

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОМ

А.А. Колесников, А.А. Кузьменко

Таганрогский государственный радиотехнический университет

Важнейшими свойствами турбогенераторов (ТГ) являются их *нелинейность, многомерность и динамическая взаимосвязь* между турбиной и синхронным генератором (СГ) – как в составе отдельного турбогенератора, так и особенно во всей группе ТГ энергосистемы. Технологические процессы, протекающие в отдельных турбогенераторах, связаны между собой через общую энергосеть, что требует развития особого подхода к управлению ТГ: необходимо рассматривать эти процессы как некоторую единую динамическую систему с желаемыми свойствами. Однако в настоящее время системы управления возбуждением и частотой вращения ТГ, как правило, проектируются в виде *отдельных независимых линейных* подсистем. При синтезе регуляторов используются линеаризованные уравнения, которые справедливы только в малой области отклонения от установившегося состояния.

Повышение требований к качеству работы турбогенераторов (устойчивость, надежность), расширение их функциональных возможностей, да и сама логика научно-технического прогресса обуславливают актуальность и необходимость поиска путей совершенствования процессов управления ТГ. В этой связи в данной статье предлагается взглянуть на проблему управления ТГ с точки зрения современной науки об управлении – синергетической теории управления (СТУ), развитой в трудах профессора А.А. Колесникова [2, 3]. Методы синергетической теории управления позволяют в аналитическом виде получить законы управления для нелинейных многомерных, многосвязных объектов, к которым, собственно, и относится турбогенератор.

Материалы IV Международной конференции "Повышение эффективности производства электроэнергии". Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003, с. 131 - 134.

В энергосистемах большой мощности ТГ связаны через линию электропередачи с энергосистемой, которая представлена шинами большой мощности. Распространенная динамическая модель такой системы для одного ТГ (с учетом модели возмущения) имеет вид [1]:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\delta}{dt} &= s, \\
 \frac{T_j}{\omega_0} \frac{ds}{dt} &= P_T - E_q^2 y_{11} \sin \alpha_{11} - E_q U_c y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}) + f(t), \\
 T'_{d0} \frac{dE_q}{dt} &= -E_q + T'_{d0}(x_d - x'_d) U_c s y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}) + U_1, \\
 T_T \frac{dP_T}{dt} &= -P_T - k_\sigma s + U_2, \\
 \frac{dx_5}{dt} &= x_6, \quad \frac{dx_6}{dt} = -\Omega^2 x_5, \\
 f(t) &= c_1 x_5,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где δ – угол между вектором ЭДС и вектором напряжения 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; 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, $f(t)$ – внешнее возмущение; x_5, x_6 – переменные состояния модели гармонического возмущения, Ω – частота возмущения.

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;

Материалы IV Международной конференции "Повышение эффективности производства электроэнергии". Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003, с. 131 - 134.

компенсирует гармоническое возмущение резонансной частоты $\Omega = \Omega_p$, действующее на ТГ со стороны энергосистемы.

На инвариантах, которые входят в структуру формируемых инвариантных многообразий, обеспечивается выполнение заданной технологической задачи и (или) поддерживаются заданные соотношения, отражающие специфику управляемого объекта и характеризующие наиболее благоприятные режимы его функционирования. Для турбогенератора необходимо выполнить следующие инварианты: 1) стабилизация ЭДС СГ $E_q - E_{q0} = 0$; 2) стабилизация угла между вектором ЭДС СГ и вектором выходного напряжения турбогенератора $\delta - \delta_0 = 0$. Здесь E_{q0} , δ_0 – заданное значение ЭДС СГ и угла соответственно.

Для объекта (1) вводятся макропеременные:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= b_{11}(E_q - E_{q0}) + b_{12}(P_T + \varphi_1(s, \delta) + c_1 x_5); \\ \psi_2 &= b_{21}(E_q - E_{q0}) + b_{22}(P_T + \varphi_1(s, \delta) + c_1 x); \\ \psi_3 &= \gamma(\delta - \delta_0) + s.\end{aligned}$$

Синтезированные управления имеют следующий вид

$$\begin{aligned}U_1 &= k_4(\delta - \delta_0) + sk_5 + k_2 P_T - k_8 + k_0 E_q + k_1(E_q - E_{q0}) + \\ &+ (k_6 s - k_7) \sin(\delta - \alpha_{12}) + k_3 x_5; \\ U_2 &= k_9 P_T + k_{10} E_q^2 - k_{11}(E_q - E_{q0}) - k_{16}(\delta - \delta_0) + (k_{12} E_q + k_{13}) \sin(\delta - \alpha_{12}) + \\ &+ k_{17} s + k_{19} + k_{18} s \cos(\delta - \alpha_{12}) - k_{14} x_5 - k_{15} x_6,\end{aligned}\tag{2}$$

где $k_j, j = 0, \dots, 19$ – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров объекта и $\gamma, T_s, b_{ij}, E_{q0}, \delta_0$.

Согласно одному из основополагающих принципов СТУ: принципу сжатия–расширения фазового потока, под действием синтезированных синергетических законов управления изображающая точка замкнутой системы попадет на пересечение инвариантных многообразий $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$, далее, двигаясь по этому пересечению, она попадает на $\psi_3 = 0$.

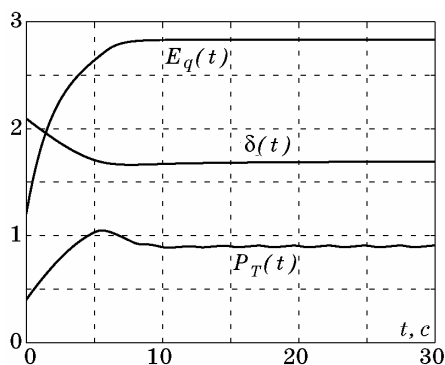


Рис. 1. Изменение переменных состояния

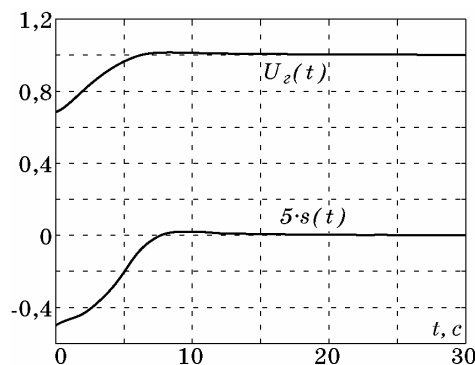


Рис. 2. Изменение скольжения и выходного напряжения СГ

Синергетические законы управления (2) 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), с законами управления (2) представлены на рис. 1 и 2. Проанализировав результаты моделирования, можно сказать, что поставленные ранее цели управления полностью достигнуты: 1) замкнутая система является асимптотически устойчивой в целом; 2) обеспечивается выполнение требуемых инвариантов; 3) регулятор компенсирует внешнее гармоническое возмущение $\Omega_p = 0,41 \text{ рад/с}$.

Литература

1. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000, Ч. II.
2. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000, Ч. III.
3. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем/ В.А. Веников, Э.Н. Зуев, М.Г. Портной и др. М.: Высшая школа, 1982.