

В.А. Попов, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-3484-4597

Р.А. Романюк, магистр

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

УЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

При решении задач планирования режимов в существующих системах электроснабжения неизбежно сталкиваются с необходимостью учета неопределенности информации. Более того, значимость данного фактора усиливается в предположении появления в структуре электрических сетей источников распределенной генерации, особенно, если они ориентированы на использование возобновляемой энергии. При этом очевидно, что эффективность и характер воздействия на режимы электрических сетей внедряемых источников генерации во многом зависят от их параметров и мест локализации. В этих условиях практический интерес представляет сравнительная оценка различных вариантов внедрения средств распределенной генерации с точки зрения их влияния на такие показатели режима электрической сети как потери и качество электроэнергии, надежность электроснабжения. Так как указанные показатели имеют различную физическую природу, то невозможно их представить единой комплексной характеристикой, например, экономического характера. В связи с этим в статье для выбора оптимального варианта применения распределенной генерации осуществлена модификация одного из методов многокритериального сравнения альтернатив для условий, когда ряд режимных характеристик представлены нечеткими количественными и качественными величинами в виде нечетких множеств.

Ключевые слова: распределенная генерация, неопределенность информации, многокритериальное сравнение альтернатив.

Введение

Широкое применение распределенной генерации является сегодня общепринятой тенденцией развития современной электроэнергетики. Вместе с тем реализация подобных проектов часто сталкивается со значительными организационными и техническими сложностями, отсутствием необходимого правового и нормативного обеспечения, что в ряде случаев может спровоцировать определенный конфликт интересов между потенциальными инвесторами и энергокомпаниями. Помимо этого внедрение распределенной генерации требует значительных инвестиций, где помимо средств на приобретение и монтаж самого генерирующего оборудования необходимо учитывать и затраты, связанные с выполнением выдаваемых энергокомпаниями технических условий на подключение данных устройств к электрическим сетям энергосистемы, которые во многих случаях бывают необоснованно усложненными. Это объясняется тем, что энергокомпании опасаются возможности негативного влияния подключаемого оборудования на режимы находящихся под их оперативным контролем электрических сетей, усложнения управления их работой. В связи с этим при определении точечных решений относительно применения распределенной генерации интерес представляет выбор из ряда альтернативных вариантов того, который помимо интересов инвестора будет учитывать характер и степень влияния подключаемых генерирующих источников на технико-экономические показатели работы существующих электрических сетей.

Традиционно в качестве основных показателей, характеризующих эффективность работы электрических сетей, рассматриваются: величина потерь электрической энергии, надежность электроснабжения и качество электрической энергии. Все перечисленные показатели имеют различную физическую природу и единицы измерения. Более того, при этом отсутствует нормативный показатель, характеризующий качество электрической энергии в плане соблюдения нормируемых уровней отклонения напряжения, а согласно стандартам IEEE надежность электроснабжения отражается рядом показателей. Все это делает невозможным использование единого критерия экономического характера достаточно адекватно отражающего последствия применения распределенной генерации на режимы электрических сетей для возможности технико-экономического сравнения различных вариантов их применения. Указанные обстоятельства требуют применения в данном случае методов многокритериального сравнения альтернатив.

Помимо этого опыт эксплуатации отечественных энергосистем показывает, что в настоящее время объективная оценка указанных выше показателей режима невозможна без учета объективно существующей неопределенности информации, особенно когда речь идет о распределительных электрических сетях [1]. В значительной мере это связано с отсутствием необходимых данных для достоверной оценки электрических нагрузок как отдельных потребителей, так и узлов сети в целом, которые лежат в основе определения указанных показателей режима. Дополнительно неопределенность информации усиливается вследствие появления в структуре распределительных сетей альтернативных источников энергии, функционирование которых зависит от многих труднопрогнозируемых внешних факторов. Таким образом, корректный учет неопределенности информации, особенно в современных системах электроснабжения с интегрированными в них разнообразными по своей природе источниками распределенной генерации, является принципиальным условием для возможности адекватного определения широкого спектра показателей, отражающих различные технико-экономические характеристики работы данных систем.

Цель и задачи

Учитывая приведенные соображения, основной целью данных исследований является постановка и решение двух взаимосвязанных задач. Первая из них заключается в разработке общей методики моделирования нагрузок узлов распределительной сети и определения на их основе таких показателей режима, как потери электрической энергии, ожидаемая величина недоотпущенной электроэнергии, а также оценки режима напряжений в условиях применения распределенной генерации. Вторая задача связана с адаптацией одного из методов многокритериального сравнения альтернатив к условиям, когда оценочные характеристики альтернативных вариантов внедрения средств распределенной генерации заданы нечеткими величинами количественного и качественного характера.

Материал и результаты исследований

В ряде проведенных исследований было показано, каким образом неопределенность информации может быть эффективно учтена, в частности, при моделировании режимов электрических сетей, в том числе в условиях наличия в их структуре альтернативных источников энергии. Для данной цели предлагается использовать математический аппарат теории нечетких множеств. В этом случае, как, например, показано в работах [2, 3], значения нагрузок могут быть представлены нечеткими числами, в частности, $L-R$ типа [4]. Очевидно, что при этом и все вычисляемые на их основе интегральные показатели (например, такие, как потери мощности и электрической энергии) также будут описываться аналогичными нечеткими числами.

В исследованиях представленных в [5] продемонстрировано, каким образом вопросы надежности электроснабжения могут быть учтены при использовании средств распределенной генерации. Говорить о повышении надежности электроснабжения в указанных условиях целесообразно только в том случае, если имеется техническая возможность задействовать в послеаварийном режиме генерирующие источники для электроснабжения определенной выделенной нагрузки. Очевидно, что реализация подобных проектов чаще всего требует применения достаточно дорогостоящих автоматических коммутационных аппаратов типа реклоузеров. Более того, количество и размещение указанных аппаратов должно быть тщательно согласовано с существующей стратегией секционирования распределительной сети. В этих условиях эффект от внедрения распределенной генерации может быть оценен определенным удельным показателем, отражающим степень изменения некоторой интегральной характеристики надежности (например, ожидаемой величины недоотпущенной электроэнергии) на единицу вложенных средств. В условиях существующего информационного обеспечения указанная характеристика (которая определяется на основании значения средних значений нагрузок узлов сети), скорее всего, будет иметь нечеткий характер и, следовательно, также может быть представлена нечетким множеством, в частности, $L-R$ типа (рис.1).

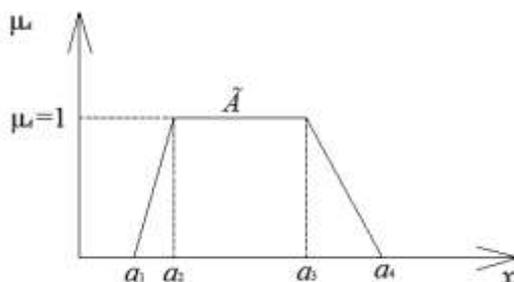


Рисунок 1 – Характеристики трапециевидальной функции принадлежности

Для оценки качества электрической энергии, в частности, допустимости отклонений напряжения не существует объективной количественной оценки. С другой стороны, появление в структуре систем электроснабжения источников распределенной генерации, может принципиально различно повлиять на режим напряжений, в зависимости от параметров интегрируемых источников, их режимов работы и точек подключения в электрические сети. Подключение генерирующих источников может разгрузить распределительные сети и, тем самым, снизив в них потери напряжения, обеспечит допустимые уровни их отклонений на зажимах электроприемников, даже, если в исходном режиме данные требования и не соблюдались. В отдельных случаях для достижения положительного эффекта необходимо изменить параметры работы средств централизованного регулирования напряжения. И, наконец, возможны ситуации, когда распределенная генерация, даже при корректировке режимов работы средств регулирования напряжения, приводит к появлению недопустимых отклонений напряжения у некоторых групп потребителей, в частности по причине нарушения однородности графиков нагрузок отдельных распределительных линий, что не позволяет выбрать приемлемый закон регулирования напряжения. В связи с этим для оценки влияния распределенной генерации на режим напряжений могут быть использованы определенные лингвистические оценки, задаваемые экспертным путем и описываемые соответствующими функциями принадлежности, формируемыми, например, по аналогии с [6].

Таким образом, на стадии сравнения альтернативных вариантов применения распределенной генерации складывается ситуация при которой любая альтернатива будет характеризоваться тремя оценочными характеристиками (целевыми функциями) и при этом каждая из них будет представлена нечеткими величинами с трапециевидальными функциями принадлежности. В этих условиях возникает необходимость в разработке метода многокритериального сравнения альтернатив при нечетком задании исходных данных. Ниже рассмотрена процедура адаптации метода VIKOR [7] к указанным условиям.

Первоначально исходные данные представляются в форме, так называемой, матрицы решений, где строки соответствуют рассматриваемым альтернативам, а столбцы отражают критерии (частные целевые функции C_1, \dots, C_n), значения которых заносятся в соответствующие ячейки.

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \dots & \tilde{A}_{1n} \\ A_2 & \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \dots & \tilde{A}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_m & \tilde{A}_{m1} & \tilde{A}_{m2} & \dots & \tilde{A}_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

При этом все оценки альтернатив будут характеризоваться нечеткими величинами (рис), которые описываются следующим образом

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{если } x \in (a_1, a_2) \\ \mu_A, & \text{если } x \in (a_2, a_3) \\ \frac{x - a_4}{a_3 - a_4}, & \text{если } x \in (a_3, a_4) \\ 0, & \text{если } x \in (-\infty, a_1) \cup (a_4, \infty). \end{cases} \quad (2)$$

Проводим нормализацию значений рассматриваемых критериев, учитывая правила выполнения арифметических операций с нечеткими числами [8], что осуществляется следующим образом
- для критериев предполагающих максимизацию

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{a_{ij1}}{m_i}, \frac{a_{ij2}}{m_i}, \frac{a_{ij3}}{m_i}, \frac{a_{ij4}}{m_i}, \mu_{ij} \right), \quad (3)$$

где $m_i = \max_i a_{ij4}$;

- для критериев требующих минимизации

$$\tilde{V}_{ij} = \left(\frac{n_i}{a_{ij4}}, \frac{n_i}{a_{ij3}}, \frac{n_i}{a_{ij2}}, \frac{n_i}{a_{ij1}}, \mu_{ij} \right), \quad (4)$$

где $n_i = \min_i a_{ij1}$.

Определяем наилучшее (\tilde{V}_i^+) и наихудшее (\tilde{V}_i^-) значения для всех рассматриваемых целевых функций (критериев) $i = 1, \dots, m$, учитывая их характер (т.е. принимая во внимание подлежит ли данный критерий максимизации или минимизации).

Для всех элементов нормализованной матрицы решений, элементы которой определены в соответствии с (1), (2) находим детерминированные аналоги, представляемые центрами тяжести соответствующих нечетких множеств, на основе следующих выражений

$$y_a = \frac{\mu_a \left(\frac{a_3 - a_2}{a_4 - a_1} \right) + 2}{6}, \quad (5)$$

$$x_a = \frac{y_a(a_2 + a_3) + (a_1 + a_4)(\mu_a - y_a)}{2\mu_a}. \quad (6)$$

Вычисляем расстояния между всеми элементами матрицы решений относительно наилучшего и наихудшего решений. При этом исходим из того, что расстояние между двумя нечеткими числами \tilde{A} и \tilde{B} находится в соответствии с формулой

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{(y_A - y_B)^2 + (x_A - x_B)^2}{2}}. \quad (7)$$

Определяем показатели S_j и R_j [7], характеризующие, соответственно, групповую полезность и индивидуальные потери и которые при рассматриваемой форме представления исходной информации могут быть вычислены следующим образом

$$S_j = \sum_{i=1}^n [d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_{ij}) / d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_i^-)], \quad (8)$$

$$R_j = \max_i [d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_{ij}) / d(\tilde{V}_i^+, \tilde{V}_i^-)]. \quad (9)$$

Вычисляем характеристику $Q_j, j = 1, \dots, m$ на основе выражения

$$Q_j = \begin{cases} \frac{R_j - R^+}{R^- - R^+} & \text{если } S^+ = S^- \\ \frac{S_j - S^+}{S^- - S^+} & \text{если } R^+ = R^- \\ \eta \frac{(S_j - S^+)}{(S^- - S^+)} + (1 - \eta) \frac{(R_j - R^+)}{(R^- - R^+)} & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (10)$$

где $S^+ = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^+ = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$, η - показатель, определяющий относительный вес стратегии выбора компромиссного решения согласно идеологии характеристик S или R . При отсутствии конкретных соображений принимается $\eta = 0,5$.

Ранжируем альтернативы, основываясь на вычисленных значениях Q_j , полагая, что лучшей альтернативе соответствует наименьшая величина данного показателя. Полученные результаты

позволяют в дальнейшем проверить (и при необходимости скорректировать) ранжирование альтернатив согласно условиям наличия необходимой стабильности решения и приемлемого различия между альтернативами [7] в соответствии со стандартным алгоритмом метода VIKOR.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, для получения объективных и достоверных результатов при моделировании режимов распределительных сетей и принятия решений с использованием полученных при этом характеристик необходим учет неопределенности исходной информации, связанной с отсутствием необходимой информационной базы, появлением в структуре сетей альтернативных источников энергии с труднопрогнозируемыми выходными характеристиками. Во-вторых, эффективным математическим аппаратом для учета неопределенности количественной информации и возможности использования лингвистических оценок при определении параметров режимов распределительных сетей служит теория нечетких множеств. В третьих, показано, что проведенная в работе модификация метода VIKOR позволяет осуществить ранжирование альтернативных вариантов применения распределенной генерации при нечетком задании показателей, характеризующих влияние интегрируемых в электрические сети генерирующих источников на потери электрической энергии, надежность электроснабжения и качество электрической энергии (в плане допустимости отклонений напряжения), соблюдая при этом правила выполнения арифметических операций над нечеткими множествами и выполняя присущее данному методу требования оценки оптимальности альтернатив на основе вычисляемого расстояния до идеального решения.

Список использованной литературы

1. Праховник А.В. Совершенствование информационного обеспечения задач моделирования и управления режимами СЭС в условиях реформирования электроэнергетики. Требования и общие принципы организации баз данных для решения задач моделирования и оптимизации режимов в современных системах электроснабжения [Текст]/ Праховник А.В., Попов В.А., Ткаченко В.В., Луцько О.С. // *Енергетика: економіка, технології, екологія* N 1, 2010, стор. 42 – 47.
2. Попов В.А. Совершенствование информационного обеспечения задач моделирования и управления режимами СЭС в условиях реформирования электроэнергетики. Принципы учета неопределенности исходной информации при моделировании нагрузок в распределительных сетях [Текст]/ Попов В.А., Ярмолюк Е.С., Саид Банузاده Сахрагард, Журавлев А.А. // *Енергетика: економіка, технології, екологія* N 1, 2011, стор. 61 – 65.
3. Попов В.А. Евристичний алгоритм моделювання режимів інтегрованих систем електропостачання у врахуванням невизначеності вихідної інформації, Праці Інституту електродинаміки НАН України Збірник наукових праць [Текст]/ Попов В.А., Ярмолюк О.С. Спеціальний випуск, 2012, стор. 40 – 47.
4. Dubois, D. “Fundamentals of Fuzzy sets” [Text] Dubois, D., and Prade, H., Kluwer Academic Publishers, (2000) Boston.
5. Попов В.А. Особенности анализа надежности воздушных распределительных сетей с источниками распределенной генерации [Текст]/ Попов В.А., Ткаченко В.В., Саид Сахрагард, Журавлев А.А. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* N 3/8 (75), 2015, стор. 26-32.
6. Wei Shih-Hua., Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers, *Expert Systems with Applications* [Text]/ Wei Shih-Hua, Chen Shyi-Ming, (2009) 362, pp.285– 2299.
7. Opricovic S. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [Text]/ Opricovic S., Tzeng G.H. // *European Journal of Operational Research*, 156; 2004, p. 445-55.
8. Kauffmann A. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications [Text]/ Kauffmann A., Gupta M.M., New York: Van Nostrand Reinhold, (1991).

V. Popov ,Dr. Sc. Sciences, prof., ORCID

R. Romaniuk, Msc. ORCID

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

TAKING INTO ACCOUNT OF THE INFORMATION UNCERTAINTY IN THE MULTICRITERIA EVALUATION OF ALTERNATIVES OF DISTRIBUTED GENERATION INTEGRATION

In solving problems of planning modes of operation in the existing distribution systems one will inevitably face the necessity of accounting information uncertainty. Moreover, the significance of this factor is enhanced in the case of appearance of distributed generation sources, particularly if they are focused on the use of renewable energy, in the structure of electrical networks. It is obvious that the effectiveness and the impact on the electric networks modes of operation indicators (such as energy losses, voltage profile, reliability) implemented sources of generation are largely dependent on their settings and locations. At the same time, taking into account the different physical nature and dimension of aforementioned characteristics, they can not

be represented by a single integral indicator. Taking this circumstance into account a modification of one of the methods of multi-criteria comparison of alternatives is developed in this article to select the optimal variant of the use of distributed generation performed for conditions when a number of modes of operation characteristics are given as a fuzzy quantitative and qualitative variables in the form of fuzzy sets.

Keywords: distributed generation, uncertainty of information, multicriteria comparison of alternatives.

References

1. Prakhovnik A.V. Improving information support simulation and control SES regimes in terms of electricity reform. The requirements and general principles of database solutions to the problems of modeling and optimization in modern power supply systems [Text] / Prakhovnik A.V., Popov V.A., Tkachenko V.V., Lutsk O.S. // *Energetics: ekonomika, tehnologii, ekologiya* N 1, 2010 Side. 42 - 47.
2. Popov V.A. Improving information support simulation and control SES regimes in terms of electricity reform. Accounting for uncertainty of initial information for modeling loads in distribution systems [Text] / Popov V.A., Yarmolyuk E.S., Said Banuzade Sahragard, Zhuravlev A.A. // *Energetics: ekonomika, tehnologii, ekologiya* N 1, 2011 Side. 61 - 65.
3. Popov V.A. Evristichny algorithm modelyuvannya rezhimiv integrovanih systems elektropostachannya in urahuvannyam neviznachenosti vihidnoi Informacie, Pratsi Institutu elektrodinamiki National Academy of Sciences of Ukraine Zbirnik Naukova Pratzen [Text] / Popov V.A., Yarmolyuk E.S. // *Key infrastructure Spetsialny* 2012, sided. 40 - 47.
4. Dubois, D. "Fundamentals of Fuzzy sets" [Text] Dubois, D., and Prade, H., Kluwer Academic Publishers, (2000) Boston.
5. Popov V.A. Features of the analysis of air distribution networks reliability of sources of distributed generation [Text] / Popov V.A., Tkachenko V.V., Said Sahragard, Zhuravlev A.A. // *Eastern European advanced technology magazine* N 3/8 (75) 2015 Side. 26-32.
6. Wei Shih-Hua., Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers, *Expert Systems with Applications* [Text]/ Wei Shih-Hua, Chen Shyi-Ming, (2009) 362, pp.285– 2299.
7. Opricovic S. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [Text]/ Opricovic S., Tzeng G.H. // *European Journal of Operational Research*, 156; 2004, p. 445-55.
8. Kauffmann A. Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications [Text]/ Kauffmann A., Gupta M.M., New York: Van Nostrand Reinhold, (1991).

В.А. Попов, д-р техн. наук, проф., **ORCID**

Р.А. Романюк, магістр, **ORCID**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНІЙ ОЦІНКІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

При вирішенні задач планування режимів в існуючих системах електропостачання неминуче стикаються з необхідністю врахування невизначеності інформації. Більш того, значимість даного чинника посилюється в припущенні появи в структурі електричних мереж джерел розосередженої генерації, особливо – якщо вони орієнтовані на використання відновлюваної енергії. При цьому очевидно, що ефективність і характер впливу на режими електричних мереж зазначених джерел генерації багато в чому залежать від їх параметрів і місць локалізації. У цих умовах практичний інтерес являє порівняльна оцінка різних варіантів впровадження засобів розосередженої генерації з точки зору їх впливу на такі показники режиму електричної мережі як втрати і якість електроенергії, надійність електропостачання. Оскільки вказані показники мають різну фізичну природу, їх неможливо представити єдиною комплексною характеристикою, наприклад, економічного характеру. У зв'язку з цим у статті для вибору оптимального варіанту застосування розосередженої генерації здійснена модифікація одного з методів багатокритеріального порівняння альтернатив для умов, коли ряд режимних характеристик представлені нечіткими кількісними і якісними величинами у вигляді нечітких множин.

Ключові слова: розосереджена генерація, невизначеність інформації, багатокритеріальне порівняння альтернатив.

Надійшла 22.02.2017

Received 22.02.2017