

П.П. ГОВОРОВ, д-р техн. наук, **В.П. ГОВОРОВ**, **О.В. КОРОЛЬ**
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВОЛЬТОДОДАВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ЕЛЕКТРОННИМ
УПРАВЛІННЯМ В КВАЗІСТАЛОМУ РЕЖИМІ

У статті розглянуті питання підвищення надійності роботи вольтододавальних трансформаторів з електронним управлінням, які використовуються в якості активних елементів ESS, і виконують функції автоматичної корекції параметрів режиму електричних мереж. На основі аналізу електромагнітних процесів розроблені схемні та математичні моделі трансформатора в квазіусталених режимах, а також визначено умови надійної роботи електронних елементів в цих умовах. Запропоновано шляхи підвищення надійності роботи трансформаторів із включенням тиристорів в ланцюзі його первинної обмотки. Бібл. 4, рис. 3.

Ключові слова: вольтододавального трансформатор, тиристор, надійність, електрорушійна сила, напруга, струм кут зсуву.

Надійшла 16.04.2015

Received 16.04.2015

УДК 621.316.11

В.А. ПОПОВ¹, канд. техн. наук, доц., **П.Я. ЭКЕЛЬ**², д-р техн. наук,
В.В. ТКАЧЕНКО¹, канд. техн. наук, **С. БАНУЗАДЕ САХРАГАРД**³

¹ Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

² Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Ave. Dom Jose Gaspar

³ Iranian NIK Energy

УЧЕТ ФАКТОРА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ
КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ ВАРИАНТОВ ИНТЕГРАЦИИ
ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

В работе предложен подход для комплексной оценки влияния распределенной генерации на такие показатели эффективности работы распределительных сетей как потери электрической энергии, режим напряжений и надежность электроснабжения с использованием процедуры Беллмана-Заде для многокритериального сравнения альтернатив. Обоснован метод дифференциации весов частных целевых функций на основе оценки энтропии. Особое внимание уделено особенностям анализа надежности при различных вариантах подключения генерирующих источников к электрическим сетям.

Ключевые слова: распределенная генерация, надежность электроснабжения, многокритериальное принятие решений, энтропия информации.

1 Введение

Одним из важнейших аспектов реформирования энергетики на современном этапе является смещение акцентов в пользу развития малой генерации. Украина, как никакая другая страна мира, заинтересована в кардинальном повышении эффективности своей энергетической отрасли [1], что делает необходимым, чтобы даже те единичные проекты, которые сегодня реализуются в сфере применения распределенной генерации, были технически обоснованы и экономически эффективны. Очевидно, что указанные источники даже относительно небольшой мощности оказывают воздействие на потери электрической энергии, режим напряжений, надежность электроснабжения.

Расчет потерь электрической энергии, в принципе, не вызывает затруднений. Это реализуется как в процессе непосредственного моделирования режимов электрических сетей, так и на основе специальным образом адаптированных расчетных методов, ориентированных на использования обобщенных показателей (величины потребления электроэнергии или максимальной нагрузки) [2].

Появление генерирующих источников может как повысить качество электрической энергии (за счет компенсации потерь напряжений), так и привести к его ухудшению даже после соответствующей адаптации условий работы средств централизованного регулирования напряжения (в силу увеличения неоднородности нагрузок отдельных распределительных линий). При этом отсутствие общепринятого показателя позволяет оценить режим напряжений, формируемый после интеграции генерирующих источников, в основном экспертным путем, например, за счет использования соответствующих балльных оценок.

2 Оценка влияния распределенной генерации на надежность электроснабжения

Наиболее сложным и неоднозначно решаемым вопросом является оценка влияния распределенной генерации на надежность электроснабжения. Считается (по крайней мере, теоретически), что при потере питания от централизованных источников имеется возможность «выделить» источник распределенной генерации (ИРГ) для работы на близкую по мощности нагрузку, что получило название «Islanding» («островной» режим) [3]. С точки зрения надежности именно указанный режим, да еще в условиях нормирования показателей надежности, что является характерным для большинства индустриально развитых стран, представляет наибольший интерес.

Опыт оптимизации надежности электроснабжения демонстрирует, что в большинстве случаев обеспечить ее нормируемые уровни невозможно без применения автоматических коммутационных аппаратов (КА), например реклоузеров. Рассмотрим подобные электрические сети, которые могут быть построены как по магистральной (рис. 1а), так и по петлевой (рис. 1б) схемам и на их примере проанализируем различные варианты применения ИРГ.

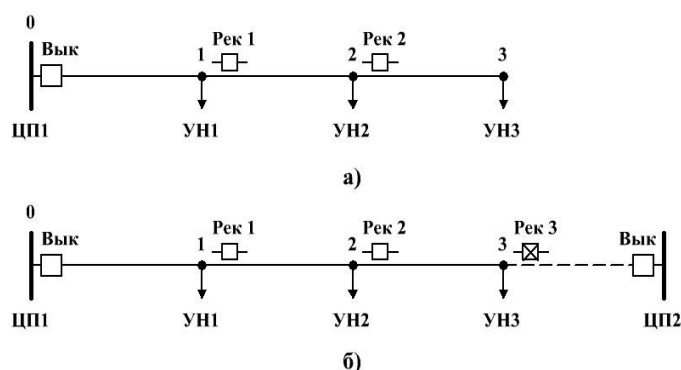


Рисунок 1 - Линия распределительной сети с реклоузерами (ЦП – центр питания, УН – узел нагрузки)

В узле 3, являющемся точкой подключения резервного питания (ТПРП), установлен нормально отключенный реклоузер, настроенный на децентрализованную и скоординированную с реклоузерами 1 и 2 работу в случае подключения резервного питания от ЦП2. Оценим изменения интегральных показателей надежности [4] для следующих условий:

- в линиях установлены 2 реклоузера (Рек1 и Рек2), которые делят линию на 3 части (каждая из которых может включать в себя ряд участков линии и нагрузочных узлов);
- варьируется размер «острова» (в % от суммарных длины и нагрузки линии);
- подключение ИРГ осуществляется в начале линии (участок 0-1); в середине линии (участок 1-2); в конце линии (участок 2-3).

Результаты выполненных при этом расчетов, отражающие изменение интегральных показателей надежности (в %), приведены в таблице.

Таблица 1

Размер «острова» в %	ТПРП в линии	Без ИРГ		ИРГ в начале		ИРГ в середине		ИРГ в конце	
		EENS	SAIDI	EENS	SAIDI	EENS	SAIDI	EENS	SAIDI
17	нет	100,0	100,0	103,1	103,1	92,7	92,7	82,3	82,3
	есть	100,0	100,0	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5
33	нет	100,0	100,0	100,0	100,0	83,3	83,3	66,7	66,7
	есть	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50	нет	100,0	100,0	103,1	103,1	84,4	84,4	65,6	65,6
	есть	100,0	100,0	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- при наличии в линии ТПРП с автоматическим КА формирование «острова» практически не дает эффекта в плане повышения надежности вне зависимости от его локализации;
- в случае отсутствия в линии ТПРП «остров» выгоднее формировать в конце линии (в рассмотренном примере показатели надежности улучшились до 33 % в зависимости от объема нагрузки, обеспечиваемой ИРГ).

3 Технические проблемы создаваемые распределенной генерацией

Помимо этого расширение применения распределенной генерации создает определенные технические проблемы, которые связаны с изменением свойств распределительных сетей и для своего решения требуют разработка новых устройств релейной защиты, автоматики и принципов их применения [1]. При этом может возникнуть необходимость:

- в установке нового или переносе как минимум одного существующего КА с целью выделения «острова». При этом затраты на перенос существующего реклоузера на новое место составляют порядка 30 % от затрат на приобретение и установку в линии нового реклоузера;
- в перенастройке релейной защиты и автоматики (РЗА) на питающих подстанциях. При этом может потребоваться замена РЗА и/или выключателей старого типа на современные (например, вакуумные или элегазовые);
- в использовании в точках подключения ИРГ к линии современных КА и согласовании работы их средств РЗА с уже существующими в линии реклоузерами и выключателями на питающей подстанции;
- целесообразностью замены установленных на ответвлениях линии предохранителей на более дорогостоящие, но в меньшей степени зависящие от величин и направлений токов КЗ секционализеры.

Следовательно, в рассмотренных условиях различные варианты интеграции ИРГ в электрические сети обеспечивают практически одинаковый уровень надежности электроснабжения, но потребуют для своей реализации различных объемов затрат.

Таким образом, становится очевидным, что принятие решения относительно оптимального варианта использования источника распределенной генерации должно базироваться на процедурах многокритериального сравнения альтернатив, которые должны позволять эффективно работать с критериями, которые различны как по своей физической природе, так и размерности.

4 Алгоритм многокритериального сравнения альтернативных вариантов использования средств распределенной генерации

Для данной цели рассмотрим алгоритм, предложенный Беллманом и Заде [5] и который отвечает указанным требованиям. Согласно данному подходу первоначально каждая целевая функция $F_p(X)$ заменяется нечеткой функцией или нечетким множеством

$$A_k = \{X, \mu_{A_k}(x)\}, \quad x \in L, \quad k = 1, \dots, q,$$

где $\mu_{A_k}(x)$ - функция принадлежности нечеткого множества A_k , L - область допустимых решений.

В этом случае нечеткое решение D формируется на основе применения некоторого оператора агрегирования, в частности, используя операцию минимизации, и определяется согласно условию

$$x^* = \arg \max_{x \in P} \min_{k=1, \dots, q} \mu_{A_k}(x), \quad \text{где } P - \text{область компромиссов (область Парето)}.$$

Здесь функции принадлежности $\mu_{A_k}(x)$, $k = 1, \dots, q$ должны отражать степень принадлежности нечеткими целевыми функциями своих оптимальных значений. Указанному условию, в частности, отвечают следующие функции принадлежности:

- для целевых функций подлежащих максимизации

$$\mu_{A_k}(x) = \left[\frac{f_k(x) - \min_{x \in L} f_k(x)}{\max_{x \in L} f_k(x) - \min_{x \in L} f_k(x)} \right]^{w_k}, \quad (1)$$

- для целевых функций подлежащих минимизации

$$\mu_{A_k}(x) = \left[\frac{\max_{x \in L} f_k(x) - f_k(x)}{\max_{x \in L} f_k(x) - \min_{x \in L} f_k(x)} \right]^{w_k}. \quad (2)$$

В приведенных выражениях показатель w_k характеризует степень важности (вес) отдельных целевых функций и его аргументированное задание может существенно влиять на принятие окончательного решения.

Субъективные методы определения весов целевых функций основаны в основном на использовании экспертных оценок и в рассматриваемом случае не могут быть применены, т.к. эксперт чаще всего не в состоянии оценить, что важнее – снизить потери энергии, повысить надежность электроснабжения или обеспечить надлежащий режим напряжений. В связи с этим в работе сделана ориентация на объективные методы оценки [6].

IEW (Information Entropy Weighting method) принято рассматривать в качестве одного из таких методов. В основе данного подхода лежит оценка энтропии информации, используемой при решении той или иной задачи, и веса отдельных целевых функций определяются в процессе выполнения следующей процедуры.

1. Используя вычисленные значения функций принадлежности нечетких целевых функций (1), (2), энтропия находится следующим образом

$$H_i = - \left(\sum_{j=1}^m e_{ij} \ln e_{ij} \right), \quad e_{ij} = \frac{1 + \mu_{A_k}}{\sum_{j=1}^m (1 + \mu_{A_k})}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m.$$

2. Определяется показатель

$$G_i = 1 - H_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

При этом, чем больше значение G_i , тем меньше энтропия информации, представляемой данной целевой функцией, что говорит о том, что она вносит больше информации в процедуру принятия решения и, следовательно, должна иметь больший вес.

3. На конечном этапе вычисляются веса отдельных целевых функций

$$w_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^n G_i} = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i}, \quad i = 1, \dots, n.$$

5 Выводы

Оценка эффективности применения источников распределенной генерации должна базироваться на комплексной оценке, рассматривая одновременно их влияние на потери электрической энергии, режим напряжений и надежность электроснабжения.

Обеспечение нормируемой надежности электроснабжения может потребовать значительных дополнительных затрат, которые зависят от точек интеграции генерирующих источников в распределительные сети.

Алгоритм Беллмана-Заде является эффективным инструментом для многокритериального сравнения альтернативных вариантов использования средств распределенной генерации, учитывая, что частные целевые функции имеют различную физическую природу и размерность.

Список литературы

1. *Стогий Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П.* Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – № 6. – С. 44-50.
2. *Попов В.А., Ярмолюк Е.С., Ткаченко В.В., Саид Банузاده Сахрагард* К вопросу рациональной интеграции источников распределенной генерации // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, Спеціальний випуск, Частина 1*. – Київ, 2011. – С. 111–121.
3. *Antikainen J., Repo S., Verho P., Jarventausta P.* Possibilities to Improve Reliability of Distribution Network by Intended Island Operation // *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*. – April 2009. – Vol. 4, № 1. – pp 22–28.
4. *Про затвердження форм звітності № 11-НКРЕ (квартальна) «Звіт щодо показників надійності електропостачання» та № 12-НКРЕ (квартальна) «Звіт щодо показників комерційної якості надання послуг» та інструкцій щодо їх заповнення* // *Постанова НКРЕ України № 1015 від 25.07.2013 р.*
5. *Bellmann R.E., Zadeh L.A.* Decision-making in a fuzzy environment // *Management Science*. – 1970. – № 17. – pp. 141–164.
6. *Гинявичюс Р., Подвезько В.* Влияние весов частных критериев на результаты многокритериальной оценки // *Вісник НАУ*. – 2004. – № 3. – стр. 37-41.

V.A. POPOV¹, P.J. EKEL², V.V. TKACHENKO¹, S. BANUZADE SAKHRAGARD³

¹ Energy saving and energy management institute of National Technical University of Ukraine "KPI"

² Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Ave. Dom Jose Gaspar

³ Iranian NIK Energy

TAKING INTO ACCOUNT THE FACTOR OF POWER SUPPLY RELIABILITY FOR COMPLEX ASSESSMENT OF OPTIONS OF DISTRIBUTED GENERATION INTEGRATION IN THE DISTRIBUTION NETWORKS

An approach to the integrated assessment of the impact of distributed generation on such indicators of distribution networks operation as the losses of electrical energy, the voltage regime and the reliability of power supply based on the Bellman-Zadeh procedures for the multi-criteria comparison of alternatives is proposed. The method of partial objective functions differentiation based on the evaluation of entropy is justified. Particular attention is paid to the peculiarities of reliability analysis for various connectivity options of generating sources to the electricity grid.

Key words: distributed generation, power supply reliability, multi-criteria decision making, entropy of information.

References

1. Stohnii B.S., Kyrylenko O.V., Denysyuk S.P. Intelligent electric mains of electrical power systems and their technological support // *Tekhnichna elektrodynamika*.– 2010.– № 6.– pp. 44-50. (Ukr)
2. Popov V.A., Yarmoliuk E.S., Tkachenko V.V., Saeed Banuzade Sakhragard On the rationality of integration of distributed generation sources // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, Spetsialnyi vypusk, Chastyna 1*.– Kyiv, 2011.– pp. 111–121. (Rus)
3. Antikainen J., Repo S., Verho P., Jarventausta P. Possibilities to Improve Reliability of Distribution Network by Intended Island Operation // *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*.– April 2009.– Vol. 4, № 1.– pp 22–28.
4. On approval of the reporting forms № 11-NERC (quarterly) «Report on the electricity supply reliability indexes» and № 12-NERC (quarterly) «Report on the commercial service quality indexes» and instructions for filling them // NERC of Ukraine Resolution № 1015 of 25.07.2013. (Ukr)
5. Bellmann R.E., Zadeh L.A. Decision-making in a fuzzy environment // *Management Science*.– 1970.– № 17.– pp. 141–164.
6. Ginevicius R., Podvezko V. The influence of the criteria weights on the results of multicriteria analysis // *Visnik NAU*.– 2004.– № 3.– pp. 37-41. (Rus)

УДК 621.316.11

В.А. ПОПОВ¹, канд. техн. наук, доц., П.Я. ЕКЕЛЬ², д-р техн. наук,
В.В. ТКАЧЕНКО¹, канд. техн. наук, С. БАНУЗАДЕ САХРАГАРД³, аспирант

¹ Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

² Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Ave. Dom Jose Gaspar

³ Iranian NIK Energy

УРАХУВАННЯ ФАКТОРА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ВАРІАНТІВ ІНТЕГРАЦІЇ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В РОЗПОДІЛЬНІ МЕРЕЖІ

У роботі запропоновано підхід для комплексної оцінки впливу розосередженої генерації на такі показники ефективності роботи розподільчих мереж як втрати електричної енергії, режим напруг і надійність електропостачання на підставі процедури Беллмана-Заде для багатокритеріального порівняння альтернатив. Обґрунтовано метод диференціації ваг цільових функцій на основі оцінки ентропії. Особливу увагу приділено особливостям аналізу надійності при різних варіантах підключення генеруючих джерел до електричних мереж.

Ключевые слова: розосереджена генерація, надійність електропостачання, багатокритеріальне прийняття рішень, ентропія інформації.

Надійшла 10.05.2015

Received 10.05.2015