

基于电力现货市场仿真的海上风电接入对广东省电力行业碳减排影响评估

宋怡, 林晨韵, 梁高琪*, 赵俊华

(香港中文大学(深圳), 广东省 深圳市 518172)

Assessing the Impacts of Large-scale Offshore Wind Power Integration on Carbon Emission Reduction in Guangdong Province Based on Electricity Spot Market Simulation

SONG Yi, LIN Chenyun, LIANG Gaoqi*, ZHAO Junhua

(The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen 518172, Guangdong Province, China)

Abstract: Decarbonizing the current power industry is essential for mitigating global warming. Based on Security-Constrained Economic Dispatch, the simplified power system model is established to evaluate the impacts of large-scale offshore wind power on carbon emission of Guangdong Province from 2019 to 2028. The simulation results show that under the scenario of offshore wind power, both the total carbon emissions and carbon emission intensity of Guangdong Province will drop; the emission reduction contribution of offshore wind power will increase every year, up to 20%. The total carbon emissions and carbon emission intensity of Class A units will remain unchanged. The relevant data of Class B units presents trend similar to that of Guangdong Province. For nodes connected with offshore wind farms, the carbon emission intensity of different nodes decreases, whereas for nodes not connected with offshore wind farms, the carbon emission intensity may increase, remain unchanged, or decrease.

Keywords: offshore wind power; carbon emission reduction; carbon emission factor; power system; electricity spot market; market simulation

摘要: 为应对全球气候变化, 电力行业低碳化能源转型迫在眉睫。针对2019—2028年广东省的能源规划, 搭建广东省电力系统简化模型, 依据安全约束经济调度原理仿真电力现货市场, 评估大规模海上风电的接入对广东省电力行业碳排放的影响。仿真结果表明, 按广东省海上风电发展规划接入海上风电后: 电力行业总碳排放量和系统碳排放强度均有不同

程度的降低; 海上风电减排贡献百分比逐年提升, 最高可达20%; A类机组碳排放量和碳排放强度基本不变; B类机组相关碳排放数据变化趋势与广东省基本一致; 对于接入海上风电场的节点, 少数节点在有海上风电时碳排放强度明显减小; 对于未接入海上风电场的节点, 在有海上风电情况下其碳排放强度增加、不变、减少都可能出现。

关键词: 海上风电; 碳减排; 碳排放因子; 电力系统; 电力现货市场; 市场仿真

0 引言

气候变化是近年来全球致力解决的热点问题之一, 主要原因在于人类活动所产生的温室气体已经逐渐威胁到地球的自然环境, 并给人类社会带来巨大考验。气候变化所导致的诸如海平面上升、冰盖融化、极端天气、干旱等已成为全球性影响。联合国在《2019年全球气候状况声明》中指出, 2019年是有记录以来温度第二高的年份, 平均温度比工业化前高出1.1℃, 且温室气体浓度持续升高。温室气体主要包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟化碳和六氟化硫。其中二氧化碳对温室气体排放的贡献率最高, 2018年全球二氧化碳浓度约为0.040 78%, 是工业化前水平的147%, 占温室气体总排放量的80%以上^[1]。根据Global Carbon Atlas汇总的碳排放数据, 2018年全球碳排放总量为36 573 Mt, 中国为碳排放量最多的国家, 共排放10 065 Mt, 美国(5416 Mt)、印度(2654 Mt)分列第二、第三位。中国全年人均碳排放量达到7 t, 排名第49位^[2]。主观减少碳排放是缓

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91746118)。

Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (91746118).

解气候变化的重要举措。基于联合国气候变化框架公约, 1997年84个国家签署通过《京都议定书》, 该协议以稳定温室气体含量为目标, 规定发达国家从2005年开始承担减少碳排放量的义务, 发展中国家从2012年开始履行减排合约^[3]。作为继《京都议定书》之后的第二份全球减排协定, 《巴黎协定》确立了一个相对灵活的气候应对国际体系, 从2016年至今全球已有195个缔约方签署, 该协定鼓励各方以“自主贡献”的形式参与, 加速和加强可持续低碳未来所需的行动和投资, 确定到本世纪末将全球平均温升保持在相对于工业化前2℃以内^[4]。

电力行业是碳排放的最主要来源, 根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)公布的数据, 2018年全球能源相关碳排放量高达33 Gt, 发达经济体电力行业的碳排放量占能源相关总碳排放量的36%^[5]。为解决碳排放日益增加的问题, 构建可持续性发展能源体系, 全球电力行业加快向清洁低碳能源转型迫在眉睫。中国作为以传统化石能源发电为主导的国家, 已积极开展低碳能源战略, 重点解决经济发展与环境保护之间的矛盾。中国国务院在《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》(国办发〔2014〕31号)中指出, 要“加快构建清洁、高效、安全、可持续的现代能源体系。坚持绿色低碳战略, 着力优化能源结构, 把发展清洁低碳能源作为调整能源结构的主攻方向”^[6]。

近年来, 中国电力系统的低碳化持续进行, 发电企业作为减排主力军, 现阶段主要采用以下4种方式: 工程减排、管理减排、市场减排和结构减排。工程减排是以提高机组能效或采用捕集与封存技术作为主要方法。管理减排是指采用管理手段减少工厂用电并促进发电权交易等。市场减排主要通过促进碳排放市场中的交易, 如现如今正在进行的清洁发展机制(clean development mechanism)^[7]。结构减排以提高可再生能源发电上网, 优化电力结构为主, 要求在保障电力系统稳定性的前提下, 优先调度可再生和清洁发电资源, 如水电、核电、光伏以及风电。目前结构减排在4种方式中较为有效。据REN21统计, 到2030年, 中国可再生能源发电量占总发电量的目标为35%, 美国加利福尼亚州为50%, 德国达到65%^[8]。风电作为能源转型的重要组成部分, 各国政府正在努力加强风电行业管理和完善政策体系, 其中海上风电为重点发展对象。2019年全球风电累计装机容量(海上和陆上)超过651 GW, 比2018年增长10%。其中, 陆上风电新增装机容量, 中国以23.76 GW位居首位,

其次是美国(9.14 GW)和印度(2.34 GW)^[9], 2019年中国海上风电新增装机容量2.39 GW。根据中国《风电发展“十三五”规划》, 预计到2020年, 中国风电年发电量将占全国总发电量的6%^[10]。

相较于其他新能源, 风电成本较低, 技术成熟, 是目前应用规模最大的新能源发电方式, 其中, 海上风电凭借风机利用率高、市场消纳空间大、风能质量好等优点成为建设清洁低碳能源体系的重要途径。一方面, 中国正处于能源转型的关键时期, 随着风电产业的市场竞争力进一步增强, 发展海上风电可以提高清洁能源供应, 推动能源结构持续优化。另一方面, 风力、光伏等可再生能源在发电过程中可近似为无碳排放, 因此, 采用海上风电来逐步替代化石能源, 可以有效应对气候变化、保护生态环境^[11]。

风电对减少电力行业碳排放的作用在许多研究中都得到了验证。文献[12]量化了2006—2017年印度地区因风电并网而减少的总碳排放量; 文献[13]基于最优潮流模型和蒙特卡洛仿真, 研究风电的预测误差对电力系统碳排放的影响; 文献[14]则评估了在不同风电出力功率的情景下, 碳排放配额和不同类型机组发电利润之间的关系; 文献[15-16]结合生命周期评价(life cycle assessment), 评估了风电项目的实际碳减排效果和潜力; 为了增加风电的减排效益, 文献[17-20]均采用协同调度的方式, 其中, 文献[17-18]选取风电-储能联合运行为研究对象, 文献[19]定量分析电动汽车充电与风电协同调度的碳减排效益, 文献[20]选用碳捕集火电机组来克服风电的波动对电力系统的不利影响; 此外, 文献[21]验证了引入碳捕集电厂可以减少接入风电场的电力系统碳排放; 就海上风电而言, 文献[22-25]肯定了海上风电在不同国家能源转型和碳减排中的重要作用, 但并未对其具体减排效益进行量化。

针对区域电力行业的碳排放计算, 基于政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出的碳排放因子法^[26], 文献[12,27-28]计算不同地区电力或能源系统的碳排放数据, 其中, 文献[27-28]发现中国安徽省和重庆市能源相关碳排放量逐年上升, 碳排放强度则呈下降趋势; 文献[29-30]提出了一种电力系统碳排放流分析法, 从消费侧来衡量电力系统的碳排放, 被广泛应用, 例如文献[31]根据此方法计算中国各省化石能源碳排放, 文献[32]研究电网互联的碳减排效益; 为了评估碳排放的影响因素, 文献[33-34]基于对数平均权重分解法^[35],

比较能源效率、经济规模、电源结构等因素对电力行业碳排放的作用；文献[36-38]分别以英国、罗马尼亚和中国为例，指出提高清洁能源比例是电力行业低碳化的重要途径。

综上所述，目前有关风电和碳减排的研究主要集中在如何增加风电的减排效益，且基本通过简化的小型电力系统模型来验证，但考虑到实际大型电力系统的运行特性、区域阻塞、政策细节等因素，这些方法是否适用于实际大型电力系统仍有待评估。针对电力行业的碳排放计算，相关研究主要从宏观层面对省市级及以上单位进行分析，但并未将市场竞争考虑在内。由于电力现货市场的运行可能会大幅度影响不同能源的实际并网电量，从而影响电力系统的碳排放，因此相关结论是否适用于中国部分已经运行电力市场的地区仍需进一步研究。本文基于安全约束经济调度（security-constrained economic dispatch, SCED）原理，结合不同能源类型的历史数据和投资规划，仿真广东省电力现货市场，评估2019—2028年大规模海上风电的接入对广东省电力行业碳排放的影响。

1 广东省电力系统及预测数据

1.1 基本情况

截至2019年12月底，广东省电网规模位居全国第一，共有220 kV及以上输电线路41 614 km（含电缆），通过“八交九直”高压输电线路与中西部电网相联，受西电最大能力3944万kW^[39]，广东电网统调装机容量1.26亿kW（煤电、气电、水电、核电、风电占比分别为48.2%、17.5%、7.4%、12.8%、3.1%），同比增长8.5%，全省发受电量6 581.6亿kWh，同比增长6.5%^[39]。一方面，广东省及其所联网用电量，电源及负荷分布不均匀，供能不足问题持续存在；另一方面，广东省能源结构仍以煤、油等化石能源为主，面临巨大的资源和环境压力。因此，发展海上风电既可以缓解南方区域的用电压力，又可以推动广东省能源结构优化转型。同时，南方（以广东起步）的电力市场改革和宏观政策环境也为海上风电产业提供了良好的发展机遇和广阔的市场空间^[40]。

1.2 广东省全社会用电量及装机容量预测

针对系统负荷，本文以2009—2018年广东省全社会用电量为基础，运用统计软件SPSS和Python中sklearn模块的线性回归模型对2019—2028年的广东省

全社会用电量进行预测，如表1所示。

表 1 2019—2028年广东省全社会用电量预测

Table 1 Forecast of total electricity consumption in Guangdong Province from 2019 to 2028

亿kWh					
年份	2019	2020	2021	2022	2023
全社会用电量	6539	6819	7100	7380	7660
年份	2024	2025	2026	2027	2028
全社会用电量	7941	8221	8501	8782	9062

广东省现货市场目前采用“部分机组计划调度+部分机组全电量调度”的模式。其中，按计划调度发电的机组划分为A类，按全电量调度参与市场竞争的机组为B类。A类机组包含水电、核电以及部分火电，其余大部分火电机组为B类机组。本文中，新增机组包括火电、海上风电、核电和水电机组，未考虑太阳能及其他类型机组，其中，火电和风电机组归类为B类机组参与市场竞争，核电和水电机组归类为A类机组提前出清。以2009—2018年广东省各类型机组装机容量为基础，对2019—2028年以上4种类型机组的装机容量进行预测，并结合政府公布的能源规划加以调整，最终得到结果如表2所示。

表 2 2019—2028年广东省各类型机组装机容量预测

Table 2 Forecast of installed capacity in Guangdong Province from 2019 to 2028

万kW					
年份	总装机容量	火电	水电	核电	海上风电
2019	11 572	8743	1291	1411	127
2020	12 738	9595	1298	1600	245
2021	14 044	10 101	1306	1637	1000
2022	14 515	10 221	1315	1749	1230
2023	15 224	10 589	1323	1862	1450
2024	15 945	10 970	1331	1974	1670
2025	16 711	11 365	1339	2087	1920
2026	17 461	11 774	1347	2200	2140
2027	18 255	12 198	1355	2312	2390
2028	19 035	12 637	1363	2425	2610

新增火电机组接入节点分散在广东省内各市，如广州、东莞、汕尾、湛江等。新增风电机组接入节点集中于阳江、珠海、湛江、汕头等地。新增核电厂集

中于阳江、江门、汕尾等地。新增水电站集中于深圳和阳江。

1.3 海上风电发展规划

中国海岸线辽阔，海上风能资源规模巨大，近海（不包括台湾省）50 m等深线及浅海域10 m高度风能储量约为9.4亿kW^[41]。虽在海上风电开发利用方面起步较晚，但依靠丰富的海上风能资源，近年来中国海上风电产业发展迅速，具有极大潜力。预计2020年全国海上风电开工建设规模达到1000万kW，重点推动江苏、浙江、福建、广东等省的海上风电建设，到2020年四省海上风电开工建设规模均达到百万kW以上级别^[10]。

中国南方电网覆盖广东、广西、云南、贵州、海南五省（区），并与香港、澳门地区以及东南亚国家的电网相联。2019年，南方五省区全社会用电量11 338亿kWh，同比增长7.3%。为响应国家能源发展战略要求，南网区域广东、海南、广西三省区均制定了海上风电发展目标，其中，海南争取投产东方近海风电装机共35万kW，同时开展近海风电前期研究和海岛风电利用研究^[42]，广西着力优化能源结构，重点推进风力资源富集、消纳条件好的地区风电开发，探索北部湾地区海上风电开发^[43]。

根据《广东省海上风电发展规划（2017—2030）（编修）》，全省规划海上风电场址23个，总装机容量6685万kW，包括：近海浅水区（35 m水深以内）海上风电场址15个，装机容量985万kW，其中粤东海域415万kW，珠三角海域150万kW，粤西海域420万kW；近海深水区（35~50 m水深）规划海上风电场址8个，装机容量5700万kW，分布在粤东、粤西海域（如表3所示）^[40]。到2020年底，开工建设海上风电装机容量1200万kW以上，其中建成投产200万kW以上；到2030年底，建成投产约3000万kW^[40]。

表3 2017—2030年广东省海上风电布局规划

Table 3 Offshore wind planning in Guangdong Province from 2017 to 2030

所属海域	所属市	海上风电场场址	装机容量 /万kW
		洋东海上风电场	25
粤东近海浅水区	汕头市	勒门海上风电场	70
		海门海上风电场	90

续表

所属海域	所属市	海上风电场场址	装机容量 /万kW
粤东近海浅水区	揭阳市	靖海海上风电场	15
		神泉海海上风电场	75
	汕尾市	后湖海上风电场	50
		甲子海上风电场	90
珠三角近海浅水区	惠州市	港口海上风电场	100
	珠海市	桂山海上风电场	20
		金湾海上风电场	30
	阳江市	南鹏岛海上风电场	70
沙扒海上风电场		230	
粤西近海浅水区		外罗海海上风电场	40
	湛江市	新寮海上风电场	20
		徐闻海上风电场	60
粤东近海深水区		（场址一、二、三、四、五、六）	5000
粤西近海深水区		（场址一、二）	700
合计			6685

2 现货市场仿真原理及参数

为了评估大规模海上风电对广东省碳减排的影响，本文以历史数据和以往经验为基础，搭建广东省电力现货市场简化模型，依据SCED对2019—2028年的现货市场进行出清仿真，并对仿真结果进行分析。具体地，输入系统负荷、西受电量、A类和B类机组4个变量，分别仿真春、夏、秋、冬各季节典型日在接入海上风电和未接入海上风电两种情况下的A、B类机组出力，依据不同机组碳排放系数，计算并分析系统及各节点碳排放量和碳排放强度。图1表示电力现货市场的仿真流程。

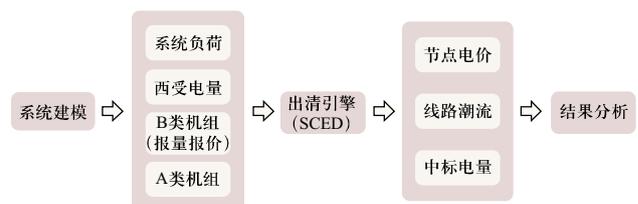


图1 市场仿真流程

Fig. 1 Market simulation process

2.1 现货市场出清模型

2.1.1 SCED

SCED是电力现货市场运行的一种调度模型，指在一定约束条件下（发电机功率约束、系统安全约束、节点电压约束、线路潮流约束等）以全系统运行成本最小为目标，输出满足预计负荷的发电结果，包括各机组发电量、各节点边际电价、全系统潮流等^[44]。SCED的目标函数为

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n C_i [P_{Gi}(t)] \quad (1)$$

式中： F 为系统运行成本； T 为调度时间段数； n 为发电机组个数； $P_{Gi}(t)$ 为机组 i 在时间 t 的有功功率； $C_i [P_{Gi}(t)]$ 为机组 i 在时间 t 的运行成本函数，其公式为

$$C_i [P_{Gi}(t)] = a_i P_{Gi}^2(t) + b_i P_{Gi}(t) + c_i \quad (2)$$

式中： a_i 、 b_i 、 c_i 分别为二次函数的3个系数。

各机组的发电功率约束可表示为

$$P_{Gi\min} \leq P_{Gi}(t) \leq P_{Gi\max} \quad (3)$$

$$Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi}(t) \leq Q_{Gi\max} \quad (4)$$

式中： $P_{Gi\min}$ 和 $P_{Gi\max}$ 分别为机组 i 的最小及最大有功功率约束； $Q_{Gi\min}$ 和 $Q_{Gi\max}$ 分别为机组 i 的最小及最大无功功率约束； $Q_{Gi}(t)$ 为机组 i 在时间 t 的实际无功功率。

各节点供给平衡约束条件为

$$P_{Gi}(t) - P_{Di}(t) - V_i(t) \sum_{j=1}^n (G_{ij} V_j(t) \cos \theta_{ij} + B_{ij} V_j(t) \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$Q_{Gi}(t) - Q_{Di}(t) - V_i(t) \sum_{j=1}^n (G_{ij} V_j(t) \sin \theta_{ij} - B_{ij} V_j(t) \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

式中： $P_{Di}(t)$ 和 $Q_{Di}(t)$ 分别为节点 i 在时间 t 的有功负荷和无功负荷； G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 间的电导、电纳、相位角； $V_i(t)$ 和 $V_j(t)$ 分别为节点 i 和节点 j 在时间 t 的电压。

各节点的电压约束条件为

$$V_{i\min} \leq V_i(t) \leq V_{i\max} \quad (7)$$

式中： $V_{i\min}$ 和 $V_{i\max}$ 分别为节点 i 可承受的电压下限和上限。

输电线路的潮流约束为

$$P_{ij\min} \leq P_{ij}(t) \leq P_{ij\max} \quad (8)$$

$$Q_{ij\min} \leq Q_{ij}(t) \leq Q_{ij\max} \quad (9)$$

式中： $P_{ij\min}$ 和 $P_{ij\max}$ 分别为节点 i 和节点 j 间输电线路潮流有功功率的下限和上限； $Q_{ij\min}$ 和 $Q_{ij\max}$ 分别为节点 i 和节点 j 间输电线路潮流无功功率的下限和上限； $P_{ij}(t)$

和 $Q_{ij}(t)$ 为节点 i 和节点 j 间输电线路的实际潮流有功功率和无功功率。

目前，中国南方（以广东起步）区域的电力市场可分为电力批发市场和电力零售市场。电力批发市场包括电能量市场和辅助服务市场。电能量市场包括基于差价合约的日以上周期的中长期电能量市场和全电量竞价的日前、实时现货电能量市场。电力零售市场在近阶段通过电力销售公司与用户之间的电力交易协议来实施完成^[45]。现阶段，现货交易在日前市场和实时现货电能量市场中进行。在日前交易中，B类机组全电量申报分时段报价信息，以社会福利最大化为目标通过SCED进行集中优化出清，得到分时各机组发电量以及各节点的电价。在实时交易中，以日前交易结果为基础，运用SCED以发电机组成本最小为目标进行超短期优化出清^[45]。

2.1.2 输入变量及参数

输入的4个变量分别为系统负荷、西受电量、A类和B类机组。针对系统负荷，本文采用表1所预测系统负荷，依据历史数据按比例分配到各节点。西受电量一般设为系统总负荷的三分之一，并依据历史数据将总输送电量按比例分配到各输电线路。针对A类和B类机组，新增机组装机容量参考表2所预测数据。考虑到风电机组的短期边际成本基本为零，且通过分析国外现货市场中风电场的竞价数据可以发现，风电场在现货市场中的理性报价策略为通过报地板价增大现货交易量。因此，各风电场报价设为地板价（假定地板价为150元/MWh，天花板价为1000元/MWh），报量为该风电场的总输出功率。火电机组的报量报价参考接入同一节点的原火电机组的报量报价。

2.2 海上风电出力模型和参数

由于风电机组需要上报电量参与市场竞争，本文基于所选风机机型和相关环境参数，计算出单台机组每个季节每日发电量。根据单台机组的发电量与各海上风电场规划装机容量，得到每个风电场每个季节每日总发电量。

本文采取的数据基于规划中海上风电场所在地区日24 h风速平均值。风电机组选取明阳智能MySe5.5-155-IB，是中广核阳江南鹏岛40万kW海上项目所用风机。该机型采用半直驱技术，叶片长76.6 m，切入风速为3 m/s，切出风速为25 m/s，额定风速为10.5 m/s，额定功率为5.5 MW。该机型单台机组的输出功率为

$$G = G_r \eta_1 \eta_2 \quad (10)$$

风轮的输出功率为

$$G_i = 0.5\rho v^3 S C_p \quad (11)$$

式中: G 为单台机组的输出功率; G_i 为风轮的输出功率; η_1 为齿轮箱与发电机效率; η_2 为变频器效率; ρ 为空气密度; v 为风速; S 为扫风面积; C_p 为贝兹系数。

2.3 碳排放数据计算

衡量系统或机组的碳排放强度时, 本文采用IPCC提出的排放因子法来核算碳排放量^[26]。发电机组的碳排放因子 (t/MWh), 即碳排放系数, 指机组每发一单位 (MWh) 电所产生的碳排放量 (t), 该系数与发电机组类型有关。本文中风电、核电、水电机组的碳排放系数均设置为0, 火电机组的碳排放系数根据火电机组类型来设定, 取值0.6~1.2 t/MWh。

各机组碳排放量的计算方法为

$$M_i = R_i \cdot W_i \quad (12)$$

式中: M_i 为机组*i*的碳排放量, t; R_i 为机组*i*的碳排放系数, t/MWh; W_i 为机组*i*的出力, MWh。

系统碳排放强度*E*为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (13)$$

式中: n 为系统的发电机组数量。

为了对碳排放在空间尺度上进行细化, 本文还计算了节点碳排放强度。不同于以往文献^[46-48]中采用节点碳排放量关于负荷的导数来衡量碳排放对负荷变化的反应程度, 本文通过实际节点碳排放量除以总出力来计算节点碳排放强度。节点*j*的碳排放强度*E_j*为

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} M_i}{\sum_{i=1}^{n_j} W_i} \quad (14)$$

式中: n_j 为节点*j*接入的发电机组数量。

在仿真出清2019—2028年各季节有无海上风电两种情况下的电力现货市场后, 得到每个季节典型日24 h的A、B类机组出力, 根据不同机组的碳排放系数, 计算每种情形下系统碳排放强度和各节点碳排放强度。

3 结果分析

3.1 系统碳排放强度

仿真系统每15 min出清一次, 得到A类、B类各机组出力。根据2.3节的计算公式得到系统总碳排放量和碳排放强度。由于A类机组按计划调度提前出清, 而包含海上风电机组的B类机组按全电量竞价参与市场

竞争, 两类机组在海上风电接入后碳排放的变化趋势不同, 故本文除了以广东省全省为研究对象, 还分别考虑A类和B类机组两种情况, 分析海上风电的接入对系统碳减排的影响。

在有海上风电情况下, 广东省电力系统总碳排放量及碳排放强度变化明显。图2表示广东省2019—2028系统总碳排放量、系统碳排放强度、海上风电减排贡献百分比、中标电量占比及装机容量占比, 一小格表示一年春夏秋冬四季。

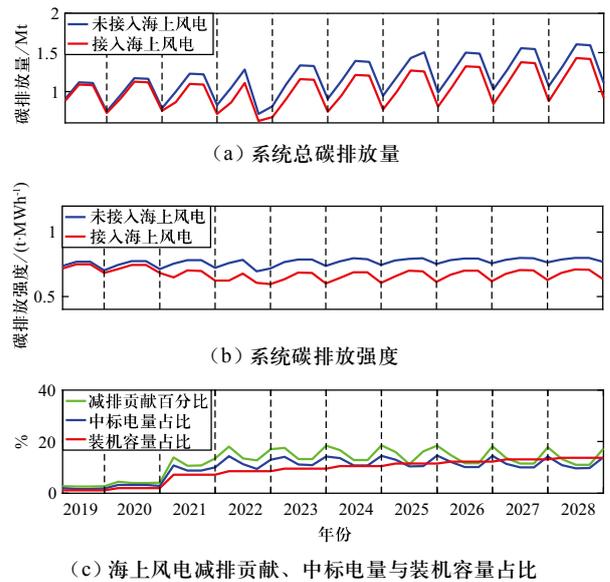


图2 2019—2028年广东省碳排放与海上风电仿真结果
Fig. 2 Simulation of carbon emission and offshore wind power in Guangdong Province from 2019 to 2028

从图2所示仿真结果可以得出:

1) 在无海上风电情况下, 广东省全省电力行业系统总碳排放量逐年增加。接入海上风电后, 系统总碳排放量降低, 且随着海上风电装机容量增加, 其减排贡献百分比呈上升趋势, 自2021年起基本超过10%, 最高可达20%。这是因为风电机组优先出清, 且碳排放系数为0, 所以会降低系统总碳排放量。

2) 未接入海上风电时, 广东省系统碳排放强度基本在0.7~0.8 t/MWh, 接入海上风电后, 系统碳排放强度降低, 基本在0.6~0.75 t/MWh。

3) 海上风电减排贡献百分比及其中标电量具有明显的季节特征, 同一年份春冬两季相应数值略大于夏秋两季。这是因为风电机组优先出清, 在夏秋两季负荷高的情况下, 需额外调动更多的火电机组, 因此海上风电中标电量占比降低, 且海上风电减排贡献百分比小于春冬两季。

3.1.1 A类机组

在有海上风电情况下，A类机组总碳排放量和系统碳排放强度均基本不变。图3表示2019—2028年A类机组系统碳排放强度，一小格表示一年春夏秋冬四季。

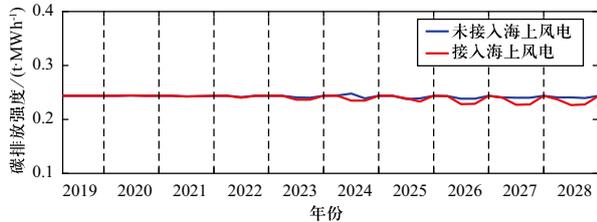


图3 2019—2028年A类机组碳排放强度

Fig. 3 Average carbon emission intensity of Class A units from 2019 to 2028

从图3所示仿真结果可以得出：

1) 不同年份不同季节，A类机组碳排放强度基本一致，取值0.23~0.25 t/MWh。因为火电机组上网电量仅占A类机组总发电量的25%左右，其余发电量由碳排放系数为0的核电和水电机组承担，因而A类机组碳排放强度远低于火电机组的碳排放强度。

2) 接入海上风电后，A类机组碳排放强度基本不变。因为A类机组新增仅考虑核电和水电，新增装机容量相对较小，系统发电功率和碳排放强度保持不变，同时，因为A类机组提前出清，所以基本不受有无海上风电的影响。

3.1.2 B类机组

在有海上风电情况下，B类机组总碳排放量和系统碳排放强度变化明显。图4表示2019—2028年B类机组总碳排放量和海上风电减排贡献百分比，一小格表示一年春夏秋冬四季；图5表示2019—2028年B类机组

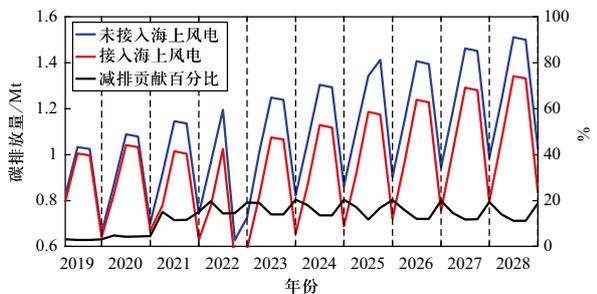


图4 2019—2028年B类机组总碳排放量和海上风电减排贡献百分比

Fig. 4 Total carbon emissions and emission reduction contribution of offshore wind power of Class B units from 2019 to 2028

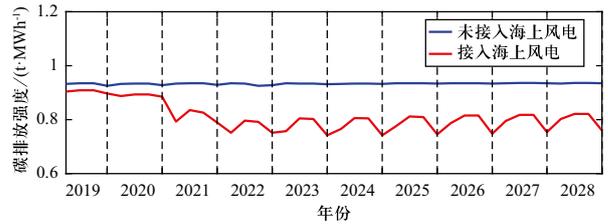


图5 2019—2028年B类机组碳排放强度

Fig. 5 Average carbon emission intensity of Class B units from 2019 to 2028

系统碳排放强度，一小格表示一年春夏秋冬四季。

从图4、图5所示仿真结果可以得出：

1) 有无海上风电情况下，B类机组总碳排放量逐年增加，且夏秋两季高于春冬两季，变化趋势与广东省系统总碳排放量一致（如图2所示）。因为海上风电为B类机组，在市场竞争中优先出清，且碳排放系数为0，所以会降低系统总碳排放量。

2) 未接入海上风电时，B类机组碳排放强度基本在0.92~0.94 t/MWh，接入海上风电后，碳排放强度明显降低，基本在0.75~0.9 t/MWh。

3.2 节点碳排放强度

由于海上风电机组全部为B类机组，研究节点碳排放强度时仅考虑B类机组。仿真系统中共有节点169个，接入海上风电场的节点12个。本文以是否接入海上风电场节点的碳排放强度为研究对象。

3.2.1 接入海上风电场的节点

在接入海上风电场的节点中，揭阳站和双寨_1站在加入海上风电后碳排放强度变化明显；其他节点在有海上风电情况下碳排放强度皆为0。从仿真结果看，由于各节点春冬、夏秋季节变化规律分别类似，此处以秋冬季节为代表，图6—图9分别表示揭阳站和双寨_1站2019—2028年秋冬季节碳排放强度，一小格表示一天24 h。

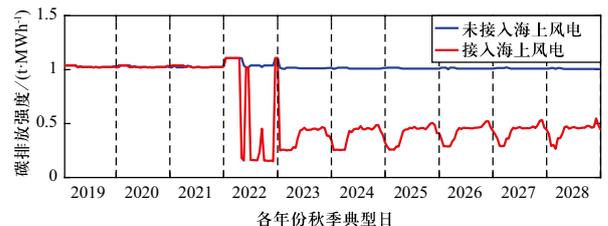


图6 2019—2028年秋季揭阳站排放强度

Fig. 6 Carbon emission intensity from 2019 to 2028 in autumn at Jieyang

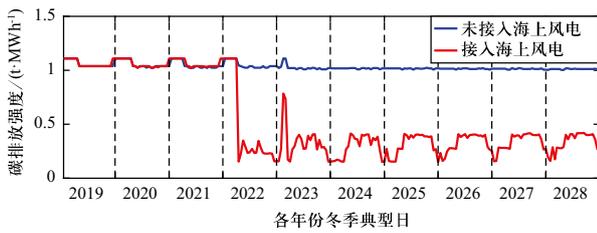


图7 2019—2028年冬季揭阳站碳排放强度

Fig. 7 Carbon emission intensity from 2019 to 2028 in winter at Jieyang

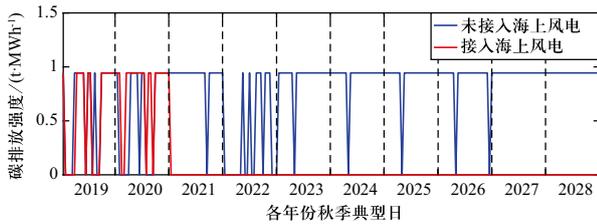


图8 2019—2028年秋季双寨_1站碳排放强度

Fig. 8 Carbon emission intensity from 2019 to 2028 in autumn at Shuangzhai_1

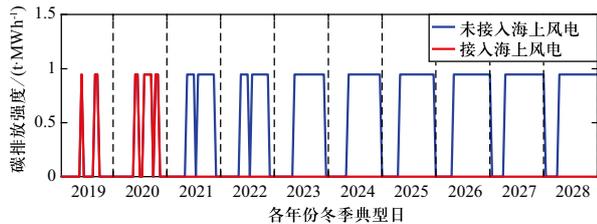


图9 2019—2028年冬季双寨_1站碳排放强度

Fig. 9 Carbon emission intensity from 2019 to 2028 in winter at Shuangzhai_1

从图6—图9所示仿真结果可以得出:

1) 一定年份接入海上风电后, 揭阳站和双寨_1站碳排放强度大幅度降低。双寨_1站于2021年接入海上风电场, 所以2020年及以前有无海上风电情况下碳排放强度相等; 揭阳站于2022年接入海上风电场, 所以2021年及以前有无海上风电情况下碳排放强度相等。

2) 多数节点如坝基头、平地、金鹤等, 在有海上风电情况下碳排放强度皆为0。这些节点之前未接入机组, 同时风电机组发电过程中无碳排放, 所以有无海上风电情况下碳排放强度皆为0。

3.2.2 未接入海上风电场的节点

在未接入海上风电场的节点中, 不同节点接入海上风电后变化情况不同。图10代表大多数无变化趋势节点的碳排放强度情况(以小漠厂站为例), 图11、图12代表少数出现变化趋势的节点(以中山站和海门站为例) 2019—2028年碳排放强度。由于变化规律无

明显季节特征, 此处选取春季为代表, 一小格表示一天24 h。

从仿真结果可以得出: 接入海上风电后, 多数节点碳排放强度无明显变化(如图10所示); 部分节点如中山、海门、琴江等, 无海上风电时有碳排放强度, 接入后部分时段减小, 部分时段增大(如图11、图12所示)。

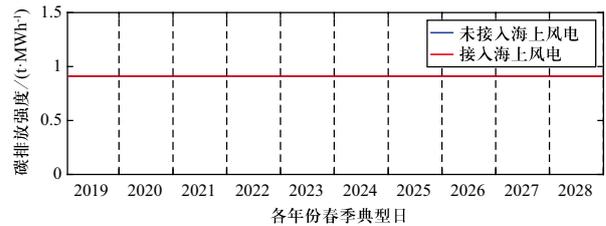


图10 2019—2028年春季小漠厂站碳排放强度

Fig. 10 Carbon emission intensity from 2019 to 2028 in spring at Xiaomochang

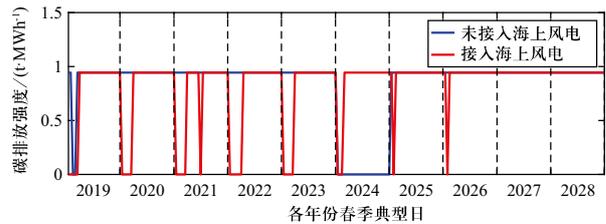


图11 2019—2028年春季中山站碳排放强度

Fig. 11 Carbon emission intensity from 2019 to 2028 in spring at Zhongshan

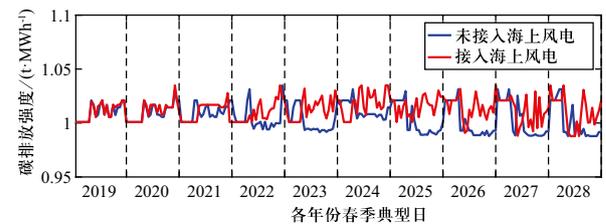


图12 2019—2028年春季海门站碳排放强度

Fig. 12 Carbon emission intensity from 2019 to 2028 in spring at Haimen

4 结论

全球碳排放持续增加, 由此带来的全球气候变化问题亟待解决, 电力系统作为碳排放最大来源, 实现电源结构低碳化具有重要的战略和现实意义。风电作为技术成熟的清洁能源成为近年来南网地区发展重点, 其中海上风电的开发与发展在未来十年将会是广东省能源转型的方向。本文基于广东省电力现货市场简化模型, 研究2019—2028年大规模海上风电的并网

对广东省碳排放的影响, 得出结论如下。

1) 2019—2028年广东省全省电力行业系统总碳排放量逐年增加。接入海上风电后, 系统总碳排放量降低, 且随着海上风电装机容量增加, 其减排贡献百分比呈上升趋势, 自2021年起基本超过10%, 最高可达20%。

2) 未接入海上风电时, 广东省系统碳排放强度约0.7~0.8 t/MWh, 接入海上风电后, 系统碳排放强度降低至0.6~0.75 t/MWh。

3) 海上风电的接入对A类机组在不同年份不同季节的总碳排放量和碳排放强度均无明显影响。针对B类机组, 接入海上风电后, 其碳排放量和碳排放强度变化趋势与广东省全省基本一致。

4) 对于接入海上风电的节点, 多数节点由于之前未接入发电机组, 因此碳排放强度在有无海上风电情况下皆为0, 少数节点接入海上风电后碳排放强度减小; 对于无海上风电接入的节点, 接入海上风电后碳排放强度增加、不变、减少都可能出现。

针对电力行业碳排放, 以往研究通常以年为时间单位、以省市级及以上范围为地区单位, 侧重于从整体层面对碳排放数据进行分析, 这种研究对多种因素进行了简化或忽略, 得到的数据对碳减排有一定的指导作用, 但无法与具体政策的落实联系起来。本文有关系统总碳排放的研究结果量化了海上风电的减排效益; 有关节点碳排放的研究结果可应用于低碳电力的规划和电力行业的低碳运行, 未来在建设海上风电和实现碳减排时, 可参考以上结论, 将碳排放与经济、气象、电厂选址、企业经营策略等结合起来制定区域性和分时性的减排政策。

海上风电对广东省实现碳减排具有重要意义, 为推动海上风电等可再生能源产业发展, 应完善相关政策措施、推动技术进步、提高可靠性, 从而实现向清洁低碳能源体系的转型。为实现总的碳减排目标, 应从时间和空间两个维度对碳排放数据进行细化, 以制定更有效的减排政策, 如促进碳排放权交易、逐步开放水电进入市场、鼓励用户侧节能减排等。

参考文献

- [1] 郝静, 宛霞. 《2019年全球气候状况声明》全方位聚焦气候变化影响[N]. 中国气象报, 2020-03-19(3).
- [2] GILFILLAN D, UNFCCC, BP. Fossil fuel emissions[DB/OL]. (2019) [2020]. <http://www.globalcarbonatlas.org/cn/CO2-emissions>.
- [3] United Nations Treaty Collection. A Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change [EB/OL]. (1997-12-11)[2020]. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-a&chapter=27&lang=en.
- [4] 侯方心, 张士宁, 赵子健等. 实现《巴黎协定》目标下的全球能源互联网情景展望分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 34-43.
HOU Fangxin, ZHANG Shining, ZHAO Zijian, et al. Global Energy Interconnection Scenario outlook and analysis in the context of achieving the Paris Agreement goals [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020,3(1):34-43 (in Chinese).
- [5] International Energy Agency. Global energy & CO₂ status report [R/OL]. (2019-03)[2020-03]. https://webstore.iea.org/download/direct/2461?filename=global_energy_and_co2_status_report_2018.pdf.
- [6] 国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014—2020年) [EB/OL]. (2014-06-07) [2020-03]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm.
- [7] 杜姣, 万玉秋, 张汉文. 清洁发展机制(CDM)实践及理论研究进展[J]. 环境保护科学, 2007, 33(4): 121-124.
DU Jiao, WAN Yuqiu, ZHANG Hanwen. Study progress in practice and theory of clean development mechanism(CDM) [J]. Environmental Protection Science, 2007, 33(4):121-124(in Chinese).
- [8] REN21. Renewables 2019 global status report[R/OL]. (2019-05)[2020-03]. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf.
- [9] Global Wind Energy Council. Global wind report 2019 [R/OL]. (2019-04)[2020-03]. <https://gwec.net/global-wind-report-2019>.
- [10] 国家能源局. 风电发展“十三五”规划[EB/OL]. (2016-11) [2020-03]. http://www.nea.gov.cn/135867633_14804706797341n.pdf.
- [11] 李翔宇, Gayan Abeynayake, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状 & 前景[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116-126.
LI Xiangyu, ABEYNAYAKE G, YAO Liangzhong, et al. Recent development and prospect of offshore wind power in Europe[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 116-126(in Chinese).
- [12] CHOUHAN B S, RAO K V S, KUMAR SAXENA B. Reduction in carbon dioxide emissions due to wind power generation in India[C]//2017 International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon). 17-19 Aug. 2017, Bangalore, India. IEEE, 2017: 257-264.
- [13] ANDERSON C L, CARDELL J B. The impact of wind energy on generator dispatch profiles and carbon dioxide production[C]//2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences. 4-7 Jan. 2012, Maui, HI, USA. IEEE, 2012: 2020-2026.
- [14] EBRAHIMI M, HASANPOUR S. Cournot equilibrium analysis for influence of wind power on Genco's profit considering carbon emission market[C]//2014 International

- Congress on Technology, Communication and Knowledge (ICTCK). 26-27 Nov. 2014, Mashhad, Iran. IEEE, 2014: 1-5.
- [15] 熊绍隆. 碳减排交易市场背景下的新能源风电企业价值评估[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- XIONG Shaolong. Value evaluation of new energy wind power enterprises under the background of marketization of carbon emission reduction trading[D]. Kunming: Yunnan University, 2019(in Chinese).
- [16] 吴凡. 基于LCA理论的风电项目碳减排效果分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- WU Fan. Research on carbon emission reduction benefit of wind power project based on LCA theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019(in Chinese).
- [17] 曾鸣, 杜楠, 刘晓立, 等. 风电与储能联合运行的碳减排效果[J]. 水电能源科学, 2013, 31(3): 232-235.
- ZENG Ming, DU Nan, LIU Xiaoli, et al. Carbon emissions effect of joint operation of wind power and energy storage[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(3): 232-235(in Chinese).
- [18] ZHANG Y, IU H H C, FERNANDO T, et al. Cooperative dispatch of BESS and wind power generation considering carbon emission limitation in Australia[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6): 1313-1323.
- [19] 于大洋, 黄海丽, 雷鸣等. 电动汽车充电与风电协同调度的碳减排效益分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 14-18.
- YU Dayang, HUANG Haili, LEI Ming, et al. CO₂ reduction benefit by coordinated dispatch of electric vehicle charging and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10):14-18(in Chinese).
- [20] 刘铠诚, 何桂雄, 孙洪, 等. 碳减排约束下风火发电商市场效益的协调优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 89-95.
- LIU Kaicheng, HE Guixiong, SUN Hong, et al. Coordinated optimization of market benefit of wind-fire power generator under carbon reduction constraint[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019,31(9):89-95(in Chinese).
- [21] YANG W H, LIU J P, LI J, et al. Optimization dispatch of wind power integrated power system under carbon market environment[C]//2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA). 23-24 Dec. 2013, Toronto, ON, Canada. IEEE, 2013: 375-378.
- [22] ESTEBAN M D, DIEZ J J, LÓPEZ J S, et al. Why offshore wind energy?[J]. Renewable Energy, 2011, 36(2): 444-450.
- [23] APPIOTT J, DHANJU A, CICIN-SAIN B. Encouraging renewable energy in the offshore environment[J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 90:58-64.
- [24] KOTA S, BAYNE S B, NIMMAGADDA S. Offshore wind energy: a comparative analysis of UK, USA and India[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 685-694.
- [25] DVORAK M J, ARCHER C L, JACOBSON M Z. California offshore wind energy potential[J]. Renewable Energy, 2010, 35(6): 1244-1254.
- [26] IPCC. Good practice guidance uncertainty management in national greenhouse gas inventories [R/OL]. (2000)[2020-03]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english>.
- [27] 张乐勤, 李荣富, 陈素平, 等. 安徽省1995年-2009年能源消费碳排放驱动因子分析及趋势预测——基于STIRPAT模型[J]. 资源科学, 2012, 34(2): 316-327.
- ZHANG Leqin, LI Rongfu, CHEN Suping, et al. Trend prediction and analysis of driving factors of carbon emissions from energy consumption during the period 1995-2009 in Anhui Province based on the STIRPAT model[J]. Resources Science, 2012, 34(2): 316-327(in Chinese).
- [28] 陈立泰, 张军委, 万丽娟. 重庆市碳排放量测度及影响因素分析: 1998~2008[J]. 探索, 2010(3): 106-110.
- [29] KANG C Q, ZHOU T R, CHEN Q X, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386-2394.
- [30] 周天睿, 康重庆. 基于碳排放流的配电系统低碳优化运行方法研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 241-247.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing. Research on low-carbon oriented optimal operation of distribution networks based on carbon emission flow theory[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 241-247(in Chinese).
- [31] 汪锋, 豆南南, 喻冬梅. 基于电力系统碳排放流的分省化石能源消费CO₂排放量测算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 105-112.
- WANG Feng, DOU Nannan, YU Dongmei. Measurement of provincial CO₂ emission from fossil energy consumption based on carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17):105-112(in Chinese).
- [32] 谭新, 刘昌义, 陈星, 等. 跨国电网互联情景下的碳流及碳减排效益研究——以非洲能源互联网为例[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 210-217.
- TAN Xin, LIU Changyi, CHEN Xing, et al. Carbon flow and emission reduction benefits based on grid interconnection: a case study on Africa energy interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3):210-217(in Chinese).
- [33] ANG B W, SU B. Carbon emission intensity in electricity production: a global analysis[J]. Energy Policy, 2016, 94: 56-63.
- [34] 王常凯, 谢宏佐. 中国电力碳排放动态特征及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 21-27.
- WANG Changkai, XIE Hongzuo. Analysis on dynamic characteristics and influencing factors of carbon emissions from electricity in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(4):21-27(in Chinese).
- [35] ANG B W, ZHANG F, CHOI K. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition[J]. Energy, 1998, 23(6): 489-495.

- [36] ZHENG Z H, LI F R. Assessment of carbon dioxide efficiencies for UK's electricity generation[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 24-28 July 2011, Detroit, MI, USA. IEEE, 2011: 1-5.
- [37] CIUPĂGEANU D A, LĂZĂROIU G, TÎRȘU M. Carbon dioxide emissions reduction by renewable energy employment in Romania[C]//2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). 11-13 Oct. 2017, Iasi, Romania. IEEE, 2017: 281-285.
- [38] LI A J, LI Z. Integrated analysis of carbon dioxide emissions mitigation through energy efficiency for coal-fired power industry in China[C]//2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications. 16-18 Jan. 2013, Hong Kong, China. IEEE, 2013: 891-893.
- [39] 广州电力交易中心. 广东电力市场2019年年度报告[R/OL].(2020-02)[2020-03]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200227/1048396.shtml>.
- [40] 广东省发展改革委. 广东省海上风电发展规划(2017—2030年)(修编)[EB/OL].(2018-04-11)[2020-03]. http://drc.gd.gov.cn/gkmlpt/content/1/1060/post_1060661.html#876.
- [41] 赵世明, 姜波, 徐辉奋, 等. 中国近海海洋风能资源开发利用现状与前景分析[J]. 海洋技术, 2010, 29(4): 117-121. ZHAO Shiming, JIANG Bo, XU Huifen, et al. Exploration and application of ocean wind energy resources in coastal sea of China [J]. Ocean Technology, 2010,29(4):117-121(in Chinese).
- [42] 海南省人民政府. 海南省“十三五”能源发展规划[EB/OL].(2017-03-20)[2020-04].<http://www.hainan.gov.cn/hainan/38957/201704/b24d78a4a79c41579e9eaacb8d6003a3.shtml>.
- [43] 广西壮族自治区人民政府. 广西能源发展“十三五”规划[EB/OL].(2016-09-05)[2020-04]. <http://d.gxzf.gov.cn/file/2017/05/17/1495010854.pdf>.
- [44] ZHU J. Security-constrained economic dispatch[M]// Optimization of power system operation. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2015: 145-214. DOI:10.1002/9781118887004.ch5.
- [45] 马辉, 陈雨果, 陈晔, 等. 南方(以广东起步)电力现货市场机制设计[J]. 南方电网技术, 2018, 12(12): 42-48.
- MA Hui, CHEN Yuguang, CHEN Ye, et al. Mechanism design of Southern China(starting from Guangdong Province)electric spot market[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(12): 42-48(in Chinese).
- [46] RUIZ P A, RUDKEVICH A. Analysis of marginal carbon intensities in constrained power networks[C]//2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences. 5-8 Jan. 2010, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2010: 1-9.
- [47] ZHOU Q, SUN T, DING T, et al. Application of carbon intensity in generation expansion planning: a comparative study[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. 26-30 July 2015, Denver, CO, USA. IEEE, 2015: 1-5.
- [48] VAN HORN K E, APOSTOLOPOULOU D. Assessing demand response resource locational impacts on system-wide carbon emissions reductions[C]//2012 North American Power Symposium (NAPS). 9-11 Sept. 2012, Champaign, IL, USA. IEEE, 2012: 1-6.

收稿日期: 2020-04-17; 修回日期: 2020-06-08。



宋怡

作者简介:

宋怡(1998),女,本科生,主要研究方向为可再生能源、电力市场, E-mail: yisong@link.cuhk.edu.cn。

林晨韵(1997),女,本科生,主要研究方向为电力市场仿真与分析、能源经济与政策, E-mail: chenyunlin@link.cuhk.edu.cn。

梁高琪(1989),女,博士后,主要研究方向为智能电网信息物理安全、电力市场、数据质量评估及提高。通信作者, E-mail: lianggaoqi@cuhk.edu.cn。

赵俊华(1980),男,副教授,主要研究方向为电力系统分析与计算、智能电网、电力市场、数据挖掘、人工智能, E-mail: zhaojunhua@cuhk.edu.cn。

(责任编辑 李锡)