

ОТЗЫВ

ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМЫ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ТИРИСТОРНОЙ С ЦИФРОВЫМ АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТИПА АРВ-2ПИ, ПРОВЕДЕННЫХ В СОСТАВЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА С СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ МОЩНОСТЬЮ 300 кВт

1. Актуальность работ.

В последние 15 лет в энергосистемах разных стран мира (США и Канада: 2003г., 2012г.; Европы: 2003г., 2006г., 2012г.; Россия: 2003г., 2005г., 2010г.; Казахстан: 2012г.; Индия: 2012г.; Бразилия: 2009г.; Япония: 2006г.) происходили крупные системные аварии в результате нарушения устойчивости и токовых перегрузок линий электропередачи (ЛЭП). Большинство таких аварий происходили практически по одному сценарию: после первого серьезного возмущения через некоторое время следовали множественные возмущения, сопровождавшиеся низкочастотными электромеханическими колебаниями (НЧК), которые приводили к погашению большей части объединенной электроэнергетической системы (ОЭС).

Факторами, влияющими на возникновение и развитие таких системных аварий, являются:

- рост потребления электроэнергии, опережающий развитие сетевой инфраструктуры электроэнергетических систем (ЭЭС),
- рыночные условия, стимулирующие увеличение объемов транспортировки электроэнергии из региона в регион слабыми электрическими связями,
- подключение к ОЭС существенных объемов мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с переменными графиками несения нагрузки,
- объединение на параллельную работу ЭЭС различных стран в одну ОЭС для снижения затрат на производство электроэнергии,

Возникающие под воздействием вышеуказанных факторов снижения запасов устойчивости, перегруженности ЛЭП, длительная работа со слабодемпфированными модами электромеханических НЧК могут привести (и приводили) к развитию крупных системных аварий с потерей устойчивости ЭЭС (ОЭС). Характерным примером возникших НЧК в ОЭС Украины являются переходные режимы на энергоблоках Ровенской АЭС, возникшие при отключении автотрансформатора связи между системообразующими сетями 330 кВ и 750 кВ, приведшие к длительным колебаниям (более 10 с) энергоблока №3 РАЭС в диапазоне 600-1600 МВт. В результате на данном энергоблоке, вследствие возникших переходных режимов и гидроударов было выявлено повышение активности 2-го контура и повреждения парогенераторов, что в последующем привело к длительному ремонту и существенному экономическому ущербу.

Операторы ЭЭС (ОЭС) в подобных ситуациях в достаточно короткий срок должны реализовать соответствующие управляющие воздействия, технические и организационные мероприятия для корректировки возникшего предаварийного режима с целью предотвращения полного обесточения ОЭС. С учетом сложности возникающих процессов в ЭЭС (ОЭС), все большую роль имеют исследования, направленные на изучение процессов воздействия ключевых элементов ЭЭС (генерирующих мощностей, ЛЭП, нагрузок) для предупреждения развития слабодемпфированных или нарастающих низкочастотных электромеханических колебаний. Для решения проблемы улучшения динамических свойств ЭЭС (ОЭС) и предотвращения возникновения опасных в аспекте функционирования ЭЭС (ОЭС) НЧК направлены многочисленные исследования в разных странах. В основе указанных исследований находится математическое моделирование. Разработкой и совершенствованием математических моделей ЭЭС, их элементов, изучением электромеханических НЧК в разные годы занимались такие ученые, как А. А. Горев, П. С. Жданов, С. А. Лебедев, Д. И. Азарьев, М. М. Ботвинник, В. А. Веников, Л. В. Цукерник, М. Л. Левинштейн, О. В. Щербачев, И. А. Груздев, В. А. Строев, Н. Н. Щедрин, А. Н. Костюк, И. Литкенс, В. В. Бушуев, Н. Н. Лизалек, А. А. Юрганов, A. Blondel, R. H. Park, I. M. Canay, F. P. de Mello, C. Concordia, P. M. Anderson, A. Fuad, P. Kundur и другие.

К техническим средствам, которые существенно влияют на динамические свойства ЭЭС (ОЭС), относятся системы автоматического управления возбуждением (САУВ) синхронных машин (СМ). В современных САУВ СМ для выполнения основной функции: поддержания постоянным заданного напряжения статора СМ или на стороне высокого напряжения блочного трансформатора при изменении нагрузки в различных режимах работы ЭЭС (ОЭС) используется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) - регулятор или его упрощенные модификации (ПИ-, ПД-) по основному регулируемому параметру: модулю напряжения статора. Однако, для поддержания напряжения статора СМ с малым статизмом и малыми колебаниями во всех возможных режимах ЭЭС (ОЭС), в том числе и в случае значительных возмущений, возникла необходимость введения дополнительных обратных связей (ОС) для компенсации отрицательного влияния используемого значения коэффициента ОС по отклонению модуля напряжения статора $K_{ov} > 25$. Как было отмечено в трудах F. P. de Mello, C. Concordia, P. Kundur, A. A. Юрганова при применении автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) с указанными значениями коэффициента ОС по отклонению модуля напряжения статора, в некоторых режимах работы ЭЭС (ОЭС) наблюдается эффект отрицательного демпфирования электромеханических НЧК в электромеханических переходных процессах вследствие запаздывания сигналов в замкнутом контуре «ЭЭС (ОЭС) - СМ - АРВ - возбудитель - СМ - ЭЭС (ОЭС)». Для компенсации этого негативного эффекта

применяются различные стабилизирующие ОС по параметрам, характеризующим электромеханическое состояние СМ (отклонению угла или скорости ротора, отклонению и производной частоты напряжения статора, ускоряющей мощности, производной тока ротора и др.). Запаздывание сигналов в замкнутом контуре «ЭЭС (ОЭС) - СМ - АРВ - возбудитель - СМ - ЭЭС (ОЭС)» не является постоянной величиной, а зависит от структуры и параметров ЭЭС (ОЭС), а также ее режима работы.

В настоящее время созданы разнообразные средства, улучшающие динамические свойства ЭЭС: высоковольтные линии постоянного тока, гибкие системы передачи переменного тока, статические компенсаторы реактивной мощности, тиристорно-управляемые последовательные компенсаторы и др. Однако, по сравнению с указанными средствами САУВ СМ, представляющие собой эффективные децентрализованные устройства демпфирования электромеханических колебаний, остаются ключевыми элементами ЭЭС, при их относительно небольшой стоимости по сравнению с вышеупомянутыми средствами. Поэтому, несмотря на существование и других средств, разработка эффективных структур САУВ СМ, реализующих новые типы ОС, с помощью которых можно компенсировать (устранить) отрицательные свойства и сохранить или усилить положительные свойства существующих САУВ СМ в аспекте решения проблемы улучшения динамических свойств ЭЭС является актуальной научно-технической проблемой.

2. Анализ разработанного и реализованного в НПООО «Преобразовательная техника» стенда.

На Украине, действующими нормативными документами, устанавливающими требования к системам возбуждения являются:

1. СОУ-Н МЕНВ40.1-00100277-68:2012. «Сті́йкість енергосистем. Керівні вказівки Міненерговугілля України».

Документ устанавливает требования к устойчивости энергосистем и является обязательным для организаций, занимающихся проектированием и эксплуатацией энергосистем ОЭС Украины и принадлежат к сфере управления Минэнергоугля.

2. ДСТУ 4265:2003 (ГОСТ 21558-2000). Межгосударственный стандарт «Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов».

Документ устанавливает требования к системам возбуждения синхронных машин для обеспечения их устойчивой и надежной параллельной работы в составе ОЭС.

Для проведения приемо-сдаточных испытаний изготавливаемых систем возбуждения различных видов в полном объеме в соответствии с разделом 6 ДСТУ4265:2003 (ГОСТ21558-2000), а также для отладки ПО АРВ, отработки алгоритмов системы управления и проверки устойчиво-

сти генератора при работе в сети с имитацией внешних возмущающих воздействий в НПООО «Преобразовательная техника» совместно с ЧАО «Завод «Преобразователь» был создан специализированный стенд физической модели энергосистемы «Синхронный генератор – шины бесконечной мощности» («СГ-ШБМ»), представляющий собой синхронный генератор мощностью 300 кВт типа СГ-313 с 2^x канальной системой самовозбуждения тиристорной (со шкафом управления, аналогичным по составу и функциям ШУ системы возбуждения турбогенератора ТГВ-300 блока №1 ДТЭК Ладыжинской ТЭС), устройствами щита возбуждения (тиристорный разрядник, автомат гашения поля, датчики тока и напряжения ротора). В качестве имитатора паровой (или гидро-) турбины используется приводной двигатель постоянного тока, который подключен к тиристорному электроприводу с цифровым управлением КТЭ-500/440-1В.

Реализованный стенд позволяет вычислить следующие количественные показатели качества переходных процессов для исследования статической и динамической устойчивости физической модели энергосистемы «Синхронный генератор – шины бесконечной мощности» («СГ-ШБМ») при различных настройках коэффициентов автоматического регулятора возбуждения (АРВ) и стабилизатора мощности (power system stabilizer – PSS) синхронной машины:

- колебательность n ,
- перерегулирование Δ_{\max} %,
- ошибка регулирования e_{∞} %,
- время регулирования t_c с,
- диапазон изменения напряжения возбуждения V_f о.е. (характеризует качество управления),

при моделировании различных возмущающих воздействий как со стороны системы возбуждения, системы регулирования турбины и энергосистемы, включающих в себя:

- подачу ступенчатого сигнала по входу уставки по напряжению АРВ различной величины и длительности;
- изменение момента на валу турбины;
- моделирование всех возможных видов коротких замыканий в сети различной длительности;
- моделирование несимметричных режимов в сети и другие.

3. Анализ структуры системы регулирования АРВ-2ПИ

НПООО «Преобразовательная техника».

По предоставленному описанию системы автоматического управления возбуждением синхронных машин (САУВ СМ) необходимо отметить следующее:

1. Цифровая система регулирования АРВ-2ПИ содержит регулятор тока возбуждения РТ, регулятор напряжения генератора РН, регулятор реактивной мощности РМ, регулятор $\cos \phi$, которые выбираются в соответствии с алгоритмами работы САУВ СМ.
2. Применение пропорционально-интегрального канала регулирования по отклонению напряжения статора от заданной уставки $\Delta V = V_{ref} - V_t$ позволяет достичь минимальной ошибки регулирования напряжения статора.
3. При возникновении больших возмущений (короткие замыкания) динамическая устойчивость генератора в начале процесса t_0 при резком снижении напряжения статора обеспечивается действием основного канала регулирования по отклонению напряжения статора (коэффициент K_{0V}), действием канала по производной напряжения K_{1V} и релейной форсировкой напряжения, если напряжение снизилось менее чем $0,85 U_{c\text{ ном}}$.
4. По предоставленным протоколам испытаний на физической модели можно сделать вывод, что регулятор АРВ-2ПИ обеспечивает точность поддержания напряжения статора, статическую и динамическую устойчивость СМ при проведенных возмущениях установившегося режима и в целом удовлетворяет требованиям нормативных документов по устойчивости при подаче приведенных возмущений. Кроме того в результате проведенных испытаний также установлено, что АРВ-2ПИ имеет ряд преимуществ, включая минимизацию влияния помех вследствие ограниченного количества применяемых входных сигналов как к изменению параметров СМ так и энергосистемы.

Начальник электрического цеха
Ташлыкской ГАЭС (ТГАЭС), к.т.н.



О. Н. Агамалов