

АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ АГРЕГИРОВАННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ: УПРАВЛЕНИЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРОМ

А.А. КОЛЕСНИКОВ, М.Ю. МЕДВЕДЕВ, А.А. КУЗЬМЕНКО

Таганрогский государственный радиотехнический университет

1. Традиционные подходы к управлению частотой и мощностью турбогенератора

В энергосистемах большой мощности ТГ связаны через линию электропередачи с энергосистемой, которая представлена шинами большой мощности (также применяют эквивалентный термин – шины бесконечной или неограниченной мощности). Распространенная динамическая модель такой системы для одного ТГ имеет вид [1, 2]:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= s, \\ \frac{T_j}{\omega_0} \frac{ds}{dt} &= P_T - E_q^2 y_{11} \sin \alpha_{11} - E_q U_c y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}) + f(t), \\ T'_{d0} \frac{dE_q}{dt} &= -E_q + T_{d0} (x_d - x'_d) U_c s y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}) + U_1, \\ T_T \frac{dP_T}{dt} &= -P_T - k_\sigma s + U_2, \end{aligned} \tag{1}$$

где δ – угол поворота ротора СГ относительно синхронной оси вращения (угол между вектором ЭДС и напряжением СГ); s – скольжение; ω_0 – синхронная частота сети; U_c – напряжение сети; E_q – синхронная ЭДС СГ; P_T – механическая мощность турбины; y_{ij}, α_{ij} – проводимости и их дополнительные углы; x_d, x'_d – реактивные сопротивления СГ; $f(t)$ – внешнее возмущение; U_1 – управление напряжением возбуждения СГ, U_2 – управление механической мощностью турбины; T_j – приведенная постоянная времени турбогенератора; T'_{d0}, T_T – постоянная времени СГ и турбины соответственно.

Традиционные автоматические регуляторы возбуждения (АРВ), действуя на возбуждение СГ, поддерживают напряжение U_2 с заданной точностью. Основными классами регуляторов возбуждения являются АРВ пропорционального и АРВ сильного действия (АРВ-СД) [2]. Наибольшее применение находит АРВ-СД, который обеспечивает более высокое быстродействие, увеличивает область устойчивости, позволяет увеличить предел генерируемой мощности, а также способствует гашению колебаний в энергосистеме. Особенностью этой системы регулирования является введение в закон управления, кроме сигналов по отклонению напряжения, сигнала по производной напряжения, а также других режимных параметров и их производных, в том числе и более высоких порядков. Различные комбинации отклонений режимных параметров и их производных определяют все многообразие структур АРВ-СД. Так, например, в [1, 2] приведено исследование АРВ-СД следующей структуры:

$$E_{qe} = E_{qe0} + k_{0U} \Delta U_2 + k_{1U} \frac{d\Delta U_2}{dt} + k_{0f} \Delta \omega + k_{1f} \frac{d\Delta \omega}{dt}, \tag{2}$$

где $\Delta U_2 = U_2^0 - U_2$ – отклонение напряжения СГ, U_2^0 – заданное значение напряжения, $\Delta \omega$ – отклонение частоты, $k_{0U}, k_{1U}, k_{0f}, k_{1f}$ – коэффициенты настройки.

При использовании наиболее распространенной методики синтеза АРВ структура АРВ заранее задается, а параметры регулятора подбираются в зависимости от требований к системе управления на основе, например, метода D -разбиения для линеаризованной системы (1). Доминирующими требованиями к АРВ являются обеспечение максимальной области устойчивости и повышенного быстродействия в режиме больших отклонений от положения равновесия, а также заданные демпфирующие свойства в режиме малых отклонений. В [2] отмечается, что из-за нелинейности СГ одинаковые настройки АРВ для обоих режимов могут оказаться противоречивыми в отношении качественных свойств энергосистемы: добиться отсутствия статической ошибки поддержания напряжения, т.е. $\Delta U_e = 0$, можно путем увеличения k_{0U} (теоретически при $k_{0U} \rightarrow \infty$), что, в свою очередь, ведет к значительному увеличению колебательности системы и, как следствие, к уменьшению ее быстродействия. Таким образом, необходимо найти такую структуру АРВ, которая позволяет удовлетворить требованиям к свойствам энергосистемы в обоих режимах.

Автоматический регулятор частоты вращения воздействует на впуск в турбину энергоносителя (воды, пара, газа) и обеспечивает поддержание заданной частоты вращения генератора. Традиционно в системах управления частотой вращения турбины используются ПИ-регуляторы по отклонению частоты или мощности [3]:

$$\mu_{PT} = k_u \Delta P_T + \frac{1}{T_u} \int \Delta P_T dt, \quad (3)$$

где μ_{PT} – сигнал на входе сервопривода турбины, k_u, T_u – параметры регулятора.

На рис. 1-4 представлены результаты моделирования турбогенератора (1) с АРВ-СД (2) $U_1 = E_{qe}$ и ПИ-законом регулирования турбины (3) $U_2 = \mu_{PT}$: рис. 1 и 2 соответствуют случаю, когда $f(t) = 0$, а рис. 3 и 4 при $f(t) = A \sin(\Omega_p t)$. Моделирование проводилось при следующих параметрах объекта: $\omega_0 = 1$; $y_{11} = y_{12} = 0,3$; $U_c = 1$; $U_e^0 = 1$; $E_{qe0} = 2,25$; $k_\sigma = 20$;

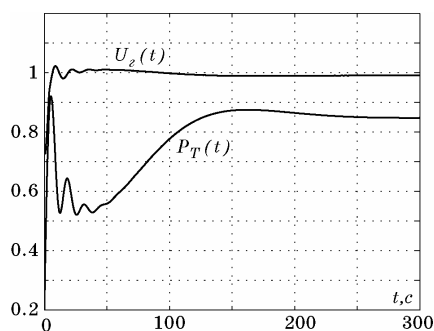


Рис. 1. Изменение переменных состояния

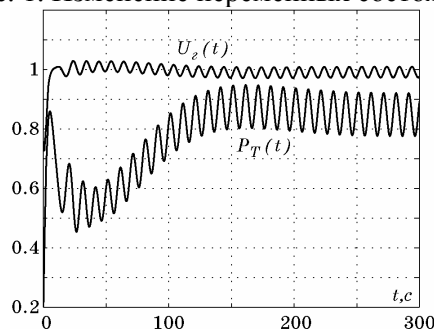


Рис. 3. Изменение переменных состояния

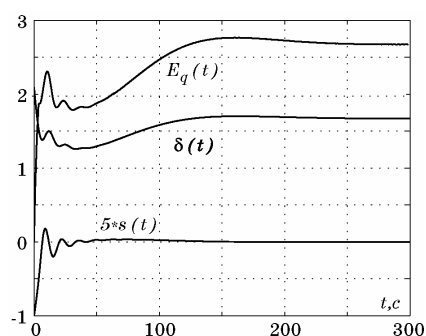


Рис. 2. Изменение переменных состояния

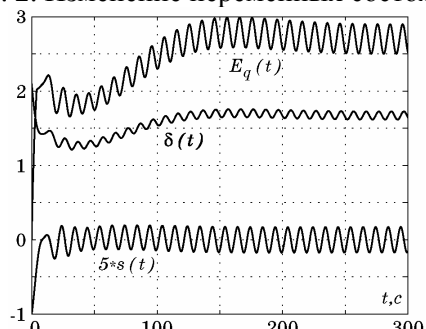


Рис. 4. Изменение переменных состояния

Управление и информационные технологии. Всероссийская научная конференция 3 – 4 апреля 2003 г. Санкт-Петербург. Сборник докладов в двух томах. Том 1. с. 220 – 225

$T_j = 9,17c$; $T_{d0} = 5,6c$; $T_T = 15c$; $T'_{d0} = 2,12c$; $\Omega_p = 0,628 \text{ рад/с}$ $\alpha_{11} = \alpha_{12} = 0,019 \text{ рад}$;
 $P_0 = 0,85$; и регуляторов: $k_{0U} = 50$; $k_{1U} = 7$; $k_{0f} = 30$; $k_{1f} = 8$; $k_u = 0,6$; $T_u = 25c$. На управления введены ограничения: $0 \leq U_1 \leq 3$, $0 \leq U_2 \leq 1,1$.

По результатам моделирования можно указать на следующие недостатки:

- в области больших отклонений от заданного режима наблюдается нарушение заданного качества системы – увеличивается ее колебательность;
- область устойчивости по углу ограничена: $\delta < 160^\circ$;
- постоянное возмущение полностью подавляется, а компенсация гармонического возмущения, частота которого соответствует частоте резонанса $f_p = 0,1 \text{ Гц}$, отсутствует.

2. Синергетический подход

Повышение требований к качеству работы ТГ, а именно: устойчивости, надежности, расширение их функциональных возможностей, и сама логика научно-технического прогресса обуславливают актуальность и необходимость поиска путей совершенствования процессов управления турбогенераторами. В этой связи предлагается взглянуть на проблему управления ТГ с точки зрения современной науки об управлении, т.е. с учетом *нелинейности, многомерности и многосвязности* их математических моделей и использования современных методов синтеза нелинейных векторных систем взаимосвязанного управления.

Для синтеза векторных законов управления ТГ с учетом нелинейных моделей динамики, необходимо переходить на новые концептуальные основы. Такой концепцией является синергетическая теория управления, развитая в трудах профессора А.А. Колесникова [5-7]. Методы синергетической теории управления позволяют в аналитическом виде получить законы управления для нелинейных многомерных, многосвязных объектов, к которым, собственно, и относятся турбогенераторы.

Задача синергетического синтеза законов управления ТГ (1) формулируется следующим образом. Требуется найти аналитический закон взаимосвязанного управления ТГ по частоте вращения и возбуждению (как некоторую совокупность обратных связей), который гарантирует асимптотическую устойчивость замкнутой системы в целом; обеспечивает поддержание частоты и напряжения на требуемом уровне; производит необходимое демпфирование переходных процессов; компенсирует гармоническое возмущение резонансной частоты $\Omega = \Omega_p$, действующее на ТГ со стороны энергосистемы.

Основным методом синергетической теории управления является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [5-7]. Набор желаний проектировщика системы в синергетической теории управления принято выражать в виде соответствующей системы технологических *инвариантов*. При этом инварианты, которые входят в структуру формируемого инвариантного многообразия, выступают как цель управления, т.е. на них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи и (или) поддерживаются заданные соотношения, отражающие специфику управляемого объекта и характеризующие наиболее благоприятные режимы его функционирования.

Турбогенератор, представленный системой уравнений (1), имеет два канала управления. Следовательно, согласно методу АКАР, для него можно задать не более двух независимых инвариантов. Набор естественных инвариантов формируется, исходя из решаемой турбогенератором технологической задачи:

1) стабилизация ЭДС СГ

$$E_q - E_{q0} = 0, \quad (4)$$

где E_{q0} – заданное значение ЭДС СГ;

2) стабилизация угла между вектором ЭДС СГ и вектором выходного напряжения турбогенератора

$$\delta - \delta_0 = 0, \quad (5)$$

где δ_0 – требуемое значение угла.

Для компенсации гармонического возмущения $f(t)$, действующего на турбогенератор, согласно синергетическому подходу, исходную модель объекта (1) необходимо дополнить динамической моделью возмущения, например, вида

$$\begin{aligned} \frac{dx_5}{dt} &= x_6, \quad \frac{dx_6}{dt} = -\Omega^2 x_5, \\ f(t) &= c_1 x_5, \end{aligned} \quad (6)$$

где x_5, x_6 – переменные состояния модели возмущения, Ω – частота возмущения.

Таким образом, для полученной расширенной модели (1), (6) формируется совокупность макропеременных

$$\begin{aligned} \psi_1 &= b_{11}(E_q - E_{q0}) + b_{12}(P_T + \varphi_1(s, \delta) + c_1 x_5), \\ \psi_2 &= b_{21}(E_q - E_{q0}) + b_{22}(P_T + \varphi_1(s, \delta) + c_1 x_5), \end{aligned} \quad (7)$$

которая должна удовлетворять решениям системы дифференциальных уравнений

$$T_s \dot{\psi}_s(t) + \psi_s(t) = 0, \quad s = 1, 2. \quad (8)$$

Решения этой системы $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$ асимптотически устойчивы при выполнении условий $T_1 > 0, T_2 > 0$. При попадании изображающей точки системы в окрестность пересечения многообразий $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$ происходит динамическая декомпозиция, в результате чего поведение системы будет описываться системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= s, \\ \frac{T_j}{\omega_0} \frac{ds}{dt} &= -\varphi_1(s, \delta) - (E_{q0})^2 y_{11} \sin \alpha_{11} - E_{q0} U_c y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}). \end{aligned} \quad (9)$$

В полученной декомпозированной модели (9) имеется канал «внутреннего» управления $\varphi_1(s, \delta)$, через который мы можем влиять на изменение скольжения s и угла δ . Тогда для определения $\varphi_1(s, \delta)$ введем макропеременную

$$\psi_3 = \gamma(\delta - \delta_0) + s, \quad (10)$$

удовлетворяющую решению дифференциального уравнения

$$T_3 \dot{\psi}_3(t) + \psi_3(t) = 0. \quad (11)$$

Очевидно, что на $\psi_3 = 0$ будет выполняться технологический инвариант (5). Выражение для $\varphi_1(s, \delta)$ найдем из решения (11), с учетом (10) и (9).

Тогда, подставив (7) в (8), с учетом уравнений (1) определим управления

$$\begin{aligned} U_1 &= k_4(\delta - \delta_0) + s k_5 + k_2 P_T - k_8 + k_0 E_q + k_1 (E_q - E_{q0}) + (k_6 s - k_7) \sin(\delta - \alpha_{12}) + k_3 x_5; \quad (12) \\ U_2 &= k_9 P_T + k_{10} E_q^2 - k_{11} (E_q - E_{q0}) - k_{16} (\delta - \delta_0) + (k_{12} E_q + k_{13}) \sin(\delta - \alpha_{12}) + k_{17} s + k_{19} + \\ &\quad + k_{18} s \cos(\delta - \alpha_{12}) - k_{14} x_5 - k_{15} x_6, \end{aligned}$$

где $k_j, j = 0, \dots, 19$ – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров объекта и $\gamma, T_s, b_{ij}, E_{q0}$.

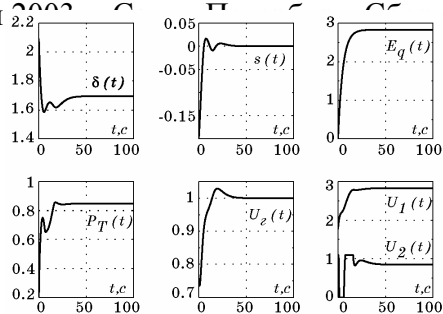


Рис. 5. Изменение переменных состояния и управлений при $f(t)=0$

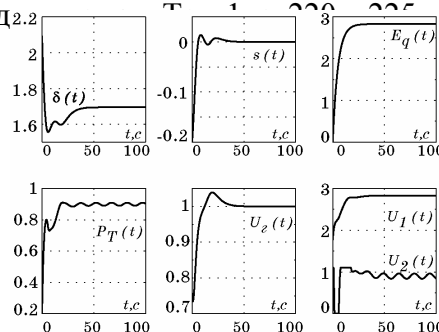


Рис. 6. Изменение переменных состояния и управлений при $f(t)=A \sin(\Omega_p t)$

Синергетические законы управления (12) являются базовыми законами векторного управления нового класса, т.к. они синтезированы аналитически с использованием нелинейной модели объекта и естественным образом учитывают взаимосвязь каналов управления. Регулятор, реализующий синергетические законы управления, представляет собой совокупность нелинейных обратных связей по переменным состояния системы.

Результаты моделирования расширенной системы (1), (6) с законами управления (12) представлены на рис. 5 и 6. Моделирование проводилось при тех же параметрах объекта; а параметры регулятора следующие: $b_{11} = 2, b_{12} = b_{21} = b_{22} = 1; T_1 = T_2 = 5c; T_3 = 4c; \gamma = 0,7; E_{q0} = 2,83; \delta_0 = 1,69 \text{ рад}$. На управления введены ограничения: $0 \leq U_1 \leq 3, 0 \leq U_2 \leq 1,1$. Частота гармонического возмущения соответствовала частоте резонанса регулируемой системы $\Omega = \Omega_p = 0,42 \text{ рад/с}$.

3. Выводы

Сравнительный анализ результатов моделирования турбогенератора (1) с традиционными и синергетическими законами управления показал преимущества синергетического подхода, которые заключаются в следующем:

- замкнутая система асимптотически устойчива в целом, т.е. во всей физически допустимой области изменения координат ТГ;
- система обладает повышенным быстродействием при меньшей колебательности, что говорит о непротиворечивости целей управления в режимах малых и больших отклонений;
- система управления обеспечивает компенсацию гармонического возмущения, влияние которого не отражается на скольжении и напряжении СГ.

Синтезированные базовые законы синергетического управления (12) позволяют построить новый класс векторных регуляторов частоты и мощности, обеспечивающих высокие динамические свойства турбогенераторов в режимах больших и малых отклонений и условиях действия внешних резонансных возмущений.

Литература

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1984.
2. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем/ В.А. Веников, Э.Н. Зуев, М.Г. Портной и др. М.: Высшая школа, 1982.
3. Стернинсон Л. Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. М.: Энергия, 1975.
4. Литкенс И.В., Пуго В.И. Колебательные свойства электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
6. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000, ч. II.

Управление и информационные технологии. Всероссийская научная конференция 3 – 4 апреля 2003 г. Санкт-Петербург. Сборник докладов в двух томах. Том 1. с. 220 – 225

7. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000, ч. III.