

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Зеленохат Н.И., докт. техн. наук, МЭИ (ТУ)

В настоящее время особое внимание уделяется реформированию ЕЭС России с ориентацией на решение проблемы ее синхронной работы с энергосистемами других стран. Все более значимыми становятся решения по повышению эффективности и надежности функционирования энергообъединения в аварийных режимах, возникающих после резких возмущений при коротких замыканиях и коммутационных переключениях электрической части системы. Одним из таких решений является применение электрического торможения синхронных генераторов на электростанциях. Эффективность такого решения и возможные пути его реализации рассматриваются в данной работе.

Общая характеристика управляемого воздействия в виде электрического торможения

Возникающие при резких возмущениях в электроэнергетической системе (ЭЭС) переходные процессы могут сопровождаться выпадением генераторов из синхронизма, возникновением асинхронного хода, а также, хотя и в крайне редких случаях, каскадным развитием аварии с тяжелыми последствиями как для самой ЭЭС, так и для электропотребителей. В связи с этим наряду с совершенствованием и улучшением качества работы основных средств автоматического регулирования и управления становится необходимым применение дополнительных управляющих устройств целенаправленного воздействия на переходные процессы в ЭЭС.

Одним из таких средств является электрическое торможение (ЭТ) синхронных генераторов [1], под которым понимается целенаправленное подключение нагрузочных (тормозных) сопротивлений либо изменение параметров схемы системы, например, сопротивлений некоторых заранее выбранных элементов схемы, влияющих на изменение нагрузки генераторов.

Изменение указанных сопротивлений может осуществляться с помощью управляющих устройств в функции времени t в соответствии с каким-либо принятым алгоритмом $z = f(t)$ непрерывно (автоматическое регулирование) либо скачкообразно от наименьшего z_{\min} до наибольшего значений z_{\max} (релейное или дискретное

управление). К устройствам с автоматическим регулированием могут быть отнесены источники реактивной мощности, известные под названием ИРМ [2], управляемые реакторы [3] и др.

Эффективность электрического торможения прежде всего зависит от алгоритмов управления. Как и в любых других устройствах управления, согласно теории оптимального управления, в устройствах ЭТ должен быть заложен принцип обратных связей, который выражается в учете информации о поведении управляемого генератора А и приемной части В энергосистемы. Необходимо косвенно либо непосредственно контролировать величину угла сдвига ротора генератора А относительно ротора «эквивалентного» генератора приемной части системы В, то есть обобщенного угла δ_{AB} , и реагировать на его изменения. Стало быть, в алгоритмы управляющих устройств ЭТ целесообразно включать непосредственно либо косвенно определяемый обобщенный угол δ_{AB} и его производные.

Проведенные исследования показывают, что использование в алгоритмах управления угла сдвига δ_{AB} и его производных как в условиях простейшей, так и сложной системы, позволяет с помощью ЭТ обеспечивать сохранение динамической устойчивости ЭЭС и достаточно высокое качество послеаварийного переходного процесса. Однако реализация алгоритмов управления ЭТ, использующих обобщенные параметры, встречает определенные трудности, связанные с передачей измеряемых значений параметров режима на большие расстояния с относительно высоким быстродействием. Именно это обстоятельство послужило причиной того, что в алгоритмах устройств управления ЭТ, а также АРВ сильного действия и быстродействующего регулирования турбин используются только местные параметры режима, заменяемые непосредственно на электростанции. Действительно, в зависимости от структуры и режима конкретной энергосистемы во многих случаях удастся подобрать те или иные приемлемые алгоритмы управления средствами воздействия на ЭЭС с использованием лишь стационарных параметров режима. Однако найденные алгоритмы не всегда обеспечивают устойчивую работу системы.

В ряде случаев может оказаться, что вообще не удастся подобрать алгоритмы управления по местным параметрам режима. Это вовсе не означает, что применение соответствующего средства воздействия на энергосистему не эффективно. Это говорит лишь о том, что алгоритмы управления следует формировать с ориентацией на использование и системных (обобщенных) параметров режима. В силу этого обстоятельства при сравнительной оценке эффективности применения различных средств управления воздействиями на энергосистему следует исходить из учета их полных возможностей, то есть когда в алгоритмах управления используются и обобщенные параметры режима, а сами алгоритмы управления должны быть оптимальными.

Из теории оптимального управления [3] известно, что для достижения оптимального переходного процесса под действием управляющих воздействий, ограниченных по модулю, необходимо иметь релейное управление. Следовательно, непрерывное или плавное регулирование, если рассматривать его с точки зрения сохранения динамической устойчивости ЭЭС в первом цикле качаний роторов, но не эффективного демпфирования этих качаний, не имеет существенных преимуществ перед релейным управлением. Поэтому устройства ЭТ по возможности сразу в момент возникновения короткого замыкания (КЗ) должны мгновенно включаться в работу, оказывая предельно возможное положительное воздействие на ротор генератора А.

Следовательно, исследование эффективности управления ЭТ в целях улучшения динамической устойчивости системы можно выполнять с ориентацией на то, что тормозные сопротивления подключаются с помощью быстродействующего выключателя с предельно малым временем запаздывания.

Рассмотрим возможные варианты выполнения устройств электрического торможения. В зависимости от способа подключения тормозных сопротивлений к схеме ЭЭС устройства ЭТ можно отнести к трем видам: поперечное, продольное и продольно-поперечное.

Поперечное электрическое торможение

В тех случаях, когда ЭТ осуществляется посредством параллельного подключения к электрической схеме системы тормозного сопротивления Z_T , в общем случае комплексного, представляющего собой параллельно (рис. 1) либо последовательно включенное активное R_T и емкостное X_T сопротивления, ЭТ можно назвать поперечным (ПЭТ).

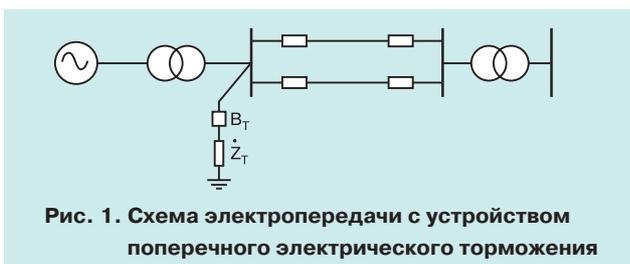


Рис. 1. Схема электропередачи с устройством поперечного электрического торможения

При наиболее опасном трехфазном КЗ на шинах электростанции, имеющей устройство ПЭТ, эффективность

последнего проявляется лишь в послеаварийном режиме после отключения поврежденного участка с КЗ, так как напряжение на Z_T при КЗ близко к нулю. При менее опасных возмущениях действие ПЭТ проявляется уже в аварийном режиме. Поэтому, если выбрать мощность устройства ПЭТ, исходя из условия сохранения динамической устойчивости в первом цикле качаний ротора, вызванного наиболее опасным возмущением, то с полным основанием можно считать, что и при менее опасных возмущениях с помощью ПЭТ сохранение устойчивости ЭЭС обеспечивается. В силу этого при составлении различных вариантов в качестве расчетного следует рассматривать наиболее опасное возмущение в системе, а именно трехфазное на шинах удаленной электростанции А.

Как показывают проведенные исследования, алгоритм релейного управления ПЭТ должен предусматривать отключение тормозного сопротивления не ранее выполнения условия $\Delta\omega_{AB} = d\delta_{AB}/dt = 0$, то есть после того, как будет установлен факт прекращения роста угла сдвига δ_{AB} между передающей и приемной частями системы.

Выполненные расчеты показывают [4], что можно выбрать отвечающие релейному управлению ПЭТ тормозные сопротивления R_T и X_T , включением которых обеспечивается сохранение динамической устойчивости генераторов даже с ухудшенными параметрами генераторов удаленной электростанции.

В качестве быстродействующих выключателей для осуществления ПЭТ могут быть применены элегазовые или вакуумные выключатели. Так, на Зейской ГЭС находит применение поперечное ЭТ, осуществляемое подключением на генераторное напряжение активных тормозных сопротивлений (резисторов) через элегазовые выключатели [5]. Однако использование пневматического привода снижает эффективность применения ЭТ для многократного воздействия в целях демпфирования больших качаний роторов генераторов в переходном процессе. Проведенные исследования ВНИИЭ, МЭИ, СибНИИЭ и другими организациями показывают, что для демпфирования качаний роторов генераторов целесообразно применение многократного ЭТ. Поэтому для строящейся Бурейской ГЭС для осуществления многократного ЭТ предусматривается применение тиристорных выключателей, хотя пока такие выключатели отечественной промышленностью не производятся.

В качестве тормозных сопротивлений можно использовать нихромовые ленты, что имело место при осуществлении ПЭТ на Братской ГЭС. Более перспективными, как показывают исследования и опыт применения ЭТ на Зейской ГЭС, являются токопроводящие электротехнические бетоны («бетелы») либо новый композитный материал «эком».

Применение ПЭТ оказывает существенное влияние на предел динамической устойчивости, а также на успешную ресинхронизацию и сохранение результирующей устойчивости системы. Поэтому на сооружаемой Бурейской ГЭС предусматривается применение ПЭТ с использованием тиристорных выключателей.

Интерес представляет применение ПЭТ также на ГЭС Чиф Джозеф в США. Активное тормозное сопротивление

выполнено с использованием троса из нержавеющей стали. Тормозное сопротивление подключается к сети с помощью быстродействующего вакуумного выключателя 230 кВ. Это обеспечивает высокое быстродействие при выполнении коммутационных операций при управлении электрическим торможением.

Однако не только быстродействие выключателей, но и в не меньшей мере алгоритмы управления определяют эффективность применения поперечного ЭТ. Как уже отмечалось, наибольшую сложность представляет задача определения момента отключения тормозного сопротивления, особенно если от удаленной электростанции с ПЭТ отходит несколько линий электропередачи в разных направлениях [6].

Поэтому и в настоящее время продолжается поиск эффективных способов осуществления ЭТ генераторов в ЭЭС. Остановимся на рассмотрении одного из таких способов.

Продольное электрическое торможение

Тормозные сопротивления можно включать последовательно в цепь статора генератора на время КЗ в ЭЭС [1]. В этом случае ЭТ называется продольным электрическим торможением (ПрЭТ).

Длительность аварийного режима изменяется десятками долями секунды, поэтому от коммутационной аппаратуры в цепи с сопротивлением R требуется сверхвысокое быстродействие. Отсутствие мощных быстродействующих выключателей послужило основанием для разработки схемы, представленной на рис. 2 [6,7].

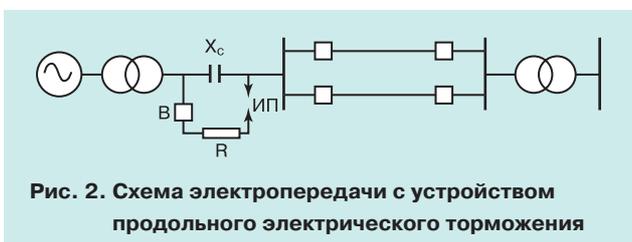


Рис. 2. Схема электропередачи с устройством продольного электрического торможения

Последовательно в цепь статора включена батарея статических конденсаторов (БСК), в аварийном режиме шунтируемая цепью с сопротивлением R через искровые промежутки ИП, которые пробиваются вследствие появления перенапряжения на БСК при протекании через нее тока КЗ. Нормально включенный в цепь с сопротивлением R выключатель отключается одновременно с отключением выключателей поврежденных линий от действия релейной защиты. Тем самым с помощью простых средств обеспечивается включение сопротивления R в цепь статора на время КЗ. В течение этого времени происходит работа генератора на активное тормозное сопротивление R , вследствие чего максимальный угол сдвига ротора в первом цикле его качаний не превышает критического значения, если соответствующим образом выбраны величины сопротивлений R и X_c . В этом случае обеспечивается сохранение динамической устойчивости ЭЭС.

Выполненные расчеты применительно к простейшей схеме системы показывают, что при помощи ПрЭТ можно

обеспечить сохранение динамической устойчивости генераторов, характеризующихся малыми значениями постоянной инерции (капсульных генераторов) [7].

ПрЭТ является однократным, причем не требуется телепередача параметров режима из ЭЭС. Затраты на устройство ПрЭТ определяются затратами, в основном, на выключатель в цепи с сопротивлением R_T , на само сопротивление, а также затратами на искровые промежутки и БСК. Область применения ПрЭТ — на электростанциях с ухудшенными параметрами агрегатов (капсульные генераторы), на электростанциях, работающих через дальние ЛЭП.

При определении мест применения ПрЭТ основной задачей является выбор величин сопротивлений БСК и R_T . Эта задача может быть успешно решена с использованием разработанных методик, в частности, описанных в [6,7].

Для демпфирования качаний роторов генераторов в послеаварийном режиме целесообразно применение специальных средств, например, АРВ сильного действия, а также многократного электрического торможения [4].

Продольно-поперечное электрическое торможение

Такой вид ЭТ представляет собой комбинацию двух выше рассмотренных: продольного и поперечного (сокращенно обозначается ПрПЭТ). Схема электропередачи с устройством ПрПЭТ представлена на рис. 3. Применение ПрПЭТ дает наибольшую эффективность, поскольку торможение ротора генератора в аварийном и начале послеаварийного режимах осуществляется с наибольшей интенсивностью.

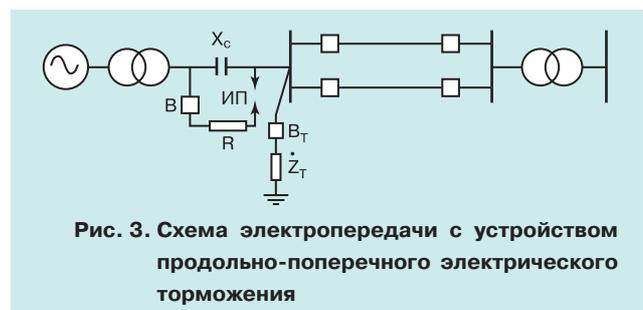


Рис. 3. Схема электропередачи с устройством продольно-поперечного электрического торможения

В момент возникновения КЗ вблизи рассматриваемой электростанции, удаленной от приемной части ЭЭС, при срабатывании искровых промежутков или разрядников параллельно с БСК в цепь статора включается активное тормозное сопротивление R , через которое проходит часть тока КЗ. Рассеиваемая сопротивлением R часть избыточной кинетической энергии ротора, накапливаемой им в течение КЗ, отражается на уменьшении величины угла выбега и скорости относительного движения ротора к моменту времени отключения КЗ ($t_{кз}$).

В начальной стадии послеаварийного переходного режима ($t \geq t_{кз}$) происходит разрыв цепи с сопротивлением R из-за деионизации ИП или отключения выключателя B_R и включается выключатель B_T , то есть вступает в работу ПЭТ.

Подключаемое параллельно к статорной цепи тормозное сопротивление R_T через выключатель B_T способствует увеличению отбора мощности с вала ротора генератора и его затормаживанию. Вследствие этого рост угла сдвига ротора δ прекращается при значении δ_{\max} меньше критического $\delta_{кр}$, и тем самым обеспечивается сохранение динамической устойчивости генераторов даже с малой постоянной инерции, составляющей секунду и меньше.

Основную функцию сохранения динамической устойчивости выполняет ПрЭТ. Применение ПЭТ обуславливается в большей мере необходимостью демпфирования качаний ротора и сокращением времени затухания переходного процесса в ЭЭС.

В отдельных случаях для демпфирования качаний роторов генераторов могут применяться и управляемые статические компенсаторы, устанавливаемые на подстанциях для регулирования напряжения в стационарных режимах. Эффективность такого мероприятия исследована в [8].

Таким образом, применение электрического торможения в энергосистемах обеспечивает повышение надежности работы ЭЭС России при резких возмущениях ее режима, что придает ему особую значимость при решении актуальной проблемы объединения ЭЭС Востока и Запада на синхронную работу с единой частотой [9], в силу чего оно может получить более широкое применение на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л.А. Жукова. — М.: Энергия, 1979.
2. Веников В.А., Жуков Л.А. Регулирование режима электрических систем и дальних электропередач и повышение их устойчивости с помощью управляемых статических ИРМ. — Электричество, 1967, № 6.
3. Павлов А.А. Синтез релейных систем оптимальных по быстродействию. — М.: Наука, 1966.
4. Зеленохат Н.И. Определение параметров системы кибернетического управления переходными процессами с помощью электрического торможения. — Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1972, № 2.
5. Воробьев Ю.А., Гробовой А.А., Дудченко Л.Н. Противоаварийная автоматика ОЭС Востока. — Электрические станции, 1998, № 9.
6. Zelenokhat N.I., Ba T. Seidi, Bargouthy K.S., Myagmarsourene D. The synthesis of control algorithms of electrical braking in power systems using energy function approach 12-th Power Systems Computation Conference. Dresden, 1996.
7. Зеленохат Н.И., Негаш Г.А., Куки А.А., Ислам И.М. Анализ эффективности продольного электрического торможения генераторов в энергосистеме. — М., 2000. — Рукопись деп. в ВИНТИ, № 11.
8. Зеленохат Н.И., Баргути Х.С., Ба Т.С., Негаш Г.А. Стабилизация режима энергосистемы с помощью управляемого электрического торможения. — Изв. РАН, 1996, № 6.
9. Проблемы совершенствования регулирования частоты в ЭЭС России в условиях конкурентного рынка и программные задачи по подготовке к синхронной работе энергообъединений Востока и Запада / Под ред. А.Ф. Дьякова, Ф.Л. Когана, Ю.Н. Кучерова, В.В. Нечаева. — М.: СПО ОРГРЭС, 2002.



16-19 ноября 2004

Москва
ВВЦ
павильон № 69

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ РОССИИ

Международная специализированная выставка и семинар

Организаторы: АО "ЭНЕРВЕК-ЭКСПО" при поддержке
ОАО "Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы"

Тематические направления:

- проектирование и строительство объектов электросетевого хозяйства
- совершенствование системы управления Единой национальной электрической сетью России
- повышение технического уровня эксплуатации электрических сетей
- снижение издержек на передачу электроэнергии, в том числе потерь в электрических сетях
- модернизация и техническое перевооружение электросетевого комплекса
- снижение аварийности и повышение надежности передачи электроэнергии