

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (05.14.02)

УДК 621.311

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-11-20

Условия устойчивости электроэнергетической системы при применении автоматического регулятора возбуждения пропорционального действия синхронного генератора

И.С. Зубкова, О.Н. Кузнецов

Цель работы — исследование эффективности применения автоматического регулятора возбуждения пропорционального действия (АРВ ПД) синхронного генератора с учетом демпферных контуров для обеспечения статической устойчивости электроэнергетической системы.

Изучение эффективности применения АРВ ПД синхронного генератора проведено для установленных стандартом АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.29.160.20.001-2012 «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов» схемно-режимных ситуаций с применением программно-вычислительного комплекса ЕТАР путем выполнения расчетов электромеханического переходного процесса и оценки соответствия характера протекания процесса требованиям стандарта в части интенсивности затухания переходного процесса.

Определены параметры схемы замещения генератора, оказывающие наибольшее влияние на демпфирование синхронных качаний, показано влияние учета демпферных контуров на характер переходного процесса системы с АРВ ПД. Расчетные исследования продемонстрировали эффективность применения АРВ ПД (удовлетворяет требованиям стандарта АО «СО ЕЭС» по интенсивности затухания колебаний режимных параметров) для синхронных генераторов станций, работающих через электропередачу на приемную систему.

Установлено, что по мере роста номинальной мощности синхронного генератора ухудшаются его демпферные свойства. Наилучшие результаты применения АРВ ПД имеют место с генераторами мощностью 100...200 МВт.

В случае сложной системы также достигнуто удовлетворительное демпфирование параметров переходного режима.

Полученные результаты исследования определяют возможность применения АРВ ПД на генераторах мощностью от 100 до 200 МВт и могут быть применены при выборе типа регулятора возбуждения синхронного генератора. Установка АРВ ПД не нуждается в выборе настроечных параметров каналов стабилизации.

Расчеты электромеханических переходных процессов в ЭЭС с синхронными генераторами, снабженными АРВ ПД, следует проводить с применением моделей генераторов, учитывающих демпферные контуры. АРВ ПД эффективно работает с генераторами номинальной мощностью 200 МВт и менее.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, автоматический регулятор возбуждения пропорционального действия, статическая устойчивость, демпфирование колебаний.

Для цитирования: Зубкова И.С., Кузнецов О.Н. Условия устойчивости электроэнергетической системы при применении автоматического регулятора возбуждения пропорционального действия синхронного генератора // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 11—20. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-11-20.

Power System Stability Conditions in Fitting the Synchronous Generator with a Proportional Automatic Excitation Controller

I.S. Zubkova, O.N. Kuznetsov

The effectiveness of using a proportional automatic excitation controller (AEC-P) for a synchronous generator taking into account the generator damper circuits for maintaining power system steady-state stability is studied.

The effectiveness of applying a synchronous generator's AEC-P is studied with reference to the power system contingencies specified by the JSC Unified Energy System Operator (SO UES) standard STO 59012820.29.160.20.001-2012 "Requirements for the Excitation Systems and Automatic Voltage Regulators Combined with Power System Stabilizers for Synchronous Generators" with the use of the ETAP software and computing system by numerically analyzing electromechanical transients and assessing the extent to which the process pattern complies with the requirements of the standard in terms of transient damping intensity.

The generator equivalent circuit parameters having the strongest influence on the damping of synchronous swings are determined, and it is shown how the consideration of generator damping circuits influences the pattern of transients in the system equipped with an AEC-P. The numerical study results have demonstrated the effectiveness of applying an AEC-P (i.e., that it meets the requirements specified by the JSC SO UES standard in terms of operating parameters oscillation damping intensity) for power plant synchronous generators operating on the receiving system via a power transmission line.

It has been established that the synchronous generator's self-damping properties tend to degrade with increasing the generator rated capacity. The best results from applying an AEC-P are obtained for generators having rated capacities ranging from 100 to 200 MW.

Satisfactory damping of transient parameters has also been achieved for a complex power system.

The obtained study results have demonstrated the possibility of applying AEC-P systems for generators with rated capacities ranging from 100 to 200 MW and can be used in choosing the type of a synchronous generator's excitation controller. In the case of using an AEC-P, there is no need of tuning the stabilization channels' parameters.

Electromechanical transients in electric power systems containing synchronous generators equipped with AEC-P should be numerically analyzed with using generator models that take into account their damping circuits. An AEC-P shows efficient performance when installed in generators with a rated capacity of 200 MW or less.

Key words: electric power system, proportional automatic excitation controller, steady-state stability, damping of oscillations.

For citation: Zubkova I.S., Kuznetsov O.N. Power System Stability Conditions in Fitting the Synchronous Generator with a Proportional Automatic Excitation Controller. Bulletin of MPEI. 2020;1:11—20. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-11-20.

Введение

Генераторы современных электрических станций снабжаются автоматическими регуляторами сильного действия (АРВ СД) [1], обеспечивающими высокие демпфирующие способности и значительную область устойчивости генерирующего оборудования в составе электроэнергетической системы. При этом требуется выполнение работ по выбору значений настроечных параметров: коэффициентов усиления и постоянных времени в передаточных функциях звеньев регулятора. Также генераторы могут функционировать под управлением АРВ пропорционального действия (ПД), которое не требует настройки в таком объеме как АРВ СД. Известно, что АРВ ПД не может иметь большое значение коэффициента усиления основного канала регулирования по отклонению напряжения на зажимах генератора [2], поскольку большие значения указанного коэффициента приводят к самораскачиванию генератора. Стоит отметить, что такая ситуация наблюдается, если не моделируются демпферные контуры синхронного генератора, т. е. не учитываются естественное демпфирование колебаний режимных параметров и инерционность возбудителя.

Постановка задачи исследования

Решение основной задачи существования электро-энергетической системы (ЭЭС) — обеспечение надеж-

ного и экономичного электроснабжения потребителей предъявляет к системе ряд требований. В каждый момент времени ЭЭС подвергается большому количеству возмущений как больших, так и малых, при этом ее работоспособность при воздействии нормативных возмущений не должна нарушаться [3]. Способность системы сохранять исходный режим или режим, близкий к исходному, называют устойчивостью. Для обеспечения устойчивости при больших возмущениях, например, коротких замыканиях, требуются значительные управляющие воздействия на систему, такие как форсировка возбуждения, аварийное управление мощностью турбины и т. п. [4, 5]. Для поддержания устойчивости ЭЭС при малых возмущениях необходимы управляющие воздействия, меньшие по величине, например, автоматическое регулирование возбуждения, управление продольной компенсацией электропередачи [6 — 8].

Независимо от типа регулятора возбуждения при больших возмущениях (коротких замыканий, отключения оборудования) работает форсировка возбуждения, и устойчивость генерирующего оборудования в этом случае достигается с ее помощью. В случае же малых возмущений (отключения и включения небольших объемов нагрузки, коммутации линий низшего класса номинального напряжения), демпфирование качаний режимных параметров генерирующего оборудования происходит за счет стабилизирующего действия регу-

лятора возбуждения и демпферных свойств генератора [2, 9].

В соответствии со стандартом [1] на генераторах следует устанавливать АРВ СД с быстродействующими системами возбуждения (СВ) [10]. При соответствующем выборе значений настроечных параметров с помощью АРВ СД и форсировки возбуждения будет получена устойчивость ЭЭС во всех расчетных нормальных и аварийных режимах работы.

В ряде источников показано, что при обеспечении высокой точности поддержания напряжения (1...2%) на шинах генератора с помощью АРВ ПД возникает нарушение устойчивости ЭЭС [2, 9]. Однако стоит отметить, что устойчивость ЭЭС нестабильна и в случае применения модели генератора без учета его демпферных контуров. Кроме того, известно, что демпферные свойства генераторов увеличиваются при уменьшении их номинальной мощности.

Таким образом, необходимо провести сопоставительное исследование эффективности применения АРВ ПД с учетом демпферных свойств синхронного генератора.

Ввиду усложнения математической модели генераторов и энергосистемы в целом при учете демпферных контуров генераторов, исследование электромеханического переходного процесса ЭЭС целесообразно выполнять в программно-вычислительном комплексе ЕТАР, позволяющем проводить расчеты при представлении синхронных генераторов полной моделью Парка–Горева с учетом системы возбуждения [2, 9, 11].

Математическая модель электроэнергетической системы

Для расчетов электромеханических переходных процессов и установившихся режимов опишем электрическую сеть ЭЭС узловыми уравнениями в форме балансов мощностей.

Синхронный генератор для моделирования электромеханических переходных процессов содержит уравнения механического движения ротора, электромагнитных переходных процессов в статорных и роторных обмотках (уравнения Парка–Горева) и уравнения баланса мощности в генераторном узле.

Уравнения движения ротора:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0;$$

$$\frac{T_J}{\omega_{ном}} \frac{d\omega}{dt} = M_*^T - M_*^{эл},$$

где δ — угол ротора генератора; ω — угловая скорость вращения ротора; T_J — постоянная инерции генератора; ω_0 — угловая скорость вращения вектора напряжения шин бесконечной мощности; M_*^T — момент вращения турбины, $M_*^T = M_*^T(\omega_T)$

Определение электромагнитного момента генератора:

$$M_{эл} = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d,$$

где $\omega_{ном} = 2\pi f_0 = 18000$ эл. град/с $\approx 314,16$ рад/с — номинальная угловая скорость вращения электромагнитного поля обмотки возбуждения, соответствующая номинальной частоте $f_{ном} = 50$ Гц.

Уравнения электромагнитных переходных процессов в статорных и роторных обмотках запишем в соответствии со схемой замещения синхронного генератора рис. 1, а, б [9, 11]

Уравнения переходных процессов в обмотке статора:

$$u_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega - R i_d;$$

$$u_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \omega - R i_q;$$

$$u_0 = \frac{d\Psi_0}{dt} - R i_0,$$

где u_d, u_q — проекции напряжения на оси d и q ; u_0, Ψ_0, i_0 — нулевые составляющие напряжения, потокосцепления и тока; Ψ_d, Ψ_q — потокосцепления по осям d и q ; i_d, i_q — проекции тока на оси d и q ; R — активное сопротивление обмоток статора генератора.

Уравнения переходных процессов в обмотке ротора и демпферных контурах по осям d и q :

$$\begin{cases} u_{fd} = \frac{d\Psi_{fd}}{dt} + R_{fd} i_{fd}; \\ 0 = \frac{d\Psi_{1d}}{dt} + R_{1d} i_{1d}; \end{cases}$$

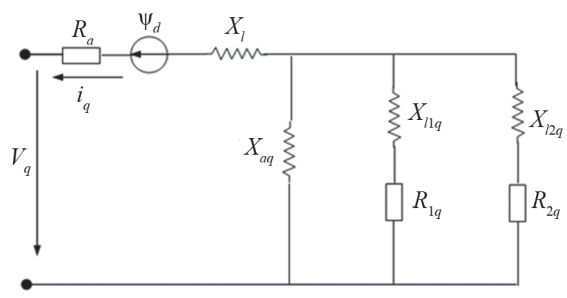
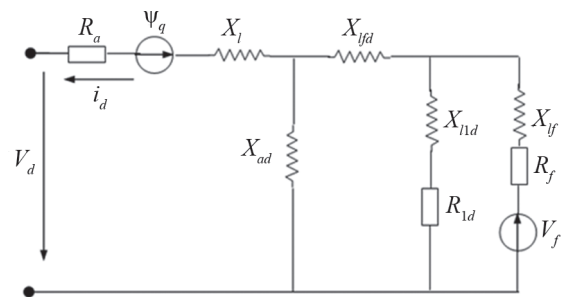


Рис. 1. Схемы замещения генератора по осям d (а) и q (б)

$$\begin{cases} 0 = \frac{d\psi_{1q}}{dt} + R_{1q}i_{1q}; \\ 0 = \frac{d\psi_{2q}}{dt} + R_{2q}i_{2q}, \end{cases}$$

где u_{fd} , ψ_{fd} , R_{fd} , i_{fd} — напряжение, потокоцепление, активное сопротивление и ток обмотки возбуждения; ψ_{1d} , R_{1d} — потокоцепление и активное сопротивление продольного демпферного контура; i_{1d} — ток, протекающий по продольному демпферному контуру.

Входящие в данные уравнения потокоцепления определим как

$$\begin{cases} \psi_d = -(L_{ad} + L_1)i_d + L_{ad}i_{fd} + L_{ad}i_{1d}; \\ \psi_q = -(L_{aq} + L_1)i_q + L_{aq}i_{1q} + L_{aq}i_{2q}; \\ \psi_0 = -L_0i_0; \\ \psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{f1d}i_{1d} - L_{ad}i_d; \\ \psi_{1d} = L_{ffd}i_{fd} + L_{11d}i_{1d} - L_{ad}i_d; \\ \psi_{1q} = L_{11q}i_{1q} + L_{aq}i_{2q} - L_{aq}i_q; \\ \psi_{2q} = L_{aq}i_{1q} + L_{22q}i_{2q} - L_{aq}i_q. \end{cases}$$

Для расчетов электромеханических переходных процессов ЭЭС применяется та же упрощенная модель синхронного генератора без учета демпферных контуров по продольной и поперечной осям.

Уравнения баланса мощности в генераторном узле выглядят как

$$\begin{cases} P_{ri} - P_{cri} = 0; \\ Q_{ri} - Q_{cri} = 0. \end{cases}$$

Условия колебательной статической устойчивости (КСУ) ЭЭС исследуем с учетом различных систем возбуждения как медленно-, так и быстродействующих с АРВ ПД в соответствии со стандартом IEEE Standard 421.5—2016.

Для примера на рис. 2 приведена схема медленнодействующей системы возбуждения с АРВ пропорци-

онального действия с гибкой обратной связью (ГОС) второго порядка IEEE_type 2.

Схема системы возбуждения IEEE_type 1 отличается от IEEE_type 2 тем, что ГОС представлена реальным дифференцирующим звеном, описываемым передаточной функцией:

$$\frac{sK_F}{(1 + sT_F)}$$

В качестве первичного двигателя рассматривается паровая турбина с регулятором скорости вращения.

Параметры схемы замещения демпферных контуров

Применение модели генератора с учетом демпферных контуров подразумевает ввод в поля расчетной программы ряда значений параметров, характеризующих демпферные обмотки [9]:

$$T''_{d0} = T''_d \frac{x'_d}{x''_d},$$

где T''_{d0} , T''_d — сверхпереходные постоянные времени по продольной оси при разомкнутой и замкнутой накоротко обмотках якоря; x'_d , x''_d — синхронное и сверхпереходное индуктивные сопротивления по продольной оси.

$$T'_{d0} = T_{d0} + T_{yd0} - T''_{d0},$$

где T'_{d0} — переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря; T_d — постоянная времени обмотки возбуждения; $T_{yd0} \cong (0,1...0,2)$, $T_{yad0} \cong (0,2...0,4)$ — постоянные времени демпферной обмотки явнополюсной и неявнополюсной машин.

Для демпферного контура по оси q:

$$x'_q = x_q,$$

где x'_q — переходное индуктивное сопротивление по поперечной оси; x_q , x_d — синхронные индуктивные

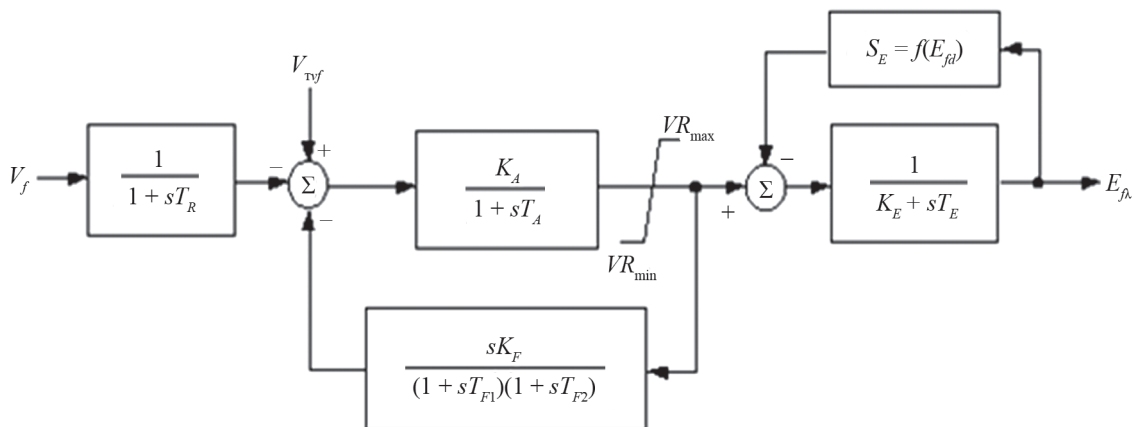


Рис. 2. Схема СВ IEEE type 2

сопротивления по поперечной и продольной осям, $x_q = 0,9x_d$.

$$x_q'' = \frac{x_2^2}{x_d''},$$

где x_q'' — сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси; x_2 — индуктивное сопротивление обратной последовательности.

Пусть $T_q'' = T_d''$ — сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при замкнутой накоротко обмотке статора, тогда

$$T_{q0}'' = T_q'' \frac{x_q'}{x_q''},$$

где T_{q0}'' — сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке статора.

Для двух демпферных контуров по оси q расчет параметров протекает так же, как и для оси d .

Переходную постоянную времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке статора примем $T_{q0}' = 3$.

В свою очередь, описанные постоянные времени по-разному влияют на устойчивость системы в переходном процессе. Наибольшее воздействие на демпфирование колебаний оказывает изменение сверхпереходной постоянной времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря.

Выполнен расчет всех неизвестных постоянных времени, требуемых для корректного ввода данных моделей синхронных машин различной мощности с учетом демпферных контуров, результаты сведены в табл. 1.

Расчетное исследование влияния демпферных контуров синхронных генераторов.

Расчет переходного режима проводили в схеме станция — электропередача — шины бесконечной

мощности, на генераторе станции установлен АРВ ПД. Результаты расчетов переходного режима с учетом и без учета демпферных контуров даны на рис. 3, 4 ($\delta(t)$ — зависимость угла ротора генератора от времени).

Из представленных графических зависимостей рис. 3, 4 следует, что учет демпферных контуров генератора влечет за собой интенсивное уменьшение колебаний угла в переходном процессе, в отличие от случая представления генератора без этих контуров. Очевидно, что при АРВ ПД с большими значениями коэффициента усиления по отклонению напряжения будет возникать самораскачивание [2], поэтому отсутствие факторов демпфирования в системе (демпферных контуров генератора и турбины с регулятором скорости) заведомо ведет к нарушению устойчивости, что не позволяет адекватно оценивать область применения АРВ ПД. Следовательно, в дальнейшем синхронный генератор будет представлен моделью с учетом демпферных контуров.

Важно отметить, что с возрастанием номинальной мощности СГ интенсивность демпфирования колебаний посредством демпферных контуров машины снижается.

Оценка эффективности применения автоматических регуляторов сильного действия в простейшей системе

Рассмотрена модель простейшей энергосистемы, состоящая из электрической станции (ЭС) с одним синхронным генератором (СГ), повышающего трансформатора (Тр), воздушной линии электропередачи (ВЛЭП или ВЛ), автотрансформатора связи (АТр) и внешней приемной энергосистемы (С), эквивалентированной и представленной шинами бесконечной мощности (ШБМ) (рис. 5).

В качестве объекта исследований выступают синхронные генераторы разной мощности (200, 300, 500, 800, 1000 МВт), устанавливаемые на станции. Каждый генератор в свою очередь снабжен АРВ ПД различного типа: IEEE_type1, IEEE_type2, IEEE_type1S и IEEE_AC4A [12].

Качество переходных процессов изучим путем оценки длительности и интенсивности колебаний параметров электрического режима после приложения к системе определенных возмущений. В качестве возмущающего воздействия [1] используем трехфазное короткое замыкание (КЗ) длительностью 0,02 с, моделируемое на шинах станции (шина 2), к которым через трансформатор подключен синхронный генератор с исследуемыми СВ. В соответствии с [1], при расчете переходного процесса рассмотрим два характерных режима работы системы:

- режим номинальной загрузки синхронного генератора по активной и реактивной мощностям при номинальном напряжении статора в нормальной схеме системы N ;

Таблица 1

Параметры синхронных генераторов

Параметр	Значение				
$P_{ном}$, МВт	220	300	500	800	1000
cosφ	0,850	0,85	0,85	0,90	0,90
x_d , %	197,0	219,5	241,3	233,0	282,0
x_d' , %	29,00	30,00	37,30	30,70	38,20
x_d'' , %	20,00	19,50	24,30	21,90	26,90
x_2 , %	24,00	23,80	29,60	26,70	32,80
T_{d0} , с	6,400	7,000	6,300	9,300	9,600
T_{d0}' , с	8,320	9,100	8,190	12,09	12,48
T_d'' , с	0,120	0,120	0,120	0,150	0,220
T_{d0}'' , с	0,170	0,180	0,190	0,210	0,310
x_q' , %	177,30	197,55	217,17	209,70	253,80
x_q'' , %	28,80	29,05	36,06	32,55	39,99
T_{q0}'' , с	0,720	0,810	0,730	0,970	1,400

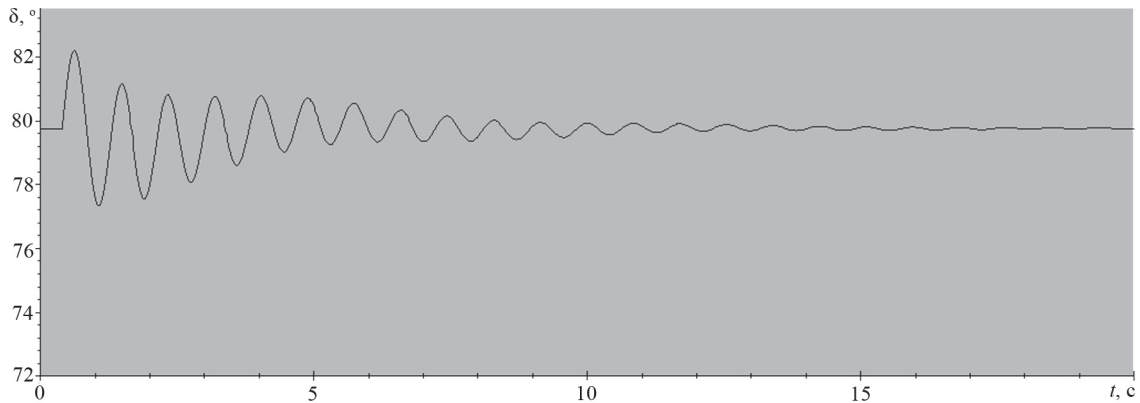
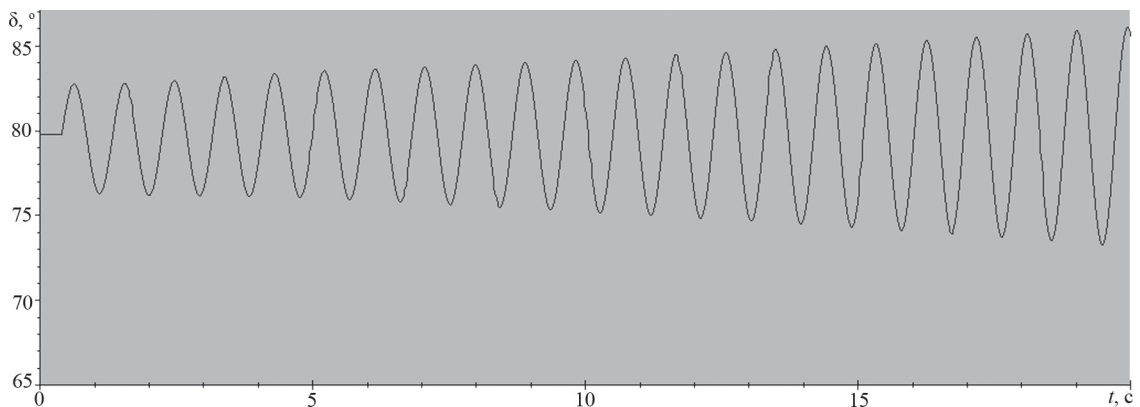
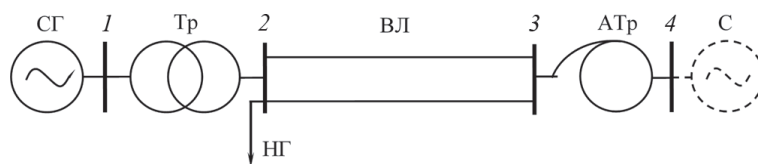
Рис. 3. Зависимость $\delta(t)$ в случае применения модели генератора с учетом демпферных контуровРис. 4. Зависимость $\delta(t)$ в случае применения модели генератора без учета демпферных контуров

Рис. 5. Схема простейшей ЭЭС

- послеаварийный режим работы сети, моделируемый отключением одной цепи линии электропередач $N - 1$.

В процессе расчета регистрируются следующие параметры электрохимического переходного процесса:

- активная мощность синхронного генератора $P(t)$;
- угол ротора генератора $\delta(t)$.

Основным критерием обеспечения требуемого качества демпфирования колебаний электрохимического переходного процесса является непревышение размахом колебаний активной мощности генератора станции 6%-й величины мощности генератора, предшествующей возмущающему воздействию, начиная с момента времени, отстающего на 15 с после моделирования короткого замыкания [1].

Результаты расчетов всех схемно-режимных ситуаций представлены в табл. 2.

Анализируя полученные результаты расчетов переходных процессов, стоит отметить, что имеет место неудовлетворительное демпфирование качаний в после-

аварийном режиме в системе с машинами номинальной мощностью 800 и 1000 МВт при установке СВ IEEE_AC4A, что можно объяснить меньшей эффективностью демпферных контуров у машин большей мощности. При применении СВ IEEE_type2 отмечено менее интенсивное демпфирование колебаний параметров режима, что связано с качаниями напряжения на зажимах генератора, вызванными действием гибкой обратной связи со звеном второго порядка в СВ генератора. Колебания напряжения на зажимах генератора при применении данной СВ затухают через 60 с.

Оценка эффективности применения автоматических регуляторов пропорционального действия в сложной системе

Аналогично процедуре оценки эффективности применения АРВ ПД в схеме простейшей ЭЭС осуществляется и оценка эффективности применения АРВ ПД в сложной системе. В соответствии с [1] изучим схемно-режимную ситуацию, представленную на рис. 6.

Таблица 2

Демпфирование колебаний параметров режима в переходном процессе

Тип регулятора	$P_{г.ном}, \text{ МВт}$									
	200		300		500		800		1000	
	N	$N-1$	N	$N-1$	N	$N-1$	N	$N-1$	N	$N-1$
IEEE_type1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
IEEE_type2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
IEEE_type1S	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
IEEE_AC4A	+	+	+	+	+	+	+	—	+	—

Примечание: + — удовлетворительно; — — неудовлетворительно

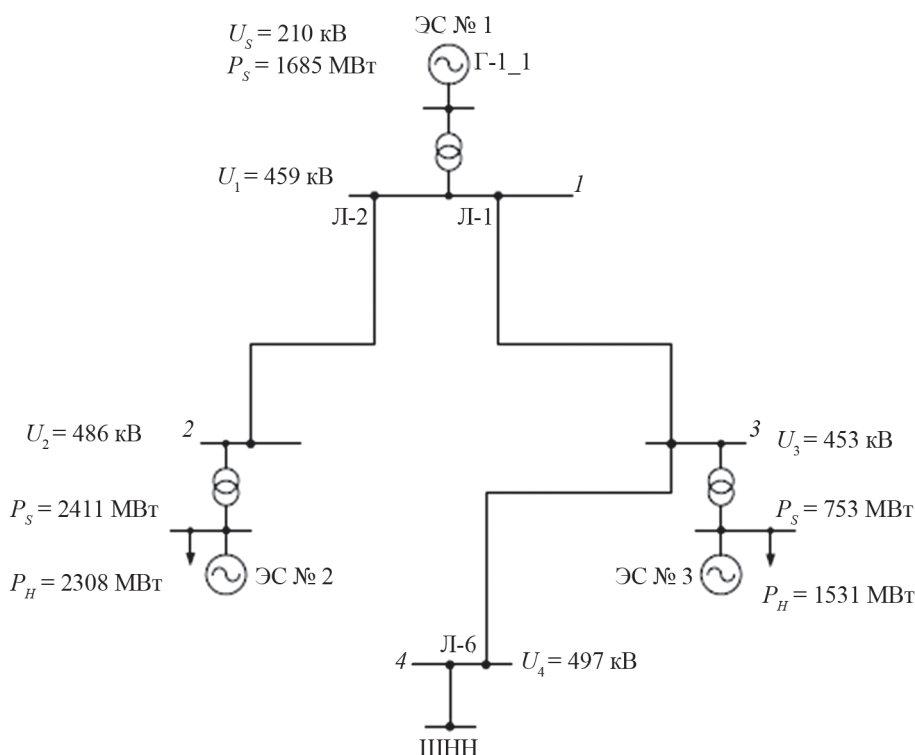


Рис. 6. Схемно-режимная ситуация исследуемой системы

Схема исследуемой ЭЭС и ее режим созданы в ПВК ЕТАР 16.2.0. Параметры элементов математической модели энергосистемы даны в табл. 3 — 6. В качестве возмущающего воздействия смоделировано трехфазное короткое замыкание на шине 1 длительностью 0,02 с.

Так как представленная сеть выполнена на номинальное напряжение 500 кВ, то выбираем соответствующую марку провода воздушной линии АС-330/43. В соответствии с выбранной маркой провода и параметрами моделей линий электропередач были рассчитаны их длины и представлены в табл. 3.

На исследуемый генератор Г-1_1 установим регуляторы возбуждения, исследованные в простейшей системе, и проведем расчеты переходных процессов. Зафиксируем изменение угла ротора генератора во времени для регуляторов типа IEEE_type 1 (рис. 7) и IEEE_type 2 (рис. 8). Для остальных регуляторов (IEEE_type1S и IEEE_AC4A) получены схожие кар-

Таблица 3

Длины линий электропередач

Номера узлов замыкания	Обозначение	Длина, км
1 — 2	Л-2	160
1 — 3	Л-1	327
3 — 4	Л-6	165

тины изменения угла ротора генератора во времени с регулятором типа IEEE_type 1.

Как и в случае расчета переходного процесса в простейшей ЭЭС все регуляторы, устанавливаемые на генераторе Г-1_1, кроме регулятора IEEE_type 2, позволяют обеспечить требуемое качество демпфирования колебаний электромеханических переходных процессов.

Таблица 4

Параметры моделей синхронных генераторов [4]

Параметр	Значение		
	Г-1_1	Г-2	Г-3
Наименование	Г-1_1	Г-2	Г-3
Модель АРВ	АРВ-СД	АРВ-П	
Модель турбины и РС	—	1	—
$S_{ном}$, МВА	2500	9000	2500
$U_{ном}$, кВ	210	230	
$\cos\varphi$	0,8		
X_d , о. е.	0,065	0,060	0,053
X_d' , о. е.	1,885	1,049	1,334
X_d'' , о. е.	0,184	0,287	0,143
X_q , о. е.	0,098	0,090	0,079
X_q' , о. е.	1,650	0,900	1,181
X_q'' , о. е.	0,112	0,110	0,090
R_a , о. е.	0,020	0,012	0,027
T_{d0}' , о. е.	8,125	7,198	5,574
T_{d0}'' , о. е.	0,042	0,092	0,039
T_{q0}'' , о. е.	0,060	0,110	0,056
X_{σ} , о. е.	0,130		
T_J , с	6,700	6,900	8,400
D , о. е.	0,000		

Таблица 5

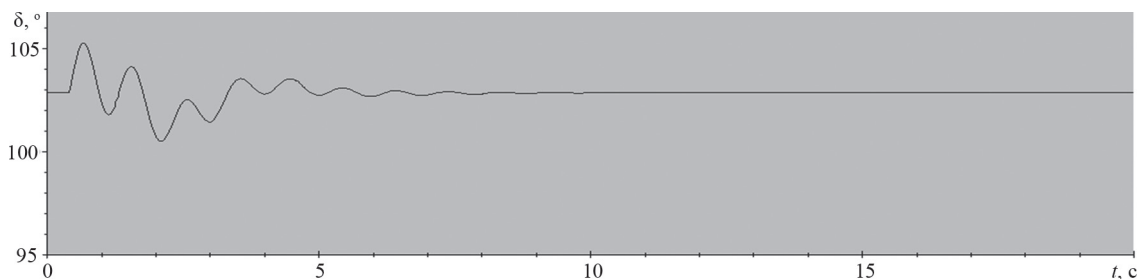
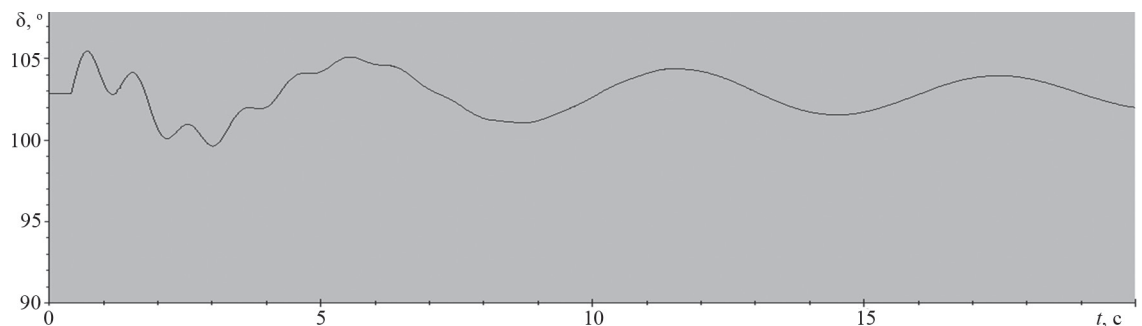
Параметры моделей трансформаторов

Параметр	Модель трансформатора		
	Т-1_1	Т-2	Т-3
$S_{ном}$, МВА	2000		
U_B , кВ	500		
U_{H1} , кВ	212,5	220,0	233,5
P_x , МВт	52,50	108,5	84,00
P_k , МВт	22,50	6,800	57,00
u_k , %	12,72	4,090	10,34
I_{Σ} , %	3,620	7,360	5,690

Таблица 6

Параметры моделей автоматических регуляторов возбуждения

Параметр	Модель АРВ		
	АРВ-СД Г-1_1	АРВ-П Г-2	АРВ-П Г-3
K_{0U} , е.в.н./е.н.с.	50	1,0	25
K_{1U} , е.в.н./е.н.с./с	4,7	—	—
$K_{0\gamma}$, е.в.н./Гц	2,0	—	—
$K_{1\gamma}$, е.в.н./Гц/с	3,1	—	—
$K_{1\gamma\gamma}$, е.в.н./е.в.н.р./с	0,7	—	—
$U_{fdownlim}$, е.в.н.	-1,70	-0,15	0,06
U_{fuplim} , е.в.н.	1,72	2,10	2,50

Рис. 7. Зависимость изменения угла ротора генератора δ во времени для регуляторов типа IEEE_type 1Рис. 8. Зависимость изменения угла ротора генератора δ во времени для регуляторов типа IEEE_type 2

Установка на генератор G-1_1 регулятора IEEE_тире 2 приводит к возникновению качаний напряжения на зажимах генератора, не затухающих в течение длительного времени.

Заключение

Проведено сопоставительное исследование эффективности применения АРВ ПД с учетом демпферных свойств синхронного генератора и получены следующие результаты.

Расчет электромеханических переходных процессов ЭЭС для оценки эффективности применения АРВ ПД следует выполнять при применении модели синхронного генератора, учитывающей демпферные контуры синхронного генератора по продольной и поперечной осям, в противном случае будет иметь место заужение области применения данного типа АРВ по причине возникновения самораскачивания.

Литература

1. **СТО 59012820.29.160.20.001—2012.** Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов.
2. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985.
3. **Приказ** Минэнерго России № 277 от 30 июня 2003 г. «Методические указания по устойчивости энергосистем».
4. **СТО 59012820.29.020.004—2018.** Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика. Нормы и требования.
5. **Совалов С.А., Семенов В.А.** Противоаварийное управление в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. **Павлушко С.А.** Автоматическое регулирование возбуждения синхронных генераторов как эффективный инструмент обеспечения надежности параллельной работы генерирующего оборудования и ЭЭС в целом // Электрические станции. 2012. № 7. С. 16—22.
7. **Юрганов А.А., Кожевников В.А.** Регулирование возбуждения синхронных генераторов. СПб.: Наука, 1996.
8. **Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г.** Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: Торус Пресс, 2011.
9. **Machowski J., Bialek J.W., Bumby J.R.** Power System Dynamics and Stability. N.-Y.: John Wiley & Sons Ltd, 1997.
10. **Коротков В.Ф.** Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах. М.: Издат. дом МЭИ, 2013.
11. **Kundur P.** Power System Stability and Control. N.-Y.: McGraw-Hill, 1994.
12. **IEEE Standard 421.5—2016.** Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.

Наиболее сильно выражены демпферные свойства у генераторов меньшей мощности, следовательно, более целесообразна работа АРВ ПД с генераторами меньшей мощности.

Использование АРВ ПД в составе медленно- и быстродействующей систем возбуждения позволяет обеспечить требуемое, в соответствии с [1], демпфирование колебаний параметров переходного процесса за исключением применения СВ IEEE_type2.

Результаты исследования влияния различных типов систем возбуждения на демпфирование колебаний переходных процессов в простейшей и сложной ЭЭС показали, что при установке на разных агрегатах СВ разных типов демпфирование параметров переходного процесса отвечает требованиям стандарта СТО 59012820.29.160.20.001—2012.

References

1. **СТО 59012820.29.160.20.001—2012.** Trebovaniya k Sistemam Vozbuzhdeniya i avtomaticheskim Regulyatoram Vozbuzhdeniya Sil'nogo Deystviya Sinkhronnykh Generatorov. (in Russian).
2. **Venikov V.A.** Perekhodnye Elektromekhanicheskie Protssesy v Elektricheskikh Sistemakh. M.: Vysshaya Shkola, 1985. (in Russian).
3. **Prkaz** Minenergo Rossii № 277 ot 30 Iyunya 2003 g. «Metodicheskie Ukazaniya po ustoychivosti energosistem». (in Russian).
4. **СТО 59012820.29.020.004—2018.** Releynaya Zashchita i Avtomatika. Avtomaticheskoe Protivoavariynoe Upravlenie Rezhimami Energosistem. Protivoavariynaya Avtomatika. Normy i Trebovaniya. (in Russian).
5. **Sovalov S.A., Semenov V.A.** Protivoavariynoe Upravlenie v Energosistemakh. M.: Energoatomizdat, 1988. (in Russian).
6. **Pavlushko S.A.** Avtomaticheskoe Regulirovanie Vozbuzhdeniya Sinkhronnykh Generatorov kak Effektivnyy Instrument Obespecheniya Nadezhnosti Parallelnoy Raboty Generiruyushchego Oborudovaniya i EES v Tselom. Elektricheskie stantsii. 2012;7:16—22. (in Russian).
7. **Yurganov A.A., Kozhevnikov V.A.** Regulirovanie Vozbuzhdeniya Sinkhronnykh Generatorov. SPb.: Nauka, 1996. (in Russian).
8. **Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G.** Primenenie Gibkikh (Upravlyaemykh) Sistem Elektropredachi Peremennogo Toka v Energosistemakh. M.: Torus Press, 2011. (in Russian).
9. **Machowski J., Bialek J.W., Bumby J.R.** Power System Dynamics and Stability. N.-Y.: John Wiley & Sons Ltd, 1997.
10. **Korotkov V.F.** Avtomaticheskoe Regulirovanie v Elektroenergeticheskikh Sistemakh. M.: Izdat. dom MEI, 2013. (in Russian).
11. **Kundur P.** Power System Stability and Control. N.-Y.: McGraw-Hill, 1994.
12. **IEEE Standard 421.5—2016.** Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.

Сведения об авторах:

Кузнецов Олег Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: KuznetsovON@mpei.ru

Зубкова Ирина Сергеевна — аспирант кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: ZubkovaIS@mail.ru

Information about authors:

Kuznetsov Oleg N. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Power Electrical Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: KuznetsovON@mpei.ru

Zubkova Irina S. — Ph.D.-student of Power Electrical Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: ZubkovaIS@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 31.07.2019

The article received to the editor: 31.07.2019