

7. А н и ш е н к о В. А. Выявление ошибок сигнализации положения коммутирующей аппаратуры при помощи ЭВМ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1982. – № 9. – С. 24–28.

8. А н и ш е н к о В. А. Совместный контроль достоверности сигнализации положений коммутационной аппаратуры и измерений аналоговых переменных // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1994. – № 1–2. – С. 9–13.

9. А н и ш е н к о В. А., К а з а н с к а я Т. Н. Многопризнаковый контроль достоверности информации в АСУ ТП / Ред. журн. «Приборы и системы управления». – М.: 1988. – 6 с. – Деп. в Информприборе 25.08.1988, № 4303.

10. А н и ш е н к о В. А. Двухпризнаковый контроль достоверности информации в АСУ ТП // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1988. – № 8. – С. 42–44.

11. А н и ш е н к о В. А., К а з а н с к а я Т. Н. Двухпризнаковый контроль достоверности измерений несвязанных переменных состояния энергетического объекта // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1990. – № 9. – С. 31–34.

12. Н о в и ц к и й П. В., З о г р а ф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

13. Ч у н о в к и н а А. Г. Погрешность измерения, неопределенность измерения и неопределенность измеряемой величины // Измерительная техника. – 2000. – № 7. – С. 19–23.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 6.12.2000

УДК 621.315.1.072

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС С ПОМОЩЬЮ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДЕМПФИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ

Докт. АЛИ ФАРХАН МУХСЕН

Ярмухский университет (Иордания)

Инж. БАМПИ Ю. С.

НИГП «БелТЭИ»

Широкое распространение синхронных электрических машин во многом зависит от развития и совершенствования систем управления их возбуждением. До сих пор применение синхронных генераторов с низкими электромеханическими характеристиками и пониженным уровнем устойчивости все еще возможно как раз благодаря прогрессу в области систем возбуждения. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных машин позволяет поддерживать статическую и динамическую устойчивость больших объединенных энергетических систем.

Системы регулирования возбуждения (т. е. синтез закона регулирования и выбор параметров стабилизации) применяются во многих странах. В бывшем СССР, например, использовались автоматические регуляторы возбуждения сильного действия (АРВ СД), в которых законы управления содержали не только отклонения режимных параметров, но также первые и (или) вторые производные их отклонений [1] от заданных значений. Большинство крупных турбогенераторов и практи-

чески все гидрогенераторы, работающие в настоящее время в энергетических системах стран СНГ, оснащены статическими тиристорными системами возбуждения и регуляторами возбуждения сильного действия.

В ряде западных стран были предложены стабилизаторы энергосистем (СЭС) для подавления опасных колебательных режимов. В настоящее время получили широкое распространение работы по исследованию возможности увеличения демпфирующих свойств энергосистемы за счет применения СЭС [2]. В данной работе проводится сравнение демпфирующих свойств различных систем регулирования возбуждения при возмущениях и следующих за ними переходных процессах, анализ динамики регуляторов возбуждения, определение наиболее эффективных демпфирующих сигналов и структуры системы регулирования возбуждения.

Решение упомянутых задач проводилось путем сравнения частотных характеристик и анализа собственных значений матриц линеаризованных уравнений переходных процессов. В некоторых случаях характеристики движения под воздействием малых возмущений исследовались с помощью численного интегрирования нелинейной системы дифференциальных уравнений, хотя такой метод в основном применяется для изучения переходных процессов и динамики регулирования возбуждения при конечных возмущениях.

Статическая колебательная устойчивость. Исследование колебательной статической устойчивости проводилось для системы генератор — шины бесконечной мощности. Синхронный генератор присоединен к повышающему трансформатору, связанному с линией электропередачи. Математическая модель состоит из системы нелинейных уравнений Парка—Горева 18-го порядка.

Основная часть вычислений проводилась для мощного, широко распространенного турбогенератора ТВВ-1000-4 со статическим тиристорным возбуждением и применением различных структур СЭС. Характерная черта этого турбоагрегата — значительная величина механической постоянной времени ($T_J = 13,5$ с).

Исследование статической колебательной устойчивости генераторов, оснащенных унифицированным регулятором возбуждения сильного действия, при различных дополнительных стабилизирующих сигналах было проведено ранее [3]. Было показано, что применение дополнительных каналов управления по производной тока возбуждения, статорного тока и второй производной роторного угла может значительно улучшить демпфирование и расширить границы области устойчивости для простой системы с одной машиной. В этом случае была достигнута степень демпфирования колебаний при малом возмущении на уровне $\alpha_{\max} = 4,5 \dots 5,5$ с⁻¹ и реактивном сопротивлении $X_E = 0,4$ Ом. Следует заметить, что в энергосистемах большой мощности такая высокая степень устойчивости, как правило, недостижима. Как упомянуто в [3], в сложных энергосистемах с многими машинами путем оптимизации настройки СЭС можно достичь демпфирования на уровне $\alpha_{\max} = 1,5 \dots 2,0$ с⁻¹; в протяженных ЛЭП со слабыми связями — $0,3 \dots 0,7$ с⁻¹. Но чем большая степень стабилизации может быть получена в системе с одной машиной, тем большего эффекта можно достичь в больших системах со многими машинами.

Обобщенная блок-схема АРВ и СЭС для синхронного генератора приведена на рис. 1.

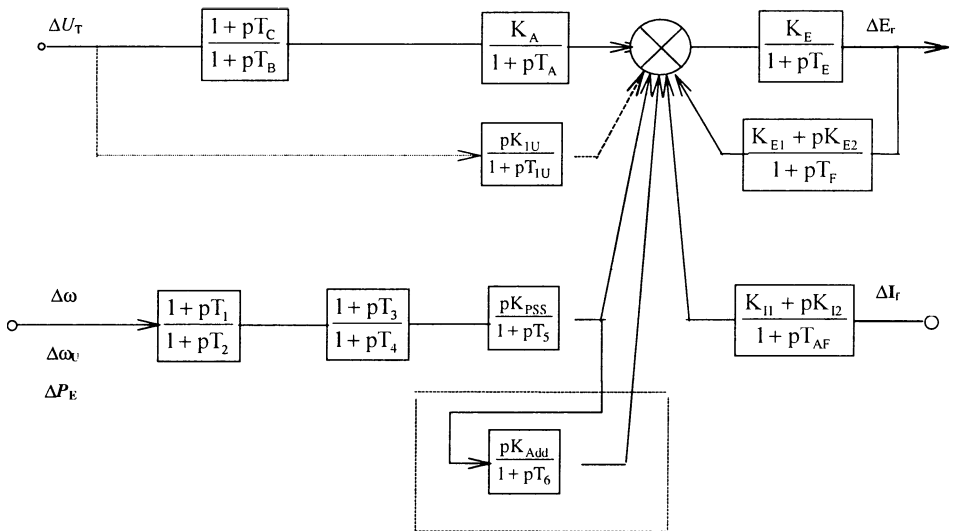


Рис. 1

Как видно, данная структура включает АРВ по отклонению напряжения в качестве входного сигнала; канал СЭС по отклонениям механической скорости генератора, выходной частоты или мощности в качестве входных сигналов; кроме того, несколько дополнительных демпфирующих сигналов и каналов обратной связи (канал производной выходного напряжения, типичный для регуляторов напряжения сильного действия, канал обратной связи по напряжению и току возбуждения, дополнительный блок по производной выходного сигнала СЭС). Такая структура дает возможность улучшить демпфирующие свойства системы и определить сильные и слабые стороны каждого подхода к формированию наиболее эффективной структуры системы управления возбуждением.

Для достижения высоких демпфирующих свойств данной системы необходимо отрегулировать постоянные времени опережения–запаздывания $T_1 - T_4$ в СЭС, другие постоянные времени в СЭС, коэффициенты усиления АРВ. Моделирование вариации усиления в структуре АРВ выполнено с помощью соответствующего выбора постоянных времени $T_b = 10T_c$ [4].

В табл. 1 представлены собственные значения матрицы характеристического полинома изучаемой системы при оптимальной настройке параметров АРВ с каналом СЭС.

В этом случае степень демпфирования $\alpha_{\max} = 2,9 \text{ с}^{-1}$ поддерживалась приложением сигнала девиации механической скорости генератора (скольжения ротора) как входного сигнала канала СЭС.

В табл. 2 показано положительное влияние демпфирующих дополнительных сигналов, а также обратной связи по напряжению и току возбуждения на статическую устойчивость (увеличение степени демпфирования $\alpha_{\max} = 3,6 \text{ с}^{-1}$ и уменьшение зависимости демпфирующих свойств от режима работы генератора), существенное влияние гибкой обратной связи.

**Собственные значения системы при приложении $\Delta\omega$
как демпфирующего сигнала в канале СЭС**

Вещественная часть	Мнимая часть	Вещественная часть	Мнимая часть
-50,0	0	-4,077	0
-50,0	0	-2,90	6,152
-44,635	0	-2,90	-6,152
-40,642	0	-2,87	2,521
-33,333	0	-2,87	-2,521
-23,734	0	-1,868	0
-12,950	18,399	-1,25	0
-12,950	-18,399	-1,25	0
-5,998	0	-1,019	0

Таблица 2

**Собственные значения системы при приложении $\Delta\omega$ как демпфирующего сигнала
в канале СЭС и дополнительных сигналов по напряжению и току возбуждения**

Вещественная часть	Мнимая часть	Вещественная часть	Мнимая часть
-50,0	0	-3,794	0
-47,324	9,190	-3,625	3,813
-47,324	-9,190	-3,625	-3,813
-40,623	0	-3,574	4,562
-33,333	0	-3,574	-4,562
-25,641	0	-1,877	0
-10,239	13,956	-1,250	0
-10,239	-13,956	-1,250	0
-6,770	0	-1,017	0

Рассматривалась также возможность изменения мощности или частоты выходного напряжения как входного сигнала. Результаты показывают, что демпфирующие свойства рассматриваемой системы, полученные с использованием СЭС, и отклонения мощности генератора и механической скорости очень близки (табл. 3).

Таблица 3

**Собственные значения системы при приложении величины отклонения мощности
как демпфирующего сигнала в канале СЭС и дополнительных сигналов
по напряжению и току возбуждения**

Вещественная часть	Мнимая часть	Вещественная часть	Мнимая часть
-50,0	0	-3,794	0
-47,311	9,190	-3,608	4,607
-47,311	-9,190	-3,608	-4,607
-40,623	0	-3,587	3,785
-33,333	0	-3,587	-3,785
-14,285	0	-1,877	0
-12,285	0	-1,25	0
-10,249	13,946	-1,25	0
-10,249	-13,946	-1,017	0
-6,761	0		

При использовании отклонения частоты выходного напряжения максимальная степень устойчивости уменьшается до $\alpha_{\max} = 2,4 \text{ с}^{-1}$ (табл. 4) даже с дополнительной гибкой обратной связью по напряжению и току возбуждения. Введение дополнительного блока по производным позволяет увеличить степень демпфирования.

Таблица 4

Собственные значения системы при приложении $\Delta\omega_U$ как демпфирующего сигнала в канале СЭС и дополнительных сигналов по напряжению и току возбуждения

№ п/п	Вещественная часть	Мнимая часть	№ п/п	Вещественная часть	Мнимая часть
1	-50,0	0	11	-3,753	0
2	-43,072	12,378	12	-2,420	6,653
3	-43,072	-12,378	13	-2,420	-6,653
4	-40,617	0	14	-2,432	2,657
5	-33,333	0	15	-2,432	-2,657
6	-24,122	0	16	-1,863	0
7	-18,241	17,897	17	-1,25	0
8	-18,241	-17,897	18	-1,25	0
9	-14,286	0	19	-1,02	0
10	-5,548	0			

Следует заметить, что преимуществом стабилизирующего сигнала на частоте выходного напряжения является относительная легкость его измерения. Вот почему этот сигнал применяется как стандартный для автоматических регуляторов возбуждения в энергосистемах СНГ.

На рис. 2 показана область статической устойчивости рассматриваемой системы в координатах коэффициентов усиления K_{pss} блока второй

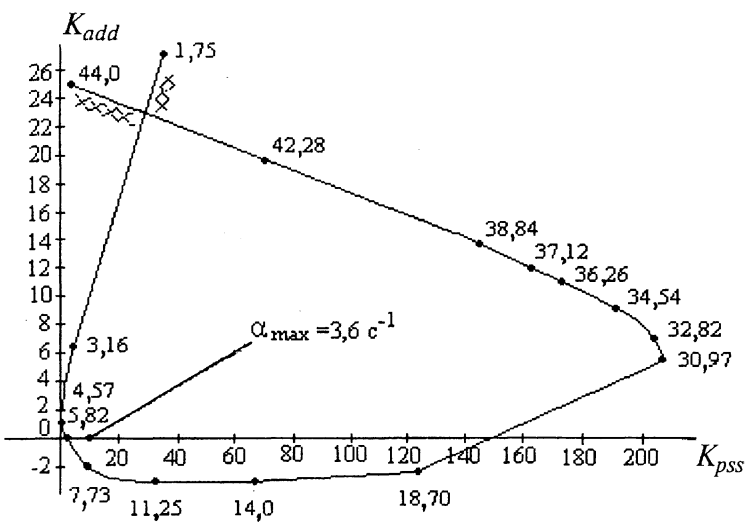


Рис. 2. Характеристика статической устойчивости генератора при приложении $\Delta\omega$ как демпфирующего сигнала к СЭС и дополнительных сигналов по напряжению и току возбуждения

производной K_{add} при наличии дополнительных стабилизирующих сигналов по напряжению и току возбуждения и использовании механической скорости генератора как входного сигнала.

Из рисунка следует, что введение гибких обратных связей существенно расширяет область устойчивости. Максимальная степень устойчивости может быть достигнута без применения дополнительного блока производных, но его использование может увеличить полученную степень демпфирования.

На рис. 3 показана частотная характеристика рассматриваемой системы в присутствии дополнительных стабилизирующих сигналов и гибких обратных связей по напряжению и току возбуждения при использовании частоты выходного напряжения как входного сигнала.

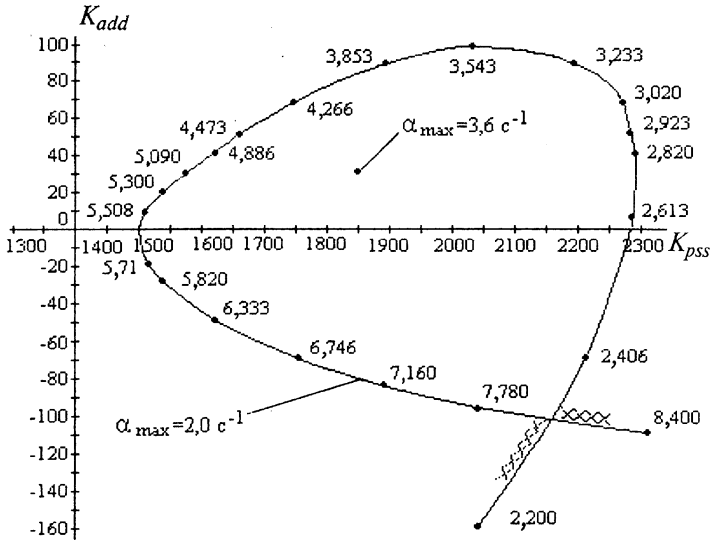


Рис. 3. Кривая равных степеней демпфирования генератора при приложении $\Delta\omega$ как демпфирующего сигнала к СЭС и дополнительных сигналов по напряжению и току возбуждения

В этом случае частотная характеристика сдвинута в направлении увеличения значений усиления K_{pss} . Максимальная степень устойчивости $\alpha_{max} = 3,6 \text{ c}^{-1}$ была достигнута путем применения дополнительного блока производных.

Динамическая устойчивость. Анализ переходных процессов, вызванных конечными возмущениями, при применении различных систем управления возбуждением представляет значительный интерес для сравнения потенциальных возможностей таких систем в смысле повышения пределов динамической устойчивости. Следует заметить, что ее предел, оцениваемый по колебанию роторного угла, не зависит от системы возбуждения и структуры каналов СЭС. Эта величина определяется только отношением увеличения возбуждения при условии, что напряжение возбуждения быстро нарастает. Практически все АРВ в энергосистемах СНГ применяют релейное форсирование возбуждения для увеличения предела динамической устойчивости при аварийных режимах в системе.

Высокие демпфирующие свойства АРВ с каналами СЭС, применяющие стабилизирующие и дополнительные сигналы с оптимальной регулировкой, вызывают эффективное демпфирование переходных про-

цессов в энергосистемах. Расчеты для переходных процессов при конечных возмущениях выполнялись сначала для разного рода коротких замыканий. Принято, что короткое замыкание имеет место на ненагруженной ветви цепи и что конфигурация цепи не меняется после устранения аварийной ситуации.

Временной отклик рассматриваемой системы на трехфазное короткое замыкание в течение 0,12 с показан на рис. 4. Переходный процесс демпфируется АРВ и релейным форсированием возбуждения, введенного в контур управления. При подавлении нелинейных колебаний переходные процессы демпфируются примерно за одну секунду.

Отсутствие релейного форсирования возбуждения в этом случае может вызвать нежелательные побочные эффекты, например интенсивное недовозбуждение на первой стадии переходного процесса из-за специфических соотношений между индивидуальными каналами СЭС. Поэтому следует рекомендовать применение релейной форсировки возбуждения в структуре СЭС, причем время его действия должно несколько превышать время возмущения.

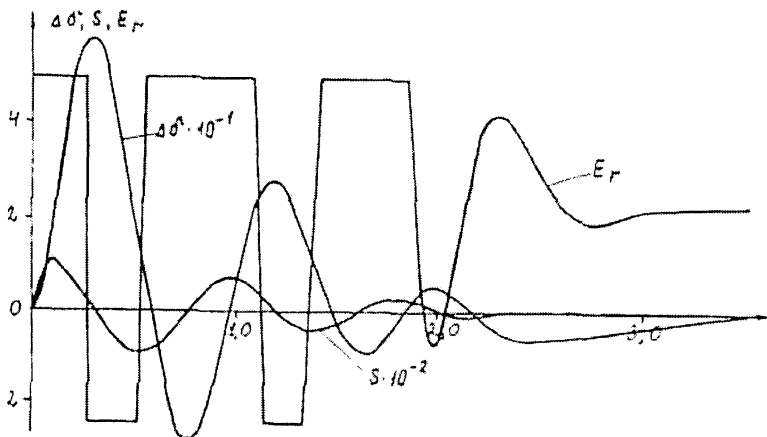


Рис. 4

ВЫВОД

Исследование демпфирующих свойств, полученных при приложении различных стабилизирующих и дополнительных сигналов к АРВ и каналам СЭС, проведено на основе анализа собственных значений характеристического полинома, области устойчивости и переходных процессов. Результаты моделирования показывают, что демпфирование в предложенной структуре СЭС с использованием механической скорости генератора, а также увеличение его мощности и частоты выходного напряжения почти одинаково (примерно на уровне $\alpha_{\max} = 3,6 \text{ с}^{-1}$). Качество устойчивости в «малом» и динамической устойчивости генератора может быть улучшено применением обратной связи по напряжению и току возбуждения и форсировки возбуждения особенно на первой стадии переходного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г л е б о в И. А. Системы возбуждения мощных синхронных машин. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1979. — 314 с.
2. О к о г о к о в R. V., П е р ш и к о в G. A., С м о л о в и к S. V. Damping Properties Maintained by the Different Structures of Excitation Control // Proceedings of the 10th International Power System Conference. — Teheran, Iran, 1995. — P. 19–28.
3. А в а д А. Е., О к о н Л. И., О к о р о к о в Р. В., С м о л о в и к С. В. Исследование интенсивности предлагаемого АРН-SDPM стабилизатора // Вопросы развития энергосистем: Тр. науч. конф. — Санкт-Петербург, 1992. — С. 23–28.
4. Excitation System Models for Power System Stability Studies // IEEE Committee Report // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. — Vol. PAS — 100. № 2, February 1981. — P. 494–509.

Представлена кафедрой
электротехники и электроники

Поступила 17.01.2000
После доработки 19.02.2001

УДК 621.311:658.012.011.56

УПРАВЛЕНИЕ ОХЛАЖДЕНИЕМ ТРАНСФОРМАТОРОВ (АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ) — ТИПОВАЯ ЗАДАЧА АСУ ТП ПОДСТАНЦИИ

Инженеры БУРЛЮК В. В., ЛУЦЕВИЧ М. Н., ЦАРЕВ Б. П.

Государственное научно-производственное объединение «АГАТ»

Инж. БУНИН Ю. В.

ПО «Витебскэнерго»

Инж. СОЛОМОНИК А. И.

Витебские электрические сети

Электрическая энергия при передаче к потребителю претерпевает многократную трансформацию на подстанциях. Длительная (непрерывная) работа трансформаторов подстанции обеспечивается системами охлаждения, сложность которых зависит от их мощности. Штатные системы охлаждения существующих трансформаторов большой мощности содержат группы охладителей, которые автоматически включаются в зависимости от нагрузки и температуры верхних слоев масла. При этом часть групп охладителей включается одновременно с трансформатором и остается включенной независимо от нагрузки. Температурные и нагрузочные уставки таких систем охлаждения остаются неизменными при всех, в том числе сезонных, условиях. Очевидно, что наличие постоянно включенных групп охладителей независимо от нагрузочного режима и сезонных условий приводит к нерациональным затратам электроэнергии собственных нужд подстанции, которые для трансформаторов 125–200 МВ·А достигают 150 тыс. кВт·ч/год [1].