ЭНЕРГЕТИКА

Дж. А. АВЕТИСЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОДНОГО
КЛАССА СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Современные системы энергоснабжения относятся к сложным системам с большим количеством элементов (источники, преобразователи и потребители энергии, устройства автоматического управления, защиты и т. д.), соединенных между собой сетью передачи и распределения энергии. Задачи синтеза подобных систем формулируются в виде таких многокритериальных задач оптимизации, которые трудно решать даже с помощью ЭВМ большой вычислительной мощности. Поэтому практически процесс синтеза осуществляется поэтапно с постепенным накоплением в последующем использовании информации о проектируемой системе.

На начальных этапах синтеза в первую очередь определяются структура и параметры системы. Под структурой понимается граф, характеризующий направленную передачу энергии от источников к преобразователям и от преобразователей к потребителям (стокам). К параметрам системы относятся показатели, характеризующие качество энергии в отдельных ветвях графа. Выбор структуры и параметров производится с учетом таких интегральных показателей системы как стоимость, масса, надежность и т. д.

Учитывая сложность решения многокритериальных задач оптимизации при неполной информации, в данной работе рассматривается однокритериальная задача оптимального выбора структуры и параметров с детерминированным характером критерия. В отличие от известных работ, например, [1] для решения используется метод динамического программирования, который достаточно универсален по отношению к таким свойствам задачи, как дискретность и непрерывность параметров, линейность и нелинейность функциональных связей [2, 3].

Класс рассматриваемых систем ограничивается следующими допущениями относительно их структуры и параметров. Все структурные элементы (узлы структурного графа системы) делятся на три группы: источники, преобразователи и потребители (стоки) энергии. Каждая группа имеет фиксированные иерархические уровни расположения элементов. На верхних уровнях располагаются источники, на средних — преобразователи и на нижних — стоки. Структурные связи между элементами учитывают лишь функциональную необходимость направленной передачи энергии от источников к преобразователям и от преобразовате-

лей к стокам. Структурные связи допускаются только между элементами, расположенными на разных, но соседних иерархических уровнях.

Структурные свойства реальных систем могут часто не соответствовать принятым допущениям. Так, например, благодаря автоматическим регуляторам или параллельной работе, возникают обратные или поперечные связи между элементами системы, которые не учитываются в рассматриваемой постановке задачи. Подобные несоответствия устраняются рассмотрением укрупненных структурных элементов. Например, вместо нескольких параллельно работающих электрических генераторов с регуляторами напряжения можно структурно рассматривать один эквивалентный источник электроэнергии. Таким образом, путем различной степени детализации и декомпозиции многие реальные системы могут рассматриваться в рамках допускаемых структур.

Параметры системы, характеризующие качество энергии, могут по физическому смыслу меняться как непрерывно (напряжение и т. д.), так и дискретно (число фаз и т. п.). Однако, в силу требований стандартизации и унификации непрерывные параметры также должны соответствовать определенным дискретным уровням. Поэтому можно предполагать, что все параметры являются дискретными и имеют конечное число допустимых значений.

С учетом принятых допущений задача синтеза структуры и параметров ставится следующим образом. Каждый структурный элемент может иметь конечное число вариантов, отличающихся друг от друга конструктивными решениями, параметрами и т. д. Исходя из функциональной равнозначности все варианты одного и того же элемента имеют на выходе одинаковое количество энергии заданного качества. Однако, питание отдельных вариантов может осуществляться различными видами энергии. Многовариантность отдельных элементов приводит к большому количеству возможных вариантов построения структуры и выбора параметров системы. Из возможного множества вариантов системы необходимо выбрать один или несколько так, чтобы минимизировать (максимизировать) значение целевой функции (критерия оптимальности).

Целевая функция является детерминированной, аддитивной и представляет сумму составляющих, определяющих долю отдельных элементов системы. Каждая составляющая является функцией выходной энергии или мощности элемента. Тогда целевая функция для системы с тремя иерархическими уровнями принимает следующий вид:

$$F = \sum_{i=1}^{n_{II}} \sum_{j=1}^{m_{III}} f_{ij}^I(z_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_{II}} \sum_{j=1}^{m_{II}} f_{ij}^{II}(y_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_C} \sum_{j=1}^{m_{CI}} f_{ij}^C(x_{ij}), \quad (1)$$

где n_{II} , n_C — соответственно, число источников, преобразователей и стоков; m_{III} , m_{II} , m_C — количество вариантов для i -го источника, преобразователя и стока; f_{ij}^I , f_{ij}^{II} , f_{ij}^C — составляющие целевой функции для j -го варианта i -го источника, преобразователя и стока; z_{ij} , y_{ij} ,

x_{ij} — энергия (мощность) на выходе j -го варианта i -го источника, преобразователя и стока.

Условия реализуемости каждого элемента системы одновременно только в одном варианте можно получить, придав переменным z_{ij} , y_{ij} , x_{ij} булевский смысл. Если вариант элемента реализован, то соответствующая переменная равна выходной мощности самого элемента. В противном случае она равна нулю. Следовательно, выходная мощность каждого элемента может рассматриваться как сумма выходных мощностей всех его вариантов, т. е.

$$\sum_{j=1}^{m_{\Pi i}} z_{ij} = z_i, \quad i = 1, \dots, n_{\Pi}, \quad z_{ij} = \{z_i, 0\}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{\Pi i}} y_{ij} = y_i, \quad i = 1, \dots, n_{\Pi}, \quad y_{ij} = \{y_i, 0\}, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{C_i}} x_{ij} = x_i, \quad i = 1, \dots, n_C, \quad x_{ij} = \{x_i, 0\}, \quad (4)$$

где z_i , y_i , x_i — соответственно, энергия (мощность) на выходе i -го источника, преобразователя и стока.

Мощность на выходе элемента определяется как сумма мощностей, потребляемых на входе для тех вариантов элементов нижестоящего уровня, которые соединены с данным элементом. Потребляемая мощность на входе элемента для каждого варианта определяется через выходную с помощью соответствующего коэффициента полезного действия. Передача энергии по структурным связям от элемента к элементу предполагается без искажений и потерь, так как это может быть эквивалентно учтено в тех элементах, к которым направлены структурные связи. Тогда, вводя булевы коэффициенты для структурных связей (1 при наличии и 0 при отсутствии), а также учитывая, что мощности на выходе стоков обычно известны, получим

$$z_i = \sum_{j=1}^{n_{\Pi}} \sum_{l=1}^{m_{\Pi l}} k_{ij}^{\Pi\Pi} q_{lj}^{\Pi} (y_{lj}), \quad i = 1, \dots, n_{\Pi}, \quad k_{ij}^{\Pi\Pi} = \{1, 0\}, \quad (5)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^{n_C} \sum_{l=1}^{m_{C_l}} k_{ij}^{C\Pi} q_{lj}^C (x_{lj}), \quad i = 1, \dots, n_{\Pi}, \quad k_{ij}^{C\Pi} = \{1, 0\}, \quad (6)$$

$$x_i = a_i, \quad i = 1, \dots, n_C, \quad (7)$$

где $k_{ij}^{\Pi\Pi}$ — коэффициент соединения i -го источника с j -м вариантом i -го преобразователя; $k_{ij}^{C\Pi}$ — коэффициент соединения i -го преобразователя с j -м вариантом i -го стока; q_{lj}^{Π} , q_{lj}^C — соответственно, энергия (мощность) на входе j -го варианта i -го преобразователя, стока, опре-

деления как функция ресурсов на выходе: q_i — заданное значение мощности на выходе i -го стока.

Функции q_{ij}^I и q_{ij}^C являются непрерывными, монотонно возрастающими и выпуклыми вверх.

Характер этих кривых объясняется известным увеличением коэффициента полезного действия с ростом установленной мощности элемента энергетической системы, а также наличием в нем потерь даже при нулевой мощности на выходе.

Функции f_{ij}^C , f_{ij}^I и f_{ij}^A , дающие оценку вариантам элементов системы, фактически должны иметь характер кривых q_{ij} в силу известной закономерности уменьшения удельных показателей изделия с ростом его единичной мощности. С учетом дискретности стандартных шкал мощностей для отдельных элементов энергетических систем функции f_{ij} будут ступенчатыми. Здесь скачки имеют место не только в начале координат, но и при величинах выходных мощностей, равных дискретным значениям стандартной шкалы. Именно эти точки определяют выбор стандартного изделия для всех промежуточных значений мощностей. Следовательно, при дискретном изменении мощности элементов системы оценка элементов будет также дискретной, т. е.

$$f_{ij}^C = \begin{cases} 0 & \text{при } x_{ij} = 0, \\ b_{ij}^1 & \text{при } 0 < x_{ij} \leq x_{ij}^1, \\ \dots & \dots \\ b_{ij}^r & \text{при } x_{ij}^{r-1} < x_{ij} \leq x_{ij}^r, \end{cases} \quad (8)$$

где $b_{ij}^1, \dots, b_{ij}^r$ — постоянные значения функции для указанных диапазонов изменения мощности; r — количество дискретных точек шкалы мощностей, охватывающих максимально возможный диапазон изменения мощности элемента; $x_{ij}^1, \dots, x_{ij}^r$ — значения мощностей по стандартной шкале.

Выражения, аналогичные (8), можно записать для всех составляющих целевой функции системы. Таким образом, функции f_{ij} (так же, как и q_{ij}) считаются для каждого варианта отдельного элемента известными и заданными в общем случае дискретным способом. В первом приближении или при большой частоте дискретных точек в стандартных шкалах ступенчатые функции могут быть аппроксимированы непрерывными монотонно возрастающими функциями.

В результате задача синтеза получает следующую формулировку: найти значения z_{ij} , y_{ij} , x_{ij} для всех i и j , доставляющие мин (макс) F при выполнении условий (2)–(7) и заданных функциях f_{ij} , q_{ij} , значениях постоянных коэффициентов $k_{i(j)}$ и a_i для всех i и j .

Данная задача относится к классу комбинаторных задач дискретного программирования и имеет практический смысл для оптимизации структуры и параметров энергосистемы по таким критериям как стоимость или масса. Критерии вероятностной структуры, например, надеж-

ность, в данной постановке могут быть учтены лишь косвенно путем ограничений на множество допустимых вариантов структуры или параметров системы или введенным коэффициентам резервирования по числу элементов или его мощности.

В [4] показано, что при многоэтапной трактовке процесса синтеза в соответствии с иерархической структурой системы выражение (1) приводится к виду

$$F = F^C(\bar{x}) - F''[\bar{y}(\bar{x})] + F''[\bar{z}(\bar{y})], \quad (9)$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ — векторы, определяемые как

$$\bar{x} = (x_{ij}) \in D_x, \quad i = 1, \dots, n_c, \quad j = 1, \dots, m_{ci};$$

$$\bar{y} = (y_{ij}) \in D_y, \quad i = 1, \dots, n_{ii}, \quad j = 1, \dots, m_{ii};$$

$$\bar{z} = (z_{ij}) \in D_z, \quad i = 1, \dots, n_{ii}, \quad j = 1, \dots, m_{ii};$$

D_x , D_y , D_z — счетные (конечные) множества векторов, определяемые, соответственно, условиями (4) и (7), (3) и (6), (2) и (5). Тогда процесс минимизации (максимизации) F можно записать как уравнение

$$\min_x F = \min_x \{F^C(\bar{x}) - \min_y [F''(\bar{y})] + \min_z [F''(\bar{z})]\}, \quad (10)$$

которое относится к классу функциональных уравнений Р. Беллмана.

Таким образом, сформулированная выше задача синтеза может быть преобразована к задаче динамического программирования при достаточно слабых предположениях о свойствах F (однозначность определения по параметрам оптимизации и ограниченность по величине на замкнутом множестве параметров). Переход к задаче динамического программирования позволил для автономных электросистем построить простые алгоритмы решения в линейном приближении, апробированные на конкретных примерах [4]. Аналогичный подход можно распространить на энергосистемы более сложной структуры с элементами различной физической природы (электрические, тепловые, гидравлические и т. д.), если задача синтеза тем или иным образом может быть сведена к рассматриваемому классу систем.

Заключение. Задачи оптимизации структуры и параметров систем энергоснабжения с учетом условий стандартизации и унификации можно сформулировать в виде комбинаторных задач дискретного программирования. Последние с помощью анализа иерархической структуры систем преобразуются к задачам динамического программирования, терминология которого позволяет разбить исходную задачу на ряд взаимосвязанных, но более простых задач, которые легко решаются известными методами.

Ջ. Ա. ԱՎԵՏԻԱՆ

ԷՆԵՐԳԱՄԱՏՈՒԿԱՐԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՄԻ ԳԱՍԻ
ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԻ ՈՒ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՍՊՏԻՄԻՉԱՑՈՒՄԸ

Ա Վ Փ Ի Ն Փ Ի Ո Ւ Մ

Ուսումնասիրվում է էլեմենտների տեղադրման աստիճանական կառուցվածքով էներգամատակարարման համակարգերի դասակարգը: Կառուցվածքի օպտիմիզացման խնդիրներն ու աչղայտի համակարգերի պարամետրերը (չափերը) ձևակերպվում են դինամիկ ծրագրավորման տերմիններով: Գաթույլ է տալիս ելակետային խնդիրը բաժանել մի խումբ փոխադարձ կապված, սակայն ավելի պարզ խնդիրների, որոնց լուծումը կատարվում է հաշտնի մեթոդներով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Лазарев Н. А. Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов. М., «Машиностроение», 1976. 256 с.
2. Белая Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М., «Наука», 1965, 460 с.
3. Аветисян Дж. А., Соколов В. С., Хан В. Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. М., «Энергия», 1976. 208 с.
4. Аветисян Дж. 1. О синтезе электрических систем. «Известия АН СССР Энергетика и транспорт», 1978, № 2.