

В свою очередь, в отсутствие необходимости разряда СНЭ непосредственно на месте следует рассмотреть возможность организации и проведения следующих мероприятий на исследуемой автономной солнечной электростанции:

– увеличить емкость существующей СНЭ на аккумуляторных батареях и снабжать электроэнергией близлежащего потребителя;

– преобразовывать «излишек» в водород, который затем (а) переводить в электроэнергию в непосредственной близости от конечного потребителя (КПД двойного преобразования водорода находится в диапазоне 50–70 %) или же (б) переводить в аммиак и использовать в качестве удобрений для сельскохозяйственных нужд, либо же поставлять в виде аммиака в другие отрасли экономики, например, в качестве топлива для морского транспорта.

Таким образом, при использовании идеального графика выработки мощности объекта возобновляемой генерации в контексте решения оптимизационной задачи определения оптимальной емкости и режима работы, размещаемой совместно с объектом ВИЭ СНЭ полученное решение не будет являться оптимальным. Для корректности и адекватности проведенных расчетов необходим ввод соответствующих поправочных коэффициентов, а также проведение дополнительных исследований функционирования СНЭ в составе объекта ВИЭ в современных энергосистемах, характеризующихся существенной долей возобновляемой генерации в суммарной мощности генерации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Wu Q., Zhou J., Liu S., Yang X., Ren H. Multi-objective optimization of integrated renewable energy system considering economics and CO2 emissions // *Energy Procedia*, 2016. – V. 104. – P. 15-20.
2. Suresh M.C.V., Belwin E.J. Optimal DG placement for benefit maximization in distribution networks by using dragonfly algorithm // *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2018. – V. 5. – Is. 4. – P. 1-8.
3. De A., Mittal A. An optimal positioning and voltage stability analysis of renewable distributed generation and grid integrated energy systems – a review // *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER)*, 2019. – V. 9. – Is. 2. – P. 13-20.
4. Ufa R.A., Malkova Y.Y., Rudnik V.E. Andreev M.V., Borisov V.A. A review on distributed generation impacts on electric power system // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022. – V. 47. – Is. 47. – P. 20347-20361.
5. Fadaee M., Radzi M.A.M. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. – V. 16. – Is. 5. – P. 3364-3369.

Научный руководитель: к.т.н. Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

АВТОМАТИКА РАЗГРУЗКИ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ И УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ СИНХРОННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

К.К. Якименко

Томский политехнический университет
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5AM21

Сегодняшняя стадия развития сферы электроэнергетики влечет за собой изменения состава и процентного соотношения генерирующего оборудования, принципов и логики противоаварийного и режимного управления при протекании переходных процессов, характер ко-

торых также меняется. Появляются новые особенности сохранения надежности и устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС), баланса мощности. Возникают сложности в управлении режимами, которые не были характерны для традиционных систем, основанных преимущественно на углеродсодержащем топливе. Среди направлений развития ЭЭС, которые влияют на развитие систем противоаварийной автоматики (ПА), можно выделить [1]:

- активно растущая доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ), влияние которых на режим ЭЭС сказывается в отсутствии вращающихся масс, что проявляется в снижении суммарной инерции (системы с меньшей инерцией в случае серьезных аварий теряют свою устойчивость быстрее из-за большей скорости изменения режимных параметров), наличии непостоянных перетоков активной мощности в сети из-за стохастического характера генерации ВИЭ;
- развитие методов цифровой обработки сигналов позволяет организовывать своевременное противоаварийное управление с учётом актуального состояния аварийного процесса;
- улучшение производительности и ускорение быстрогодействия вычислительных систем и алгоритмов, которые смогут осуществить и выбрать управляющее воздействие (УВ) с минимальными задержками по времени.

Одним из ключевых требований при управлении ЭЭС является соблюдение требований к устойчивости параллельной работы энергосистемы, то есть сохранении синхронизма в системе. В соответствии с «Методическими указаниями по устойчивости» [2], статическая апериодическая и динамическая устойчивость (ДУ) должны сохраняться при наиболее тяжёлых нормативных возмущениях, как короткие замыкания с отключениями элементов сети, скачкообразный аварийный небаланс активной мощности по любым причинам, то есть нормативных возмущениях.

При решении задачи предотвращения нарушения динамической устойчивости следует принимать во внимание особенности электромеханических переходных процессов на слабых и сильных связях. На слабых связях, к которым в основном относятся межсистемные связи, менее вероятны нарушения динамической устойчивости. Дело в том, что относительное скольжение, вызванное возмущением, является незначительным для нарушения устойчивости. Поэтому автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) для данных связей обеспечивает условия статической апериодической устойчивости. Так как рассматриваются нормативные возмущения, применяются нормальные и ремонтные схемы и в послеаварийных режимах. Сильная связь – общее число линий, связывающих отдельную электростанцию с энергосистемой. Сильные связи с большей вероятностью подвержены возможности нарушения ДУ, потому что их предел по статической апериодической устойчивости значительно превышает суммарную мощность меньшей из соединяемых частей системы [3].

На базе современных программных комплексов можно смоделировать множество вариантов ЭЭС и различные варианты нормативных возмущений в них. Большая часть экспериментов покажет, что при тяжёлых нормативных возмущениях нарушится синхронная динамическая устойчивость (СДУ). Именно поэтому в данный момент активно ведутся исследования в этой области для сохранений устойчивости и надежности системы.

Автоматику для предотвращения нарушения СДУ при названных выше возмущениях принято называть «Автоматика разгрузки при близких коротких замыканиях и затяжных коротких замыканиях (АРБКЗ и АРЗКЗ)». Автоматика разгрузки при коротких замыканиях наравне с автоматикой разгрузки при отключении ЛЭП, сетевого и генерирующего оборудования (АРО СГО) и автоматикой разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ) входит автоматику предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) [4].

В АРКЗ в качестве УВ применяются:

- импульсная разгрузка турбин (ИРТ),
- электрическое торможение (ЭТ);
- отключение генераторов (ОГ);
- изменение топологии сети («отдаления» генерирующего оборудования от места КЗ).

Отличительной особенностью АРКЗ является необходимость выполнения в этом виде автоматики функции определения тяжести короткого замыкания, как признака возможного

нарушения динамической устойчивости. Эту функцию принято называть «Фиксация тяжести короткого замыкания» (ФТКЗ). Вид и дозировка УВ в АРКЗ определяются с использованием информации о тяжести короткого замыкания, а также информации о схеме и электрическом режиме в доаварийном состоянии.

ФТКЗ должна выполняться путем непосредственного и прямого измерения одного или нескольких из следующих параметров во время короткого замыкания:

- величины сброса активной мощности электростанции (отдельных генераторов или групп генераторов электростанции);
- величины напряжения прямой последовательности на шинах электростанции;
- величины угла между ЭДС и напряжением на шинах генераторов электростанции.

Одним из наиболее эффективных способов по сохранению динамической устойчивости генераторов является использование импульсной разгрузки турбин и длительной разгрузки турбин для сохранения статической устойчивости в послеаварийном режиме. Разгрузка турбин применяется для уменьшения момента, создаваемого турбиной, и заключается в быстром снижении механической мощности турбины с последующим ее плавным восстановлением до заданного значения. Это делает возможным оставление агрегата подключенным к сети, что существенно повышает надежность электроснабжения. Для эффективной разгрузки турбины необходимо сформировать управляющие импульсы тока через электрогидравлический преобразователь (ЭГП), соответствующим значением уровня сигнала (амплитуды), длительности и характером снятия управляющего воздействия. Работая с изменен амплитуду и длительность прямоугольной части импульса, можно менять глубину и скорость разгрузки турбины. Однако при прямоугольном импульсе могут возникнуть глубокие качания, вызывающие нарушения ДУ. Исправить это можно путем подачи более плавного импульса со спадающим задним фронтом по экспоненте, то есть замедлением восстановления мощности турбины [5]. Однако применение данного метода осложнено индивидуальностью импульсных характеристик турбин, которые могут быть непостоянными даже на одних и тех же турбинах [3].

В большинстве случаев под электрическим торможением понимают подключение в электрически близкой к генераторам точке сети параллельно или последовательно специальных тормозных резисторов. Основная задача ЭТ состоит в предотвращении выпадения из синхронизма генераторов электростанции.

Отключение генераторов используется для сохранения устойчивости при возмущениях, связанных с ослаблением связей энергосистемы путем изменения баланса мощностей в энергосистеме. ОГ заключается в разгрузке "опасного сечения" во время переходного процесса и в послеаварийном режиме.

Однако бывают случаи, когда технически невозможно применить ни разгрузку турбин, ни отключение генераторов, ни электрическое торможение. Это может быть связано со множеством факторов, но зачастую большие объемы УВ недопустимы в дефицитных или сложных энергосистемах. Тогда рассматривают изменение топологии электрической сети. Эффективность метода заключается в снижении тяжести КЗ из-за его «отдаления» от генераторов электростанций. Возможны варианты, когда систему необходимо делить на динамические зоны и применять к ним разные объемы УВ для сохранения устойчивости [6].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сенюк, М. Д. Апробация алгоритма анализа динамической устойчивости и противоаварийного управления режимом синхронного генератора на многомашинной модели энергосистемы / М. Д. Сенюк, А. А. Дмитриева // Электротехнические системы и комплексы, 2022. – № 1(54). – С. 46-53.
2. Методические указания по устойчивости энергосистем (утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.2003 №277). – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 16 с.

3. Гречушников, В. В. Оценка эффективности управляющих воздействий для сохранения синхронной динамической устойчивости на сильных связях при близких затяжных коротких замыканиях / В. В. Гречушников, Н. Р. Вагапов, Е. А. Понамарев // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016 : Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3 т., Казань, 19–23 сентября 2016 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 162-165.
4. ГОСТ Р 55105-2019. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. – М.: Стандартинформ, 2020. – 24 с.
5. Киевец, А. В. Исследование методики настройки противоаварийной разгрузки турбогенератора / А. В. Киевец, А. С. Гусев, А. Ю. Пишулин // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016 : Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3 т., Казань, 19–23 сентября 2016 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 224-226.
6. Сергеев, Е. В. Изменение топологии электрической сети как управляющее воздействие автоматики разгрузки при близких и затяжных коротких замыканиях / Е. В. Сергеев // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016 : Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3 т., Казань, 19–23 сентября 2016 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 371-374. – EDN YZDWOI.

Научный руководитель: доцент, к.т.н. С.М. Юдин, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

ГИБКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

М.В. Хромов

Томский политехнический университет
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А03

Технологии управляемых систем электропередачи переменного тока – Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS) являются одной из наиболее перспективных электросетевых технологий, суть, которой состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей.

Что такое FACTS и для чего используется

Система транспортировки переменного тока, включающая в себя силовую электронику и статические контроллеры, для улучшения управления и увеличения мощности передачи.

Задачи Facts

- Увеличить пропускную способность ЛЭП до тепловых пределов нагрева.
- Поддержка постоянной работы энергосистемы при различных проблемах.
- Обеспечение заданной мощности в электрической сети в соответствии с требованиями диспетчера.
- Управление напряжениями в сетях.

Основные элементы FACTS

Система силовой электроники, которая управляет многими параметрами системы передачи переменного тока.

Виды подключения FACTS

- Контроллеры серии;
- Шунтирующие контроллеры;
- Комбинированная серия-контроллеры серии;