

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И УСТРОЙСТВ ДАЛЬНИХ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ**

Р. И. БОРИСОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций
и электрических систем и сетей)

Совокупности участков дальних линий электропередач переменного тока и их элементов, конечных и промежуточных присоединений образуют сложную многопараметрическую систему. Параметрами такой системы являются определенные переменные режимов и переменные разных элементов схем, известные сочетания которых позволяют произвести описание электрического и технико-экономического состояния всей системы в эксплуатационных и проектных расчетах.

Установление параметров режима и параметров схем в виде состава и вида работающего оборудования является сложной задачей вследствие взаимной причинной обусловленности действия разных факторов и необходимости выполнения условий по требуемой экономичности и надежности работы. Попытки изолированного решения разных задач, например, по выбору средств продольной и поперечной компенсации [1], регулированию реактивных мощностей [2] и др., в отрыве от взаимообуславливающих факторов, неизбежно приводило к неэкономичным решениям, так как сумма локальных минимумов частных решений в ограниченной постановке задач могла оказаться больше значения минимума для решения в ее общей форме. Использование ЭЦВМ позволяет подойти к выбору параметров именно как многофакторных задач нелинейного программирования. В этом отношении следует отметить целый ряд работ, в которых ставятся и решаются задачи энергетики в весьма общей форме [3, 4, 5]. В работе И. А. Федоровой [5] пропускная способность дальней электропередачи по условиям статической устойчивости и условиям предельных динамических переходов формулируется в виде многофакторных задач от параметров схем, состава ее элементов и параметров режима. По минимуму стоимости передачи электрической энергии решаются задачи проектирования и конструкций дальних электропередач. Дальнейшие обобщения в постановке и решении этих задач представляются совершенно необходимыми и далеко не исчерпанными.

Решение задач проектирования по выбору параметров элементов и участков должны решаться с учетом состояния, назначения и развития всей схемы объединения и отдельных ее элементов. Правильное определение функций дальних электропередач на разных этапах электрификации позволяет более обоснованно подходить к задачам их проектирования, как выбору соответствующих параметров по некоторым критериям цели с учетом статистических характеристик прогнози-

рования режимов работы электропередач и промежуточных систем и технических ограничений по разным условиям. Вероятностный характер по ряду исходных данных должен учитываться при создании математических моделей, отражающих процесс проектирования и работу таких схем [6].

Для расчетов на проектирование данные по составу работающего оборудования и его параметрам, конструктивным параметрам электропередачи по участкам могут выступить в качестве переменных, подлежащих определению. Условия по статической устойчивости, распределению напряжения, ограничению токов короткого замыкания, нагреву генераторов по току статора и ротора и др. выступают как требования надежности в виде ограничений.

Задачи эксплуатационных расчетов по настройке режимов по существу являются более простыми, чем задачи проектирования состава и параметров элементов схем. Это относится к любой форме их постановки и как детерминированных, и как стохастических. Для задач на проектирование характерно появление дополнительных переменных, подлежащих определению в виде параметров элементов схем и состава оборудования. При этом целевая функция теряет условия гладкости [7], что существенно усложняет решение таких задач. Кроме того, поскольку шкала сечений проводов дальних электропередач и перечень оборудования по параметрам и составу величины дискретные, то это требует использования методов нелинейного целочисленного программирования. Однако, установленная мощность конечных и промежуточных устройств систем должна соответствовать предельной транзитной мощности, передаваемой по линии. Поэтому говорить о вариациях состава оборудования в широких пределах не приходится. Оборудование такого ряда является уникальным и мощности его предельные. Поэтому задача о составе может быть решена простым перебором вариантов, поскольку их число не превышает двух или трех. Тогда для каждого варианта целевая функция, составленная по уравнениям сетевых мощностей, оказывается функцией гладкой, а учет ограничений не может нарушить этих свойств. Что касается элементов собственно линии электропередачи, то для них задача проектирования формулируется в полной мере.

Для детерминированного расчетного значения передаваемой мощности или заданного распределения значений передаваемых мощностей на расчетный стол можно говорить в первую очередь о параметрах продольных и поперечных КУ, требуемых для работы линии, о значениях волнового сопротивления и волновой длины собственно линии на разных участках и т. д. При этом зависимости затрат от этих параметров можно считать функциями гладкими, поскольку значения волновой длины и волнового сопротивления зависят не столько от сечения проводов ЛЭП, сколько от конструкции линии, а параметры продольных КУ набираются из элементов, мощности которых много меньше мощности всей установки или плавно регулируются. Назначение дросселей поперечной компенсации заключается в регулировании напряжения и повышения уровня динамической устойчивости. Последнее условие на обеспеченность состояния динамической устойчивости в виде соотношения к параметрам схем и параметрам режима еще не сформулировано и находится в стадии разработок. Задача может формулироваться на определение параметров нерегулируемых или регулируемых поперечных КУ по заданному распределению расчетных нагрузок для обеспечения нужного эффекта их действия по напряжениям в узловых точках схемы.

Как известно, критерием оптимизационных расчетов в энергетике являются расчетные затраты для объектов стабилизированных в своем развитии во времени. Рассматриваемая задача относится к объектам такого класса. Поэтому в качестве критерия оптимизации используются расчетные затраты. В качестве ограничений используются требования по надежности и технические условия работы схемы и ее элементов. Математическое формулирование некоторых задач управления было изложено ранее в статьях этого сборника. Однако для задач на проектирование их использование имеет некоторую специфику. Сначала рассмотрим задачу выбора параметров элементов электропередач для детерминированных форм исходных данных о значении расчетной нагрузки.

Математическая модель по выбору параметров установок продольной и поперечной компенсации по детерминированным значениям передаваемых мощностей

Рассмотрим схему на рис. 1, в которой приемная Π_1 и передающая Π_2 системы связываются дальней электропередачей с одной сбалансированной по активной мощности промежуточной системой. Эти условия и схемы могут быть другими, более сложными и особенными, что не нарушит построений математической модели. В качестве расчетной принимается передаваемая мощность P_{89} . Переток P_{11-5} по условию принимается равным нулю.

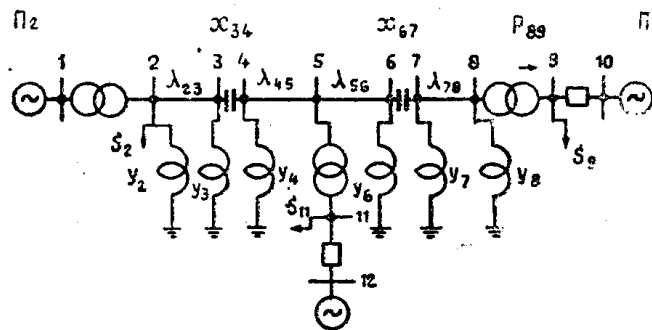


Рис. 1. К управлению параметрами продольных и поперечных КУ электропередачи переменного тока

Переменная часть приведенных затрат при передаче заданной мощности P_{89} запишется так:

$$\begin{aligned} \sum Z &= Z_{y_2} + Z_{\lambda_{23}} + Z_{y_3} + Z_{x_{34}} + Z_{y_4} + Z_{\lambda_{45}} + Z_{y_5} + Z_{x_{67}} + Z_{y_6} + Z_{y_7} + Z_{\lambda_{78}} + Z_{y_8} = \\ &= \sum_6^6 Z_y + \sum_4^4 Z_\lambda + \sum_2^2 Z_x, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum Z &= Z_{y_2}(y_2, P_{23}^*) + Z_{\lambda_{23}}(\lambda_{23}, P_{23}) + Z_{y_3}(y_3, P_{23}) + Z_{x_{34}}(x_{34}, P_{34}) + \\ &+ Z_{y_4}(y_4, P_{34}) + Z_{\lambda_{45}}(\lambda_{45}, P_{45}) + Z_{y_5}(y_5, P_{56}) + Z_{x_{67}}(x_{67}, P_{56}) + \\ &+ Z_{y_6}(y_6, P_{67}) + Z_{\lambda_{78}}(\lambda_{78}, P_{78}) + Z_{y_7}(y_7, P_{78}) + Z_{y_8}(y_8, P_{78}). \quad (2) \end{aligned}$$

В последнем соотношении волновые длины участков предполагаются известными, хотя величины, которые их определяют, могут быть искомыми, а в качестве неизвестных принимаются параметры элементов КУ ($y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, x_{34}, x_{67}$). Поскольку мощности на каждом участке зависят от параметров режима соответствующих участков, то

затраты оказываются в функциональной зависимости от этих параметров режима и параметров схем.

$$\sum Z = \sum Z(y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, x_{34}, x_{67}, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \delta_7, \delta_8) \rightarrow \sum Z(m\Pi) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Параметры элементов КУ должны быть выбраны таким образом, чтобы приведенные затраты были наименьшими и обеспечивались требуемые технические условия работы электропередачи и элементов конечных и промежуточных систем. Эти требования в виде ограничений к параметрам режима были сформулированы ранее. Предполагается, что проводимости поперечных КУ могут принимать любые значения от $-\infty$ до $+\infty$. Параметры продольных КУ ограничиваются, как известно, условиями статистической устойчивости и значениями токов короткого замыкания, а именно: значение параметров x_{ij} должно быть больше нуля, но меньше модуля параметра B_{ij} некомпенсированной линии.

$$0 < \pi x_{ij} < \pi |B_{ij}|,$$

где π — символ перечисления.

Все ограничения в виде двухсторонних неравенств к параметрам схем и параметрам режима могут быть обобщенно записаны

$$\pi \underline{\Pi}_i \leq \pi \Pi_i \leq \pi \overline{\Pi}_i,$$

где

$$\Pi_i \in (E_{11}; E_{10}; E_{12}; \delta_{01}; \delta_{010}; \delta_{012}; K_{12}; K_{8,9}; K_{11,12}; U_1; U_2; U_3; U_4; U_5; U_6; U_7; U_8; \delta_1; \delta_2; \delta_3; \delta_4; \delta_5; \delta_6; \delta_7; \delta_8).$$

Ограничения в виде односторонних неравенств в обобщенной форме представляются так:

$$0 < \pi \Pi_j \leq \pi \overline{\Pi}_j, \quad (6)$$

где

$$\Pi_j \in (\delta_{E_1} - \delta_{E_{10}}; \delta_{E_1} - \delta_{E_{12}}; \delta_{E_{10}} - \delta_{E_{12}}; x_{34}; x_{67}).$$

Уравнения небалансов по активным мощностям образуют совокупность из 14 уравнений, а по реактивному из 12 уравнений:

$$\pi P_{\text{нб}}(m'\Pi) = 0,$$

$$\pi Q_{\text{нб}}(m'\Pi) = 0.$$

где

$$(m'\Pi) \in (E; E_{10}; E_{12}; \delta_{01}; \delta_{010}; \delta_{012}; K_{12}; K_{8,9}; K_{11,12}; U_1; U_2; U_3; U_4; U_5; U_6; U_7; U_8; \delta_1; \delta_2; \delta_3; \delta_4; \delta_5; \delta_6; \delta_7; \delta_8; y_2; y_3; y_4; y_5; y_6; y_7; y_8; x_{34}; x_{67}).$$

Известным образом, путем введения дополнительных переменных, неравенства преобразуются в равенства, после чего может быть составлена функция Лагранжа, из которой получается система нелинейных алгебраических уравнений относительно всех неизвестных. Общее число всех неизвестных при определении параметров КУ и законов их регулирования составляет 120. Для совокупностей режимов передаваемых активных мощностей, таким образом, устанавливаются требуемые законы регулирования и мощности поперечных и продольных КУ, ис-

ходя из принципа минимума приведенных затрат с ограничениями по разным условиям.

Математическая модель выбора параметров КУ для вероятностных форм исходных данных о передаваемых мощностях

Нагрузка дальних электропередач является случайной величиной с определенными значениями вероятности. То же самое можно утверждать о погодных условиях, механических нагрузках, состояниях по возмущениям режима. Другие факторы, принимающие участие в расчете, в виде, например, нормативного коэффициента эффективности капитальных затрат, издержек на обслуживание и других являются детерминированными величинами. Задачи проектирования должны решаться для комбинированных условий задания исходных данных в виде вероятностных и детерминированных совокупностей. Функция цели формулируется как математическое ожидание приведенных затрат, т.е. как вероятностная категория минимума затрат ожидаемых в среднем [6]. Технические условия не могут формулироваться по математическому ожиданию, поскольку эти условия должны гарантированно выполняться для каждого рабочего режима, а не в среднем и с вероятностью этих событий, равной единице.

Распределение передаваемых мощностей подчиняется определенным законам. Однако параметры КУ могут определяться по минимуму целевого функционала и как постоянные величины, не зависящие от нагрузки. Если бы распределение значений тридцатиминутных максимумов за расчетный промежуток времени было одинаковым, то задача решалась по минимуму приведенных затрат. Поскольку число повторений максимумов тридцатиминутных нагрузок оказывается разным, то следует ввести математическое ожидание, как число повторений умноженное на значение каждой нагрузки и приближать параметры схем по математическому ожиданию. Допустим, что для схемы на рис. 1 требуется определить параметры продольных и поперечных КУ, если известна вероятность распределения активной нагрузки P_{89} для конца электропередачи $P_{89} = P_{89}(\rho)$,

ρ — вероятность события.

Ожидаемые удельные затраты для всех участков и элементов КУ могут быть определены так:

$$\sum Z = \sum_i \sum_m Z(m\Pi) \cdot \rho_i. \quad (9)$$

Ограничения в виде равенств и неравенств (5), (6), (7) могут быть записаны в виде сумм, поскольку для каждой переменной они должны выполняться для всей совокупности режимов

$$\sum_i \pi P_{i, \text{ог}}(m\Pi) = 0, \quad (10)$$

$$\sum_i \pi Q_{i, \text{ог}}(m\Pi) = 0, \quad (11)$$

$$\sum_i \pi \underline{\Pi}_i \leq \sum_i \pi \Pi_i \leq \sum_i \pi \bar{\Pi}_i, \quad (12)$$

$$0 < \sum_i \pi \Pi_j \leq \sum_i \pi \bar{\Pi}_j. \quad (13)$$

Модель в стохастической форме может быть развита для исследований экономического диапазона регулирования напряжения, решения задач распределения активных и реактивных мощностей в объединениях такого рода. Представляется возможность произвести оценку эффективности реализации оптимальных и других эксплуатационных режимов. Могут быть поставлены и решены вопросы совместной работы электропередач 1150, 750 и 500 кВ и сформулировать задачи стратегии развития электрических сетей как при избытке, так и недостатке исходной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. И. Борисов. Выбор оптимальных параметров компенсирующих устройств для длинной шины, связанной с промежуточными системами. Труды ТЭИ СО АН СССР, вып. 14, Новосибирск, 1962.
2. Р. И. Борисов. Выбор оптимальных параметров регулирования напряжения в промежуточных системах, связанных дальней линией переменного тока. Доклады совещания по вопросам передачи электроэнергии на расстояние 2000—3000 км. Новосибирск, 1960.
3. Л. А. Крумм. Градиентный метод оптимизации режимов электроэнергетических систем. «Электричество», 1963, № 6.
4. Г. Б. Левенталь, Л. С. Попырин. Оптимизация теплоэнергетических установок. М., «Энергия», 1970.
5. И. А. Федорова. Элементы анализа и синтеза систем электропередач с применением ЭЦВМ. Автореферат докторской диссертации. Минск, 1970.
6. Е. В. Цветков. О методике проектирования энергосистем ГЭИ. Тр. ВНИИЭ, вып. XIII, 1961.
7. Д. Хедли. Нелинейное и динамическое программирование. М., «Наука», 1967.