Проблемы бионики. 2001. Вып. 54. С. 23-27. ХТУРЭ

УДК 621.311:681.3

А. Л. ЕРОХИН

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЛОЖНООРГАНИЗОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Введение

В сложноорганизованных системах (СОС) для оптимального управления используется принцип гомеостатического регулирования, основанный на системах прямых и обратных связей. Электрические сети (ЭС) относятся к классу сложноорганизованных систем. Состояние системы отождествляется с состоянием характеризующих информационных параметров. Функционирование любой сложноорганизованной системы управления или системы поддержки принятия решений в режиме реального времени детерминируется оптимальными режимами работы составляющих их подсистем. В условиях экстремальных нагрузок ЭС система управления временно переходит на уровень гетеростатического управления.

Актуальной задачей в современном диспетчерском управлении электроэнергетикой является разработка и внедрение интеллектуальных систем управления в аварийных ситуациях.

Для решения задачи повышения эффективности управления электрическими сетями начальным этапом работы систем идентификации аварийного режима должна быть достаточная классификация режимов работы управляемого объекта, поскольку можно ожидать, что задачи и модели управления в различных режимах будут различными. Задачи оптимального управления потокораспределением в электрических сетях (ЭС) при стационарных (штатных) режимах достаточно хорошо проработаны. Нештатные же режимы в сетях слабо классифицированы, поэтому имеющиеся отдельные модели управления не обеспечивают оптимального управления.

Нештатные режимы в ЭС будем называть аварийными (АР), которые можно разделить на допустимые аварийные режимы (ДАР) и недопустимые (НАР). По хронологическому (временному) признаку различают АР:

1) доаварийные;
2) собственно аварийные (бывают допустимые и недопустимые);
3) послеаварийные.

Для моделирования поведения системы в доаварийном режиме можно применить принцип гетеростазиса, преимущество которого заключается в более широких диапазонах регулирования параметров ЭС. Гомеостазис представлен аттракторами, которые определяют устойчивые состояния системы в процессе ее функционирования.

1. Модель пространства параметров

Информационные параметры представлены пространством сигналов, измеренных в ЭС с помощью фиксаторов событий. Считается, что указанный набор сигналов является адекватным отображением пространства параметров режимов ЭС.

Рассмотрим модель топологического пространства параметров режимов ЭС с дискретным временем. Полный (и избыточный) набор сигналов для ЭС:

$$\{I_a, I_b, I_c, I_0, U_a, U_b, U_c, U_0, P_i, \varphi_a, \varphi_b, \varphi_c, \dots, \tag{1}$$

где I_a, I_b, I_c, I_0 – токи в фазах ЭС; U_a, U_b, U_c, U_0 - напряжения в фазах; P_i – характеристики потребленной (инжектированной) мощности; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ – фазовые сдвиги.

В [2] предложено для расчета аварийного режима применять модели установившегося потокораспределения в ЭС, основанные на балансе потребленной и инжектированной мощностей, а также на построении матрицы Якоби для векторов активных и реактивных нагрузок. Обе модели достаточно точны для штатного режима потребления в ЭС или близкого к штатному. При АР известное уравнение баланса можно представить в виде

$$\sum \Omega_s - \sum W_i = 0, \tag{2}$$

где Ω_S – множество инжектированных мощностей узлов-поставщиков целевого продукта (электрической энергии) в ЭС; W_i – множество потребленных мощностей узлов-потребителей в ЭС; i – номер узла-потребителя, являющегося источником набора сигналов-параметров.

Уравнение (2) приводит к плохо сходимым результатам из-за «нуля» в правой части при неидеальном режиме работы СОС.

Пусть набор входных сигналов параметров (1) представлен подмножеством (a_{ij}). Для идентификации АР и последующей выработки управляющих воздействий входное подмножество подвергается преобразованию в подмножество (b_{ij}) выходных (определяющих) параметров режимов СОС. Заметим, что оба подмножества дискретны. Преобразования подмножеств и передача подмножества выхода (b_{ij}) происходят на подмножестве элементарных каналов передачи информации (v_i) образующих информационный канал (V), который назовем системным каналом.

В топологическом пространстве параметров режимов ЭС введем предикатную переменную нормы $P(b_{ij})=a_{ij}{}^{b}ij$. Такая переменная логически связывает между собой элементы ввода с сопряженными с ними элементами выхода.

Будем считать $P(b_{ij})=1$, если в СОС установился баланс мощностей.

Балансом назовем нахождение суммы всех инжектированных в ЭС мощностей и потребленных при условии нахождения указанной суммы в пределах некоторого флуктуационного коридора (ФК). ФК определяется заданными уставками релейной защиты. Будем разделять локальный и глобальный предикаты нормы.

Локальным предикатом нормы назовем $P_i(b_{ij})$ в каждой точке входа (в узле СОС). Тогда

$$\vee P_i(b_{ij})=1, \tag{3}$$

если вся ЭС находится в штатном режиме.

В любой момент времени в ЭС имеется счетное множество локальных небалансов, вызванных стохастическим характером потребления электрической энергии. ЭС, как и любая система, стремится прийти в состояние равновесия, соответствующее установившемуся режиму. Таким образом, возникающие в ЭС возмущения можно разделить на следующие классы:

1) возмущения, вызванные плановыми переключениями (перетоками мощностей);
2) неплановые возмущения, не приводящие к изменению предиката нормы;
3) неплановые возмущения, приводящие к изменению предиката нормы.

Очевидно, что АР соответствует третий класс возмущений.

Анализ поставки-потребления электрической энергии показывает, что дисбаланс носит циклический, статистически прогнозируемый характер. Выделим ряд периодических составляющих.

Первая составляющая $\pm\delta_d$ – это предикатная флуктуационная составляющая, связанная с суточным ритмом (дневное-ночное потребление энергии).

Ко второй составляющей $\pm\delta_w$ отнесем предикатную флуктуационную составляющую с недельным периодом (рабочие-выходные дни).

Далее выделим третью $\pm\delta_m$ и четвертую $\pm\delta_y$ составляющие, связанные с месячными и годовыми циркадными изменениями в потреблении. Обрабатывая статистические ряды указанных составляющих, можно выделять интервалы их допустимых изменений.

Тогда глобальная предикатная флуктуационная составляющая

$$\Delta=\sum\pm\delta_i, \tag{4}$$

где $\pm\delta_i$ – локальная периодическая составляющая.

Допустимость дисбаланса можно контролировать с помощью уставок тока-мощности. В свою очередь, выделение периодических составляющих и их анализ позволит управлять значениями уставок для обеспечения безаварийной работы. Дисбаланс в допустимых пределах не нарушает целостности СОС. Выход любого параметра за пределы флуктуационного коридора система должна квалифицировать как нестандартную ситуацию и приступать к ее немедленной классификации и распознаванию.

2. Модели топологии сложноорганизованных систем

Рассмотрим модели топологии СОС. Простейшей моделью может считаться топология, заданная на метрическом двухмерном пространстве. Для такой топологии все подсистемы СОС и структуры их связей заданы в виде матриц данных координатно-векторных множеств. Метрическая топология обеспечивает визуальное представление структуры СОС в виде географической карты и может быть реализована как геоинформационная система управления электрическими сетями. Однако такая топология не подходит для машинного анализа нестандартной ситуации.

Более сложной моделью, но и более информативной для анализа стационарных и нестационарных потоков мощностей в ЭС можно считать топологию подмножеств параметров ЭС. Такая топология определяет структуру связей отношений «выходов–входов» между подсистемами СОС. Рассмотренную выше модель топологического пространства параметров режимов ЭС можно представить в виде множеств связанных между собой потребителей W_{Si} и поставщиков Ω_S электрической энергии. На каждом уровне иерархии s – это множества Ω_S, W_{Si}.

Элементы множеств Ω_S, W_{Si} могут быть отнесены к различным классам эквивалентности R_i, исходя из значений параметров (1). Определяющим параметром для такой классификации в ЭС служит уровень напряжения U. Тогда в класс эквивалентности R_1 могут быть включены бытовые потребители электрической энергии (380 В). При этом структура множества «связей–выходов» узла-поставщика принадлежит классу R_1, а структура множества «связей–входов» уже принадлежит классу эквивалентности R_2. Последний объединяет множество поставщиков и потребителей уже более высокого уровня напряжений (уровень напряжения 6–10 кВ).

На s-ом уровне иерархии СОС множество «связей-выходов» от узлов-поставщиков Ω_S на входы множество узлов-потребителей, отнесенных к классу эквивалентности R_i

$$\Omega_s \leftrightarrow \bigcup_{i\in M^2} W_{si}\,, \tag{5}$$

где si – число потребителей, размещенных на s-ом уровне иерархии в классе R_i; M^2 – метрическое пространство, на котором заданы системы «связей входов-выходов».

Уточним (2) для нештатного режима работы СОС с учетом (4). Тогда модель «рабочего» (не идеального) баланса в СОС типа ЭС будет заптсана в виде

$$\sum\Omega_s - \sum W_{si} = \Delta \tag{6}$$

Распознавание АР осуществляется зв следствие описания классов R_i объектов через определенные значения значащих признаков. Такими значащими признаками являются матрицы параметров, хранящиеся в коде АР в виде подмножества выхода (b_{ij}). В базе знаний хранятся наборы матриц предикатов флуктуационных коридоров балансов мощностей.

3. Модель искажений передачи сигналов параметров режимов электрических сетей

При оперативном управлении режимами ЭС являются актуальными вопросы искажений истинности и правильности передачи сигналов параметров режимов. В связи с этим необходимо обеспечить разработку методов и алгоритмов решения задач восстановления искаженного "образа" первичной информации, а также коррекции фазовых искажений каналов передачи информации сложноорганизованных систем.

В качестве модели искажений передачи сигналов примем модели детерминированных хаотических процессов. Такие модели основаны на комбинаторно-топологическом преобразовании двухмерной информации.

Математическая модель искажений базируется на теоретико-множественных и топологических свойствах подмножеств элементов входа (a_i) и выхода (b_j) подмножества (v_i), образующих системный канал (V) информации, в который вносятся фазовые искажения.

Подмножества $(a_i)\in[A]$ и $(b_j)\in[B]$ удовлетворяют аксиомам общей топологии и аксиомам операций замыкания, обладают свойствами замкнутости, отделимости и счетной базой. Указанные подмножества образуют топологическое пространство (Ω,ω) с дискретным носителем ω топологии. Любые два элемента $[A]$ и (b_k), $(b_l)\in[B]$ множества Ω обладают непересекающимися окрестностями. Введем локальную систему координат, для чего запишем подмножество $(a_{ij})\subset[A]$ в матричной форме, относительно которой проводятся преобразования подстановок как нарушение упорядоченности "прообраза", отображаемого в "образ" $(b_{kl}) \subset [B]$. Так для (a_{ij}) и (b_{kl}) упорядоченность элементов определяется матрицами

$$[A] = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}, \quad [B] = \sum_{k=1}^{p}\sum_{l=1}^{s} b_{kl}. \tag{7}$$

Введем оператор K преобразований подстановок, отображающих произвольным образом $(a_{ij}) \leftrightarrow (b_{kl})$. Тогда

$$[K]: [A] \leftrightarrow [B] \equiv \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(a_{ij}) \rightarrow \sum_{k=1}^{p}\sum_{l=1}^{s}(b_{kl}). \tag{8}$$

Отобразим на $[A]$ некоторую регулярную двухмерную функцию $[F]$, элементы (a_{ij}) которой преобразуют $[F]$ в подмножество упорядоченных растровых элементов

$$[F^*] = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(a_{ij} \otimes f_{ij}) \subset [A], \tag{9}$$

где $[F^*] \subseteq [F]$ – матрица $[F]$ в растровой форме представления; $(a_{ij} \otimes f_{ij})$ – дискретные фрагменты функции, отображенные на элементах (a_{ij}).

После $[K]$ преобразования подстановок (4) функция $[F]$ на $[B]$ представима в виде

$$[F^{**}] = \sum_{k=1}^{p}\sum_{l=1}^{s}(b_{kl} \otimes f_{kl}) \subset [B], \tag{10}$$

где $[F^{**}] \subset [F]$ – матрица хаотически преобразованной функции $[F^*]$ в растровой форме представления; $(b_{kl} \otimes f_{kl})$ – дискретные фрагменты функции, отображенные на (b_j)

Оператору $[K]$ может быть придано численное значение коэффициента R, который определяет степень комбинаторных подстановок (хаотичности) (b_{kl}) на подмножестве $[B]$

$$R = \sum_{k=1}^{p}\sum_{l=1}^{s} b_{kl} / (p \times s), \tag{11}$$

где (b_{kl}) – число элементов подстановок в $[B]$; $(p \times s)$ – общее число элементов (b_{kl}) в $[B]$.

Коэффициент R принимает значения в интервале $0 \le R \le 1$, и если R=0, то элементы (b_{kl}) и (a_{ij}) множеств $[B]$, $[A]$и сами множества изоморфны, при этом $[F^*] \equiv [F^{**}]$. При R=1 преобразования (8-10) определяют на $[B]$ хаос и $[F^*] \neq [F^{**}]$. Задавая значения коэффициента R в (11) в пределах $0 \le R \le 1$, можно генерировать искажения. После $[K]$ преобразования (10) подмножество $(b_{kl}) \subset [B]$ распадается на два подмножества. Первое из них

$$[\Phi] = \bigcup (b_{kl}) \tag{12}$$

составлено из всех подстановок элементов (b_{kl}).

Второе подмножество

$$[\Lambda] = \bigcup (b_{ty}) \leftrightarrow \bigcup (a_{ty}) \tag{13}$$

состоит из всех элементов (b_{ty}) изоморфных (a_{ty}). Множества $[A]$ и $[B]$ представим в виде

$$[A] \cong [\Lambda] \subset (\Omega, \omega), \tag{14}$$

$$(\Omega,\omega)\supset[B]=\bigcup\{[\Lambda]\vee[\Phi]\}. \qquad (15)$$

Топология пространства (Ω,ω) определяет объединение (15) как топологически подобное множеству $[A]$, а множества $[\Lambda]$ и $[\Phi]$ – гомеоморфные кругу. Дискретные фрагменты $(f_{kl})\subset[F^{**}]\leftrightarrow[F^{*}]$, отображенные множеством $[\Lambda]$ на $[B]$, имеют распределение, эквивалентное на $[A]$, для всех же фрагментов $(f_{ty})\subset[F^{**}]\subset[\Phi]$ – распределение на $[B]$случайное.

Определяющей характеристикой аттрактора динамической системы является свойство структурной устойчивости. Рассматриваемую модель процесса подстановок можно рассматривать как динамическую со слабой или сильной эргодичностью.

Малейшее изменение$[F]$, отображаемое на (a_{ij}) приводит к новому, случайному положению фрагментов (f_{kl}) на $[B]$. Для моделирования искажений в системном канале достаточно придать функции $[F]$ любое аффинное преобразование на A.

Выводы

1. В основе разработанной модели управления сложноорганизованных систем лежит объединение топологических областей.
2. Разработанные модели пригодны для управления до- и послеаварийными режимами в сложноорганизованных системах типа электрическая сеть.
3. Представленные математические модели могут использоваться для управления инженерными сетями с различной природой целевого продукта.

Список литературы: 1. *Месарович М., Такахара Я.* Общая теория систем: Математические основы. М.: Мир, 1978. 311 с. 2. *Аюев Б.И., Зубарев В.В.* Алгоритмы управления аварийными режимами энергетических систем // Управление и автоматизация электроэнергетических систем. Рига: Риж. политехн. ун., 1983. С.83-90. 3. *Бурцев В.М., Єрохін А.Л.* Застосування теорії груп підстановок для моделювання детермінованих хаотичних процесів // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць. Вип. 6 (16). Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2001. С.47-51.

Поступила в редколлегию 10.05.2001