

Применение электромагнитного тормоза для улучшения динамической устойчивости ЭЭС на примере Конаковской ГРЭС

О.Н. Кузнецов, канд. техн. наук, Н.А. Антипова, асп.

Дан обзор существующих методов и средств по улучшению динамической устойчивости ЭЭС. Предложено применение электромагнитного тормоза в качестве средства улучшения динамической устойчивости ЭЭС, а также его конструктивное исполнение. Рассмотрено применение электромагнитного тормоза для обеспечения динамической устойчивости генераторов Конаковской ГРЭС, определены технические требования к его параметрам.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, переходные процессы, динамическая устойчивость, электромагнитный тормоз, короткое замыкание.

Electromagnetic Brake Application for EPS Transient Stability on Konakovskaya State District Power Station

O.N. Kuznetsov, Candidate of Engineering, N.A. Antipova, Post Graduate Student

The authors describe the existing methods and tools for improving EPS transient stability. The electromagnetic brake (EMB) application as an instrument for transient stability improvement is suggested. The EMB design is proposed. The authors consider the EMT application for the transient stabilization of generators at Konakovskaya State District Power Station. The technical requirements to EMB parameters are defined.

Key words: electrical power system, transients, transient stability, electromagnetic brake, short circuit.

Введение. Обеспечение динамической устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) на сегодняшний день продолжает оставаться одной из наиболее важных задач, решаемых на высших иерархических уровнях управления системой. Динамическая устойчивость является ограничивающим критерием при выборе максимально-допустимых перетоков в ряде контролируемых сечений ЕЭС России. Проблемы динамической устойчивости не позволяют обеспечить полную выдачу мощности крупных электростанций, которые соединены с основной сетью энергосистемы малым количеством связей.

Таким образом, проблема обеспечения динамической устойчивости остается актуальной.

Способы улучшения динамической устойчивости. Основные на сегодняшний день способы, позволяющие улучшить динамическую устойчивость:

1. Использование систем автоматического регулирования генераторов:

- форсировка возбуждения в составе автоматического регулятора возбуждения генератора [1] (позволяет увеличить напряжение на зажимах синхронного генератора за счет увеличения напряжения на обмотке возбуждения генератора, тем самым увеличивая электромагнитную мощность генерирующего агрегата);

- автоматический регулятор скорости вращения ротора генератора (регулирует мощность турбины, стремясь восстановить баланс ускоряющего и тормозящего моментов на валу генерирующего агрегата).

2. Сетевое строительство.

Строительство дополнительной цепи линий электропередачи позволяет увеличить пропускную способность сети.

3. Сооружение вставок и передач постоянного тока.

При появлении небаланса мощности в системе позволяет быстро (благодаря тиристорному управлению) его ликвидировать за счет передачи мощности из других энергосистем (либо из другой части системы).

4. Установка противоаварийной автоматики:

- автоматическое повторное включение (АПВ) поврежденных линий электропередачи;

- импульсная разгрузка турбин (ИРТ) генерирующих агрегатов (для турбогенераторов) (позволяет кратковременно уменьшить мощность турбины генерирующего агрегата путем перекрытия клапана паропровода от парогенератора к турбине);

- отключение генераторов (отключение части генераторов электростанции при коротком замыкании, необходимое для обеспечения динамической устойчивости оставшихся в работе генераторов);

- автоматическая частотная разгрузка (позволяет при появлении небаланса в системе отключить часть нагрузки, тем самым ликвидируя небаланс активной мощности);

- автоматика ликвидации асинхронного режима при появлении асинхронного хода (производит деление энергосистемы на несинхронно работающие части, тем самым позволяет сохранить динамическую устойчивость отдельных частей системы).

5. Применение динамического торможения генератора:

- заземление нейтрали трансформаторов через активное сопротивление (влияет на аварийную характеристику мощности, улучшает ус-

тойчивость при однофазных и двухфазных замыканиях на землю [2]);

- электрическое торможение – включение активного сопротивления последовательно с каким-либо звеном электропередачи или параллельно ему (наиболее эффективно улучшает устойчивость при симметричных коротких замыканиях включение активных сопротивлений параллельно генераторам или трансформаторам передающей станции [2]).

Следует отметить, что практически все вышеперечисленные средства, улучшающие динамическую устойчивость, влияют на генератор опосредованно – изменяют либо параметры режима (напряжение на шинах генератора, мощность системы), либо проводимость прилегающей сети.

При этом наиболее эффективными в плане влияния на динамическую устойчивость являются устройства, напрямую воздействующие на крутящие моменты на валу генерирующего агрегата. В настоящее время для улучшения динамической устойчивости довольно успешно применяются устройства ИРТ, которые непосредственно воздействуют на вращающий момент турбины генерирующего агрегата.

Следует отметить, что у устройства ИРТ существует ряд недостатков:

- 1) *инерционность действия ИРТ*, которая определяется как многозвенностью системы регулирования, так и инерционностью паровых объемов турбины. Запаздывание начала уменьшения мощности турбины составляет 0,2 с. Такой порядок запаздывания зачастую не позволяет генераторам сохранить динамическую устойчивость при длительных коротких замыканиях в сети, электрически близких к генерирующему оборудованию [3];

- 2) *принцип действия ИРТ*, основанный на кратковременном перекрытии клапана паропровода от парогенератора к турбине, может привести к сильному износу и даже механическому повреждению конструктивных частей генерирующего агрегата.

Таким образом, встает вопрос о поиске альтернативных средств, улучшающих динамическую устойчивость электроэнергетических систем.

Ниже рассматривается устройство, основанное на принципе электромагнитного торможения, – электромагнитный тормоз (ЭМТ). Данное устройство во время аварийной ситуации (короткого замыкания) подает тормозящий момент непосредственно на вал генератора, тем самым компенсирует небаланс мощностей, возникающий на валу машины при возмущении, и, как следствие, существенно улучшает динамическую устойчивость генерирующего агрегата.

Принцип работы и возможные конструкции ЭМТ. Принцип работы ЭМТ основан

на эффекте магнитной индукции – создании вихревых токов во вращающемся проводящем металлическом диске, охваченном полем электромагнита. Создание вихревых токов способствует трансформации кинетической энергии вращающегося диска в тепловую энергию, тем самым создается тормозящий момент.

В настоящее время устройства ЭМТ, которые также называются индукционными тормозами, применяются в промышленности.

Индукционные тормоза получили наибольшее распространение в грузоподъемном оборудовании, где они обеспечивают плавный спуск грузов с необходимой скоростью, регулируемой изменением тока возбуждения электромагнитов.

Тормоза скольжения используются также в качестве динамометров и нагрузочных устройств при испытаниях двигателей и различных установок, где они обеспечивают создание регулируемого нагрузочного момента и его измерение.

Кроме того, устройства ЭМТ используются в качестве ретардеров грузового автотранспорта. Ретардер – устройство, дополняющее рабочую тормозную систему грузовика, седельного тягача или туристического автобуса (рис. 1). Непосредственной задачей ретардера является помощь рабочим тормозам на продолжительных спусках, серпантинах, горных дорогах.

В электроэнергетике ЭМТ в настоящее время не нашел своего применения.

Однако возможность управления тормозным моментом на валу генератора посредством дополнительного устройства – электромагнитного тормоза – является весьма заманчивой.



Рис. 1. Электромагнитный ретардер фирмы Telma в разрезе

При условии получения малой величины постоянной времени ЭМТ представляется возможным обеспечить динамическую устойчивость генераторов электростанций при самых тяжелых нормативных аварийных возмущениях, согласно «Методическим указаниям по устойчивости энергосистем» [4].

Поскольку ЭМТ предполагается устанавливать на валу генерирующего агрегата – между турбиной и генератором, – то имеют значение его размеры и вес.

Предлагаемая конструкция ЭМТ подобна конструкции электромагнитного ретардера фирмы Telma (рис. 1). Она включает в себя два металлических диска (рис. 2, позиция 1), в пространстве между которыми закрепляются катушки индуктивности цилиндрической формы, охваченные обмоткой возбуждения (рис. 2, позиция 2).

Для ЭМТ подобной конструкции мощностью 50 МВт, согласно приближенным расчетам, имеем следующие характеристики:

- размеры: диаметр стальных дисков – 1,4 м, толщина каждого диска – 2 см; суммарная масса – около 500 кг;
- величина постоянной времени обмотки возбуждения электромагнита – около 50 мс.

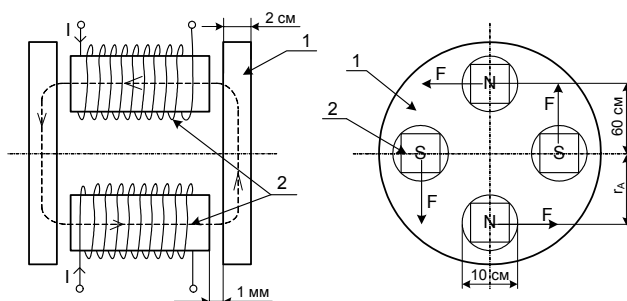


Рис. 2. Предлагаемая конструкция ЭМТ: 1 – стальной диск; 2 – электромагниты

Исследование применения ЭМТ для обеспечения динамической устойчивости генераторов Конаковской ГРЭС. В качестве объекта исследования рассматривается Конаковская ГРЭС, расположенная в Тверской области. Данная станция оснащена восемью блоками суммарной установленной мощностью 2460 МВт, выдает свою мощность в сеть 220 кВ (блоки №1–4), 500 кВ (блоки №5–8), а также 330 и 750 кВ. На станции установлены следующие генерирующие агрегаты: блоки №4–8 – ТВВ-320-2УЗ (номинальная активная мощность 300 МВт), блоки №1–3 – генераторы ТВВ-350-2УЗ (номинальная активная мощность 320 МВт). Исследуется динамическая устойчивость системы без применения ЭМТ и с его применением. Исходя из результатов расчетов, определяются технические требования к параметрам ЭМТ.

Расчеты переходных процессов для исследования динамической устойчивости станции проводятся в программном комплексе Eurostag, который в настоящее время широко применяется в ОАО «СО ЕЭС» для исследования динамической устойчивости ОЭС (объединенных энергетических систем) и ЕЭС (единой энергетической системы) в целом. Этот программный комплекс позволяет создавать пользовательские модели различных систем регулирования.

При моделировании переходных процессов турбогенераторы Конаковской ГРЭС, а также

ближайших станций представлены полной математической моделью, учитывающей систему возбуждения и действие их АРВ, генераторы удаленных станций представлены упрощенными моделями.

Исследования динамической устойчивости станции выполнялись в соответствии с «Методическими указаниями по устойчивости энергосистем» [4].

Анализ результатов расчетов динамической устойчивости показал, что при нормативном аварийном возмущении (отключение ВЛ 220 кВ, отходящих от Конаковской ГРЭС, действием УРОВ при трехфазном КЗ с отказом одного выключателя, в нормальной схеме) динамическая устойчивость блоков №1–4 нарушается.

График изменения угла ротора генераторов №1–4 представлен на рис. 3, график изменения напряжения в месте короткого замыкания – на рис. 4.

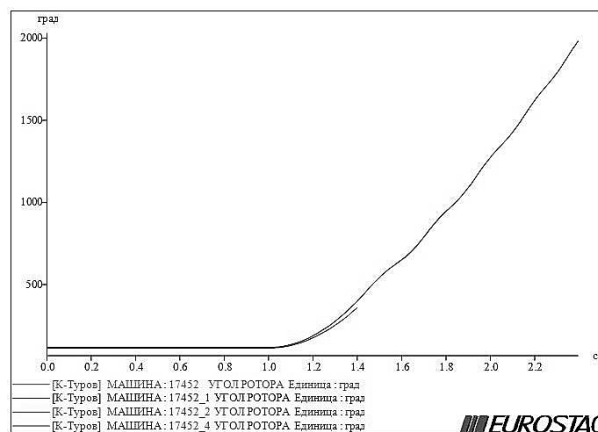


Рис. 3. График изменения угла ротора генераторов ВЛ 220 кВ Конаковская ГРЭС – Радищево 1 цепь действием УРОВ при трехфазном КЗ с отказом одного выключателя (углы генераторов в ОРУ 220 кВ)

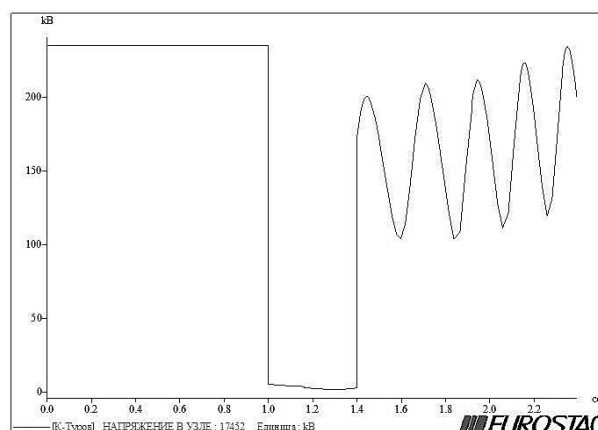


Рис. 4. График изменения напряжения в месте КЗ ВЛ 220 кВ Конаковская ГРЭС – Радищево 1 цепь действием УРОВ при трехфазном КЗ с отказом одного выключателя (напряжение ОРУ 220 кВ)

Было определено предельное время отключения трехфазного короткого замыкания, при котором динамическая устойчивость гене-

раторов Конаковской ГРЭС сохраняется. Предельное время отключения КЗ для исследуемой системы – 0,19 с, в то время как время отключения КЗ с учетом действия УРОВ в расчетах принималось равным 0,4 с.

Для сохранения динамической устойчивости станции рассмотрены различные мероприятия.

Применение установленной в настоящее время на генераторах Конаковской ГРЭС автоматики, действующей на ИРТ, не позволяет сохранить динамическую устойчивость станции в силу ее недостаточного быстродействия.

Кроме того, рассмотрено применение отключения генераторов (трех из четырех блоков, работающих на шины 220 кВ) для сохранения динамической устойчивости. Следует отметить, что данное мероприятие также оказалось неэффективным в силу недостаточного быстродействия.

В качестве мероприятия для улучшения динамической устойчивости генератора было рассмотрено применение устройства ЭМТ.

Для нахождения оптимальных параметров ЭМТ была проведена серия расчетов электро-механических переходных процессов с учетом установки ЭМТ на генераторах №1-4 Конаковской ГРЭС при варьировании постоянной времени обмотки возбуждения ЭМТ и мощности ЭМТ.

При расчетах моделировался следующий порядок действия ЭМТ. В начальный момент КЗ – при снижении напряжения на шинах станции – подавался управляющий импульс на систему возбуждения электромагнита. На обмотку возбуждения электромагнита подавалось напряжение, ток в обмотке возбуждения возрастал, и, как следствие, возрастал тормозящий момент ЭМТ. Снятие напряжения с обмотки возбуждения электромагнита происходило также после подачи управляющего импульса по факту уменьшения угла ротора генератора или через 1 с после начала действия ЭМТ, если уменьшения угла ротора не происходило. При этом действие ЭМТ учитывалось в изменении ускоряющего момента – момента турбины генерирующего агрегата.

Найденные параметры ЭМТ, необходимые для сохранения динамической устойчивости Конаковской ГРЭС при возмущении – трехфазном КЗ на ВЛ 220 кВ, отключаемом действием УРОВ:

- мощность – 60% от номинальной мощности генератора, или 180 МВт;
- постоянная времени – 400 мс или 0,4 с.

Графики зависимостей различных параметров переходного процесса от времени с учетом применения ЭМТ представлены на рис. 5, 6.

Рассмотрим график изменения момента турбины, представленный на рис. 5. В изменении момента турбины, как уже было отмечено выше, было учтено изменение тормозящего момента ЭМТ. Тормозящий момент ЭМТ начинал возрастать по экспоненциальному закону с мо-

мента начала КЗ. Примерно через 0,4 с величина тормозящего момента достигала 60 % от номинального момента генерирующего агрегата. Затем тормозящий момент начинал уменьшаться также по экспоненциальному закону.

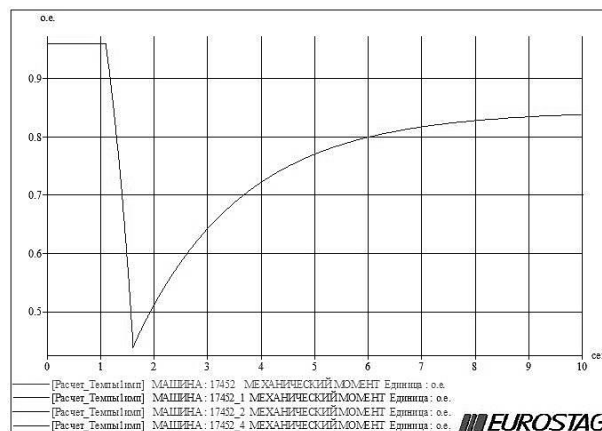


Рис. 5. График изменения момента турбины ВЛ 220 кВ Конаковская ГРЭС – Радищево 1 цепь действием УРОВ при трехфазном КЗ с отказом одного выключателя с учетом применения ЭМТ (момент турбины генераторов №1–4)

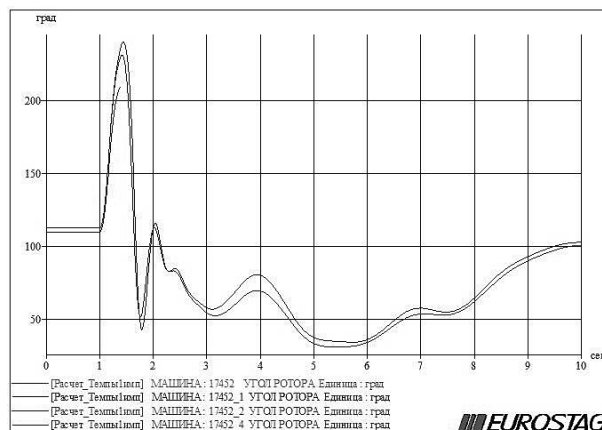


Рис. 6. График изменения угла ротора ВЛ 220 кВ Конаковская ГРЭС – Радищево 1 цепь действием УРОВ при трехфазном КЗ с отказом одного выключателя с учетом применения ЭМТ (углы генераторов в ОРУ 220 кВ)

В качестве альтернативы применению ЭМТ рассмотрено применение превентивной разгрузки генераторов №1-4 Конаковской ГРЭС. Разгрузка генераторов №1-4 до величины 65 % номинальной мощности (суммарная мощность блоков 220 кВ при этом составит 800 МВт) позволяет избежать нарушения динамической устойчивости станции. Однако данное мероприятие влечет огромные убытки для генерирующих компаний, в чьей собственности находится генерирующее оборудование, поэтому может быть применено лишь в качестве крайней меры.

Таким образом, применение ЭМТ на генераторах Конаковской ГРЭС, работающих на шины 220 кВ станции, позволяет сохранить динамическую устойчивость при наиболее тяжелых нормативных возмущениях, согласно «Методи-

ческим указаниям по устойчивости энергосистем» [4].

Заключение

Применение ЭМТ позволяет улучшить динамическую устойчивость ЭЭС. На основании проведенных исследований и расчетов сформулированы требования к ЭМТ, которые необходимы для обеспечения динамической устойчивости данной системы при трехфазном коротком замыкании, отключаемом действием УРОВ.

Показано, что другие средства противоаварийного управления в случае данного возмущения оказываются неэффективными ввиду

их недостаточного быстродействия. Альтернативой применению ЭМТ может стать превентивная разгрузка генераторов.

Список литературы

1. **Веников В.А.** Электрические системы. Управление переходными режимами электроэнергетических систем: учебник. – М.: Высш. шк., 1982.
2. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – 4-е изд., переаб и доп. – М.: Высш. шк., 1985.
3. **Коцеев Л.А.** Автоматическое противоаварийное управление в электроэнергетических системах. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
4. **Методические** указания по устойчивости энергосистем; утв. приказом Минэнерго № 277 от 30.06.2003 г.

Антипова Нина Алексеевна,
Московский энергетический институт (технический университет); филиал ОАО «НИИПТ» – «Технологии автоматического управления»,
аспирант; начальник сектора расчета и анализа перспективных электрических режимов,
телефон (499) 788-15-76,
e-mail: antipova-na@so-ups.ru; antinina@yandex.ru

Кузнецов Олег Николаевич,
Московский энергетический институт (технический университет),
кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, директор института электроэнергетики,
e-mail: KuznetsovON@mpei.ru