

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Статья посвящена проектированию электротехнических систем с распределенной генерацией, а именно выбору оптимальных напряжений для систем питания и распределения электрической энергии, поскольку использование оптимальных напряжений минимизирует затраты на эксплуатацию и сооружение систем. Целью работы является разработка алгоритма и программы расчета оптимальных напряжений электротехнических систем с распределенной генерацией. Алгоритм реализован в системе конструкторского проектирования MathCAD. По результатам расчета программы можно сделать вывод, что полученные значения оптимальных напряжений для систем питания и распределения электрической энергии соответствуют справочным данным и могут быть использованы при проектировании электротехнических систем с распределенной генерацией.

Ключевые слова: распределенная генерация, оптимальное напряжение, электротехническая система, микросеть, источник энергии, электроустановка, технология генерации.

Введение. Одним из перспективных технологических изменений для российской энергетики является внедрение микросетей на базе распределенной генерации (РГ) [1, 2]. РГ представляет собой размещение электроустановок в отдельных зданиях, предприятиях с возможностью выдачи энергии во внешнюю сеть. Близость электроустановок к основному потребителю позволяет минимизировать потери при передаче энергии, а также дает возможность отапливать помещения за счет выделения тепловой энергии в процессе работы электроустановок [3]. Возможность выбора технологии РГ делает ее более гибкой по сравнению с централизованной электротехнической системой (ЭТС), позволяя учитывать мощность отдельных электроприемников, а также тип и удаленность топливных ресурсов.

Производство энергии в ЭТС с РГ осуществляется при использовании следующих технологий [4, 5]:

1. Парогазовые турбины.
2. Двигатели внутреннего сгорания.
3. Паровые турбины.
4. Микротурбины.
5. Ветрогенераторы.
6. Солнечные тепловые электростанции.
7. Топливные элементы.
8. Геотермальная электростанция.
9. Двигатель Стирлинга.
10. МикроГЭС.
11. МиниГЭС.
12. Фотоэлектрические преобразователи.

Таким образом, на данный момент существует множество технологий локальной генерации энер-

гии. Технология может быть основана на сжигании топлива с последующим превращением тепловой энергии в механическую энергию вращения генератора (турбины с типичным размером модуля 1–400 МВт, двигатели внутреннего сгорания мощностью 5 кВт–10 МВт). Для локальной генерации может быть использована энергия ветра (ветрогенераторы мощностью 200 Вт–3 МВт). Технология генерации может использовать солнечную энергию (солнечные тепловые электростанции с типичным размером модуля 1–80 МВт). При наличии геотермальных источников энергии для локальной генерации могут быть использованы геотермальные электростанции мощностью 5–100 МВт.

При выборе технологии ЭТС с РГ следует учитывать, что коэффициент полезного действия (КПД) зависит от объема генерации. Многие из вышеперечисленных технологий обладают при малых объемах производства энергии довольно низким КПД. В этом отношении и с точки зрения коммерческой доступности наиболее перспективными для применения в ЭТС с РГ являются поршневые двигатели, в частности, двигатели с циклом Отто. Электрическая эффективность таких двигателей при объемах генерации меньше 14 кВт не превышает 25 %. Но общая эффективность (объединенная тепловая и электрическая эффективности) составляет не менее 79 %.

Следует отметить, что повсеместное внедрение ЭТС с РГ уменьшит объемы выбросов, что должно положительно сказаться на экологической обстановке в стране и здоровье ее населения.

Для широкого внедрения ЭТС с РГ необходимо выполнить структурные изменения энергосистемы, которые должны основываться на проектах отдельных микросетей с РГ.

Для создания микросети на базе РГ необходима тщательная проработка проекта, который включает в себя помимо конструкторской, эксплуатационной документации обоснованный расчет параметров ЭТС с РГ. Так как любая ЭТС с РГ представляет собой сложную многопараметрическую систему, то для качественного и оптимального по срокам расчета параметров ЭТС с РГ предлагается использовать блочно-иерархический подход к процессу проектирования с применением информационных технологий [6, 7], а именно систем конструкторского проектирования (Computer Aided Design, CAD). При этом можно выделить 6 основных этапов проектирования ЭТС с РГ [8]:

- детализация источников энергии;
- детализация приемников энергии;
- детализация системы передачи электрической энергии;
- детализация системы распределения электрической энергии;
- детализация преобразователей электрической энергии;
- изображение принципиальной схемы.

В настоящей работе рассматривается этап детализации источников энергии. Данный этап представляет собой выбор первичных и вторичных источников электрической энергии. В качестве первичных источников в ЭТС с РГ используются генераторы постоянного или переменного тока (синхронный и асинхронный генераторы, силовой электронный преобразователь), аккумуляторы и т.д. Вторичные источники электрической энергии представляют собой преобразователи следующих видов:

- преобразователи переменного тока в переменный;
- преобразователи переменного тока в постоянный;
- преобразователи постоянного тока в переменный;
- преобразователи постоянного тока в постоянный.

В качестве вторичных источников энергии в основном используются трансформаторы.

На стадии проектирования источников энергии добиваются повышения экономичности ЭТС с РГ [9]:

- выбором оптимального количества источников в зависимости от суммарной мощности электроприемников системы, графиков нагрузок;
- определением рационального места положения источников энергии.

При этом ЭТС с РГ должна соответствовать требованиям надежности согласно категории электроприемников системы.

Очевидно, что этап детализации источников электрической энергии ЭТС с РГ является многопараметрической задачей, для качественного и быстрого по срокам решения которой необходимо применение информационных технологий с использованием специального алгоритмического и программного обеспечения, а именно систем конструкторского проектирования. Для данного этапа проектирования системы наиболее важным является вопрос выбора оптимального напряжения ЭТС с РГ, под которым понимается такое значение стандартного номинального напряжения, при котором

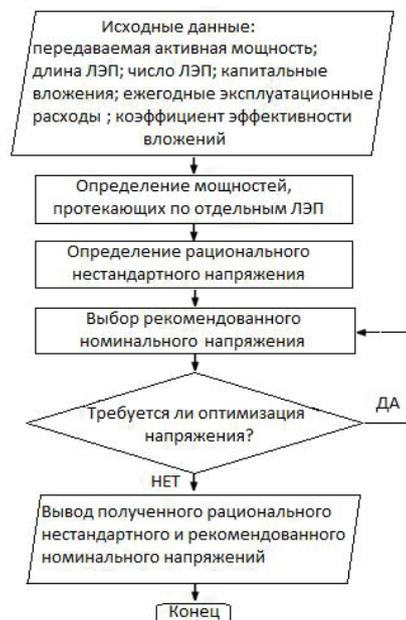


Рис. 1. Блок-схема выбора оптимального напряжения

сооружение и эксплуатация ЭТС имеют минимальное значение приведенных затрат.

Работы [10–12] посвящены проектированию ЭТС с РГ, в частности выбору источников энергии. Однако в указанных работах процедура выбора оптимального напряжения ЭТС с РГ представляется недостаточно проработанной, так как не рассмотрен алгоритм оптимизации напряжения ЭТС с РГ с учетом ежегодных приведенных затрат.

Поэтому целью данной работы является выбор оптимального напряжения ЭТС с РГ, а именно, разработка алгоритма и программы расчета оптимального напряжения источника энергии для ЭТС с РГ в системе конструкторского проектирования MathCAD с учетом ежегодных приведенных затрат.

Алгоритм выбора оптимального напряжения и обсуждение результатов расчета программы. Алгоритм выбора оптимального напряжения источника энергии ЭТС с РГ показан в виде блок-схемы (рис. 1).

Алгоритм реализован в системе конструкторского проектирования MathCAD. В качестве исходных данных программы выбраны следующие характеристики ЭТС с РГ: P_0 — передаваемая активная мощность (МВт), L — длина линии электропередачи (ЛЭП), км, N — число ЛЭП, K — капитальные вложения, руб./год, I — ежегодные эксплуатационные расходы, руб., E — коэффициент эффективности вложений, год⁻¹.

Операция определения мощностей, протекающих по отдельным ЛЭП представляет собой деление передаваемой активной мощности на число ЛЭП:

$$P = \frac{P_0}{N}, \quad (1)$$

где P — активная мощность, протекающая по отдельной ЛЭП.

Операция определения рационального нестандартного напряжения представляет собой расчет рационального напряжения $U_{\text{рац}}$ в зависимости от значений активной мощности P и длины линий L по следующим формулам:

$$U_{\text{рац}} = 4,34\sqrt{0,016P + L}; \quad (2)$$

$$U_{\text{рац}} = \sqrt{P(0,1 + 0,15\sqrt{L})}; \quad (3)$$

$$U_{\text{рац}} = 1000 / \sqrt{500 / L + 2500 / P}, \quad (4)$$

где (2) — формула Стила для $L \leq 250$ км и $P \leq 60$ МВт; формула (3) — формула А. М. Залеского для $L \leq 1000$ км и $P \geq 60$ МВт; (4) — формула Г. А. Илларионова для $P \geq 1000$ МВт.

Операция выбора рекомендованного номинального напряжения представляет собой сравнение полученного расчетного значения рационального нестандартного напряжения с рядом номинальных напряжений электрических сетей.

Операция оптимизации рекомендованного номинального напряжения представляет собой расчет ежегодных приведенных затрат на строительство и эксплуатацию ЭТС с выбранным в предыдущей операции по следующей формуле:

$$Z = EK + I, \quad (5)$$

где Z — ежегодные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию ЭТС, руб., E — нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений, год⁻¹, K — капитальные вложения, руб./год, I — ежегодные эксплуатационные расходы, руб. Затем рассчитываются ежегодные приведенные затраты Z для предшествующего и последующего значений номинального напряжения из ряда номинальных напряжений электриче-

ских сетей. После чего выбирается, которому соответствуют наименьшие ежегодные затраты Z .

Следует отметить, что исходные данные, используемые при расчете ежегодных приведенных затрат, могут варьироваться с течением времени и в зависимости от региона страны.

Результаты расчета программы и справочные данные [13–15] представлены в виде табл. 1, в которой P — передаваемая активная мощность на одну цепь (диапазон значений активной мощности P выбран произвольно), L — длина линии, U_1 — справочное номинальное напряжение, U_2 — рациональное нестандартное напряжение (результат расчета программы), U_3 — рекомендованное номинальное напряжение (результат расчета программы).

Из таблицы следует, что:

— значения рациональных нестандартных напряжений меньше значений рекомендованных номинальных напряжений, что можно объяснить операцией оптимизации номинального напряжения с учетом ежегодных приведенных затрат, включенной в алгоритм работы программы;

— рекомендованные номинальные напряжения соответствуют справочным номинальным напряжениям.

Таким образом, результаты расчета программы и справочные данные не отличаются.

Рекомендованные номинальные значения напряжений могут быть использованы для расчета системы электроснабжения индивидуального жилищного строительства (ИЖС) с РГ при помощи имитационного моделирования в специализиро-

Таблица 1

Результаты расчета программы и справочные данные

P , МВт	L , км	U_1 , кВ	U_2 , кВ	U_3 , кВ
0,1	3	10	7,52	10
2	10	20	13,75	20
15	30	35	23,87	35
50	150	110	53,3	110

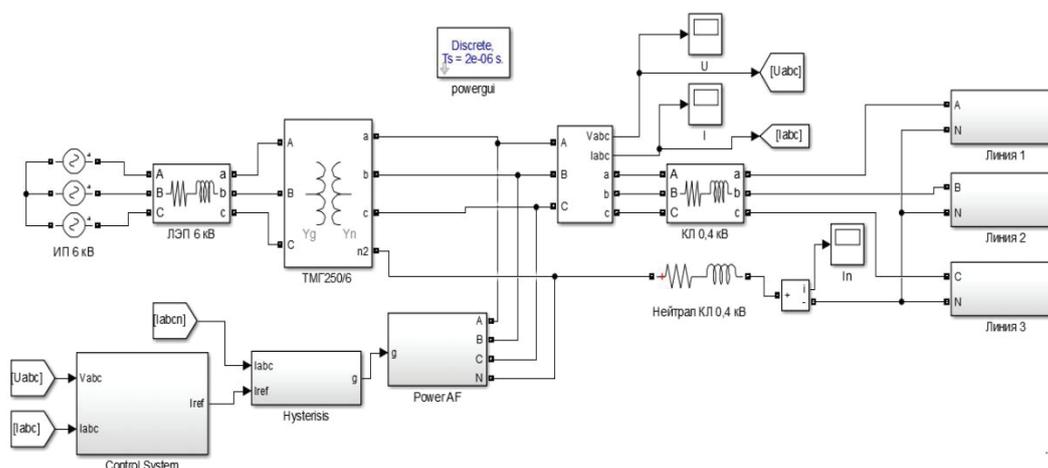


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения ИЖС

ванных системах конструкторского проектирования (Matlab&Simulink и т.п.). Имитационная модель системы электроснабжения ИЖС в программе Matlab&Simulink представлена на рисунке (рис. 2).

При моделировании системы электроснабжения следует учитывать особенность ИЖС — рост электропотребления за счет увеличения разнообразия и доступности бытовых электроприемников, и использовать большее из рекомендованных номинальных значений напряжений.

Рассмотрен этап детализации первичных источников энергии при расчете параметров ЭТС с РГ, а именно алгоритм и программа выбора рациональных напряжений для систем питания и распределения электроэнергии с учетом ежегодных приведенных затрат. Результаты расчета программы по разработанному алгоритму соответствуют справочным данным и могут быть использованы при проектировании ЭТС с РГ на этапе детализации первичных источников энергии.

Библиографический список

1. Леонов Е. Н. Системы децентрализованного электроснабжения на основе технологий микрогенерации и их перспективы // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2014. С. 91 — 93. ISBN 978-5-9613-0289-9.
2. Pehnt M., Cames M., Fisher C. [et al.]. Micro Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems. Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 346 p. Hardcover ISBN 978-3-540-25582-6.
3. Ivanin O. A., Director L. B. The Use of Artificial Neural Networks for Forecasting the Electric Demand of Stand-Alone Consumers // Thermal Engineering. 2018. Vol. 65, no. 5. P. 258 — 265. DOI: 10.1134/S004060151805004X.
4. Жилин Е. В. Минимизация потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2018. 22 с.
5. Дубинин В. С. Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России (часть 1) // Промышленная энергетика. 2005. № 9. С. 7 — 13.
6. Ivanin O. A., Director L. B. The solution of the optimization problem of small energy complexes using linear programming methods // IOP Conf. Series: Journal of Physics. Conf. Ser. 2016. Vol. 774, no. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/774/1/012046.
7. Ахтулова Л. Н., Ахтулов А. Л., Леонов Е. Н. [и др.]. Интеграционные технологии при создании малых электротехнических систем и комплексов на основе методологии когенерации // Омский научный вестник. 2014. № 2 (130). С. 145 — 151.
8. Леонов Е. Н. Разработка методики оптимизации проектирования структуры электротехнических систем с распределенной генерацией: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2017. 20 с.
9. Ахтулов А. Л., Леонов Е. Н., Федоров В. К. Методика оптимального выбора источников энергии в электротехнических системах распределенной генерацией // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 2. С. 20 — 25.
10. Ерохин П. М., Ерошенко С. А., Паздерин А. В. [и др.]. Разработка адекватных технических условий для технологического присоединения генерирующих объектов малой мощности к электрической сети // Промышленная энергетика. 2016. № 2. С. 6 — 12.
11. Samoylenko V. O., Eroshenko S. A., Pazderin A. V. Towards a sustainable development given the gradual conventional energy sources upgrade // International Conference On Sustainable Cities (ICSC 2016). 2016. Vol. 6. DOI: 10.1051/e3sconf/20160603011.
12. ГОСТ 721 — 77. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В (с изм. № 1, 2, 3). Введ. 1978 — 07 — 01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 8 с.
13. ГОСТ 21128 — 83. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В. (с изм. № 1). Введ. 1984 — 07 — 01. М.: Изд-во стандартов, 1995. 5 с.
14. Voropai N. I., Styczynski Z. A., Shushpanov I. N. [et al.]. Security Model of Active Distribution Electric Networks // Thermal Engineering. 2013. Vol. 60, Issue 14. P. 1024 — 1030. DOI: 10.1134/S0040601513140097.
15. Fishov A., Shiller M., Dekhterev A., Fishov V. Stability Monitoring and Control of Generation Based on the Synchronized Measurements in Nodes of Its Connection // Journal of Energy and Power Engineering. 2015. Vol. 9. P. 59 — 67. DOI: 10.17265/1934-8975/2015.01.007.

КОЩУК Галина Андреевна, ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Адрес для переписки: galina_koshuk@mail.ru

КОСАРЕВ Борис Андреевич, инженер по специальности «Промышленная электроника».

Адрес для переписки: BorisK_88@mail.ru

ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 2389-6978,

AuthorID (РИНЦ): 512746

AuthorID (SCOPUS): 57194237212

Адрес для переписки: el.tech.omgtu@gmail.com

Для цитирования

Кошук Г. А., Косарев Б. А., Федоров В. К. Выбор оптимального напряжения источника энергии для системы электроснабжения с распределенной генерацией // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 115 — 118. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-115-118.

Статья поступила в редакцию 25.10.2018 г.

© Г. А. Кошук, Б. А. Косарев, В. К. Федоров