

大规模风光储并网碳经济性评估

肖钧文^{1,2}, 黄辉先¹, 刘晓舟³

(1. 湘潭大学信息工程学院, 湘潭 411100; 2. 国网湖南省电力有限公司湘潭供电分公司, 湘潭 411100;

3. 中车株洲电机有限公司, 株洲 412001)

摘 要: 构建大规模风光储并网碳经济性评估模型。首先根据储能设备最小年均运行成本及缺电率确定风光储电源容量,在此基础上构建碳排放量评估模型;其次基于生命周期成本理论构建风光储成本评估模型,并结合动态碳交易价格构建碳经济效益评估模型;然后在输送等量电能的前提下分别构建风光储电源外送、火电外送和风光与火电打捆外送3种方案,以评估风光储并网的低碳经济性;最后通过实际算例分析验证评估方法的有效性、合理性。

关键词: 碳; 排放; 经济性; 模型; 风光储

中图分类号: TM9

文献标志码: A

0 引 言

随着温室效应的日益严峻和国家可持续发展战略的逐步实施,如何实现低碳经济的稳定高效发展已成为当今亟待解决的技术难题。低碳经济的引入将为电力行业的发展带来新的机遇与挑战^[1]。根据 IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)统计结果^[2],在 CO₂排放量上,电力行业已超越其他行业,成为名副其实的 CO₂排放大户。因此,电力系统低碳化发展明显有利于节能减排、可持续发展战略的实施^[3]。传统化石能源燃烧是电力工业 CO₂排放的主要来源,而风能发电、光伏发电相对传统火电具有碳排放强度小的优点^[4],因此在保障电力规划安全可靠的前提下,优先发展风光等新能源发电,有利于电力系统的低碳化发展。

风光作为新能源的重要组成部分,对风光储并网进行低碳经济性评估,有利于指导新能源的规划与建设。目前,国内对新能源低碳经济性评估主要从电源规划^[4-5]、新能源消纳能力^[6]和投资风险^[7]等方面进行。考虑到中国新能源基地与负荷中心呈逆向分布,通过特高压直流输电实现资源优化配置,并且目前研究尚未同时考虑以下几个方面的影响:一是碳交易价格波动^[7-8]对新能源低碳经济性评估的影响;二是特高压输电过程

中的 CO₂排放量;三是未构建系统的低碳经济性评估模型对其进行评估;四是风光储电源、输电线路的生命周期对其低碳经济性的影响^[9],使得目前新能源低碳经济性评估存在不足。

鉴于以上问题的客观存在,本文重新构建一种大规模风光储并网低碳经济性评估模型。该模型在满足负荷需求的前提下,根据生命周期成本理论,以最小储能设备年运行成本与缺电率为目标函数确定风光储电源容量,并以此为基础从风光储电源、输电线路和负荷3个方面出发,构建碳排放量评估模型;然后,以风光储年平均成本、年均发电成本和输电线路年均成本为指标构建成本评估模型,同时充分考虑碳交易价格波动,基于碳排放成本、电能效益、低碳效益贡献率因子和碳排放补偿时间等指标,建立以最小风光储并网成本和碳排放成本为目标函数的低碳经济性评估模型。最后,以风光储大规模外送、火电外送和风光、火电打捆外送3种方案作为算例验证评估模型的有效性。

1 碳排放评估模型

1.1 发电评估模型

风光储电源容量优化是提高其经济效益的重要途径

收稿日期: 2017-11-27

基金项目: 湖南省重点学科建设项目; 智能计算与信息处理教育部重点实验室建设项目; 湖南省教育厅重点项目(12A136)

通信作者: 黄辉先(1957—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事先进控制理论及应用、电力电子变流技术、工业复杂过程建模与控制等方面的研究。huanghx@xtu.edu.cn

径,通过风速、光照强度等因素确定风电机组、太阳电池的输出功率,建立以最小风光储年运行成本 C_{CP} 和负荷缺电概率 R_{LPSP} 为目标函数的风光储电源容量优化模型,以减少电源的装机容量。本文以蓄电池作为储能设备,从而建立风光储发电评估模型的目标函数:

$$\begin{cases} \min C_{CP} = 1/Y_{bat} [n_{b,p} P_{bat} + n_{b,c} C_{bat} + \\ q_{bat} (n_{b,p} P_{bat} + n_{b,c} C_{bat}) + Y_{bat} m_{bat} C_{bat}] \\ \min R_{LPSP} = \frac{\sum_{t=1}^{8760} S_{LPSP,t}}{8760} \end{cases} \quad (1)$$

式中, Y_{bat} ——蓄电池工作时间; $n_{b,p}$ ——蓄电池的功率单价; $n_{b,c}$ ——蓄电池的容量单价; C_{bat} ——蓄电池的额定容量; q_{bat} ——蓄电池的更换次数; P_{bat} ——蓄电池的额定功率; m_{bat} ——蓄电池的维护单价; $S_{LPSP,t}$ ——系统缺电标记符,当其满足式(2)时为 1,否则为 0。

$$P_C \geq (P_w + P_{PV} - P_{Load} - P_l) \quad (2)$$

式中, P_C ——电池容量、负荷功率; P_w ——风电机组输出功率; P_{PV} ——太阳电池输出功率; P_{Load} ——负荷功率; P_l ——输电线路损耗。

1.2 碳排放评估模型

中国能源与负荷呈逆向分布、输送距离远,采用特高压柔性直流输电可有效实现资源优化配置。通过对风光储电源、输电线路和负荷端进行全面调研,本文从风光储电源、输电线路和负荷 3 个方面构建碳排放评估模型。式(3)中的 3 项分别表示风光储电源、输电线路和负荷的碳排放量。

$$V_1 = \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i V_i + \rho_l L \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i V_i / \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i + \sum_{i \in \Omega_{style}} (P_i - P_j) V_{Load} \quad (3)$$

式中, V_1 ——输电线路单位电能损耗碳排放量; P_i ——节点 i 负荷功率; V_i ——单位发电量的碳排放量; Ω_{style} ——风光储系统节点集合; ρ_l ——输电线路单位输电长度的线损率; L ——输电线路长度; P_j ——第 j 条线路潮流; V_{Load} ——负荷消耗单位电能的碳排放量。

2 碳经济效益评估模型

2.1 风光储成本评估模型

为有效评估风光储并网的碳经济性,本文从风光储电源、输电线路 2 个方面构建风光储成本评估模型,从发电角度建立以风光储电源年运行成本 C_{CP} 、特高压

直流输电年运行成本 C_L 和单位发电成本 C_F 为指标的风光储并网成本评估模型。其中风光储电源年运行成本包括安装成本年平均费用^[10]和年均重置成本^[11]2 部分,因特高压柔性直流输电的运行维护成本所占比重较小,本文仅以年均建设成本作为特高压直流输电年运行成本,从而可得到风光储并网成本为:

$$C = C_{CP} + C_L + C_F = C_{TCP} \mu_{CRF} (\mu, Y_{Proj}) + C_{TREP} \mu_{SFF} (\mu, Y_{REP}) + \frac{(1+\mu)^{Y_{Line}} \mu}{(1+\mu)^{Y_{Line}} - 1} C_{Line} + \sum_{i \in \Omega_{style}} \left[I_{il} + \sum_{t=1}^{Y_{proj}} \frac{M_{il}}{(1+\mu)^t} \right] / \sum_{i=1}^{Y_{proj}} \frac{P_i}{(1+\mu)^i} \quad (4)$$

式中, C_{TCP} ——安装成本; μ_{CRF} ——资金回收系数; Y_{REP} ——元件重置周期; Y_{Proj} ——元件生命周期; C_{TREP} ——重置成本; μ_{SFF} ——偿债基金因子; μ ——折现率; Y_{Line} ——输电线路生命周期年限; C_{Line} ——输电线路建设成本; I_{il} ——第 i 年建设成本; M_{il} ——第 i 年运营成本。

2.2 碳经济效益评估模型

在对风光储电源并网的碳经济效益进行全面分析的基础上,本文从碳排放成本、电能效益、低碳效益贡献率因子和碳排放补偿时间 4 个方面构建了碳经济效益评估模型。其中碳排放成本 C_1 根据风电场、光伏电站与燃煤电厂的单位碳排放成本以及输电线路与负荷的碳排放量得到。

$$C_1 = V_1 \cdot c_l = \left[\sum_{i \in \Omega_{style}} P_i V_i + \rho_l L \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i V_i / \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i + \sum_{i \in \Omega_{style}} (P_i - P_j) V_{Load} \right] \cdot c_l \quad (5)$$

式中, c_l ——风电场、光伏电站与燃煤电厂的单位碳排放成本。

根据 3 种方案的碳排放成本可得到方案 1 相对于方案 2 和方案 3 所取得的碳排放效益 ΔE_1 。考虑到风光储并网会产生一定的碳排放成本,结合售电效益可提出考虑碳排放成本的电能效益指标。其电能效益为:

$$E_2 = P_{Load} (c_s + c_0) - C_1 - C \quad (6)$$

式中, c_s ——综合售电电价; c_0 ——政府补偿电价。

为了更好地评估风光储并网的碳经济效益,本文进一步提出低碳效益贡献率因子:

$$u_c = \frac{\Delta E_1}{\Delta E_1 + P_{Load} (c_s + c_0)} \quad (7)$$

基于工程经济学的投资回收期的概念提出碳排放

补偿时间,以评估碳排放成本补偿年建设成本所需的年限。

$$t_c = \frac{C}{C_1} = \frac{C_{CP} + C_L + C_F}{C_1} \quad (8)$$

在满足风光储目标函数的条件下,同时考虑负荷需求响应的碳经济效益评估指标体系,从而建立以最小风光储并网成本和碳排放成本为目标函数的碳经济效益评估模型,其目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} \min C = C_{CP} + C_L + C_F \\ \min C_1 = \left[\sum_{i \in \Omega_{style}} P_i V_i + \rho_l L \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i V_i / \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i + \sum_{i \in \Omega_{style}} (P_i - P_j) V_{Load} \right] \cdot C_t \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{wmin} \leq P_w \leq P_{wmax} \\ P_{PVmin} \leq P_{PV} \leq P_{PVmax} \\ P_{Cmin} \leq P_C \leq P_{Cmax} \\ \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i \leq S_{max} \\ \sum_{i \in \Omega_{style}} P_i \geq P_{Line} + P_{Load} \\ \min C_{bat} \\ \min R_{LPSP} \end{cases} \quad (10)$$

式中, P_{wmax} ——风电机组输出功率的上限; P_{wmin} ——风电机组输出功率的下限; P_{PVmax} ——太阳能电池输出功率的上限; P_{PVmin} ——太阳能电池输出功率的下限; P_{Cmax} ——电池容量的上限; P_{Cmin} ——电池容量的下限; S_{max} ——输电线路的最大输送容量。

2.3 碳经济效益评估流程

根据风光储电源的碳经济效益评估模型,本文拟定3种评估方案。方案1采用风光储电源优化的方式进行外送,方案2采用火电外送方式,方案3采用风光与火电打捆外送的方式。其中方案3与方案1均采用同一的波动范围进行电源容量规划,从而得到碳经济性评估流程如图1所示。

3 算例分析

算例采用某地的实际数据。其中,风电机组的额定功率为30 kW,切入、额定和切出风速分别为3、11和25 m/s;太阳能电池的额定功率为100 W,因表面积尘引起的光伏发电系统功率输出效率、最大功率点跟踪控制效率和DC/DC变换器效率分别为94%、96%和96%;蓄电池的额定容量为100 Ah,额定电压为12 V,最大容许放电深度为80%^[4,10-12]。取太阳能电池、风电机组、特高压输电线路生命周期年限均为20 a。根据当地风速、光照

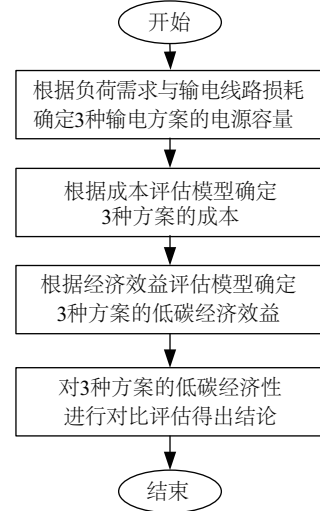


图1 碳经济效益评估流程

Fig. 1 Flow of carbon economy assessment

基本数据,并应用本文的风光储电源的确定方法,按照年平均发电量6400 MWh,年发电时间按8760 h计算,在负荷缺电率为0%时进行电源容量配置,并假设能源基地与负荷中心相距2000 km,采用特高压柔性直流输电将电能输送到负荷中心,取输电线路的线损率为7.349%^[13],并根据风光火单位发电量的碳排放量不同进行3种方案的碳排放量计算,其中光伏发电的碳排放强度为0.2868 kg/kWh,风电的碳排放强度为0.29 kg/kWh、火电0.89 kg/kWh^[4]。通过计算得到3种方案的年均运行成本和碳排放量如表1所示。

表1 年均运行成本和碳排放量

项目	方案1	方案2	方案3
年运行成本/亿元	277.63	108.93	165.16
碳排放量/t	53361631	72505208	66124015

从表1可看出,3种方案的年运行成本和碳排放量各有不同。在年运行成本方面,方案2的年运行成本最低,主要由于方案2的装机运行成本较低,而随着风电机组、太阳能电池的不断发展,方案1和方案3的年运行成本也将逐步降低;在碳排放量方面,方案1具有最低的碳排放量,方案2有最大的碳排放量,且方案1的碳排放量远低于方案2,说明采用风光发电能有效降低碳排放量。考虑到碳交易价格的波动性,对3种方案的碳排放成本进行评估能够有效指导电源的规划建设^[14]。进一步计及碳交易价格波动特性,可得到的3种方案的碳排放成本如图2所示。

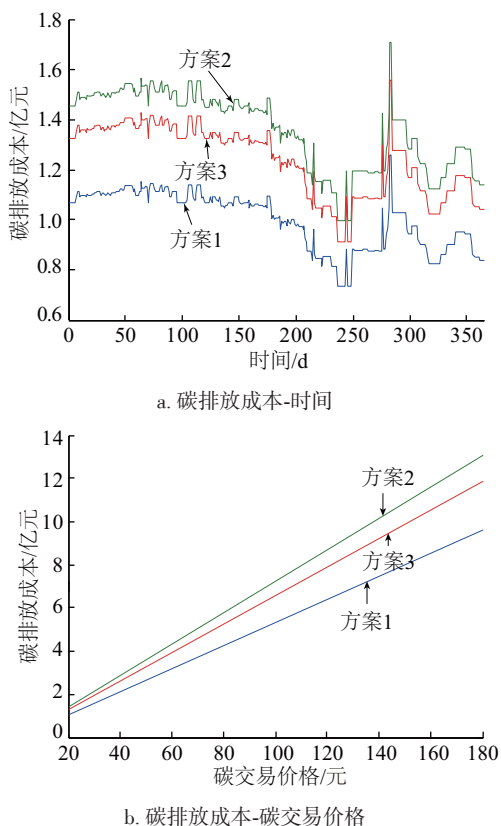


图2 碳排放成本

Fig. 2 Carbon cost

从图 2a 可看出,方案 1 相较于方案 2 和方案 3 有更低的碳排放成本,3 种方案的碳排放成本随碳交易价格波动均产生较大幅度的变动,说明不考虑碳交易价格波动的评估方法存在一定的不足。从图 2b 可看出,3 种方案随碳交易价格的增长呈成本快速增加的趋势,且方案 2 和方案 3 的增长速度高于方案 1,说明随着碳交易价格的增长,采用方案 1 能有效降低碳排放成本。

从电能效益角度分析,由于本文是在 3 种方案向负荷输送同等电量的前提下进行相关的研究分析。按照受端综合电价 0.4549 元/kWh 进行计算,3 种方案输送到受端所获得的售电综合效益均为 255.05 亿元。同时,考虑到国家对新能源发电的补偿,风电按照 0.22 元/kWh,光伏发电按照 1 元/kWh 进行补偿,并结合年运行成本和碳排放成本可得到 3 种方案的电能效益,如图 3 所示。从图 3a 可看出,方案 1 相对于方案 2 和方案 3 明显具有更好的电能效益,而方案 3 的电能效益也优于方案 2,其主要原因是由于国家对新能源的财政补贴。3 种方案的电能效益随时间的变化幅度不大,说明 3 种方案的电能效益受碳交易价格的小幅波动影响不

大。从图 3b 可看出,随着碳交易价格的增长,3 种方案的电能效益都呈下降趋势,且方案 2 降幅较方案 1 和方案 3 大,主要由于方案 2 的碳排放量较方案 1 和方案 3 大,可见随着碳交易价格的增长,方案 1 将具有更好的经济效益。

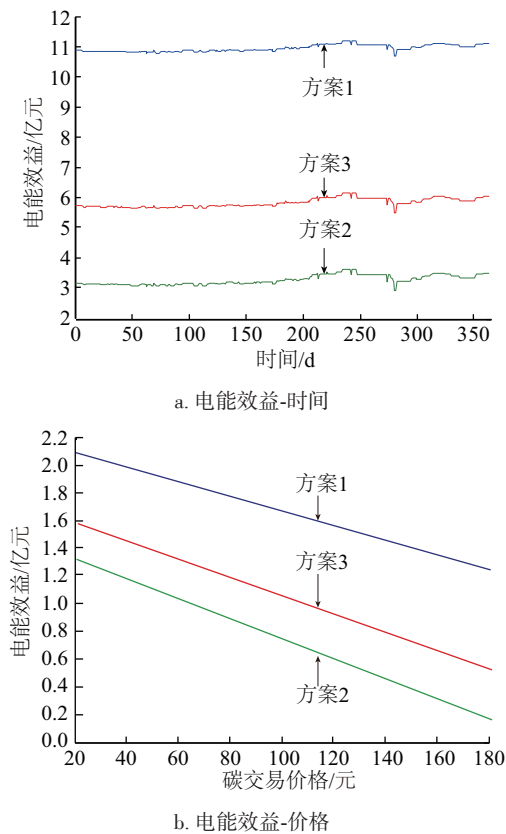
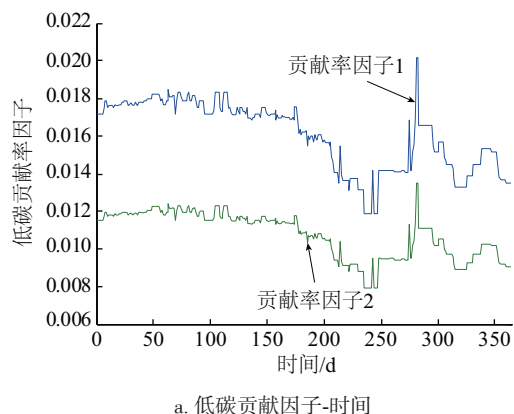


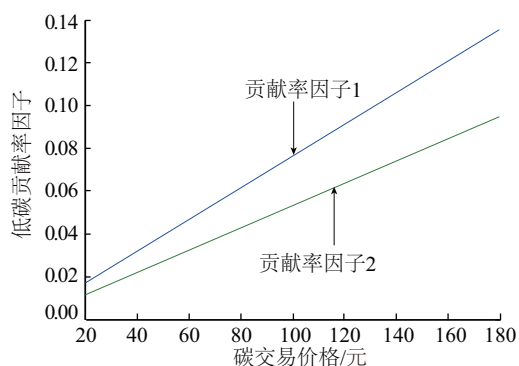
图3 电能效益

Fig. 3 Energy efficiency

通过上面的碳排放成本和电能效益的分析,本文引入低碳贡献率因子来评估 3 种方案的碳经济效益,通过本文的计算方法得到方案 1 相对于方案 2、方案 3 的低碳贡献率因子如图 4 所示。



a. 低碳贡献因子-时间



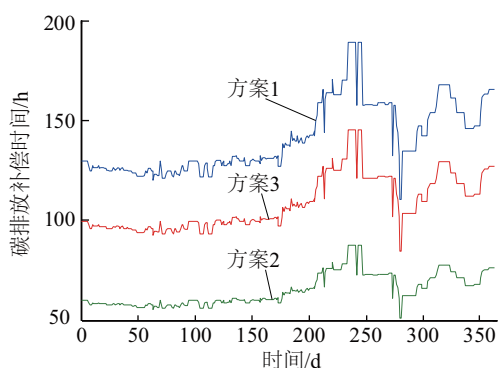
b. 低碳贡献因子-价格

图4 低碳贡献率因子

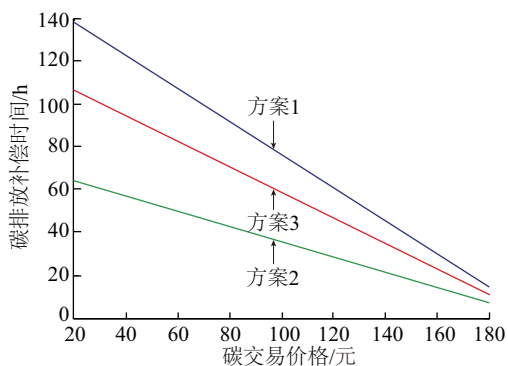
Fig. 4 Low carbon contribution factor

从图4可看出,方案1相对于方案2所取得的低碳贡献率因子(贡献率因子1)大于方案1相对于方案3的低碳贡献率因子(贡献率因子2),2种低碳贡献率因子均随碳交易价格的增加而增加,且低碳贡献率因子1增幅大于低碳贡献率因子2,说明方案1较方案2具有更好的低碳经济性。

通过引入碳排放补偿时间以模拟3种方案的盈利能力,通过计算得到3种方案的碳排放补偿时间如图5所示。从图5可看出,方案1的碳排放补偿时间大



a. 碳排放补偿时间-时间



b. 碳排放补偿时间-价格

图5 碳排放补偿时间

Fig. 5 Carbon offsets time

于方案2和方案3,主要由于方案1相对于方案2和方案3的年运行成本大。但随着碳交易价格的增长,方案1的碳补偿时间呈现出较快的降低速度,且降低速度远大于方案2和方案3,说明方案1较方案2和方案3具有更好的发展前景,也具有更好的经济效益。

4 结论

以年运行成本和碳排放成本最小为目标,对风光储电源进行优化,然后综合考虑电源、输电线路和负荷特性,同时考虑碳交易价格波动,构建风光储碳经济性评估模型,最后构建3种方案对其评估模型进行评估,并通过算例分析得到如下主要结论:

1) 3种方案的碳排放成本、电能效益、低碳贡献率因子和碳排放补偿时间均随碳交易价格的波动而波动,说明将碳交易价格当成常数的评估方法存在一定的不足。

2) 3种方案的电能效益和碳排放补偿时间均随碳交易价格的增长而降低,且方案1相比于方案2和方案3,在电能效益方面降幅慢,在碳排放补偿时间方面降幅则更快,说明方案1较方案2和方案3具有更好的经济发展前景。

3) 3种方案的碳排放成本和低碳贡献率因子随碳交易价格的增加而增加,且方案1在碳排放成本方面增幅低于方案2和方案3,而3种方案中方案2的增幅最大,说明在计及碳成本时,方案1相较方案2具有更好的经济性。

4) 模型量化了碳经济效益占系统效益的比重,有利于指导新能源的规划与建设,有利于为系统进行减排方案的制定提供依据。

[参考文献]

- [1] GRUBB M, JAMASB T, POLLITT M G. Delivering a low-carbon electricity system[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [2] IPCC. Intergovernmental panel for climate change fourth assessment report[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] ZHANG N, KANG C, KIRSCHEN D S, et al. Planning pumped storage capacity for wind power integration[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2013, 4(2): 93-401.
- [4] 段建明, 王志新, 王承民, 等. 考虑减排效益的可再生能源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 11-

15.
DUAN J M, WANG Z X, WANG C M, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits [J]. Power system technology, 2015, 39(1): 11-15.
- [5] 杜尔顺, 孙彦龙, 张宁, 等. 适应低碳电源发展的低碳电源规划模型[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2725-2731.
DU E S, SUN Y L, ZHANG N, et al. Transmission expansion planning model facilitating low-carbon power sources' development [J]. Power system technology, 2015, 39(10): 2725-2731.
- [6] 曹阳, 李鹏, 袁越, 等. 基于时序仿真的新能源消纳能力分析及其低碳效益评估[J]. 电力系统及其自动化, 2014, 38(17): 60-66.
CAO Y, LI P, YUAN Y, et al. Analysis on accommodating capability of renewable energy and assessment on low-carbon benefits based on time sequence simulation [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(17): 60-66.
- [7] 李莉, 王建军, 李宁, 等. 低碳经济下能效电厂的半方差风险投资组合优化模型[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 26-29.
LI L, WANG J J, LI N, et al. A risk investment portfolio optimization model of energy efficiency power plant based on mean semi-variance theory in low-carbon economy environment [J]. Power system technology, 2011, 35(8): 26-29.
- [8] 田廓, 邱柳青, 曾鸣. 基于动态碳排放价格的电网规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 57-65.
TIAN K, QIU L Q, ZENG M. The development status and prospect of grid-connected photovoltaic generation and its related technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 57-65.
- [9] 刘臣辉, 詹晓燕, 范海燕, 等. 多晶硅-光伏系统碳排放环节分析[J]. 太阳能学报, 2012, 30(7): 1158-1163.
LIU C H, ZHAN X Y, FAN H Y, et al. Analysis of carbon emission links on polycrystalline-silicon PV system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2012, 30(7): 1158-1163.
- [10] YANG H, LU L, ZHOU W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system [J]. Solar energy, 2007, 81(1): 76-84.
- [11] 江全元, 石庆均, 李兴鹏, 等. 风光储独立供电系统电源优化配置[J]. 电力系统自动化设备, 2013, 33(7): 19-26.
JIANG Q Y, SHI Q J, LI X P, et al. Optimal configuration of standalone wind-solar-storage power supply system [J]. Electric power automation equipment, 2013, 33(7): 19-26.
- [12] 曾庆禹. 特高压交直流输电系统技术经济分析[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 341-348.
ZENG Q Y. Techno-economic analysis of UHVAC and UHVDC power transmission systems [J]. Power system technology, 2015, 39(2): 341-348.
- [13] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-98.
HAN X J, CHENG C, JI T M, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-98.
- [14] 殷桂梁, 李湘男, 郭磊, 等. 混合储能系统在风光互补微电网中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 49-53.
YIN G L, LI X N, GUO L, et al. Application of hybrid energy storage system on wind/solar hybrid microgrid [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(2): 49-53.

CARBON ECONOMY EVALUATION OF LARGE-SCALE WIND-SOLAR-STORAGE POWER

Xiao Junwen^{1,2}, Huang Huixian¹, Liu Xiaozhou³

(1. School of Information Technology, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China;

2. State Grid Xiangtan Power Supply Company, Xiangtan 411100, China;

3. CRRC Zhuzhou Electric Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The assessment of the low-carbon economy of the power system is beneficial to guiding its planning and construction. In order to efficiently assess the low-carbon economy of the wind-solar-storage power, a large-scale model is constructed. Firstly the capacity of wind-solar-power storage is determined based on the minimum annual operating cost and power shortage rate of the energy storage equipment, and then a carbon emission assessment model is set up according to this model. Secondly, a wind-solar-storage cost assessment model is built based on the life cycle cost theory and a carbon economic performance assessment model is constructed combined with dynamic carbon transaction price. And then three schemes of outgoing transmission of solar power storage, thermal power and bundled wind and thermal power are separately constructed to evaluate the low carbon economy of wind- solar energy storage grid connected under the premise of transporting equal amount of electric energy. Finally, an example is analyzed to verify its validity and rationality of the assessment method.

Keywords: carbon; emission; economy; models; wind-solar-storage