УДК 621.311

В. Ц. Зелинский, к. т. н., доц.; В. В. Зелинский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАФОВ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На основе методов теории графов предложена методика моделирования и оптимизации расчётной модели электроэнергетической системы, которая позволяет сформировать адаптивные модели для систем оперативно-диспетчерского управления нормальными режимами ЭЭС.

Ключевые слова: *расчетная модель, адаптивная модель, дерево графа, независимый контур, хорда, неоднородность.*

Развитие автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) электроэнергетическими системами нуждается в совершенствовании методов моделирования и оптимизации расчетной схемы электрической сети, алгоритмического и программного обеспечения задачи управления режимами и автоматизации процесса реализации управляющих воздействий в системах управления нормальными режимами ЭЭС. Традиционные математические методы и модели не в полной мере удовлетворяют новые требования по реализации принципов автоматического управления режимами ЭЭС. Целесообразным является формирование математической модели для управления нормальными режимами на основе современных методов и средств моделирования с использованием теории оптимального управления сложными технологическими системами и методов теории графов [1, 4].

Основной целью проведенных в работе исследований является определение условий формирования и оптимизация дерева графа расчетной модели ЭЭС, обеспечивающих определенные условия синтеза и реализации оптимальных управляющих воздействий в АСДУ и адекватность модели реальным условиям технологического режима в ЭЭС.

Формирование целевой функции задачи оптимального управления нормальными режимами ЭЭС нуждается в целенаправленном формировании расчетных моделей с целью синтеза на их основе оптимальных управляющих воздействий для регулирующих устройств, которые задействованы в процессе управления технологическим режимом в ЭЭС. Задачу синтеза оптимальных управляющих воздействий в общем виде формулируют как задачу теории оптимального управления сложными технологическими процессами [1], решением которой являются законы управления регулирующими устройствами в виде, удобном для его последующей практической реализации в автоматизированных или автоматических системах управления режимами. В общем виде закон управления может быть представлен уравнением:

$$u(t) = -W\,y(t), \tag{1}$$

где $u(t), y(t)$ – соответственно векторы управления и наблюдения, W – матрица обратной связи, отображающая связь топологии сети с ее постоянными параметрами.

Для определения законов управления (1) необходимо построить расчетную модель по определенному алгоритму. В первую очередь, сформировать модель дерева графа таким образом, чтобы выделить в качестве хорд независимых контуров трансформаторные ветви. Это позволит реализовать в контурах схемы замещения уравнительную электродвижущую силу (э. д. с.) в линейной зависимости от параметров регулирующих устройств. На этапе предварительных расчетов необходимо также выполнить ранжирование регулирующих трансформаторов по приоритету управления режимом.

Моделирование дерева графа начинается с анализа результатов зависимости потерь активной мощности от коэффициентов трансформации регулирующих устройств

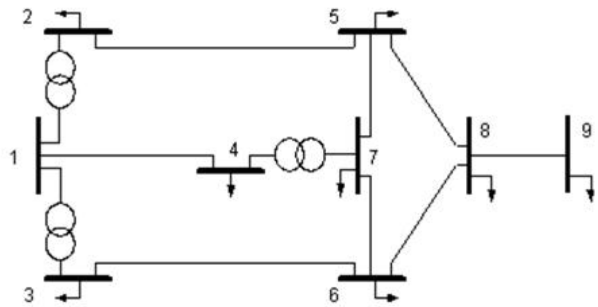

Рис. 1. Схема соединений моделируемой электрической сети

$\Delta P = f(K_T)$ для всех трансформаторов с РПН электрической сети и ранжирования их по приоритету управления в АСДУ [1, 2]. Например, для электрической сети (рис. 1) эти зависимости могут иметь вид, представленный на рис. 2. Первой при моделировании независимых контуров в качестве хорды первого независимого контура выбираем ветвь 4 – 7, поскольку чувствительность к снижению потерь мощности в этой ветви наибольшая, для второго контура выбираем ветвь 1 – 2, для третьего – ветвь 1 – 3. Модель дерева графа электрической сети формируем как корневое дерево, где балансирующий узел – это корень дерева. Все допустимые варианты развития деревьев графа модели образуют начальное множество деревьев, оптимизация которых при определенных сформированных для задач АСДУ условиях позволяет синтезировать оптимальную расчетную модель.

Начальными условиями процесса моделирования является выбор балансирующего узла, выбор хорд (результатам ранжирования) и системы независимых контуров. В качестве критерия формирования оптимального обхода контуров выбрана неоднородность ветвей схемы замещения электрической сети [1, 4]. Ветви графа $N_{i,j}, i = 1,\dots n;\ j = 1,\dots n$ придаём определенный вес, который определяется как величина неоднородности каждой из ветвей. Хорды для контуров выбираются по результатам предварительного анализа по методике, предложенной в [2], и формируется соответс-твующая матрица хорд L_j, где $j = 1,\dots k$ – количество регулирующих устройств. Построение модели дерева графа начинается с выбора балансирующего узла и нахождения минимального расстояния между двумя фиксированными вершинами хорды графа из массива L_j, то есть первой ветвью, которая по результатам ранжирования трансформаторов выбирается хордой в первом контуре.

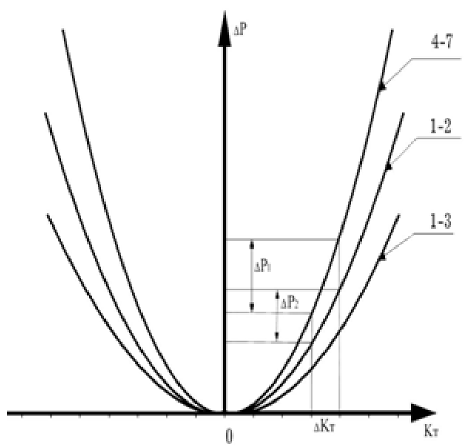

Рис. 2. Определение регулировочного эффекта трансформаторов с РПН

Рассмотрим произвольное дерево графа G схемы замещения электрической сети с вершинами $\overline{1,m}$ и заданной длиной (весом) w_{ij} ребер $\overline{1,n}$. Сформируем матрицу весовых коэффициентов ветвей размерностью $n \times n$, где в качестве недиагональных элементов выбрана величина неоднородности ветвей схемы замещения

$$W = (w_{ij}), \tag{2}$$

где w_{ij} – длина (вес) ребра.

При формировании диагональных элементов, когда $i = j$, величина $w_{ij} = 0$. Если же отсутствует ветвь, которая непосредственно связывает узлы i и j, то величина $w_{ij} = \infty$. Начиная с матрицы $W^{(0)} = W$, формируется последовательность $W^{(0)}, W^{(1)}, ..., W^{(n)}$ таких $n \times n$ матриц, где элемент $w_{ij}^{(n)}$ матрицы $W^{(n)}$ – это мера расстояния между i и j узлами в графе G. Матрица весов $W^{(m)} = \left(W_{ij}^{(n)}\right)$, для всего множества вершины m_{ij} определяется как

$$W_{ij}^{(m)} = min\left\{W_{ij}^{(m-1)}, W_{im}^{(m-1)} + W_{mj}^{(m-1)}\right\} \tag{3}$$

Путь минимальной длины контура среди всех ориентированных $i - j$ путей, которые используют вершину m_{ij} множества, определяется как $P_{(ij)}^{(m)}$. Для всех вершин $0 \le m \le n$ множество $W_{ij}^{(m)}$ определяет длину пути обхода независимого контура $P_{(ij)}^{(m)}$. Кроме минимальной длины ветвей графа, которые определяются при выборе пути обхода контура, необходимо получить и контуры минимальной длины. Достигается это следующим образом: при построении последовательности $w^{(0)}, w^{(1)}, ..., w^{(n)}$ одновременно строится последовательность матриц $P^{(0)}, P^{(1)}, ..., P^{(n)}$ таким образом, что элемент $p_{ij}^{(m)}$ матрицы $P^{(m)}$ указывает на вершину, которая следует за вершиной i в $p_{ij}^{(m)}$, тогда:

$$p_{ij}^{(0)} = \begin{cases} 1, при\ w_{ij} \ne \infty \\ 0, при\ w_{ij} = \infty \end{cases}. \tag{4}$$

Элементы матрицы $P^{(m)} = (p_{ij}^{(m)})$ получаем из условия $P^{(m-1)} = (p_{ij}^{(m-1)})$ Соответственно,

если $M = min\left\{w_{ij}^{(m-1)}, w_{im}^{(m-1)} + w_{mj}^{(m-1)}\right\}$, тогда

$$p_{ij}^{(m)} = \begin{cases} p_{ij}^{(m-1)}, при M = w_{mj}^{(m-1)} \\ p_{im}^{(m-1)}, при M < w_{ij}^{(m-1)} \end{cases}. \tag{5}$$

Если $M = w_{mj}^{(m-1)}$, то длина $p_{ij}^{(m)}$ равна длине $p_{ij}^{(m-1)}$, поэтому $p_{ij}^{(m)}$ совпадает с $p_{ij}^{(m-1)}$. С другой стороны, если $M < w_{ij}^{(m-1)}$, то $p_{ij}^{(m)}$ – конкатенация путей $p_{ij}^{(m-1)}$ и $p_{mj}^{(m-1)}$, и поэтому $s_{ij}^{(m)} = s_{im}^{(m-1)}$. Кратчайший путь определяется последовательностью вершин $i, i_1, i_2, ...,$ где

$$i_1 = s_{ij}^{(n)}; i_2 = s_{ij}^{(m)}; i_3 = s_{ij}^{(n)}; ... i_j = s_{ki}^{(n)}. \tag{6}$$

Если же $w_{ij}^{(m)}$ или $w_{ij}^{(m-1)}$ равны ∞, то $w_{ij}^{(m)} = w_{ij}^{(m-1)}$. В алгоритме также предусмотрены процедуры проверки связности графа расчетной модели сети.

Разработанный алгоритм и его программная реализация позволяют найти минимальный путь обхода как первого независимого контура постепенным перебором всей матрицы весовых коэффициентов ветвей, так и пути формирования других независимых контуров, в составе которых должны быть последующие хорды из массива L_j. При невозможности реализации в модели полного списка запланированного массива хорд, сформированного по результатам анализа ранжирования регулирующих устройств, предусмотрено построение дерева графа путем исключения из этого списка трансформаторных ветвей, чувствительность к снижению потерь которых незначительна и управление которыми не

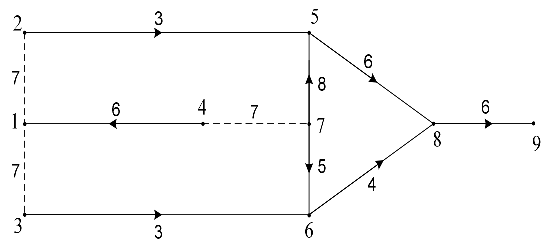

Рис. 3. Граф электрической сети с выбранной хордой и весовыми коэффициентами

дает существенного эффекта от оптимизации режимов. Предложенный алгоритм поиска минимальной длины (весов) контура по критерию неоднородности его ветвей использован для записи матриц соединений и формирования узловых и контурных уравнений состояния электрической сети.

Процесс моделирования и оптимизации расчетной модели рассмотрен на примере электрической сети (рис. 1), граф которой с весовыми коэффициентами каждой из ветвей представлен на рис. 3. Для рассмотренной схемы предварительно определена матрица хорд L_j, в которую согласно приоритету входят трансформаторные ветви 4 – 7, 1 – 3, 1 – 2. Даные ветви в процессе моделирования будут включены в качестве хорд независимых контуров с одновременным поиском минимальной длины (веса) каждого из контуров вокруг этой ветки (хорды).

В результате моделирования получена расчетная модель дерева графа (рис. 4) с тремя независимыми контурами минимальной длины и выбранными на этапе предварительных расчетов хордами. Длина каждого из независимых контуров графа составляет:

1 контур, хорда 4 – 7 (w_{47} =7), обход контура (номер ветви и её вес) – 7 – 6 (5), 6 – 3 (3), 4 – 1 (6), 3 – 1 (7), общая длина контура – $P_{1к.}$ = 28.

2 контур, хорда 1 – 3(w_{13} =7), обход контура (номер ветви и её вес) – 3 – 6 (3), 6 – 7 (5), 7 – 5 (8), 5 – 2 (3), 2 – 1 (7), общая длина контура – $P_{2к.}$ = 33.

3 контур, хорда 1-2(w_{12} =7), обход контура (номер ветви и её вес) – 2-5 (3), 5-8 (6), 8-6 (4), 6-3 (3), 3-1 (7), общая длина контура - $P_{3к.}$ = 30.

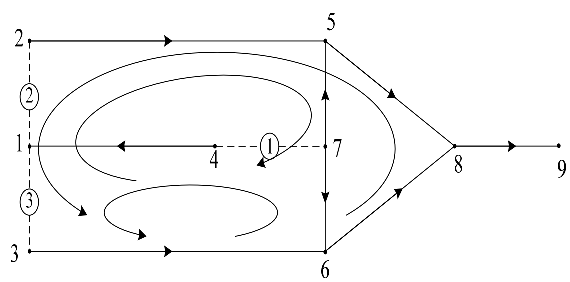

Рис. 4 Независимые контуры графа расчетной модели

Сформированые таким образом контуры минимальной длины дерева графа электрической сети за критерием неоднородности используются для формирования уравнений состояния ЭЭС и определения параметров как установившихся, так и оптимальных режимов. При моделировании дерева графа, для реальных ЭЭС большой размерности реализация сформированного массива хорд полным списком бывает невозможной. А в отдельных случаях и нецелесообразной как с технической, так и с экономической точки зрения, поскольку чувствительность к снижению потерь активной мощности трансформаторов, которые имеют наклонные характеристики (рис. 1), незначительна и управления ими не имеет существенного влияния на параметры оптимального режима ЭЭС.

Таким образом, моделирование дерева графа по предварительно заданному определенному алгоритму в задачах формирования расчетной адаптивной модели ЭЭС и реализация полученных с его помощью управляющих воздействий в АСДУ нормальными режимами позволяет повысить эффективность оперативно-диспетчерского управления режимами, а также за счет упорядочения этих воздействий более рационально использовать ресурс трансформаторов с РПН. Целенаправленное формирование и оптимизация расчетной модели обеспечивают ей значительную гибкость, высокую степень адаптивности и управляемости, что является одним из определяющих факторов при развитии и модернизации существующих АСДУ нормальными режимами ЭЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.

2. Лежнюк П. Д., Зелинский В. Ц., Серова И. А. Методика координации работы регулирующих устройств при оптимальном управлении режимами электрической системы // Устройство преобразования информации для контроля и управления в энергетике. – Харьков, 1992. – С. 108 - 112.

3. Бурков В. Н., Георгидзе И. А., Ловецкий С. Е. Прикладные задачи теории графов. – Тбилиси: Мецниереба, 1974. – 234 с.

4. Зелінський В. Ц., Остра Н. В. Оптимізація розрахункової моделі електроенергетичними системами для автоматизованих систем диспетчерського управління з урахуванням втрат потужності // Вісник ВПІ. – 2005. – № 4. – С. – 63 - 68.

Зелинский Виктор Цезарович – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем.

Зелинский Вадим Викторович – студент института магистратуры, аспирантуры и докторантуры.
Винницкий национальный технический университет.