

Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью

СИТНИКОВ В.Ф., СКОПИНЦЕВ В.А.

Обсуждается направление инновационного развития электроэнергетики, получившего название Smart Grid. В России указанное направление рекламируется как создание интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Отмечаются имеющиеся в отечественной практике сдерживающие факторы, которые следует устранить.

Ключевые слова: *электроэнергетическая система, качество функционирования, надежность электроснабжения, информационная система, подготовка кадров*

В последнее десятилетие во многих странах мира разрабатывается направление инновационного развития электроэнергетики, получившее название Smart Grid. На основе анализа зарубежных публикаций в [1] сделан вывод о том, что однозначной и общепринятой интерпретации этого термина пока не существует. Так, государственные структуры рассматривают Smart Grid как идеологию национальных программ развития электроэнергетики, компании-производители оборудования и технологий – как основу оптимизации бизнеса, энергетические компании – как базу для обеспечения инновационной модернизации своей деятельности. Имеет место также точка зрения на Smart Grid как на совокупность организационных изменений, новой модели процессов управления, решений в области информационных технологий, а также инноваций в сфере АСУ ТП и диспетчерского управления в электроэнергетике. Все перечисленные и возможно другие толкования разных структур и компаний относительно Smart Grid являются следствием эволюционного развития электроэнергетических систем (ЭЭС). В развитии электроэнергетики промышленно развитых стран можно выделить три характерных этапа с очень размытыми по времени границами.

Первый этап развития относится к первой половине прошлого века, когда электрическая энергия вследствие целого ряда ее преимуществ перед другими видами энергии стала ускоренными темпами завоевывать ведущие позиции в технологических процессах многих отраслей экономики стран. В связи с возрастающими потребностями в электрической энергии стояла задача строительства мощных для того времени электростанций с возможностью передачи электроэнергии на большие

The line of innovative development of electric power engineering called a Smart Grid is discussed. In Russia, this line is advertised as development of an intellectual electric power system with an active-adaptive network. Retarding factors existing in the Russian electric power industry that should be removed are pointed out.

Key words: *electric power system, quality of operation, reliability of power supply, information system, training of staff*

расстояния. В СССР на этом этапе также имели место заводские и фабричные источники электроэнергии и межколхозные ГЭС небольшой мощности.

Второй этап развития характеризовался тем, что наряду с совершенствованием технологий выработки, преобразования и передачи электрической энергии стали формироваться современные ЭЭС. По времени этот этап условно относится ко второй половине прошлого века, когда были созданы мощные электроэнергетические объединения. На этом этапе выявилась потребность в рассмотрении сложных научно-технических проблем системного характера, без решения которых невозможно было обеспечить нормальное функционирование ЭЭС. В результате получили развитие исследования по режимам работы систем и переходным процессам в них, по теории статической и динамической устойчивости, по теории релейной защиты и автоматики и ряд других теорий.

На этом этапе в СССР преобладал основополагающий принцип развития электроэнергетики – концентрация выработки электроэнергии на крупных электростанциях при централизованном электроснабжении и управлении режимами работы объединенной энергосистемы. Выполнению принципа во многом способствовала существующая государственная (общенародная) собственность на средства производства.

С конца прошлого века в России осуществляется переход к рыночным отношениям, следствием которого стали изменения некоторых положений и принципов в развитии электроэнергетики:

хозяйственное разделение участков единого технологического процесса генерации, передачи, распределения и потребления электроэнергии;

разделение интересов образуемых субъектов рынка по поддержанию надежности работы энергетических объектов и получению прибыли, что объективно усложняет решение задач обеспечения надежного энергоснабжения многочисленных потребителей электро- и теплоэнергией;

постоянное давление рынка на экономию издержек, стремление к снижению резервов и запасов всех видов, полноте использования энергетического оборудования; коммерческие требования к режиму работы ЭЭС и ограничения на его изменения, значительно снижающие управляемость системой.

В настоящее время состояние электроэнергетики России характеризуется следующим:

установилась тенденция к увеличению спроса на электроэнергию при усиливающейся политике на энергосбережение;

возросла плотность суточного и годового графиков нагрузки элементов системы, вследствие чего имеет место напряженный режим работы оборудования;

в структуре энергообъединений узлы становятся все более электрически жестко связанными, что приводит к росту токов коротких замыканий;

в структуре ЭЭС содержится значительная доля оборудования и аппаратуры с большим сроком эксплуатации;

работа операторов системы стала более напряженной из-за короткого промежутка времени, отводимого на решение непредвиденных ситуаций;

возросла значимость компьютеризации процессов управления в функционировании ЭЭС;

многократно возросли информационные потоки технологической и управленческой направленности;

наблюдается тенденция к росту числа аварийных ситуаций на энергообъектах с возможностью их перерастания в крупные системные аварии.

Изменения и отмеченные факторы в состоянии электроэнергетики России способствовали началу третьего этапа ее развития, в ходе которого речь идет о создании энергосистем с активно-адаптивной сетью (ЭСААС) – технических систем, отличающихся большим числом датчиков систем сбора, элементов и обработки информации о состоянии оборудования, наличием исполнительных органов, системой управления в реальном масштабе времени, системой оценки текущей и прогнозирования будущей ситуации, быстрым действием управляющей системы и информационного обмена [2].

Особенностью такой электрической сети является резервированная структура, позволяющая с помощью гибкого управления потоками энергии

избегать появления «узких мест» и опасных неустойчивых режимов работы. Предполагается, что оперативное управление конфигурацией сети и потоками энергии позволит повысить передающую способность сетей, смягчить проблемы возникновения каскадных аварий, обеспечить надежные электрические связи энергоисточников с потребителями энергии и, в конечном счете, повысить надежность электроснабжения потребителей и экономичность работы сети.

Таким образом, на современном этапе развития ЭЭС наряду с вопросами совершенствования технологий преобразования и передачи электроэнергии актуальны вопросы управления такими свойствами систем, как их экономичность, надежность, безопасность и живучесть. Каждое из перечисленных свойств рассматривалось и ранее, на предыдущих этапах развития ЭЭС, однако нередко в отдельности, без взаимосвязи между собой. В настоящее время рациональное решение задач перспективного развития, организации эксплуатации и технического обслуживания, оперативно-технологического управления возможно при комплексном учете и рассмотрении перечисленных свойств, определяющих качество функционирования энергосистем [3].

Учитывая изложенное, концепцию Smart Grid и ее практическое воплощение в виде ЭСААС можно интерпретировать как создание энергосистем с повышенным качеством функционирования. Ожидаемые при этом некоторые изменения в подходах к анализу и управлению электрической сетью отражены в таблице.

В таблице следует обратить внимание на особую роль, возлагаемую на электрическую сеть. Помимо традиционной ее «обязанности» по обеспечению надежной электрической связи для передачи энергии от энергоисточников к узлам ее потребления ставится задача предотвращать появление «узких мест» и опасных неустойчивых режимов в системе. Достигается это соответствующим уровнем резервирования в структуре сети, наличием устройств с силовой электроникой, осуществляющих оптимизацию потоков мощности и снижение потерь в сетях, переходом к энергоинформационной системе – главному средству оптимизации управления [2].

Создание в России интеллектуальной ЭЭС с активно-адаптивной сетью при существующем ее состоянии сопряжено с определенными тормозящими факторами, которые потребуются устранить, чтобы не допустить негативных последствий. Например, для придания электрической сети энергоинформационных свойств необходимо появление в ее структуре многих элементов, обеспечивающих ее активно-адаптивные характеристики. Однако каж-

Номер п\п	Существующие подходы	Изменения при создании ЭСААС
1.	Электрическая сеть рассматривается как система передачи электроэнергии от источников генерации к потребителям	Электрическая сеть рассматривается как основной объект формирования технологического базиса для создания новых функциональных свойств энергосистемы
2.	Управление электрической сетью при авариях по факту возмущения	Управление электрической сетью по принципу предупреждения аварийных повреждений элементов сети
3.	Централизованное диспетчерское управление режимами работы	Отказ от жесткого диспетчерского регулирования в пользу координации работы всех составляющих сети
4.	Отдельные информационные каналы связи	Превращение информационных связей в основополагающий принцип для перехода к энергоинформационной системе – главному средству оптимизации управления
5.	Плановые и внеплановые ремонты оборудования	Переход на технологии ремонта и обслуживания по состоянию путем развития систем диагностики состояния оборудования
6.	Договоры потребителей на присоединенную мощность и поставки электроэнергии	Потребителю отводится роль активного участника процесса в части самостоятельного формулирования условий объема получаемой энергии и качества энергетических услуг
7.	Наличие посредников между ЕНЭС и конечным потребителем	Расширение рынков мощности и энергии вплоть до включения в их деятельность конечного потребителя

дый вводимый в структуру сети элемент не застрахован от отказов и ложных действий. С другой стороны, известна общая закономерность для сложных технических систем – эмергентность – несводимость свойств системы к свойствам отдельных ее элементов, т.е. выводы о поведении системы в целом на основе суждений о поведении отдельных ее элементов могут быть ошибочными. Поэтому при переходе к энергоинформационной системе основным критерием принимаемых решений является выполнение основной задачи – обеспечение требуемого уровня надежности электроснабжения подсоединенных к сети потребителей с учетом отказов не только основного оборудования, но и возможных неисправностей аппаратуры в информационных каналах связи, систем автоматики и релейной защиты.

В этой связи показательными являются результаты выполненных в [4] исследований по оценке фактической эксплуатационной надежности ячеек элегазовых выключателей в открытых распределительных устройствах 110–750 кВ электроподстанций ОАО «ФСК ЕЭС», подтверждающие необходимость применения комплексного подхода. Статистически установлено, что собственно выключатель с приводом незначительно влияет на результирующие простои ячеек РУ – доля составляет около 10%. Примерно 70% случаев ячейка с выключателем простаивает из-за повреждений измерительных трансформаторов и разъединителей, а также из-за вторичных цепей. Замечено, что значительное ухудшение надежности привнесли современные микропроцессорные устройства контроля и управления, включая АСУ ТП. Чрезмерное увлечение их информационными масштабами и неоправданное

дублирование их функций привели к тому, что эти системы стали избыточно громоздкими и все менее надежными. При этом стоимость рассматриваемых систем становится сравнимой с затратами на электротехническое оборудование.

В то же время качественно выполненная энергоинформационная система позволяет перейти к управлению по принципу предупреждения аварийных ситуаций в электрической сети (п. 2 таблицы), что приводит к повышению надежности электроснабжения потребителей и соответственно к уменьшению ущерба для объектов электроэнергетики как от аварий, так и от нарушений электроснабжения у потребителей.

Развитая энергоинформационная система позволяет существенно ослабить влияние посредников на условия поставок электроэнергии потребителям (п. 7 таблицы), в первую очередь на значение тарифа на электроэнергию (исключается диктат посредников в этом вопросе).

Приведенный пример наглядно демонстрирует необходимость комплексной оценки принимаемых решений и научного их обоснования.

В [1] при обсуждении вопроса реализации концепции Smart Grid в России отмечают такие сдерживающие факторы, как уровень развития информационных технологий, силовой электроники, альтернативных источников энергии, нормативно-технической базы и других, которые в совокупности отражают технологический разрыв между состоянием отечественных и зарубежных энергосистем. Поэтому в настоящее время можно говорить лишь о точечной реализации отдельных компонентов рассматриваемой концепции. Делать это надо параллельно с провозглашенной политикой на ре-

конструкцию и модернизацию электрических сетей, а также со структурным упорядочением субъектов энергетического рынка и их полномочий.

В первую очередь, для планирования работ по достижению нужного качества функционирования электрической сети потребуются выполнить анализ существующего уровня повреждаемости электросетевых объектов и связанных с этим случаев нарушений электроснабжения подсоединенных к сети узлов нагрузок. Это крайне необходимо, учитывая наличие в сетях значительной доли отработавшего свой ресурс оборудования. Выявление основных причин нарушений в работе электрической сети и последствий от них позволит установить «слабые места» и составить план их устранения в зависимости от располагаемых средств.

Анализ повреждаемости сети необходим для оценки остаточного ресурса работы оборудования, планирования очередности проведения модернизации объектов, рациональной организации технического обслуживания и ремонта электросетевых объектов, обоснования потребности в резервах в структуре сети и других действий [5].

Для решения отмеченных и других задач необходимо располагать базой данных о повреждаемости электросетевых объектов на достаточно глубокую ретроспективу для обеспечения репрезентативности выборок. При этом важно обеспечить достоверность статистических данных о повреждаемости объектов и доступность к ним (существует коммерческая тайна) организаций, в сферу деятельности которых входят оценки свойств, характеризующих качество функционирования энергосистем. Речь идет о недопустимости искажений причин и размера последствий в статистической информации о повреждаемости, а также о «невключении» части сведений в базу данных. Необходимо понимание того, что неполная и недостоверная информация о случаях повреждений в электрической сети приводит к некачественным решениям при разработке мер и мероприятий по снижению частоты повреждений и тяжести последствий от них. Соответственно, не могут быть обоснованными решения по обеспечению нужных уровней надежности, безопасности, экономичности и живучести электрической сети и электросетевых объектов при их проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании.

Отмеченным требованиям должны соответствовать принимаемые правовые, управленческие и нормативно-технические документы, что не всегда выполняется. В качестве примера можно привести утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 28 октября 2009 г. № 846 «Правила расследования причин аварий в электро-

энергетике» (далее Правила) и принятые на их основе приказы Минэнерго РФ от 2 марта 2010 г. №№ 90, 91 и 92 о формах акта расследования и отчете об авариях и передаче оперативной информации об авариях в электроэнергетике. Не останавливаясь детально на ряде имеющихся в указанных документах несоответствий, рассмотрим цели расследований и формирование базы данных о повреждаемости для решения практических задач развития, эксплуатации и управления. В п.30 Правил область использования материалов расследований аварий после проведения анализа определена двумя направлениями:

для планирования режимов работы объектов электроэнергетики и(или) энергопринимающих установок;

для разработки мер по обеспечению надежного и безопасного функционирования указанных объектов (установок), в том числе в составе энергосистемы.

Отмеченные направления в большей мере относятся к сфере деятельности оперативно-диспетчерского управления. При этом Правила ориентированы на расследование причин аварий. Можно показать, что без статистических данных о числовых значениях последствий аварий невозможно решать задачи, в которых требуется оперировать с показателями безопасности функционирования объектов (установок).

При оценках безопасности технических объектов применяется понятие риска аварий [5, 6] как меры опасности, характеризующей вероятность возникновения аварии и тяжесть ее последствий. Риск того, что за время τ произойдут технологические нарушения с неприемлемыми последствиями \dot{x}_j , составит [3]:

$$R_j(\tau, X \geq \dot{x}_j) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(\tau) P_m\{X_j \geq \dot{x}_j\}, \quad (1)$$

где $P_m(\tau)$ – вероятность того, что на интервале времени τ на объекте произойдет ровно m нарушений; $P_m\{X_j \geq \dot{x}_j\}$ – условная вероятность повышения допустимых значений последствий при m технологических нарушениях; индекс j показывает, что отдельно могут оцениваться социальные, экологические или экономические риски.

При решении практических задач в формуле (1) $P_m(\tau)$ часто определяют из предположения о наличии стационарного пуассоновского потока технологических нарушений:

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau}, \quad m=0,1,2,\dots, \quad (2)$$

где λ – интенсивность потока нарушений.

Условная вероятность того, что в случае технологического нарушения значение последствий будет равным или превысит допустимое, составит:

$$P_m\{X_j \geq \dot{x}_j\} = 1 - F(x_j), \quad (3)$$

где $F(x_j)$ – функция распределения, определяется по статистическим данным о последствиях нарушений.

Таким образом, для разработки мер по обеспечению безопасного функционирования объектов необходимо иметь функцию распределения $F(x_j)$.

Информация о повреждаемости в работе электрической сети должна обеспечивать решение ряда задач в практике проектирования и эксплуатации объектов, например:

экономические аспекты надежности электроснабжения подсоединенных потребителей;

страхование ответственности за нарушение договорных условий по надежности электроснабжения;

создание аварийного запаса материалов в электрической сети для ремонта воздушных линий электропередачи;

выявление территориальных зон повышенной опасности для работы объектов электрической сети;

разработка нормативных показателей электроснабжения разных категорий потребителей;

выявление «узких мест» в электрической сети для обоснования мероприятий по их устранению и др.

Как видно, формируемые Правилами статистические данные не приспособлены для решения многих задач для проектирования и эксплуатации объектов.

При решении практических задач кроме наличия полной и достоверной информации о повреждаемости и других характеристиках работы анализируемого объекта важно располагать методиками, позволяющими обрабатывать массивы информации с получением численных значений показателей свойств, определяющих качество функционирования энергосистем.

Следует признать, что несмотря на наличие множества статей и монографий по надежности и промышленной безопасности энергетических объектов и систем сохраняется потребность в разработке соответствующих инженерных методик расчета. Ранее в условиях плановой экономики такие расчеты, как правило, не требовались и обосновывающие материалы при проектировании и развитии объектов ограничивались экономическим сопоставлением вариантов по приведенным затратам. При переходе к рыночным отношениям наряду с технологическими вопросами возникла потреб-

ность в рассмотрении вопросов рациональной организации управления для достижения нужного качества функционирования.

В последнее время произошли изменения в составе проектной документации для системообразующих подстанций и линий электропередачи. Так, в качестве обязательного раздела потребовались разработки по мероприятиям гражданской обороны и предупреждению чрезвычайных ситуаций. В связи с пожарами на ПС и особенно после крупной аварии на ПС «Чагино» 500 кВ потребовалась разработка декларации пожарной безопасности с проведением расчетов по оценке пожарных рисков. Совсем недавно в составе проектной документации для узловых ПС появилось требование представления раздела с декларацией по промышленной безопасности как объекта повышенной опасности из-за использования в технологическом процессе в большом объеме взрывопожароопасного вещества – трансформаторного масла. Здесь также требуется выполнение расчетов для оценки промышленных рисков от аварий с тяжелыми последствиями.

Оценки надежности принимаемых технических решений пока не нашли обязательного применения в практике проектирования электрической сети, хотя качественные требования по надежности электроснабжения потребителей содержатся в директивных документах разных уровней управления. В этом вопросе сказывается отсутствие приемлемых методик расчета численных показателей надежности и нормативов по надежности электроснабжения.

Для разработки нормативно-методической базы необходимы усилия специалистов, в первую очередь прикладной отраслевой науки. В ряде зарубежных публикаций отмечается необходимость расширения исследовательских программ, направленных на изучение инструментов и технологий обеспечения надежности электроснабжения с привлечением наиболее компетентных специалистов в этой области и улучшение своевременного внедрения в практику результатов исследований.

В отечественной практике имеет место противоположная тенденция – ослабление влияния отраслевой науки на решение обозначенных выше вопросов. В исторически ведущих энергетических организациях произошло ослабление их научного потенциала и, как следствие, отсутствие научной поддержки при выполнении основных по профилю работ с принятием обоснованных решений.

Следует также отметить образовавшийся в организациях кадровый перекос в сторону менеджеров, финансистов и юристов при относительном снижении численности и квалификации инженерно-тех-

нического состава. Существенно снизился престиж инженера и ученого на производстве. В учебных заведениях по подготовке и переподготовке кадров для электроэнергетики требуется корректировка учебных программ в сторону повышения качества образования с учетом современных требований и выдвигаемых задач. Без устранения возникших за последнее время отмеченных сдерживающих факторов в развитии и функционировании отечественной электроэнергетики трудно рассчитывать на практическое воплощение концепции инновационного развития Smart Grid в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кобец Б.Б., Волкова И.** Интеллектуальные сети. – Энергорынок. Профессиональный журнал, 2010, март.
2. **Алексеев Б.А.** Электрические сети противостоят авариям. – Энергоэксперт, 2009, № 5.
3. **Скопинец В.А.** Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть. – М.: Энергоатомиздат, 2009.
4. **Абдурахманов А.М., Мисриханов М.Ш., Федоров В.Е., Шунтов А.В.** О надежности ячеек элегазовых выключателей 110–750 кВ подстанций. – Материалы Международ. науч. семинара «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Ялта (АР Крым, Украина), 13–19 сентября 2010 г.
5. **Ситников В.Ф., Скопинец В.А.** Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации. – Электричество, 2007, № 11.
6. **РД 03–418–01.** Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – М.: Госгортехнадзор России, 2001.
7. **ГОСТ Р 51901–2002.** Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М.: Госстандарт РФ, 2002.

[22.08.11]

Авторы: Ситников Владимир Федорович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1984 г. В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию «Источники питания на магнитных ключах» в МЭИ. Генеральный директор ОАО «Институт «Энергосетьпроект».

Скопинец Владимир Алексеевич окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1965 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию по анализу аварийности электроэнергетических систем. Начальник департамента ОАО «Институт «Энергосетьпроект».