

低碳背景下的江苏海上 风电新发电成本计量体系构建

冯奕 刘哲 刘秋华¹

(南京工程学院经济与管理学院, 南京 211167)

【摘要】: 在低碳背景下, 为了减少碳排放量, 我国正大力推动发展海上风电。以江苏海上风电成本为研究对象, 为了确定风力发电的实际效益, 综合考虑了发电投资内部成本、辅助服务成本和环境效益等各方面因素。对燃煤发电污染物排放量和污染物环境价值进行了计量, 把海上风电相较于其所节约的环境成本视作外部成本, 提出风电社会总成本计量新模型。采用基于成本归集的核算方法来量化各构成元素对风电社会总成本及投资效益的影响, 构建新的海上风电发电成本计量体系, 并对案例进行了分析, 为海上风电场投资建设、经济运行和成本预估提供理论支持以及海上风电上网电价的合理制定提供参考。

【关键词】: 低碳 江苏 海上风电 成本归集 计量体系

2009年哥本哈根世界气候大会推动世界各国把“低碳”经济作为共同面对的重要课题。2011年国务院印发的能源发展“十二五”规划中就明确了“绿色、低碳”的发展路线。在此“低碳”经济背景下, 我国的海上风电产业正迅速发展。相继开展了山东、江苏两省海上风电基地的示范项目建设^[1]。

但海上风电场的开发成本高、投资风险大, 导致海上风电的发电成本很高; 因此, 客观考核海上风电的发电成本, 并完善电价机制等激励政策, 是我国海上风电规模化发展的重要前提。

近年来, 国内外专家学者对海上风电的发电成本与价值分析进行了研究。英国伯明翰大学的Richard Green等学者对海上风电的成本总趋势进行了研究, 分析得出政府部门需要扶持海上风电产业链发展以降低制造成本和边际成本^[2]。丹麦AKF研究所的Jacob Ladenburg等学者从福利经济学的角度对视觉污染的影响进行了分析, 得出海上风电比岸上风电可以有效地降低视觉污染, 减小福利经济成本的结论^[3]。西班牙拉科鲁尼亚大学的Laura Castro-Santos等学者针对漂浮式海上风电提出了一种基于全生命周期阶段的总成本计算方法, 对漂浮海上风电建设中的总成本分布进行经济性评估^[4]。

我国水电水利规划设计总院的黄琳等学者阐述了海上风电建设比陆上风电建设增加的成本, 从风力资源准确性和风机设备质量两方面对海上风场的工程风险性进行了分析^[5]。华南理工大学的陈皓勇等学者通过综合分析国内外海上风电定价机制以及海上风电成本结构特征, 提出了海上风电经营期成本计算模型^[6]。上海大学的黄玲玲等学者围绕可靠性、可用率及维护三方面归纳了影响海上风电运维成本的主要因素^[7]。此外, 还有学者对海上风电直流传输网络、主变压器、开关配置方案的经济性进行研究。

基金项目: 江苏省社会科学基金项目——“基于低碳经济下的江苏海上风电可持续发展研究”(项目编号: 14EYD004; 项目负责人: 刘秋华) 成果之一。

作者简介: 冯奕, 电力工程博士, 南京工程学院经济与管理学院讲师, 研究方向: 新能源技术; 刘哲, 南京工程学院经济与管理学院硕士研究生, 研究方向: 配电网自动运行与控制; 刘秋华, 技术经济及管理博士, 南京工程学院经济与管理学院院长、教授, 研究方向: 能源技术经济及管理。

综上所述,目前对于我国海上风电成本的研究大多针对特定的技术,并且缺乏对海上风电环境效益的研究。本文以低碳经济为前提,结合上述研究成果采用基于成本归集的核算方法,考虑海上风电的环境效益,通过算例全面分析海上风电的发电成本构成,构建海上新发电成本计量体系。

1 江苏发展海上风电优势

陆上风电场施工期会破坏工区大量植被,造成一定的水土流失;施工造成的噪声、灯光等会造成邻近地区栖息觅食的鸟类数量减少、多样性降低等环境危害。而海上风电场较陆上风电场具有风力资源丰富稳定、风机利用率高、占用土地资源少、噪声环境污染小等优点。同时海上风电场项目受地形地貌影响较小,风电机组单机容量更大(3~5兆瓦),具有更高的年利用小时数。

江苏省具有得天独厚的风能开发利用条件。江苏省地形条件优越,以平原为主,气候工程条件好,使风电场的建设造价成本和施工难度降低。江苏省东部沿海拥有954km海岸线,滩涂面积达6500km²。距海岸线20km处面积约7614km²可开发,风电可开发量约3800万kW;距海岸线50km处面积约19035km²可开发,风电可开发量约9500万kW,风能资源丰富^[8]。

除了拥有丰富的海上风能资源,江苏风电产业基础好,配套能力强。据不完全统计江苏已有风电开发和设备制造企业200多家,部分产品已达到国内领先水平。江苏已形成了较为完整的风电产业链,整机制造企业数量居全国首位。

另外,江苏省发展海上风电具有重要的意义。江苏土地资源紧张,开拓海洋资源可缓解土地压力;位于中国东部沿海经济发达地区,属于电力负荷中心,输电成本低;电网分布均匀,各地区电网紧邻,电力输送便利,已建成四条500kV跨江输电通道,电力可以直接并入华东电网;沿海岸线呈条带状分布的风电场对电力输送通道的要求大大降低,有利于更好实现风电消纳^[9]。

2 风电内部成本计量

本文把风电场作为一个工程项目,基于成本归集的核算方法计量风力发电的实际成本。风电内部成本是指维持风电场正常运作所需的最低成本,主要归集成四个部分,包括风电项目投资的静态成本、运行维护检修成本、资本借贷成本和并网附加成本。风力发电内部成本归集如图1所示。

2.1 风电场参数计算

容量系数F是指风力机年平均输出功率 P_a 与额定功率 P_r 之比,为:

$$F = P_a / P_r \quad (1)$$

排除意外情况,风电场运营寿命为N年,因此寿命期发电总量Q为:

$$Q = 8760 \times F \times P_r \times N \quad (2)$$

2.2 项目投资成本静态计量

设风电机组购置费用 C_a 、风电场基础结构建设费 C_b 、风电机组安装工程费 C_c 、电气系统架设费 C_d 、风电并网建设费 C_e ,总的项目投资成本为 C_i 。从单位成本考虑,则每千瓦时风电投资成本 C_z 为:

$$C_z = \frac{C_t}{Q} = \frac{C_a + C_b + C_c + C_d + C_e}{8\,760 \times F \times P_r \times N} \quad (3)$$



图 1 风力发电内部成本归集

考虑风电项目开发建设投资周期较长,约为 20~25 年,设投资建设期的风机等固定资产的折旧年限为 n ,折旧费为 C_n 。则折旧后的每千瓦时风电投资成本 C_{z0} 为:

$$C_{z0} = \frac{C_n}{Q_y} = \frac{\frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} C_z}{8\,760 \times F \times P_r} \quad (4)$$

式中: r 为贴现率。

2.3 运行维护检修成本计量

年运行维护成本主要包括故障维修费和固定费。故障维修费是指因风力机或其他电气设备出现故障时必须维修而产生的费用,该费用主要受风机质量、年利用小时数、海域位置的外部环境状况、距海岸距离等因素影响。而固定费主要包括风电场定期维护费和员工工资福利费两大部分,由风电场规模、员工数、福利薪资水平等因素决定。

设运行维护检修成本为 C_w ,故障维修费为 C_{w1} ,固定费为 C_{w2} ,则每千瓦时运行维护成本 C_{w0} 为:

$$C_{w0} = \frac{C_w}{Q} = \frac{C_{w1} + C_{w2}}{8\,760 \times F \times N \times P_r} \quad (5)$$

2.4 资本借贷成本计量

在项目开发建设期内贷款所形成的利息是指筹集的债务资金在开发建设期内发生且在建成投产后算入固定资产原值的利息,包括向银行借贷和其他形式的债务资金利息以及融资费用。为简化计量,开发建设期资本借贷利息的估算根据项目建设进度采用投资分年计划。现规定借贷都在每年年末支付,按全年息采用复利计算方式。设有效年利为 r_y 为:

$$r_y = \left(1 + \frac{k}{m}\right)^m - 1 \quad (6)$$

式中: k 为年利率; m 为每年计息次数。

流动资金指流动资产值除去流动负债后的余额,主要包括项目建成投产后原材料购买、员工工资支付和其他因周转资金产生的费用,据调查,风电项目所需流动资金较少。为简化计量,采取扩大指标法估算风电场流动资金,则每千瓦时资本借贷成本 C_{10} 为:

$$C_{10} = \frac{C_l}{Q} = \frac{C_l}{8\,760 \times F \times N \times P_r} \quad (7)$$

式中: C_{10} 为资本借贷总成本。

2.5 风电运行并网附加成本计量

由于风能的间歇性,导致风电机组输出功率随机波动会影响电网的频率和电压稳定。因此,风电并网运行需要增加一定的备用容量防止这种随机波动,随之产生并网附加成本。在电力市场环境下,电网需要支付电力公司相应的辅助服务容量成本和电量成本。

设一段时间 t 内的辅助服务容量成本 C_R , 辅助服务电量成本为 C_B , 风电场发电量为 Q_t , 辅助服务成本为 C_F , 则每千瓦时电量包含辅助服务成本 C_{F0} 为

$$C_{F0} = \frac{C_F}{Q_t} = \frac{C_R + C_B}{F \times P_r \times t} \quad (8)$$

3 风电外部成本计量

外部成本是指每生产 1kWh 电能需支付的额外代价,主要包含能源发电对环境、资源造成的破坏而产生的附加成本。

影响外部成本构成主要包括因破坏环境造成的相关的环境安全问题,如影响人体健康和破坏生态文明;财政收入状况和政府相关补贴等社会因素;发电过程中排放的温室气体引发气候变化导致温室效应、臭氧层空洞;硫化物排放导致酸雨、土质污染等生态问题。同时非环境因素变化如政府财政补贴、增加的就业机会、技术研发成本增高等导致的外部隐形成本变化。

3.1 燃煤火电污染物排放量计量

在我国,火力发电造成的污染是最严重复杂的,传统火力发电厂污染物排放主要包括各种硫化物、氮氧化物、固体粉尘悬浮

物和以一氧化碳为主的有毒有害气体以及大量的温室气体,对土壤、水源也会造成严重的污染。上述污染物排放率为单位燃料燃烧所产生的污染物质,每种污染物排放量具体计量方法如下。

其中 CO₂ 排放量计量公式为:

$$G_{CO_2} = B \times Q_0 \times E \times K_{CO_2} \times \lambda_{CO_2} \quad (9)$$

式中: G_{CO₂} 表示的排放率 (kg/t); B 表示耗煤量 (kg); Q₀ 表示单位热值 (MJ/kg); E 表示单位热值下的排放量 (t/TJ); K_{CO₂} 表示碳氧化率; λ_{CO₂} 表示与 C 的摩尔质量比 (约 3.667)。

SO₂ 排放量计量公式为:

$$G_{SO_2} = B \times S_y \times K_{SO_2} \times \lambda_{SO_2} \times (1 - \eta) \quad (10)$$

式中: G_{SO₂} 表示 SO₂ 的排放量; B 表示耗煤量; S_y 表示燃料应用基含硫量; K_{SO₂} 表示燃料硫向烟气硫的转化率; λ_{SO₂} 表示 SO₂ 与 S 的摩尔质量比 (约 2); η 表示脱硫效率。

其中 CO、粉煤灰、炉渣和 TSP (悬浮颗粒物) 排放率分别为 0.26, 110.00, 30.00, 0.40kg/t。

3.2 风力发电环境价值标准

风力发电的环境价值是指风电环境效益的货币化,一般指相较于传统火力煤炭发电而言对其进行计量。现以单位污染物减排所降低的环境污染造成的经济损失所代表的价值作为污染物的环境价值。文献^[10]依据我国现有污染物排放收费标准和美国环境价值标准,分析得出我国当前火力发电单位减排污染物的环境价值标准。

3.3 计量方法

为简化计量,假设年发电量相同估算火电厂同条件下产生的环境成本作为风电场可节约的等值环境成本。计算公式如下:

$$C_{ENV} = \frac{\sum_i^n V_i O_i}{Q_y} \quad (11)$$

式中: C_{ENV} 为火电厂环境成本; V_i 为第 i 种污染物环境价值; O_i 为第 i 种污染物的排放量; n 为污染物总的种类数。

4 算例分析

4.1 算例基本信息统计

本文以中广核如东 150MW 海上风电示范项目为例进行说明。它位于江苏如东近海海域离岸约 25km, 共布置 38 台单机容量为 4MW 的双馈风电机组。风机的实际寿命还不能准确确定, 这里假设其寿命期为 20 年, 年利用小时数为 2600h。对整个建设及发电并网过程的成本进行定量分析, 分别做了如下简化和假设:

(1) 假定风电机组额定风速为 10.5m/s; 年平均风功率密度 447W/m²。

(2) 工程总装机容量为 152MW, 年发电量约 38800 万 kWh。

(3) 项目总投资约 28 亿元, 其中资本金 10 亿元, 贷款 10 亿元, 偿还期 10 年, 利率 4.9%; 融资 8 亿元, 偿还期 6 年, 利率 8.5%。

(4) 贴现率为 8%, 折旧年限为 20 年。

4.2 内部成本计算

(1) 根据东海大桥海上风电场成本构成情况, 对中广核如东 150MW 海上风电示范项目静态投资各成本初步估算^[11]。

(2) 风电场的容量系数 0.2914, 根据公式(4), 单位风电场投资成本为 0.735 元/kWh。

(3) 根据各国已经建成的风电场经验, 在风机使用初期维护检修成本约占初期投资的 2%~5%, 本文取 4%, 则初期维护检修成本为 11200 万元; 单位风电维修成本为 0.253 元/kWh。

(4) 等额本息产生的利息为 26692.875 万元, 则公司融资产生的利息为 28004.369 万元, 贷款和融资总利息和为 54697.244 万元, 则单资本借贷费为 0.0705 元/kWh。

(5) 风电场备用容量取最大发电负荷的 2%~5%, 本文取 4%, 辅助服务容量成本价格 0.112 元/kW, 备用容量的电量价格为 0.28 元/kWh, 则备用容量为 1552 万 kWh; 风电场一年内辅助服务容量成本为 173.824 万元; 辅助容量电量成本为 434.56 万元; 风电运行并网附加成本为 608.384 万元; 单位并网附加成本为 0.014 元/kWh。

4.3 外部环境成本计算

风电场环境价值的计量指相对于装机容量为 50MW, 年正常发电时间为 7760 小时的等年发电量火电厂环境污染物损失的价值(全国煤炭平均价格取 450 元/吨)。

本算例中年煤炭消耗量为 135800 吨, 节能价值为 0.157500 元/kWh; 以同样方式, 可计算得到 SO₂、NO_x、CO₂、CO、TSP、粉煤灰、炉渣的年排放量和环境价值。

计及节能和减排价值, 该风电场的环境外部成本价值为 0.253 元/kWh。

4.4 成本计量结果分析

从以上计算结果可知, 仅从风电场的初期建设投资角度来看, 单位风电投资约高达 0.735 元/kWh, 较高的成本难以同常规能源相竞争。但是, 考虑了环境外部成本以后, 相较于传统的火力发电可节约社会总成本 0.253 元/kWh, 海上风电成本高的劣势将被削减, 海上风电的经济性逐渐凸显。

江苏省作为华东经济中心,同时也是电力负荷中心。根据江苏省统计局的数据显示,2015年江苏省用电高峰负荷达8900万千瓦,全年全社会用电量达465亿kWh^[12]。假设其中10%的电量由海上风电场承担,可节省煤炭1627.5万吨,价值73.23亿元,减少的污染物环境价值44.38亿元。计及节能和减排两个方面,可节约社会总成本逾117亿元。

从长远角度看,随着海上发电技术的快速发展、风电场规模的逐渐扩大和风电场管理制度的进一步完善,海上风电的运行价值也会不断提高,风电企业利润也会逐渐增加。

5 结论

我国经济快速发展依赖于电力能源发展,如果依然保持以煤炭为主的发电体系,将给环境带来巨大压力。在低碳背景下,发展风电技术可以忽略对环境的污染,节能减排降低环境成本。通过计算分析,从长远角度来看该海上风电在考虑环境成本时具有明显的经济性。为了促进海上风电产业进一步发展,建议企业和政府可以参考如下措施建议。

5.1 国家政策导向鼓励风电投资发展

- (1) 制定合理的风电上网电价,弥补风电场初期投资的高成本,从而提高项目收益水平,增加海上风电市场竞争力;
- (2) 风电场每发1度电可以获得额外补贴(节能减排),例如证书补贴制等;
- (3) 完善合理的税务和促进政策,减免生产税和降低投资税,以此降低资本回收率。

5.2 政府职能部门保障风电建设运营

- (1) 各职能部门统筹协调,简化审批流程和管理程序,帮助解决风电企业落实项目建设期间遇到的问题;
- (2) 创新海上风电管理制度,如风电审核采取一站式服务方法,提高办事效率,以减少人力和物力成本;
- (3) 加强海上风电自主研发能力,全方位开展海上风电示范项目,制定海上风电标准化建设体系,加强引导调控,调整产业结构。

5.3 风电企业加强创新合作提升竞争力

- (1) 风电投资初期要积极做好海上风电项目规划,拟写合理的项目建设方案以节省不必要的开销;
- (2) 风电建设期要积极落实电力消纳市场,确保海上风电场工程建设和配套电网同步建设建成投产;
- (3) 风电企业加强自主创新,相互之间加强合作,共享技术进步成果和建设管理经验等措施以节约成本。

参考文献:

[1] FENG Y, LIN H, HO S L, et al. Overview of Wind Power Generation in China: Status and Development [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 847-858.

-
- [2]GREEN R,VASILAKOS N. The economics of off shore wind[J]. Energy Policy,2011(39):496-502.
- [3]LADENBURG J,LUTZEYER S. The economics of visual disamenity reductions of offshore wind farms-Review and suggestions from an emerging field [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2012,16(16):6793-6802.
- [4]CASTROSANTOS L,DIAZCASAS V. Cost comparison of three floating offshore wind platforms [J]. Journal of Coastal Research,2015,315: 1217-1221.
- [5]黄琳,黄静波.海上风电场建设成本及风险分析[J].水力发电,2012,38(12):81-83.
- [6]陈皓勇,谭科,席松涛,等.海上风电的经营期成本计算模型[J].电力系统自动化,2014,38(13):135-139.
- [7]黄玲玲,曹家麟,张开华,等.海上风电机组运行维护现状研究与展望[J].中国电机工程学报,2016,36(3):729-737.
- [8]李俊峰,蔡丰波,乔黎明,等.2014中国风电发展报告[R].中国循环经济协会可再生能源专业委员会:2014.
- [9]刘秋华,陈超,董丹丹.江苏省海上风电资源利用现状分析[J].南京工程学院学报(社会科学版),2015(3):55-61.
- [10]IEC 61400-21: Wind Turbine Generator Systems. Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines[S]. 2001.
- [11]方言.新建风力发电项目成本分析与竞价机制研究[D].华北电力大学,2013.
- [12]江苏省统计局.2015 年全省全社会用电量指标[EB/OL].[2017-03-21].http://www.jssb.gov.cn/tjxxgk/tjsj/jdsj/2014_2829/2014ydsj/ydl/201601/t20160129_276789.html.