**5.5. Новые свойства будущих электроэнергетических систем**

Воропай Н.И., Осак А.Б.

ИСЭМ СО РАН

Закономерности изменения условий развития и функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) приводят к существенным трансформациям в структуре систем и режимах их работы. Эти трансформации обусловлены рядом объективных факторов, которые определяют облик ЭЭС будущего.

Продолжаются увеличение масштабов ЭЭС, расширение обслуживаемых ими территорий, объединение для совместной работы различных ЭЭС с формированием межрегиональных, межгосударственных и межконтинентальных энергообъединений.

Продолжается развитие агломераций вокруг крупных городов, обусловлены формированием в них центров государственного и хозяйственного управления, сосредоточение в них высокотехнологических производств, финансовых ресурсов, креативных групп населения, научно-образовательного кластера. Одновременно с этим продолжается тенденция деурбанизации городских поселений, включая вынос за пределы городской застройки промышленного производства и развитие индивидуального малоэтажного строительства. В дополнение к предыдущему будет продолжаться повышение статуса и жизненного уровня в средних и небольших городах. Все это приведет ко все большему рассредоточению электропотребления по территории при глубокой электрификации промышленности и быта для обеспечения роста качества жизни и производительности труда [1, 2].

Тенденция децентрализации электроснабжения развивается и со стороны генерации электроэнергии в связи с расширением использования источников распределенной генерации, подключаемых к узлам распределительной электрической сети. Эта тенденция обусловлена появлением новых высокоэффективных технологий производства электроэнергии, гибко адаптирующих ЭЭС к неопределенности спроса на электроэнергию. Свой вклад в распределенную генерацию вносят источники электроэнергии, использующие возобновляемые энергетические ресурсы.

Новые высокоэффективные технологии получают все большее использование и для крупных источников электроэнергии. Реально структура генерации будущих ЭЭС должна включать относительно крупные генерирующие источники для снабжения электроэнергией крупных электроемких потребителей и достаточно высокую долю распределенной генерации электроэнергии.

Широкое распространение в ЭЭС установок распределенной генерации порождает несколько особенностей. Многие малые генерирующие установки, использующие газотурбинные технологии, работают на более высокой по сравнению с промышленной частоте и подключаются к системе через выпрямительно-инверторные блоки. Аналогичное подключение имеют ветроагрегаты, отличающиеся к тому же стохастическим характером генерируемой мощности. В результате существенно изменяются частотные характеристики генерации в ЭЭС, снижается регулирующий эффект генерации по частоте. Установки распределенной генерации имеют малые по сравнению с традиционными генераторами большой мощности постоянные инерции ротора и упрощенные системы регулирования, что создает проблемы с обеспечением устойчивости ЭЭС. Подключение установок распределенной генерации к распределительной электрической сети радикально изменяет ее свойства, создавая проблемы устойчивости, формируя необходимость существенного развития и принципиальной реконструкции систем релейной защиты и автоматики на этом уровне.

В связи с тенденциями развития и размещения генерации и потребления электроэнергии существенно изменится в будущем и электрическая сеть. С учетом новых технологий в преобразовательной технике на основе силовой электроники, снижения стоимости, повышения надежности и обеспечения высокой управляемости электропередач постоянного тока они получат существенное развитие в передающей электрической сети. Одновременно широкое использование устройств, формирующих на основе использования силовой электроники гибкие электропередачи переменного тока (FACTS), радикальным образом повысит управляемость передающей сети переменного тока [3]. Новые технологии, включая использование устройств FACTS, существенно повысят надежность и управляемость распределительной электрической сети.

Рост электропотребления при рассредоточении генерирующих источников и потребителей по территории приводит к увеличению плотности передающих и распределительных электрических сетей. В целом с учетом указанных факторов электроэнергетические системы будущего все в большей мере будут приобретать функции и свойства инфраструктурных систем (своего рода «электрического интернета»), которые теоретически будут в состоянии предоставлять потребителю электроэнергию в требуемом месте, необходимых качества и надежности электроснабжения и по приемлемой цене.

Наблюдается тенденция роста доли новых электроприемников с новыми нагрузочными характеристиками. К таким электроприемникам относятся все электроустановки, запитанные через современные блоки питания − выпрямители плюс стабилизаторы и выпрямители плюс инверторы. Это частотно-регулируемый электропривод, вся компьютерная, офисная и бытовая техника с импульсными источниками питания, светодиодное освещение и т.п. Отличительной их особенностью является неизменная величина потребляемой активной мощности при изменении в широком диапазоне величины и частоты напряжения в питающей сети (некоторые электроприемники обеспечивают неизменность нагрузки даже при снижении уровня напряжения до 30 % от номинального). Если традиционные потребители при снижении величины питающего напряжения снижают свое потребление, тем самым обеспечивая регулирующий эффект нагрузки, то новые потребители при снижении величины питающего напряжения увеличивают потребляемый ток при сохранении неизменной активной мощности, а с учетом потерь в распределительной электрической сети это приводит к росту активной и реактивной мощности нагрузки. Соответственно, при росте общей доли новых электроприемников будет снижаться регулирующий эффект нагрузки по напряжению в ЭЭС.

Ситуация усугубляется широким применением современных устройств регулирования под нагрузкой (РПН) трансформаторов, в том числе в распределительной электрической сети, в результате чего уровни напряжения на шинах потребителей становятся относительно стабильными и соответствуют нормативным требованиям, но при аварийных условиях в магистральных и распределительных электрических сетях вместо снижения напряжения на шинах потребителей (и, как следствие, снижения активной и реактивной нагрузки) имеет место неизменность нагрузки, увеличение потерь в сети и существенный рост потребляемой из питающей электрической сети реактивной мощности.

Еще одной проблемой является то, что все большее число электроприемников сохраняют неизменной потребляемую мощность при изменении частоты в питающей сети. К таким электроприемникам относятся не только упомянутые выше новые потребители, но и большинство нагревательных элементов, используемых для электроотопления. При этом снижается как суммарная мощность, так и общая доля нагрузки, напрямую подключенной к электрической сети переменного тока (без частотных преобразователей), которая обеспечивала бы регулирующий эффект нагрузки по частоте для всей ЭЭС.

Еще один важный новый фактор для будущих ЭЭС – появление активных потребителей, самостоятельно управляющих собственным электропотреблением в зависимости от ценовых условий на розничном рынке электроэнергии путем переноса потребления электроэнергии некоторыми электроприемниками с периодов с высокой ценой электроэнергии на периоды с низкой ценой. Такое независимое от диспетчерского графика управление нагрузкой активных потребителей создает проблемы для управления режимами ЭЭС вследствие неопределенности электропотребления активных потребителей. Поэтому перспективным является взаимодействие ЭЭС и потребителей по совместному управлению режимами системы с использованием регулировочных возможностей потребителей.

Существенное изменение свойств будущих ЭЭС произойдет в результате массового распространения систем хранения электрической энергии, технологии которого уже сейчас имеют промышленное применение [4]. Характерно то, что системные накопители электрической энергии имеют высокоэффективные быстродействующие системы управления на базе силовой электроники, могущие внести свой вклад в обеспечение управляемости ЭЭС. Большая доля накопителей электрической энергии ожидается на базе электромобилей, которые при массовом их использовании существенно изменят облик и режимы работы будущих ЭЭС.

С учетом указанных тенденций все большего распространения электроприемников и систем хранения электроэнергии, питающихся на постоянном токе через преобразовательные элементы, можно ожидать переход к формированию питающих распределительных электрических сетей на постоянном токе при размещении общих преобразовательных установок с переменного тока на постоянный на питающих подстанциях [5,6].

Перечисленные новые нагрузочные характеристики потребителей, накопителей и генерации будущих ЭЭС существенно изменят свойства и управляемость систем. Существующие принципы управления режимами в традиционных ЭЭС основываются на использовании регулирующего эффекта нагрузки и частотных характеристиках генерации. За счет указанных эффектов современные ЭЭС обладают внутренней самоустойчивостью, а системы управления воздействуют при выходе режимных параметров за определенные границы. В связи с изменением свойств будущих ЭЭС их внутренняя самоустойчивость во многом трансформируется, вследствие чего традиционные принципы управления режимами ЭЭС потребуют существенной модификации и развития.

Практически во всех странах мира в качестве государственной политики технологического развития электроэнергетики и ЭЭС будущего объявлена концепция интеллектуальной энергосистемы (Smart Grid). Эта концепция базируется на интеграции нескольких инновационных направлений во всех звеньях от производства до потребления электроэнергии, а именно [7 и др.]:

• инновационные технологии и установки для производства, хранения, передачи, распределения и потребления электроэнергии;

• высокоэффективные средства и технологии измерения, сбора, обработки, хранения, передачи и представления (визуализации) информации;

• прогрессивные информационные и компьютерные технологии, в том числе Интернет;

• высокоэффективные методы мониторинга и управления на базе современных подходов теории управления;

• активные потребители.

Развитие будущих ЭЭС на технологической базе интеллектуальной энергосистемы позволит во многом нивелировать перечисленные выше потенциально негативные тенденции в изменении свойств ЭЭС. В то же время уже сейчас возникают, а в будущем будут обостряться новые проблемы, связанные с необходимостью усиления координации управления режимами ЭЭС на различных уровнях, повышения эффективности управления, обеспечения надежности самой системы управления режимами ЭЭС. Особую остроту приобретают вопросы информационной и кибер-безопасности при мониторинге и управлении ЭЭС [8, 9 и др.].

Все изложенное требует серьезных глубоких исследований по изучению свойств будущих ЭЭС, разработке принципов и методов их формирования с учетом изменяющихся условий, управления их режимами в нормальных и аварийных ситуациях, а также систем диспетчерского и автоматического управления режимами будущих ЭЭС [10].

**Литература**

1. Воропай Н.И., Стенников В.А. Энергетическая стратегия России: изменяющийся взгляд на развитие электроэнергетики // Энергетическая политика, 2013, вып. 2, с. 66-70.

2. Бушуев В.В. Электроэнергетика в энергетической стратегии России // Электричество, 2014, №8, с. 4-8.

3. Zhang X.-P., Rehtanz Ch., Pal B. Flexible AC transmission systems: modelling and control. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, 383 p.

4. Electric energy storage systems / Styczynski Z.A., Adamek F., Voropai N.I. e.a. CIGRE: Paris, 2011, 95 p.

5. Allee G., Tschudi W. Edison redux: 380 V DC brings reliability and efficiency to sustainable data centers // IEEE Power and Energy Magazine, 2012, Vol. 10, No. 6, P. 50-59.

6. Patterson B.T. DC, come home: DC microgrids and the birth of the “Enernet” // IEEE Power and Energy Magazine, 2012, Vol. 10, No. 6, P. 60-69.

7. Воропай Н.И. Smart Grid: мифы, реальность, перспективы // Энергетическая политика, 2010, вып. 2, с. 9-14.

8. Yin Wei, Kundur D. Two-tier hierarchical cyber-physical security analysis framework for Smart Grid // IEEE PES General Meeting, San Diego, USA, July 22-27, 2012, 5 p.

9. Осак А.Б., Панасецкий Д.А., Бузина Е.Я. Аспекты надежности и безопасности при проектировании цифровых подстанций // Междунар. н.-т. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». Екатеринбург, Россия, 3-7 июня 2013 г., 7 с.

10. Воропай Н.И., Осак А.Б. Электроэнергетические системы будущего // Энергетическая политика, 2014, вып. 5, с. 60-63.