

Запрягая ветер

О том, как ветер приводит к смене парадигмы в электроснабжении

Йохан Кройзелъ



Перед лицом антропогенного парникового эффекта и тревог по поводу будущего дефицита топлива меняется облик энергетического рынка. Существенную и быстрорастущую долю этого рынка уже заняли альтернативные источники энергии, такие как ветровая энергия. Цитируя расхожее клише, можно сказать, что действительно подул «ветер перемен». К сожалению, это выражение справедливо и в другом смысле: нет ветра – нет электричества. Поскольку большинство заказчиков не готовы к тому, что при смене ветра каждый раз будут происходить массовые отключения, то требуются резервные мощности по выработке энергии, которые могли бы экстренно скомпенсировать последствия изменений погоды.

Но эта проблема – не единственная. Тепловые электростанции строились с таким расчётом, чтобы их энергия передавалась на минимальные расстояния, то есть, как правило, вблизи крупных городов. А вот энергию ветра можно извлекать лишь там, где ветер дует. Таким образом, скорее всего придётся приспособлять передачу энергии к возможностям её выработки, а не наоборот.

В будущем система электроснабжения должна стать гибким посредником между мало-предсказуемой выработкой электрической энергии и большими ожиданиями относительно качества снабжения ею.

Эффективные энергосистемы

В индустриально развитых странах одно из главных преимуществ снабжения электрической энергией – доступность электроэнергии в любое время и практически в любом месте, при этом качество снабжения стандартизовано. На всём протяжении 20-го века это достигалось путём систематического совершенствования структуры энергосистем, исходя из интересов потребителя. Энергосистемы проектировались и строились вокруг центров потребления энергии (хотя природные источники энергии располагались как правило рассредоточенно и имели локальный характер). Пример тому – тепловая электроэнергетика, преобладающая во многих странах и функционирование которой подчинено интересам потребителя.

Накопление энергии, необходимое для компенсации колебаний в энергопотреблении, обычно имеет место на стороне природного источника энергии – обычно это более эффективно с точки зрения затрат (например, складирование топлива для электростанций). Однако в последние 15 лет этот основной принцип всё чаще подвергался сомнению. Эти сомнения обусловлены двумя причинами:

- Либерализация электроснабжения, к которой во многих странах пришлось переходить с начала 90-х гг., привела к отказу от принципа выработки электрической энергии на месте её потребления. В этом случае выбор, от какой электростанции получать электроэнергию, практически отсутствовал, что почти исключало возможности для конкуренции.
- Изменения климата, вызванные имеющими антропогенное происхождение выбросами парниковых газов, проявляются всё более явно, как и нехватка ископаемых природных источников энергии. Всё это привело к возрастанию интереса к возобновля-

емым источникам энергии. После энергии воды, которая используется с первых дней энергетики, вторым по значению возобновляемым глобальным источником энергии стала энергия ветра.

В последние 15 лет во всем мире наблюдался особенно бурный рост ветровой энергетики.

Ветер и солнце – почти идеальные возобновляемые источники энергии: экологически чистые, легкодоступные в любой исторической перспективе и к тому же имеющие значительный потенциал освоения по сравнению со всеми другими формами энергии из возобновляемых источников. Однако эксплуатация таких источников означает отход от управления энергосистемой только по нагрузке. Ни ветровую, ни солнечную энергию нельзя накопить в их первичном виде, поэтому системы электроснабжения будущего должны быть гораздо более гибкими, нежели нынешние. Они должны будут согласовать непредсказуемость и непостоянство природного источника энергии с неизменностью требований потребителя к качеству и надёжности снабжения выработанной из этого источника электрической энергией.

Базовые структурные изменения в секторе электроснабжения

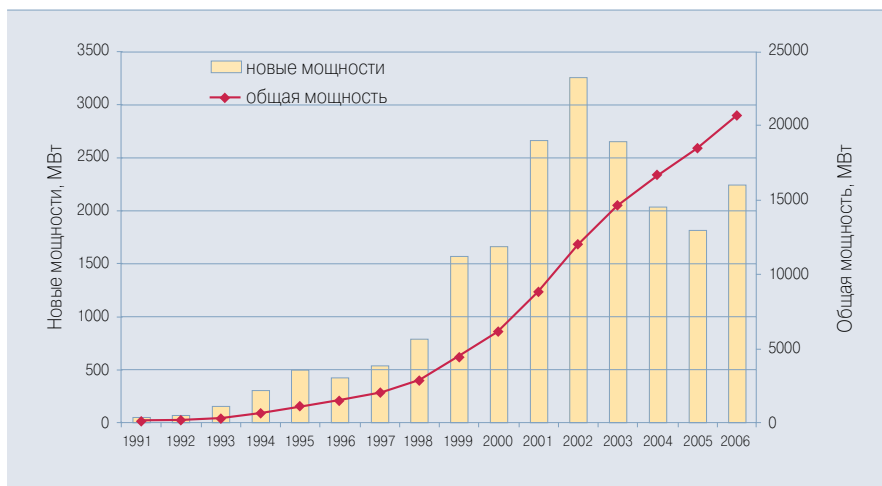
К далеко идущим изменениям в секторе электроснабжения по сравнению с началом 90-х гг. привели две важных тенденции. Первая – либерализация поставок электроэнергии, что можно наблюдать во всём мире. Это уже привело к разделению с одной стороны на генерацию

энергии, её оптовые поставки и торговлю ею, а с другой стороны на доведение энергии до потребителя и управление этим процессом. Как следствие, проектирование новых электростанций более не увязывается с планируемым расширением электрических сетей. Кроме того те, кто управляет распределением электроэнергии, должны считаться с требованиями тех, кто управляет выработкой электроэнергии, в части распределения нагрузок и графика их работы. Лишь в случае возникновения опасности потери устойчивости электроснабжения операторы, управляющие распределением энергии, имеют право на самостоятельные решения. Наконец, эти операторы располагают очень ограниченной информацией об электростанциях, если те принадлежат независимым производителям электрической энергии.

Вторая важная тенденция – стремление к повышению энергоэффективности и к сокращению использования невозобновляемых природных источников энергии. В этом плане центральное место в электроэнергетике должны занимать децентрализованные энергетические установки, вырабатывающие одновременно тепловую и электрическую энергию, а также выработка энергии из возобновляемых природных источников. Последнее без сомнения является одним из краеугольных камней в надёжном удовлетворении мировой энергетической потребности, причём на весьма длительную перспективу. Поэтому возобновляемые источники энергии прочно занимают заметное место в энергетической политике многих стран, и этому направлению оказывается значительная поддержка.

В последние 15 лет во всем мире наблюдался особенно бурный рост ветровой энергетики¹⁾. Преимущества последней – в доступности ветровой энергии в больших количествах (по крайней мере в прибрежных районах) и вполне приемлемой стоимости преобразования этой энергии в электрическую энергию по сравнению с преобразованием энергии других возобновляемых источников. Ранее ветер в значительной степени оставался «незапряженным» из-за того, что экономическая эффективность этого была недостаточной. Теперь же внедрение ветроэнергетики во многих странах уже привело к тому, что на конец 2006 г. суммарная мощность ветровых энергетических установок превысила 74 млн. кВт. В одной лишь Германии, площадь которой достаточно велика, общая мощность всех имеющихся на сегодняшний день таких установок превосходит 20 млн. кВт (рис. 1), в то время как зимой 2005/2006 гг. вся

1) Распространение ветровой энергетики в Германии (Источник: Bundesverband Windenergie e. V.)



¹⁾ См. также статью «Чистая энергия из морских просторов» на с. 69 этого номера журнала.

пиковая нагрузка не превышала 77 млн. кВт. Всего же в 2006 г. ветровыми энергетическими установками Германии было выработано 30,5 млрд. кВтч электроэнергии (5,1 % от её общей выработки).

Общим в этих двух тенденциях является то, что помимо колебаний нагрузки операторам энергосистем во всё большей степени приходится учитывать и другие малопредсказуемые процессы.

К чему приводит высокая степень непредсказуемости в выработке электроэнергии?

Существенная особенность ветровой энергетики – «привязанность» к конкретным географическим местам: такие места, где ветер может достигать значительной силы, часто находятся вне районов интенсивного энергопотребления. При этом сила ветра весьма изменчива.

После энергии воды вторым по значению возобновляемым глобальным источником энергии стала энергия ветра.

Выбор подходящего места для выработки любой формы энергии из возобновляемого источника диктуется доступностью данного источника в данном месте, особенно если затраты на использование линий электропередачи не зависят от того, где находится потребитель. Например, в Германии ветровые энергоустановки сосредоточены в северных федеральных землях (рис. 2). В этих местах по ряду причин энергетическая инфраструктура менее развита и поэтому не приспособлена для передачи больших мощностей. Поэтому такую инфраструктуру необходимо расширять, и в дополнение к 20 миллионам кВт ветровых установок на суше в Германии добавились 30 миллионов кВт ветровых электростанций, вынесенных в море. На рис. 3 показано, как сейчас представляются перспективы дальнейшего расширения инфраструктуры. Проведённое агентством DENA²⁾ исследование влияния расширения ветроэнергетики на сеть линий электропередачи в Германии показало, что к 2015 г. потребуются ещё 800 км таких линий [1].

Однако высокая доля ветроэнергетики в общем производстве электроэнергии не только предъ-

являет новые требования к линиям электропередачи, но и влияет на остальные компоненты энергосистем. Прежде всего, надо учитывать, где именно расположены ветровые энергоустановки. Те установки, которые расположены на суше в местах с типичной для Германии ветровой активностью, работают в среднем на 10-15 % от заложенной в них мощности с коэффициентом технической готовности, характерным для тепловых электростанций [3]. Эта цифра возрастает почти до 50 % для ветровых энергоустановок, вынесенных в море. Нехватку мощности необходимо возмещать за счёт так называемых «теневого электростанций», которые «поддерживают» энергосистему за счёт использования других источников энергии.

Благодаря такой поддержке в сетях с неуклонно возрастающей долей ветровой энергии с самого начала не возникает никаких проблем. Однако в таких сетях должно гарантированно обеспечиваться «горячее» (первичное) и среднесрочное (вторичное и третичное) резервирование. В принципе, как и в любой системе, потребление и выработка электроэнергии должны быть всегда согласованы. Во всех энергосистемах определенная часть мощности – так называемый запас на балансировку – обеспечивается электростанциями, работающими в режиме частичной нагрузки с возможностью как увеличения, так и уменьшения отдаваемой мощности по первому требованию энергодиспетчера (см. вставку). Поскольку этим используемым для поддержания баланса энергосистем электростанциям требуется дополнительное оборудование для управления ими, а их рабочая мощность используется не полностью, запас на балансировку должен

быть по возможности меньше. Величина этого запаса зависит от величины непредвиденных колебаний нагрузки в энергосистеме, последняя определяется как величиной самой нагрузки, так и характеристиками самой большой генерирующей установки (выход из строя которой должен быть скомпенсирован энерго-

Резервы для поддержания баланса мощности

Секундный резерв (горячий, первичный) – резерв выработки электрической энергии, который может быть введён в течение нескольких секунд. Обычно состоит из генераторов, работающих с неполной нагрузкой, мощность которых можно быстро увеличить или уменьшить. Секундный резерв обычно используется для поддержания постоянства частоты.

Минутный резерв (тёплый, вторичный) – резерв более низкого уровня. Резкие изменения режима энергосистемы компенсируются как правило за счёт секундного резерва. Для разгрузки последнего в течение нескольких минут производится переключение на другие источники электроэнергии (правила UCSTE, например, предписывают ввод минутного резерва в течение не более 15 минут). Обычно минутным резервом являются гидроаккумулирующие электростанции, газотурбинные энергетические установки (запускаются по мере необходимости) или тепловые электростанции, работающие не на полную мощность.

Часовой резерв (холодный, третичный) – резерв ещё более низкого уровня, состоящий из электростанций, которые запускаются из «холодного» состояния по мере необходимости.

2) Ландшафт в районе Мекленбург-Форпоммерн, Германия: низкая плотность населения и малая концентрация промышленности привели к тому, что сеть линий электропередачи здесь развита слабо.



²⁾ DENA (Deutsche Energie Agentur) – Немецкое агентство по энергетической эффективности

Эффективные энергосистемы

системой в любом случае). В пределах любой энергосистемы (например, европейской UCTE²⁾) действуют обязательные требования к величине запаса на балансировку и к величине изменения мощности, которую балансирующие электростанции должны обеспечить.

Сосредоточение ветровых энергоустановок в удалении от берега во многих случаях вызовет постоянную и масштабную проблему передачи от них вырабатываемой энергии.

Энергосистема, в которой в течение короткого времени количество энергии, вырабатываемой ветровыми энергоустановками, может меняться от нуля до почти полного покрытия региональной потребности (например, в северной Германии или Дании), должна удовлетворять более высоким требованиям по резервированию, нежели обычная система с тепловой электростанцией, самый крупный энергоблок которой имеет мощность всего в несколько процентов от пиковой, сама нагрузка заранее известна, а её изменения предсказуемы. Проводившиеся в северной Германии первые опыты по прогнозированию выработки электроэнергии ветровыми установками с помощью методов, совершенство которых, однако, оставляет желать лучшего, показали, что при выработке энергии ветровой установкой требуется резерв в 25 % от рабочей мощности этой установки, который при необходимости должен быть введён в течение нескольких минут [2]. При

таких результатах требования UCTE к балансировке энергосистем безусловно должны быть пересмотрены. Это подтверждается и при анализе результатов исследований агентства DENA [1]. Такой анализ показывает, что в условиях высокой ветровой активности короткое замыкание в объединённой энергосистеме северной Германии приведёт к дефициту электрической энергии на порядок большему, чем предписанный требованиями UCTE вторичный резерв мощности.

Крупная авария в энергосистеме UCTE 4 ноября 2006 показала, что в европейской энергосистеме выработку значительной части электроэнергии заранее спланировать невозможно и это влияет на способы управления такой системой. В отчёте UCTE об этой аварии [4], при которой вся сеть UCTE оказалась разделена на три обособленные и асинхронно работающие части, во-первых отмечено, что после аварии произошло автоматическое отключение ветровых энергетических установок в северной Германии, никак не скоординированное с системными операторами. И хотя в данном конкретном случае такое отключение даже стабилизировало ситуацию (ветровые установки расположены в районе, где частота тока превышает норму, а часть вырабатываемой энергии оказывается в избытке), вполне могло произойти и обратное. Во-вторых, в отчёте указывается, что восстановлению синхронного режима в энергосистеме мешала децентрализованная выработка электроэнергии, природу которой системные операторы знали недостаточно и повлиять на которую никак не могли. Это свидетельствует о том, что основополагающие требования к менеджменту энергосистем изменились значительно, а соответствующие прикладные средства от них отстали.

Технические решения для энергосистем будущего

Новые возможности для сетей передачи электрической энергии

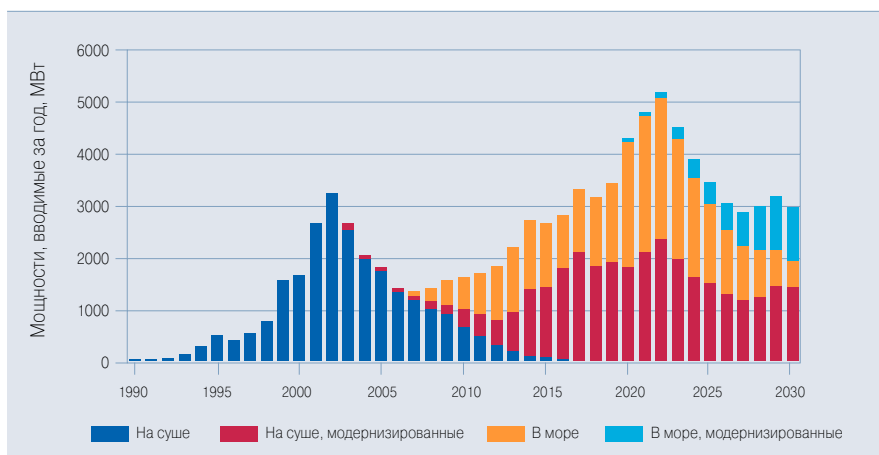
Рост доли энергии, извлекаемой из возобновляемых источников, а также изменения в энергетическом бизнесе породили новые задачи для сетей передачи энергии, отличные от местной балансировки нагрузок и генерируемых мощностей. При этом требования к величине потерь при передаче энергии и к величине реактивной мощности превышают таковые для существующих систем. Для повышения устойчивости работы энергосистем имеются несколько альтернативных путей.

Прежде всего следует упомянуть такой путь, как строительство новых линий электропередачи. Однако часто это связано с большими затратами времени и другими трудностями. Интересной альтернативой этому представляется более полное использование возможностей уже существующих ЛЭП. К тому же на имеющихся трёхфазных линиях можно повысить рабочее напряжение, увеличить сечение проводников и даже поднять их допустимую рабочую температуру³⁾.

Ветер и солнце – почти идеальные возобновляемые источники энергии: экологически чистые, легкодоступные и к тому же имеющие значительный потенциал освоения.

Сосредоточение ветровых энергоустановок в удалении от берега во многих случаях вызовет постоянную и масштабную проблему передачи от них вырабатываемой энергии. Такую ситуацию в Германии предвидят уже сейчас. Вопрос поставлен так: стоит ли модернизировать сеть линий напряжением 400 кВ, построенную для другой цели (создания общего резерва мощности), или же лучше наложить на эту сеть ещё одну – 3-фазную более высокого напряжения или постоянного тока? В последнем случае при тех же габаритах уровень передаваемой мощности выше и не нужно нормировать реактивную

3 Прогноз дальнейшего развития ветровой энергетики в Германии (источник: <http://www.deutsche-windindustrie.de>)



³⁾ UCTE: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity – Ассоциация операторов систем передачи энергии в континентальной Европе

⁴⁾ См. также статью «Эффективной электроэнергией – быть!» на с. 14 этого номера журнала.

мощность. При использовании коммутируемых двунаправленных высоковольтных преобразователей постоянного тока на транзисторах IGBT такие линии помимо своего основного назначения могут в длительном режиме компенсировать и реактивную мощность в местных сетях (рис. 4). Этот вариант особенно привлекателен в районах с большим количеством ветровых установок, поскольку, как говорилось выше, структура электрических сетей в этих районах довольно слабая. Именно такая технология под названием HVDC Light™ используется в оборудовании, которое компания АББ поставляет с 1997 г., причём его номинальная мощность сегодня может достигать 1,1 млн. кВт.

Способность двунаправленных систем постоянного тока к немедленной работе в любой области PQ-диаграммы и, в частности, в её нулевой точке (рис. 4б) в сочетании с главным преимуществом постоянного тока – отсутствием реактивной мощности – означает, что такой способ передачи энергии идеально подходит для проектируемых ветровых установок, располагаемых в море. При этом часто более целесообразно линии электропередачи от этих установок доводить не только до берега, а продолжать до ближайших крупных узлов энергосистемы. Это хорошо согласуется с концепцией наложения сетей для передачи больших объёмов электроэнергии.

Управление системой становится более прозрачным

Необходимость передачи энергии, извлекаемой из возобновляемых источников, и быстрые изменения нагрузки на фоне колебаний вырабатываемой мощности приводят к ужесточению требований к сетям передачи электроэнергии. В этом плане более подробная и более своевременная информация о состоянии энергосистемы, обеспечиваемая новейшими широкомасштабными системами мониторинга [5], могла бы способствовать совершенствованию управления энергосистемой. Децентрализованное измерительное оборудование может фиксировать значения векторов напряжения и тока с высоким разрешением по времени. Если в масштабах энергосистемы осуществить синхронизацию времени (например, с помощью системы GPS, см. рис. 5), то для управления энергосистемой можно получить весьма точное отображение её состояния в динамике.

Область применения информации такого качества простирается от более тщательного наблюдения за смежными районами энергосистемы, особенно если там имеются элементы, влияющие на передачу мощности (фазосдвигающие трансформаторы, устройства FACTS или линии постоянного тока), и до непрерывного

мониторинга систем в критических режимах работы или идентификации частей энергосистемы, выпадающих из синхронизма. Во время крупной аварии 4 ноября 2006 г., при которой европейская энергосистема UCTE оказалась разделённой на три обособленных подсистемы, это разделение сначала не было обнаружено на диспетчерских пунктах. В принципе можно предположить, что вероятность подобной аварии тем больше, чем выше нагрузка энергосети. Поэтому возможно большая доступность информации для диспетчерских пунктов управления энергосистемами не только желательна, но и крайне необходима.

Проблема тепловых электростанций

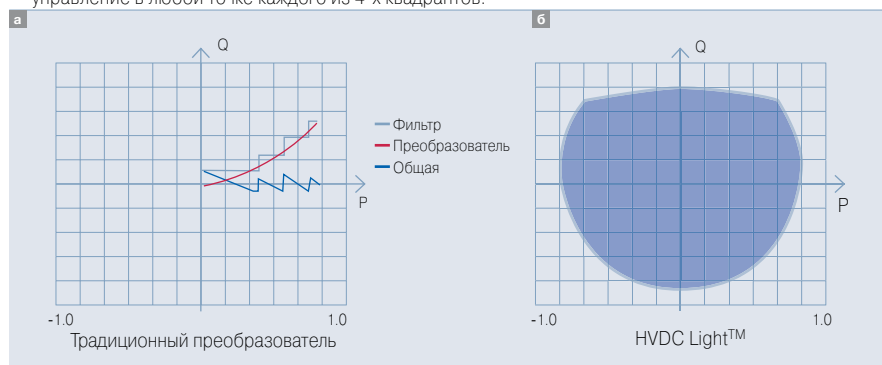
Большая доля электроэнергии, вырабатываемой ветровыми установками, приводит к тому, что повышаются требования к управлению независимыми системами выработки электроэнергии. Это касается как первичного, так и вторичного резервирования, в частности способности обеспечить минутный резерв (см. вставку) и особенно актуально для тех энергосистем, где для балансировки используются электростанции, работающие на угле. Использование на существующих тепловых электростанциях современных средств измерения и контроля – это значительный потенциал для модернизации, не требующий значительных усилий. Внедрение модельно-ориентированных и всесторонне оптимизированных характеристик для турбин и котлов на тепловых электростанциях с парогенераторами (как это сделано в системах MODAN и MODAKOND от компании АББ) имеет следствием более плавный ход и меньший износ турбин, а также уменьшение потребности во вспомогательных материалах. При операциях дросселирования (такое возможно при введении секундного резерва) гарантируется повышение эффективности почти на 0,48 %. Такое повышение происходит благодаря тому, что необходимое для балансировки энергосистемы увеличение числа оборотов парогенератора

достигается минимальным дросселированием турбины. Подобная модернизация, приводящая к результатам, намного превосходящим современные требования UCTE, становится ещё более важной в системах со значительной долей энергии, извлекаемой из возобновляемых источников, и, соответственно, с нестабильной работой остальных генерирующих мощностей этой системы.

Энергосистемы будущего будут характеризоваться значительной долей энергии, вырабатываемой из возобновляемых источников, децентрализацией её выработки и заданием объёмов выработки энергии ИЗВНЕ.

Из-за непредсказуемости уровня мощности, вырабатываемой ветровыми установками, обеспечение ввода минутного резерва приобретает особую важность. Поэтому модернизация существующих тепловых электростанций является технической необходимостью для повышения надёжности работы энергосистем. Однако для генерирующих компаний это в равной степени и возможность извлечения дополнительной выгоды, ибо резерв мощности на либерализованных рынках энергии считается товаром высокого качества. Систематически проводимая модернизация средств измерения и контроля часто содержит в себе значительный потенциал. Например, при согласованной модернизации одновременно котла, турбины и контрольно-измерительного оборудования может быть достигнуто повышение мощности парогенератора в течение 1 минуты с 2 до 50

4 PQ-диаграммы традиционного преобразователя постоянного тока (а) и двунаправленного преобразователя HVDC Light™ (б) – во втором случае обеспечивается непрерывное и быстродействующее управление в любой точке каждого из 4-х квадрантов.



Эффективные энергосистемы

5 Широкомасштабная система мониторинга с синхронизацией устройств векторных измерений [5].



МВт и повышение точности контроля с ± 5 до $\pm 0,5$ %. Кроме того, после такой модернизации электростанция может использоваться для первичного и вторичного балансирования энергосистемы.

Большая доля электроэнергии, вырабатываемой ветровыми установками, приводит к тому, что повышаются требования к управлению независимыми системами выработки электроэнергии.

Перспективы

Энергосистемы будущего будут характеризоваться значительной долей энергии, вырабатываемой из возобновляемых источников, децентрализацией её выработки, заданием объёмов выработки энергии извне, а также хорошо развитым энергетическим бизнесом. Отсюда вытекают новые требования к традиционным генерирующим подсистемам и передающим сетям, поскольку электростанции не могут располагаться произвольно, возобновляемые природные источники энергии зачастую имеют нестабильную и непредсказуемую природу, пока ещё недостаточно информации о режимах децентрализованной выработки электроэнергии, не отработаны схемы ведения энергетического бизнеса в таких условиях. В этом плане центральным вопросом является увеличение числа процессов в энергосистеме, которые оператор не может планировать и на которые он не может влиять. В прошлом нагрузка была предсказуемой и планируемой,

6 Ветер – бесплатный, но нестабильный источник энергии.



а управление энергосистемой осуществлялось, прежде всего исходя из величины нагрузки. В будущем же придётся учитывать (и координировать друг с другом) значительно большее число факторов с тем, чтобы электроснабжение как основа любого индустриального общества продолжало оставаться безопасным, надёжным и экономичным.

Для многих вытекающих из сказанного аспектов уже существуют решения. Например, повышение требований к контрольно-измерительным системам традиционных электростанций, повышение пропускной способности электрических сетей, расширение и повышение качества информации о состоянии энергосистем. Самым сложным в грядущем времени будет выбор правильных решений на основе всесторонних знаний о новой энергетике и своевременное внедрение этих решений в энергосистемы.

Йохан Кройзелъ

Marketing and technology power divisions, ABB AG
Мангейм, Германия
jochen.kreusel@de.abb.com

Литература

- [1] Deutsche Energie-Agentur: Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020 (dena-Netzstudie). Deutsche Energie-Agentur, Cologne, 2004
- [2] Dany, G. Systemtechnische Weiterungen der Netzintegration von Windkraftwerken. Aachener Beiträge zur Energieversorgung (Band 92): Jahresbericht 2003 des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen in Verbindung mit der Forschungsgesellschaft Energie an der RWTH Aachen e.V., pp. 105–107, Aachen, 2003
- [3] Dany, G., Haubrich, H.J., Biermann, D., Krabs, M., Machate, R.D., Sierig, J., Wert der Windenergieeinspeisung, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Vol. 50 (2000), issue 1/2, pp. 48–52
- [4] Union for the co-ordination of transmission of electricity (UCTE), System disturbance on 4 November 2006 – final report, UCTE Brussels, 30th January 2007
- [5] Иоахим Берщ, Седрик Карнал, Андреас Сураны. Вся энергосистема, как на ладони. Выявление неустойчивости энергосистемы и оптимизация использования основных средств с помощью платформы Inform^{IT} Wide Area Monitoring PSG 850. АББ Ревю 4/2003, с. 32–36