

УДК 920.92; 621.31

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-87-95

Анализ проблем энергосистемы с высокой долей солнечной генерации

С. А. Ситников, аспирант, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Н. М. Шайтор, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

А. В. Горпинченко, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Е. А. Дубков, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Стремительное развитие солнечной энергетики привело к созданию качественно новых энергосистем с высокой долей солнечной генерации. Поведение систем подобного рода в определенных случаях существенно отличается от поведения традиционных энергетических систем, содержащих преимущественную долю тепловых электростанций. Так, значительная доля генерации солнечных электростанций (СЭС) в составе энергосистемы, отсутствие регулировочного диапазона реактивной мощности и общепринятой концепции моделирования солнечной электрической станции приводят к проблеме ввода излишних ограничений для сохранения устойчивости и надежности энергосистемы. Вместе с тем задачи устойчивости и надежности необходимо решать одновременно с задачами экономии энергоресурсов – именно в этом заключается проблема оптимизации. Баланс между надежностью и экономией заключается в соблюдении требуемых ограничений по сечениям энергосистемы.

Продоланный анализ позволил определить приоритетные направления в исследовании работы солнечных электростанций в составе единой энергосистемы. Произведен расчет суточного графика генерации активной мощности для совокупности солнечных электростанций, находящихся в одинаковых метеорологических условиях, для двух характерных сезонов года (зимний и летний). Определен реальный регулировочный диапазон реактивной мощности и проведен анализ участия СЭС в обеспечении устойчивости и надежности энергосистемы. Данные результаты получены в ходе исследования энергосистемы Республики Крым и города Севастополя.

Одним из главных выводов данной статьи является отсутствие общего подхода в описании СЭС совместно с системой регулирования в математических моделях для расчета установившихся и переходных электроэнергетических режимов. С учетом нарастающей тенденции цифровизации в настоящее время данный вопрос встает более остро. Сделанные выводы позволят задать вектор развития проработки вопросов присоединения солнечных электростанций к единой энергетической системе.

Ключевые слова: статическая устойчивость, динамическая устойчивость, тяжелое короткое замыкание, возобновляемые источники энергии, реактивная мощность, суточный график генерации.

Введение

В последнее время в единой энергосистеме России большое распространение получили солнечные электростанции (СЭС) [1]. Рост мощности, генерируемой электростанциями на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), вызван последними тенденциями развития электроэнергетики в стране, закрепленными на законодательном уровне [2, 3]. Безусловно, такая политика благоприятно сказывается для населения, на экологическом аспекте, однако рост установленной мощности ВИЭ вывал проблемы при планировании и при управлении электроэнергетическим режимом энергосистемы [4].

Цель работы – определение реального диапазона регулирования реактивной мощности на совокупности солнечных электростанций энергосистемы Республики Крым и города Севастополя с возможностью применения полученных

результатов к другим энергосистемам, имеющим высокую долю установленной мощности СЭС.

Постановка проблемы

Повышение доли генерации солнечной энергии в энергосистеме ведет к увеличению процента генерируемой активной мощности, не поддающейся точному планированию. Это, в свою очередь, приводит к необходимости учета аварийного небаланса мощности, вызванного снижением активной мощности солнечных электростанций, расположенных в одном энергоузле, в течение 10 минут вследствие изменения погодных условий, связанных со снижением солнечной активности (Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок : приказ Минэнерго России от 03.08.2018 № 630. Москва, 2018. 16 с.).

Кроме того, при максимуме генерации СЭС в сети 110 кВ в нормальном режиме имеют место высокие уровни напряжения. Однако в послеаварийном режиме при отключении станций может возникнуть обратная ситуация, при которой необходимо ограничить допустимый переток активной мощности в сечении – в совокупности элементов одной или нескольких электрических связей, одновременное отключение которых приводит или не приводит к разделению энергосистемы на две изолированно работающие части. При этом в расчетах установившихся режимов проблематично предусмотреть реальную величину генерации энергии, что накладывает излишние ограничения на управленческие электроэнергетическим режимом.

Еще одним немаловажным аспектом при работе таких станций параллельно с энергосистемой является их влияние на устойчивость энергосистемы. Во-первых, большая доля СЭС в совокупности со станциями на традиционных источниках энергии, содержащих синхронные генераторы, снижает величину эквивалентного момента инерции энергосистемы. Этот фактор в определенных режимах увеличивает вероятность нарушения динамической устойчивости энергосистемы.

Во-вторых, из-за отсутствия регулирования реактивной мощности со стороны станции снижается предел передаваемой мощности в связях энергосистемы, на которые СЭС имеют большое влияние в части регулирования напряжения [5]. Такая проблема ведет к снижению статической аperiodической устойчивости в энергосистеме с высокой долей генерации солнечных электростанций [6, 7].

Отсутствие регулирования реактивной мощности солнечных электростанций является следствием целенаправленного сужения диапазона изменения $\cos \varphi$. Целью такой манипуляции собственником является максимальная выработка оплачиваемой активной мощности в отличие от реактивной. Расширение диапазона регулирования реактивной мощности и правильная настройка регуляторов СЭС способны повысить устойчивость энергосистемы [8].

Актуальной проблемой в расчете установившихся и переходных режимов энергосистемы является отсутствие верифицированной модели СЭС в программных комплексах. Детализированная с необходимой точностью модель позволила бы учесть реакцию станции в энергосистеме на требуемую для проведения расчета статической устойчивости траекторию утяжеления, а также на тяжелые короткие замыкания, необ-

ходимые для расчета динамической устойчивости. Тяжесть коротких замыканий в данном случае определяется их видом (однофазное, двухфазное, трехфазное), временем протекания тока и величиной переходного сопротивления в месте замыкания.

Расчет реального диапазона регулирования реактивной мощности солнечных электростанций

В энергосистеме Республики Крым и города Севастополя суммарная установленная мощность солнечных электростанций достигает порядка 300 МВт. Самыми крупными СЭС на Крымском полуострове являются: «Перово» (106 МВт), «Охотниково» (80 МВт), «Николаевка» (70 МВт), которые также можно назвать одними из крупнейших в России [9]. Еще одна из особенностей солнечных электростанций Крымского полуострова – это расположение их в непосредственной близости друг от друга, как географически, так и в составе энергосистемы. Все электростанции расположены в радиусе 23 км в западной части полуострова. Таким образом, исследования, проводимые для группы электростанций, будут справедливы, так как все электростанции находятся в одинаковых метеорологических условиях.

Однако достижение величины генерации установленной мощности СЭС даже в полдень невозможно ввиду множества факторов [10]. Основными ограничивающими факторами для генерации максимальной мощности станции являются: освещенность, облачность и продолжительность светового дня [11–13]. Такие метеорологические факторы являются типичными для определенных сезонов года [14, 15].

Для определения реального диапазона регулирования реактивной мощности в ходе исследования сделана выборка величин генерации активной мощности энергосистемы в течение суток по характерным сезонам. Полученные результаты представлены в виде графиков суточной генерации.

Для определения суммарных среднесуточных графиков генерации СЭС энергосистемы были взяты данные за 2020 г. с интервалом 30 минут. Исходя из этого получен профиль генерации, составленный на основе средних получасовых значений за каждый месяц года. В итоге выделены два наиболее контрастных профиля генерации для зимнего и летнего сезонов; такое разделение обусловлено метеорологическими факторами, характерными для энергосистемы Крымского полуострова.

На рисунке 1 представлены графики суммарной генерации СЭС в летний и зимний сезоны. Основные отличия заключаются в величине генерации активной мощности и продолжительности светового дня.

Суточный график генерации солнечной электростанции в летний сезон энергосистемы Рес-

публики Крым и города Севастополя характерен для восьми месяцев года – с марта по октябрь. Зимний сезон характерен для четырех месяцев – с ноября по февраль – как для месяцев наиболее пасмурных, с коротким световым днем. Такое разделение по сезонам характерно для солнечной генерации Крымского полуострова.

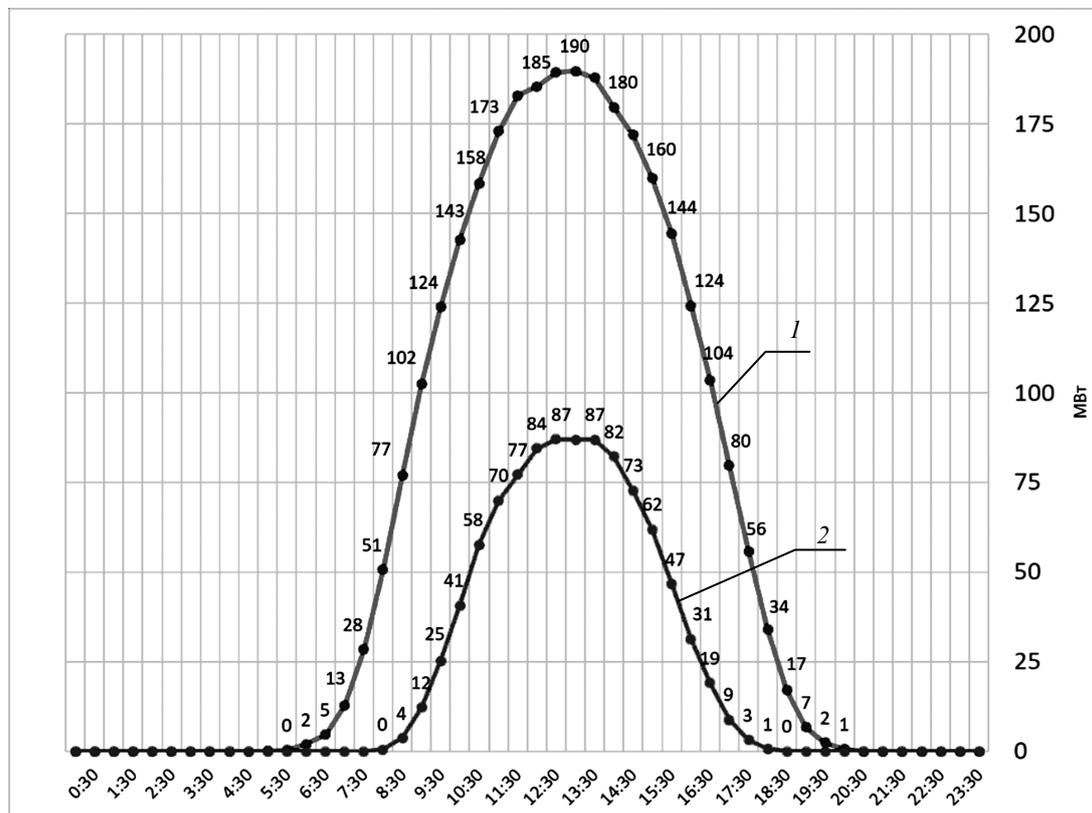


Рис. 1. Графики суточной генерации СЭС для характерных сезонов года: 1 – летний сезон; 2 – зимний сезон

Fig. 1. Diagrams of daily generation of SPP for typical seasons of the year: 1 - summer season; 2 - winter season

По результатам расчетов графиков суммарной генерации активной мощности СЭС определены графики верхней и нижней границ регулировочного диапазона реактивной мощности энергосистемы, представленные, соответственно, на рисунках 2 и 3. Крайние границы диапазона рассчитаны с учетом номинальных параметров инверторов, используемых на станциях. Для примера взяты номинальные данные инвертора Protect PV.250 как наиболее распространенного на солнечных электростанциях энергосистемы Крыма. Заводом – изготовителем инвертора заявлен $\cos \phi$, равный диапазону значений от $-0,9 \dots 1$ до $+0,9$ (рис. 4).

Из графиков рисунков 2 и 3 видно, что диапазон регулирования реактивной мощности более ± 20 МВар обеспечивается в летний сезон порядка 11 часов, а в зимний период – до 4 часов в те-

чение суток. К тому же для летнего сезона обеспечивается диапазон регулирования более ± 70 МВар в течение 4 часов в сутки. Такие значения в регулировании реактивной мощности сравнимы с генерацией батареи статических конденсаторов и потреблением шунтирующего реактора, или с регулировочным диапазоном современной тепловой электростанции до 150 МВт.

Анализ влияния работы солнечных электростанций на устойчивость энергосистемы

Собственнику не выгодно участие в регулировании напряжения солнечных электростанций, так как при загрузке по реактивной мощности генерирующее оборудование разгружается по активной мощности, за которую собственник получает оплату. Такая ситуация наглядно показана на векторной диаграмме ниже (рис. 4).

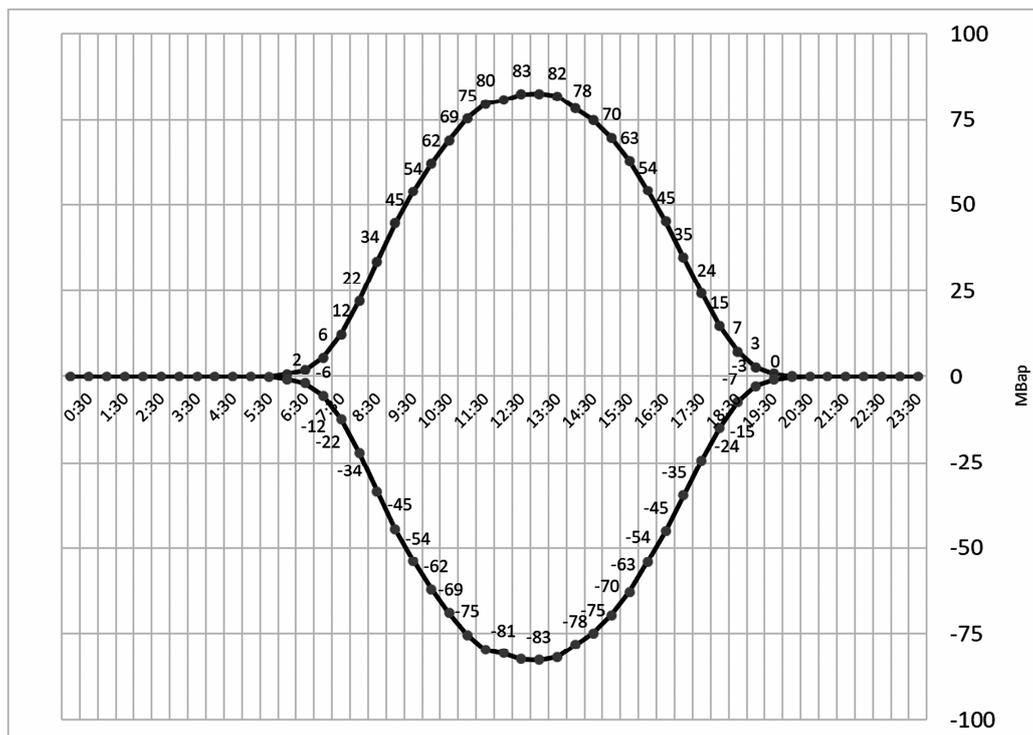


Рис. 2. Суммарный регулировочный диапазон реактивной мощности СЭС энергосистемы Крыма в летний сезон (верхний и нижний предел)

Fig. 2. The total adjustment range of reactive power of the SES of the power system of Crimea in the summer season (upper and lower limit)

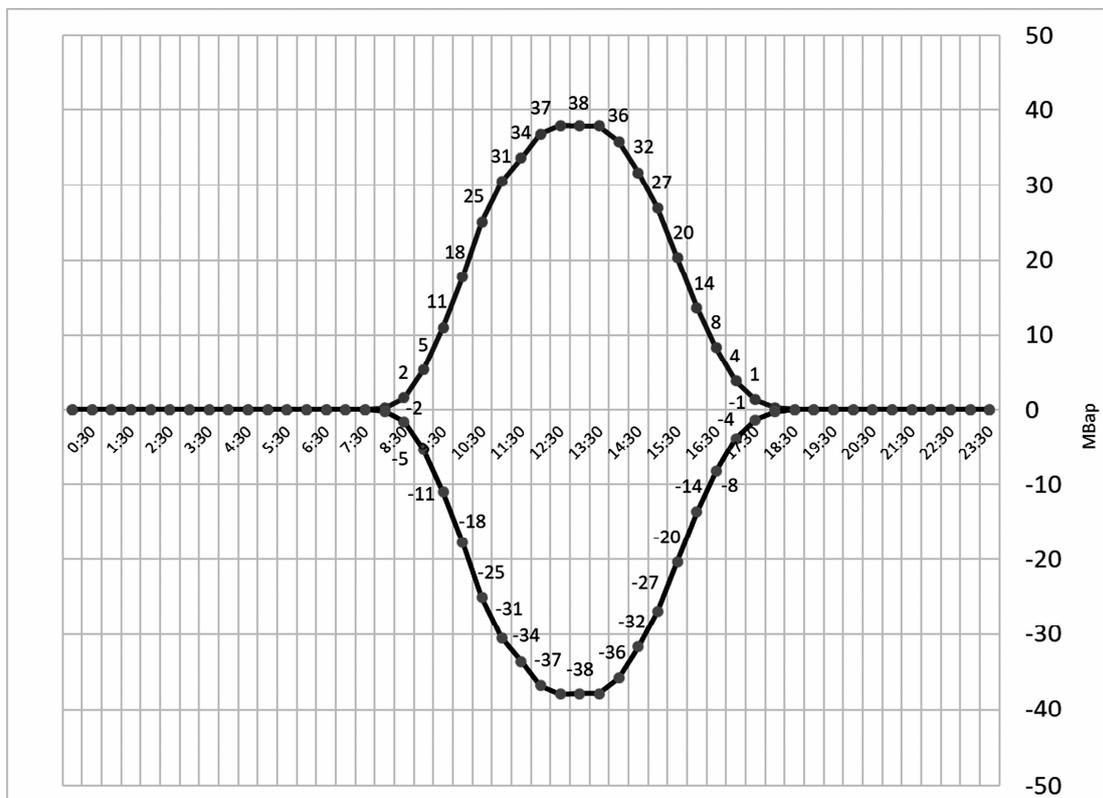


Рис. 3. Суммарный регулировочный диапазон реактивной мощности СЭС энергосистемы Крыма в зимний сезон (верхний и нижний предел)

Fig. 3. The total adjustment range of reactive power of the SES of the power system of Crimea in the winter season (upper and lower limits)

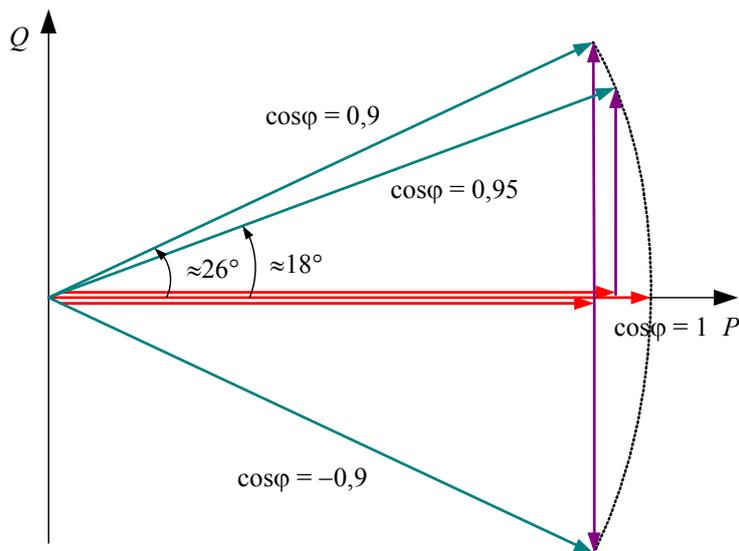


Рис. 4. Векторная диаграмма мощности СЭС

Fig. 4. Vector diagram of power the SPS

Собственник СЭС намеренно приводит значение $\cos \varphi$ к единице, чтобы получать максимальную генерацию активной мощности, равную полной мощности станции:

$$S_{\text{СЭС}} = P_{\text{СЭС}} \cdot \cos \varphi,$$

где $S_{\text{СЭС}}$ – полная суммарная мощность, генерируемая станцией; $P_{\text{СЭС}}$ – генерируемая суммарная активная мощность станции.

В этом случае станция не задействована в регулировании напряжения. Однако, как было

сказано выше, регулирование напряжения играет большую роль в обеспечении устойчивости энергосистемы.

Для примера рассмотрим влияние регулирования реактивной мощности солнечных электростанций в летний сезон в избыточном энергорайоне (рис. 5). В данном примере генерация избыточного энергорайона состоит из солнечных (СЭС) и тепловых (ТЭС) электростанций, а сечение, соединяющее энергорайон с единой энергосистемой (ЕЭС), является полным.

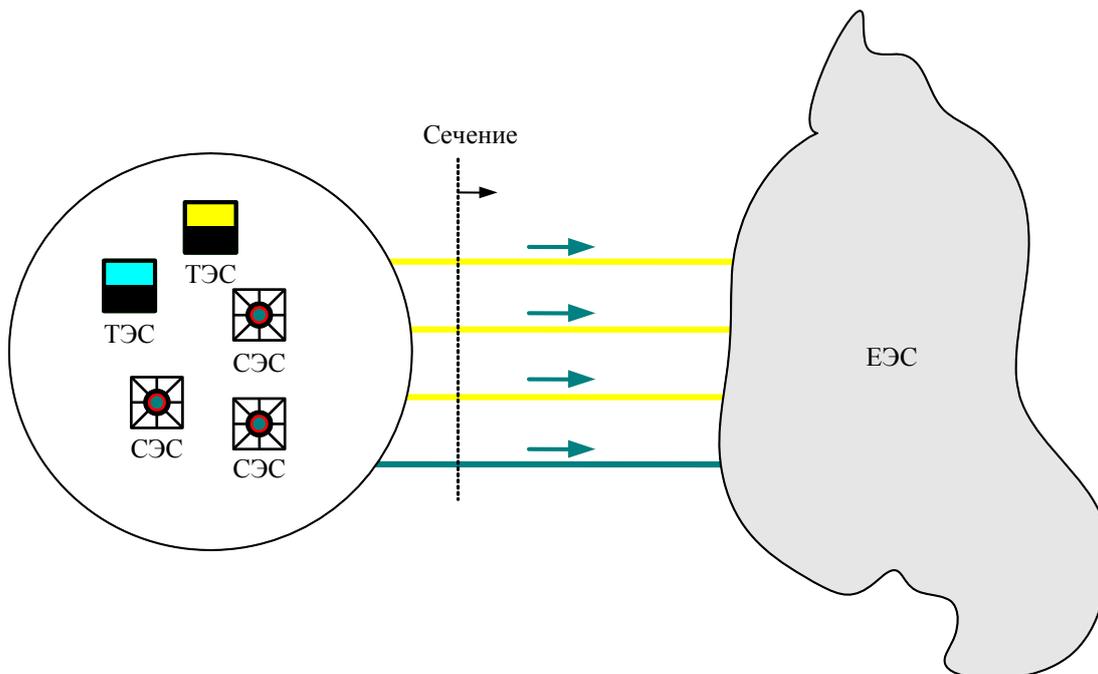


Рис. 5. Простейшая схема работы избыточного района в составе ЕЭС

Fig. 5. The simplest scheme of operation of a redundant area in the UES

В такой ситуации вполне возможно нарушение динамической устойчивости при нормативном возмущении в нормальной или ремонтной схеме. Вследствие этого необходимо осуществлять регулирование перетока в сечении за счет ограничения генерации ТЭС для предупреждения возможных последствий тяжелого короткого замыкания [16].

Однако, используя полный диапазон СЭС в части регулирования реактивной мощности, мы можем демпфировать возмущения, происходящие в энергосистеме. Для детального рассмотрения работы регулирования солнечной электростанции обратимся к угловой характеристике передаваемой мощности, приведенной на рисунке 6 и определенной по формуле

$$P_c = \frac{U_1 U_2}{Z_c} \sin \delta,$$

где P_c – активная мощность, передаваемая по сечению (см. рис. 5); U_1 , U_2 – напряжения по концам сечения; Z_c – суммарное сопротивление линий, входящих в сечение; δ – угол между векторами напряжений по концам сечения.

Как видно из рисунка 6, при возникновении тяжелого короткого замыкания, близкого к сечению, а также с режимом работы энергорайона на выдачу мгновенная реакция регуляторов солнечной электростанции позволит уменьшить площадку ускорения и увеличить площадку торможения за счет разгрузки по активной мощности и дополнительной загрузке по реактивной мощности. Такая работа СЭС снизит избыток мощности в энергорайоне, тем самым не даст ускориться роторам генераторов ТЭС за время протекания тока короткого замыкания, а также повысит предел передаваемой мощности в доаварийном и послеаварийном режимах за счет увеличения напряжения в сети.

Выводы

Проведены исследования электроэнергетической системы с высокой долей солнечной генерации, дано определение реального диапазона регулирования реактивной мощности на совокупности СЭС энергосистемы Республики Крым и города Севастополя. Исследования позволяют сделать следующие выводы.

Расширение диапазона регулирования реактивной мощности СЭС позволит повысить качество электроэнергии в части требований к напряжению, а также обеспечить демпфирование возникающих в энергосистеме возмущений. Такая работа солнечных электростанций благо-

приятно скажется на устойчивости и надежности электроэнергетической системы в целом.

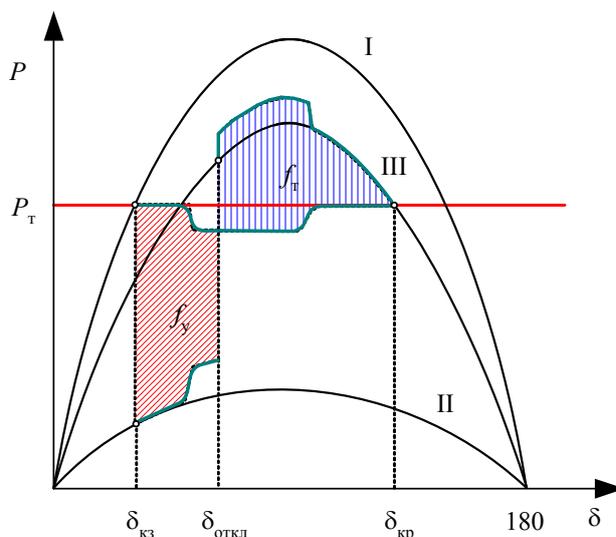


Рис. 6. Угловая характеристика передаваемой мощности при сохранении ДУ: I – характеристика предела передаваемой мощности в доаварийном режиме, II – во время короткого замыкания, III – после отключения поврежденного сетевого элемента; $\delta_{кз}$ – угол, при котором возникло короткое замыкание (точка равновесия); $\delta_{откл}$ – угол, при котором произошло отключение сетевого элемента, $\delta_{кр}$ – угол, при превышении которого нарушается устойчивость по связи; f_y – площадка ускорения, f_T – площадка торможения; P_T – активная мощность, генерируемая на электростанциях энергорайона

Fig. 6. Angular characteristic of the transmitted power while maintaining the remote control: I - characteristic of the transmitted power limit in the pre-emergency mode, II - during a short circuit, III - after disconnecting the damaged network element; $\delta_{кз}$ - angle at which a short circuit occurred (equilibrium point); $\delta_{откл}$ - the angle at which the network element was disconnected, $\delta_{кр}$ - the angle above which the stability of the connection is violated; f_y - acceleration area, f_T - braking area; P_T - active power generated at power plants of the energy district

Одной из основных технических проблем, озвученных в данной работе, остается отсутствие какого-либо общего подхода к моделированию и учету систем регулирования СЭС в расчетных моделях. Создание детализированной верифицированной модели энергосистемы, содержащей совокупность солнечных электростанций большой мощности, для проведения расчетов установившихся и переходных режимов возможно на базе существующих программных комплексов Rastr Win 3 и RUS Tab.

Проработка в дальнейшем полученных выводов позволит снизить ограничения в контролируемых сечениях энергосистемы (соблюдение баланс между экономией и надежностью), а в будущем в совокупности с системой мони-

торинга запаса устойчивости – вывести управление энергосистемой на качественно новый уровень.

Библиографические ссылки

1. Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Шестой технологический уклад, технико-экономическое обоснование использования солнечных термофотоэлектрических установок для энергетики Крыма // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2017. № 2 (31). С. 109–111.
2. Белокрылова Е. А., Кологерманская Е. М. Современные политико-правовые аспекты развития возобновляемых источников энергии в Российской Федерации // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2017. Т. 27, № 2. С. 85–93.
3. Рыбкина Я. А. Правовая природа отбора проектов ВИЭ и применение норм антимонопольного законодательства к процедуре отбора проектов ВИЭ // Правовой энергетический форум. 2018. № 4. С. 38–45.
4. Гурьев В. В., Кувшинов В. В. Оптимизация методов прогнозирования вырабатываемой мощности солнечных электростанций в энергосистеме Республики Крым и города Севастополя // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018 : сб. статей по материалам международной научно-практической конференции (Севастополь, 24–27 сентября 2018 г.). Севастополь : СевГУ, 2018. С. 325–327.
5. Крамской Ю. Г. Интеграция возобновляемых источников электроэнергии в электрические сети с применением силовой электроники // Энергия единой сети. 2017. № 1 (30). С. 55–69.
6. Шарифов Б. Н. Электромагнитные переходные процессы в системе управления выходными параметрами солнечной электростанции // Политехнический вестник. Серия «Инженерные исследования». 2019. № 4 (48). С. 26–32.
7. Аль Баурмани А. Г., Кувшинов В. В., Якимович Б. А. Математическая модель оптимизации режима работы энергосистемы Республики Крым и города Севастополя // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов : сб. докладов 9-й Всерос. науч.-практ. конф. Томск : Томский политех. ун-т, 2019. С. 66–73.
8. Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью / Ф. Р. Исмагилов, Б. Н. Шарифов, Б. М. Гайсин, Т. Р. Тергулов, Н. Л. Бабкина // Вестник Уфимского гос. авиационного техн. ун-та. 2016. Т. 20, № 4 (74). С. 71–79.
9. Гурьев В. В., Кувшинов В. В., Якимович Б. А. Перспективы развития возобновляемых источников энергии на территории Крымского полуострова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 116–123. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-116-123.
10. Джумаев А. Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции // Сб. статей XLVI Междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 27 мая 2015 г.). 2015. № 5 (42). С. 33–40. Новосибирск : Изд-во СибАК, 2015.
11. Гурьев В. В. Усовершенствование методов прогнозирования генерирующей мощности солнечных электростанций в энергосистеме Республики Крым и города Севастополя // Научные горизонты. 2017. № 4. С. 63–73.
12. Технико-экономические аспекты развития автономных солнечных энергетических систем / Е. Г. Какушина, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов, П. Н. Кузнецов, С. И. Соломенникова // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 4. С. 55–60.
13. Морозов И. А., Тыквинский А. М. Влияние освещенности на выдаваемую мощность солнечного модуля. Кибернетика энергетических систем // Сб. материалов XXXVIII сессии Всерос. науч. семинара «Диагностика энергооборудования» (Новочеркасск, 17–19 октября 2016 г.). Новочеркасск : Южно-Российский гос. политех. ун-т (НПИ) имени М. И. Платова, 2016.
14. Морозова Н. В., Кувшинов В. В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок для использования в энергетике Крыма : монография. М. : Спутник+, 2017. 174 с.
15. Тукфатуллин О. Ф. Выбор оптимального угла наклона фотоэлектрических панелей с однопозиционной фиксацией стационарных фотоэлектрических систем в зависимости от географической широты и инсоляции в течение года // Гелиотехника. 2016. № 4. С. 17–20.
16. Никифоров И. С., Хатуницкий В. В. Оптимизация режима по реактивной мощности для повышения динамической устойчивости Псковской ГРЭС // Электроэнергетика глазами молодежи : тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. (Иваново, 9–13 ноября 2015 г.). В 2 т. / Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2015. Т. 1. 628 с.

References

1. Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [The sixth technological order, use of thermoelectric photovoltaic systems in the communal sector of the Crimea]. *Sotsial'no-ekonomicheskoe upravlenie: teoriya i praktika*, 2017, no. 2, pp. 109-111 (in Russ.).
2. Belokrylova E.A., Kologermanskaya E.M. [Modern political and legal aspects of the development of renewable energy sources in the Russian Federation]. *Vestnik Udmurtskog ouniversiteta, Economics and Law*, 2017, vol. 27, no. 2, pp. 85-93 (in Russ.).
3. Rybkina Ya. A. [Legal nature of the selection of renewable energy projects and the application of antitrust laws to the procedure for selecting renewable energy projects]. *Pravovoi energeticheskii forum*, 2018, no. 4, pp. 38-45 (in Russ.).
4. Guriev V.V., Kuvshinov V.V. [Optimization of methods for predicting the generated power of solar power plants in the power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol]. *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2018* :

sb. statei po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Sevastopol', 24-27 sentyabrya 2018 g.). [Ecological, industrial and energy safety - 2018: collection of articles. articles based on the materials of the international scientific and practical conference (Sevastopol, September 24-27, 2018)]. Sevastopol, SevGU, 2018, pp. 325-327 (in Russ.).

5. Kramskoy Y.G. Integration of renewable energy sources into electrical networks using power electronics. *Energiya edinoi seti*, 2017, no. 1, pp. 55-69 (in Russ.).

6. Sharifov B.N. [Electromagnetic transients in the control system of the output parameters of a solar power plant]. *Politekhnicheskii vestnik, Inzhenernye issledovaniya*, 2019, no. 4, pp. 26-32 (in Russ.).

7. Al Bairmani A.G., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. [Mathematical model for optimizing the operating mode of the power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol]. *Nauchnaya initsiativa inostrannykh studentov i aspirantov rossiiskikh vuzov : sb. dokladov 9-i Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Scientific initiative of foreign students and postgraduates of Russian universities: Collection of reports of the 9th All-Russian Scientific and Practical Conference]. Tomsk : Tomsk Polytechnic University, 2019, pp. 66-73 (in Russ.).

8. Ismagilov F.R., Sharifov B.N., Gzysin B.M., Teregulov T.R., Babkina N.L. [Investigation of parallel operation of a solar power plant with a grid]. *Vestnik Ufimskogo gos. aviatsionnogo tekhn. un-ta*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 71-79 (in Russ.).

9. Guriev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. [Prospects for the development of renewable energy sources on the territory of the Crimean peninsula]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 116-123 (in Russ.).

10. Dzhumaev A.Ya. [Analysis of the effect of temperature on the operating mode of a photovoltaic solar station]. *Cb. statei XLVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. „Tekhnicheskii nauki - ot teorii k praktike” (Novosibirsk, 27 maya 2015 g.)* [XLVI International scientific-practical conf. “Engineering - from theory to practice”

(Novosibirsk, May 27, 2015)], no. 5, pp. 33-40. Novosibirsk, SibAK Publ, 2015 (in Russ.).

11. Guriev V.V. [Improvement of prediction methods generating power of solar power stations in the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol]. *Nauchnye gorizonty*, 2017, no. 4, pp. 63-73 (in Russ.).

12. Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Kuznetsov P.N., Solomennikova S.I. [Technical and economic aspects of the development of autonomous solar energy systems]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*, 2018, vol. 4, no. 4, p. 55-60 (in Russ.).

13. Morozov I.A., Tykvinsky A.M. [Influence of illumination on the output power of the solar module. Cybernetics of energy systems]. *Cb. materialov XXXVIII sessii Vseros. nauch. seminara “Diagnostika energooborudovaniya” (Novocherkassk, 17–19 oktyabrya 2016 g.)*. [Proc. XXXVIII session of the All-Russian scientific seminar on the topic “Diagnostics of power equipment”, Novocherkassk, October 17-19, 2016]. Novocherkassk, Yuzhno-Rossiiskii gos. politekh. un-t (NPI) imeni M.I. Platova, 2016 (in Russ.).

14. Morozova N.V., Kuvshinov V.V. [Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations for use in the power industry of the Crimea]. *Moscow, Sputnik+ Publ.*, 2017, 174 p. (in Russ.).

15. Tukfatullin O.F. [Selection of the optimal angle of inclination of photovoltaic panels with one-position fixation of stationary photovoltaic systems, depending on the geographical latitude and insolation throughout the year]. *Geliotekhnika*, 2016, no. 4, pp. 17-20 (in Russ.).

16. Nikiforov I.S., Khatunitskiy V.V. [Optimization of the reactive power mode to increase the dynamic stability of the Pskov SDPP]. *Elektroenergetika glazami molodezhi : tr. VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Ivanovo, 9-13 noyabrya 2015 g.)* [Electric power industry through the eyes of youth: Proc. of the VI International Scientific and Technical Conference, (November 9-13, 2015)]. Ivanovo, Ivanovskii gos. energeticheskii un-t im. V. I. Lenina, 2015, vol. 1, 628 p. (in Russ.).

Analysis of Problems of the Power System with a High Proportion of Solar Generation

S.A. Sitnikov, Post-graduate, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

N.M. Shaytor, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

A.V. Gorpichenko, PhD in Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

E.A. Dubkov, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The rapid development of solar energy has led to the creation of qualitatively new energy systems with a high share of solar generation. The behavior of systems of this kind in certain cases differs significantly from the behavior of traditional energy systems containing the predominant share of thermal power plants. Thus, a significant share of the generation of solar power plants as part of the power system, the lack of an adjustment range for reactive power and the generally accepted concept of modeling a solar power plant lead to the problem of introducing unnecessary restrictions to maintain the stability and reliability of the power system. At the same time, the problems of stability and reliability must be solved simultaneously with the problems of saving energy resources; this is precisely the problem of optimization. The balance between reliability and economy lies in meeting the required restrictions on the cross-sections of the power system.

The analysis made it possible to determine the priority directions in the study of the operation of solar power plants as part of a unified energy system. The calculation of the daily schedule of power generation for a set of SESs located in the same meteorological conditions for two seasons of the year has been performed. The real regulation

range of reactive power was determined and the analysis of participation in the rating of stability and reliability of power systems was carried out. These results were obtained during the study of the power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol.

One of the main conclusions of this paper is the lack of a general approach in the description of SES together with the control system in mathematical models for calculating steady-state and transient electric power modes. Given the growing trend towards digitalization, this issue is currently becoming more acute.

The conclusions made will allow us to set a vector for the development of the study of the issues of connecting the SES to the unified energy system.

Keywords: static stability, dynamic stability, severe short circuit, renewable energy, reactive power, daily generation schedule.

Получено 23.01.2021

Образец цитирования

Ситников С. А., Шайтор Н. М., Горпинченко А. В., Дубков Е. А. Анализ проблем энергосистемы с высокой долей солнечной генерации // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С. 87–95. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-87-95.

For Citation

Sitnikov S.A., Shaytor N.M., Gorpichenko A.V., Dubkov E.A. [Analysis of Problems of the Power System with a High Proportion of Solar Generation]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 87-95 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-87-95.