

$$\frac{\sum_{i=1}^n 1.1441 P_{pi} H_i L_i 10^{-3}}{16138 + 5.0356 Q_{ki}} - 0.16 > 0.25,$$

де  $H_i = 0,8594 \operatorname{tg}^2 \phi_i - 0,1171 \operatorname{tg} \phi_i - 0,0244$ ;  $L_i = 1000 \dots 2500$  м через кожні 500 м;  
 $\operatorname{tg} \phi_i = 0,25 \dots 1,7320$  через кожні 0,25;  $Q_{ki} = 200 \dots 500$  через кожні 50 квар;  
 $P_{pi} = 500 \dots 2500$  кВт через 500 кВт;  $N = 0,25$ .

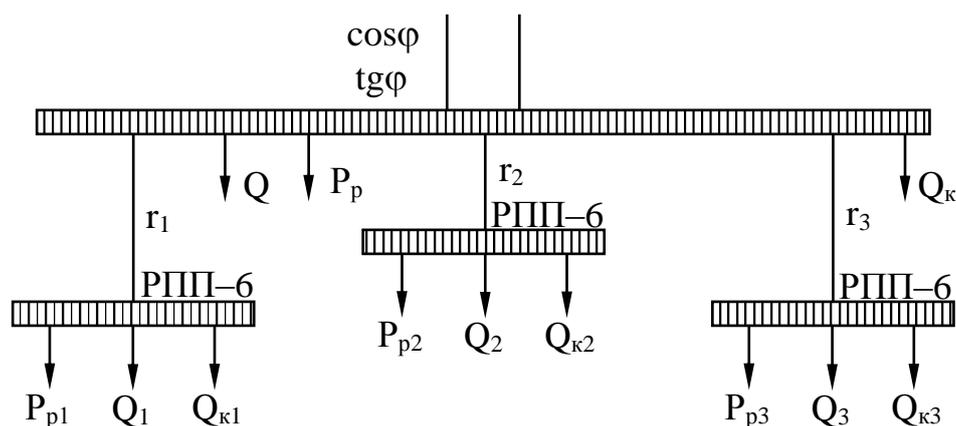


Рис.1- Схема розподілу потужностей ПКРП на підземних пунктах

Таким чином, отримана економіко-математична модель, яка дозволяє визначати доцільність розміщення ПКРП у РПП 6 кВ.

**Висновок.** Запропонована економіко-математична модель визначення раціональних значень потужності ПКРП на підземних розподільних пунктах 6 кВ з урахуванням однакових потужностей вибухобезпечних ПКРП, що застосовуються.

#### Список літератури

1. Трифонов Д.В. Підвищення ефективності використання електроенергії у виробничих системах / Трифонов Д.В., Ковальов О.Р.; Кумпін О.О. //; Наук.-техн. збірник „Гірнична електромеханіка та автоматика”. – Д.: РВК НГУ. – 2015. – № 94. – С. 135-139.
2. Півняк Г.Г. Електропостачання гірничих підприємств / Півняк Г.Г., Білий М.М., Бажін Г.М. / Довідковий посібник. – Д.: РВК ДНУ. – 2008. – 550 с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.*

УДК 621.311

**Д.В. Цыпленков, канд. техн. наук., А.А. Суворкин**

(Україна, Днепр, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

## ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

**Анотація.** Необхідність використання інтелектуальних електричних систем з мінімальними технічними втратами і впливом на навколишнє середовище є поштовх для систем з розподіленою генерацією, які можуть запропонувати такі переваги як зниження ресурсів системи передачі і розподілу, підвищення надійності, поліпшення якості електроенергії і т.п. В залежності від конфігурації системи та управління нею, ці переваги можуть бути позначитися і негативним чином.

**Ключові слова:** розподілена генерація, відновлювані джерела енергії, проблеми в енергомережах.

**Анотація.** *Необходимость использования интеллектуальных электрических систем с минимальными техническими потерями и влиянием на окружающую среду является толчок для систем с распределенной генерацией, которые могут предложить такие преимущества как снижение ресурсов системы передачи и распределения, повышения надежности, улучшения качества электроэнергии и т.п. В зависимости от конфигурации системы и управление ней, эти преимущества могут быть сказаться и негативным образом.*

**Ключевые слова:** *распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, проблемы в энергосетях.*

**Abstract.** *The need to use intelligent electrical systems with minimal technical losses and environmental impact is the impetus for systems with distributed generation, which can offer such advantages as reducing transmission and distribution system resources, increasing reliability, improving power quality, etc. Depending on the configuration of the system and its management, these advantages may also have a negative effect.*

**Keywords:** *distributed generation, renewable energy, problems in power grids.*

**Введение.** Проблемы развития современного производства связаны со спросом на электроэнергию, который опережает прирост генерирующих мощностей. Электроэнергетика в 20-м веке развивалась главным образом путем повышения уровня централизации электроснабжения при создании все более мощных электроэнергетических объектов. Следствием этого явилось формирование территориально распределенных протяженных электроэнергетических систем (ЭЭС), что позволило достичь существенного экономического эффекта, повысить надежность электроснабжения и качество электроэнергии [1, 2].

В связи с этим как одно из важных средств решения энергетического обеспечения в мировой практике рассматривают распределенную генерацию (РГ) [1]. Под распределенной генерацией понимается совокупность модульных генерирующих объектов малой мощности, производящих электроэнергию в непосредственной близости к месту потребления. При этом параметр «близости» к месту потребления оценивается по классу напряжения распределительной сети, к которой подключается генерирующий объект.

Кроме электростанций небольшой мощности в концепции РГ немаловажная роль отводится возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) - это источники преобразования солнечной энергии, энергии ветра и водных потоков, а также органических отходов, связанных с жизнедеятельностью человека - промышленные, сельскохозяйственные, бытовые отходы [2].

В последнее время для многих регионов остро стоит вопрос энергетической безопасности, при которой потребитель имеет надежный доступ к необходимой ему энергии, а поставщик - к её потребителям при стабильных и приемлемых ценах [3].

Огромные размеры страны при низкой плотности населения в отдельных регионах приводят к недопустимым в современных условиях затратам на транспорт электроэнергии, обеспечение защиты от негативного влияния природно-климатических условий [4], повышение надёжности элементов протяженных электрических сетей [5].

С начала XX века технологии традиционных паротурбинных агрегатов тепловых и атомных электростанций развивались по пути использования все более высоких параметров пара, это требовало применения более совершенных материалов котлов и турбин, при этом имела место тенденция увеличения единичной мощности установок. Все отмеченное позволяло улучшать технико-экономические параметры установок - удельные капиталовложения и постоянные текущие издержки на единицу мощности и удельные расходы топлива на единицу вырабатываемой электроэнергии. Указанная тенденция укрупнения агрегатов наблюдалась и в гидроэнергетике, хотя и в меньшей мере.

В 1980-е годы эта тенденция принципиально изменилась вследствие появления высокоэффективных (до 55-60 % КПД) газотурбинных и парогазовых установок (ГТУ и ПГУ) широкого диапазона мощностей, в том числе малых - от единиц до одного-двух десятков МВт. Отличительной особенностью таких установок, особенно малых, является их высокая заводская готовность, что позволяет вводить их в эксплуатацию за период в пределах года [3-5]. Одновременно появился большой ассортимент мини- и микро- ГТУ (от долей кВт до нескольких десятков кВт). На основе малых ГТУ начали сооружаться малые ГТУ-ТЭЦ для комбинированной выработки электроэнергии и тепла.

Распределенная генерация (РГ) становится все более важным источником электроэнергии в современной энергосистеме. Хотя стоимость установки высока, источники РГ, становятся выгодными для потребителей, путем предоставления электроэнергии непосредственно потребителю, а не в отдаленный генератор. Тогда, таким образом системы РГ могут помочь увеличить объемы электроэнергии в часы пика,

так что перегрузка по мощности может быть сведена к минимуму, тем самым, предотвращая ухудшения качества электроэнергии и обслуживания.

В настоящее время развитие технологий применения источников возобновляемой энергетики приводит к тому что в вопросах обеспечения стабильного электроснабжения источники малой мощности будут играть существенную роль. Украина в этом процессе занимает активную позицию. Учитывая климатические факторы нашей страны, ее географическое расположение потенциал возобновляемой энергетики в стране достаточно высок [4]. Согласно данным Института возобновляемой энергетики НАН Украины технически-достижимый потенциал составляет не менее 548 млрд кВт×ч/год, из них в электрогенерации – до 270 млрд кВт×ч/год (ветроэнергетика – до 60 млрд кВт×ч/год, солнечная электроэнергетика – 5,7 млрд кВт×ч/год, большая гидроэнергетика – 20,1 млрд кВт×ч/год, малая гидроэнергетика – 8,6 млрд кВт×ч/год, биоэнергетика – 27 млрд кВт×ч/год, энергия окружающей среды – до 146 млрд кВт×ч/год).

Введение в эксплуатацию в последние 5 лет в области ветроэнергетики и солнечной энергетики, и в меньшей степени малой гидроэнергетики [4, 5, 6], и других объектов возобновляемой энергетики приводит к постановке задачи создания сетей с распределенной генерацией и регулирование потоков мощности в таких сетях. Выходная мощность возобновляемых источников энергии также должна управляться независимо от локальной загрузки области. В таком случае системы с распределенной генерацией могут негативно повлиять на функции управления напряжением сети, увеличивая колебания между максимальным и минимальным уровнями напряжения по сравнению с необходимым значением.

Из-за внедрения систем с распределенной генерацией на основе возобновляемых источников энергии появляются проблемы с контролем и обеспечением стабильности энергосети и качества напряжения. Отсюда возникает необходимость автоматизации таких систем.

Следовательно с увеличением количества и мощности источников систем с распределенной генерацией возникают различные технические, эксплуатационные и экономические проблемы в интеграции распределенных систем в существующие энергетические системы.

Тем не менее, научно-исследовательские работы в этом направлении, показывают, что существуют проблемы, которые системы с распределенной генерацией, представляет для безопасной и надежной работы систем распределения энергии.

**Актуальность работы. Технологии распределенных поколений.** Из-за увеличения различных технологий, а также развития РГ, которые играют существенное и актуальное явление в энергетической системе, до сих пор нет универсального соглашения по определению параметров генераторов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с целью использования их, как объекты распределенной генерации в общей энергосистеме.

Современное определение РГ очень разнообразно и варьируется от 1 кВт – для систем на основе солнечных модулей, до ветрогенераторов от 1 МВт до 1000 МВт.

Некоторые из популярных технологий РГ перечислены ниже:

- паротурбинные установки;
- микрогэс-турбины, газовые турбины горения;
- топливные элементы;
- фотовольтаическая (PV) система;
- ветротурбины.

**Внедрение систем распределенной генерации в энергосистемы Украины.** Различные типы распределенной генерации, в будущем в Украине, ожидаются что они будут только расти. РГ включает в себя применение небольших генераторов, разбросанных по всей энергосистеме, чтобы обеспечить потребления энергии электрическими потребителями.

Такие системы, которые локально интегрируются в энергосеть несколько достоинств с точки зрения местоположения, поскольку, использования таких систем могут предотвратить падения напряжения на отдельном участке линии, иными словами компенсировать его.

Соответствующая мощность внедряемой РГ для эффективного и надежного энергоснабжения вызывает необходимость дополнительных исследований.

Однако размер генераторов зависит от нескольких факторов, таких как доступность входной энергии, месторасположения, экономической и экологической составляющей.

Анализ исследований показывает следующие проблемные направления при использовании систем с РГ:

- интеграция РГ в общую энергосистему;
- оптимальное расположение объектов РГ;

- изменение мощности короткого замыкания;
- качество напряжения;
- стабильность напряжения;
- несбалансированность систем с РГ.

Рассмотрим основные проблемы в вышеперечисленных направлениях.

**Интеграция РГ в общую энергосистему.** Системы с распределенной генерации дают ряд преимуществ, таких как увеличения поддержки напряжения, надежность, экономическую гибкость, эффективность и вспомогательные услуги, а также снижение выбросов веществ, загрязняющих окружающую среду, повышение безопасности, увеличение мощности, уменьшение потери энергии в энергосистеме.

Выход мощности РГ в сеть варьируется в зависимости от изменения локальной нагрузки. Выходная мощность ВИЭ также может управляться независимо от локальной загрузки области. Этот режим управления реализуется, если работа генераторов соответствует сигналу потребления, который может или, в некоторых случаях, не может соответствовать местным изменениям нагрузки, а также необходимо учитывать возможность выработки электроэнергии генераторами ВИЭ, которые в свою очередь зависят от природных ресурсов, таких как солнечная энергия или энергия ветра.

В таком случае системы РГ могут негативно повлиять на функции управления напряжением сети, увеличивая колебания между максимальным и минимальным уровнями напряжения по сравнению с необходимым значением. Поскольку минимальный уровень напряжения может оставаться (как правило, при высокой нагрузке, отсутствие работы генераторов), но максимальный уровень напряжения может увеличиться, например, в условиях низкой нагрузки с РГ, работающими при максимальной производительности в то время, когда необходимость отсутствует. Что в свою очередь создает проблемы традиционному энергоснабжению сети, с мощностью, напряжением, частотой.

Из-за внедрения систем РГ на основе ВИЭ риск проблем с контролем и стабильностью энергосети. Например, если автоматический выключатель в распределительной системе сработал, это может привести к удалению ячейки РГ из системы. Если потеря электропитания не обнаружена блоком генератора, участок РГ продолжит работу.

Отсюда возникает необходимость автоматизации системы РГ, которая должна точно соответствовать активной и реактивной мощности нагрузки в участке системы, тогда система могла бы продолжать работать без каких-либо проблем.

Однако, этот нюанс является сомнительным, в том, что ячейка РГ будет точно соответствовать нагрузке в системе в нужный момент времени. Поэтому, будут возникать колебания частоты или напряжения, когда ячейка РГ попытается подключиться и загрузить систему. Следовательно, присоединения генераторов требуют определенных правил и алгоритмов присоединения к сети, в случае повышения нагрузки в энергосистеме РГ начинало бы отдавать нагрузку, а при потере нагрузки – остается отсоединенными до тех пор, пока сеть не будет нагружена.

На этой почве и возникает «конфликт» владельцев систем распределенной генерации и энергокомпаний, потому что не всегда энергии от РГ является востребованной.

**Оптимальное расположение объектов РГ.** Существует несколько способов выбора оптимального расположения источников распределенной генерации для различных целей в энергосистеме.

Базируясь на приоритетах целей внедрения источников РГ, аналитический процесс используется для определения наилучшего расположения генераторов, этот вариант возможен при существующей базе данных энергопотребителей за определенный период времени. Предлагаемый метод достаточно хорош для нынешнего состояния энергосистемы в Украине, так как большинство потребителей имеют постоянную основу использования электрической энергии и рост её потребления. Опираясь на данные такими как расширение сети, концентрация нагрузки, структурные и регуляторные изменения и т.д. можно ориентировочно определить оптимальное месторасположение РГ. Но стоит учесть, что оптимальное местоположение может не быть актуальным после нескольких лет. Более того, с ростом уровня внедрения систем распределенной генерации, оптимальное местоположение может меняться, и для поиска оптимального местоположения требуется новое скоординированное исследование.

**Требования к системе защиты в системах с распределенной генерации.** В зависимости от характеристик РГ (его номинальной мощности, используемой технологии, режима работы), расположения генераторов и конфигурации сети, влияние распределенной генерации на защиту от перегрузки по току может отличаться. Это явно указывает на то, что источники питания на основе ВИЭ, безусловно, влияют на схему защиты распределительной сети.

Если система защиты блоков РГ может обнаружить неисправность и быстро отключиться от сети, тогда источник РГ не будет мешать нормальной работе системы защиты. Поэтому большинство стандартов присоединения требуют отключения источника ВИЭ при возникновении неисправности.

В настоящее время все больше и больше распределительных сетей автоматизированы и оснащены системами SCADA, однако, она не всегда может справиться с неисправностью, откуда и возникает необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

**Изменение мощности короткого замыкания.** Установка новых распределенных генераторов в распределительных сетях потенциально увеличивает уровень мощности короткого замыкания (КЗ). Хотя иногда желательно иметь высокий КЗ, например, в точке подключения инвертора линии коммутируемой станции HVDC или при наличии больших нагрузок с быстро меняющимися требованиями, в общем случае увеличение КЗ потенциально указывает на возможном возникновении проблем на участке сети.

**Качество напряжения.** Различные РГ имеют разные характеристики и, таким образом, создают различные проблемы с качеством электроэнергии. Ярким примером является то, что один большой источник РГ, например, ветряная турбина, в слабой сети может привести к проблемам с качеством электроэнергии особенно при пуске и остановке. Чрезмерное использование силовых электроприборов и современных средств управления представляет проблемы с качеством электроэнергии и кроме того, эти устройства очень подвержены проблемам с качеством электроэнергии.

**Стабильность напряжения.** Традиционно, структура распределительной сети не нуждалась в рассмотрении проблем стабильности, поскольку сеть была пассивной и радиальной и оставалась стабильной в большинстве случаев, если сеть передачи сама была стабильной.

Однако это, скорее всего, изменится по мере увеличения проникновения этих схем и увеличения их вклада в сетевую энергоэффективность. Области, которые необходимо учитывать, включают в себя переходные процессы (стабильность первой гармоники), а также долгосрочную динамическую стабильность и возможный коллапс напряжения.

**Несбалансированность систем с РГ.** Зачастую очень часто встречаются системы РГ, которые предоставляют генерацию в сеть в однофазном режиме. Если это возникает, происходит дисбаланс системы, и он не должен увеличиваться сверх допустимого предела. Так как, работа генераторов испытывает дисбаланс нагрузок в фазах. Их производительность ухудшается из-за неуравновешенности в системе.

**Выводы.** В данной статье рассматриваются технологии распределенной энергетики и их влияние на будущую энергосистему. Различные варианты РГ, включенные в украинскую энергосистему, описываются вместе с будущими возможностями и вариантами. Из-за растущего спроса на ископаемое топливо и экологических проблем, возникающих при использовании традиционной генерации, внедрение распределенной генерации, поступающей от возобновляемых источников энергии, растет и ожидается, что в будущем будет расти. При увеличении источников РГ, возникают различные технические и экономические проблемы в интеграции распределенных поколений в существующие энергетические системы, которые необходимо рассматривать.

### Литература

1. Энергетика XXI века: Условия развития, технологии, прогнозы / Л.С.Беляев, А.В. Лагерев, В.В. Посекалин; Отв. ред. Н.И.Воропай. Новосибирск: Наука, 2004, 386 с.
2. Каргиев М.В. Распределенная генерация энергии с использованием возобновляемых источников энергии // Energy Fresh. - 2010 - № 1. - С. 42-45.
3. Атлас енергетичного потенціалу нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні. – К., 2005. – 36 с.
4. Альтернативная энергетика в Украине: монография / Г.Г. Пивняк, Ф. П. Шкрабец; Д.: НГУ, 2013. – 109 с.
5. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Пивняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
6. Ветроэнергетика. Информационно-аналитический обзор по альтернативной энергетике: монография / С.В. Тарасов, Ф.П. Шкрабец, В.А. Задонцев, С.В. Отчич; под общ. ред. В.А. Дзензерского и Г.Г. Пивняка; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 156 с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.*