

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рубан Н.Ю., Аскарлов А.Б., Андреев М.В., Киевец А.В., Рудник В.Е. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 7–30.
2. Zuo Y., Yuan Z., Sossan F., Zecchino A., Cherkaoui R., Paolone M. Performance assessment of grid-forming and grid-following converter-interfaced battery energy storage systems on frequency regulation in low-inertia power grids // Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2021. – № 27. – 100496.
3. Hatziargyriou N. и др. Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended // IEEE Transactions on Power Systems. – 2021. – № 36(4). – P. 3271–3281.
4. Guo X.-Q., Wu W.-Y., Gu H.-R. Phase locked loop and synchronization methods for grid-interfaced converters: A review // Przegląd Elektrotechniczny. – 2011. – № 87(4). – P. 182–187.
5. Танфильев О.В., Филиппова Т.А., Танфильева Д.В. Особенности параметрирования автоматики ликвидации асинхронного хода в неполнофазных режимах // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2018. – № 2 (71). – С. 175–187.
6. Li Y., Fan L., Miao Z. Wind in Weak Grids: Low-Frequency Oscillations, Subsynchronous Oscillations, and Torsional Interactions // IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. – № 35(1). – P. 109–118.
7. Cheema K.M. A comprehensive review of virtual synchronous generator // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2020. – № 120. – 106006.

Научный руководитель: А.А. Суворов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВЕТРОГЕНЕРАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Ю.Д. Бай¹, И.А. Разживин¹, Я.Ю. Малькова²
Томский политехнический университет^{1,2}
ИШЭ, ОЭЭ^{1,2}, группа 5АМ11²

В связи с тенденцией увеличения потребления электроэнергии, сложившейся за последние 15-20 лет, модернизация современных электроэнергетических систем (ЭЭС) является актуальной [6]. Принимая во внимание стремление ведущих стран к сохранению окружающей среды, они постепенно переходят на использование возобновляемых источников энергии.

Одной из основных проблем, связанных с использованием ветроэнергетических установок (ВЭУ), является стохастический характер выработки электроэнергии и её зависимость от конкретного места установки [5]. Также, возникают проблемы неравномерности и труднопрогнозируемости режимов работы ВЭУ, что в свою очередь влияет на оценки их влияния на режимы и процессы в ЭЭС.

Для определения оптимальных объемов и мест внедрения ВЭУ с минимально возможными потерями мощности необходимо определить строгий и адекватный метод устранения неопределенностей режима.

Введение

В теории вероятностей установлено, что, зная плотность распределения вероятностей (ПРВ) и функцию распределения вероятностей (ФРВ) [1] можно определить все возможные состояния, которые будет принимать исследуемая величина. Однако, рассмотрение соответствующих задач связано с решением многомерных функциональных зависимостей (ФЗ), где трудности возникают, начиная с четвертого порядка. Поэтому, активно используются различные численные методы, такие как: методы Монте-Карло, метод Грамма-Шарлье, и т.д. [7]. Тем не менее, в вышеперечисленных методах для многомерных зависимостей требуется в геометрической прогрессии увеличивать необходимое минимальное число испытаний для сохранения статистической репрезентативности результатов. Решить проблему возрастания минимально-допустимого количества требуемых испытаний позволяет разработка метода прямого преобразования входных вероятностно-определенных данных исходных параметров режима в выходные полные вероятностные характеристики исследуемых величин.

Используемый метод определения вероятностных параметров

Алгоритм получения ПРВ многомерной ФЗ в обобщенном упрощенном виде можно представить в виде следующих процедур:

1. Подготовка видов и параметров одномерных ФРВ и ПРВ случайных аргументов:

$$\begin{aligned} & \mu_1, \dots, \mu_2, \dots, \mu_3, \sigma_1, \dots, \sigma_2, \dots, \sigma_3; \\ & X_1, \dots, X_i, \dots, X_n, \text{ т.е. } f_1(x_1), \dots, f_i(x_i), \dots, f_n(x_n); \\ & c_1(x_1), \dots, c_i(x_i), \dots, c_n(x_n); \end{aligned} \quad (1)$$

где μ – МО, σ – СКО, f – ФРВ, c – ПРВ.

2. Выбор количества и самих значений порядков квантилей ФРВ: $0, p_1, \dots, p_j, \dots, 1$.
3. Формирование значений СА, функциональной зависимости как квантилей каждого выбранного одного порядка ФРВ и одномерных ПРВ аргументов от этих квантилей (для порядка p_j):

$$\begin{aligned} & x_{1p_j} = f_1^{-1}(p_j), \dots, x_{ip_j} = f_i^{-1}(p_j), \dots, x_{np_j} = f_n^{-1}(p_j); \\ & y_{p_j} = \varphi(x_{1p_j}, \dots, x_{ip_j}, \dots, x_{np_j}); \\ & c_1(x_{1p_j}), \dots, c_i(x_{ip_j}), \dots, c_n(x_{np_j}); \end{aligned} \quad (2)$$

4. Базовые составляющие совместных ФРВ и ПРВ случайных аргументов ФЗ или порядки квантилей ФЗ как совмещений значений всех независимых СА (для порядка p_j):

$$p_j \cdots p_j \cdots p_j = f_{1\dots i\dots n}(x_{1p_j}, \dots, x_{ip_j}, \dots, x_{np_j}) = f_1(x_{1p_j}) \cdots f_i(x_{ip_j}) \cdots f_n(x_{np_j}); \quad (3)$$

$$c_{1\dots i\dots n}(x_{1p_j}, \dots, x_{ip_j}, \dots, x_{np_j}) = c_1(x_{1p_j}) \cdots c_i(x_{ip_j}) \cdots c_n(x_{np_j}).$$

5. Формирование и обработка квантилей порядков независимых СА функциональной зависимости. Вычисление значений ФЗ, совместных ПРВ случайных аргументов, а также выбор и суммирование последних как составляющих ПРВ по принципу равенства ФЗ.

Эксперименты

Для моделирования ЭЭС с ВЭУ в вероятностном формате используется Matpower [9]. Эксперименты проводятся для тестовой схемы IEEE-57. Подробная информация о параметрах сети изложена в технической документации [3]. Исходные параметры узлов и их ЗРВ устанавливаются в соответствии со статистическими данными. Формирование перечня контролируемых параметров и заданных предельных требований проводится согласно регламентирующим нормативно-техническим документам [2].

В первую очередь рассчитывается установившийся режим. Первым этапом происходит определение вероятностных характеристик узлов и ветвей. Вторым этапом вычисляются вероятностные характеристики потерь мощности в ветвях. Для рассмотрения дальнейшего внедрения объектов ВЭУ были выделены ветви № 27, 8 и 15, а именно узлы № 9, 12 и 15.

Таблица 1. Вероятностные данные потерь мощности выборки ветвей

Величина	Минимум ФЗ	Максимум ФЗ	ФЗ (ФРВ > 0,99)	ФЗ (%) от максимума ФЗ	Мода
$S_{л15}$, МВА	0,0685	79,4	6,691	8,65	5,3812
$S_{л8}$, МВА	1,860	45,431	13,122	30,11	11,301
$S_{л27}$, МВА	0,0036	30,482	1,508	4,62	2,2541

Далее в рассматриваемые узлы внедряется ВЭУ в качестве P-V агрегата. Для экспериментов были взяты три временных ряда ветра с неизвестными законами распределения. Каждая выборка аппроксимировалась с последующей проверкой на соответствие выбранным законам критериями согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова [4]. Первым данным максимально соответствует распределение Вейбулла, вторым – Рэлея, а третьим – нормальное. Модель кривой мощности для моделирования ВЭУ выбрана параметрическая квадратичная. Механические данные взяты из данных об оригинальной NREL 5.0 МВт турбине [8].

Планируемая мощность внедрения – 10, 20, и 50 МВт. При увеличении внедряемой мощности объект ВЭУ рассматривается с теми же вероятностными характеристиками, что и единичный агрегат.

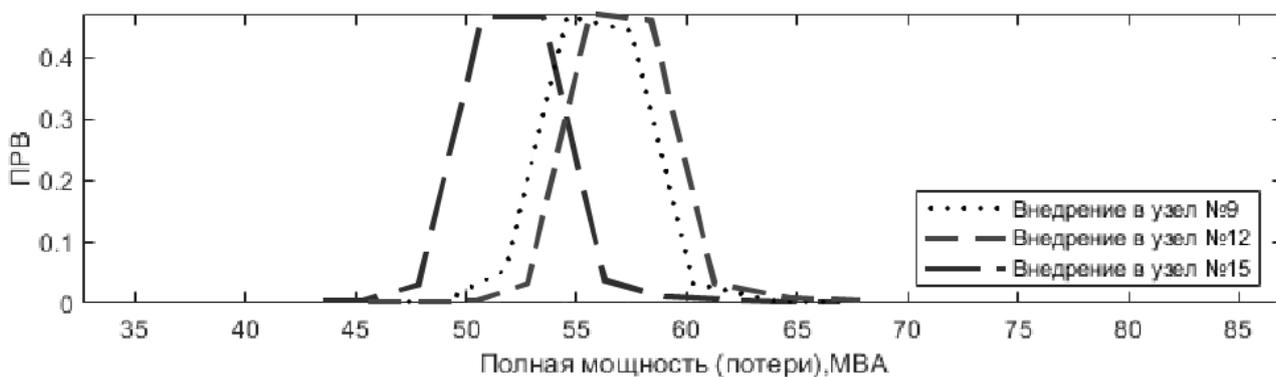


Рис. 1. Изменение ПРВ потерь мощности при внедрении ВЭУ с ЗРВ Вейбулла на примере внедрения 20 МВт в перечень узлов

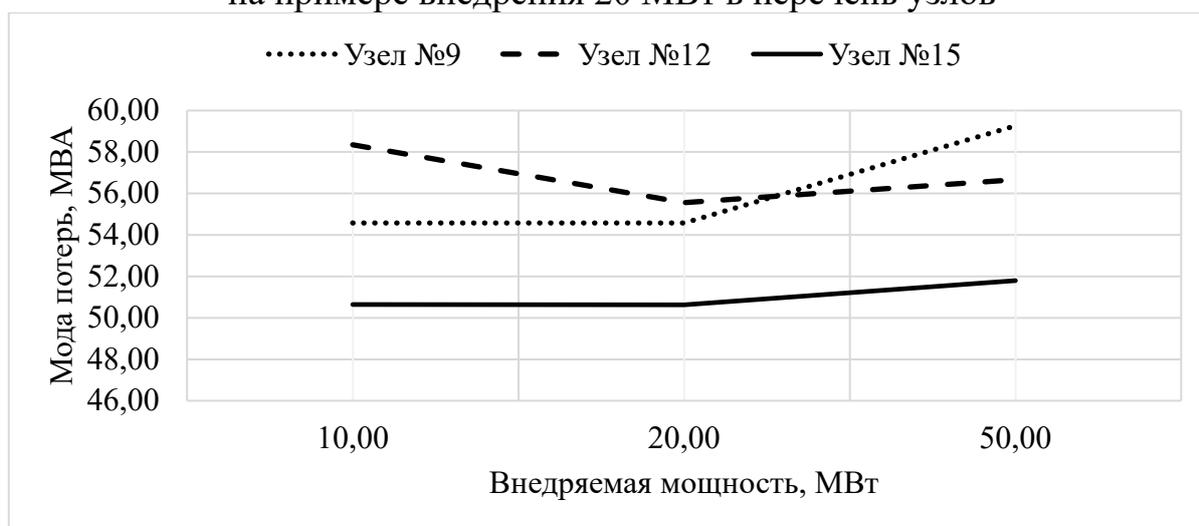


Рис. 2. Изменение ПРВ потерь мощности при внедрении ВЭУ с ЗРВ Рэлея на примере внедрения 10 МВт в перечень узлов

В соответствии с полученными данными:

- для внедрения 10 МВт оптимальными узлами являются: № 15, 9, 12;
- для внедрения 20 МВт оптимальными узлами являются: № 15, 9, 12;
- для внедрения 50 МВт оптимальными узлами являются: № 15 и 12. По контролируемым параметрам не проходит внедрение 50 МВт в узел №9.

Выводы

В данной работе представлена методика вероятностного определения оптимальных узлов и объемов внедрения объектов ВЭУ в сеть. Из представленных результатов экспериментальных исследований следует, что разработанные метод и алгоритм его реализации позволяют определять оптимальные узлы и объемы внедрения ВЭУ с помощью формирования и анализа законов распределения вероятностей параметров режимов. Разработанный алгоритм позволил рассчитать наиболее повторяемые значения потерь мощности и токов в ветвях, что, в рамках заданных предельных требований способствовало определению наилучшего сценария внедрения ВЭУ, в том числе с учетом прогнозирования увеличения внедряемой мощности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. - М.: Высш. шк., 1999.- 576 с.
2. Воропай Н.И. Надежность систем электроснабжения. Конспект лекций. - Новосибирск: Наука, 2006.- 205с.
3. Anand R., Balaji. V. Power Flow Analysis of Simulink IEEE 57 Bus Test System Model using PSAT // Indian Journal of Science and Technology. - 2015. - V 8.- N 23.- P. 1-9.
4. Гафарова Л.М., Завьялова И.Г., Мустафин Н.Н. Об особенностях применения критерия согласия Пирсона χ^2 // ЭСГИ. - 2015.- N 4 (8).- С. 63-67.
5. Wang J., Hu J., Ma K. Wind Speed Probability Distribution Estimation and Wind Energy Assessment // Renewable & Sustainable Energy Reviews. - 2016. - V 60.- P. 881–899.
6. Ahmed S.D., Al-Ismail F.SM., Shafiullah M., Al-Sulaiman F.A., El-Amin I.M. Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review // IEEE Access. - 2020. - V 2.- P. 10857-10878.
7. Karimishad A., Nguyen T. Probabilistic Transient Stability Assessment Using Two-Point Estimate Method // 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009), IET. - 2019.- P. 1-6.
8. Jonkman J., Butterfield S., Musial W., Scott G. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development [Электронный ресурс] // NREL, Colorado, USA, Tech. Rep. NREL/TP-500-38060.- 2009.- 75 p. Режим доступа: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/38060.pdf>.
9. Zimmerman R.D., Murillo-S´anchez C.E. Matpower Documentation [Электронный ресурс] // Power Systems Engineering Research Center (PSerc). - 2020.- 249 p. Режим доступа: <https://matpower.org/doc>.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-3249.2021.4

Научный руководитель: М.В. Андреев, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД КОНДЕНСАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Г.Р. Валеева

Казанский государственный энергетический университет

Накопителями электроэнергии называются устройства, способные аккумулировать электрическую энергию для ее дальнейшего использования. Наиболее удобными для эксплуатации являются химические накопители электроэнергии,