

высокой стоимости. Данная концепция не приведёт к сокращению персонала в диспетчерском центре, поскольку ИИ предназначен для упрощения и повышения эффективности управления процессом персоналом.

В статье рассматриваются результаты исследований мониторинга НЧК на базе СМНР. Был проведён литературный обзор, анализ НЧК, тесты сигналов, а также перспективы внедрения ИИ. Результаты исследований и проведённых тестов утверждают об эффективности СМНР и внедрения в данную систему нейронных сетей.

Литература

1. Жуков А. В., Климова Т. Г., Расщепляев А. И. Мониторинг низкочастотных колебаний в электроэнергетических системах // *Электричество*. – 2013. – № 2. – С. 20-27.
2. Назаренко Е. А., Винаковская Н. Г. Анализ блокировок дистанционной защиты от синхронных качаний и асинхронного режима // *Высокие технологии и инновации в науке*. – 2020. – С. 169-172.
3. Недолико А. В., Беляев А. Н. Повышение динамической устойчивости транзитных электропередач переменного тока на основе применения данных мониторинга переходных режимов // *Материаловедение. Энергетика*. – 2016. – № 4 (254). – С. 106-115.
4. Успенский М. И. Оценка надежности функционирования устройства синхронизированных векторных измерений // *Релейная защита и автоматизация*. – 2017. – № 3. – С. 33-38.
5. Балабин М. А. и др. Тестовые испытания устройств синхронизированных измерений векторных величин энергосистем // *Электричество*. – 2011. – № 4. – С. 17а-27.
6. Жуков А. В. Обобщение мировых тенденций развития техники и технологий электроэнергетики (по итогам 46-ой сессии СИГРЭ 2016 г.). – 2017.
7. Shen Z., Ding R. A novel neural network approach for power system low frequency oscillation mode identification // 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 2019. – С. 1-5.

СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Покацкий М.Ю., Троицкий Е.Д.

Научный руководитель доцент Р.А. Уфа

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В современных энергосистемах стало появляться все больше и больше объектов возобновляемых источников энергии. Так, суммарная установленная мощность генерации на основе ВИЭ (без учета гидроэнергетики) мире в 2020 г. составила около 1400 ГВт (согласно данным Международного агентства по возобновляемой энергетике (International Renewable Energy Agency)). Объекты возобновляемой генерации получили такой толчок к развитию благодаря мировому тренду уменьшения углеродного следа в атмосфере Земли.

Схема подключения современных ВИЭ к ЭЭС предполагает наличие статических преобразователей напряжения (СПН) на базе силовой полупроводниковой техники. Специфика работы СПН позволяет значительно расширить возможности управления и повышает эффективность функционирования как самих объектов ВИЭ, так и ЭЭС в целом. В таком случае, объект возобновляемой генерации может функционировать при любом диапазоне частот нормального и аварийного режимов, при этом оставаясь подключенным к основной сети и обеспечивая требуемое регулирование (например, выдачу реактивной мощности и поддержание заданного уровня напряжения). Поэтому, в настоящее время объекты ВИЭ, подключаемые через СПН, получили широкое применение, а также наблюдается тенденция по замене ими ранее установленных, подключаемых непосредственно к сети, объектов ВИЭ.

Между тем, обладая существенными преимуществами (отсутствие редукторов, дополнительных источников возбуждения, независимое регулирование активной и реактивной мощности (СПН и др.)), объекты ВИЭ, подключаемые через СПН, характеризуются отсутствием инерции, что ввиду увеличения уровня генерируемой ими мощности в ЭЭС, приводит к уменьшению общей (физической) ввиду увеличения суммарной установленной мощности ВИЭ с СПН в Европе эквивалентное значение инерции снизилось почти на 20 %. Это, в свою очередь, приводит к ускорению протекания переходных процессов, соответственно, увеличивает вероятность нарушения устойчивости ЭЭС. В частности, чем меньше инерция системы, тем больше она чувствительна к различным возмущениям, например, синхронные качания в таких системах могут быть ошибочно приняты за короткое замыкание. Кроме этого, изменяется частотный спектр процессов в ЭЭС с ВИЭ. Обеспечение устойчивости и надежности ЭЭС с нарастающей долей объектов распределенной генерации, включая ВИЭ, доминантные моды объектов ВИЭ находятся в диапазоне более высоких частот, чем электромеханические колебания. Следовательно, увеличивается вероятность появления локальных и межзональных колебаний, параметры и траектория изменения которых будут отличаться от колебаний в традиционных ЭЭС, без ВИЭ.

В Российской Федерации и странах СНГ принято говорить о статической (апериодической и колебательной) и динамической устойчивости, а за рубежом, принято, что классификация имеет несколько ответвлений в связи с развитием ВИЭ. Стоит учитывать, что с повышением мощностей ВИЭ в энергосистеме РФ, следует переосмыслить классификацию устойчивости.

В 2004 году совместная рабочая группа IEEE и GIGRE опубликовала свою классификацию устойчивости энергосистемы. Классификация имеет 3 основные ветви: Стабильность угла ротора, стабильность напряжения в узлах и стабильность напряжения. Стабильность угла ротора подразделяется на небольшие возмущения и переходные состояния. Стабильность напряжения делится на небольшие возмущения и значимые, которые могут быть краткосрочными и долгосрочными. Стабильность частоты же может быть краткосрочной и долгосрочной. С учетом обозначенного выше, классическое представление классификации устойчивости, принятое во всем мире, не должно

быть пересмотрено. Так, традиционно выделяют следующие типы устойчивости. В России же выделяют статическую и динамическую устойчивость.

Однако, в 2020 году рабочая группа IEEE подняла вопрос о новой классификации после того, как в энергосистеме начало появляться всё больше и больше элементов силовой электроники. Генерация ВИЭ, где необходима силовая электроника в отдельно взятых регионах нашей планеты достигает 50 % и выше. Сейчас в моде подключаемые электромобили, которым необходима подзарядка от сети.

Неконтролируемая зарядка — это свободная зарядка подключаемого электромобиля (ПЭ) без ограничений, при условии, что она начинается автоматически. Оборудование не пытается контролировать время и объем зарядки ПЭ. Неконтролируемая зарядка — это наихудший сценарий, поскольку люди, скорее всего, будут заряжать свои ПЭ по прибытии домой, что совпадает с суточной пиковой нагрузкой внутри страны. Более высокие скорости зарядки и большее количество одновременных подзарядок ПЭ приводят к увеличению спроса на ПЭ, что может вызвать проблемы в сети. Даже при низких общих показателях внедрения ПЭ в некоторых частях сети может возникать большое количество заряжающихся ПЭ из-за групп одновременного использования. Факторы, связанные с ПЭ, высокой инерцией привели к возникновению новых ветвей классификации устойчивости, которые равносильны стабильности напряжения, угла ротора и частоты. Были введены резонансная стабильность и стабильность силовых преобразователей.

В частности, причиной появления новых видов устойчивости энергосистемы являются солнечные и ветряные электростанции, последние, зачастую имеют схему подключения двойного питания, за счет своей дешевизны и простоты, принципиальная схема показана на рис. 1, где Р – редуктор, АГДП – асинхронный генератор двойного питания, СПН – силовой преобразователь напряжения. Суть такой конструкции генератора заключается в том, что обмотка статора подключается напрямую к сети, а обмотка ротора подключена через силовой преобразователь с сети. Около 30 процентов мощности генератора проходит через силовой преобразователь, что позволяет уменьшить потери и снизить стоимость самого преобразователя. Можно сказать, что главное преимущество ветряных турбин этого типа заключается в том, что их преобразователи могут поддерживать частоту и амплитуду выходного напряжения постоянными, поскольку они постоянно работают синхронно с сетью. В солнечных станциях же преобразуется постоянный ток в переменный с помощью силового преобразователя. Как видно, силовые преобразователи – необходимость при работе с ВИЭ. Именно из-за них появились новые проблемы устойчивости такие как резонансные возмущения и возмущения, вызванные скоростью переходных процессов в полупроводниковой технике. В частности, проблемы с колебаниями могут быть вызваны волновым взаимодействием между преобразователями и внешними системами питания переменного тока. Еще одной неотъемлемой частью данных процессов является то, что они происходят гораздо быстрее, чем в традиционных источниках энергии, что приводит к некорректной работе автоматики.

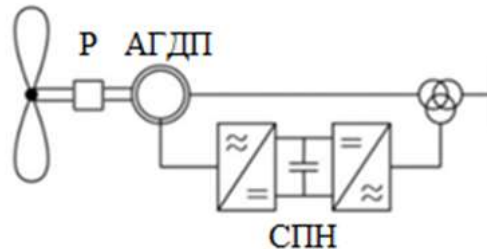


Рис. 1. Асинхронный генератор двойного

Расширение внедрения силовых электронных преобразователей породило проблему их негативного влияния на качество электроэнергии. Причиной этому явился нелинейный и импульсный характер процессов преобразования электроэнергии посредством ключевых элементов, дискретно управляющих потоками электрической энергии. В результате работы ключевых элементов происходит искажение токов в цепях переменного тока и кроме активной мощности, потребляемой из сети (или передаваемой в сеть), также возрастают реактивная мощность, обусловленная фазовым сдвигом основных гармоник тока и напряжения, и мощность искажения. Появление в системе электроснабжения высших гармоник тока и напряжения приводит к росту потерь мощности, перегреву оборудования, старению изоляции, сбою аппаратуры и т.п.

Резонансная неустойчивость возникает по причине качаний ротора асинхронной машины, такие качания могут приводить к тому, что скольжение становится отрицательным, что приводит к возникновению субсинхронных колебаний в обмотках асинхронного генератора.

Неустойчивость преобразователей возникает по причине взаимодействия элементов силовых преобразователей с емкостными и индуктивными элементами сети, что также вызывает низко и высокочастотные колебания. Классификация стабильности энергосистем представлена на рисунке 2.

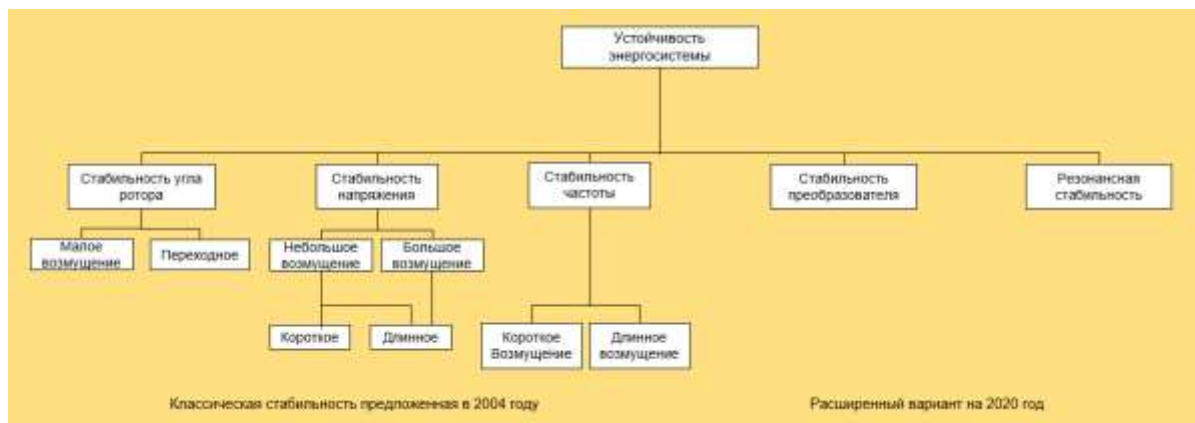


Рис. 2. Современные виды стабильности энергосистем

Литература

1. Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А. Преобразовательная техника, Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2009.
2. Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем. – 1 изд. – Санкт-Петербург: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – Санкт-Петербург: Энергия, 1970. – 520 с.
4. Эрнст А.Д. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: курс лекций. – Нижневартовск: Изд-во НГГУ, 2012. – 199 с.
5. Kundur. P. Power System Stability and Control. - New-York: McGraw-Hill, 1993. – 979 с.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ИНЕРЦИИ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УДАЛЕННОМ ЭНЕРГОРАЙОНЕ

Радько П.П.

Научный руководитель доцент Н.Ю. Рубан

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Введение. Из-за глобальной тенденции перехода к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) общественное значение постоянной инерции уменьшается по мере внедрения солнечных и ветряных электростанций [1-3]. В частности, солнечные электростанции (СЭС), которые в своем устройстве не имеют вращающихся элементов, обладают нулевой постоянной инерции [4, 5]. При значительной доле ВИЭ в системе может наблюдаться чрезвычайно высокая скорость изменения частоты.

Помимо прочего энергосистемы с возобновляемыми источниками могут отличаться и другой характеристикой – неоднородностью инерции. Она проявляется, когда постоянная инерции существенно отличается по значению между энергорайонами одной энергосистемы. В данной работе проведено исследование закономерностей, которые могут наблюдаться при интеграции ВИЭ в электрически удаленные энергорайоны.

Рассматриваемая схема. Исследование проводится в модели энергосистемы, базирующейся на учебной модели IEEE 9 bus и приведенной на рисунке 1. Рассматриваемую энергосистему можно условно поделить на два энергорайона: первый включает в себя электростанции с синхронными генераторами (СГ) Г1 и Г2 и нагрузками в узлах 7, 9, 6; второй – Г3, солнечную электростанцию и нагрузку в узле 4. Линии 7-5 и 5-4 отключены для моделирования слабой связи между энергорайонами. Затем, после окончания всех пусковых процессов (пуска генераторов, отключения системы от шины бесконечной мощности) моделируется наброс активной нагрузки в узле 4 величиной в 6,2 % от суммарной.

Предложенная схема опирается еще и на практический опыт комбинированного применения ВИЭ и СГ. Крупные производства или месторождения зачастую являются удаленными от основной электрической сети, за счет чего между этими энергорайонами выстраивается слабая связь. Для того, чтобы минимизировать потери в длинных линиях вблизи объекта устанавливаются синхронные генераторы, способные тем самым обеспечить энергией удаленные промышленные объекты. Затем, за счет увеличения добываемых или производственных объемов, а также модернизации технологии встает вопрос об увеличении вырабатываемой локальной мощности. И, благодаря глобальной тенденции перехода к ВИЭ именно такие установки используются в качестве дополнительных питающих источников. Таким образом и выстраивается комбинированная работа ВИЭ и традиционных генераторов на местах, имеющих с основной сетью слабую связь.