

基于合作博弈论的电能替代效益分摊方法

陈星莺, 郁清云, 谢俊, 余昆

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 电能替代对于落实节能环保政策、实现能源战略转型具有实际意义。为了将电能替代效益公平合理地分摊给电力用户, 激励用户参与电能替代, 提出一种基于合作博弈论的电能替代效益分摊方法。分析电能替代对降低生产运行成本和减少污染排放的价值, 并对其进行量化; 基于合作博弈论, 采用核仁和 Shapley 值法对电能替代效益进行分摊。算例验证了所提电能替代效益分摊方法的有效性和合理性。

关键词: 电能替代; 合作博弈论; 效益分摊; 核仁法; Shapley 值法

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.005

0 引言

随着我国经济的高速发展, 我国以煤为主的能源结构所引起的环境问题日益严重, 为此, 国家电网公司开展了“以电代煤, 以电代油, 用清洁电”为核心理念的电能替代工作。电能替代是指在终端能源消费环节利用电力能源代替煤炭、石油、天然气等化石能源以及常规终端能源的能源消费方式。通过电能替代, 在电网公司增供扩销的同时, 能够有效减少终端化石能源的消耗, 缓解污染物排放对环境造成的压力, 产生显著的经济效益和环境效益^[1-3]。

近年来电能替代的理论和实践研究工作已经全面开启: 文献[2]结合售电侧改革背景, 提出“互联网+”电能替代的概念, 并对其总体发展路线、关键技术以及多元主体下的经济效益进行了分析和探讨; 文献[3]建立电能替代的环境负荷 IPAT (human Impact of Population, Affluence and Technology) 模型, 用以对多情景下终端电能替代的中长期潜力进行预测分析; 文献[4]提出一种基于粒子群优化支持向量机的方法, 能实现对电能替代潜力的有效预测; 文献[5]对商业用户电能采暖替代的2种主流技术选型进行研究, 以2类电采暖/制冷系统(同时配置冷水机组制冷系统和蓄热式电锅炉供暖系统以及兼具制冷、供暖功能的地源热泵系统)成本偏差最小为目标, 提出一种直接求取边界条件的优化模型; 文献[6]对接入风电和电锅炉等电采暖负荷的配电网进行可靠性评估。以上文献大多偏向于电能替代的潜力分析和运行方式的优化研究, 鲜见从市场化的角

度研究电能替代的效益分摊问题。

国家发改委颁布的《关于推进电能替代的指导意见》^[7]指出, 各地方政府可通过财政补贴、奖励等方式对符合条件的电能替代项目和技术予以支持, 而随着电力体制改革的推进和电力市场的建设, 还可以通过优化电能替代电价制度对参与电能替代的用户进行合理价格补偿, 而科学、公平、合理地分摊电能替代效益是确定合理电价的基础, 有利于充分发挥价格信号的作用, 调动电能替代用户参与电能替代的积极性, 推动电能替代的发展。

基于合作博弈的成本(效益)方法是一种在多利益主体间公平分摊成本(效益)的方法, 有较强的理论背景, 国内外学者对其在电力系统成本(效益)分摊领域的应用进行了深入研究。文献[8]运用基于合作博弈的成本分摊理论来分摊机组启动费用, 验证了分摊的合理性和公平性, 并对核的存在性进行了讨论; 文献[9]提出基于合作博弈的输电网合作投资费用的分摊方法, 采用核心、核仁及 Shapley 值3种方法将成本分摊给各发电机和用户; 文献[10]采用合作博弈方法分摊输电费用, 并通过算例验证了其有效性和公平性; 文献[11]采用合作博弈理论求取电网和用户双方都能接受的分摊方案, 不仅能明显改善负荷曲线, 还能降低用户电费; 文献[12-13]提出一种计算分布式电源节点电价的方法, 该方法以网损量(排放量)最少为优化目标, 通过合作博弈方法计算网损(排放)减少分摊量, 并基于该分摊结果对各节点电价进行修正, 能有效降低网损(排放量)。

在上述背景下, 本文首先定义了系统运行成本函数和排放函数分别用以量化电能替代的经济效益和环境效益; 然后基于合作博弈方法^[14-15], 采用成本(效益)分摊问题中的核仁和 Shapley 值方法对电能替代效益进行分摊; 最后, 对五机系统的计算分析表明, 基于合作博弈论的电能替代效益分摊方法遵循按贡献分摊的原则, 满足公平性要求, 能激励用户参与电能替代, 从而推动电能替代的发展。

收稿日期: 2018-05-07; **修回日期:** 2018-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901100); 国家电网公司总部科技项目(电能替代典型场景优化互动及电网调控支撑技术及应用)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0901100) and the Science and Technology Program of SGCC (Optimization, Interaction, Regulate and Control of Power Grid for Typical Scenarios of Electric Energy Substitution)

1 电能替代效益的量化方法

为了对电能替代效益实现量化计算,本节定义了系统运行成本函数和排放函数分别作为分析电能替代的经济效益和环境效益的客观依据。

实施电能替代之前,终端用户使用分散的传统化石能源设备,能源利用率低,排放量大。终端用户电能替代之前的成本函数和排放函数分别如式(1)和式(2)所示。

$$C_i^l(P_{L_i}) = a_i^l P_{L_i}^2 + b_i^l P_{L_i} + c_i^l \quad (1)$$

$$E_i^l(P_{L_i}) = e_i^l P_{L_i}^2 + f_i^l P_{L_i} + g_i^l \quad (2)$$

其中, C_i^l 为用户 i 消耗化石能源的成本函数; E_i^l 为用户 i 的排放函数; P_{L_i} 为满足用户 i 能源需求的等效用电量(即用户 i 的电能替代量); a_i^l, b_i^l, c_i^l 为成本函数参数; e_i^l, f_i^l, g_i^l 为排放函数参数。

实施电能替代后,终端用户依靠电网电力提供能源,此时需要电厂增发电量以供应终端用户。发电机发电成本及排放函数分别为:

$$C_j^e(P_{G_j}) = a_j^e P_{G_j}^2 + b_j^e P_{G_j} + c_j^e \quad (3)$$

$$E_j^e(P_{G_j}) = e_j^e P_{G_j}^2 + f_j^e P_{G_j} + g_j^e \quad (4)$$

其中, C_j^e 为发电机 j 的发电成本函数; E_j^e 为发电机 j 的排放函数; P_{G_j} 为发电机 j 的发电量; a_j^e, b_j^e, c_j^e 为发电机 j 的成本函数参数; e_j^e, f_j^e, g_j^e 为发电机 j 的排放函数参数。

忽略网络阻塞,终端用户 i 接入电网后(此时记为电能替代负荷 i),电网调度的目标是在满足供需平衡和各机组出力限制的约束条件下,合理安排各发电机组的有功出力,使系统的运行成本和排放量最小。为确定此时各发电机的增发电量,建立多目标优化调度模型如下:

$$\begin{cases} \min \sum_{j=1}^{N_G} C_j^e(P_{G_j}) \\ \min \sum_{j=1}^{N_G} E_j^e(P_{G_j}) \\ \text{s.t.} \sum_{j=1}^{N_G} P_{G_j} = \sum_i P_{L_i} \\ P_{G_j, \min} \leq P_{G_j} \leq P_{G_j, \max} \end{cases} \quad (5)$$

其中, N_G 为系统发电机总数; $P_{G_j, \min}$ 和 $P_{G_j, \max}$ 分别为发电机 j 有功出力的下限和上限。考虑到污染排放价格,将多目标函数转化为单目标优化函数,如式(6)所示。

$$\min \left[\sum_{j=1}^{N_G} C_j^e(P_{G_j}) + \gamma \sum_{j=1}^{N_G} E_j^e(P_{G_j}) \right] \quad (6)$$

其中, γ 为污染排放单位成本(\$/lb)。

因此,电能替代的经济效益和环境效益表达式分别如式(7)、式(8)所示。

$$\Delta C = \sum_i C_i^l(P_{L_i}) - \sum_{j=1}^{N_G} C_j^e(P_{G_j}) \quad (7)$$

$$\Delta E = \sum_i E_i^l(P_{L_i}) - \sum_{j=1}^{N_G} E_j^e(P_{G_j}) \quad (8)$$

2 电能替代效益分摊

本节采用基于合作博弈的成本(效益)分摊方法分摊电能替代效益。多利益主体共同使用某资源时必然会产生相应的成本,而基于合作博弈论的成本(效益)分摊方法则是解决多利益主体成本(效益)分摊问题的有效方法^[11]。基于合作博弈的成本(效益)分摊方法首先将单个成员的成本直接分摊给该成员,然后将合作产生的效益按一定原则分配给各成员,再将这2个数值相减,最终得到各成员应承担的成本。在合作博弈的多种方法中,核仁和Shapley值法是经济学上解决成本(效益)分摊问题最常用的方法。

2.1 核仁分摊方法^[16-19]

假设:

$$X^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_i^k, \dots, x_n^k\} \quad (9)$$

$$Y^k = \{y_1^k, y_2^k, \dots, y_i^k, \dots, y_n^k\} \quad (10)$$

其中, $k=c, e, k=c$ 表示运行成本, $k=e$ 表示排放减少量; X^k 为各电能替代负荷分摊到的运行成本(运行成本为传统能源成本和发电成本之和)/排放减少量的集合; Y^k 为相应运行成本/排放减少量的转归集合; n 为电能替代负荷数。

核仁是基于最小核心进行分摊,其表达式如式(11)~(13)所示。

$$I^k(S) = v^k(S) - \sum_{i \in S} v^k(i) \quad (11)$$

$$e^k(S, y^k) = I^k(S) - \sum_{i \in S} y_i^k \quad (12)$$

$$\begin{cases} C^{+k}(\varepsilon^k) = \{y^k \in Y^k \mid \varphi^k(y^k) \leq \varepsilon^k\} \\ \varphi^k(y^k) = \max_{S \in N} e^k(S, y^k) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $k=c, e$; $v^k(S)$ 为由电能替代负荷联盟 S 产生的运行成本/排放减少量; $v^k(i)$ 为由电能替代负荷 i 产生的运行成本/排放减少量; $I^k(S)$ 为由于电能替代负荷联盟 S 中各负荷之间的交互作用产生的运行成本/排放减少量; $e^k(S, y^k)$ 为联盟 S 在运行成本/排放减少量的转归 $y^k \in Y^k$ 处的超出值; ε^k 为任意小的实数; $C^{+k}(\varepsilon^k)$ 为所有满足条件 $\varphi^k(y^k) \leq \varepsilon^k$ 的转归集合; N 为由所有电能替代负荷组成的全局联盟; $\varphi^k(y^k)$ 为超出值的最大值。

式(13)可以采用线性规划来实现,即:

$$\begin{cases} \min \varepsilon^k \\ \text{s.t. } I^k(S) = \sum_{i \in S_1} y_i^k \\ I^k(S) - \sum_{i \in S_2} y_i^k \leq \varepsilon^k \end{cases} \quad (14)$$

其中, $k=c, e$; S_1 为全体电能替代负荷的集合; S_2 为电能替代负荷的所有非空子集。

每个电能替代负荷的运行成本/排放减少分摊量,应该为每个电能替代负荷分摊的由交互作用产生的运行成本/排放减少量与每个电能替代负荷单独作用时的运行成本/排放减少量之和,即如式(15)、(16)所示。

$$x_i^c = y_i^c + v^c(i) \quad (15)$$

$$x_i^e = y_i^e + v^e(i) \quad (16)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n$ 。

2.2 Shapley 值分摊方法^[19-20]

基于 Shapley 值的运行成本/排放减少量的分摊结果计算公式为:

$$\phi_i^k(v) = \sum_{i \in S} \{W(|S|)[V^k(S) - V^k(S - \{i\})]\} \quad (17)$$

$$W(|S|) = \frac{(n-|S|)! (|S|-1)!}{n!} \quad (18)$$

其中, $\phi_i^k(v)$ 为电能替代负荷 i 的运行成本/排放减少分摊量; $|S|$ 为联盟 S 中的电能替代负荷数目; $V^k(S) - V^k(S - \{i\})$ 为由于电能替代负荷 i 加入联盟 S 给联盟带来的运行成本/排放减少值; $n!$ 为全局联盟(全部电能替代负荷)所有可能电能替代负荷加入次序的排列。Shapley 值只考虑电能替代负荷 i 最后一个加入联盟 S 且其加入次序先于联盟 S 之外所有成员的排列; $(|S|-1)!$ 表示满足电能替代负荷 i 最后一个加入联盟 S 的排列数目, $(n-|S|)!$ 表示满足电能替代负荷 i 的加入次序先于联盟 S 中其他成

员的排列数目, Shapley 值以相同的比例 $1/n!$ 向这些电能替代负荷分摊联盟 S 的边际收益, 因此 $W(|S|)$ 代表一个权值, 表示电能替代负荷 i 应该得到的联盟 S 边际收益的份额。

3 算例分析

某系统有 5 台发电机组, 接有 3 个终端用户负荷。实施电能替代前, 3 个终端用户直接使用传统化石能源, 综合参考文献[21-23], 得到其经济参数和排放因子见表 1; 实施电能替代后, 3 个终端用户接入电网使用电能替代传统化石能源, 系统中 5 台发电机组的经济参数、出力上下限及排放因子见表 2, 发电机经济参数参考文献[24], 排放因子参考文献[25]。

实施电能替代后, 假设某个时段的电能替代负荷分别为 $L_1=50 \text{ MW}$ 、 $L_2=100 \text{ MW}$ 、 $L_3=200 \text{ MW}$, 污染排放单位成本为 $\gamma=0.002 \text{ \$/lb}$ 。按合作博弈理论将这 3 个负荷视为 3 个局中人, 全局局中人集合以及每个非空子集都形成一个联盟, 共有 7 个联盟。采用优化调度模型(式(6)所示目标函数与式(5)中约束条件所构成的优化问题)分别计算每个联盟下的发电机出力情况以及运行成本和排放减少量(基本量为各用户未采用电能替代时的系统运行成本和排放量), 通过计算可以得到运行成本及排放基本量分别为 $\$9\,842.9$ 和 866.1 lb 。表 3 为各联盟的发电机出力情况以及运行成本和排放减少量。

从表 3 可以看出, 运行成本/排放减少量的计算结果具有下列特征:

a. 由 2 个电能替代负荷联盟所得到的运行成本/排放量减少值小于这 2 个电能替代负荷单独作用引起的运行成本/排放量减少值之和;

b. 由 3 个电能替代负荷联盟所得到的运行成本/排放量减少值小于其中任意 2 个电能替代负荷

表 1 传统化石能源参数

Table 1 Parameters of traditional fossil energy

负荷	$a_i^l/$ ($\$ \cdot \text{MW}^{-2}$)	$b_i^l/$ ($\$ \cdot \text{MW}^{-1}$)	$c_i^l/\$$	$e_i^l/$ ($\text{lb} \cdot \text{MW}^{-2}$)	$f_i^l/$ ($\text{lb} \cdot \text{MW}^{-1}$)	g_i^l/lb
1	0.009 41	9.61	405.6	0.004 702	0.186 4	108.001 2
2	0.008 98	11.57	441.6	0.006 652	0.052 4	98.005 6
3	0.014 08	10.18	500.9	0.005 654	0.202 3	70.018 6

表 2 5 机系统发电机参数

Table 2 Generator parameters of five-unit system

发电机	$a_j^g/$ ($\$ \cdot \text{MW}^{-2}$)	$b_j^g/$ ($\$ \cdot \text{MW}^{-1}$)	$c_j^g/\$$	$e_j^g/$ ($\text{lb} \cdot \text{MW}^{-2}$)	$f_j^g/$ ($\text{lb} \cdot \text{MW}^{-1}$)	g_j^g/lb	$P_{Gj,\min}/\text{MW}$	$P_{Gj,\max}/\text{MW}$
G1	0.006 0	9.5	389	0.001 19	-0.229 87	45.859 3	0	332.4
G2	0.007 0	8.5	420	0.002 19	-0.127 67	66.867 9	0	140.0
G3	0.007 3	8.0	396	0.002 23	-0.345 51	32.266 9	0	100.0
G4	0.008 0	7.4	320	0.001 21	-0.113 45	46.876 5	0	100.0
G5	0.006 5	9.0	405	0.002 31	-0.411 16	58.895 5	0	100.0

表 3 各联盟的运行成本和排放减少值

Table 3 Operation cost and emission reduction of all coalitions

联盟	发电机出力/MW					$\Delta C/\$$	$\Delta E/\text{lb}$
	G1	G2	G3	G4	G5		
\emptyset	0	53.7	85.8	100.0	19.5	0	0
{1}	0	71.0	100.0	100.0	38.0	441.2	130.76
{2}	17.7	86.5	100.0	100.0	54.8	739.8	175.05
{3}	53.6	117.4	100.0	100.0	88.0	1 158.7	340.01
{1,2}	35.7	102.0	100.0	100.0	71.4	1 158.4	304.71
{1,3}	74.1	134.9	100.0	100.0	100.0	1 555.5	462.95
{2,3}	119.0	140.0	100.0	100.0	100.0	1 802.6	501.23
{1,2,3}	169.0	140.0	100.0	100.0	100.0	2 150.8	624.66

联盟引起的运行成本/排放量减少值与另一个电能替代负荷单独作用引起的运行成本/排放量减少值之和。

造成上述特点的原因是各电能替代负荷之间的交互作用产生了交叉项,使得总的运行成本/排放减少量小于各电能替代负荷单独作用时引起的运行成本/排放量减少值之和。因此,联盟的运行成本/排放量减少值与电能替代负荷加入联盟的次序有很大的关系。为了克服这个问题,可以将该分摊问题看成一个合作博弈问题,然后通过核仁或 Shapley 值法进行分摊。

3.1 核仁分摊

首先对运行成本减少量进行分摊计算,当各个电能替代负荷单独作用时,运行成本减少量分别为 $v^c(\{1\}) = \$441.2$ 、 $v^c(\{2\}) = \$739.8$ 、 $v^c(\{3\}) = \$1 158.7$;当 2 个电能替代负荷组成的联盟作用时,运行成本减少量分别为 $v^c(\{1,2\}) = \$1 158.4$ 、 $v^c(\{1,3\}) = \$1 555.5$ 、 $v^c(\{2,3\}) = \$1 802.6$;当所有电能替代负荷组成的联盟作用时,需要进行分摊的运行成本减少量为 $v^c(\{1,2,3\}) = \$2 150.8$ 。

由式(11)计算各负荷联盟因交互作用产生的运行成本减少量(单位均为\$),即:

$$I^c(\{1\}) = v^c(\{1\}) - v^c(\{1\}) = 0 \quad (19)$$

$$I^c(\{2\}) = 0, I^c(\{3\}) = 0 \quad (20)$$

$$I^c(\{1,2\}) = v^c(\{1,2\}) - v^c(\{1\}) - v^c(\{2\}) = -22.6 \quad (21)$$

$$I^c(\{1,3\}) = -44.4, I^c(\{2,3\}) = -95.9 \quad (22)$$

$$I^c(\{1,2,3\}) = v^c(\{1,2,3\}) - v^c(\{1\}) - v^c(\{2\}) - v^c(\{3\}) = -188.9 \quad (23)$$

将式(19)——(23)代入式(14),得:

$$\begin{aligned} & \min \mathcal{E}^c \\ & y_1^c, y_2^c, y_3^c \\ \text{s.t. } & y_1^c + y_2^c + y_3^c = -188.9 \\ & \mathcal{E}^c \geq -y_1^c \\ & \mathcal{E}^c \geq -y_2^c \\ & \mathcal{E}^c \geq -y_3^c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^c & \geq -22.6 - y_1^c - y_2^c \\ \mathcal{E}^c & \geq -44.4 - y_1^c - y_3^c \\ \mathcal{E}^c & \geq -95.9 - y_2^c - y_3^c \end{aligned} \quad (24)$$

对式(24)进行求解,交互作用项的分摊结果分别为: $y_1^c = \$ -34.685$ 、 $y_2^c = \$ -71.065$ 、 $y_3^c = \$ -83.150$ 。

由式(15)得,每个电能替代负荷应该分摊的运行成本减少量分别为: $x_1^c = \$ 406.5$ 、 $x_2^c = \$ 668.7$ 、 $x_3^c = \$ 1 075.6$ 。

同理可以计算出每个电能替代负荷应该分摊的排放减少量,计算结果见表 4。

表 4 2 种分摊方式下运行成本/排放量减少值分摊结果

Table 4 Allocation results of operation cost/emission reduction for two methods

负荷	核仁分摊法		Shapley 值分摊法	
	$\Delta C/\$$	$\Delta E/\text{lb}$	$\Delta C/\$$	$\Delta E/\text{lb}$
1	406.5	126.65	399.0	126.83
2	668.7	168.04	671.9	168.12
3	1 075.6	329.98	1 079.9	329.72
总和	2 150.8	624.67	2 150.8	624.67

3.2 Shapley 值分摊

同 3.1 节,首先对运行成本减少量进行分摊计算。由式(17)、(18)计算电能替代负荷 1 分摊到的运行成本减少量为:

$$\begin{aligned} \phi_1^c &= \frac{0! \times 2!}{3!} [V(\{1\}) - V(\{1\} - \{1\})] + \\ & \frac{1! \times 1!}{3!} [V(\{1,2\}) - V(\{2\})] + \\ & \frac{1! \times 1!}{3!} [V(\{1,3\}) - V(\{3\})] + \\ & \frac{2! \times 0!}{3!} [V(\{1,2,3\}) - V(\{2,3\})] = \$399.1 \end{aligned} \quad (25)$$

同理,可求得电能替代负荷 2、3 分摊到的运行成本减少量分别为: $\phi_2^c = \$ 671.9$ 、 $\phi_3^c = \$ 1 079.9$ 。

采用同样的方法对排放减少量进行分摊计算,分摊结果见表 4。

3.3 分摊结果分析

将核仁与 Shapley 值的分摊结果进行对比,发现这 2 种分摊方法的分摊结果相近。以运行成本减少量为例,各个联盟的合作收益分别为 $V(\{1\}) = 0$ 、 $V(\{2\}) = 0$ 、 $V(\{3\}) = 0$ 、 $V(\{1,2\}) = \$ 22.6$ 、 $V(\{1,3\}) = \$ 44.4$ 、 $V(\{2,3\}) = \$ 95.9$ 、 $V(\{1,2,3\}) = \$ 188.9$ 。下面对该分摊问题是否为凸博弈进行验证(单位均为\$)。

$$\begin{aligned} V(\{1\}) + V(\{2\}) &= 0 < V(\{1,2\}) = 22.6 \\ V(\{1\}) + V(\{3\}) &= 0 < V(\{1,3\}) = 44.4 \\ V(\{2\}) + V(\{3\}) &= 0 < V(\{2,3\}) = 95.9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V(\{1\})+V(\{2,3\}) &= 95.9 < \\
 V(\{1,2,3\}) &= 188.9 \\
 V(\{2\})+V(\{1,3\}) &= 44.4 < \\
 V(\{1,2,3\}) &= 188.9 \\
 V(\{3\})+V(\{1,2\}) &= 22.6 < \\
 V(\{1,2,3\}) &= 188.9 \\
 V(\{1,2\})+V(\{1,3\}) &= 67 < \\
 V(\{1,2,3\})+V(\{1\}) &= 188.9 \\
 V(\{1,2\})+V(\{2,3\}) &= 118.5 < \\
 V(\{1,2,3\})+V(\{2\}) &= 188.9 \\
 V(\{1,3\})+V(\{2,3\}) &= 140.3 < \\
 V(\{1,2,3\})+V(\{3\}) &= 188.9
 \end{aligned}$$

同理可得到各联盟排放减少量的合作收益也满足上述条件,因此本文考虑的电能替代效益分摊问题是凸博弈,这就是核仁和 Shapley 值法的分摊结果相近的原因。

从表 4 的分摊结果可以看出,无论对单个电能替代负荷还是电能替代负荷联盟,2 种分摊方法的分摊结果均满足个体理性、联盟理性、全局理性。

a. 对单个电能替代负荷而言,该负荷分摊到的运行成本/排放量减少值小于该负荷单独作用时产生的运行成本/排放量减少值(运行成本减少值单位均为 \$,排放量减少值单位为 lb,后同):

$$\begin{cases}
 x_1^e = 406.5 < v^e\{1\} = 441.2 \\
 x_2^e = 668.7 < v^e\{2\} = 739.8 \\
 x_3^e = 1075.6 < v^e\{3\} = 1\ 158.7 \\
 \\
 x_1^e = 126.65 < v^e\{1\} = 130.76 \\
 x_2^e = 168.04 < v^e\{2\} = 175.05 \\
 x_3^e = 329.98 < v^e\{3\} = 340.01
 \end{cases}$$

b. 对电能替代负荷联盟而言,联盟中每个负荷分摊的运行成本/排放量减少值之和小于该电能替

代负荷联盟的运行成本/排放量减少值:

$$\begin{cases}
 x_1^e + x_2^e = 1\ 075.2 < v^e\{1,2\} = 1\ 158.4 \\
 x_1^e + x_3^e = 1\ 482.1 < v^e\{1,3\} = 1\ 555.5 \\
 x_2^e + x_3^e = 1\ 744.3 < v^e\{2,3\} = 1\ 802.6 \\
 \\
 x_1^e + x_2^e = 294.69 < v^e\{1,2\} = 304.71 \\
 x_1^e + x_3^e = 456.63 < v^e\{1,3\} = 462.95 \\
 x_2^e + x_3^e = 498.02 < v^e\{2,3\} = 501.23
 \end{cases}$$

c. 对整个分摊方案而言,整个分摊是收支平衡的:

$$\begin{aligned}
 x_1^e + x_2^e + x_3^e &= 2\ 150.8 = v^e\{1,2,3\} \\
 x_1^e + x_2^e + x_3^e &= 624.7 = v^e\{1,2,3\}
 \end{aligned}$$

通过核仁和 Shapley 值分摊法,每个负荷都能分配到一个合理的电能替代效益值,该值不受联盟中电能替代负荷加入次序的影响,这样的分摊结果对各个负荷而言都是公平的,亦即实现了电能替代效益的公平分摊,有利于实现电能替代电价的合理补偿。表 5 给出了不同负荷量下 3 个电能替代负荷运行成本/排放量减少值分摊结果,对比表 5 中第 1—3 行可以发现,当电能替代负荷 2 和负荷 3 不变时,随着电能替代负荷 1 的负荷量增加,负荷 1 的运行成本和排放减少分摊量增加,而电能替代负荷 2 和负荷 3 的运行成本和排放减少分摊量虽减少但变化不大;对比表中第 4—6 行,当电能替代负荷 1,负荷 2 和负荷 3 均增加时,3 个负荷的效益分摊量也都增加,以上规律说明某用户的电能替代负荷量越大,意味着该用户参与电能替代的程度越明显,因而其效益分摊量也越大。综上可知,基于合作博弈论的电能替代效益分摊方法体现了按贡献分摊的原则,能够被合作各方视为公平,从而激励用户参与电能替代,为后续电能替代电价制度的制定奠定基础,推动电能替代的发展。

表 5 不同电能替代负荷下系统运行成本/排放量减少值分摊结果

Table 5 Allocation results of operation cost/emission reduction under different electric energy substitution levels

负荷 1/MW	负荷 2/MW	负荷 3/MW	核仁分摊法						Shapley 值分摊法					
			ΔC/\$			ΔE/lb			ΔC/\$			ΔE/lb		
			负荷 1	负荷 2	负荷 3	负荷 1	负荷 2	负荷 3	负荷 1	负荷 2	负荷 3	负荷 1	负荷 2	负荷 3
50	100	100	418.63	706.81	678.11	129.66	168.09	145.12	418.89	706.67	677.97	127.79	169.03	146.05
100	100	100	465.39	693.09	664.39	171.94	168.04	145.06	465.39	693.09	664.39	171.94	168.04	145.06
150	100	100	536.06	676.12	647.42	237.60	166.44	143.46	541.80	673.26	644.56	236.30	167.09	144.11
80	80	80	451.08	641.13	621.87	152.68	144.44	122.06	451.08	641.13	621.87	152.68	144.44	122.06
100	100	100	465.39	693.09	664.39	171.94	168.04	145.06	465.39	693.09	664.39	171.94	168.04	145.06
150	150	150	472.12	792.44	757.99	228.44	242.22	214.26	472.12	792.44	757.99	228.44	242.22	214.26

4 结论

实施电能替代,实现终端负荷从燃油、燃煤到用电的转变,能有效降低用能成本,减少污染排放,从而推动节能减排战略的实施。

为了提高终端用户参与电能替代的积极性,本

文运用了基于合作博弈论的成本(效益)分摊方法来分摊电能替代效益,通过对 5 机系统进行电能替代效益分摊计算表明,基于合作博弈论的电能替代效益分摊方法可以满足公平性要求,能够激励终端用户参与到电能替代之中,从而推动电能替代的发展。

参考文献:

- [1] 王伟,黄珂. 电能替代战略:机遇、挑战与政策选择[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2014(4):1-5.
WANG Wei, HUANG Ke. The strategy of electric power alternation: opportunities, challenges and policy options[J]. Journal of North China Electric Power University(Social Sciences), 2014(4):1-5.
- [2] 孙毅,许鹏,单葆国,等. 售电侧改革背景下“互联网+”电能替代发展路线[J]. 电网技术,2016,40(12):3648-3654.
SUN Yi, XU Peng, SHAN Baoguo, et al. Road map for “Internet Plus” energy substitution in electricity retail market reform in China[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3648-3654.
- [3] 孙毅,周爽,单葆国,等. 多情景下的电能替代潜力分析[J]. 电网技术,2017,41(1):118-123.
SUN Yi, ZHOU Shuang, SHAN Baoguo, et al. Analysis of electric power alternative potential under multi-scenario[J]. Power System Technology, 2017, 41(1):118-123.
- [4] 孙毅,石墨,单葆国,等. 基于粒子群优化支持向量机的电能替代潜力分析方法[J]. 电网技术,2017,41(6):1767-1771.
SUN Yi, SHI Mo, SHAN Baoguo, et al. Electric energy substitution potential analysis method based on particle swarm optimization support vector machine[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1767-1771.
- [5] 曲子清,辛洁晴,吴亮,等. 商业用户电能采暖替代技术选型的边界条件论证[J]. 电力系统自动化,2016,40(13):48-54.
QU Ziqing, XIN Jieqing, WU Liang, et al. Argument on boundary conditions of selection electric energy substitution technologies with electric heating for commercial customers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13):48-54.
- [6] 李娟,周红莲,周二彪,等. 计及风速-电锅炉等电采暖负荷相关性的配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):26-31.
LI Juan, ZHOU Honglian, ZHOU Erbiao, et al. Reliability evaluation of distribution network considering correlation between wind speed and electricity heating load such as electricity boiler[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):26-31.
- [7] 国家发展改革委. 关于推进电能替代的指导意见[EB/OL]. (2016-05-16) [2017-10-23]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201605/t20160524_804425.html.
- [8] 胡朝阳,甘德强,韩祯祥,等. 市场机制下机组启动费用的分摊研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(20):1-11.
HU Zhaoyang, GAN Deqiang, HAN Zhenxiang, et al. Study on allocation of unit start-up costs under power market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20):1-11.
- [9] 鲁粟,彭建春,黄攀,等. 输电网合作投资费用的计算与分摊[J]. 电力自动化设备,2005,25(1):17-20.
LU Li, PENG Jianchun, HUANG Pan, et al. Computation and allocation of transmission cooperative investment costs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1):17-20.
- [10] ZOLEZZI J M, RUDNICK H. Transmission cost allocation by cooperative games and coalition formation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4):1008-1015.
- [11] 周明,殷毓灿,黄越辉,等. 考虑用户响应的动态尖峰电价及其博弈求解方法[J]. 电网技术,2016,40(11):3348-3354.
ZHOU Ming, YIN Yucan, HUANG Yuehui, et al. Dynamic critical peak price and its gaming approach considering costumers' response[J]. Power System Technology, 2016, 40(11):3348-3354.
- [12] SHALOUDEGI K, MADINEHI N, ABYANEH H A, et al. A novel policy for locational marginal price calculation in distribution systems based on loss reduction allocation using game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):811-820.
- [13] FARSANI E A, ABYANEH H A, HOSSEINIAN S H. A novel policy for LMP calculation in distribution networks based on loss and emission reduction allocation using nucleolus theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1):143-152.
- [14] TSUKAMOTO Y, IYODA I, CORP M E. Allocation of fixed transmission cost to wheeling transactions by cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2):620-629.
- [15] HU Z Y, CHEN L, GAN D Q, et al. Allocation of unit start-up costs using cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2):653-662.
- [16] 甘德强,杨莉,冯冬涵. 电力经济与电力市场[M]. 北京:机械工业出版社,2010:57-60.
- [17] 周兴华,杜松怀. 双边交易电力市场下基于核仁理论的网损分摊方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(1):60-65.
ZHOU Xinghua, DU Songhuai. A novel nucleolus theory based allocation method of power losses in bilateral electricity markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1):60-65.
- [18] DU S H, ZHOU X H, MO L, et al. A novel nucleolus-based loss allocation method in bilateral electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1):28-33.
- [19] STAMTSIS G C, ERLICH I. Use of cooperative game theory in power system fixed-cost allocation[J]. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(3):401-406.
- [20] TAN X, LIE T T. Application of the Shapley value on transmission cost allocation in the competitive power market environment[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1):15-20.
- [21] 国务院第一次全国污染源普查领导小组. 第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册[EB/OL]. [2017-10-23]. <http://www.docin.com/p-393983353.html>.
- [22] 国家环境保护总局. 排污申报登记实用手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,2004:539.
- [23] 俞晓. 到港船舶使用岸电的环境效益和经济效益研究[D]. 上海:复旦大学,2013.
YU Xiao. Environmental and economic benefits of vessels using shore-power[D]. Shanghai:Fudan University, 2013.
- [24] ZWE L G. Constrained dynamic economic dispatch solution using particle swarm optimization[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. New York, USA:IEEE, 2004:153-158.
- [25] LI X B. Study of multi-objective optimization and multi-attribute decision-making for economic and environmental power dispatch[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(5):789-795.

作者简介:



陈星莺

陈星莺(1964—),女,江苏无锡人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为配用电规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制、高效用电与节能、能源管理与能源经济(**E-mail**:xychen@hhu.edu.cn);

郁清云(1995—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场与电力经济(**E-mail**:yuyingyun138136@163.com);

谢俊(1979—),男,安徽安庆人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统优化运行与电力市场(**E-mail**:eejxie@qq.com)。

(下转第44页 continued on page 44)

ternational Journal of Time Use, 2004, 1(1):37-59.

- [19] ZHU Zhicheng, WEI Zhiqiang, YIN Bo, et al. A novel approach for event detection in non-intrusive load monitoring[C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2017: 1-5.
- [20] 王闯, 燕达, 丰晓航, 等. 基于马氏链与事件的室内人员移动模型[J]. 建筑科学, 2015, 31(10): 188-198.
WANG Chuang, YAN Da, FENG Xiaohang, et al. A Markov chain and event based model for building occupant movement process[J]. Building Science, 2015, 31(10): 188-198.
- [21] NISSAN USA. Specifications of 2016 Nissan LEAF[EB/OL]. [2017-09-06]. <http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/versions-specs/version.sv.html>.

作者简介:



葛少云

葛少云(1964—),男,河北曲阳人,教授,博士,主要研究方向为城市电网规划与电力系统优化运行等(E-mail: syge@tju.edu.cn);

李吉峰(1991—),男,吉林吉林人,博士研究生,主要研究方向为城市电网规划与可靠性(E-mail: lijifeng2014@163.com);

刘洪(1979—),男,天津人,副教授,博士,研究方向为城市电网规划、综合能源系统运行与规划等(E-mail: liuhong@tju.edu.cn)。

Modelling of household energy consumption characteristics considering physical features and behavior factors

GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, WANG Yiran, ZHANG Peng

(Key Laboratory of Smart Grid, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problem that modelling and prediction of conventional load do not consider user behavior characteristics and need to take massive historical data as the research basic, a modelling method of household energy consumption characteristics with the consideration of physical features and behavior factors is proposed. Taking the household energy center as the research object, the overall analysis flowchart is introduced, meanwhile the external demand, internal conversion and terminal energy load type are induced. Considering the physical features and behavior factors, the energy consumption model of electrical equipment is built and its expansion method is proposed. On this basis, the user energy consumption behavior is simulated with the combination of non-intrusive load decomposition and Markov chain. Case analysis shows that, the proposed method has the ability to depict load portrait curve independently and no longer depends on massive data for derivation drive.

Key words: household user; load prediction; energy consumption detail; Markov chain; modelling

(上接第 35 页 continued from page 35)

Benefit allocation method for electric energy substitution based on cooperative game theory

CHEN Xingying, YU Qingyun, XIE Jun, YU Kun

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Electric energy substitution has practical significance in implementing energy saving and environmental protection policy and realizing strategic energy transition. In order to properly and reasonably allocate the benefit of electric energy substitution to power customers and encourage them to participate in electric energy substitution, an allocation method for sharing the benefits of electric energy substitution is proposed based on the cooperative game theory. The value of electric energy substitution in reducing operation cost and emission is analyzed and quantified. Nucleolus and Shapley value methods are adopted to allocate the benefit of electric energy substitution based on the cooperative game theory. Case verifies the effectiveness and rationality of the proposed method.

Key words: electric energy substitution; cooperative game theory; benefit allocation; nucleolus method; Shapley value method