

新能源环境替代效用与传输价值研究

刘健¹, 于壮壮², 牛东晓¹, 郭磊³

(1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031;

3. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053)

摘要:研究了新能源的环境效用和新能源对常规能源的环境替代效用,并以此为基础提出了新能源环境电价的定价策略。研究了新能源在单一电网消纳时的环境边际替代率和确定环境电价的方法,讨论了新能源远距离输送时送受端环境效用的相互影响,讨论了输送比例和区域间边际环境效用系数对区域间环境电价的影响,证明了环境电价可以体现新能源远距离输送的作用和价值。

关键词:新能源;环境效用;电价;边际环境效用系数;传输价值;定价策略

中图分类号:F 206;TK 01

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.010

0 引言

风电、光伏等新能源发电因其在环保方面的优势,在近年来得到了大规模发展。目前,新能源电价的形成都是通过经济技术的方法,参考火电标杆电价并予以补贴^[1],因此可认为新能源带来的环境价值是通过补贴的形式计入电价。然而这种新能源补贴电价的方法无法正确反映新能源的环境价值。

第一,根据经济学原理,消费品之所以能满足人的需求,是因为消费品有效用(utility),用户的消费选择来自于消费品能够带来效用的大小^[2]。社会选择新能源替代常规能源,是因为新能源在环境方面的效用高于常规能源,新能源的环境效用可用其替代了多少常规能源来表示。目前新能源的补贴电价显然不能反映这种替代效用,因此需要对新能源的环境效用进行量化后计入电价。

第二,新能源带来的环境效用是通过降低常规能源排放体现的^[3-4],应通过比较一定时段内的新能源发电量与火电发电量来确定。因此,新能源带来的环境效用应根据不同的时间、不同的电网运行状态确定,反映环境效用的电价也应是实时、动态的,并以电网经济调度为基础^[5-6]。

第三,目前在新能源参与经济调度或电力市场时,大多采用含环境成本的优化计算方法^[7-9],但是这种方法只能反映全网环境成本的大小^[10],且将新能源的电价作为一个整体来进行研究,无法量化各时刻新能源对常规能源的边际替代,因此需要将反映环境价值的电价部分分解出来进行计算。

第四,新能源的环境效用与本地区的环境情况相关。众所周知,我国的新能源分布不平衡,新能源装机大部分处在新能源资源丰富但经济不发达的中西部,需远距离将新能源送至东部的负荷中心。因东/西部人文、地理环境的不同,常规能源的排放在东/西部产生的影响也不相同^[11-12],新能源的环境价

值也随之传导,即新能源在传输过程中的环境价值需体现不同地区的环境影响。而目前的定价方法较为笼统和粗略,无法准确反映新能源在不同地区并网后带来的环境价值,无法指导新能源在不同地区的并网规划、实时调度中新能源送出功率的安排。

文献[13]提出一种动态定价方法,将环境效用部分从电价中分解出来。新能源的电价应该至少包含2个方面:①作为并网电源,与常规能源相同,无差别同质化参与电网安全经济运行或参与电力市场;②作为环境效用更高的能源,反映其环境效用。即新能源电价为固定电价与环境电价之和,其中固定电价反映新能源的基本发电运行成本,环境电价反映新能源的环境效用,环境电价是实时的,依据电网运行状态的变化而变化。

本文将针对新能源环境电价进行详细深入的研究,主要包含两方面的内容:研究新能源对常规机组的环境替代效用,依据边际替代方法和含新能源的实时经济调度手段,对新能源环境电价进行量化,替代传统的补贴电价;考虑新能源在进行远距离输送时,如何通过环境电价的调节来体现新能源在不同区域消纳的环境效用,鼓励新能源从环境因素好的地区向环境因素差的地域传送,以减少环境因素差地域的排放。

1 新能源环境效用

从经济学角度而言,分析消费品的效用有基数效用和序数效用^[14]这2种不同的理论。从分析效果而言,这2种理论应能得到相同的决策方法,本文选择采用基数效用法。

设在一个独立电力平衡的系统中,存在 N 台火电机组和 M 座新能源电厂,火电机组 i 的实时功率为 P_i^h ,新能源电厂的实时总功率为 P^w 。

定义 t 时刻该地区新能源电厂在单位时间内的环境总效用(total utility)为 $T^w(t)$,其应与单位时间内减少火电机组的排放量成正比,即:

$$T^w(t) = T(P^w(t)) = \sum_{i=1}^N V_i(P_i^h(t)) \quad (1)$$

其中, $T(P^w(t))$ 为效用函数; $V_i(P_i^h(t))$ 为火电机组 i 的排放函数, 可根据污染物排放数据进行量化拟合。

由于本文后续计算和分析中均针对 t 时刻, 因此下文的公式和相关表述中均忽略时标 t 。

新能源的环境效用 T^w 为新能源总功率的函数 $T(P^w)$, 应与其发电总功率 P^w 成正比。同时, 新能源带来的环境效用越高, 其环境电价 c^w 应越高, 即环境效用应与环境电价成正比。因此可以将新能源环境效用定义为:

$$T^w = \eta c^w P^w \quad (2)$$

其中, η 为地区边际环境效用 (marginal utility) 系数, 可参照国家发展和改革委员会于 2015 年发布的中国区域电网基准线排放因子^[15], 主要考虑地区电量边际排放因子 (OM) 和容量边际排放因子 (BM), 来表征该地区常规能源的排放影响。

定义新能源的边际环境效用 U^w 为:

$$U^w = \frac{dT^w}{dP^w} = \eta c^w \quad (3)$$

因此新能源的环境电价为:

$$c^w = U^w / \eta \quad (4)$$

2 新能源边际替代率

根据经济学原理, 2 种消费品的边际替代率 MRS (Marginal Rate of Substitution) 是指在消费过程中总需求不变的情况下, 为了满足总效用不变, 每减少某一消费品的数量, 需增加另一消费品的数量^[3]。

在 t 时刻新能源的边际替代率可以认为是: 在这种电网状态下, 若新能源发电功率微增 dP^w , 则需微降相应火电机组 i 的功率 dP_i^h , 二者的比值即为新能源对火电机组 i 的边际替代率 S_i , 如式 (5) 所示。

$$S_i = -\frac{dP_i^h}{dP^w} \quad (5)$$

依据式 (5), 新能源的环境电价为:

$$c^w = \frac{U^w}{\eta} = \frac{1}{\eta} \frac{dT^w}{dP^w} = \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^N \frac{dV_i(P_i^h)}{dP_i^h} \frac{dP_i^h}{dP^w} = -\frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^N \mu_i S_i \quad (6)$$

其中, $\mu_i = dV_i(P_i^h) / dP_i^h$ 为火电机组 i 的排放函数对发电功率 P_i^h 的导数。

由式 (6) 可知, 新能源的环境电价 c^w 为其边际替代率 S_i 的加权求和, 而 S_i 应由电网优化计算求解。

在系统运行过程中, t 时刻火电机组的实时运行功率均由安全经济调度决定^[6]。在 t 时刻, 系统的

目标函数为:

$$\min F(P_1^h, P_2^h, \dots, P_N^h) \quad (7)$$

电力平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^N P_i^h + P^w = P^L \quad (8)$$

其中, P^L 为 t 时刻电网的总负荷。

根据拉格朗日乘数法, 最优解应满足:

$$\lambda = \frac{\partial F(P_1^h, P_2^h, \dots, P_N^h)}{\partial P_i^h} \quad (9)$$

将拉格朗日乘子 λ 进行微分展开可得:

$$d\lambda = \frac{\partial^2 F}{\partial (P_i^h)^2} dP_i^h \quad (10)$$

考虑火电机组微减量之和与新能源微增量相等, 即 $\sum_{i=1}^N dP_i^h = -dP^w$ 。结合式 (10), 可推导得到新能源发电对火电机组 i 的边际替代率为:

$$S_i = \frac{-1}{\frac{\partial^2 F}{\partial (P_i^h)^2} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\frac{\partial^2 F}{\partial (P_k^h)^2}}} \quad (11)$$

需要说明的是, 计算过程中需考虑边界条件的影响, 即火电机组功率 P_i^h 的上下限范围约束 $P_{i,\min}^h \leq P_i^h \leq P_{i,\max}^h$, 若第 k 台火电机组的功率 P_k^h 已达到额定功率下限, 则新能源增加功率不会产生替代的环境效用, 因此需要剔除式 (11) 中 P_k^h 的相关项。

3 新能源远距离输送环境效用

3.1 模型建立

首先建立如下模型: 设电网 A 向电网 B 送电, 电网 A 中包含 M_A 台新能源机组 (功率之和为 P_A^w) 和 N_A 台火电机组 (单台火电机组的功率为 P_{Ai}^h), 电网 B 中包含 M_B 台新能源机组 (功率之和为 P_B^w) 和 N_B 台火电机组 (单台火电机组的功率为 P_{Bj}^h)。

假设电网 A 与电网 B 通过联络线进行电力交易, 电网 B 通过中长期交易向电网 A 的新能源机组与各火电厂购买电量, 交易电量依据电网的负荷进行日内分解, 形成电网 A 与电网 B 之间联络线在每一时刻的输送功率值 P_{line} , 其中包含新能源输送交易功率 P_{line}^w 和火电输送交易功率 $\sum P_{\text{line},i}^h$ 两部分, 即 $P_{\text{line}} = P_{\text{line}}^w + \sum P_{\text{line},i}^h$, 则联络线中新能源的传输比例为 $\tau = P_{\text{line}}^w / P_{\text{line}}$ 。

设电网 A 中新能源的外送比例为 $\sigma^w = P_{\text{line}}^w / P_A^w$, 电网 A 中第 i 台火电机组的功率外送比例为 $\sigma_i^h = P_{\text{line},i}^h / P_{Ai}^h$ 。去除外送功率部分, 电网 A 中剩余的新能源功率与火电机组功率通过优化调度参与本电网的电力平衡。

电网 A 的新能源效用分为本地消纳和传输到电网 B 消纳两部分,环境电价也分为 c_{A1}^w 和 c_{A2}^w 两部分,分别与电网 A 的新能源边际效用 U_A^w 和电网 B 的新能源边际效用 U_B^w 相关,即 $c_{A1}^w = U_A^w/\eta_A$, $c_{A2}^w = U_B^w/\eta_B$ 。因此可以得电网 A 和 B 的环境电价分别为:

$$c_A^w = (1-\sigma^w)c_{A1}^w + \sigma^w c_{A2}^w \quad (12)$$

$$c_B^w = U_B^w/\eta_B = c_{A2}^w \quad (13)$$

3.2 新能源在不同区域的环境效用

电网 A 中新能源的环境效用为:

$$T_A^w = \sum_{i=1}^{N_A} V_{Ai} [(1-\sigma_i^h)P_{Ai}^h] \quad (14)$$

参照式(6)可得:

$$c_{A1}^w = -\frac{1}{\eta_A} \sum_{i=1}^{N_A} \mu_{Ai} S_{Ai} \quad (15)$$

其中, $S_{Ai} = \frac{d(1-\sigma_i^h)P_{Ai}^h}{d(1-\sigma^w)P_A^w}$ 为电网 A 中的新能源对火电机组 i 的边际替代率; $\mu_{Ai} = dV_{Ai}[(1-\sigma_i^h)P_{Ai}^h]/dP_{Ai}^h$ 为电网 A 中火电机组 i 的排放函数对 P_{Ai}^h 的导数。

电网 B 中新能源的环境效用为本地与外受火电环境替代效用之和,即:

$$T_B^w = \sum_{i=1}^{N_A} V_{Ai}(\sigma_i^h P_{Ai}^h) + \sum_{j=1}^{N_B} V_{Bj}(P_{Bj}^h) \quad (16)$$

参照式(6)可得:

$$c_{A2}^w = c_B^w = -\frac{1}{\eta_B} \left(\sum_{i=1}^{N_A} \mu_{A2i} S_{B1i} + \sum_{j=1}^{N_B} \mu_{Bj} S_{B2j} \right) \quad (17)$$

其中, $S_{B1i} = d(\sigma_i^h P_{Ai}^h)/dP_{Ai}^w$ 为单位时间内电网 B 中的新能源对电网 A 中的火电机组 i 传输至电网 B 部分功率的边际替代率; $S_{B2j} = dP_{Bj}^h/dP_B^w$ 为电网 B 中的新能源对本地火电机组 j 的边际替代率; $\mu_{A2i} = dV_{Ai}(\sigma_i^h P_{Ai}^h)/dP_{Ai}^h$ 为电网 A 中火电机组 i 的排放函数对发电功率 P_{Ai}^h 的导数; $\mu_{Bj} = dV_{Bj}(P_{Bj}^h)/dP_{Bj}^h$ 为电网 B 中火电机组 j 的排放函数对发电功率 P_{Bj}^h 的导数。

3.3 区域间边际环境替代率

电网 A 和电网 B 的优化平衡约束分别为:

$$\sum_{i=1}^{N_A} P_{Ai}^h + P_A^w - P_{line} = P_A^L \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^{N_A} \sigma_i^h P_{Ai}^h + \sum_{j=1}^{N_B} P_{Bj}^h + P_{line}^w + P_B^w = P_B^L \quad (19)$$

依据式(11)所示的推导方法,可得:

$$S_{Ai} = \frac{d(1-\sigma_i^h)P_{Ai}^h}{d(1-\sigma^w)P_A^w} = \frac{-1}{\frac{1}{(1-\sigma_i^h)^2} \frac{\partial^2 F_A}{\partial (P_{Ai}^h)^2} \sum_{k=1}^{N_A} \frac{(1-\sigma_k^h)^2 \times 1}{\partial^2 F_A / \partial (P_{Ak}^h)^2}} \quad (20)$$

$$S_{B1i} = \frac{d\sigma_i^h P_{Ai}^h}{dP_{line}^w} = \frac{-1}{\frac{1}{(\sigma_i^h)^2} \frac{\partial^2 F_A}{\partial (P_{Ai}^h)^2} \sum_{k=1}^{N_A} \frac{(\sigma_k^h)^2 \times 1}{\partial^2 F_A / \partial (P_{Ak}^h)^2}} \quad (21)$$

$$S_{B2j} = \frac{dP_{Bj}^h}{dP_{line}^w} = \frac{dP_{Bj}^h}{dP_B^w} = \frac{-1}{\frac{\partial^2 F_B}{\partial (P_{Bj}^h)^2} \sum_{k=1}^{N_B} \frac{1}{\partial^2 F_B / \partial (P_{Bk}^h)^2}} \quad (22)$$

需说明的是:①若电网 A 或电网 B 中的某一台火电机组已达到最低功率,则计算环境电价时应剔除该机组的相关项;②若电网 A 中某一台火电机组的 $\sigma_i^h = 1$,则计算环境电价 c_{A1}^w 时不含该项,同样若某一台火电机组的 $\sigma_i^h = 0$,则计算 c_{A2}^w 时不含该项。

3.4 两区域的环境电价传导分析

为了方便分析,本文做出如下假设:

a. 电网 A 中火电机组的外送比例相同,即 $\sigma_i^h = \sigma^h$;

b. 电网 A 和电网 B 的优化目标对本电网内各火电机组功率的二次偏导数相同;

c. 电网 A 和电网 B 中各火电机组的排放函数相同且均为功率的线性函数,即 $\mu_{Bj} = \mu$, $\mu_{A2i} = \sigma^h \mu$, $\mu_{A1i} = (1-\sigma^h)\mu$ 。

根据以上假设,可以得到:

$$c_A^w = \frac{\mu}{\eta_A} (1-\sigma^w)(1-\sigma^h) + \frac{\mu}{\eta_B} \sigma^w \sigma^h + \frac{\mu}{\eta_B} \sigma^w = c_{1A}^w + c_{2A}^w + c_{3A}^w \quad (23)$$

$$c_B^w = \frac{\mu}{\eta_B} + \frac{\mu}{\eta_B} \sigma^h = c_{1B}^w + c_{2B}^w \quad (24)$$

其中, $c_{1A}^w = \frac{\mu}{\eta_A} (1-\sigma^w)(1-\sigma^h)$ 为对电网 A 内火电机组的环境替代,外送新能源越多,则这一部分环境电价就越低; $c_{2A}^w = \frac{\mu}{\eta_B} \sigma^w \sigma^h$ 为对外送至电网 B 的电网 A

内火电机组的环境替代, $c_{3A}^w = \frac{\mu}{\eta_B} \sigma^w$ 为对电网 B 内火电机组的环境替代,外送新能源越多,则这两部分的环境电价越高; $c_{1B}^w = \frac{\mu}{\eta_B}$ 为对电网 B 内火电机组的环境替代; $c_{2B}^w = \frac{\mu}{\eta_B} \sigma^h$ 为对电网 A 送入的火电机组的环境替代。电网 B 外受火电功率的比例 σ^h 越高,则本地新能源环境替代效用越强,相应的环境电价 c_B^w 越高。

当电网 A 的外送火电功率比例 $\sigma^h = 0$ ($\tau = 1$, 全部外送新能源功率)时,环境电价的表达式为:

$$c_A^w = \frac{1}{\eta_A} \mu + \frac{\eta_B - \eta_A}{\eta_A \eta_B} \sigma^w \mu \quad (25)$$

其中,等号右边的第一项为对电网 A 内火电机组的

环境替代,第二项为对电网 B 内火电机组的环境替代。因此,只有当电网 B 的边际环境效用系数大于电网 A 的边际环境效用系数($\eta_B > \eta_A$)时,才能保证电网 A 的新能源送至电网 B 后带来有效的环境效用,否则将外送的新能源功率全部留在电网 A 是最优的选择。换言之,若 $\eta_B < \eta_A$,将电网 A 的新能源功率送至电网 B 后,其环境电价 c_A^w 不如将新能源功率留在本地时高(式(25)中等号右边的第二项为负值),这说明将新能源送至电网 B 后未起到足够的降低排放的作用,新能源电厂本身将功率留在本地消纳的意愿要更高。若 $\eta_B = \eta_A$,则认为将电网 A 的新能源外送至电网 B 与将电网 A 的新能源留在本地消纳的环境效用相同。此外,根据式(25)还可得知:在 $\eta_B > \eta_A$ 的条件下,将电网 A 的新能源外送至电网 B 的比例 σ^w 越大,则其环境电价越高,因此增强了电网 A 中新能源电厂外送功率的动力。

4 算例

针对华北蒙西电网(电网 A)和京津唐电网(电网 B)进行简化建模,电网负荷及联络线传输功率如下:电网 A 的最大负荷为 1 674 MW,最小负荷为 997 MW;电网 B 的最大负荷为 2 946 MW,最小负荷为 2 145 MW;联络线最大传输功率为 400 MW,最小传输功率为 200 MW。联络线功率采用“峰平谷”的形式,由电网 A 送电网 B。

电网 A 包含 4 台火电机组,容量分别为 600 MW、500 MW、350 MW、200 MW。电网 B 包含 6 台火电机组,容量分别为 600 MW、500 MW、500 MW、350 MW、350 MW、200 MW。不同容量火电机组的参数见文献[10]。

电网 A 的风电数据取自内蒙某风电场典型日的功率曲线,电网 B 的风电数据取自北京某风电场典型日的功率曲线。

以本电网最小煤耗作为优化目标,将煤耗曲线用二次多项式进行拟合。对各类型火电机组的 CO_2 排放进行分析,按照火电名义环境补偿成本价格 40 元/t 进行测算,并按照式(26)对火电机组的 CO_2 排放进行拟合^[16]。

$$V_i(P_i^h) = \alpha(P_i^h)^2 + \beta P_i^h + \gamma + \xi e^{\nu P_i^h} \quad (26)$$

其中, $\alpha, \beta, \gamma, \xi, \nu$ 为火电机组 i 的排污特性系数。

4.1 独立系统的环境电价

取 $\eta_B = 6 \times 10^{-4}$,假设电网 B 联络线的受入功率为 0,取电网 B 中 2 种典型风电曲线(顺调峰和逆调峰)下计算的环境电价,如图 1 所示。

本文中顺调峰指风电功率曲线的峰谷与负荷曲线峰谷相近,负荷高峰时段风电处于高发时段,负荷低谷时段风电处于少发时段;逆调峰指风电功率曲

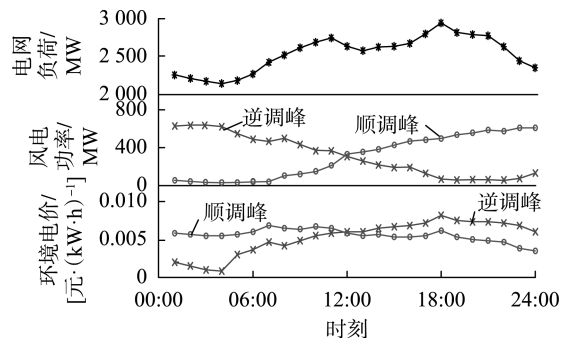


图 1 电网负荷、风电功率及环境电价曲线

Fig.1 Network load, wind power and environment electricity price curves

线的峰谷与负荷曲线的峰谷相反,负荷高峰时段风电处于少发时段,负荷低谷时段风电处于高发时段。

从图 1 中可以看出,顺调峰下的环境电价波动不大,这是因为当风电出力为顺调峰时,火电机组的出力变化较小,因此环境电价曲线比较平滑;反之,由于风电逆调峰造成火电机组的大量调整,使环境电价的曲线波动更大。

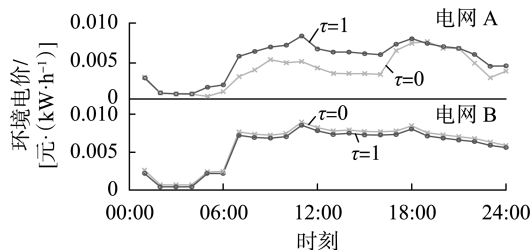
按照负荷时段进行分析,在负荷高峰时段,环境电价主要取决于火电机组的排放函数对火电机组功率的导数 μ_i ,而从式(26)可以看出, μ_i 单调上升(α, ξ, ν 一般为正值),因此当顺调峰下的风电出力比逆调峰下的风电出力高时,相应火电机组的出力就越低,导致 μ_i 越低,顺调峰下的环境电价要比逆调峰下的环境电价低。即:在负荷高峰时段,风电逆调峰出力较小,火电机组出力更高, CO_2 排放更多,风电的替代效用就更明显,因此环境电价要更高。

而在电网负荷低谷时段,顺调峰下的环境电价比逆调峰下的环境电价要高,这是因为在负荷低谷时段,风电功率越大,达到最低功率的火电机组越多,风电功率增长仅能使未达到最低功率的火电机组减少功率,即利用式(11)计算 S_i 时需剔除已降低到最低功率的火电机组,造成新能源的替代效用降低。考虑极端情况,若风电功率在负荷低谷时段增长到使所有火电机组均达到最低功率,则即使再增加风电功率也无法带来 CO_2 排放量的减少,即风电的环境电价应为 0。换言之,引入环境电价同时可以促进新能源并网调峰。

4.2 风电传输比不同时输送环境电价

取 $\eta_A = 4 \times 10^{-4}$, $\eta_B = 6 \times 10^{-4}$,当 $\tau = 1$ 时,联络线全部外送风电功率;反之,当 $\tau = 0$ 时,联络线全部外送火电功率。2 种情况下电网 A 和电网 B 的风电环境电价变化如图 2 所示。

从图 2 可以看出,相比于 $\tau = 0$ 的情况,当 $\tau = 1$ 时,电网 A 中风电的环境电价高,这是因为 τ 对式(23)中 c_{1A}^w 的影响不大,当 $\tau = 1$ 和 $\tau = 0$ 时,式(23)中的 $c_{2A}^w = 0$ (σ^w, σ^h 均为 0),而当 $\tau = 0$ 时,式(23)中

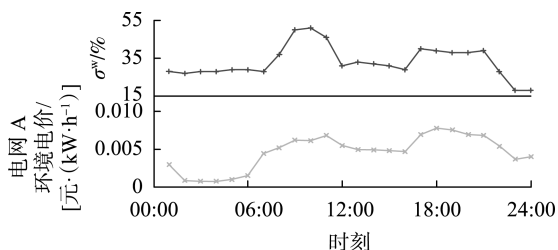
图2 τ 对环境电价的影响Fig.2 Influence of τ on environment electricity price

的 $c_{3A}^w = 0 (\sigma^w = 0)$, 当 $\tau = 1$ 时 $c_{3A}^w \neq 0$, 即电网 A 中的风电在 $\tau = 1$ 时除了对本电网的火电有替代效用, 对电网 B 的火电也存在替代效用, 因此环境电价较高。

相比于 $\tau = 0$ 的情况, 当 $\tau = 1$ 时, 电网 B 中风电的环境电价低, 这是因为当 $\tau = 1$ 时式(24)中的 $c_{2B}^w = 0 (\sigma^h = 0)$, 当 $\tau = 0$ 时, $c_{2B}^w \neq 0$, 即电网 B 中的风电在 $\tau = 0$ 时除了对本电网的火电有替代效用, 对联络线输送的火电也存在替代效用, 因此环境电价较高。

4.3 风电外送比不同时的输送环境电价

固定 $\tau = 0.5$, 取 $\eta_A = 4 \times 10^{-4}$, $\eta_B = 6 \times 10^{-4}$, 不同时刻的风电外送比 σ^w 不同, σ^w 与电网 A 环境电价的关系如图 3 所示。

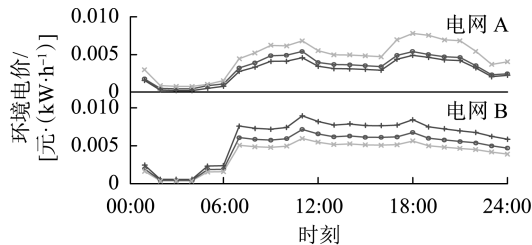
图3 σ^w 对环境电价的影响Fig.3 Influence of σ^w on environment electricity price

由图 3 可见, 风电外送比例 σ^w 越高 (由于固定了 $\tau = 0.5$, 因此火电外送功率相应增高), 电网 A 的风电环境电价越高, 这是因为在 $\eta_A < \eta_B$ 的情况下, 式(25)中的 σ^w 越大, 环境电价越高, 二者基本同向增减。即在 $\eta_A < \eta_B$ 的情况下, 电网 A 的风电外送对电网 B 中火电机组的替代效用要高于对电网 A 中火电机组的替代效用, 因此风电外送比例越大, 替代效用越明显, 环境电价越高。

4.4 环境边际效用系数不同时的输送环境电价

固定 $\tau = 0.5$, 图 4 比较了不同的 η_A 、 η_B 情况下 2 个电网环境电价的变化曲线。

由图 4 可见, 随着 η_A 增加、 η_B 降低, 电网 A 的环境电价不断降低, 电网 B 的环境电价不断增加。当 $\eta_A < \eta_B$ 时, 电网 A 的环境电价高于电网 B; 反之, 当 $\eta_A > \eta_B$ 时, 电网 A 的环境电价低于电网 B。即只有当风电从边际环境效用系数较低的电网向边际环境效用系数较高的电网传输时, 其环境替代效用才更明显, 环境电价更高。

* $\eta_A = 4 \times 10^{-4}$, $\eta_B = 6 \times 10^{-4}$ * $\eta_A = 5 \times 10^{-4}$, $\eta_B = 5 \times 10^{-4}$ * $\eta_A = 6 \times 10^{-4}$, $\eta_B = 4 \times 10^{-4}$ 图4 η_A 、 η_B 对环境电价的影响Fig.4 Influence of η_A and η_B on environment electricity price

5 结论

本文首先应用动态电价的方法将体现新能源环境效用的部分从电价中分解出来, 形成了环境电价部分; 然后研究了新能源对火电机组的环境替代效用, 依据边际替代方法、含新能源的实时经济调度手段, 对新能源的环境电价进行量化, 给出了新能源在单一电网消纳、电网间输送 2 种情况下的环境电价计算方法。根据理论和仿真计算结果可得如下结论。

a. 当新能源在单一电网消纳时, 新能源环境电价能够正确反映其所带来的环境效用。

b. 当新能源进行远距离输送时, 送端和受端的环境电价与区域边际环境效用系数、新能源传输比例这 2 个因素有关。只有当新能源从边际环境效用系数低的区域送出时, 其环境电价才能高于边际环境效用系数高的区域; 新能源传输比例越高, 环境替代效用越明显, 环境电价越高。

在目前的电价制度、未来的电力市场构架下, 新能源环境电价的引入可代替补贴电价, 具有以下意义: 进行新能源投资规划时, 不仅只考虑当地的风资源等情况, 还需考虑并网后对电网运行过程中减排效果的影响, 从而指导新能源并网规划、投资收益测算等方面; 当新能源进行外送交易时, 需考虑受端电网的情况, 引导新能源向环境情况更差的地区输送; 通过价格手段促进新能源进行调峰运行。

参考文献:

- [1] 肖云鹏, 王锡凡. 考虑低碳效益的风电两部复合竞价方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 41-46, 74.
XIAO Yunpeng, WANG Xifan. Two-part compound bidding mode for wind power considering low-carbon benefit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 41-46, 74.
- [2] 黎诣远. 西方经济学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 70-82.
- [3] 魏学号, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53-56.
WEI Xuehao, ZHOU Hao. Evaluating the environmental value schedule of pollutants mitigated in China thermal power industry[J].

- Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1): 53-56.
- [4] 李泓泽, 赵会茹, 王宝, 等. 风电并网发电的外部价值测算[J]. 现代电力, 2012, 29(4): 83-88.
LI Hongze, ZHAO Huiru, WANG Bao, et al. Measurement on external value of grid-connected wind power generation[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(4): 83-88.
- [5] HETZER J, YU D C, BHATTARAI K. An economic dispatch model incorporating wind power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.
- [6] 朱志键, 王杰. 基于改进 NSGA-II 的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 176-183.
ZHU Zhijian, WANG Jie. Dynamic economic emission dispatch based on modified NSGA-II for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 176-183.
- [7] MIRANDA V, HANG P S. Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.
- [8] 徐志宇, 姬淑芳, 邵伟晖, 等. 面向风电接入的电力市场最优定价与跟踪控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 51-57.
XU Zhiyu, JI Shufang, SHAO Weihui, et al. A wind power integration-oriented strategy for optimal pricing and tracking control of electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 51-57.
- [9] 曲正伟, 王京波, 张坤, 等. 考虑不确定性成本的含风电场群电力系统短期优化调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 137-144.
QU Zhengwei, WANG Jingbo, ZHANG Kun, et al. Short-term optimal dispatch considering uncertainty cost for power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 137-144.
- [10] 王艳君, 余贻鑫. 风电场对电力系统运行成本和市场价格的影响[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 19-23.
WANG Yanjun, YU Yixin. Impacts of wind farm on power system operating cost and market price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 19-23.
- [11] 李颢. “西电东送”环境减排效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9): 36-41.
LI Yang. Study on environmental effects of emission reduction in west-to-east electricity transmission[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(9): 36-41.
- [12] 王颖婕, 路正南. 中国东西部地区碳排放的比较研究[J]. 技术经济与管理研究, 2013(8): 107-111.
WANG Yingjie, LU Zhengnan. A comparative study of China's eastern and western regional carbon emissions[J]. Technoeconomics & Management Research, 2013(8): 107-111.
- [13] 刘健, 牛东晓, 邢棉, 等. 基于动态电价的新能源实时调度定价与策略研究[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1339-1344.
LIU Jian, NIU Dongxiao, XING Mian, et al. Research and strategy of dynamic electricity price based real-time dispatching pricing of new energy[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1339-1344.
- [14] GREGORY M. Principles of economics[M]. [S.l.]: Thomson Learning, 2002: 78-86.
- [15] 国家发展和改革委员会. 2016 年中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. (2017-04-14) [2018-08-31]. http://www.ndrc.gov.cn/yjzq/201704/t20170414_847850.html.
- [16] ROY S. Market constrained optimal planning for wind energy conversion systems over multiple installation sites[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1): 124-129.

作者简介:



刘健

刘健(1979—),男,河北唐山人,高级工程师,博士,主要研究方向为电网运行与控制、新能源并网等(E-mail: liu_jian04@163.com);

于壮壮(1987—),男,山东乳山人,工程师,博士,主要研究方向为技术经济与管理、新能源等(E-mail: yu.zhuangzhuang@nc.

sgcc.com.cn);

牛东晓(1962—),男,安徽宿县人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为技术经济与决策、新能源评价并网等(E-mail: niudx@126.com);

郭磊(1984—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统及其自动化以及电力信息技术等(E-mail: stones_wall@163.com)。

Research on environmental substitution utility and transmission value of new energy

LIU Jian¹, YU Zhuangzhuang², NIU Dongxiao¹, GUO Lei³

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

3. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

Abstract: The environmental utility of new energy and its environmental substitution utility for conventional energy are studied, based on which, a pricing strategy of new energy environment electricity price is put forward. The marginal environmental substitution rate and the determining method of environment electricity price are studied when the new energy is consumed in a single power grid. The mutual effect between the environmental utility of the receiving end and the sending end is discussed when the new energy is transmitted over long distances. The influence of transmission proportion and interregional marginal environmental utility coefficient on interregional environment electricity price is discussed. It proves that the environment electricity price can reflect the role and value of long distance transmission of new energy.

Key words: new energy; environmental utility; electricity price; marginal environmental utility coefficient; transmission value; pricing strategy