УДК 621.311.001.57, 519.83

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКТИВНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ УЧАСТИИ В КООПЕРАЦИИ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Н.И. Айзенберг
Институт систем энергетики ми. Л.А. Мелентьева СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 130
E-mail: zen@isem.irk.ru

Е.А. Барахтенко
Институт систем энергетики ми. Л.А. Мелентьева СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 130
E-mail: barakhtenko@isem.irk.ru

Г.С. Майоров
Институт систем энергетики ми. Л.А. Мелентьева СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 130
E-mail: mayorovgs@isem.irk.ru

Ключевые слова: интегрированные энергетические системы; мультиагентный подход; распределенная генерация; активные потребители; вектор Шепли.

Аннотация: В связи с увеличением количества активных потребителей в энергетических системах, требуется разработка новых методов для эффективного управления. Необходимо разработать механизмы взаимодействия активных потребителей между собой и с централизованной системой, чтобы получить наибольший экономический эффект от их совместной работы. В докладе предлагается методика поиска решения справедливого распределения затрат между активными потребителями при участии в кооперации в интегрированной энергетической системе.

1. Введение

Целью нашего исследования является моделирование и оптимизация ИЭС, состоящей из объектов совместной генерации электроэнергии, тепла, холода и газа, находящихся на различных иерархических уровнях управления этой системы. В результате планируется создать методику определения оптимальной конфигурации системы, в том числе определить логику внутренних взаимосвязей активных потребителей и централизованной ИЭС. Основным критерием оптимального планирования функционирования системы является минимизация суммарных издержек потребителей или максимизации общественного благосостояния при полной информированности участников обмена. Известно, что равновесие, получаемое в соответствии с таким критерием, является не устойчивым, так как в объединенной системе часть потребителей будет выигрывать за счёт других. Одной из возможностей является достижение оптимального решения при соблюдении интересов всех участников формирование коалиций, состоящих из активных потребителей, на разных уровнях системы [1, 2]. Внутри коалиции участники могут обмениваться между собой информацией и полезностью от приобретаемой энергии. Последнее предполагает перераспределение совокупного дохода, получаемого коалицией. Здесь применимы подходы кооперативной теории игр, предлагающие решения по дележу совместной выгоды, удовлетворяющей всех участников коалиции. При этом полученное решение должно улучшать (или не изменять) результат, который участники могут получить, не вступая в коалицию (Парето улучшение) [3].

2. Описание методики поиска решения по справедливому распределению затрат между активными потребителями при участии в кооперации

В представленной работе используется представление о «справедливом» распределении выигрыша $v(N)$ между игроками на основе понятия утилитаризма. Утилитаризм считает справедливым эффективное распределение, приводящее к наибольшему значению суммы полезностей членов общества.

Приведем теоретические положения, на которых основана предлагаемая методика.

Пусть имеется множество участников (активных потребителей) N, которые могут в рамках распределенной подсистемы действовать:

а) в своих интересах $\{i\} \in N$;

б) вступая в коалицию с другими участниками $S_k \subseteq N$, $k = \overline{1,M}$. Коалиции могут быть разной величины $S = (S_1,...,S_M) \subseteq N$, где $S_k \cap S_l = \varnothing$ при $k \neq l$, $U_{\forall k} S_k = N$.

Выигрышем каждого *i-го* участника называется функция, зависящая от вектора потребления энергии $P_d^{i,\tau} = \left(P_{de}^{i,\tau}, P_{dh}^{i,\tau}, P_{dg}^{i,\tau}, P_{dc}^{i,\tau}\right)$:

(1) $$v(\{i\}) = \sum\nolimits_{\tau} \pi\left(P_d^{i,\tau}\right) - \sum\nolimits_{\tau} c_d\left(P_d^{i,\tau}\right)$$

где $\pi(\cdot)$ и $c(\cdot)$ представляют собой функции полезности от полученной энергии и функции стоимость для участника $i \in N$. Каждый участник стремиться увеличить свой выигрыш (эффект) от выбранного вектора потребляемой энергии. Функция $v(\cdot)$ называется характеристической.

В рамках коалиции S характеристическая функция выигрыша определится, как

(2) $$v(S) = \sum\nolimits_{\tau} \pi\left(P_d^{S,\tau}\right) - \sum\nolimits_{\tau} c_d\left(P_d^{S,\tau}\right).$$

Задача состоит в том, чтобы каждый участник, вступая в коалицию S, получил выигрыш больший, чем, если бы действовал вне ее. Эта задача может быть смоделирована как (N,S,v) - коалиционная игра в характеристической форме [1, 4] с коалициями S, являющимися разбиениями максимальной коалиции N и имеющими характеристическую функцию выигрыша (1), (2). Необходимо определить дележ для игры (N,S,v), являющийся эффективным распределением выигрыша $x = (x_1, x_2, ..., x_S)$, между участниками $i \in S$, при $\sum\nolimits_{i \in S} x_i \leq v(S)$ и удовлетворяющим условию

(3) $$x_i \geq v(\{i\}), i \in S,$$

Решение кооперативной игры, удовлетворяющее условию (3), называемому индивидуальной рациональностью, предлагает рассматривать только распределения выигрыша, дающие каждому участнику не меньшие, чем он получил бы, действуя в одиночку. В этом случае множество полученных дележей принадлежит C-ядру игры, является решением кооперативной игры и Парето-улучшением относительно некооперативного решения.

Для того, чтобы решение (N,S,v) игры (дележ совместного выигрыша между игроками, удовлетворяющий условию (3)) существовало, необходимо выполнение нескольких условий [3].

1. Игра должна быть супераддитивной: для коалиции $S \subseteq N$

(4) $$\sum_{i \in S} v(\{i\}) \le v(S).$$

2. Игра должна удовлетворять условию сбалансированности игры – условие непустоты C-ядра. Для $\sum_{s,i \in S} \delta_s = 1$

(5) $$\sum_{s \subseteq N} \delta_s v(S) \le v(N).$$

Тогда, дележ x принадлежит C-ядру, когда для всех коалиций $S_k \subseteq N$, $k = \overline{1,M}$ выполняется [2]

(6) $$\sum_{i \in S_k} x_i \ge v(S_k),\ k = \overline{1,M}.$$

Для того, чтобы найти решения, принадлежащие С-ядру, достаточно решить систему неравенств (6). Непустота ядра подтверждает заинтересованность участников в создании коалиции. В тоже время, существует проблема выбора определенного решения, принадлежащего С-ядру. В работе существование С-ядра используется для подтверждения возможности получения совместного выигрыша коалиции. Для расчёта дележа совместного выигрыша между участниками выбран другой подход – вектор Шепли. Вектор Шепли приписывает каждому активному потребителю его средний маржинальный вклад во все коалиции, его содержащие. Для рассматриваемого случая: $S \to v(S)$, $S \subseteq N$ вектор Шепли φ распределяет выигрыш $v(N)$ максимальной коалиции между участниками следующим образом:

(7) $$\varphi_i(v) = \sum_{K \subseteq N} \frac{(k-1)!(n-k)!}{n!} \big(v(K) - v(K-1)\big),\ i \in N,\ k = |K|,$$

где $v(K-1)$ – значение выигрыша коалиции K без участника $\{i\}$.

Разработанная методика поиска решения по справедливому распределению затрат между активными потребителями при участии в кооперации в ИЭС включает следующие шаги:

Шаг 1. Подсчёт суммарных затрат на энергоснабжение активных потребителей в составе разных коалиций. В мультиагентной модели ИЭС выполняется ряд вычислительных экспериментов по взаимодействию активных потребителей в разных коалициях для каждой распределенной системы, количество экспериментов зависит от числа активных потребителей и набора коалиций, которые можно из них составить. В результате проведенных экспериментов определяются суммарные затраты на энергоснабжение активных потребителей для каждого варианта коалиции.

Шаг 2. Вычисление выигрыша для разных коалиций (1), (2). На основании проведенных экспериментов на мультиагентной модели ИЭС определяются выигрыши для каждого варианта коалиции.

Шаг 3. Приведение к нормализованному виду значения выигрышей для каждого варианта коалиции. Деление выигрышей каждой коалиции $v(S)$ на максимальный выигрыш полной коалиции $v(N)$.

Шаг 4. Проверка условия супераддитивности (4).

Шаг 5. Запись системы, описывающей *С*-ядро (6). Определение непустоты C-ядра – проверка сбалансированности игры (5).

Шаг 6. Определение дележа через вектор Шепли для каждого активного потребителя (7).

Шаг 7. Определение выигрыша для каждого активного потребителя. На основании полученных значений дележа, определяем прибыль для каждого активного потребителя при участии в кооперации.

Шаг 8. Определение итоговых суммарных затрат на энергоснабжение активных потребителей с учетом выигрыша. В результате определяем суммарные затраты на энергоснабжение активных потребителей с учетом выигрыша, полученного при участии в кооперации. Для этого от затрат, полученных без кооперации активных потребителей, отнимаем рассчитанный выигрыш.

3. Апробация подхода к организации взаимодействия активных потребителей при участии в кооперации в интегрированной энергетической системе

На тестовой схеме, представленной на рис. 1, выполнялась оценка работоспособности разработанной методики и проводилось исследование взаимодействия элементов ИЭС. Эта схема позволяет наглядно представить поведение агентов и взаимодействие между ними при решении поставленных задачи в данном исследовании. Рассматриваемая тестовая схема ИЭС, включает в себя следующие объекты: 5 обычных потребителей; 7 активных потребителей; 7 тепловых насосов для выработки тепловой энергии; 7 фотоэлектрических систем для выработки электрической энергии; 12 чиллерных установок для производства искусственного холода; 29 ЛЭП; 24 ТМ; 25 ГМ; теплоэлектроцентраль (ТЭЦ); гидроэлектростанция (ГЭС) и конденсационная электростанция (КЭС); две централизованные котельные; газораспределительная станция для подготовки газа нужных параметров и отправки его потребителям.

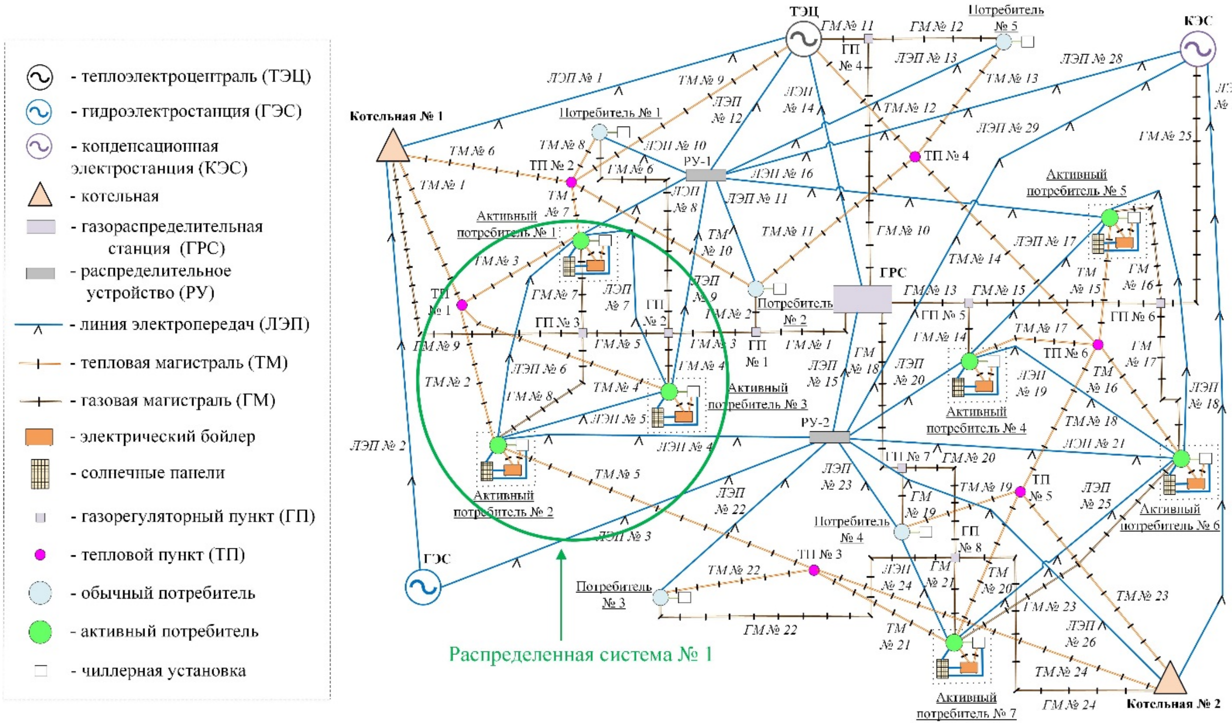

Рис. 1. Тестовая схема интегрированной энергетической системы.

В составе распределенной подсистемы №1, состоящей из трёх активных потребителей под номерами 1, 2 и 3, рассмотрены следующие варианты коалиций:

а) коалиция {активный потребитель № 1, активный потребитель №2, активный потребитель №3} – эксперимент 1;

б) коалиция {активный потребитель №2, активный потребитель №3}, {активный потребитель №1} – эксперимент 2;

в) коалиция {активный потребитель №1, активный потребитель №3}, {активный потребитель №2} – эксперимент 3;

г) коалиция {активный потребитель №1, активный потребитель №2}, {активный потребитель №3} – эксперимент 4;

д) кооперации нет: {активный потребитель №1}, {активный потребитель №2}, {активный потребитель №3} – эксперимент 5.

Согласно разработанной методике мультиагентная модель ИЭС сформировала компромиссное решение по энергоснабжению потребителей в результате взаимодействия агентов и проведенных при этом оптимизационных расчетов с применением разработанных авторами программных компонентов. Расчет производился одновременно для электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения и был нацелен на снижение суммарных затрат для активных потребителей при участии в кооперации в интегрированной энергетической системе. На основании проведенных экспериментов в программной среде AnyLogic в соответствии с разработанной методикой выполнен комплекс расчетов (табл. 1).

Так как в представленном примере спрос активных потребителей представлял из себя некоторую константу и не имел эластичности, первый член в характеристических функциях выигрыша $v(\cdot)$ (1) и (2) зануляется. Поэтому все решения принимаются на основании второй компоненты $v(\cdot)$ – затрат потребителей на снабжение энергией. В соответствие с разработанной методикой расчета итоговые суммарные затраты на энергоснабжение активных потребителей составили: для 1-го активного потребителя 384962 руб.; для 2-го активного потребителя 236982 руб.; для 3-го активного потребителя 177137 руб.

Таблица 1 Затраты на энергоснабжение активных потребителей в разных коалициях.

Вариант коалиции	**1-й активный потребитель**	**2-й активный потребитель**	**3-й активный потребитель**	**Общие затраты**
$\boldsymbol{v(\{1\}), v(\{2\}), v(\{3\})}$	388058	248639	180598	817295
$\boldsymbol{v(\{1,2\}), v(\{3\})}$	620255		180598	800853
$\boldsymbol{v(\{1,3\}), v(\{2\})}$	Издержки участников не изменяются			817295
$\boldsymbol{v(\{2,3\}), v(\{1\})}$	388058	412195		800253
$\boldsymbol{v(\{1,2,3\})}$	799081			

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

Список литературы

1. Prete, C. L., Hobbs, B. F. A cooperative game theoretic analysis of incentives for microgrids in regulated electricity markets // Applied Energy. 2016. No. 169. P. 524-541.
2. Churkin, A., Bialek, J., Pozo, D., Sauma, E., Korgin, N. (). Review of Cooperative Game Theory applications in power system expansion planning // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. No. 145. 111056.
3. Губко М. В., Новиков Д. А. Теория игр в управлении организационными системами. Издание 2. М.: Синтег, 2005. 138 с.
4. Moulin H. Cooperative microeconomics: a game-theoretical introduction. London: Prentice Hall. 1995. 254 p.