

3. Дальние электропередачи переменного тока / И. С. Брук [и др.]. – М.: АН СССР, 1958. – 259 с.
4. Залесский, А. М. Передача электрической энергии / А. М. Залесский. – Л.; М.: ГЭИ, 1948. – 355 с.
5. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и сети: проектирование / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – Минск: Вышэйш. шк., 1988. – 308 с.
6. Примеры анализа и расчета электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление / под ред. В. А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1967. – 296 с.
7. Поспелов, Г. Е. Новый взгляд на возможности электропередачи переменного тока в режиме четверти волны / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 5–6. – С. 3–8.
8. Поспелов, Г. Е. Гибкая четвертьволновая управляемая электропередача / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 5. – С. 23–30.
9. Поспелов, Г. Е. Логическая структура средств повышения динамической устойчивости систем электропередачи / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 4. – С. 12–20.
10. Поспелов, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967. – 312 с.
11. Поспелова, Т. Г. Потенциальные области использования FACTS и АСМ в Белорусской энергосистеме / Т. Г. Поспелова // Энергия и менеджмент. – 2006. – № 4 (31). С. 37–43.
12. Ивакин, В. Н. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике / В. Н. Ивакин, В. Д. Ковалев // Электричество. – 2001. – № 9. – С. 30–37.
13. Технология гибких линий электропередачи и электропередач, настроенных на передаваемую мощность // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 63–67.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 20.10.2010

УДК 621

ДЕМПФИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В МНОГОМАШИННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С РАЗНОТИПНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Акад. НАН Азербайджана, докт. техн. наук, проф. ГАШИМОВ А. М.,
докт. техн. наук РАХМАНОВ Н. Р., канд. техн. наук ЗЕЙНАЛОВ А. Д.

*Институт физики НАН Азербайджана,
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики*

За последние 8–10 лет в энергосистеме Азербайджана на трех электростанциях введены пять новых газотурбинных агрегатов общей мощностью около 1100 МВт (18 % от установленной мощности энергосистемы). Переход на газотурбинную технологию генерации мощности заметно улучшил технико-экономические показатели энергосистемы. Кроме того, появилась возможность существенного компенсирующего влияния на колебательные процессы в системе за счет гибкой настройки регуляторов возбуждения

синхронных генераторов. Это достигается применением на синхронных генераторах газотурбинных агрегатов регуляторов возбуждения с системными стабилизаторами (PSS). Регуляторы возбуждения с PSS функционально отличаются от регуляторов возбуждения сильного действия, установленных на большей части синхронных генераторов действующих тепловых и гидравлических станций системы Азербайджана.

Характерной особенностью системы «Азерэнерджи» является то, что электростанции, регуляторы возбуждения синхронных генераторов которых выполнены по типу традиционных регуляторов сильного действия (СДП), располагаются на западе страны и составляют около 65 % от общей установленной мощности, в то время как суммарное электропотребление данного региона составляет примерно 15–20 % от общего спроса на грузки всей системы. Синхронные генераторы с регуляторами возбуждения, оснащенными PSS, расположены на востоке (на Апшеронском полуострове), где сосредоточены потребители электрической энергии, суммарная мощность которых составляет более 70 % от общей нагрузки системы. В связи с этим, с точки зрения мониторинга состояния устойчивости энергосистемы, важным является оценивание характеристик низкочастотных электромеханических колебаний мощностей электропередач в сечении, связывающей западную и восточную части энергосистемы, а также взаимных углов синхронных генераторов, расположенных в этих частях. Эффективность демпфирования колебаний достигается координированной настройкой разнотипных регуляторов возбуждения синхронных генераторов, расположенных в обеих частях системы.

В настоящее время накоплен опыт решения задач координации систем одностипных регуляторов возбуждения, выполненных как на основе СДП [1–4], так и PSS [5–11]. Поэтому выбор регуляторов возбуждения для всех генераторов рассматривается с точки зрения увеличения демпфирования взаимных колебаний между отдельными частями энергосистемы.

В данной работе приводятся результаты анализа электромеханических колебаний в энергосистеме с разнотипными регуляторами возбуждения и дается сравнительная оценка влияния каждого типа регулятора на эти колебания. Для расчетной оценки значений настраиваемых параметров системных стабилизаторов использован оптимизационный подход метода генетического алгоритма.

Структура модели регулируемой энергосистемы с разнотипными регуляторами возбуждения. В энергосистеме электромеханические переходные процессы в обобщенном виде могут быть представлены следующей моделью состояния:

$$x = F(x, U), \quad (1)$$

где x , U – векторы переменных состояния и управляемых переменных соответственно.

Для системы с n генераторами вектор x определяется как

$$x = [\delta_i, \omega_i, E'_{qi}, E_{fdi}]^T, \quad (2)$$

где δ_i – угол i -го генератора, рад; ω_i – угловая скорость ротора; E'_{qi} – переходная ЭДС, пропорциональная продольному потоку обмотки возбужде-

ния, о. е.; E_{fdi} – ЭДС, пропорциональная напряжению обмотки возбуждения, о. е.

Каждый элемент вектора управляемых переменных U представляет собой величину, пропорциональную значению выходного сигнала с регуляторов возбуждения каждого генератора. В работе моделируются схемы и режимы энергосистемы, на синхронных генераторах которой в основном применяются два типа регуляторов возбуждения – сильного действия типа СДП1 и регуляторы с PSS.

Подобные случаи использования разнотипных регуляторов возбуждения в настоящее время имеют место в энергосистемах стран СНГ, в которых в качестве новых генерирующих агрегатов применяются газотурбинные установки (ГУ) импортного производства. Обычно генераторы ГУ оснащены регуляторами возбуждения типа UNITROL PSS2A [12, 13].

На рис. 1–3 приведены структурные схемы регуляторов возбуждения типов СДП1 [14] и ST1A (UNITROL) с PSS2A [13], которыми в настоящее время оснащены синхронные генераторы энергосистемы стран СНГ.

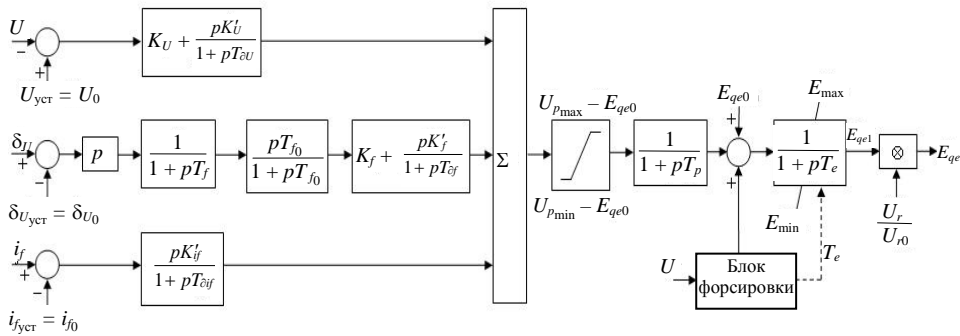


Рис. 1. Структурная схема регулятора сильного действия типа СДП1

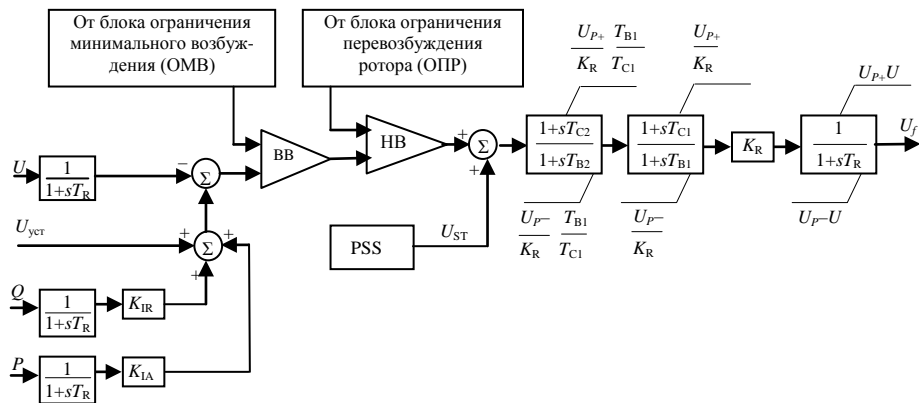


Рис. 2. Структурная схема регулятора UNITROL (IEEE 421-5 тип ST1A)

При расчете значений настраиваемых параметров АРВ синхронных машин обычно используется линеаризованная модель, составленная на основе (1) для величин приращений переменных состояния относительно точки установившегося режима. Такая линеаризованная модель энерго-

системы с разнотипными регуляторами возбуждения может быть представлена в виде

$$\Delta x = \mathbf{A}\Delta x + \mathbf{B}\Delta U, \quad (3)$$

где \mathbf{A} – матрица размерностью $4n \times 4n$ с элементами $\partial F/\partial x$; \mathbf{B} – то же $4n \times (n_{\text{СДП}} + n_{\text{PSS}})$ с элементами $\partial F/\partial U$; Δx – вектор состояния ($4n \times 1$); ΔU – вектор величин стабилизирующих сигналов с выходов АРВ СДП и PSS размерностью $(n_{\text{PSS}} + n_{\text{СДП}}) \times 1$; n – число синхронных генераторов в энергосистеме; $n_{\text{СДП}}$ – то же с регуляторами возбуждения СДП; n_{PSS} – то же с регуляторами возбуждения PSS.

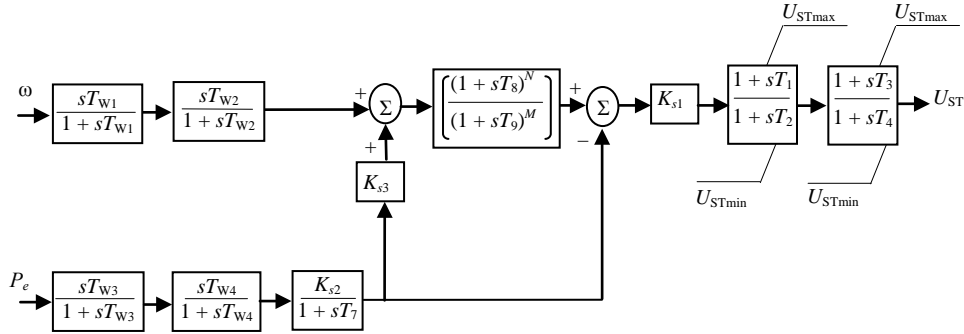


Рис. 3. Структурная схема PSS UNITROL (IEEE PSS2A)

Оптимальная настройка АРВ в многомашинной энергосистеме.

Одной из важнейших задач АРВ синхронных генераторов является обеспечение демпфирования межсистемных колебаний. Выбор значений настраиваемых параметров АРВ, при которых достигается наилучшая демпфируемость электромеханических колебаний в системе, в общем случае представляет собой сложную оптимизационную задачу. Использование традиционных методов решения этой задачи не позволяет получить глобальный оптимум для набора настроечных параметров всех регуляторов возбуждения, в том числе и PSS, одновременно удовлетворяющих всей совокупности возможных режимов работы системы.

В настоящее время для оптимального выбора параметров АРВ широкое применение получили методы искусственного интеллекта [15, 16], которые не имеют таких ограничений для решения оптимизационной задачи, как необходимость дифференцируемости целевой функции, наличие одного оптимума и т. д. В общем виде целевая функция, по которой можно идентифицировать параметры АРВ со значениями, обеспечивающими оптимальную степень демпфирования электромеханических колебаний в системе, имеет вид

$$j = \max \{ \text{Re}(\lambda_i) \}, \quad i \in P, \quad (4)$$

где P – совокупность электромеханических режимов в системе при различных возмущающих воздействиях; $\text{Re}(\lambda_i)$ – действительная составляющая собственного значения, характеризующего i -й электромеханический режим.

Улучшение демпфирования колебаний системы согласно (4) соответствует наибольшему смещению собственного значения λ_i влево от мнимой

оси [11]. При этом оптимальный поиск значений настраиваемых параметров APB и PSS производится в заданных для них интервалах возможных значений (табл. П1–П3).

Для рассматриваемого типа PSS (рис. 3) в качестве настроечных параметров были использованы T_{W1} , T_{W2} , T_{W3} , T_{W4} , K_{S1} . Остальные параметры в соответствии с рекомендациями [13] выбраны фиксированными в интервале их типовых значений (табл. П3).

С учетом изложенного выше при оптимизации функции (4) ограничениями являются граничные значения настраиваемых параметров, которые задаются в виде:

$$K_{S1}^{\min} \leq K_{S1} \leq K_{S1}^{\max}; \quad (5)$$

$$K_{W1}^{\min} \leq K_{W1} \leq K_{W1}^{\max}; \quad (6)$$

$$K_{W2}^{\min} \leq K_{W2} \leq K_{W2}^{\max}; \quad (7)$$

$$K_{W3}^{\min} \leq K_{W3} \leq K_{W3}^{\max}; \quad (8)$$

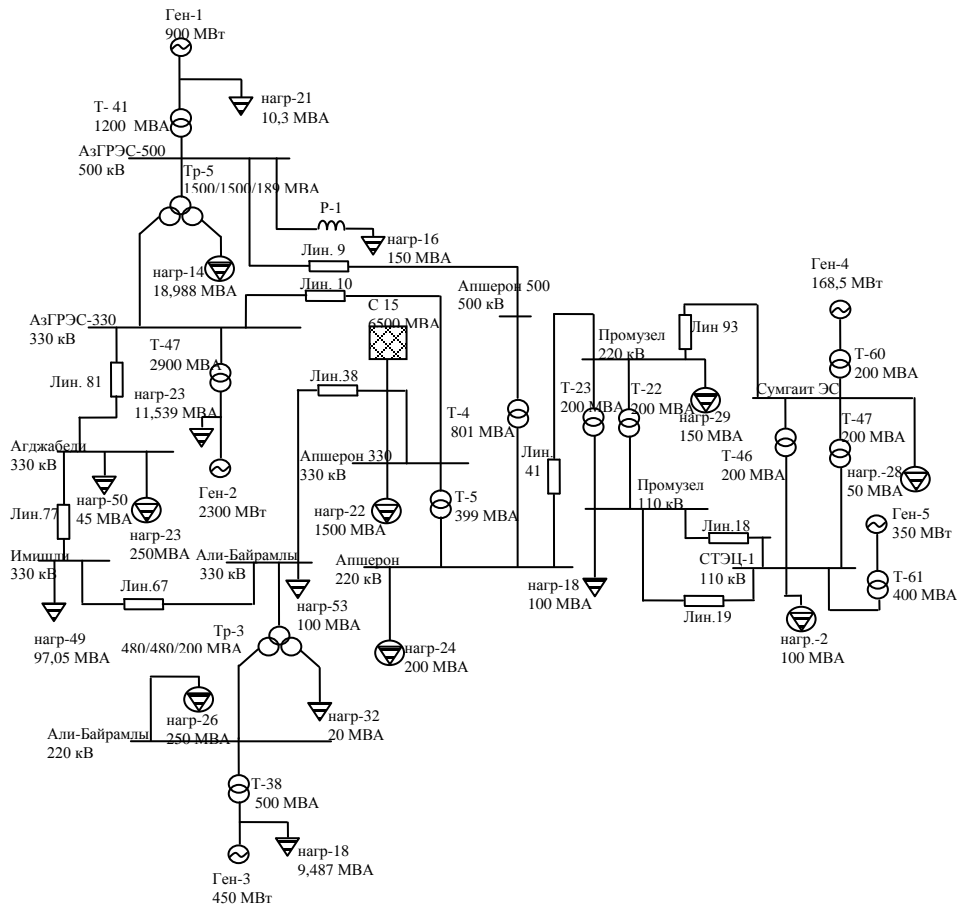
$$K_{W4}^{\min} \leq K_{W4} \leq K_{W4}^{\max}. \quad (9)$$

Для поиска оптимальных значений параметров PSS (K_{S1i} , K_{W1i} , K_{W2i} , K_{W3i} , K_{W4i} ; $i = 1, 2, \dots, n_{PSS}$) была использована программа генетического алгоритма, которая реализуется в виде таких этапов, как:

- формирование начальной популяции хромосом, составленной из последовательности значений искомых параметров PSS, выбираемых из области их заданных значений с использованием принципа рулетки. Каждому набору последовательности параметров PSS соответствует значение целевой функции;
- отбор из начальной популяции одной или более последовательностей параметров PSS, при которых достигается высокая степень демпфирования электромеханических колебаний, т. е. эти последовательности считаются наилучшими для воспроизводства нового поколения последовательностей, имеющих еще большее приближение к оптимуму целевой функции;
- на основе отобранных наилучших значений параметров PSS формируется новая популяция. С этой целью применяются два оператора – кроссовера и мутации. С помощью оператора кроссовера из двух имеющихся последовательностей генерируются две новые, а оператор мутации модифицирует одну из этих последовательностей в другую. В данном случае в качестве оператора кроссовера используется простая перекрестная перестановка;
- процесс повторяется до сходимости целевой функции – получения набора оптимальных параметров PSS, обеспечивающих высокую степень демпфирования электромеханических колебаний в системе.

Результаты исследований. Здесь приведены данные анализа электромеханических процессов в системе «Азерэнерджи» от различных возмущающих воздействий и влияние на них типа регулятора возбуждения синхронных генераторов. Для схемы «Азерэнерджи» демпфирование электромеханических колебаний по электрической связи между западным

и восточным регионами страны является одним из важных условий устойчивой работы системы. С учетом этого была принята расчетная схема сети (рис. 4), в которой электростанции, расположенные на западе, были представлены тремя эквивалентными генераторами (1, 2, 3) с регуляторами возбуждения СДП1, а электростанции на востоке – двумя эквивалентными генераторами (4, 5) с регуляторами возбуждения с PSS2A. Параметры и интервалы возможных значений регуляторов возбуждения СДП1 и ST1A с PSS2A приведены соответственно в табл. П1–П3.



Расчеты проводились по программе ETAP, при этом регуляторы моделировались с помощью блока User-Defined Dynamic Models (UDM) [17].

В табл. П4 приводятся типовые значения параметров синхронных генераторов.

На рис. 5–8 показаны кривые, характеризующие электромеханические процессы в энергосистеме, вызванные большими возмущающими воздействиями в виде трехфазных КЗ на шинах п/ст «Апшерон-330 кВ» и «Агджабеди-330». Расчеты проводились для случаев схемы, в которой на АРВ генераторов 4, 5 системные стабилизаторы были в рабочем и отключенном состояниях. При этом параметры PSS агрегатов были настроены на значения, приведенные в табл. 1. Они получены из оптимизационных расчетов, выполненных в соответствии с методом генетического алгоритма [16].

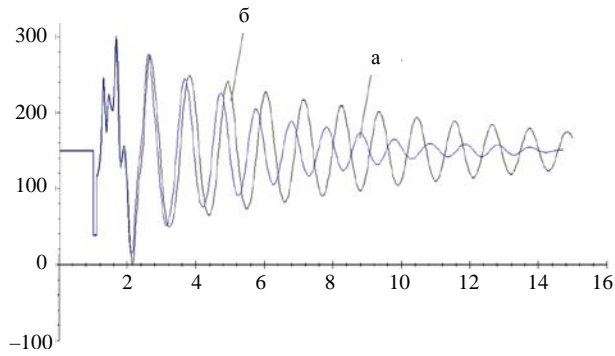


Рис. 5. Кривые изменения электрической мощности генератора 4 в режиме трехфазного КЗ на шинах п/ст «Апшерон-330 кВ»: а – включенными; б – отключенными PSS на генераторах 4, 5

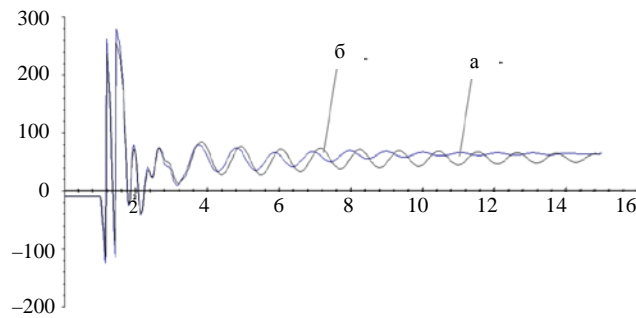


Рис. 6. Кривые изменения взаимного угла роторов генераторов 4 и 1 в режиме трехфазного КЗ на шинах п/ст «Апшерон-330 кВ»: а – включенными; б – отключенными PSS на генераторах 4, 5

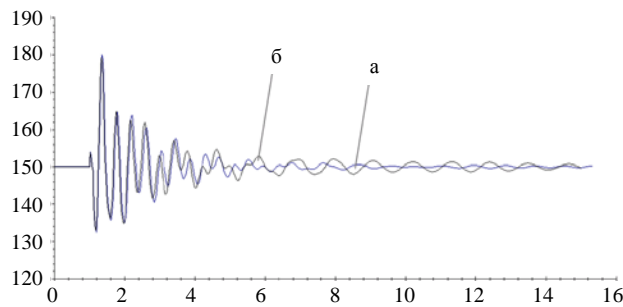


Рис. 7. Кривые изменения электрической мощности генератора 4 в режиме трехфазного КЗ на шинах п/ст «Агджабеди-330 кВ»: а – включенными; б – отключенными PSS на генераторах 4, 5

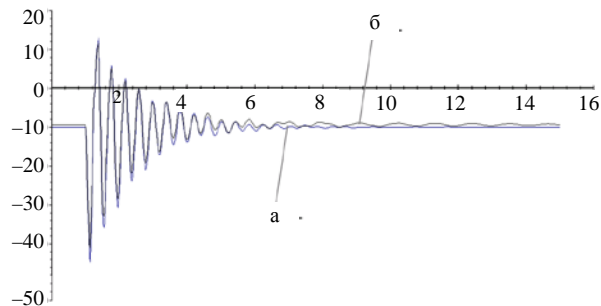


Рис. 8. Кривые изменения взаимного угла роторов генераторов 4 и 1 в режиме трехфазного КЗ на шинах п/ст «Агджабеди-330 кВ»: а – включенными; б – отключенными PSS на генераторах 4, 5

Таблица 1

Значения параметров PSS после оптимальной настройки

Параметр	K_{s1}	T_{w1}	T_{w2}	T_{w3}	T_{w4}
Генератор 4	8	4	4	4	4
Генератор 5	6	2	2	2	2

Из рис. 5, 6 видно, что демпфирование колебаний как по амплитуде, так и по времени наиболее заметно проявляется при включенных PSS в случае КЗ на п/ст 500/330 кВ «Апшерон».

Влияние PSS на демпфирование колебаний в диапазоне более низких частот, характерных для взаимных колебаний углов ротора генератора 4 с PSS и ротора генератора 1 с регулятором возбуждения сильного действия, видно из рис. 7, 8 при КЗ в разных частях схемы системы.

ВЫВОДЫ

В энергосистемах стран СНГ в ряде случаев в качестве современных генерирующих энергию технологий применяются газотурбинные установки, синхронные генераторы которых оснащены регуляторами возбуждения с системными стабилизаторами. АРВ с PSS функционально отличаются от регуляторов возбуждения сильного действия, и их число постоянно увеличивается.

Различия процессов функционирования АРВ сильного действия и АРВ с PSS усложняют осуществление скоординированной настройки их параметров для целей эффективного демпфирования электромеханических колебаний в энергосистеме.

В работе приводятся результаты моделирования и анализа электромеханических процессов в энергосистеме с разнотипными регуляторами возбуждения сильного действия и АРВ с PSS. На примере системы «Азербээнержи», в которой в настоящее время используются регуляторы возбуждения сильного действия типа СДП1 и АРВ с PSS типа UNITROL, получены сравнительные оценки влияния PSS на электромеханические процессы, вызванные трехфазными короткими замыканиями в различных местах схемы.

На основе метода генетического алгоритма получены оценки параметров АРВ с PSS, характеризующих возможности демпфирования колебаний мощности, собственных и взаимных углов синхронных генераторов. Результаты показывают, что эффективность демпфирования наиболее значительно проявляется на низких частотах колебаний.

Приложения

Таблица III

Параметры АРВ–СДП1

Параметр	Назначение	Ед. измерения	Диапазон измерения
K_U	Коэффициент усиления по отклонению напряжения	о. е.	25, 50, 75, 100
K'_U	Коэффициент усиления по производной отклонения напряжения	о. е.	0–6
K_f	Коэффициент усиления по отклонению частоты	о. е.	0–15
K'_f	Коэффициент усиления по производной отклонения частоты	о. е.	0–6
K'_{if}	Коэффициент усиления по производной тока ротора	о. е.	0–2,8

Окончание табл. П1

Параметр	Назначение	Ед. измерения	Диапазон измерения
T_p	Постоянная времени общего канала регулятора	с	0–0,04
T_f	Постоянная времени блока измерения частоты	с	0,9–2,4
T_{f0}	Постоянная времени фильтра постоянной составляющей	с	2,4
T_{eU}	Постоянная времени дифференцирующего звена канала напряжения	с	0,03
T_{ef}	Постоянная времени дифференцирующего звена канала частоты	с	0,02
T_{cif}	Постоянная времени дифференцирующего звена канала тока ротора	–	0,4

Таблица П2

Параметры APB IEEE 421-5, Type ST1A (UNITROL)

Параметр	Назначение	Ед. измерения	Диапазон измерения
T_R	Постоянная времени измерительного фильтра	с	0,020
T_s	Постоянная времени блока управления вентиля и преобразователя	с	0,004
K_{IR}	Коэффициент компенсации реактивной мощности	о. е.	–0,2–+0,2
K_{IA}	Коэффициент компенсации активной мощности	о. е.	–0,2–+0,2
K_R	Коэффициент усиления в установившемся режиме	о. е.	10–1000
T_{B1}	Постоянная времени первой задержки регулятора	с	$T_{B1} \geq T_{B2}$
T_{B2}	Постоянная времени второй задержки регулятора	с	$0 < T_{B2} \leq T_{C2}$
T_{C1}	Постоянная времени первого опережения регулятора	с	0,01–10
T_{C2}	Постоянная времени второго опережения регулятора	с	0,01–2
U_{p+}	Максимальное значение выходного сигнала APB	о. е.	Фиксированный
U_{p-}	Минимальное значение выходного сигнала APB	о. е.	Фиксированный

Таблица П3

Параметры PSS IEEE PSS2A (UNITROL)

Параметр	Назначение	Единица измерения	Диапазон измерения
T_{W1}, T_{W2}	Постоянная времени измерительного фильтра	с	0,1–30
T_{W3}, T_{W4}	Постоянная времени блока управления вентиля и преобразователя	с	0,1–30
K_{S1}	Коэффициент усиления PSS	о. е.	0,1–50
K_{S2}	Коэффициент компенсации для расчета интеграла электрической мощности	о. е.	0,01–5
K_{S3}	Коэффициент согласования сигналов	о. е.	0,01–50
T_1, T_3	Постоянная времени опережения схемы	с	0,0–2,5
T_2, T_4	Постоянная времени задержки схемы	с	0,0–2,5
T_7	Постоянная времени для расчета интеграла электрической мощности	с	3–30
T_8	Постоянная времени отслеживающего фильтра ступенчатого сигнала	с	0,0–2,5
T_9	Постоянная времени отслеживающего фильтра ступенчатого сигнала	с	0,0–2,5
M	Степень фильтра ступенчатого сигнала	–	2–5
N	Степень фильтра ступенчатого сигнала	–	1–4
U_{STmax}	Максимальное значение сигнала стабилизации	о. е.	0,0–3,277
U_{STmin}	Минимальное значение сигнала стабилизации	о. е.	0,0–3,277

Типовые значения параметров генераторов

Тип	$x_d, \%$	$x'_d, \%$	$x''_d, \%$	$x_L, \%$	$x_q, \%$	$x'_q, \%$	$x''_q, \%$	$T'_{d0}, \text{с}$	$T''_{d0}, \text{с}$	$T'_{q0}, \text{с}$	$T''_{q0}, \text{с}$	$T_j, \text{с}$
Турбогенератор	110	23	12	11	108	15	12	5,6	0,002	3,7	0,002	5
Гидрогенератор	115	37	24	15	75	75	34	5	0,03	–	0,05	5

ЛИТЕРАТУРА

- Есипович, А. Х. Расчет колебательной устойчивости и оптимизация настроек АРВ генераторов: сб. трудов Федерации энергетических и электротехнических обществ / А. Х. Есипович, А. С. Зеккель. – СПб., 1992.
- Есипович, А. Х. Программный комплекс расчета колебательной устойчивости и выбора настройки регуляторов возбуждения / А. Х. Есипович, А. С. Зеккель // Электрические станции. – 1995. – № 12.
- Лоханин, Е. К. Упрощение уравнений синхронной машины для расчета и анализа электромеханических переходных процессов и устойчивости сложной энергосистемы / Е. К. Лоханин // Электричество. – 1999. – № 1.
- Оптимизация настройки регуляторов возбуждения генераторов парогазового энергоблока Северо-Западной ТЭЦ для обеспечения ее устойчивой параллельной работы с энергосистемой NORDEL / А. С. Герасимов [и др.] [http // eurostag.regimov.net/files/sztec.pdf](http://eurostag.regimov.net/files/sztec.pdf), 2008.
- Maslennikov, V. A. The Optimization Method for Coordinated Turning of Power System Regulators, Proceedings of the 12th Power System Computation Conference PSCC / V. A. Maslennikov, M. Ustinov. – Dresden, 1996. – P. 70–75.
- Lim, C. M. Design of Stabilizer in Multi-Machine Power Systems / C. M. Lim, S. Elangovan // IEEE Proceeding. – 1985. – Vol. 132 (3). – P. 146–153.
- Sauer, P. W. Power System Dynamics and Stability / P. W. Sauer, M. A. Pai // Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1998.
- Xai, D. Self-Tuning Controller for Generator Excitation Control / D. Xai, G. T. Heydt // IEEE Trans Pas. – 1983. – Vol. 102. – P. 1877–1885.
- Larsen, E. Applying Power System Stabilizers / E. Larsen, D. Swann // IEEE Trans Pas. – 1981. – Vol. 100 (6). – P. 3017–3046.
- Tse, G. T. Refinement of Conventional PSS Design in Multi-Machine Systems by Modal Analysis / G. T. Tse, S. K. Tso // IEEE Trans PWRS. – 1993. – Vol. 8 (2). – P. 598–605.
- Application of Power Systems Stabilizers for Enhancement of Overall Systems Stability / P. Kundur [et al.] // IEEE Trans PWRS. – 1989. – Vol. 4 (2). – P. 614–626.
- IEEE Working Group. IEEE Recommended Practice for Excitation Systems Stability studies; IEEE Standard 421.5, 2005.
- ABB, UNITROL stand-alone PSS, 3ВНТ 490 395 P0101, 2005. Available: [http // www.abb.com/unitrol](http://www.abb.com/unitrol)
- Осак, А. Б. Блоки расчета токов короткого замыкания и моделирования электромеханических процессов в ПВК АНАРЭС-2000 / А. Б. Осак, А. В. Домышев, Е. И. Ушаков.
- Kennedy, J. Particle Swarm Optimization / J. Kennedy, R. C. Eberhart // Proceeding IEEE International Conference on Networks. Vol. IV. 1942–1948. – Piscataway, NJ, IEEE Center, 1995.
- Bomfim, A. L. Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithm / A. L. Bomfim, G. N. Tarnto, D. M. Falkao // IEEE Trans Power System. – 2000. – Vol. 15, № 1. – P. 163–169.
- ETAP® PowerStation® 4.0 User Guide. Volume II, Analysis Modules.

Поступила 05.10.2010