

Раздел 3. Инженерное обеспечение

УДК 621.311.24: 621.3.026.5

АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДУЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ КРЫМА

Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Бекиров О.С.

Физико-технический институт, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»,
Адрес: Симферополь, ул. Киевская, 181,
e-mail: Bekirov.e.a@cfuv.ru

Аннотация. В статье проведено исследование работы модульных компенсаторов реактивной мощности на Мирновской и Пресноводненской ветроэлектростанциях. Для этого приведены измерения активной и реактивной мощностей за краткие промежутки времени: несколько часов для Мирновской ветроэлектростанции и за сутки для Пресноводненской, а также значения для каждого месяца в течение одного года. Колебания реактивной мощности при использовании компенсаторов реактивной мощности могут быть очень незначительными, в основном за счет времени коммутации, а эффективность обоснована повышением коэффициентов мощности до значений, близких к единице.

Предмет исследования: ветроэлектростанции. Все ветроэлектростанции как генерируют активную мощность, являющуюся функцией от скорости ветра, так и потребляют реактивную мощность. Оба этих процесса могут наблюдаться одновременно и возникает проблема, связанная с уменьшением коэффициента мощности. Конденсаторных батарей, расположенных в шкафах управления, часто недостаточно для ее решения.

Материалы и методы: применялись аналитический и экспериментальный методы. Измерения проводились на Мирновской и Пресноводненской ветроэлектростанциях.

Результаты: Установлено, что применение модульных компенсаторов реактивной мощности на ветроэлектростанциях позволяет практически полностью компенсировать потребление реактивной мощности.

Выводы: Исследования показали, что на ветроэлектростанциях необходимо устанавливать дополнительные компенсирующие устройства, чтобы увеличить коэффициент мощности до значений, близких к единице, и практически полностью перекрыть потребность в реактивной мощности как в режимах, близких к номинальному, так и при отсутствии ветра.

Ключевые слова: компенсатор реактивной мощности; ветроэлектростанция; осциллограмма; ветроэнергетический модуль; трансформаторная подстанция.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно большое внимание уделяется использованию возобновляемых источников энергии. Одним из таких источников является ветер, особенностью которого является стохастический характер изменения в течение как суток, так и всего года. Соответственно, это влияет на изменение как генерации активной мощности ветроэнергетическими установками (ВЭУ) в составе ветроэлектростанции (ВЭС), так и на потребление реактивной мощности, что объясняется использованием во многих ВЭУ асинхронных генераторов.

Перетоки реактивной мощности, в свою очередь, влияют на качество электроэнергии и на взаимодействие с общей сетью. В связи с этим могут использоваться различные способы компенсации реактивной мощности, каждый из которых будет иметь преимущества и недостатки для конкретно взятой ситуации и состава ВЭС.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Практически во всех существующих электрических сетях будут присутствовать перетоки реактивной мощности, влияющие на качество

электроэнергии [1] и на возможности коммутации потребителей и источников. Как следствие, потери мощности могут рассчитываться с помощью математических [2] или полиномиальных моделей [3]. Первые более сложные и требуют более высокой квалификации, вторые – проще и требуют меньшего количества данных.

Для ветроэлектростанций перетоки реактивной мощности могут быть существенными в зависимости от номинальных мощностей и используемых типов генераторов. В связи с этим в шкафах управления каждой ВЭУ установлены конденсаторные батареи, но не всегда их достаточно. Тем более, что и их возможности могут быть ограничены двумя ступенями. Более многоступенчатые компенсаторы намного сложнее, хотя и подтверждают свою эффективность [4]. Также для них нужно разрабатывать отдельные регуляторы для переключения ступеней [5]. Работа современных регуляторов основана на адаптивных моделях прогнозирования, например на сутки вперед [6]. В этом случае могут понадобиться дополнительные расчеты и мероприятия.

Методы прогнозирования реактивной мощности также различаются и могут быть достаточно сложными. Например, если речь идет о сети с различными потребителями, то могут применяться комбинаторные методы, включающие теорию

случайных процессов и обратное вейвлет-преобразование [7]. прогнозирование с использованием искусственной нейронной сети [8], моделей глубокого обучения [9].

Одним из наиболее распространенных способов компенсации реактивной мощности является применение статического синхронного компенсатора [10]. Также возможно использование косинусных конденсаторов [11], тиристорных коммутируемых конденсаторных батарей [12] или более сложных гибридных устройств с преобразователями [13], параллельных активных фильтров [14], обладающих рядом ограничений, твердотельных трансформаторов [15], накопителей энергии для оптимизации распределения мощностей [16].

Отдельные ученые предлагают использовать ветроэлектростанции и солнечные электростанции для оптимизации режимов электроэнергетической системы в целом и для этого размещать их в ключевых точках, определяемых с помощью алгоритма оптимизации роя частиц [17].

Таким образом, проблематика компенсации реактивной мощности актуальна и требует разных решений для отдельно взятых задач и условий.

Целью исследования является: анализ одного из возможных способов компенсации – с помощью модульного компенсатора реактивной мощности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использовались экспериментальные и аналитические методы. Экспериментальные данные получены при помощи измерительного оборудования Мирновской и Пресноводненской ветроэлектростанций. Для визуализации осциллограмм применялся Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Первый экспериментальный образец модульного компенсатора реактивной мощности был смонтирован на Мирновской ВЭС на трансформаторной подстанции (ТП) № 3 мощностью 1000 кВА.

В период опытной эксплуатации модульный компенсатор показал высокую энергетическую эффективность. Удалось добиться практически нулевого перетока реактивной энергии на шинах 35 кВ трансформаторной подстанции ветроэнергетического модуля (ВЭМ).

Наличие функции автоматического создания баз данных параметров работы модульного компенсатора реактивной мощности (КРМ), а также баз данных автоматического мониторинга параметров электрической энергии измерительного комплекса промышленных ветроэлектрических станций, позволяет провести анализ результатов опытной эксплуатации модульного КРМ.

На рис. 1 приведены осциллограммы активной и реактивной мощностей на 2-х часовых интервалах

времени для двух ветроэлектрических модулей ТП-3 и ТП-11. По количеству подключенных к ним ветротурбин (9 шт.) и по конструктивному исполнению они абсолютно одинаковы, за исключением того, что на ТП-3 установлен модульный компенсатор реактивной мощности и расположены они в разных местах. Измерения параметров электроэнергии осуществлялись комплексом с периодом квантования 1 с, однако для визуализации результаты измерения представлены на рисунках одним значением на 10-и секундном интервале времени.

Осциллограммы соответствуют различным нагрузочным режимам работы ВЭМ. Измерения на двух ТП производились синхронно, однако графики активной мощности немного отличаются по величине и фазе в результате пространственного распределения скоростей ветра на территории станции. Генерируемая активная мощность изменялась в диапазоне 0,1-0,8 номинального значения. Применение модульного КРМ, установленного на ТП-3, позволило оперативно реагировать на изменение потребления реактивной мощности и практически полностью её компенсировать. Незначительные отклонения реактивной мощности на ТП-3 обусловлены дискретным изменением ёмкости конденсаторных батарей и действием задержки времени (60 с) момента коммутации. Следовательно, работа модульного КРМ удовлетворяет требованиям обеспечения непрерывной компенсации реактивной мощности в процессе генерирования активной мощности в полном диапазоне изменения скорости ветра.

Результаты анализа объемов активной и реактивной энергии, измеренных на шинах ТП-3 и ВЭС на протяжении года, представлены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 видно, что на ТП-3 достигнута практически полная компенсация реактивной мощности, потребляемая ветроэлектрическим модулем. Среднее значение коэффициента мощности за год эксплуатации составило 0,999. В то же время, по станции в целом, которая состоит из ВЭУ USW 56-100, укомплектованными только штатными компенсирующими конденсаторами, он оставался значительно ниже (0,8522). Если аналогичные модульные КРМ установить на остальных 12-ти ТП, то можно достичь практически полной компенсации потребляемой реактивной мощности на шинах Мирновской ВЭС.

Зная тяжелый характер работы КРМ в условиях действующей промышленной ВЭС, оценим некоторые показатели его надежности. Оценку проведём косвенным методом, используя данные функции самодиагностики ресурса основных его элементов и их паспортных данных.

Самым нагруженным элементом модульного компенсатора реактивной мощности являются силовые контакторы включения конденсаторов и сами конденсаторы. Согласно паспортным данным коммутационная износостойкость контакторов

11BF40K.10 фирмы “Lovato” составляет не менее 200000 циклов включений / отключений.

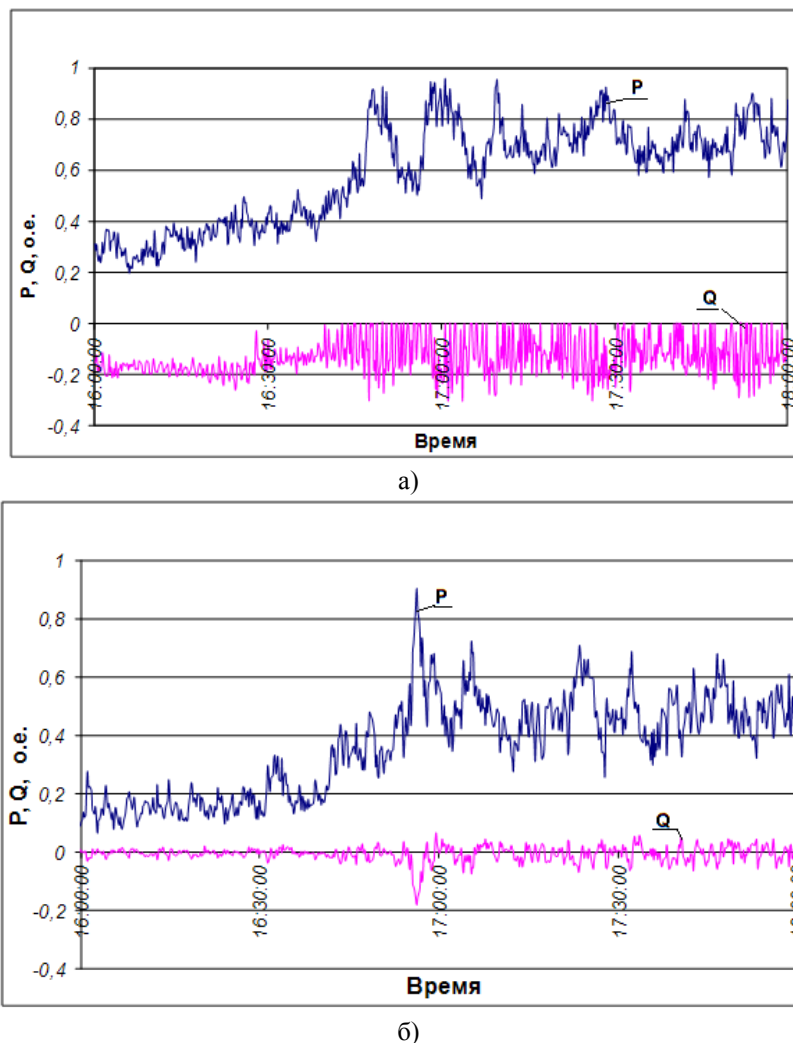


Рис. 1. Осциллограммы измеренных мгновенных значений активной и реактивной мощностей: а) на ТП-11; б) на ТП-3
Fig. 1. Oscillograms of measured instant values of active and reactive capacities: a) on the transformer substation number 11; b) on the transformer substation number 3

Таблица 1. Объемы перетоков активной и реактивной электроэнергии на шинах Мирновской ВЭС и ТП-3
Table 1. Volumes of active and reactive electricity flows on busbars of the Mirnovskaya wind farm and on the transformer substation number 3

Год, месяц	Шины 35 кВ Мирновской ВЭС			Шины 35 кВ ТП-3		
	Активная энергия (генерация), кВт	Реактивная энергия (потребление), кВАр	Коэффициент мощности $\cos \varphi$	Активная энергия (генерация), кВт	Реактивная энергия (потребление), кВАр	Коэффициент мощности $\cos \varphi$
2021 год						
Март	1939602	822003	0,9207	115747	3470	0,9996
Апрель	400029	258258	0,8401	23242	995	0,9991
Май	578655	322371	0,8736	26529	878	0,9995
Июнь	119658	210420	0,4943	13203	897	0,9977
Июль	573762	553665	0,7196	34922	2373	0,9977
Август	254793	334236	0,6062	20868	1419	0,9977
Сентябрь	173649	255213	0,5625	16183	1100	0,9977
Октябрь	409059	372120	0,7397	22457	1006	0,9990
Ноябрь	550557	325920	0,8605	29546	1316	0,9990
Декабрь	441861	306621	0,8216	22595	1237	0,9985
2022 год						
Январь	1782732	807891	0,9108	87285	4543	0,9986
Февраль	1216824	613515	0,8929	52199	2784	0,9986
Итого	8441181	5182233	0,8522	464776	22018	0,999

По данным счетчика включений / отключений силовых контакторов количество коммутаций за год эксплуатации составило 4982 циклов (для каждой из 9-ти ступеней конденсаторов). Таким образом, средний срок службы силовых контакторов модульного КРМ в условиях работы на промышленной ВЭС составит порядка 40 лет. В модульном компенсаторе реактивной мощности использованы трехфазные силовые конденсаторы типа МКРg 400V 50Hz 3x137 μ F 20 kvar “Electronicon” каждый. Они изготовлены по современной технологии, газонаполнены азотом, имеют встроенную защиту от превышения давления и низкий тангенс угла диэлектрических потерь. Диэлектрик восстанавливается после пробоя. Минимальный срок службы без уменьшения емкости, который дает завод-изготовитель, составляет не менее 200000 часов. Нарботка конденсаторов по данным системы самодиагностики составила за год 735 часов работы каждого конденсатора. Таким образом, средний срок службы силовых конденсаторов, в условиях работы промышленной ВЭС превышает средний срок службы силовых контакторов.

За 2 года эксплуатации не было зафиксировано ни одного отказа, то можно считать, что минимальное время средней наработки на отказ составляет на уровне 18000 часов (с учетом времени

функционирования КРМ при пусконаладочных работах).

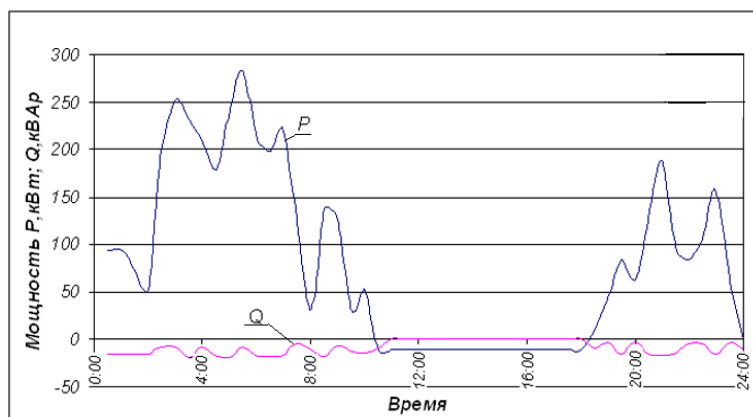
Модульный компенсатор реактивной мощности Мирновской ВЭС характеризуется следующими свойствами:

- полная компенсация потребляемой реактивной электроэнергии ветроэлектрическим модулем;
- электромагнитная совместимость с электрической сетью;
- высокая надежность в работе и долговечность;
- срок окупаемости составляет около 2 лет в результате полной автоматизации всех производственных процессов и невысокой стоимости реализации;

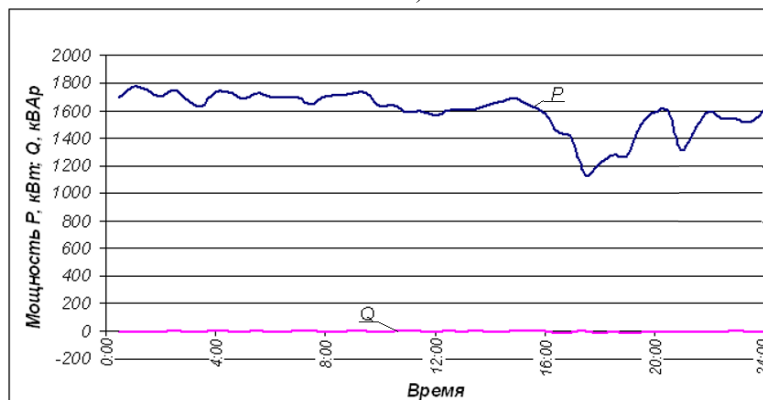
- возможность поэтапного внедрения модульных КРМ для уменьшения потребления реактивной мощности ВЭС и достижения ее нулевого перетока.

На Пресноводненской ВЭС были смонтированы модульные компенсаторы реактивной мощности на всех 5 трансформаторных подстанциях. Управление режимами работы компенсаторов реализовано как с низкой стороны 0,4 кВ, так и с высокой стороны 35 кВ.

На рис. 2 показаны суточные, а на рис. 3 – месячный график нагрузки активной и реактивной мощностей Пресноводненской ВЭС, записанные с периодом интеграции 30 мин системой коммерческого учета электроэнергии.



а)



б)

Рис. 2. Суточные графики нагрузки Пресноводненской ВЭС: а) график нагрузки за 5 февраля 2022 года с периодом интеграции 30 мин; б) график нагрузки за 8 февраля 2022 года с периодом интеграции 30 мин

Fig. 2. Daily load schedules of Presnovodnenskaya wind farm: а) load schedule for February 5, 2022 with an integration period of 30 minutes; б) load schedule for February 8, 2022 with an integration period of 30 minutes

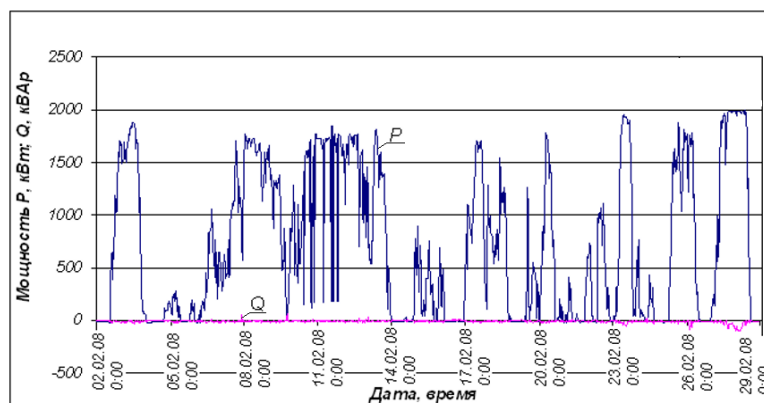


Рис. 3. График нагрузки мощностей за февраль 2022 г. Пресноводненской ВЭС с периодом интеграции 30 мин
Fig. 3. Capacity load schedule for February 2022 of Presnovodnenskaya wind farm with an integration period of 30 minutes

На графиках представлены результаты работы станции при генерировании различных мощностей и в режиме покоя. Так на рис. 2, а, с 11-00 до 18-00 можем наблюдать режим покоя (при отсутствии ветра), который характеризуется небольшим потреблением активной мощности (11 кВт) для собственных нужд станции и практически нулевым потреблением реактивной мощности.

Потребление реактивной мощности станцией в режиме покоя полностью компенсируется нерегулируемыми конденсаторными батареями, которые установлены на всех ТП. В периоды времени с 00-00 до 11-00 и с 18-00 до 24-00 станция работает в режиме малой нагрузки и здесь отчетливо видно, что максимальное отклонение по реактивной мощности составляет 20 кВАр, то есть она равна одной ступени дискретного изменения емкости КРМ. На рис. 2, б, можно наблюдать режим генерации станции на протяжении всех суток, который характеризуется изменением генерируемой активной мощности в диапазоне 1,1 – 1,8 МВт и практически нулевым перетоком реактивной мощности. Потребление реактивной мощности станции в режиме генерации полностью

компенсируется модульными КРМ, управляемыми в автоматическом режиме.

На рис. 3 представлены все режимы работы Пресноводненской ВЭС в течение одного месяца (покоя и генерации во всем диапазоне мощностей) при полной компенсации реактивной мощности.

Анализируя эти графики, можно сделать вывод, что модульные компенсаторы реактивной мощности, включенные в схему трансформаторных подстанций ВЭМ, эффективно компенсируют потребляемую реактивную электроэнергию промышленной ВЭС с асинхронными генераторами при различных режимах работы.

Так как модульные компенсаторы реактивной мощности были установлены на всех ВЭМ Пресноводненской ВЭС, то это позволило сократить до минимума потребление реактивной электроэнергии на каждой трансформаторной подстанции и обеспечить практически нулевой ее переток на шинах всей ВЭС. Результаты функционирования станции на протяжении года приведены в таблице 2. Они подтверждают энергетическую эффективность работы модульных компенсаторов реактивной мощности в составе промышленной ВЭС.

Таблица 2. Объемы перетоков активной и реактивной электроэнергии Пресноводненской ВЭС
Table 2. Volumes of active and reactive electricity flows of Presnovodnenskaya wind farm

Год, месяц	Пресноводненская ВЭС			
	Активная энергия (генерация), кВт	Реактивная энергия (потребление), кВАр	Отношение реактивной мощности к активной	Коэффициент мощности $\cos \varphi$
2021 год				
Июнь	470713	13840	0,029	0,9996
Июль	279978	12352	0,044	0,9990
Август	435839	15506	0,036	0,9994
Сентябрь	473684	14177	0,030	0,9996
Октябрь	371103	13508	0,036	0,9993
Ноябрь	928737	13099	0,014	0,9999
Декабрь	589504	21763	0,037	0,9993
2022 год				
Январь	852749	17936	0,021	0,9998
Февраль	917219	12089	0,013	0,9999
Март	862337	18594	0,022	0,9998
Апрель	601434	12979	0,022	0,9998
Май	264983	12993	0,049	0,9998
Итого	7048280	178836	0,025	0,9997

ВЫВОДЫ

Таким образом, в статье проведен анализ работы модульных компенсаторов реактивной мощности на двух ветроэлектростанциях Крыма – Мирновской и Пресноводненской. Результаты измерений генерации активной и потребления реактивной мощности показывают, что использование подобного рода устройств, помимо собственных конденсаторных батарей, установленных в шкафах управления, существенно повышает коэффициент мощности. Например, на Мирновской ветроэлектростанции среднегодовой коэффициент мощности увеличился до 0,999 на шинах ТП-3 и реактивная мощность компенсировалась практически полностью. На Пресноводненской ветроэлектростанции среднегодовой коэффициент мощности достиг значения – 0,9997, что даже несколько больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малюк Е.Г. Реактивная мощность и особенности компенсации реактивной мощности в сетях жилищно-коммунального сектора // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. № 1. С. 57-62.
2. Ребровская Д.А., Кузнецов А.В. Анализ моделей снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2020. Т. 12-2. С. 19-23.
3. Кузнецов А.В., Ребровская Д.А., Юренков Ю.П. Упрощение модели оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 4. С. 82-89.
4. Табаров Б.Д., Соловьев В.А. Исследование управления семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при дискретном регулировании реактивной мощности // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 5 (69). С. 61-66.
5. Басманов В.Г., Порошин Д.А. Разработка математической модели адаптивного регулятора реактивной мощности для конденсаторных установок // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 2. С. 55-59.
6. Hong Wang, Chao Yuan, Wen Gu, et al. Multitime Scale Reactive Power and Voltage Optimal Regulation for Transmission Network With Wind Power Cluster Based on Model Predictive Control // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2024. 10.1155/2024/7687093.
7. Савина Н.В., Казакул А.А. Прогнозирование реактивной мощности узлов нагрузки для оптимальной компенсации реактивной мощности в условиях неопределённости // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012.

№ 2 (61). С. 92-99.

8. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Оценка воздействующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 2 (226). С. 31-46.
9. Diaa Salman, Abdirahman Farah, Suleiman Abdullahi Ali, et al. Enhancing Power Grid Stability through Reactive Power Demand Forecasting Using Deep Learning // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2024. 10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P116.
10. Пашкин И.А., Николайчук Д.Г., Ставнистов А.О., и др. Компенсация реактивной мощности в энергосистеме путём применения статического синхронного компенсатора реактивной мощности СТАТКОМ // Современная школа России. Вопросы модернизации. 2022. № 3-1 (40). С. 31-33.
11. Широбокова О.Е., Лапонов А.С. Вопросы компенсации реактивной мощности в электросетях // В сборнике: Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК. Сборник материалов международной научно-технической конференции. 2022. С. 260 – 263.
12. Kushakov G. The reactive power compensation in nonlinear electrical loads // Universum: технические науки. 2022. № 5-12 (98). С. 7-9.
13. Goolak S., Tkachenko V., Kyrychenko M., et al. Hybrid reactive power compensator with adaptation of the operation of the control system to the parameters of the mains voltage // Problems of the Regional Energetics. 2023. № 1 (57). С. 1-16.
14. Чернецкий И.А., Стрельников П.А., Семенов В.Д. Способ компенсации реактивной мощности и мощности искажений в трехфазной сети // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2022. № 1-1. С. 130-132.
15. Shankar Rajukkannu, Gomathy Velmurugan, Ramkumar Pandian. An Effective SST-FLC for Mitigation of Reactive Power Compensation of DFIG Based Wind Energy Conversion System // Electric Power Components and Systems. 2024. 1-18. 10.1080/15325008.2023.2298268.
16. Yanping Deng, Ye Du, Yifan Sun, etc.. Distributed energy storage participates in reactive power optimization strategy research of new distribution system // Journal of Physics Conference Series. 2024. 2831. 012036. 10.1088/1742-6596/2831/1/012036.
17. Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N. Optimal reactive power dispatch in power system comprising renewable energy sources by means of a multi-objective particle swarm algorithm // Materials Science. Power Engineering. 2021. Т. 27. № 1. С. 5-20.

REFERENCES

1. Malyuk E.G. Reactive power and features of compensation for reactive power in the houses of the housing and communal sector // Energeticheskie

ustanovki i tehnologii. 2017. V. 3. No. 1. pp. 57-62. (In Russian).

2. Rebrovskaya D.A., Kuznecov A.V. Analysis of models of reducing power loss in the network organization when compensating for reactive power in the consumer network // *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologiyah* - MMTT. 2020. V. 12-2. pp. 19-23. (In Russian).

3. Kuznecov A.V., Rebrovskaya D.A., Yurenkov Yu.P. Simplification of the model for assessing reduction of power losses in the network organization during compensation for reactive power in the consumer network // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2019. V. 62. No. 4. pp. 82-89. (In Russian).

4. Tabarov B.D., Solovev V.A. A study of the seven-speed compensator of reactive power in discrete regulation of reactive power // *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023. No. 5 (69). pp. 61-66. (In Russian).

5. Basmanov V.G., Poroshin D.A. Development of a mathematical model of adaptive reactive power regulator for capacitor installations // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2013. No. 2. pp. 55-59. (In Russian).

6. Hong Wang, Chao Yuan, Wen Gu, et al. Multitime Scale Reactive Power and Voltage Optimal Regulation for Transmission Network With Wind Power Cluster Based on Model Predictive Control. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2024. 10.1155/2024/7687093.

7. Savina N.V., Kazakul A.A. Prediction of the reactive power of the load nodes for optimal compensation for reactive power in conditions of uncertainty // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2012. No. 2 (61). pp. 92-99. (In Russian).

8. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Assessment of influencing factors and forecasting of electrical consumption in the regional energy system, taking into account the regime of its operation // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2022. No. 2 (226). pp. 31-46. (In Russian).

9. Diaa Salman, Abdirahman Farah, Suleiman Abdullahi Ali, et al. Enhancing Power Grid Stability through Reactive Power Demand Forecasting Using

Deep Learning // *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2024. 10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P116.

10. Pashkin I.A., Nikolaychuk D.G., Stavnistov A.O., et al. Compensation of reactive power in the energy system by using a static synchronous compensator of reactive power by stature // *Sovremennaya shkola Rossii. Voprosy modernizacii*. 2022. No. 3-1 (40). pp. 31-33. (In Russian).

11. Shirobokova O.E., Laponov A.S. Issues of compensation for reactive power in electric networks. In the collection: problems of energy supply, automation, informatization and nature management in the agro - industrial complex. A collection of materials of the International Scientific and Technical Conference. 2022. pp. 260 - 263. (In Russian).

12. Kushakov G. The reactive power compensation in nonlinear electrical loads // *Universum: Technical sciences*. 2022. No. 5-12 (98). pp. 7-9.

13. Goolak S., Tkachenko V., Kyrychenko M., et al. Hybrid reactive power compensator with adaptation of the operation of the control system to the parameters of the mains voltage // *Problems of the Regional Energetics*. 2023. No. 1 (57). pp. 1-16.

14. Chernetsky I.A., Strelnikov P.A., Semenov V.D. A method of compensation for reactive power and distortion power in a three-phase network // *Sbornik izbrannyh statej nauchnoj sessii TUSUR*. 2022. No. 1-1. pp. 130-132. (In Russian).

15. Shankar Rajukkannu, Gomathy Velmurugan, Ramkumar Pandian. An Effective SST-FLC for Mitigation of Reactive Power Compensation of DFIG Based Wind Energy Conversion System // *Electric Power Components and Systems*. 2024. 1-18. 10.1080/15325008.2023.2298268.

16. Yanping Deng, Ye Du, Yifan Sun, etc.. Distributed energy storage participates in reactive power optimization strategy research of new distribution system // *Journal of Physics Conference Series*. 2024. 2831. 012036. 10.1088/1742-6596/2831/1/012036.

17. Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N. Optimal reactive power dispatch in power system comprising renewable energy sources by means of a multi-objective particle swarm algorithm // *Materials Science. Power Engineering*. 2021. V. 27. No. 1. pp. 5-20.

ANALYSIS OF INDUSTRIAL TESTS OF MODULAR REACTIVE POWER COMPENSATOR AT CRIMEAN WIND FARMS

Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N., Bekirov O.S.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute of Physics and Technology,
Address: Simferopol, 181, Kyivska Street,
e-mail: Bekirov.e.a@cfuv.ru

Abstract. The article studies the operation of modular reactive power compensators at the Mirnovskaya and Presnovodnenskaya wind farms. For this purpose, measurements of active and reactive power for short periods of time are given: several hours for the Mirnovskaya wind farm and per day for the Presnovodnenskaya wind farm, as well as values for each month for one year. Reactive power fluctuations when using reactive power compensators can be very insignificant, mainly due to the switching time, and the efficiency is justified by increasing the power factors to values close to unity.

Subject: wind farms. All wind farms both generate active power, which is a function of wind speed, and consume reactive power. Both of these processes can be observed at the same time and there is a problem related to a decrease in the power factor. Capacitor batteries located in control cabinets are often not enough to solve it.

Materials and methods: analytical and experimental methods were used. Measurements were carried out at the Mirnovskaya and Presnovodnenskaya wind farms..

Results: It has been established that the use of modular reactive power compensators at wind farms makes it possible to almost completely compensate for the consumption of reactive power.

Conclusions: Studies have shown that wind farms need to install additional compensating devices to increase the power factor to values close to unity, and almost completely cover the need for reactive power both in modes close to nominal and in the absence of wind.

Key words: reactive power compensator; wind farm; oscillogram; wind power module; transformer substation.