

Применение метода высвобождения кинетической энергии ветряного колеса ВЭУ 4-го типа в связке с модулем СИ может привести к нарушению устойчивой работы ВЭУ. Стабильная работа обеспечивается лишь в некотором диапазоне коэффициентов модуля СИ.

Наблюдаемая неустойчивость работы ВЭС 4-го типа обуславливается реактивным набором скорости ветрового колеса свыше номинальной после торможения ротора.

Исследование показало, что внедрение в энергосистему возобновляемых источников энергии, в частности, ветроэнергетических установок 4-го типа, влечет за собой более резкое изменение частоты после возмущений. Однако применение блоков синтетической инерции улучшает устойчивость системы, значительно сокращая предельное отклонение частоты. В свою очередь неправильная настройка параметров управления может привести к тому, что даже при относительно небольшой доле внедрения ВИЭ переходный процесс будет длиться значительно дольше и опаснее.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Xiong, Liansong, Yujun Li, Yixin Zhu, Ping Yang, "Coordinated Control Schemes of Super-Capacitor and Kinetic Energy of DFIG for System Frequency Support" *Energies* 11, no. 1: 103. 2018 <https://doi.org/10.3390/en11010103>.
2. Teodorescu, R. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems* / R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez // Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
3. P. Tielens and D. Van Hertem, "Grid inertia and frequency control in power systems with high penetration of renewables," in *Young Researcher Symposium Delft*, April 2012, pp. 1- 6.

Научный руководитель: к.т.н. Рубан Н. Ю., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УЗЛОВ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Ю.Д. Бай, Б.Д. Малюта, П.П. Радько
Томский политехнический университет
ИШЭ, ОЭЭ

Введение

В связи с наблюдающейся в последние 15–20 лет тенденцией роста электропотребления актуальной задачей является устойчивое развитие электроэнергетических систем (ЭЭС). Учитывая стремление ведущих стран к энергетической независимости, в настоящее время активно внедряется низкоуглеродная энергетика на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. Одной из основных задач при внедрении ВИЭ в существующие электроэнергетические системы без дополнительных изменений в сети является максимизация выработки электроэнергии с наименьшими потерями мощности и соблюдение требований сети.

В случае использования метаэвристических алгоритмов оптимизации нахождение глобального оптимума в общем случае не может быть гарантировано. В статье предложен метод повышения достоверности расчета вероятностных характеристик потерь мощности для оптимальной мощности ветроэнергетических установок (ВЭУ) и их размещения.

Используемый метод определения вероятностных параметров

В первую очередь, реализуется алгоритм определения вероятностных параметров установившихся режимов [3] для предварительного определения возможных мест присоединения ветроэнергетической установки (ВЭУ). Для данной цели была отобрана тестовая схема

IEEE-14 [4]. Вторым этапом является определение вероятностных характеристик потерь мощности в ответвлениях цепи. Наибольшие потери наблюдаются в линиях 1, 2, 8, 10, 14 (рисунок 1). Потери мощности наблюдались и на других линиях, однако, в соответствии с топологией ЭЭС и местами подключения ВЭУ, их потери меньше.

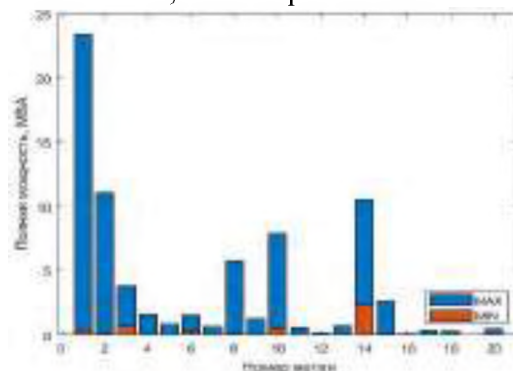


Рис. 1. Потери полной мощности в ЭЭС

Для рассмотрения дальнейшего подключения ВЭУ выделены ветви 1, 2, и 14. Согласно финальной оценке вероятностных характеристик напряжений, полученных данных, для присоединения выбраны узлы №2, 5, и 8. Планируемая мощность подключения – 5, 10, 20 и 50 МВт [5].

Таблица 1. Вероятностные данные потерь мощности выборки ветвей

Ветвь	$\Phi Z_{\min}$	$\Phi Z_{\max}$	$\Phi P > 0,99$	ΦZ (%) от $\Phi Z_{\max}$
$S_{л1}$, МВА	0,3617	23,3366	5,34	23,24
$S_{л2}$, МВА	0,203	11,035	5,168	47,71
$S_{л14}$, МВА	2,317	10,534	6,563	53,93

Эксперименты

Далее были проведены эксперименты по внедрению ВИЭ. Во время основного эксперимента, согласно алгоритму, ВЭУ с заданным законом распределения и мощностью была подключена к ряду predetermined узлов. По завершению, была сформирована таблица полных результатов, включающая данные об изменениях потерь электроэнергии в основных исследуемых ветвях, общих потерях и соответствующих вероятностных характеристиках и их параметрах [6]. В таблице 2 приведена краткая выдержка основных вероятностных параметров общих потерь мощности схемы IEEE-14 при подключении ВЭУ ко 2-му узлу.

Таблица 2. Выдержка основных вероятностных параметров полных потерь мощности

Шина подключения	Мощность ВЭУ, МВт	ЗРВ ветра	μ	M_0	σ	Максимум ΦZ	$\Phi P > 0,99$
Данные установившегося режима			16,95	16,62	1,62	78,17	18,54
Данные с учетом нормально допустимых требований			20,35	19,46	1,95	82,08	22,25
№2	5,00	Weibull	17,28	17,19	0,65	75,60	19,48
		Rayleigh	17,28	17,39	0,65	76,90	19,72
		Normal	17,09	16,80	0,61	76,94	19,72
	10,00	Weibull	17,75	17,76	0,67	75,60	20,05
		Rayleigh	17,74	17,58	0,68	78,23	19,96
		Normal	17,32	17,59	0,62	78,32	19,94
	20,00	Weibull	18,78	18,91	0,72	75,60	21,20
		Rayleigh	18,73	18,61	0,77	80,96	21,08
		Normal	17,79	18,01	0,66	81,13	20,48
	50,00	Weibull	19,36	19,36	0,78	90,27	22,14
		Rayleigh	22,24	22,08	1,10	89,79	25,54
		Normal	21,34	21,03	1,22	92,17	23,45
5	5,00	Weibull	17,31	17,19	0,64	77,22	19,79
		Rayleigh	17,30	17,44	0,65	77,16	19,79
		Normal	17,10	16,86	0,62	77,29	19,79
	10,00	Weibull	17,36	17,18	0,63	75,41	20,06

Шина подключения	Мощность ВЭУ, МВт	ЗРВ ветра	μ	M_0	σ	Максимум ФЗ	ФРВ > 0,99
	20,00	Rayleigh	17,89	17,71	0,69	78,78	20,11
		Normal	17,36	17,13	0,63	78,89	20,13
		Weibull	18,97	18,93	0,74	75,38	21,21
		Rayleigh	18,92	18,88	0,79	82,27	21,39
		Normal	17,88	17,65	0,67	82,50	20,80
	50,00	Weibull	23,82	23,92	1,00	75,27	26,74
		Rayleigh	23,60	24,05	1,21	93,52	26,92
		Normal	20,20	19,84	0,77	94,16	23,44
		Weibull	19,05	18,96	0,73	76,60	21,29
8	5,00	Rayleigh	18,99	19,16	0,77	81,29	21,64
		Normal	18,03	17,92	0,68	81,44	20,41
		Weibull	21,30	21,29	0,85	76,60	23,62
	10,00	Rayleigh	21,19	21,30	0,96	86,21	23,95
		Normal	19,08	19,32	0,72	86,52	21,98
		Weibull	26,37	26,53	1,15	76,60	28,86
	20,00	Rayleigh	26,11	26,23	1,44	96,72	29,23
		Normal	21,37	21,00	0,83	97,41	24,79
		Weibull	46,18	46,64	2,55	90,74	50,14
	50,00	Rayleigh	45,15	45,95	3,59	133,93	50,19
		Normal	45,15	45,95	3,59	133,90	47,19
		Weibull	45,15	45,95	3,59	133,90	47,19

По этим данным определяется разница в изменении потерь мощности при подключении ВЭУ к одному узлу с разными законами ветра (рисунок 2) и ко всем узлам с одинаковым законом (рисунок 3).

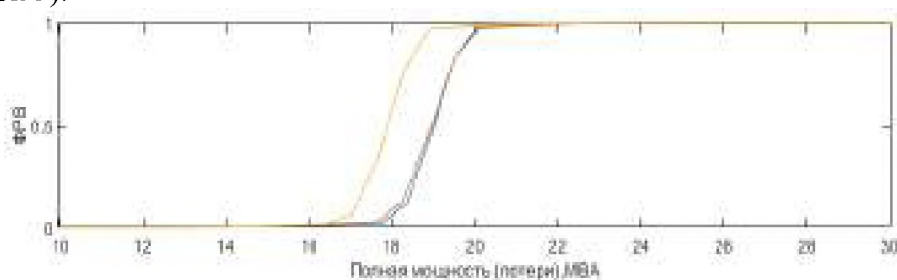


Рис. 2. Изменение ФРВ потерь мощности при подключении ВЭУ с разным ЗРВ ветра мощностью 20 МВт в узел 5

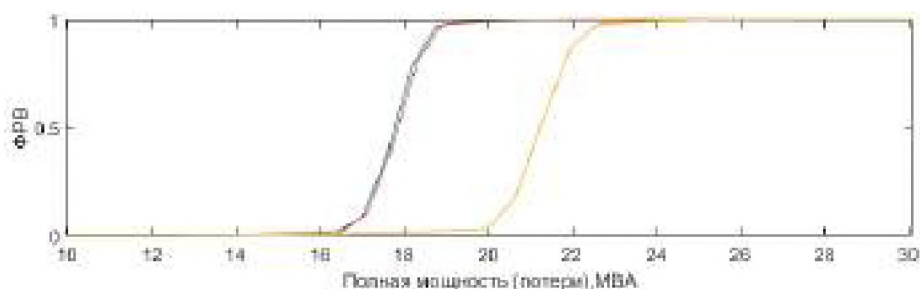


Рис. 3. Изменение ФРВ потерь мощности при подключении ВЭУ с ЗРВ Рэля мощностью 10 МВт в перечень узлов

Согласно полученным данным:

- для мощности подключения ВЭУ равной 5 МВт оптимальным вариантом будет: № 2 (нормальный закон);
- для мощности подключения ВЭУ равной 10 МВт в узле № 8 возможно использование только нормального закона. Оптимальным вариантом будет: № 5 (закон Вейбулла);
- для мощности подключения ВЭУ 20 МВт оптимальным вариантом будет: № 5 (нормальный закон);
- мощность подключения ВЭУ 50 МВт допустима только к узлу № 2 (закон Вейбулла).

Выводы

В данной работе получены теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные результаты, имеющие отношение к изучению оптимальных сценариев подключения ВЭУ. Проведенные контрольно-экспериментальные исследования подтвердили свойства и возможности разработанного метода повышения достоверности формирования вероятностных характеристик установившихся параметров ЭЭС, в том числе значений редкой повторяемости.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Преобразование глобальной энергетической системы: дорожная карта до 2050 г [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irena.org/>.
2. Optimal Placement of Wind Farm on the Power System Using Multiobjective Bees Algorithm / Ph. Prakornchai // Proceedings of the World Congress on Engineering, 2011. – V. 10. – P. 1–5.
3. Stochastic Modeling of a DFIG Wind Turbine in Matpower / Y.D. Bay, A.S. Gusev, A.A. Suvorov, I.A. Razzhivin, A.B. Askarov // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P.76005–76014.
4. Design, Simulation, and Construction of an IEEE 14-Bus Power System / J. Boudreaux – Louisiana: Louisiana State University, 2009. – 42p.
5. 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.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание "Наука" № FSWW-2020-0017.

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

ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ ОБЪЕКТА ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Я.Ю. Малькова

Томский политехнический университет
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5AM11

Ввод нового объекта генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) предупреждает процедура определения параметров данного объекта, в том числе, его мощности и узла подключения к энергосистеме, а также параметров оборудования, размещаемого совместно, например, системы накопления энергии (СНЭ) [1, 2].

В том случае, если объект ВИЭ – автономный (здесь и далее по тексту под объектом ВИЭ будем поднимать солнечную электростанцию), в качестве единственного источника заряда СНЭ выступает сам объект локальной генерации.

Так, СНЭ может заряжаться в дневные часы, когда генерация объекта ВИЭ достигает своего максимального значения, а текущая нагрузка при этом минимальна. Затем, накопленную энергию можно использовать в часы пикового спроса на электроэнергию: в вечерний пик в течение этих же суток или же на следующий день, во время утреннего пика [3]. Кроме того,