

Оптимизационная задача при управлении производством энергии в мультиагентной микроэнергосистеме

А. К. Абд Эльрахим¹, В. А. Шихин²

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва

¹aminkamal90@hotmail.com, ²ShikhinVA@mpei.ru

А. Кузалис

Университет им. Фредерика
Кипр

kouzalis@cytanet.com.cy

Аннотация. Предлагается подход для формализации задачи многокритериальной оптимизации при управлении генерацией в микроэнергосистеме (microgrid), представленной в виде мультиагентной системы (МАС). Предлагаемый в работе подход основан на схеме, разработанной для оценки эффективности функционирования как микрогрид в целом, так и отдельных её фрагментов (агентов-субъектов), что позволяет формализовать процесс интеграции разнородных целевых функций в единые критерии по определенным типовым индексам эффективности функционирования микроэнергосистемы: технические, экономические и экологические критерии. Интеграцию разнородных критериев эффективности предложено производить с применением нечёткой логики.

Ключевые слова: мультиагентная система; микрогрид; эффективность микроэнергосистемы; многокритериальная оптимизация; нечёткая логика

I. ВВЕДЕНИЕ

Микрогрид представляет собой единое объединение разнородных распределенных и централизованных источников энергии, возобновляемых источников энергии, накопителей энергии и разнотипных потребителей. При этом учитывает как возможность совместной работы с системами внешнего энергоснабжения, так и способность работать автономно [1–2].

Микроэнергосистемы относятся к классу сложных динамических систем, под которыми обычно понимаются системы высокой размерности, наличие разветвленной структуры с перекрестными связями, наличие неопределенности различных типов, нелинейностей и др. Как известно, решение задач управления в подобных системах связано с подходами на основе декомпозиции. В этом смысле, МАС-технология предлагает именно такую декомпозицию на основе введения в рассмотрение взаимосвязанных агентов [3–4].

II. МУЛЬТИАГЕНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МИКРОГРИД

А. Предлагаемое унифицированное представление агентов

На рис. 1 приведено формализованное представление агента, принятое в данной работе с учетом основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждения, самонастройка, самооптимизация, коммуникабельность, активность.

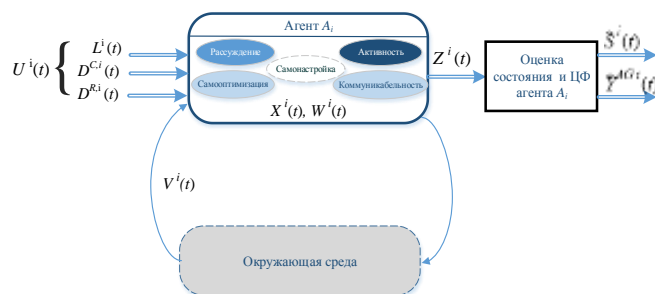


Рис. 1. Формализованное представление агента МАС

$U^i(t)$ — вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой «коммуникация», при этом $U^i(t) = [L^i, D^{C,i}, D^{R,i}]^T$, где L — технологические ограничения агента; $D^{C,i}$ — вектор входных команд; $D^{R,i}$ — вектор входных рекомендаций; $Z(t)$ — вектор выходных переменных, характеризующих протекание физических процессов во времени, по которым идентифицируется состояние агента; $S(t)$ — вектор состояний агента, связанный с его функциональной чертой «активность», а также показатели качества его функционирования Y^{AG} ; $X(t)$ — вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его функциональными чертами «самонастройка» (в отношении параметров) и «рассуждение» (в отношении констант); $W(t)$ — вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его функциональной чертой «самооптимизация»

В. Состояние агента

Под состоянием агента S^i будем понимать вектор, описывающий изменяющиеся во времени технические и/или технологические внутренние параметры. Предлагаемый перечень возможных состояний агентов и способы их оценивания представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

Возможные состояния агентов и способы их оценивания

Наименование состояния	Тип оценки состояния	Источник исходной информации	Оцениватель
$S_{1/2}(t)$ (включен/выключен)	Детерминированный	Выход агента ЦУС (Z^{IVC}) (центр управления и связи)	Не требуется
$S_{3/4}(t)$ (рабочее состояние/ аварийное состояние)	Вероятностный P	Выход i -го агента- (Z^i)	ИНС
$S_{5/6}(t)$ (нарастающий процесс/ убывающий процесс)	Временной ряд y_i	Выход i -го агента- (Z^i)	ARIMA-модель

Наблюдаемость множества состояний S^i агентов является важным свойством, поскольку служит не только источником представления необходимой информации по работоспособности системы, но и существенно влияет на эффективность ее функционирования. Были выделены 3 основных компонента, составляющих вектор состояния агентов $S^i(t)$ (табл. 1):

1. Детерминированное бинарное составляющая $S_{1/2}^i(t) \triangleq Z_{c,i}^{IVC}$, определяющая базовое состояние агента, т.е. соответствующий агент A_i находится во включенном или выключенном состоянии.
2. Вероятностная составляющая $S_{3/4}^i(t) \triangleq P(a^i \leq Z^i \leq b^i)$, где a^i, b^i – пределы как рабочее (исправное) или аварийное состояние. Для оценивания $S_{3/4}(t)$ предлагается использовать искусственную нейронную сеть (ИНС).
3. Составляющая $S_{5/6}^i(t)$ в виде временного ряда $S_{5/6}^i(t) \triangleq ARIMA_i^i = Z^i$, $ARIMA$ – оценка выхода i -го агента на основа $ARIMA$ -модели, описывающей нарастание/убывание значения соответствующего выхода агента A_i . Например, эта составляющая вектора состояний S^i позволяет прогнозировать возможность дисбаланса генерируемой и потребляемой мощностей, и, следовательно, дает возможность избежать дефицита активной мощности в микрогрид. Среди преимуществ $ARIMA$ моделей можно упомянуть: гибкость, позволяющая модели $ARIMA$ описывать большой спектр временных рядов. Кроме того, точечные и интервальные прогнозы следуют из самой модели и не требуют отдельного оценивания.

В итоге, за вектор оценки состояний агента A_i принимается:

$$\hat{S}^i(t) = (\hat{S}_{1/2}^i(t), \hat{S}_{3/4}^i(t), \hat{S}_{5/6}^i(t))^T \quad (1)$$

III. ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОГРИД

В российской, как и в зарубежной литературе [5, 6], большинство подходов к решению оптимизационных задач, связанных с управлением микрогрид формулируется в виде однокритериальной задачи, рассматривающей минимизацию общих эксплуатационных затрат или минимизацию потерь. Также имеются формулировки оптимизационных задач в многокритериальной постановке [7, 8]. Однако, как правило, осуществляется сведение многокритериальной задачи к скалярному случаю, т.е. объединяются технические и экономические показатели, что, согласно мнению большинства экспертов в области создания и эксплуатации микроэнергосистем, является недопустимым [9]. Эффективность функционирования микрогрид не рекомендуется оценивать единым интегрированным показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленное рассмотрение технической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и критериев.

Соответственно, в данной работе предлагается подход к формулированию оптимизационных задач, связанных с повышением эффективности функционирования микроэнергосистемы с учетом мнения отраслевых экспертов относительно раздельного рассмотрения отдельных групповых показателей эффективности. Предложенное в работе мультиагентное представление микроэнергосистемы ведет к совокупному учету показателей эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом.

Основные критерии эффективности функционирования микроэнергосистемы, рассмотренные в этой работе (табл. 2):

1. Качество электроэнергии (КЭ). Качество производимой и отпускаемой потребителям электроэнергии является одним из основных критериев при оценке эффективности функционирования любой энергосистемы и регулируется в соответствии с ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Под КЭ понимается поддержание заданных значений напряжения и частоты, что связано прежде всего с обеспечением баланса мощности в микроэнергосистеме.

2. Экономический критерий (ЭК). Экономический критерий Y_2^{SYS} формируется из трёх составляющих: стоимость генерируемой электроэнергии $y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$, цена для потребителя $y_4^{SYS} \triangleq PR$, прибыль владельца микроэнергосистемы $y_5^{SYS} \triangleq REV$.

3. Надёжность процесса электроснабжения Y_3^{SYS} . Возникновение технологических нарушений в элементах электрической сети и масштабы их последствий зависит от многих случайных факторов. Соответственно,

исследование надёжности сетевых комплексов обосновано в рамках вероятностных категорий. Основные показатели надёжности систем энергоснабжения: CAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (время ремонта); SAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (продолжительность отказа); SAIFI – индекс

средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей (частота отказов) [10].

4. Экологичность Y_4^{SYS} . Экологичность функционирования микрогрид предлагается ограничить рассмотрением выброса парниковых газов (CO_2 , NOX и др.), хотя данные показатели не являются единственными.

ТАБЛИЦА II КРИТЕРИИ И ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Критерий эффективности функционирования	Целевая функция	Задача на min или max	Входные переменные и параметры	Допустимая погрешность измерений
1. Качество электроэнергии (КЭ), Y_1^{SYS}	1.1. Отклонение частоты $y_1^{SYS} \triangleq \Delta f$	$f^+ \leq f \leq f^-$	1.1.1. f_{nom} – номинальная частота; 1.1.2. f – текущее значение основной частоты напряжения; 1.1.3. $\Delta f^+, \Delta f^- = 0,2 \text{ Гц}$	$\pm 0,03 \text{ Гц}$
	1.2. Отклонение напряжения $y_2^{SYS} \triangleq \Delta U$	Min	1.2.1. U_{nom} – номинальное напряжение; 1.2.2. U – текущее значение напряжения; 1.2.3. $\Delta U^+, \Delta U^- = \pm 10 \%$	Погрешность измерения длительности не должна превышать $\pm 0,01 \text{ с}$
2. Экономический критерий (ЭК), Y_2^{SYS}	2.1. Стоимость генерируемой электроэнергии $y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$	Min	2.1.1. стоимость топлива C^F ; 2.1.2. расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание C^{OM} ; 2.1.3. плата / штрафы за выброс загрязняющих веществ C^{PO}	10 %
	2.2. Цена для потребителя $y_4^{SYS} \triangleq PR$	Min	2.2.1. Фиксированный многозонный тарифный график	1 %
	2.3. Прибыль владельца микрогрид $y_5^{SYS} \triangleq REV$	Max	2.3.1. цена продажи электроэнергии Pr^C ; 2.3.2. объем проданной электроэнергии P^{MG}	5 %
3. Надежность процесса электроснабжения Y_3^{SYS}	3.1. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_6^{SYS} \triangleq CAIDI$	Min	3.1.1. суммарное время отключения потребителей, T_Σ ; 3.1.2. общее число отключений, OUT_Σ	1 %
	3.2. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_7^{SYS} \triangleq SAIDI$	Min	3.2.1. суммарное время отключения потребителей, T_Σ ; 3.2.2. общее количество потребителей, N_Σ	1 %
	3.3. Индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей, $y_8^{SYS} \triangleq SAIFI$	Min	3.3.1. общее число отключений, OUT_Σ ; 3.3.2. общее количество потребителей, N_Σ	1 %
4. Экологичность Y_4^{SYS}	4.1. Количество выбросов парниковых газов (углекислый газ) $y_9^{SYS} \triangleq CO_2$	Min	4.1.1. фактическое потребление топлива, M^{fuel} ; 4.1.2. Количество выбросов углекислого газа от источников энергии, PO^{CO_2}	10 %
	4.2. Количество выбросов парниковых газов (оксиды азота) $y_{10}^{SYS} \triangleq NOX$	Min	4.2.1. фактическое потребление топлива M^{fuel} ; 4.2.2. Количество выбросов оксидов азота от источников энергии, PO^{NOX}	10 %

IV. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Решение оптимизационных задач при наличии противоречивых критериев и неравновесным распределением критериев между разнородными субъектами динамической системы, можно связать с мультиагентным представлением исходной системы при решении задач оптимизации ее функционирования. Одной из задач при многокритериальной оптимизации путем свертки целевых функций является определение приоритетов целей, т.е. как определить весовые коэффициенты. Данная задача может решаться

посредством привлечения экспертов и экспертных знаний. В одном случае эксперт определяет «вес критерия» вкладывая свой собственный субъективный смысл. В другом случае, при определении значений весовых коэффициентов на основе нечеткой логики [11], используются комбинация экспертных знаний. Например, в [12], для этого вводится понятие нечеткого эволюционного подхода, который и применяется в настоящей работе.

Задача оптимизации, рассмотренная в этой работе, связана с планированием работы субъектов (агентов) в

рамках микрогрид. Планирование можно определить, как распределение ресурсов во времени для выполнения набора задач. Иначе - это упорядочение набора операций и распределения их по временным интервалам без нарушения технических и экономических ограничений.

Задача многокритериального планирования характеризуется четырьмя компонентами: набор ресурсов R , набор действий A , набор ограничений C и набор показателей эффективности (целевых функций ЦФ) OF [13]. Эти компоненты можно описывать следующим образом:

- Множество R состоит из p типов ресурсов. При рассмотрении исследуемой микрогрид, ресурсами являются количество топлива в хранилище V^{FU} , т.е. количество газа V^G и количество дизеля V^D , вместе с финансированием FI . Следовательно, $R = \{V^G, V^D, FI\}$;
- Множество A включает в себя n действий, которые имеют отдельные требования к ресурсам. Под действиями понимаются выдаваемая от различных ресурсов мощность (включая мощность распределительной электрической сети) и потребляемая мощность. Следовательно, $A = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$;
- Множество C состоит из технических и экономических ограничений;
- Множество OF включает в себя технические, экономические и экологические показатели эффективности. Каждая ЦФ связана с весовым коэффициентом, определяющий ее значимость в общем решении.

Расчет весовых коэффициентов предлагается выполнить на основе нечеткой логики, с помощью введенного в [11] нечеткого эволюционного подхода. Алгоритм включает:

• Определение нижних пределов

Первым этапом расчета весовых коэффициентов является определение множества нижних пределов $f^*(x)$ для целевых функций, где $f_q^*(x) = \min(f_q(x))$.

• Нормализация целевых функций

Наличие разнородности имеющихся целевых функций и критериев, т.е., различие шкал и единиц измерения часто является причиной того, что требуется нормализация критериев заключающаяся в приведении разнотипных критериев к единой шкале. Пусть $f(x)$ – вектор рассматриваемых целевых функций (ЦФ), $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_L(x))^T$. $f_q^H(x)$ – эвристическая функция для q -й ЦФ $f_q(x)$. Для каждого вектора $f(x)$ выполняется фазификация в соответствии с конкретными значениями функций принадлежности в интервале $[f_q^*, f_q^H + \varepsilon_q]$, где f_q^* – множество нижних пределов; ε_q – положительное число, предназначенное для избежания деления на ноль (когда $f_q^* = f_q^H$) и определяемое как: $\varepsilon_q = 0.01 f_q^*$, если $f_q^* = f_q^H$, иначе $\varepsilon_q = 0$.

Рассматриваемыми нечеткими подмножествами являются следующие (рис. 2): G^q – подмножество хороших решений в соответствии с q -й ЦФ $f_q(x)$; B^q – подмножество плохих решений в соответствии с q -й ЦФ $f_q(x)$.

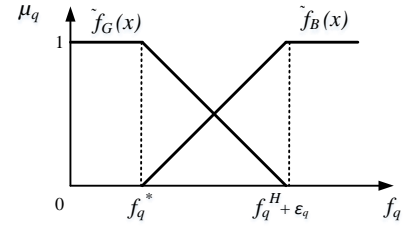


Рис. 2. Функции принадлежности $\tilde{f}_G(x)$ и $\tilde{f}_B(x)$

• Расчет весовых коэффициентов ЦФ

На всякой итерации оценивается качество решений в соответствии с каждой целевой функцией и вычисляются веса критериев. Процесс обновления весов на каждой итерации может быть представлен следующим образом:

$$w_q^1 = \frac{1}{L}, \forall 1 \leq q \leq L; \quad w_q^{k+1} = \frac{\mu_{q,k}^B(\tilde{f}_q^k)}{\sum_{q=1}^L \mu_{q,k}^B(\tilde{f}_q^k)}, \quad (2)$$

$$\forall 1 \leq q \leq L \text{ и } \forall 1 \leq k \leq Q-1$$

где Q – общее число итераций;

$$\mu_{q,k}^B(\tilde{f}_q^k) = \frac{\tilde{f}_q^k - f_q^*}{\tilde{f}_q^H - f_q^* + \varepsilon'_q}, \text{ если } \tilde{f}_q^k \in [f_q^*, \tilde{f}_q^H + \varepsilon'_q],$$

$$\text{иначе } \mu_{q,k}^B(\tilde{f}_q^k) = 0$$

V. Выводы

Разработано унифицированное представление агента применительно к микроэнергосистемам, представляющим собой композицию из субъектов, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей.

Разработана схема решения задачи оценивания эффективности микрогрид. Представленная схема позволяет формализовать процесс интеграции разнородных ЦФ в единые критерии по определённым типам.

Предложен подход на основе нечёткой логики для формулировки задачи многокритериальной оптимизации в микрогрид с учётом разнородности критериев технической, экономической и экологической эффективности функционирования системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Marnay C., Chatzivasileiadis S., Abbey C., Iravani R., Joos G., Lombardi P., Mancarella P., Appen J. Microgrid Evolution Roadmap: International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 P. 139–144.

- [2] R. Gregor, H. Ulf, B. Pascal, F. Simon. Multi-agent systems' asset for smart grid applications // Computer Science and Information Systems. Vol. 10, Issue 4, 2013. P. 1799-1822.
- [3] McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziaargyriou N., Ponci, F., Funabashi T. Multi-agent systems for power engineering applications. P.1: Concepts, approaches and technical challenges // IEEE Transactions on Power Systems. 2007. Vol. 22. No. 4. P. 1753–1759.
- [4] Leitao P., Karnouskos S., Ribeiro L., Lee J., Strasser T., Colombo A. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems, Proceedings of the IEEE, (104). Vol. 5, 2016. P. 1086-1101.
- [5] Dulau L.I., Bica D. Optimization of Generation Cost in a Microgrid // Procedia Manufacturing. 2018. No. 22. P. 703-708.
- [6] Nafisi H., Agha M.M., Abyaneh H.A., Abedi M.. Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs // IEEE Trans. Smart Grid. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 1268–1276.
- [7] Березовский В.С., Матюнина Ю.В., Цырук С.А. Обеспечение повышенного уровня качества электроэнергии и надёжности электроснабжения на договорной основе // Энергетик. 2018. № 9. С. 17–19.
- [8] Dehghanpour K., Nehrir H. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework // IEEE Trans. Smart Grid. 2017. Vol. 9. No. 6. P. 6318–6327.
- [9] Постановление правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401. «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей».
- [10] Шихин В.А., Косинский М.Ю., Седлецкий Г.С. Методологические подходы к анализу оперативной надёжности электросетевого комплекса с применением интеллектуальных моделей // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 23–30.
- [11] M. Sakawa. Fuzzy multiobjective and multilevel optimization // M. Ehrgott, X. Gandibleux (Eds.), Multiple Criteria Optimization – State of the art annotated bibliographic surveys, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002, P. 171–226.
- [12] Kacem I., Hammadi S., Borne P. Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems // Hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic Mathematics and Computers in Simulation, 60, 2002. P. 245–276.
- [13] Klein Y., Langholz G. Multicriteria Scheduling Optimization Using Fuzzy Logic // Proceedings of the IEEE Int Conference on Systems, Man and Cybernetics. №1, 1998. P. 445–450.