实施过程中需要加装无功补偿设备。HVDC 系统主要有两类: 传统直流输电(LCC-HVDC)和柔性直流输电(VSC-HVDC), 其中 LCC-HVDC<sup>[5]</sup>需要安装大量滤波和无功补偿装置, 大大增加了海上平台的体积和海上施工的复杂程度, 迄今为止 LCC-HVDC 技术并无海上风电工程的应用先例。与 LCC-HVDC 相比, VSC-HVDC 不存在换相失败问题, 可独立调节有功和无功功率, 谐波含量少, 可提高低电压穿越能力<sup>[6-8]</sup>, 适合构成多端直流输电系统<sup>[9]</sup>, 因而在海上风电并网的研究中获得了广泛的重视与认可。目前欧洲已有多采用 VSC-HVDC 方案的海上风电场并网运行, 规划中的欧洲超级电网也将大量采用 VSC-HVDC 技术<sup>[10]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金(51577115); 国家重点研发计划(2016YFB0901302); 上海市科委科创项目(16DZ1203504)

除交直流输电方式外, 研究人员还提出了低频输电技术<sup>[11-12]</sup>等, 综合考虑技术实用性、成熟度以及经济性等各方面的因素, HVAC 和 VSC-HVDC 输电技术仍将是未来海上风电建设所采用的主要输电技术。

目前针对交直流并网方案的选择, 已有相关研究从经济性的角度出发确定某特定容量风电场的经济临界距离<sup>[13-14]</sup>。文献[15]从技术性的角度探讨了 VSC-HVDC 相对 HVAC 并网方式在故障穿越情况下的优势, 文献[16]综合技术经济因素对 VSC-HVDC 和 HVAC 进行了比较, 但比较时交直流并网方式分别连接不同类型风电机组, 因此影响了结果的普适性。实际上在海上风电规划阶段, 需要在任意给定离岸距离、装机容量下选择经济合理的并网方式, 而目前罕有进行海上风电并网方式优选的研究。本文从 LCC 成本分析的角度出发, 综合考虑经济性和输电能力因素, 建立海上风电场并网方案的优选模型, 可为实际工程提供一定的参考。

## 1 LCC 模型

全寿命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)是指在产品寿命周期或其预期的有效寿命期内, 产品的设计、研究和制造、投资、使用、维修以及产品保障中发生的或可能发生的一切直接的、间接的、派生的或非派生的所有费用的总和<sup>[17]</sup>。

海上风电项目初始投资大、运营成本高, LCC 分析可以实现初始投资与运营费用之间的平衡, 其成本分解如图 1 所示。

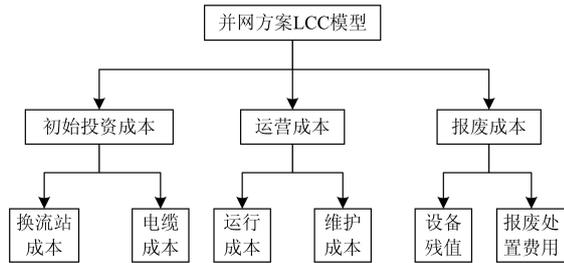


图 1 并网方案 LCC 模型

Fig. 1 LCC model of grid connected scheme

海上风电并网方式 LCC 分析的数学模型可以描述为

$$C_{\text{Total}} = C_1 + C_O + C_M + C_D \quad (1)$$

式中:  $C_1$  为初始投资成本;  $C_O$  为运行成本;  $C_M$  为维护成本;  $C_D$  为报废成本。

由于初始投入成本是一次性的成本属于现值, 而运行成本、维护成本是每年均会发生的成本。由于资金具有时间价值, 因此需要进行折算。本项目采用折算为现值的方法进行比较, 折算公式为

$$C = C_1 + \sum_{t=0}^n \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} (C_{O_t} + C_{M_t}) + \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} C_D \quad (2)$$

式中:  $r$  为折现率;  $n$  为工程寿命周期;  $t$  为年份。

## 2 实例分析

### 2.1 系统概况

某海上风电场装机容量为 250 MW, 离岸距离为 70 km, 上网电价为 0.15 €/kWh, 年利用小时数为 3500 h, 寿命周期为 20 年, 折现率为 8%。

对于交流并网方案, 采用 220 kV 高压交流并网方式。选择 1200 mm<sup>2</sup> 的单芯海缆。导体电阻为 0.0205 Ω/km, 电缆电容为 0.187 μF/km, 电缆电感为 0.4956 mH/km。

对于直流并网方案, 选用 ±150 kV 柔性直流并网方式, 采用 500 mm<sup>2</sup> 铜导体海底直流电缆, 在标准环境下(20℃)电阻为 0.0366 Ω/km。

### 2.2 初始投资成本

一般包括设备的购置费用、建筑工程费用、安装费用和其他动态费用等, 海上风电输电系统的投资成本为

$$C_1 = C_{\text{sub}} + C_{\text{cab}} + C_{\text{com}} \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{sub}}$  为变电站成本, 包括海上平台建设、设备安装等费用;  $C_{\text{cab}}$  为电缆成本, 包括电缆敷设等费用;  $C_{\text{com}}$  为补偿设备成本。

由于缺少实际工程数据, 本文所有参数均选自己公开发表的文章, 根据欧洲海上风电运营经验<sup>[18-20]</sup>, 各成本的计算公式为如下所示。

#### 1) 交流电缆成本

交流电缆成本主要受 3 个因素影响: 额定电流、额定电压和敷设成本, 综合造价取为 1600 k€/km。

#### 2) 交流变电站成本

交流变电站分为海上变电站和路上变电站, 投资成本包括基建、设备采购、设备安装等费用。

$$C_{\text{sub\_off\_AC}} = 120000 \times \left(\frac{S}{300}\right)^{-0.413} \cdot S \quad (4)$$

$$C_{\text{sub\_on\_AC}} = 30000 \times \left(\frac{S}{300}\right)^{-0.413} \cdot S \quad (5)$$

式中:  $C_{\text{sub\_off\_AC}}$  为交流海上变电站投资成本;  $C_{\text{sub\_on\_AC}}$  为交流路上变电站投资成本。

#### 3) 交流无功补偿成本

依据运行经验, 一般补偿设备价格为 60 k€/Mvar。

#### 4) 直流电缆成本

类似于交流电缆, 直流电缆综合造价取 815 k€/km。

### 5) 直流换流站成本

直流换流站分为海上换流站和陆上换流站, 投资成本包括基建、设备采购、设备安装等费用。

$$C_{\text{sub\_off\_DC}} = (42 + 27 \times \frac{P}{300}) \times 10^6 \quad (6)$$

$$C_{\text{sub\_on\_DC}} = (18 + 27 \times \frac{P}{300}) \times 10^6 \quad (7)$$

式中:  $C_{\text{sub\_off\_DC}}$  为交流海上变电站投资成本;  $C_{\text{sub\_on\_DC}}$  为交流陆上变电站投资成本。

### 2.3 运行成本

系统年运行损耗费用主要包括换流器(变压器)损耗费用和线路损耗费用。其中交流输电系统中变压器年损耗率为 0.8%, 直流输电系统中换流器年损耗率为 1.75% 左右<sup>[21]</sup>。电缆损耗费用可表示为

$$C_{\text{loss\_cab}} = P_{\text{loss}} \cdot T_0 \cdot u \quad (8)$$

式中,  $P_{\text{loss}}$  为电缆输电损耗。对于直流电缆, 其输电损耗可表示为

$$P_{\text{loss}} = (P/U_{\text{DC}})^2 \times R \times 2L \quad (9)$$

式中:  $P$  为输送功率;  $U_{\text{DC}}$  为正负极电压差;  $R$  为单位长度直流电阻;  $L$  为线路长度。

对于交流电缆, 其输电损耗包括线路导体损耗、护套和铠装损耗等, 为简便计算, 此处将护套和铠装损耗以系数形式体现<sup>[21]</sup>。线路损耗费用可表示为

$$P_{\text{loss}} = 3 \left( \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} \right)^2 \times R \times L \quad (10)$$

式中,  $\cos \varphi$  为功率因数。线路等效电阻  $R$  可由式(11)表示。

$$R = R_{\text{con}} (1 + \lambda_{\text{shield}} + \lambda_{\text{armor}}) \quad (11)$$

式中:  $R_{\text{con}}$  为电缆导体电阻;  $\lambda_{\text{shield}}$  为护套损耗系数, 一般取值为 0.28~0.35, 本文取为 0.315;  $\lambda_{\text{armor}}$  为铠装损耗系数, 一般取值为 0.56~0.7, 本文取为 0.63。

### 2.4 维护成本

维护成本主要包括一年中维护检修过程的材料和人工等费用, 年维护成本包括换流站维护成本和电缆维护成本。

$$C_{\text{Mt}} = C_{\text{Mt}_s} + C_{\text{Mt}_l} \quad (12)$$

根据运行经验, 系统年维护成本可简化为如式(13)所示。

$$C_{\text{Mt}} = f_m \cdot C_1 \quad (13)$$

式中,  $f_m$  为工程维护率, 对于柔性直流输电系统的工程维护率一般为 1.5%, 而交流系统为 2.1%<sup>[22]</sup>。交直流输电系统年维护率之间的差异主要与直流输电系统可靠性低于交流输电系统有关, 电力电子器件的故障率高于变压器等传统电气设备。

### 2.5 报废成本

报废成本一般由历史数据进行估算, 可用如式(14)计算。

$$C_D = \sum_{i \in M} (C_{\text{ied}} - C_{\text{ier}}) \quad (14)$$

式中:  $C_{\text{ied}}$  为拆除、销毁设备  $i$  所损耗的费用;  $C_{\text{ier}}$  为该设备的残值。

虽然交直流输电系统设备具有一定的设备残值收益, 但考虑到海上风电项目离岸距离远, 需要租借船舶进行拆除, 且环境较为恶劣, 拆除成本高, 通常认为与设备残值相抵。因此最终的废弃成本相对其他成本很小。

### 2.6 结果分析

通过对目标系统的 LCC 分解计算可以得到对交直流并网方案的经济评估, 如表 1 所示。

表 1 交直流并网方案 LCC 比较

Table 1 Comparison of AC/DC based on LCC					
并网方案	初始投资	运行成本	维护成本	废弃成本	LCC 成本
AC	164.43	32.41	19.33	0	216.17
DC	133.53	63.44	27.06	0	224.03

可以看出, 在该算例背景下, 采用交流输电方式并网更具经济性。如果仅考虑初始投资的话, 柔性直流并网方式投资要低于交流并网方式, 但受限于换流器中电力电子器件的高损耗以及低可靠性, 柔性直流并网方式在运营期间的运行费用和维护费用均高于交流方式, 因此从全生命周期的角度看, 交流并网方式仍具有比较优势。

## 3 灵敏度分析

### 3.1 离岸距离

由图 2 可以看出, 随着海上风电场离岸距离的增加, 柔性直流并网方式经济性优势逐渐增加, 而

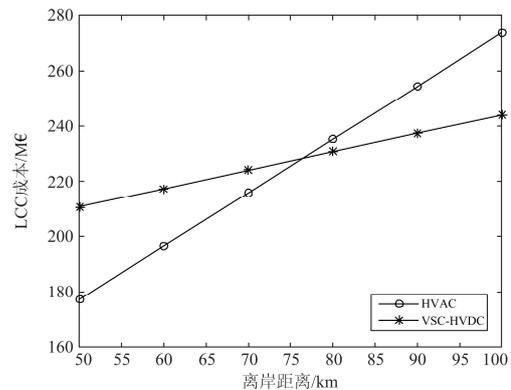


图 2 离岸距离对 LCC 成本的影响

Fig. 2 Effect of off shore distance on LCC cost

交流输电方式由于电缆成本较高,且需要大量无功补偿设备,当离岸距离超过 76 km 后已不具有经济优势。

### 3.2 装机容量

由图 3 可以看出,随着海上风电场装机容量的不断扩大,柔性直流并网方案的成本增速大于交流方式,主要是由于输送容量越大,柔性直流换流站的成本也就越大,其增幅远大于交流方案升压站成本的增幅。

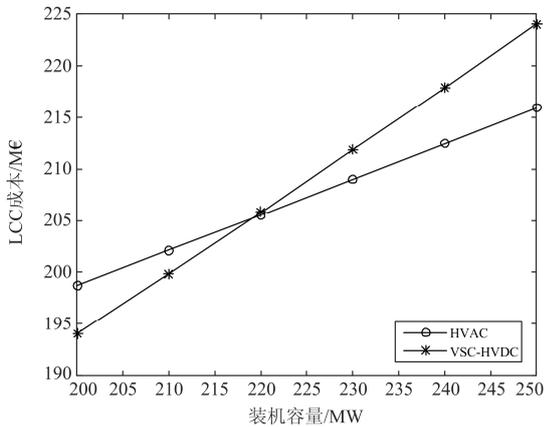


图 3 输电容量对 LCC 成本的影响

Fig. 3 Effect of transmission capacity on LCC cost

### 3.3 上网电价

由图 4 可以看出,随着上网电价的不断提高,柔性直流输电方式的成本也在不断提高,这主要是因为相对交流系统而言,直流并网方式运行中损耗更大,且损耗主要集中在两端换流站。

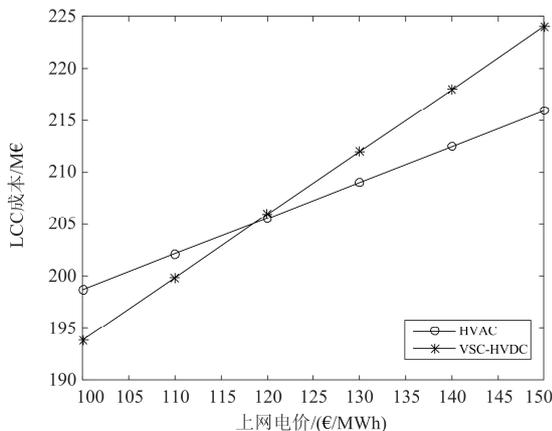


图 4 上网电价对 LCC 成本的影响

Fig. 4 Effect of internet price on LCC cost

### 3.4 折现率

由图 5 可以看出,随着折现率的提高,直流并网方式的总成本不断减少。依据经济性原理得知,

折现率越高,则现值越低。直流并网方式运营期间的运行成本和维护成本均高于交流方式,折现率越高,则交直流并网方式在运营期间的成本差异越小。

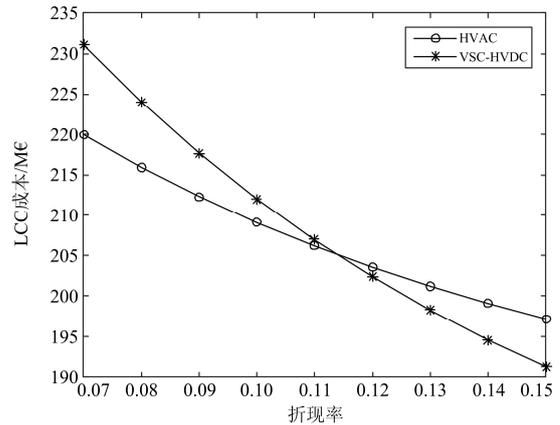


图 5 折现率对 LCC 成本的影响

Fig. 5 Effect of discount rate on LCC cost

## 4 并网方案优选研究

以上为针对某一具体海上风电场并网方式进行的 LCC 成本比较,然而人们更关注于如何根据风电场的实际情况选择最佳的并网方式。对于不同的离岸距离和装机容量要求,本节将探讨如何合理选择交直流并网方式、电压等级、补偿容量以及线路回数等。

### 4.1 交流并网方案的优选

交流并网方案的主要限制因素为交流高压电缆的热稳定、电压降和静稳定极限,参考文献[23]提出的特高压交流输电模型以及经济性优选方法,本文提出海上风电交流并网方案的优选方法。

考虑到本文需要研究 100 km 以上海上风电场的并网情况,电缆的集中参数模型是长线路的精确模型,对于短线路来说,分布式参数模型与集中参数模型等效,因此本文采用分布式参数模型对高压交流海缆进行建模。

海上风电通过交流方式并网的数学模型如图 6 所示。其中,  $Z_c$  为线路波阻抗;  $\beta$  为相位常数;  $l$  为线路长度;  $E_{wf}$ 、 $E_g$ 、 $U_{wf}$ 、 $U_g$  分别为风电场、

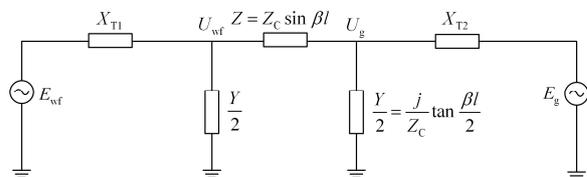


图 6 交流并网方式等值模型

Fig. 6 Equivalent model of AC grid connected system

陆上电网的等值机端电压和线路母线电压;  $X_{T1}$  和  $X_{T2}$  分别为海上升压站和陆上变电站的变压器电抗。

对图 6 所示的等值模型进行研究, 推导出系统静稳定性极限输送功率公式为

$$P_1 \approx \frac{E_{wf} E_g \sin \delta_{sr}}{X_{T1} \cos \beta l + Z_c \sin \beta l - \frac{X_{T1} X_{T2}}{Z_c} \sin \beta l + X_{T2} \cos \beta l} \quad (15)$$

式中,  $\delta_{sr}$  为机端相位角差, 本文选为  $44^\circ$  [24]。

考虑线路安装串补, 设补偿度为  $K_{se}$ , 则有:

$$Z'_c = \sqrt{1 - K_{se}} Z_c \quad (16)$$

$$\beta' = \sqrt{1 - K_{se}} \beta \quad (17)$$

此外, 还需考虑电缆的热稳定极限以及电压降约束, 三者取最小值即为并网电缆的极限传输容量。由此确定满足给定离岸距离和装机容量的交流输电模型, 对于各电压等级交流输电模型计算其 LCC 成本, 即可进行交流并网方案的优选。具体算法流程图如图 7 所示。

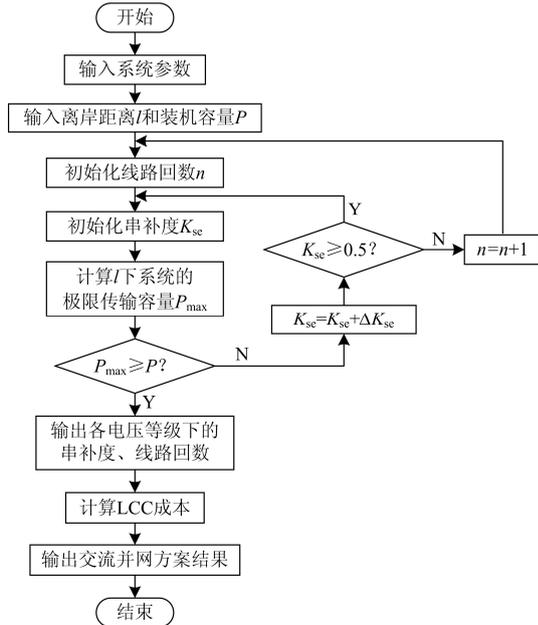


图 7 交流并网方案优选流程图

Fig. 7 Optimization flowchart of AC transmission grid-connection scheme

#### 4.2 直流并网方案的优选

目前柔性直流海缆已形成  $\pm 80$  kV、 $\pm 150$  kV、 $\pm 200$  kV 和  $\pm 320$  kV 电压等级, 在实际工程初步估计电压等级时, 可采用瑞典乌尔曼的经验公式。

$$V_d = \pm 12\sqrt{P} \quad (18)$$

式中:  $V_d$  为双极直流线路的对地线电压;  $P$  为双极

直流线路的输送功率。直流电压应选取在  $(-12\sqrt{P}, 12\sqrt{P})$  区间内。

文献[25]通过比较柔性直流输电不同电压等级的经济性, 得出工程中电压等级越高, 柔性直流输电的工程造价越小的结论。因此本节确定直流并网方式电压等级时, 选取在  $(-12\sqrt{P}, 12\sqrt{P})$  区间内较大的电压等级。

#### 4.3 优选方案分析

基于海上并网方式 LCC 成本模型, 结合交直流并网方式的优选结果, 即可得到任意离岸距离和装机规模的海上风电场并网方案优选结果, 如图 8 所示。

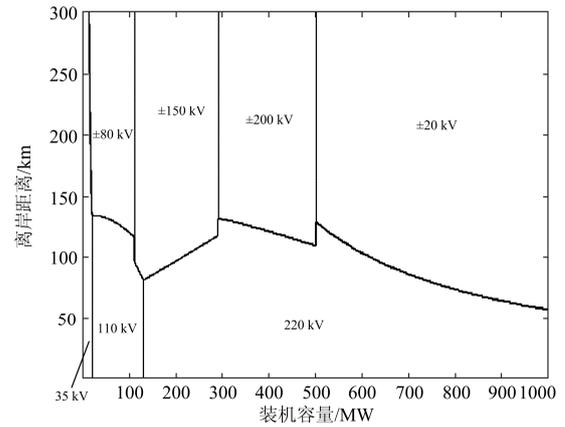


图 8 交流并网方案优选结果

Fig. 8 Optimization result of AC transmission grid-connection scheme

对图 8 结果进行讨论:

1) 总体来说, 交流并网方式适合于离岸距离较近的风电场并网。柔性直流并网方式适合于离岸距离较远的风电场并网。

2) 无论哪种并网方式, 随着风电场装机容量增加, 高电压等级越来越具有经济性。

3) 图中 35 kV 在小装机容量下针对离岸距离小于 300 km 的情况具有绝对的优势。实际上, 由于风能资源丰富, 在远海区域建立几十 MW 的风电场的概率很小, 因此可以认为 35 kV 交流系统只适合于近海小规模风电并网。

4) 图中  $\pm 150$  kV 与 220 kV 的经济等价距离均随着装机容量的增加而增加, 符合 3.2 节中敏感性的讨论。而其他电压等级之间的等价经济距离随装机容量的增加而减少, 究其原因, 在于此时柔性直流电缆损耗远小于交流电缆, 其差异远大于换流站的成本差异。

5) 考虑到随着电力电子技术的进步, 柔性直流

换流站成本有望进一步减少,因此从总体上看,随着装机容量的增加,交直流经济临界距离将逐渐减小。

## 5 结论

本文针对 HVAC 与 VSC-HVDC 两种并网方式进行了基于全寿命周期成本的经济性分析,对于离岸距离 70 km、装机容量 250 MW 的特定海上风电场算例,结果显示尽管 HVAC 的初始投资(尤其是海缆投资)比 VSC-HVDC 高一些,但由于 VSC-HVDC 目前较高的换流器损耗以及较低的可靠性, HVAC 并网方式的 LCC 成本仍具有经济性优势。

在此基础上,本文建立了海上风电并网方式的优选模型,仿真结果显示:从 LCC 成本的角度, HVAC 适合于近海风电场,而 VSC-HVDC 适合于远海风电场;随着装机容量的增加,交直流经济临界距离将逐渐减小。本文建立的风电场并网方式优选模型,对未来海上风电场的并网规划具有一定的参考价值。

值得注意的是,受限于公开资料中设备成本数据的缺失,本文建立的优选模型并未考虑同一电压等级海缆不同导体截面的情况,这种情况增加了模型的复杂性,有待于进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] 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]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 107-113.
- [2] 赵勇, 韩斌, 房刚利. 风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 1-5.  
ZHAO Yong, HAN Bin, FANG Gangli. A survey of condition monitoring and fault diagnosis for wind power generators[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 1-5.
- [3] 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.  
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3770.
- [4] ALEGRÍA I M D, MARTÍN J L, KORTABARRIA I, et al. Transmission alternatives for offshore electrical power[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(5): 1027-1038.
- [5] 崔亚辉, 张俊杰, 赵宗彬, 等. 高压直流输电超临界 600 MW 机组次同步振荡扭振模型及仿真[J]. 热力发电, 2016, 45(6): 106-110.  
CUI Yahui, ZHANG Junjie, ZHAO Zongbin, et al. Subsynchronous oscillation torsional vibration model and simulation for a supercritical 600 MW unit with high voltage direct current transmission[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(6): 106-110.
- [6] 章心因, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于 VSC-HVDC 并网风电场的低电压穿越技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 93-99.  
ZHANG Xinyin, HU Minqiang, WU Zaijun, et al. Research on the low voltage ride-through technology of integrated wind farms based on VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 93-99.
- [7] 边晓燕, 王本利, 陈建平, 等. 改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制改善风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 9-16.  
BIAN Xiaoyan, WANG Benli, CHEN Jianping, et al. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 9-16.
- [8] 高强, 吴华华, 陈楚楚, 等. 舟山多端柔性直流系统环流抑制和交流故障穿越能力分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 62-67.  
GAO Qiang, WU Huahua, CHEN Chuchu, et al. Circulating current suppressing and AC faults ride-through capability analysis of Zhoushan MMC-MTDC system[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 62-67.
- [9] 刘亚磊, 李兴源, 曾琦, 等. 多端多电平柔性直流系统在海上风电场中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 9-14.  
LIU Yalei, LI Xingyuan, ZENG Qi, et al. VSC-MTDC system based on MMC for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 9-14.
- [10] 范松丽, 苑仁峰, 艾芊, 等. 欧洲超级电网计划及其对中国电网建设启示[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 6-15.  
FAN Songli, YUAN Renfeng, AI Qian, et al. European supergrid project and its enlightenment to China's Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 6-15.
- [11] 王锡凡, 王秀丽, 滕予非. 分频输电系统及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 1-6.  
WANG Xifan, WANG Xiuli, TENG Yufei. Fractional frequency transmission system and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 1-6.
- [12] 苏匀, 李少华, 王秀丽, 等. 基于 PWM 交交变频器的分频风电系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015,

- 43(13): 86-91.  
SU Yun, LI Shaohua, WANG Xiuli, et al. Research on fractional frequency wind power system based on PWM cycloconverter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 86-91.
- [13] 李飞飞, 王亮, 齐立志, 等. 海上风电典型送出方案技术经济比较研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 140-144.  
LI Feifei, WANG Liang, QI Lizhong, et al. Technical and economical comparisons of typical transmission schemes of the offshore wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 140-144.
- [14] 程斌杰, 徐政, 宣耀伟, 等. 海底交直流电缆输电系统经济性比较[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 131-136.  
CHENG Binjie, XU Zheng, XUAN Yaowei, et al. Economic comparison of AC/DC power transmission system for submarine cables[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 131-136.
- [15] REIDY A, WATSON R. Comparison of VSC based HVDC and HVAC interconnections to a large offshore wind farm[C] // Power Engineering Society General Meeting: IEEE, 2005, 1: 1-8.
- [16] KONG Xiangyu, JIA Hongjie. Techno-economic analysis of SVC-HVDC transmission system for offshore wind[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, 2011: 1-5.
- [17] 蔡亦竹, 柳璐, 程浩忠, 等. 全寿命周期成本(LCC)技术在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 149-154.  
CAI Yizhu, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Application review of life cycle cost (LCC) technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 149-154.
- [18] ERGUN H, VAN HERTEM D, BELMANS R. Transmission system topology optimization for large-scale offshore wind integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 908-917.
- [19] VAN E B, VAN H D, REZA M, et al. Economic comparison of VSC HVDC and HVAC as transmission system for a 300 MW offshore wind farm[J]. European Transactions on Electrical Power, 2010, 20(5): 661-671.
- [20] BRESESTI P, KLING W L, HENDRIKS R L, et al. HVDC connection of offshore wind farms to the transmission system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 37-43.
- [21] VAN EECKHOUT B. The economic value of VSC HVDC compared to HVAC for offshore wind farms[D]. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2008.
- [22] 王锡凡, 刘沈全, 宋卓彦, 等. 分频海上风电系统的技术经济分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 43-50.  
WANG Xifan, LIU Shenquan, SONG Zhuoyan, et al. Technical and economic analysis on offshore wind power system integrated via fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 43-50.
- [23] 杨昊, 王丹, 刘涤尘. 特高压交流输电模型的建立与经济性优选分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 91-96.  
YANG Hao, WANG Dan, LIU Dichen. Establishment of UHV AC transmission model and economical optimization strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 91-96.
- [24] 夏俊丽, 毛荀, 柯德平, 等. 基于综合评价的交、直流输电适用范围研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 120-126.  
XIA Junli, MAO Xun, KE Deping, et al. Applicable scope of AC and DC power transmission based on comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 120-126.
- [25] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 柔性直流输电不同电压等级的经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 98-102.  
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Economic comparison of different voltage levels of flexible HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 98-102.

收稿日期: 2016-11-01; 修回日期: 2016-12-20

作者简介:

张昭丞(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: zhangzhaocheng@sjtu.edu.cn

郭佳田(1964—), 男, 高级工程师, 研究方向为深远海风电场接入系统关键技术;

诸浩君(1984—), 男, 工程师, 研究方向为深远海风电场接入系统关键技术。E-mail: juleon1011@163.com

(编辑 张爱琴)