

ВОПРОСЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ МЕГАПОЛИСОВ

С.А. Ерошенко¹, С.А. Дмитриев¹, Д.В. Кузнецов², С.Е. Кокин¹, А.В. Паздерин¹

¹Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

²Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: stas_ersh@mail.ru

Рассматривается задача размещения генерирующих источников малой мощности в распределительных сетях мегаполисов. Представлена краткая характеристика основных тенденций развития систем электроснабжения. Предложена многокритериальная постановка задачи размещения малой генерации. Приведены результаты расчетного эксперимента.

Ключевые слова: *распределенная генерация, система электроснабжения, оптимизация местоположения и мощности, распределительная сеть.*

Введение. На протяжении многих десятилетий энергетика развивалась по пути повышения концентрации и увеличения единичных мощностей. В целях повышения КПД увеличивались мощности энергетических установок, повышались уровни номинального напряжения электрических сетей. Для обеспечения работы объединенных электроэнергетических систем (ЭЭС) создавались многоуровневые иерархические системы диспетчерского управления. Централизованный путь развития энергетики привел к возникновению энергетических корпораций, монополично обеспечивающих энергоснабжение потребителей, а также ремонт, техобслуживание и другие вспомогательные услуги. Монополистический принцип организации вертикально интегрированных энергокомпаний однозначно соответствовал государственному устройству.

Модернизация электроэнергетики, начавшаяся на рубеже веков, привела к финансовой самостоятельности электросетевых компаний, источниками которой являются денежные средства за транспорт электроэнергии (ЭЭ) и плата за техническое присоединение. При увеличении числа электросетевых предприятий и уменьшении размера каждого в отдельности по сравнению с дореформенными вертикально интегрированными энергокомпаниями существенно возросли риски и значимость управленческих решений. Финансовая ответственность электросетевых компаний за собственные сети привела к повышению значимости вопросов энергосбережения, снижения сверхнормативных потерь ЭЭ и повышения качества измерительных систем учета ЭЭ. Рост нагрузки электропотребления, длительный срок службы действующего силового оборудования и связанный с ним износ требуют адекватного управления электросетевыми объектами и образованиями.

В последние годы наблюдается рост применения потребителями ЭЭ генерирующих агрегатов малой мощности в ЭЭС на средних и низких классах номиналь-

Станислав Андреевич Ерошенко, аспирант.

Степан Александрович Дмитриев (к.т.н.), доцент.

Дмитрий Владимирович Кузнецов (к.т.н.), докторант.

Сергей Евгеньевич Кокин (к.т.н.), доцент.

Андрей Владимирович Паздерин (д.т.н.), зав. кафедрой.

ного напряжения, в том числе и на основе возобновляемых источников энергии, в виде совокупности распределенных энергетических ресурсов. Данная тенденция связана с большей инвестиционной привлекательностью генерирующих объектов малой мощности, которые требуют меньших капитальных вложений, имеют значительно меньший срок окупаемости и, как следствие, меньший инвестиционный риск. Широкое применение распределенной генерации (РГ) в мире говорит о новом направлении, которое связано с развитием локальной энергетики как наиболее экономически эффективной и экологичной отрасли энергопроизводства [2]. Появление таких источников РГ, энергоаккумулирующих установок, современных цифровых устройств измерения и управления режимными параметрами энергосистем приводит к качественным изменениям как в самих ЭЭС, так и в системах их управления.

Все вышесказанное в первую очередь относится к системам электроснабжения (СЭС) больших городов – мегаполисов, которые развиваются более высокими темпами в сравнении с остальными энергообъектами, используя прогрессивные технологии. Мегаполисы представляют собой самые крупные формы городских поселений, которые возникают или образуются путем интегрированного объединения главного города с окружающими его населенными пунктами. Таким образом, в результате слияния инфраструктур образуются большие и сложные технические системы, обеспечивающие гарантированное энерго- и электроснабжение потребителей и функционирование всех подсистем СЭС (см. рис.1). ЭЭС средних размеров становятся соизмеримыми с такими СЭС мегаполисов. Следовательно, СЭС представляют собой самостоятельные объекты для изучения и исследования.

Анализ литературы показал, что для термина «распределенная генерация» общепринятое определение пока отсутствует. Приведем несколько определений, предложенных различными организациями, научными сообществами и отдельными учеными.

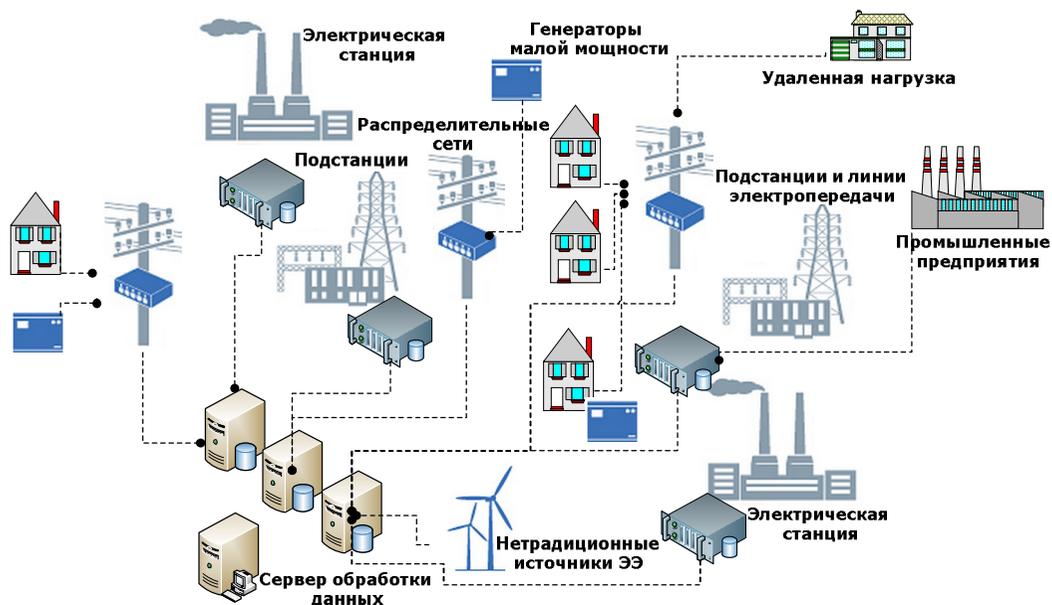
Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) определяет РГ как генерацию электрической энергии при помощи агрегатов, значительно меньших по мощности, нежели централизованные электрические станции, что позволяет реализовать подключение данных энергоустановок практически к любой точке энергосистемы.

П. Донди и др. [4] определяют РГ как малый источник электрической энергии или устройство для ее запасаения (мощностью от нескольких ватт до десятков мегаватт), которые не являются частью большой централизованной энергосистемы и расположены вблизи от места потребления.

Т. Акерман и др. [5] дают определение устройствам РГ с точки зрения мест присоединения РГ к сети и расположения, а не с позиции количественной оценки установленной мощности. Авторы определяют РГ как генерирующие установки, подключенные напрямую к распределительной сети или установленные с потребительской стороны от границы балансовой принадлежности.

В последнее время все большее число научных публикаций зарубежных ученых связано с вопросами РГ, поскольку во многих экономически развитых странах Европы и в США доля электроэнергии, вырабатываемой в системах РГ, находится на уровне 15-30 %. При этом существенную долю РГ составляет энергия, получаемая из возобновляемых источников. В странах Европы к 2020 г. прогнозируется выработка 20 % электроэнергии на возобновляемых источниках, а в США – 30 % к 2030 г. [5]. В нашей стране развитие РГ также происходит бурными темпами, но практически без внедрения установок, использующих возобновляемые источники энергии. Это, в первую очередь, газотурбинные и газопоршневые установки мощностью до 30 МВт,

которые устанавливаются крупными промышленными предприятиями со своей стороны границы балансовой принадлежности для снижения объемов энергии, покупаемой у энергоснабжающей компании. Для крупных отечественных потребителей проекты по развитию РГ инвестиционно привлекательны в силу постоянного роста тарифов на электрическую энергию и высокой платы за присоединение к электрическим сетям; кроме того, они повышают надежность собственного электроснабжения [6].



Р и с. 1.

Причины общемирового интереса к источникам РГ, в первую очередь, обусловлены существенными техническими и экономическими преимуществами устройств данного типа перед объектами «большой» энергетики.

1. Плюсы для потребителя:

- улучшение надежности и качества электроснабжения;
- учет индивидуальных требований по электроснабжению;
- уменьшение стоимости электрической и тепловой энергии за счет снижения потерь при передаче;
- эксплуатационная гибкость источников РГ;
- экологическое чистое производство электрической энергии;
- широкий ассортимент доступных технологий.

2. Плюсы для поставщика:

- снижение ущерба от недоотпуска электрической энергии;
- снижение финансовых рисков энергокомпаний;
- отсрочка инвестиций в модернизацию сетевого оборудования;
- обеспечение низких затрат входа на рынок.

3. Плюсы для государства:

- улучшение экологической обстановки;
- поддержание конкуренции на рынке электрической энергии.

Несмотря на все преимущества устройств РГ, их внедрение может негативно повлиять на СЭС. Внедрение РГ, в особенности использующей возобновляемые источники энергии, может замаскировать рост нагрузки у потребителей и существенно

усложнить проблему соблюдения баланса между генерацией и потреблением. При высоком проценте выработки, приходимся на установки РГ, графики выдачи мощности которых не координируются системным оператором, возникают проблемы диспетчерского управления электростанциями «централизованной» энергетики, так как эти станции должны брать на себя все внезапно возникающие небалансы между генерацией и потреблением. При высокой доле выработки электроэнергии источниками РГ в распределительных сетях возникает необходимость создания систем автоматического управления, сглаживающих во времени внезапные локальные небалансы между нагрузкой и генерацией за счет изменения режима электропотребления. Это предполагает высокую степень охвата распределительной сети информационно-измерительными системами, обеспечивающими возможности активного управления. В таких условиях, с точки зрения возможностей управления, СЭС с РГ на низких классах номинального напряжения из пассивного состояния переходят в активное. Увеличение степени управляемости в распределительных сетях в зарубежной технической литературе в последние годы характеризуется термином Smart grid, или «умные сети» [7, 8].

Научные проблемы распределенной генерации и «умных сетей» близки к традиционной проблематике больших электроэнергетических систем. Однако количественные отличия часто переходят в качественные, что требует изучения новых свойств и особенностей систем с РГ. На основе обзоров зарубежных публикаций можно выделить следующие основные направления научных исследований в этой области [9]:

- математические и оптимизационные модели для выбора мощности и расположения различных типов объектов РГ;
- алгоритмы оптимальной реконфигурации распределительной сети с источниками РГ;
- регулирование уровней напряжения и реактивной мощности за счет устройств РГ;
- экономические аспекты РГ и управления «активной» распределительной сетью;
- чистые и возобновляемые источники энергии;
- параллельная работа РГ с электрической сетью;
- релейная защита «активных» распределительных сетей;
- цифровые системы управления распределительными сетями с РГ.

Задача оптимизации местоположения и мощности РГ является одной из первоочередных и подлежит тщательному рассмотрению на стадии проектирования. Корректно выбранная точка подключения к сети и мощность агрегата могут улучшить работу сети и обеспечить дополнительные экономические стимулы как для потребителей, так и для поставщиков.

В действительности задача оптимизации размещения и мощности РГ имеет много общего с классической оптимизационной задачей выбора площадок расположения и мощности крупных электрических станций. В то же время существует ряд количественных и качественных отличий [10].

Для задачи размещения источников РГ в сети также характерна многокритериальность. Предложим ряд критериев оптимизационной задачи выбора местоположения и мощности источника РГ.

Инвестиции. В рыночных условиях важнейшую роль играет финансовая составляющая. Жесткая ограниченность инвестиционных средств заставляет делать

выбор, балансирующий между ценой и качеством. Таким образом, критерий инвестиций является одной из важнейших сторон реализации любого технического проекта [11]. Коэффициент, приведенный ниже, позволяет учесть этот момент. Чем ближе данный коэффициент к единице, тем более выгодным является проект:

$$\tilde{N}^k = 1 - \frac{C_n^k}{C_{\max}^k}, \quad (1)$$

где n – величина, характеризующая значение мощности генерирующей установки; C_n^k – стоимость генерирующего агрегата мощности n с установкой; C_{\max}^k – максимально возможные инвестиционные средства для реализации проекта.

Потери активной и реактивной мощности. Источники РГ могут способствовать снижению потерь мощности в сетях СЭС, поскольку позволяют разгрузить линии электропередачи [12]. В то же время возможный реверсивный поток по линиям электропередачи может привести к увеличению потерь мощности. Нижеприведенные коэффициенты отражают потери активной и реактивной мощности в сети. Чем ближе к единице эти коэффициенты, тем более выгодное положение РГ было выбрано с точки зрения данного критерия.

$$Lp^k = 1 - \frac{\operatorname{Re}\{\Delta S^k\}}{\operatorname{Re}\{\Delta S^0\}}; \quad Lq^k = 1 - \frac{\operatorname{Im}\{\Delta S^k\}}{\operatorname{Im}\{\Delta S^0\}}, \quad (2)$$

где ΔS^k – потери полной мощности в распределительной сети k ; ΔS^0 – потери полной мощности в распределительной сети без источника РГ.

Напряжения. Еще одной выгодой, которую можно извлечь при помощи внедрения устройств РГ в сеть, является улучшение параметров напряжений в сети. Сформулируем данный критерий с точки зрения максимального отклонения значения напряжения от номинального [13]. Данный показатель также будет использован для определения наиболее перспективного узла для установки РГ.

$$V^k = 1 - \max_{i=1} \left(\frac{|U_0| - |U_i^k|}{|U_0|} \right)^{NN-1}, \quad (3)$$

где U_0 – комплексное напряжение головной подстанции; U_i^k – комплексное напряжение узла i распределительной сети k ; NN – число узлов.

Допустимые токи по линиям. Ввиду того, что РГ располагается вблизи нагрузки, в некоторых участках линий ток может снижаться, разгружая линию электропередачи и увеличивая запас по пропускной способности. Приведенный ниже коэффициент позволяет оценить токи по линиям с учетом максимально допустимых токов проводников.

$$J^k = 1 - \max_{m=1} \left(\frac{|I_m^k|}{I_m^{\text{äiäi}}} \right)^{NL}, \quad (4)$$

где I_m^k – ток участка m распределительной сети k ; $I_m^{\text{äiäi}}$ – допустимый ток участка m ; NL – число участков сети.

Многокритериальный показатель. Для оценки работы распределительной сети по вышеприведенным критериям вводится многокритериальный показатель. Данная величина является безразмерной и учитывает все вышеприведенные технические и экономические критерии [14].

$$F(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \lambda_3 f_3(x) + \lambda_4 f_4(x) + \lambda_5 f_5(x) = \lambda_1 \cdot C^k + \lambda_2 \cdot Lp^k + \lambda_3 \cdot Lq^k + \lambda_4 \cdot V^k + \lambda_5 \cdot J^k, \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^5 \lambda_i = 1,0 \wedge \lambda_i \in [0,1]$.

Весовые коэффициенты введены для того, чтобы задать соответствующую значимость каждому критерию. В табл. 1 приведены возможные значения весовых коэффициентов.

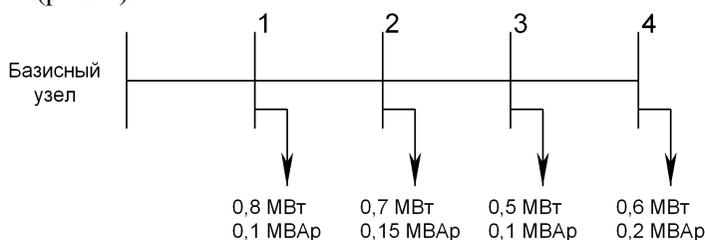
Т а б л и ц а 1

Весовые коэффициенты

$\lambda_1(C^k)$	$\lambda_2(Lp^k)$	$\lambda_3(Lq^k)$	$\lambda_4(V^k)$	$\lambda_5(J^k)$
0,40	0,30	0,05	0,2	0,05

Таким образом, многокритериальный показатель численно описывает влияние источника РГ с заданной мощностью в заданной точке подключения к сети на технические эксплуатационные характеристики системы, включая экономический показатель, представляющий собой инвестиционный капитал. Чем ближе значение многокритериального показателя к единице, тем больший положительный эффект достигается от внедрения источника РГ.

Пример. Для иллюстрации рассмотрим простейшую схему радиальной распределительной сети (рис. 2).



Р и с. 2. Схема сети

Номера и нагрузки узлов указаны на схеме. Напряжение базисного узла равно $U = 10 \angle 0^\circ$ кВ. Для простоты решения сопротивления участков фидера приняты одинаковыми $Z = 0,8 + j \cdot 0,25$ Ом.

Коэффициенты, отражающие влияние РГ на сеть, совместно с инвестиционной составляющей рассчитываются путем последовательного размещения во всех возможных узлах данной сети генерирующих агрегатов мощностью 300, 600 и 1200 кВт (коэффициент мощности генерирующих установок равен 1), что представляет собой 11,5, 23 и 46 % нагрузки фидера соответственно.

Удельная стоимость одного киловатта установленной мощности принимается

равной для всех агрегатов, следовательно, инвестиционная составляющая будет рассчитываться исходя из отношения установленных мощностей источников РГ. Максимальный инвестиционный капитал эквивалентен стоимости источника РГ мощностью 1200 кВт.

Расчет проводится простым перебором возможных вариантов размещения источника РГ. Для расчета потокораспределения, потерь мощности, токов участков и узловых напряжений использовался программный пакет RASTR.

Базовый режим (без источника РГ) дал следующие результаты:

$$\tilde{N}_n^k = 0, \Delta P = 0,107 \text{ МВт}, \Delta Q = 0,03 \text{ МВар}, U_{\min} = 9,4 \text{ кВ}, I_{\max} = 160 \text{ А}.$$

В процессе выполнения расчетов было отмечено, что эксплуатационные характеристики описанной системы улучшаются по мере приближения устройств РГ к концу фидерного присоединения: улучшаются параметры напряжения, снижается максимальный ток по участкам линии, снижаются потери как активной, так и реактивной мощности. Наилучшие с точки зрения значений многокритериального показателя варианты с источником РГ мощностью 300, 600 и 1200 кВт соответственно сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты расчетов

$P_{\text{аа}i}$, МВт	Номер узла	ΔP , МВт	ΔQ , МВар	I_{\max} , А	U_{\min} , кВ	$F(x)$
300	4	0,077	0,025	141	9,6	0,598
600	4	0,054	0,02	123	9,7	0,570
1200	4	0,028	0,01	88	9,8	0,473

Из таблицы видно, что наибольшее значение многокритериального показателя $F(x)$ имеет вариант установки источника РГ мощностью 300 кВт. В первую очередь это объясняется тем, что инвестиционный критерий в общей сумме имеет самый значимый весовой коэффициент. Как уже упоминалось ранее, на практике весовые коэффициенты могут быть распределены иначе, а также могут быть введены другие критерии, что, вероятно, приведет к выбору другой альтернативы.

Выводы

1. Задача оптимизации выбора местоположения в СЭС и мощности устройств РГ очень важна, поскольку на стадии планирования и проектирования позволяет учесть многие технические и экономические параметры генерирующих агрегатов.

2. Данная задача имеет много общего с ее классической постановкой, касающейся оптимизации развития крупных электрических станций. Однако рыночная специфика отрасли, технические параметры новых устройств, а также социальные и географические факторы требуют учета новых оптимизационных критериев.

3. Задача оптимизации является многокритериальной и имеет большую размерность, что, прежде всего, обусловлено сложностью топологии существующих распределительных сетей. Очень важна как постановка оптимизационной задачи, так и алгоритм ее решения, который представляет собой смешанную задачу целочисленного программирования, где присутствуют как бинарные, так и непрерывные переменные. Таким образом, требуется усовершенствование существующих или разработка новых математических методов решения подобных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аюев Б.И. Рынки электроэнергии и их реализация в ЕЭС России. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 107 с.
2. Moskovitz D. Profits and progress through distributed resources, The Regulatory Assistance Project, Tech. Rep., 2000.
3. Borbely A.M., Kreider J.F. Distributed Generation. – New York: CRC Press, 2003.
4. Dondi P., Bayoumi D., Haederli C., Julian D., and Suter M. Network integration of distributed power generation, London, United kingdom, 2002, pp. 1-9.
5. Ackermann T., Andersson G., and Sder L. Distributed generation: a definition, Electric Power Systems Research, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
6. Gellings C.W. The concept of demand-side management for electric utilities, Proc. IEEE, vol. 73, no. 10, pp. 146-1470, Oct. 1985.
7. Flynn B. What is the real potential of the Smart Grid? Automation 2007, The AMRA International Symposium, Reno, Nevada, September 30 – October 3, 2007.
8. Saifur R. Smart Grid Expectations, IEEE energy magazine, pp 34-79, September/October, 2009.
9. Lopes J.A.P., Hatziaargyriou N., Mutale J., Djapic P., Jenkins N. Integrating distributed generation into electric power systems, a review of drivers, challenges and opportunities, Electric Power systems Research, vol. 77, issue 9, pp. 1189-1203, July 2007.
10. Арзамасцев Д.А., Лунес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем: учеб. для энергетич. спец. вузов / Под ред. Д.А. Арзамасцева. – М.: Высшая школа, 1987. – 272 с.
11. Hoff T.E., Wenger H.J., and Farmer B.K. Distributed generation. An alternative to electric utility investments in system capacity, Energy Policy, 24, 2 (1996), 137-147.
12. Frase P. and Morita S. Distributed generation in liberalised electricity markets, International Energy Agency, 9, rue de la Federation. 75739 Paris, cedex 15, France, Tech. Rep., 2002.
13. Blazewicz. Reliability and distributed generation, Arthur D. Little, Inc., Tech. Rep., 2000.
14. Barker P. and R.W. de Mello. Determining the impact of distributed generation on power systems, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, vol.3 Seattle, WA, Jul 16-20, 2000, pp. 1645-1656.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2011 года

PROBLEMS OF SITING OF DISTRIBUTED GENERATION POWER SOURCES IN ELECTRICAL NETWORKS OF MEGAPOLISES

S.A. Yeroshenko¹, S.A. Dmitriev¹, D.V. Kuznetsov², S.E. Kokin¹, A.V. Pazderin¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
19, Mira st., Yekaterinburg, 620002

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

In this paper the problem of optimal siting and sizing of distributed generation in distribution networks of megalopolises is examined. The principle trend of power supply system development is considered as well. Multi-criteria mathematical problem formulation of small-scaled power generation siting and sizing is considered by a certain case study, the analysis of which is also provided.

Keywords: *distributed generation, power supply system, siting and sizing optimization, distribution system.*

Stanislav A. Yeroshenko, Postgraduate student.

Stepan A. Dmitriev, Ph.D. (Techn.), Associate professor.

Dmitriy V. Kuznetsov Ph.D. (Techn.), Doctoral Candidate.

Sergey E. Kokin Ph.D. (Techn.), Associate professor.

Andrey V. Pazderin (Dr. Sci. (Techn.)), Head of chair.