

УДК 681.513

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С АРВ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ГРАНИЦЕ УСТОЙЧИВОСТИ*

А.В. ЧЕХОНАДСКИХ¹, Г.Б. НЕСТЕРЕНКО²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры алгебры и математической логики. E-mail: chekhonadskikh@corp.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем. E-mail: nesterenkogb@yandex.ru

Применение теории и различных методов исследования и синтеза линейных систем регулирования для нелинейных объектов основывается на классической теореме Ляпунова об эквивалентности устойчивости в малом нелинейной и линеаризованной динамических систем. Синтез стабилизирующего регулятора возбуждения синхронного электрогенератора для линеаризованной системы представляет собой нетривиальную задачу многопараметрической оптимизации. В нелинейном случае эта процедура должна учитывать ряд особенностей. Во-первых, типовым возмущением является скачок напряжения на шинах генератора, воздействовать на которое можно через систему возбуждения, однако при этом устойчивость системы определяется углом электропередачи. Во-вторых, в зависимости от величины такого скачка принято различать статическую и динамическую устойчивость, обеспечение которых, как правило, предусматривает привлечение различных ресурсов. Наконец, установившийся режим предполагает стабилизацию трех взаимосвязанных величин: напряжения, мощности и угла электропередачи. Ранее авторы исследовали вопросы построения оптимального регулятора возбуждения для линеаризованной системы; при этом изменение настроек регулятора в достаточно широких пределах мало влияло на вид и значимые характеристики переходных процессов в нелинейной модели системы генератор – регулятор возбуждения, т. е. система робастна в пространстве параметров управления. Однако определение границ устойчивости для стандартного возмущения в пространстве параметров управления было связано с вычислительными трудностями и составило отдельную задачу. В настоящей работе представляются результаты расчетов действующих величин в нелинейной модели, включающей четырехпараметрический ПИД2-регулятор возбуждения, на границах устойчивости по пропорциональному регулированию. Приводятся типичные виды переходных процессов в замкнутой системе и их особенности в зависимости от величины и знака возмущения (всплеска и просадки напряжения на шинах генератора).

* Статья получена 11 февраля 2017 г.

Ключевые слова: синхронный генератор, автоматическое регулирование возбуждения, регулятор сильного действия, нелинейная модель, линеаризованная модель, стабилизация, степень устойчивости, граница устойчивости

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-2-58-69

ВВЕДЕНИЕ

Исследование многопараметрического автоматического регулирования возбуждения (АРВ) для синхронного генератора по многим причинам остается актуальной задачей. Прежде всего это условия функционирования небольших локальных энергосистем, для которых отключение или подключение любой из нагрузок оказывается заметным возмущением. Далее, возможности силовой электроники позволяют реализовывать многопараметрические законы управления, для которых нет апробированных методов настройки регуляторов возбуждения. Кроме того, локальные сети допускают сочетание различных типов источников, накопителей и потребителей электроэнергии, так что проектироваться они должны с учетом широкой гаммы возможностей, связанных с изменением режима функционирования сети [1].

Классическое разделение устойчивости больших энергосистем на статическую и динамическую было призвано, чтобы обеспечить достаточный запас средств возвращения к нормальному режиму как при небольших штатных, так и при значительных аварийных возмущениях; обеспечение стабильной работы таких систем в подавляющем большинстве возможных ситуаций производится хорошо изученными и апробированными на практике средствами [2, 3].

Для небольших сетей распределенной генерации электроэнергии рамки, отличающие ситуации статической и динамической стабилизации, априори не установлены; в силу этого задачи настройки регуляторов не сводятся к обеспечению некоторой удовлетворительной степени устойчивости, но ориентируются на достижение максимально возможных показателей устойчивости.

Стоит подчеркнуть, что синтез АРВ с точки зрения теории управления затрудняется тем, что регулятор непосредственно влияет на напряжение, а устойчивость энергосистемы контролируется по углу электропередачи.

Оптимальная настройка АРВ в таком случае означает такой выбор коэффициентов усиления регулятора (параметров управления), который обеспечивал бы возможно быструю стабилизацию напряжения генератора U_r при сохранении устойчивости по углу электропередачи δ ; в качестве измеряемых величин берутся отклонение напряжения и его производные [3]. Для линеаризованной модели оптимальные настройки должны обеспечить максимальную

степень устойчивости или, что то же самое, глобальный минимум гурвицевой функции $H(K) = \max \operatorname{Re}(z_1, \dots, z_n)$, где K – вектор коэффициентов усиления регулятора, а z_k – полюса системы (характеристические корни, см. [4]).

Ранее для оптимизации трехпараметрического ПДД₂ закона регулирования возбуждения авторами применялся метод конечного градиента [5, 6]. В модели генератора с четырехпараметрическим ПИДД₂ АРВ, линеаризованной относительно действующих значений установившегося режима, глобальный максимум степени устойчивости достигается при непомерно больших значениях интегрального K_i и пропорционального K_p коэффициентов. Причем стабилизация переходных процессов в нелинейной модели оказывается значительно более медленной, чем можно было бы предполагать по степени устойчивости линеаризованной модели [7]. Нахождение оптимизирующих значений осуществлялось алгебраическим методом с использованием аппарата корневых многочленов [8], там же были найдены оптимальные настройки трех коэффициентов при фиксации практически приемлемых значений интегрального и пропорционального коэффициентов. В работе [9] было показано, что последние обеспечивают высокую робастность замкнутой системы в пространстве параметров управления, т. е. изменение настроек регулятора в широких пределах не оказывает существенного влияния на значения контролируемых величин и характер переходных процессов.

В задачи настоящей работы входило исследование поведения нелинейной модели, построенной стандартными средствами пакета MATLAB Simulink, на границе устойчивости системы. При этом численными пробами определялись крайние значения возмущения при различных значениях коэффициента пропорционального регулирования вблизи его стабилизирующего минимума, т. е. значения $K_{\min} > 0$, которое еще допускает стабилизацию и, в частности, приводит к смещению полюсов линеаризованной системы на мнимую ось: $K_p \rightarrow K_{\min} + 0$. В таком случае разграничение между статической и динамической устойчивостью не проводится. В расчетах параллельно использовались методы Рунге–Кутты и Дормана–Принса. Если результаты различались существенно (т. е. один метод давал стабилизацию переходных процессов, другой – их неограниченное нарастание), то в качестве ответа принимался стабилизирующийся. Значение шага расчета доводилось до такого, дальнейшее уменьшение которого практически не сказывалось на результатах.

Естественная гипотеза поведения переходных процессов вблизи границы устойчивости представлялась в сужении до нуля полосы возмущений напряжения (между просадкой $\Delta_- U$ и всплеском $\Delta_+ U$) за счет одновременного обращения в ноль вблизи предельного значения, т. е. при $K_p \rightarrow K_{\min}$ максимальных отклонений напряжения как вверх, так и вниз: $\lim \Delta_+ U = \lim \Delta_- U = 0$.

Все данные приводятся в относительных единицах (о.е.).

1. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Модель синхронного генератора в качестве объекта задавалась соотношениями, хорошо известными из литературы [2, 3]. Авторы использовали получающуюся систему уравнений для построения модели в пакете MATLAB Simulink и эмпирического нахождения установившегося режима разомкнутой системы [7]. Линеаризованная относительно его действующих значений система служила для определения оптимальных настроек ПИДД₂-регулятора возбуждения (рис. 1). Наибольшая степень устойчивости, или, что то же самое, глобальный минимум гурвицевой функции $H(K) = \max \operatorname{Re}(z_1, \dots, z_n)$ достигался при значениях вектора K параметров управления (коэффициентов усиления), не имеющих инженерного смысла. Были найдены также условные экстремумы при $K_i = 50$ или $K_p = 50$ [7]. Оптимальные для последнего случая настройки интегрального K_i и дифференциальных коэффициентов K_1 и K_2 представлены на рис. 1. В настоящей работе в уравнении связи мощностей турбины (первичного источника энергии) и генератора, в отличие от [7], учитывались потери: $T_j / 18\,000\delta'' + 0,0003\delta' = P_T - P_r(\delta)$.

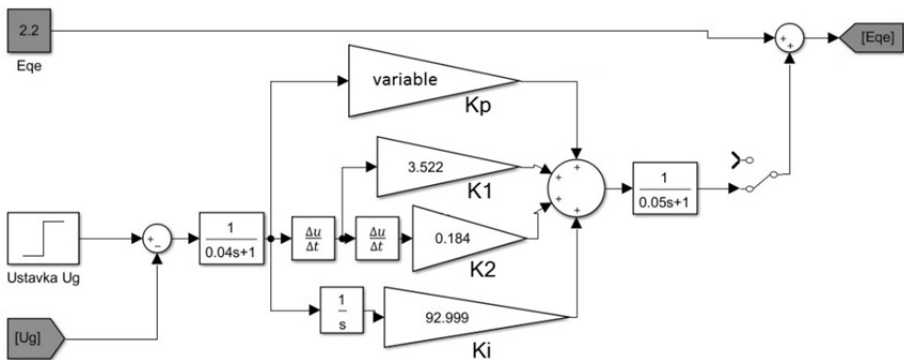


Рис. 1. Схема и настройки ПИДД₂-регулятора вблизи границы устойчивости системы. Коэффициент K_p переменный, остальные фиксированы

Главная задача настоящей работы заключалась в выяснении полосы возмущений $[\Delta_- U_{\min}; \Delta_+ U_{\max}]$, в которой переходные процессы нелинейной модели стабилизируются для различных значений пропорционального коэффициента K_p , близких к предельному значению K_{\min} .

2. ТИПИЧНЫЕ ВИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Параллельно рассчитывались три взаимодействующие характеристики переходных процессов: мощность генератора P_g , угол электропередачи δ и напряжение U_L . На рис. 2 и 3 представлены стабилизирующиеся процессы при $K_p = 3.165$, а также при стандартном $\Delta_+ U = 0.04$ и сниженном $\Delta_+ U = 0.023$ соответственно значениях возмущающего всплеска, подававшегося на 10-й секунде. Процессы развиваются с близким коэффициентом подобия.

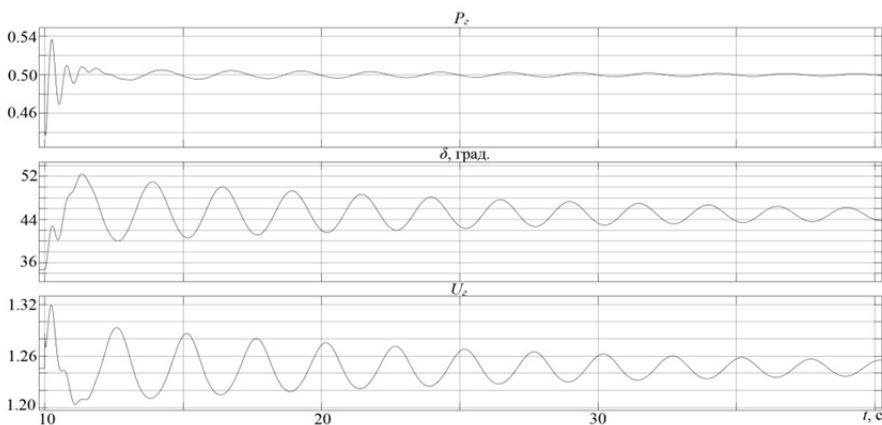


Рис. 2. Стабилизация стандартного возмущения

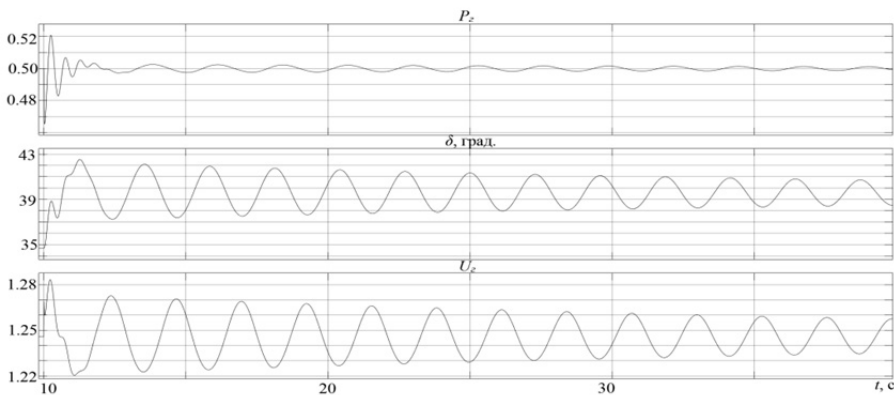


Рис. 3. Стабилизация сниженного возмущения $\Delta_+ U = 0.023$

Увеличение скачка напряжения до $\Delta_+U = 0.065$ при тех же настройках приводит к дестабилизации переходных процессов (рис. 4).

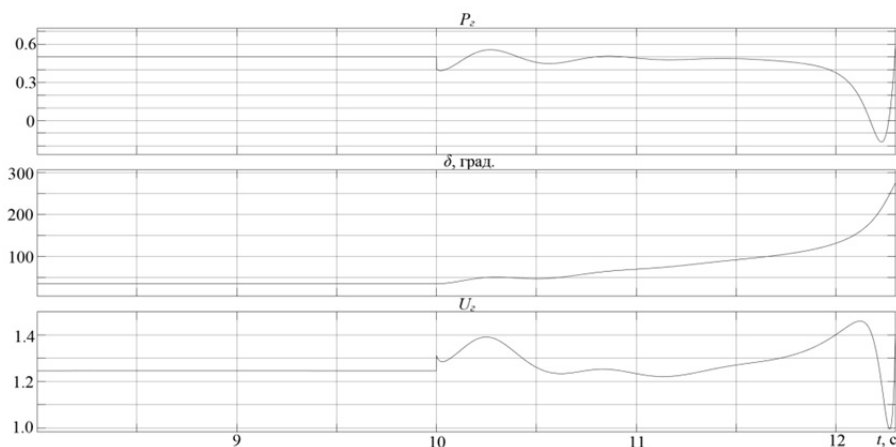


Рис. 4. Потеря устойчивости при увеличенном возмущении $\Delta_+U = 0.065$

Просадка напряжения (отрицательный скачок, например, $\Delta_-U = -0.074$ на рис. 5) задает другую динамику как стабилизирующих, так и расходящихся процессов.

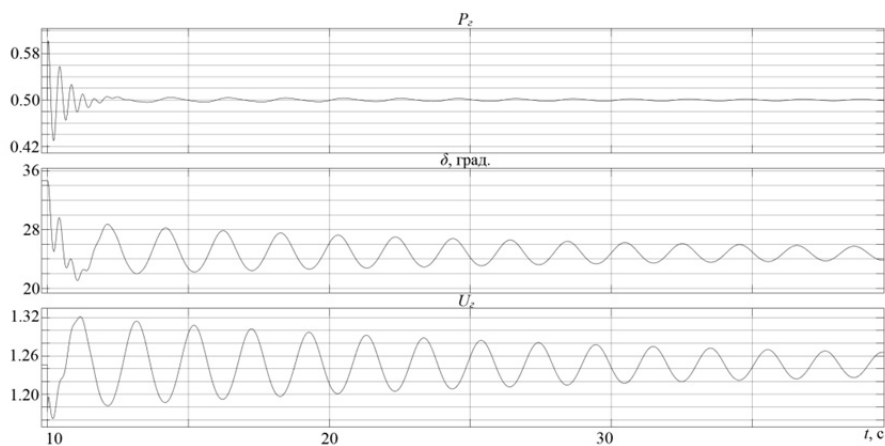


Рис. 5. Стабилизация генератора при просадке напряжения $\Delta_-U = -0.074$

Помимо ситуаций, где наблюдается практически точечная граница между значениями возмущения, ведущими к стабилизации, и значениями, ведущими к опрокидыванию генератора, возникают случаи, близкие к устойчивости по Ляпунову (рис. 6).

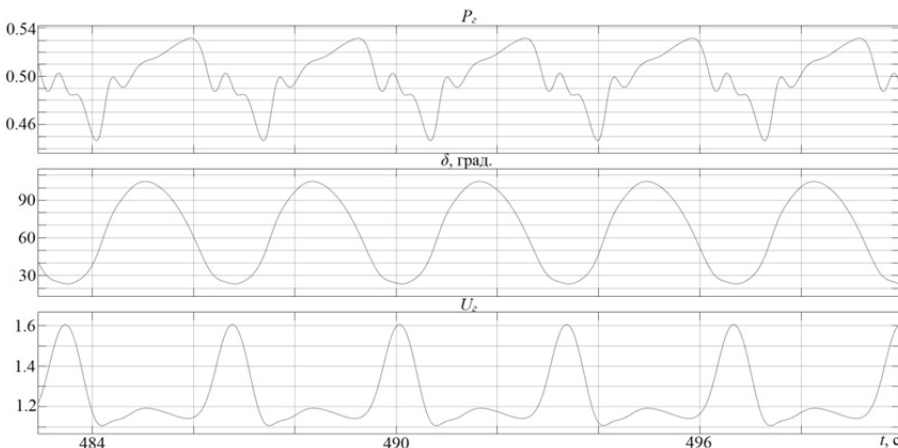


Рис. 6. Установившиеся колебания действующих значений генерации в промежутке между стабилизацией и опрокидыванием генератора

При этом происходит стабилизация переходных процессов на некоторых установившихся колебаниях, амплитуда которых снижается при уменьшении начального возмущения (рис. 6).

3. ПОЛОСА ВОЗМУЩЕНИЙ, ДОПУСКАЮЩИХ СТАБИЛИЗАЦИЮ

Некоторые из результатов нахождения пределов по возбуждению, допускающих стабилизацию при заданном значении K_p , представлены в табл. 1. В частности, $K_{\min} \approx 1.00$ о.е. Поскольку всплеск и просадка напряжения на шинах в численной модели осуществлялись изменением сопротивления, лежащего между шинами генератора и шинами системы (что вполне соответствует практическому смыслу подобных возмущений: отключению или подключению дополнительной линии), то в таблицу внесены предельные значения сопротивления, переключения на которые вызывает стабилизирующийся переходный процесс в зависимости от коэффициента K_p . Всплеск и просадка напряжения, т. е. возмущение $\Delta_{\pm} U$, монотонно (хотя и нелинейно) связаны со значением отклонения этого сопротивления от номинала 2.50 о.е.

Важной особенностью изучавшейся модели оказалось быстрое достижение «дна» по стабилизируемой просадке напряжения, моделируемой скачком выводного сопротивления $2.50 \rightarrow 2.022 \text{ Ом}$.

Таблица 1

Полоса сопротивлений отключаемой линии, допускающая стабилизацию возмущения $\Delta_{\pm}U$ в зависимости от коэффициента K_p

K_p	1	2	3	5	11	50
Верхняя граница по отключаемому сопротивлению (устойчивость к всплеску Δ_+U)	2.663	2.664	2.665	2.667	2.672	2.686
Нижняя граница по отключаемому сопротивлению (устойчивость к просадке Δ_-U)	2.214	2.122	2.022	2.022	2.022	2.022

Другая особенность проявилась в стабилизации переходных процессов при значениях $K_p < K_{\min}$, т. е. в области заведомой неустойчивости линеаризованной модели, в которой должна быть невозможна «стабилизация в малом». За счет этого все множество значений $\Delta_{\pm}U$, допускающих стабилизацию переходных процессов, не должно включать окрестности нуля и должно распадаться на два интервала.

Соответствующие результаты приведены в табл. 2.

Обращает на себя внимание то, что верхний интервал стабилизации отделяется от правой окрестности нуля несколько позже, чем нижний: при $K_p \approx 0.95$ (эти значения выделены в таблице полужирным шрифтом).

Таблица 2

Полосы сопротивлений отключаемой линии, допускающие стабилизацию возмущений всплеска $\Delta_+U_{\min} \leq \Delta_+U \leq \Delta_+U_{\max}$ и просадки $\Delta_-U_{\min} \leq \Delta_-U \leq \Delta_-U_{\max}$ в зависимости от коэффициента $K_p < K_{\min}$

K_p		-22	-21	-8	-7
Верхний интервал сопротивлений (стабилизируемый всплеск Δ_+U)		–	–	–	(2.655; 2.656)
Нижний интервал сопротивлений (стабилизируемая просадка Δ_-U)		–	(2.299; 2.304)	(2.292; 2.318)	(2.290; 2.321)
K_p	-1.5	-1	0	0.95	0.99
Верхний интервал	(2.597; 2.660)	(2.586; 2.661)	(2.554; 2.662)	(2.501; 2.663)	(2.5; 2.663)
Нижний интервал	(2.239; 2.342)	(2.240; 2.341)	(2.233; 2.354)	(2.213; 2.386)	(2.216; 2.389)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоговые результаты отчасти подтверждают гипотезу, высказанную в конце введения. Главные оговорки заключаются в том, что, во-первых, полоса стабилизируемых возмущений на границе устойчивости линеаризованной системы не сужается до нуля, а разделяется на два интервала, не включающих окрестность нуля; во-вторых, верхний и нижний интервалы возмущений (всплески и просадки соответственно) отделяются от нуля не при одном и том же значении коэффициента пропорционального регулирования $K_{\min} \approx 1.00$ о.е., а при слегка различных его значениях.

Стабилизация за пределами устойчивости линеаризованной системы при отсутствии устойчивости в малом исходной нелинейной системы ($K_p < 1.00$) требует дополнительного изучения: возможно, это чисто модельный эффект, не имеющий аналога в реальных электромеханических системах; либо это результат взаимодействия трех связанных величин P_r , δ и U_r , при некоторых условиях, создающего отрицательные обратные связи и обеспечивающего компенсацию возмущения в случае, когда классическая одноканальная система с одной контролируемой величиной должна быть неустойчивой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Armeev D.V., Arestova A.Y., Abramova Y.A.* Microgrid operation under frequency control method // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698: *Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014*. – P. 716–721.
2. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
3. *Жданов П.С.* Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
4. *Чехонадских А.В.* О ступенчато-дифференциальной оптимизации корней характеристического многочлена САУ // *Научный вестник НГТУ*. – 2008. – № 4 (33). – С. 205–208.
5. *Армеев Д.В., Михеев А.В., Чехонадских А.В.* Расчет параметров АРВ синхронного генератора методом модальной оптимизации // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2011. – № 2 (64). – С. 105–116.
6. *Armeev D.V., Chekhondskikh A.V., Voevoda A.A.* Modal optimization of AVR for synchronous generator using the finite gradient // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015): proceedings, Omsk, 21–23 May 2015*. – Omsk: IEEE, 2015. – P. 7147021.

7. Армеев Д.В., Чехонадских А.В., Нестеренко Г.Б. Ресурсы стабилизации напряжения синхронного генератора АРВ сильного действия // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 1. – С. 24–32.

8. Корюкин А.Н., Чехонадских А.В. Предел устойчивости трехмассовой системы с регулятором 3-го порядка. Ч. 2 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 37–56.

9. Nesterenko G.B. Robustness of PID2-control for synchronous generator / research adviser D.V. Armeev // *Aspire to Science: материалы городской научно-практической конференции школьников, студентов, магистрантов и аспирантов*, г. Новосибирск, 12 апреля 2017 г. – Новосибирск, 2017. – С. 142–146.

Чехонадских Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры алгебры и математической логики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления. Имеет более 70 публикаций. E-mail: chekhonadskikh@corp.nstu.ru

Нестеренко Глеб Борисович, магистрант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем. Направление научных исследований – моделирование переходных процессов в энергосистемах. Имеет 8 публикаций. E-mail: nesterenkogb@yandex.ru.

Transient simulation of a synchronous generator with a multiparameter excitation controller at the stability boundary*

A.V. Chekhonadskikh¹, G.B. Nesterenko²

¹ *Novosibirsk State Technical University, Karl Marx prosp. 20, Novosibirsk, 630073, Russia. Doctor of technical sciences, Professor of Algebra and Mathematical Logics Department. E-mail: chekhonadskikh@corp.nstu.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, Karl Marx prosp. 20, Novosibirsk, 630073, Russia. Master's student of Automated Electrical Power Systems Department. E-mail: nesterenkogb@yandex.ru*

The application of the theory and various analysis and design methods of linear control systems for nonlinear ones is based on the classical Alexander Lyapunov's theorem on the equivalence of stability in a small of nonlinear and linearized dynamical system. Stabilizing excitation controller design for a synchronous generator in the linearized case is a non-trivial multiparametric optimization problem. In the nonlinear case this procedure must take into account

* Received 11 February 2017.

a number of features; first, a typical disturbance is a voltage spike on the generator buses, which can be influenced by the excitation system, but the system stability is determined by the power transmission angle; second, it is usual to distinguish between static and dynamic stability depending on a magnitude of such a spike, which provision in the two cases, as a rule, involves the attraction of different resources; finally, the steady-state mode reversion assumes stabilization of three interconnected variables: voltage, power and power transmission angle. Previously we have investigated optimal excitation controller design for a linearized system; at the same time, controller settings changing within a wide range has no sufficient effect on the transient character and significant characteristics in the nonlinear model, i.e. the closed loop system is robust in the control parameters space. However, for the standard perturbation finding of stability boundaries in the control parameter space was associated with computational difficulties and constituted a separate problem. In this paper we present the results of the effective variable calculations in a nonlinear model, including a four-parameter PID2 excitation controller, close to the stability boundary of proportional control coefficient. Typical transient kinds in a closed loop system and their features are given depending on the magnitude and sign of the disturbance (voltage sagging and spike on generator buses).

Keywords: synchronous generator, excitation control, multiparameter controller, nonlinear model, linearized model, stabilization, relative stability, stability boundary

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-2-58-69

REFERENCES

1. Armeev D.V., Arestova A.Y., Abramova Y.A. Microgrid operation under frequency control method. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698. *Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014*, pp. 716–721.
2. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.
3. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [Stability problems of electric systems]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 456 p.
4. Chekhonadskikh A.V. O stupenchato-differentsial'noi optimizatsii kornei kharakteristicheskogo mnogochlena SAU [On gradual-differential characteristic root optimization of automatic control system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2008, no. 4 (33), pp. 205–208.
5. Armeev D.V., Mikheev A.V., Chekhonadskikh A.V. Raschet parametrov ARV sinkhronnogo generatora metodom modal'noi optimizatsii [Calculation of excitation coil controller parameters for synchronous generator by modal optimization method]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2 (64), pp. 105–116.

6. Armeev D.V., Chekhonadskikh A.V., Voevoda A.A. Modal optimization of AVR for synchronous generator using the finite gradient. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*: proceedings, Omsk, 21–23 May 2015, p. 7147021.

7. Armeev D.V., Chekhonadskikh A.V., Nesterenko G.B. Resursy stabilizatsii napryazheniya sinkhronnogo generatora ARV sil'nogo deistviya [Resources of voltage stabilization of a synchronous generator by a multiparametric excitation controller]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2017, no. 1, pp. 24–32.

8. Koryukin A.N., Chekhonadskikh A.V. Predel ustoichivosti trekhmassovoi sistemy s regulyatorom 3-go poryadka. Ch. 2 [Stability limit of the triple mass system with 3rd order controller. Pt. 2]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (67), pp. 37–56.

9. Nesterenko G.B. Robustness of PID2-control for synchronous generator. Research adviser D.V. Armeev. *Aspire to Science: materialy gorodskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii shkol'nikov, studentov, magistrantov i aspirantov* [Aspire to Science. Materials of the city scientific and practical conference of schoolchildren, students, undergraduates and graduate students], Novosibirsk, 12 April 2017, pp. 142–146.