

А.Л. Комков<sup>1</sup>, Е.Н. Попов<sup>1</sup>, Н.Ю. Филимонов<sup>1</sup>; А.А. Юрганов<sup>2</sup>; А.А. Бурмистров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «НПП «Русэлпром-Электромаш» (Санкт-Петербург, Россия).

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия).

<sup>3</sup> ПАО «Силловые машины» (Москва, Россия).

## Особенности алгоритма реализации системных функций в российских автоматических регуляторах возбуждения сильного действия

**Надежность и эффективность работы электроэнергетических систем (ЭЭС) в значительной мере определяется регулированием возбуждения входящих в нее синхронных генераторов и, в первую очередь, подсистем автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), обеспечивающих максимальный уровень динамической устойчивости и эффективное демпфирование колебаний.**

Следует заметить, что проблемой стабилизации режимов ЭЭС и разработкой унифицированного алгоритма системных стабилизаторов начали интенсивно заниматься в СССР в начале 1950-х гг. и окончательно решили ее в 1980-е гг., когда полностью сформировалась идеология внешней и внутренней стабилизации и появился сигнал производной тока возбуждения.

Этот период характеризуется быстрым развитием электроэнергетики страны. В то время были построены каскады крупных гидроэлектростанций (ГЭС), мощные тепловые и атомные станции. По географическим условиям мощные ГЭС строились вдали от крупных населенных пунктов и крупных промышленных предприятий. Возникла необходимость передавать большое количество электроэнергии на значительное расстояние от электростанций к потребителям. Строительство параллельных линий для усиления электрической связи являлось дорогостоящим, поэтому было необходимо найти иные способы решения проблемы. Начала активно развиваться теория устойчивости ЭЭС. В итоге первый в мире системный стабилизатор был разработан и внедрен практически в том виде, в каком он существует сейчас. Советский Союз имел большую территорию и разветвленную ЭЭС, обладавшую большим

числом как слабых, так и сильных электрических связей между отдельными регионами.

На Западе начальный импульс к разработке системных стабилизаторов был дан в 1970-х гг. в Канаде из-за возникшей необходимости передавать мощность 500 МВт от АЭС «Пикеринг» и ГЭС в штате Онтарио по линиям электропередач протяженностью примерно 700 км и напряжением 500 кВ потребителям в США. Без быстродействующих систем возбуждения, оснащенных системными стабилизаторами, понадобились бы дополнительные линии. В Западной Европе эта проблема возникла еще позже – при вводе в эксплуатацию турбинных блоков мощностью более 300 МВт. В настоящий момент на Западе разработано около 10 типов системных стабилизаторов, описание которых приведено в стандарте IEEE Std 421.5.

С учетом того, что отечественный стабилизатор успешно зарекомендовал себя в различных схемно-режимных ситуациях, было предложено рассмотреть вопрос о его включении в международные стандарты под названием PSS2RU. Для этого потребовалось предоставить его полное описание и привести результаты расчетов, чтобы оценить его эффективность по сравнению со стабилизаторами, включенными в стандарт IEEE Std 421.5.

### ОПИСАНИЕ СИСТЕМНОГО СТАБИЛИЗАТОРА PSS2RU

Задача любого системного стабилизатора – демпфирование электромагнитических колебаний. Данные колебания, обусловленные качаниями роторов синхронных генераторов друг относительно друга, лежат в диапазоне частот 0,1–5,0 Гц. Полный взаимный угол между двумя машинами в любой схемно-режимной ситуации может быть разложен на внутренний и внешний углы: внутренний – угол между поперечной осью машины, совпадающей с вектором синхронной электродинамической силы (ЭДС)  $E_g$  и вектором напряжения генератора  $U_g$ ; внешний – угол между вектором напряжения генератора  $U_g$  и вектором синхронной ЭДС другой машины или центром электрических качаний синхронной машины (электростанции), работающей в сложной энергосистеме. Внутренний угол образуется в результате падения напряжения на внутреннем продольном индуктивном сопротивлении машины ( $X_d$ ). Внешний угол образуется в результате падения напряжения на сопротивлениях, внешних по отношению к рассматриваемому генератору элементов ЭЭС.

Качания полного угла являются результатом совместного движения роторов и имеют двойственную природу:

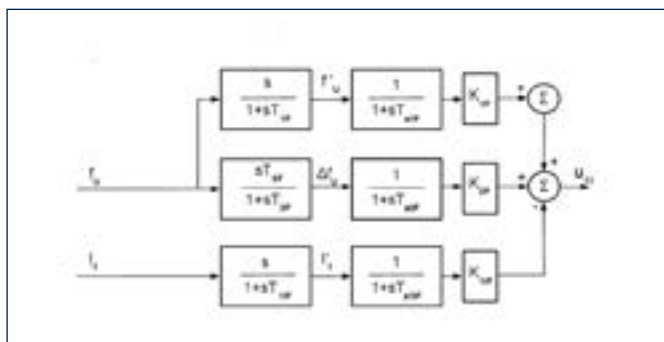


Рис. 1. Блок-схема стабилизатора PSS2RU

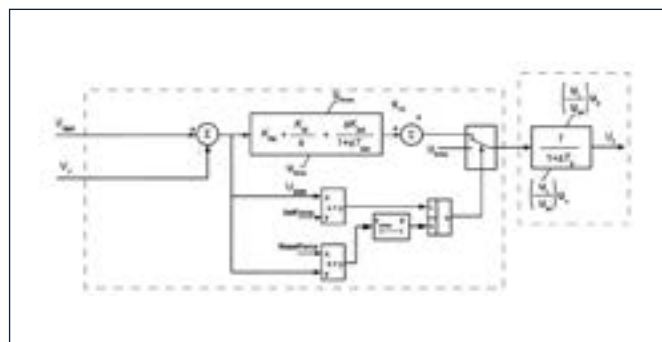


Рис. 2. Логика работы реле форсировки

- в режимах выдачи реактивной мощности устойчивость определяется величиной и качаниями внешнего угла, который в тяжелых послеаварийных режимах или в слабых ЭЭС может приближаться к  $90^\circ$  эл.;

- в режимах потребления реактивной мощности устойчивость определяется величиной и качаниями внутреннего угла, который при уменьшении тока возбуждения генератора, работающего в ЭЭС любой мощности, может приближаться к  $90^\circ$  эл.

Таким образом, при одинаковых больших значениях полного угла физика переходных процессов и условия обеспечения аperiodической и колебательной статической устойчивости существенно отличаются. Стабилизация режима, предлагаемая западными стандартами, не учитывает этого явления.

В результате аналитических и экспериментальных исследований и опыта эксплуатации синхронных генераторов выяснилось, что отклонениям внутреннего угла пропорциональна производная тока ротора. Отклонение частоты напряжения генератора  $\Delta f_U$  от установившегося значения и первая производная  $\Delta f'_U = f'_U$  генератора являются первой и второй производными внешнего угла, соответственно. Таким образом, имеются два легко измеряемых параметра, каждый из которых способен осуществлять демпфирование соответствующей компоненты взаимного угла. Следовательно, входными параметрами рассматриваемого стабилизатора являются ток ротора ( $I_r$ ) и частота напряжения генератора ( $f_U$ ). Блок-схема системного стабилизатора PSS2RU показана на рис. 1. Стабилизатор состоит из двух каналов, соеди-

Типовые значения параметров стабилизатора PSS2RU

Параметр	Значение, с
$T_{0F}$	2,00
$T_{\sigma 0F}$	0,02
$T_{1F}$	0,05
$T_{\sigma 1F}$	0,15
$T_{1IF}$	0,02
$T_{\sigma 1IF}$	0,15

ненных параллельно. Выходные сигналы каждого канала суммируются на главном сумматоре. Просуммированный сигнал является выходным сигналом стабилизатора. Передаточные функции задают необходимую форму амплитудочастотной и фазочастотной характеристик каждого канала. Два канала перекрывают диапазон частот электро-механических колебаний. Канал по частоте настраивается на частотный диапазон 0,3–1,2 Гц, канал по производной тока ротора – на частотный диапазон 1–3 Гц. Типовые значения постоянных времени приведены в таблице. Сравнительные испытания, проведенные НТЦ Единой энергетической системы, показали его высокую эффективность.

### РЕЛЕЙНАЯ ФОРСИРОВКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Совместно со стабилизатором PSS2RU применяется быстродействующая форсировка возбуждения. Ее функцией является повышение динамической устойчивости при серьезных повреждениях в энергосистеме, обусловленных снижением напряжения. Логика форсировки возбуждения представлена на рис. 2. При снижении напряжения ниже уставки срабатывания контроллер иници-

рует быстрое увеличение напряжения возбуждения до максимального значения до тех пор, пока напряжение статора генератора не повысится до уставки на снятие форсировки ( $0,8 \div 0,9$ )  $U_{\text{ном}}$ . Включение форсировки происходит с минимальной выдержкой времени, а отключение – с выдержкой 0,2–0,3 с, что соответствует времени достижения максимального значения взаимного угла между роторами синхронных машин в послеаварийном режиме качаний. Форсировка также необходима, чтобы исключить на время протекания короткого замыкания (КЗ) тракт регулирования из закона управления, так как резкие скачки токов, напряжений и частоты могут привести к снижению скорости нарастания напряжения возбуждения из-за противоположных воздействий от разных каналов регулирования.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Эффективность системного стабилизатора была проверена на математической модели 4-машинной энергосистемы (схема Кундура), часто рассматриваемой в работах западных исследователей, в среде MATLAB/Simulink Sim Power Systems. Схема изображена на рис. 3. Модель представляет собой две области, каждая из которых содержит по два синхронных генератора. Области соединены двумя линиями длиной 220 км. Режим установлен таким образом, что осуществляется передача 413 МВт из первой области во вторую.

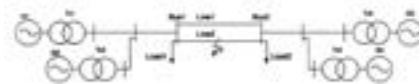


Рис. 3. Четырехмашинная тестовая схема ЭЭС

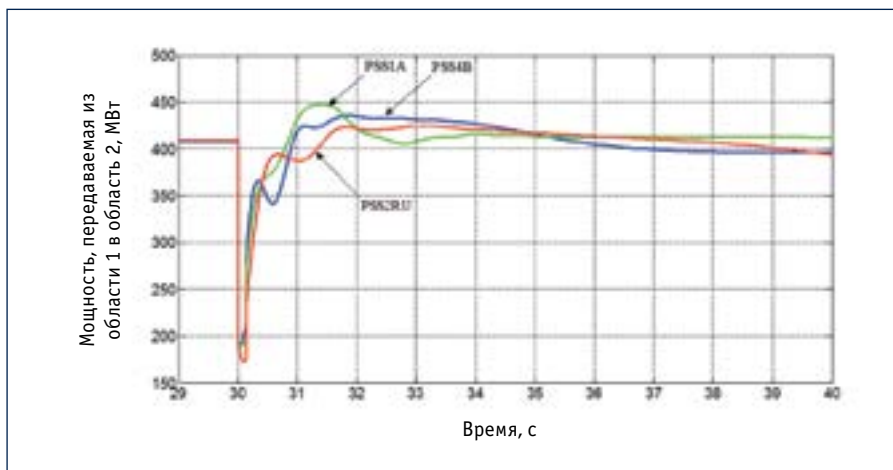


Рис. 4. Активная мощность, передаваемая из области 1 в область 2 при трехфазном коротком замыкании в середине линии с последующим ее отключением. Длина транзита – 220 км

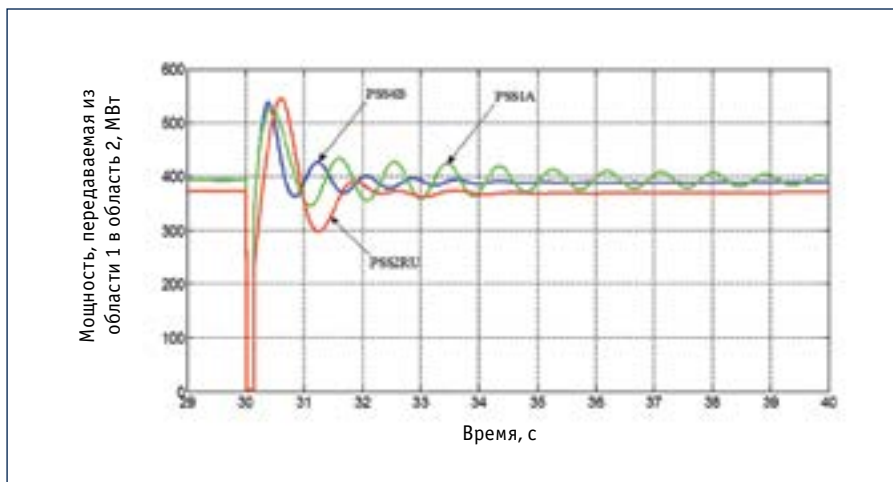


Рис. 5. Активная мощность, передаваемая из области 1 в область 2 при трехфазном коротком замыкании в середине линии с последующим ее отключением. Длина транзита – 10 км

Тестовым возмущением является трехфазное КЗ в середине одной линии с последующим ее отключением. Проведено сравнение PSS2RU со стабилизаторами, включенными в стандарт IEEE Std 421.5. Стабилизаторы PSS1A и PSS4B имеют в качестве входного параметра скорость вращения ротора. В PSS1A сигнал скорости вращения последовательно проходит через фильтры и несколько фазосдвигающих звеньев. В PSS4B сигнал скорости вращения раздваивается и проходит в одном случае через датчик низких и средних частот, в другом – через датчик высоких частот. Далее сигналы проходят через фазосдвигающие звенья, которые выделяют низкие, средние и высокие частоты, после чего каждая компонента усиливается в зависимости от частоты. Полное опи-


сание PSS1A и PSS4B представлено в стандарте, результаты теста – на рис. 4. В энергосистеме ситуация, когда присутствует длинный транзит и создаются такие тяжелые условия, является редкостью. Подобные условия могут возникнуть, если существует слабая связь или при неблагоприятных обстоятельствах при ремонтных схемах. Чтобы убедиться в эффективности стабилизатора в различных условиях, выполним такое же тестовое возмущение, но при транзите длиной 10 км. Следует отметить, что при уменьшении длины транзита до 10 км условия устойчивости энергосистемы улучшились, но такое же тестовое возмущение будет оказывать более сильную просадку напряжения на шинах генераторов, так как точка короткого замыкания стала электри-

чески ближе к каждому генератору. Результаты расчетов представлены на рис. 5.

По результатам анализа графиков на рис. 4 и 5 можно сделать заключение, что стабилизатор PSS2RU при неизменной настройке осуществляет эффективное демпфирование колебаний как при длинном, так и при коротком транзите: при длинном воздействуют все каналы стабилизатора, так как внутренний и внешний угол имеют одинаковый порядок величины; при коротком внешний угол становится малым, поэтому даже при тех же настройках каналы по отклонению и по производной частоты вносят на порядок меньший вклад в суммарный сигнал системного стабилизатора по сравнению с каналом по производной тока ротора. Можно сказать, что при коротком транзите каналы стабилизатора по отклонению и по производной частоты выключаются из работы, исходя из физической сущности процессов. Поэтому единая настройка оказывается достаточно эффективной в существенно различных условиях.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, благодаря рассмотренным свойствам и своему широкому распространению на электростанциях России и ближайшего зарубежья, а также принимая во внимание простоту и грубость настройки параметров, системный стабилизатор PSS2RU должен занять значимое место в библиотеках основных программных продуктов для выполнения сетевых исследований. Для этого важно провести работу по интеграции структуры системного стабилизатора PSS2RU и алгоритма релейной форсировки в документы международных организаций IEC и IEEE.



Концерн РУСЭЛПРОМ  
109029, РФ, г. Москва,  
Нижегородская ул., д. 32, стр. 15  
Тел.: 8 (800) 301-35-31  
Факс: +7 (495) 600-42-54  
e-mail: mail@ruselprom.ru  
ruselprom.ru

на правах рекламы