

# ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ СИНТЕЗА СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

*А.Б. Бакасова, кандидат технических наук  
Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова*

Показано использование нелинейного взаимосвязанного управления современной электроэнергетической системой на примере синергетического регулятора – резонансно-токоограничивающего устройства.

В настоящее время все чаще появляются публикации, подтверждающие возможности создания устойчивых электроэнергетических систем на основе синергетического управления.

Любая электроэнергетическая система характеризуется наличием ряда неопределенностей:

- неточное описание математической модели;
- неконтролируемое изменение статистических и динамических свойств;
- воздействие на систему внешних возмущений и др.

В современной ситуации, обусловленной высокой степенью развития вычислительной, микропроцессорной и информационно-измерительной техники, для решения перечисленных выше проблем следует переходить на принципиально новые синергетические алгоритмы управления электроэнергетической системы, которые учитывают следующие особенности энергообъектов [2]:

- структурную сложность, проявляющуюся в многомерности, многосвязности и параметрической неопределенности;
- многорежимность функционирования, связанную с существенным изменением нагрузок и изменением конфигурации сети;
- сильное проявление в переходных и экстремальных режимах нелинейных свойств объектов электроэнергетических систем, что приводит к существенным погрешностям расчетов и даже к качественным искажениям результатов.

При синергетическом управлении происходит переход от непредсказуемого поведения по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению вдоль желаемых инвариантов – целевых аттракторов (синергий), к которым подстраиваются все остальные переменные системы и на которых наилучшим образом согласуются естественные (механические, энергетические, электромагнитные, тепловые и др.) свойства управляемых процессов и требования задач управления.

Остановимся на одной из проблем электроэнергетической системы. Создание крупных объединенных энергосистем, увеличение числа и единичной мощности электростанций, внедрение мощных генераторов, трансформаторов, двигателей и повышение плотности нагрузки сопровождаются естественным ростом токов короткого замыкания (КЗ). Повышение токов КЗ приводит к значительному увеличению стоимости оборудования. Поэтому, в настоящее время ведутся работы по разработке высоковольтного оборудования, рассчитанного на работу в сетях с повышенными уровнями токов КЗ и, параллельно, по созданию новых типов токоограничивающих аппаратов на базе нелинейных устройств. Более совершенными и перспективными являются ограничители токов КЗ на базе нелинейных устройств, а именно резонансная схема ограничения токов КЗ.

В [1] были рассмотрены проблемы ограничения токов КЗ и состояние вопроса по исследованию электрических систем с резонансно токоограничивающим устройством (РТУ), аналитическое исследование переходных процессов в однофазных и трехфазных цепях, содержащих РТУ, а также вопросы выбора и оптимизации параметров элементов РТУ для электроэнергетической системы.

РТУ при соответствующем выборе параметров элементов могут выполнять функции системных элементов многоцелевого назначения – регулировать напряжение в сети, ограничивать ток КЗ и обеспечить динамическое торможение генераторов при КЗ. Схема токоограничивающего устройства резонансного типа (РТУ) показано на рис. 1 [3]. В ней  $x_L$  - линейный реактор, по сопротивлению равной сопротивлению  $x_C$ ;  $x_{H.P}$  - нелинейный реактор;  $R_d$  - значительное активное сопротивление.

В нормальных режимах напряжение на емкости  $U_C$  недостаточно для насыщения реактора  $x_{H.P}$ . При КЗ сильно растут значения  $U_C$  и это приводит к повышению  $I_{H.P}$  в параллельной цепи, реактор  $x_{H.P}$  насыщается, его сопротивление  $x_{H.P}$  уменьшается, резонанс нарушается и общее сопротивление  $Z$  схемы РТУ сильно возрастает, таким образом, ограничивается ток КЗ.

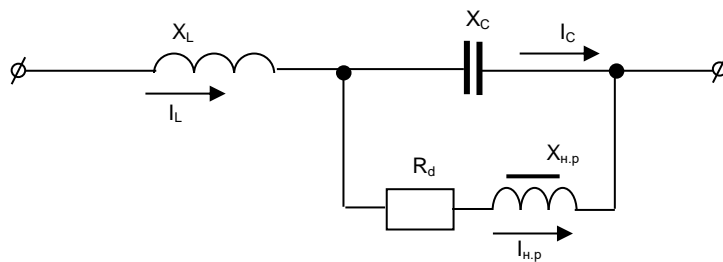


Рис. 1

При отключении КЗ восстанавливается нормальная схема резонансного состояния. Если ограничение величины тока КЗ имеет место уже в первый период его возникновения, то восстановление нормального состояния происходит после нескольких периодов колебания, зависит от момента возникновения повреждения и величины активного сопротивления системы. Важным является возможно меньшая длительность существования КЗ. Так как параллельная цепь имеет нелинейную характеристику, то в этой цепи и в емкости появляются гармонические составляющие, резко затухающие после отключения КЗ, но ток основной цепи практически не искажается. Наличие  $R_d$  устраняет возможность возникновения различных колебаний.

В [3] приведены результаты исследования электромагнитных переходных процессов в электрических системах с математической моделью третьего порядка. Рассмотрена схема (рис.2) и вебер-амперная характеристика нелинейного реактора, аппроксимированная тремя участками прямых (рис. 3). Каждая из них представлена в виде:

$$i_d = a_j \psi + b_j,$$

где  $j$ -номер участка. Тогда для каждого участка  $j$  справедливо:

$$F_1 \sin \omega t + F_2 \cos \omega t - E_j = \frac{d^3 \psi}{dt^3} + A_j \frac{d^2 \psi}{dt^2} + B_j \frac{d\psi}{dt} + D_j \psi. \quad (1)$$

где  $R=R_1+R_2$ ;  $L=L_1+L_2+L_{pm}$ .

$$\left. \begin{aligned} \frac{R}{L} + R_d a_j = A_j; \quad \frac{R R_d a_j}{L} + \frac{a_j}{C} + \frac{1}{LC} = B_j; \quad \frac{a_j (R + R_d)}{LC} = D_j \\ ; \quad \frac{b_j (R + R_d)}{LC} = E_j; \quad \frac{U_m \cos \varphi}{LC} = F_1; \quad \frac{U_m \sin \varphi}{LC} = F_2. \end{aligned} \right\}$$

Математическая модель (1) для каждого участка  $j$  является линейным и его общее решение имеет вид:

$$\psi = k_1 e^{\gamma_1 t} + k_2 e^{\gamma_2 t} \cos \omega_2 t + k_3 e^{\gamma_3 t} \sin \omega_2 t + \alpha_j \cos \omega t + \beta_j \sin \omega t + \varepsilon_j.$$

где  $\gamma_1, \gamma_2, \omega_2$  – действительные и мнимые корни характеристического уравнения.

Коэффициенты частного решения уравнения (1):

$$\alpha_j = \frac{F_2(D_j - \omega^2 A_j) - F_1(\omega B_j - \omega^3)}{(\omega B_j - \omega^3)^2 + (D_j - \omega^2 A_j)^2};$$

$$\beta_j = \frac{F_1 + \alpha_j(\omega B_j - \omega^3)}{(D_j - \omega^2 A_j)};$$

$$\varepsilon_j = -\frac{E_j}{D_j},$$

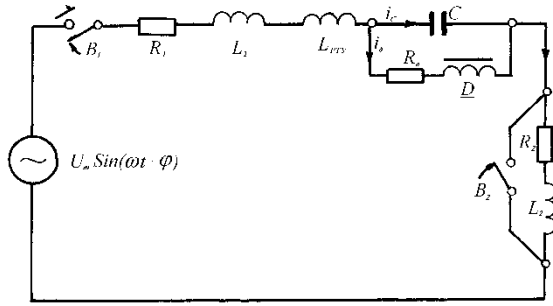


Рис.2

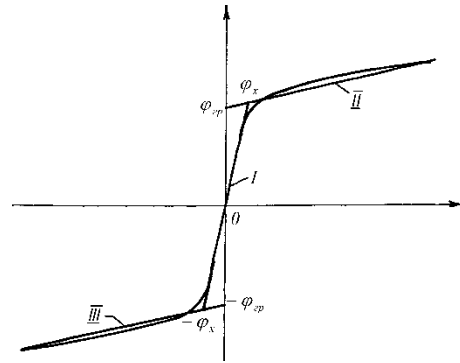


Рис.3

Постоянные интегрирования  $k_1, k_2, k_3$  определяются приспособыванием решений на границе интервалов в момент  $t=t_n$ , где  $t_n$  - момент попадания изображающей точки в начало  $j+1$ -го участка. В [3] показано, что величины  $\alpha_j, \beta_j, \varepsilon_j$  являются постоянными для каждого участка  $j$ , а величины  $k_1, k_2, k_3$  с каждым переходом изображающей точки с одного участка на другой вычисляются заново.

$$k_3 = \frac{[\Pi_1(t_n)\gamma_1 - \Pi_2(t_n)] \left[ \dot{\psi}_n - \psi_n \gamma_1^2 + M_1(t_n)\gamma_1^2 + M_3(t_n) \right] + e^{\gamma_2 t_n} \{ [T_1(t_n)\gamma_1 - T_2(t_n)] [\gamma_1^2 \Pi_1(t_n) - \Pi_3(t_n)] - [\dot{\psi}_n - \psi_n \gamma_1 + M_1(t_n)\gamma_1 + M_2(t_n)] [\Pi_1(t_n)\gamma_1^2 - \Pi_3(t_n)] \}}{e^{\gamma_2 t_n} \{ [T_1(t_n)\gamma_1 - T_2(t_n)] [\gamma_1^2 \Pi_1(t_n) - \Pi_3(t_n)] - [\dot{\psi}_n - \psi_n \gamma_1 + M_1(t_n)\gamma_1 + M_2(t_n)] [\Pi_1(t_n)\gamma_1^2 - \Pi_3(t_n)] \}};$$

$$k_2 = \frac{\dot{\psi}_n - \psi_n \gamma_1 + M_1(t_n)\gamma_1 + M_2(t_n)}{e^{\gamma_2 t_n} [\Pi_1(t_n)\gamma_1 - \Pi_2(t_n)]} - \frac{k_3 [T_1(t_n)\gamma_1 - T_2(t_n)]}{[\Pi_1(t_n)\gamma_1 - \Pi_2(t_n)]};$$

$$k_1 = \frac{1}{e^{\gamma_1 t_n}} \left\{ \psi_n - M_1(t_n) - e^{\gamma_2 t_n} [k_2 \Pi_1(t_n) + k_3 T_1(t_n)] \right\}$$

где:  $\dot{\psi}_n = u_C - R_\delta (a_j \psi_n + b_j)$ ;  $\ddot{\psi}_n = \frac{1}{C} (i - a_j \psi_n - b_j) - R_\delta a_j \psi_n$ ;

$$\left. \begin{aligned} \alpha_j \cos \omega t + \beta_j \sin \omega t + \varepsilon_j &= M_1(t); \quad \omega (\alpha_j \sin \omega t - \beta_j \cos \omega t) = M_2(t); \\ \omega^2 (\alpha_j \cos \omega t + \beta_j \sin \omega t) &= M_3(t); \quad \cos \omega_2 t = \Pi_1(t); \quad \sin \omega_2 t = T_1(t); \\ \gamma_2 \Pi_1(t) - \omega_2 T_1(t) &= \Pi_2(t); \quad \gamma_2 T_1(t) + \omega_2 \Pi_1(t) = T_2(t); \\ \gamma_2^2 \Pi_1(t) - 2\gamma_2 \omega_2 T_1(t) - \omega_2^2 \Pi_1(t) &= \Pi_3(t); \\ \gamma_2^2 T_1(t) + 2\gamma_2 \omega_2 \Pi_1(t) - \omega_2^2 T_1(t) &= T_3(t), \end{aligned} \right\}$$

Разработанная методика расчета была применена для анализа следующих процессов [3]: влияние величины активного сопротивления нелинейной цепи резонансного токо-

ограничивающего устройство на переходный процесс; влияние начальной фазы угла включения на величины токов и напряжений; зависимость ударного тока КЗ в цепи от величины реактивных сопротивлений; зависимость величины токов и напряжений от удаленности точки КЗ.

Элементы шунтирующей цепи могут быть выбраны на кратковременное воздействие тока КЗ, так как при номинальных условиях протекающей через них ток невелик. Большая часть стоимости РТУ приходится на емкостное сопротивление  $x_c$ . При сравнительных технико-экономических расчетах следует учитывать не только экономию от возможности отказа от реконструкции подстанций, но и увеличение надежности передачи повышенных мощностей в нормальных условиях и устойчивости системы – в аварийных. В РТУ нет движущихся или переключающихся при его работе элементов, все части постоянно электрически связаны и действуют автоматически. РТУ является эффективным средством безинерционного ограничения токов КЗ, воздействующих на ток КЗ уже в первую четверть периода его возникновения.

Принцип работы РТУ, процессы, происходящие в устройстве, подчиняются синергетическим законам и принципам. Поэтому, РТУ можно отнести к новому поколению синергетических регуляторов. Они принципиально превосходят существующие устаревшие типовые регуляторы с точки зрения пределов динамической устойчивости, надежности, энергетической эффективности и т.д.

Применение синергетических законов приведет к появлению принципиально нового поколения управляемых энергообъектов и энергосистем, обладающих следующими отличительными свойствами [2]:

- гарантированное выполнение генераторами и их группами возложенных на них технологических задач как в нормальных, так и в экстремальных режимах работы;
- обеспечение максимально возможной области динамической (асимптотической) устойчивости систем управления и, как следствие, их высокую надежность работы в любых экстремальных режимах;
- повышенная грубость (робастность) системы к изменению ее параметров;
- широкий диапазон заданных статических и демпфирующих технологических свойств;
- компенсация низкочастотных гармонических возмущений, частоты которых совпадают с резонансными частотами энергообъектов;
- надежное поддержание синхронизма при изменении нагрузки в широком диапазоне, в том числе и при действии значительных внешних возмущений;
- адаптивность (приспособляемость) к изменению внутренних параметров и действию внешних возмущений со стороны технологической среды;
- наиболее эффективное использование энергетических ресурсов;
- гибкость и оперативная перенастройка при изменении задач и приоритетов в электроэнергетической системе.

Синергетические методы в своей совокупности образуют новую методологическую и опытно – конструкторскую базу для кардинального прорыва в решении проблемы эффективного управления сложными электроэнергетическими системами, в том числе противоаварийного и энергосберегающего управления.

### Литература

1. Апышев Д.А., Бакасова А.Б. Нелинейности в электроэнергетике – Бишкек, 2003 г.
2. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В. Синергетические методы управления сложными системами. Энергетические системы – М.: Ком Книга 2006 г.
3. Бакасова Б.А. Математическое моделирование и исследование переходных процессов в электроэнергетических системах с существенными нелинейностями – кандидатская диссертация, Бишкек, 2004 г.