ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 210 1974

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ПО РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОБЪЕДИНЕНИЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ДАЛЬНИМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Р. И. БОРИСОВ

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

Современный уровень развития электроэнергетики характеризуется внедрением линий электропередач на напряжения 500 и 750 *кв*, которые выполняют в основном роли межсистемных связей. Находящиеся в эксплуатации линии 500 кв в составе ОДУ Сибири осуществляют роль линий межсистемного реверсивного обмена с большими изменениями перетоков мощностей и высокими значениями коэффициента запаса по статической устойчивости. Обмены мощностей осуществляются только в пределах смежных электрических систем. По мере роста мощностей объединения, протяженности и номинального напряжения линий будет производиться и транзитная передача электрической энергии. При этом в зависимости от разных условий могут меняться соотношения между транзитной и обменной мощностями промежуточных систем, подключенных по трассе дальней электропередачи. Для этих условий многие вопросы проектирования и отладки режимов таких схем потребуют своего решения. Распределение активных и реактивных мощностей между системами, роль и влияние промежуточных систем, значений параметров систем регулирования в концевых и промежуточных системах, переходных процессов, резервирования, надежности, технических и экономических условий их совместной работы и другие потребуют своего решения.

Повышение рабочего напряжения дальних линий электропередач до 750, 1200 *кв*, большие ожидаемые колебания нагрузок этих линий, исходя из опыта эксплуатации электропередач 500 *кв*, особенно в первое время их работы — все эти причины приведут к острой проблеме управления реактивными мощностями, которая может и не решиться в этих условиях обычными и апробированными способами. Кроме того, приходится считаться, что развитие энергообъединений характеризуется некоторой «связностью» состояний. Эта связность возникает из реальных условий и она касается или условий регулирования напряжения в отдельных частях схемы, или заданных значений перетоков мощностей на участках, или условиями покрытия нагрузки, исходя из режимов теплового потребления и т. д. Для таких связных по условиям объединений энергетических систем существующие методы расчетов режимов и решений задач проектирования являются существенно ограниченными. Математические модели для анализа и синтеза подобных образований должны соответствовать их техническому содержанию [1]. Рост и развитие в чисто количественных отношениях не могут не привести к качественно новым явлениям, своевременное распознание которых является крупной научно-технической проблемой. При решении задач управления реактивными мощностями предполагается, что промежуточные системы сбалансированы по активной мощности, а по дальней электропередаче передается транзитная мощность в приемную систему. Тогда возникает важная задача нужного управления реактивной мощностью каждого источника. Каждая промежуточная и концевая системы являются источниками, способными благоприятно влиять на потокораспределение реактивных мощностей, управлять напряжением и влиять на потери. Для некоторых других режимов электропередачи переменного тока будут оказывать благоприятное влияние на технико-экономические показатели промежуточных систем и надежность электроснабжения в целом.

Условия оптимальности режимов

Электропередача с промежуточными системами формируется в виде цепной схемы с неоднородными элементами (рис. 1).

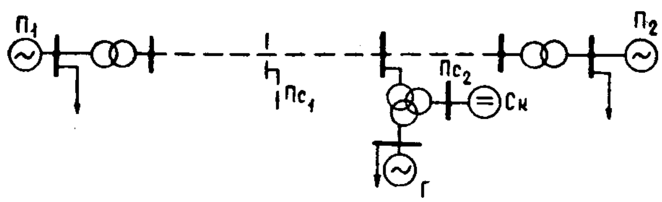

Рис. 1. Цепные схемы объединений энергосистем с электропередачами переменного тока

Для описания состояния таких схем весьма удобной формой являются уравнения сетевых мощностей, которые выражают мощности начала (i) и конца (j) каждого участка через напряжения (U_i и U_j), углы (δ_i и δ_j) и параметры участка ($A_{ij} \angle \varphi_{A_{ij}}$; $B_{ij} \angle \varphi_{B_{ij}}$; $C_{ij} \angle \varphi_{C_{ij}}$; $D_{ij} \angle \varphi_{D_{ij}}$) [2]. Условия потокораспределения активных и реактивных мощностей для каждого узла должны удовлетворяться при соответствующих значениях переменных параметров режима. Нагрузки каждого узла при этом могут замещаться по статическим характеристикам постоянными сопротивлениями или постоянными мощностями. Для совокупностей всех узлов могут быть сформированы системы уравнений по переменным параметрам режима в виде таких соотношений:

$$\sum^{n} P_{\text{н}\delta_i}(U_i;\ U_j;\ \delta_i;\ \delta_j;\ (\dot{A}_{ij})) = 0, \qquad (1)$$

$$\sum^{n} Q_{\text{н}\delta_i}(U_i;\ U_j;\ \delta_i;\ \delta_j;\ (\dot{A}_{ij})) = 0, \qquad (2)$$

где n — число узлов схемы.

Расчеты на проектирование по выбору параметров отдельных элементов схем и параметров устройств ($\dot{A}_{ij}$) могут быть сформулированы по формулам (1) и (2) совместно с переменными параметрами режима. Число независимых уравнений будет являться при этом недостаточным для определения всех неизвестных. Потребуется вводить дополнительные условия. Однако в такой постановке и решении задач как на проектирование, так и в эксплуатации содержатся определенные недостатки и упущения. Определение активных и реактивных мощностей балансирующего узла и других генераторных пунктов не позволяет судить о том, какими средствами регулирования достигается установление требуемого режима, а также судить о нагреве генераторов. Могут оказаться неудовлетворенными требования по поддержанию устойчивости, распределению напряжения, ограничению токов к. з. и другие технические и экономические условия. Простой перебор возможных вариантов немыслимо усложняет задачу. Для решения этих задач, видимо, можно применить аппарат многофакторного анализа в виде математической теории планирования эксперимента.

Методы режимных расчетов энергосистем должны обеспечивать настройку состояний по всем элементам заданной совокупности с учетом индивидуальных особенностей каждого элемента и ограничений по разным техническим условиям. При создании математической модели задачи управления энергосистем по реактивной мощности возможны и имеют практическое значение как детерминированный, так

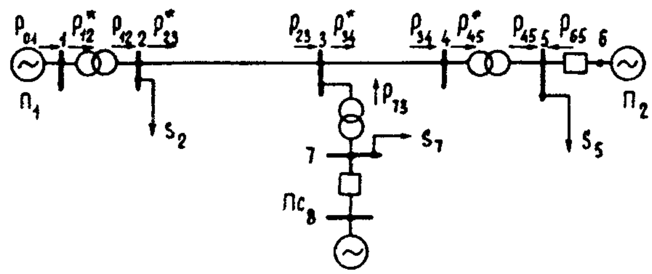

Рис. 2. Электропередача переменного тока с одной промежуточной системой

и стохастический подход к определению значений передаваемых мощностей и режимов потребления в приемной, передающей и промежуточной системах. Информация в детерминированном виде больше относится к области вопросов диспетчерского управления, а в стохастическом — для решения задач проектирования и долгосрочного планирования. Поэтому эти задачи могут рассматриваться и решаться на разных уровнях. Однако это не влияет на математическую модель задачи как некоторой оптимальной целевой формы с техническими ограничениями разного вида, которые выступают как требования надежности. В качестве целевой формы принимаются расчетные затраты, а техническими ограничениями данной задачи являются условия по статической устойчивости, распределению напряжения, ограничению токов короткого замыкания, нагреву генераторов по току статора и ротора, регулировочному диапазону трансформаторов. Учитываются условия связности режима (1), (2) по первому закону Кирхгофа.

Рассматривается схема на рис. 2 по связи передающей $П_1$ и приемной $П_2$ энергосистем дальней электропередачей переменного тока с одной промежуточной системой (ПС). Дальнейшие обобщения условий и требований на схемы более сложные по составу и конфигурации не вызывают принципиальных трудностей.

Направления потоков активных мощностей указаны на схеме. Значение P_{45} известно и отлично от нуля, а поток P_{73} принят равным нулю. Если состав оборудования предполагать известным, что для заданного значения передаваемой активной мощности решается простым перебором вариантов, то настройка режима должна производиться по распределению реактивных мощностей между источниками. Она должна соответствовать требованию минимума эксплуатационных расходов, которые складываются из стоимостного выражения потерь и затрат на дополнительную установленную мощность на электростанциях для покрытия потерь [3]

$$\min f(m\Pi) = \min \left(\sum P_{пот} c_m c_p \kappa_y + \sum P_{пот} c_п\right),$$

где

c_m — коэффициент попадания потерь соответствующей нагрузки в максимум;

$c_п$ — удельная стоимость потерь энергии;

c_p — коэффициент резерва по активной мощности;

κ_y — удельная стоимость активной мощности электростанций.

Суммарные потери $\Sigma P_{пот}$ зависят от переменных параметров режима и могут быть записаны так:

$$\sum_{ij} P_{пот} = \sum_{ij} \frac{D_{ij}}{B_{ij}} U_i^2 \cos(\Psi_{D_{ij}} - \Psi_{B_{ij}}) + \sum_{ij} \frac{A_{ij}}{B_{ij}} \cos(\Psi_{A_{ij}} - \Psi_{B_{ij}}) -$$

$$- \sum_{ij} 2 \frac{U_i U_j}{B_{ij}} \cos(\delta_i - \delta_j) \cos \Psi_{B_{ij}} \to \min.$$

Для расматриваемых условий число переменных параметров режима составляет 12 ($m\Pi \in U_1$; U_2; U_3; U_4; U_5; U_6; U_7; U_8; δ_1; δ_2; δ_3; δ_4; δ_5; δ_6; δ_7; δ_8). Отыскание значений переменных, соответствующих минимуму выражения (4), методами дифференциального исчисления недопустимо, поскольку значения переменных параметров режима весьма жестко ограничиваются техническими условиями работы энергосистем.

Условия распределения напряжения

Условия распределения напряжения сводятся к двухсторонним неравенствам в виде требований поддержания напряжений в узловых точках схемы, к которым подключены источники или потребители [4].

$$0{,}9 = \underline{U_i} \leqslant U_i \leqslant \overline{U_i} = 1{,}05. \tag{5}$$

Условия по нагреву статора и ротора генераторов

Для типового турбогенератора внутренние электрические параметры (E_i и δ_{0i}) аппроксимируются кусочно-линейными характеристиками от мощностей и напряжения, как при работе с индуктивной нагрузкой, так и при работе в области недовозбуждения [4].

$$E_{0i} = v_E U_i + \pi_E P_{0i} + q_E Q_{0i}, \tag{6}$$

$$\delta_{0i} = v_\delta U_i + \pi_\delta P_{0i} + q_\delta Q_{0i}. \tag{7}$$

По второй форме граничные условия по выбранным параметрам выражаются в форме двухсторонних неравенств

$$\underline{E_{0i}} \leqslant E_{0i} < \overline{E_{0i}}, \tag{8}$$

$$\underline{\delta_{0i}} \leqslant \delta_{0i} \leqslant \overline{\delta_{0i}}. \tag{9}$$

Условия связности по балансам активных и реактивных мощностей в узловых точках схемы

Поскольку направление потоков активных мощностей в расчетной схеме (рис. 2) считается известным, это позволяет составить уравнения балансов активных мощностей в виде формулы (1). Для составления уравнений балансов по реактивным мощностям следует задаться их произвольным потокораспределением.

Тогда

$$P_{01}(E_1;\ U_1;\ \delta_{01}) = P^*_{12}(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2;\ \kappa_{12}), \tag{10-1}$$

$$P_{12}(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2;\ \kappa_{12}) = P_2 + P^*_{23}(U_2;\ U_3;\ \delta_2;\ \delta_3), \tag{10-2}$$

$$P_{23}(U_2;\ U_3;\ \delta_2;\ \delta_3) = P^*_{34}(U_3;\ U_4;\ \delta_3;\ \delta_4), \tag{10-3}$$

$$P_{34}(U_3;\ U_4;\ \delta_3;\ \delta_4) = P^*_{45}(U_4;\ U_5;\ \delta_4;\ \delta_5), \tag{10-4}$$

$$P_{45}(U_4;\ U_5;\ \delta_4;\ \delta_5;\ \kappa_{45}) + P_{65}(U_6;\ U_5;\ \delta_6;\ \delta_5) = P_5, \tag{10-5}$$

$$P_{06}(E_6;\ U_6;\ \delta_{06}) = P_{65}(U_6;\ U_5;\ \delta_6;\ \delta_5); \tag{10-6}$$

$$P_{73}(U_7;\ U_3;\ \delta_7;\ \delta_3;\ \kappa_{73}) = 0, \tag{10-7}$$

$$P_{45}(U_4;\ U_5;\ \delta_4;\ \delta_5;\ \kappa_{45}) = P_{45}, \tag{10-8}$$

$$P_{08}(E_{08};\ \delta_{08};\ U_8) = P_7 + P^*_{73}(U_7;\ U_3;\ \delta_7;\ \delta_3;\ \kappa_{73}), \tag{10-9}$$

$$Q_{01}(E_1;\ \delta_{01};\ U_1) + Q_{21}(U_2;\ U_1;\ \delta_2;\ \delta_1;\ \kappa_{12}) = 0, \tag{11-1}$$

$$Q_{12}(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2;\ \kappa_{12}) + Q_{32}(U_3;\ U_2;\ \delta_3;\ \delta_2) +$$
$$+ Q_{73}(U_7;\ U_3;\ \delta_7;\ \delta_3;\ \kappa_{73}) = 0, \tag{11-2}$$

$$Q_{08}(E_8;\ \delta_{08};\ U_7) + Q_{37}(U_3;\ U_7;\ \delta_3;\ \delta_7;\ \kappa_{73}) = 0, \tag{11-3}$$

$$Q_{34}(U_3;\ U_4;\ \delta_3;\ \delta_4) + Q_{54}(U_5;\ U_4;\ \delta_5;\ \delta_4;\ \kappa_{45}) = 0, \tag{11-4}$$

$$Q_{45}(U_4;\ U_5;\ \delta_4;\ \delta_5;\ \kappa_{45}) + Q_{06}(E_6;\ \delta_{06},\ U_6) = 0. \tag{11-5}$$

Потоки мощности в начале и конце участка записываются в таком виде:

$$P^*_{ij} = U_i^2 \frac{D_{ij}}{B_{ij}} \cos(\Psi_{D_{ij}} - \Psi_{B_{ij}}) - \frac{U_i U_j}{B_{ij}} \cos(\delta_i - \delta_j + \Psi_{B_{ij}}) =$$
$$= P^*_{ij}(U_i;\ U_j;\ \delta_i;\ \delta_j), \tag{12-1}$$

$$P_{ij} = -U_j^2 \frac{A_{ij}}{B_{ij}} \cos(\Psi_{A_{ij}} - \Psi_{B_{ij}}) + \frac{U_i U_j}{B_{ij}} \cos(\delta_i - \delta_j - \Psi_{B_{ij}}) =$$
$$= P_{ij}(U_i;\ U_j;\ \delta_i;\ \delta_j), \tag{12-2}$$

$$Q^*_{ij} = U_i^2 \frac{D_{ij}}{B_{ij}} \sin(\Psi_{D_{ij}} - \Psi_{B_{ij}}) + \frac{U_i U_j}{B_{ij}} \sin(\delta_i - \delta_j + \Psi_{B_{ij}}) =$$
$$= Q^*_{ij}(U_i;\ U_j;\ \delta_i;\ \delta_j), \tag{13-1}$$

$$Q_{ij} = -U_j^2 \frac{A_{ij}}{B_{ij}} \sin(\Psi_{A_{ij}} - \Psi_{B_{ij}}) + \frac{U_i U_j}{B_{ij}} \sin(\delta_i - \delta_j - \Psi_{B_{ij}}) =$$
$$= Q_{ij}(U_i;\ U_j;\ \delta_i;\ \delta_j). \tag{13-2}$$

Активные потери определяются так:

$$P_{\text{пот}} = U_i^2 \frac{D_{ij}}{B_{ij}} \cos(\Psi_{D_{ij}} - \Psi_{B_{ij}}) + U_j^2 \frac{A_{ij}}{B_{ij}} \cos(\Psi_{A_{ij}} - \Psi_{B_{ij}}) -$$
$$- 2 \frac{U_i U_j}{B_{ij}} \cos(\delta_i - \delta_j) \cos \Psi B_{ij}. \tag{14-1}$$

Обобщенные параметры $\dot{A}$ соответствующего участка могут содержать комплексные коэффициенты трансформации по току и напряжению, которые следует учитывать в качестве переменных при решении задач потокораспределения.

Учет значений коэффициентов трансформаций в качестве переменных в выражениях функционала (3) и ограничениях (10-13; 10-2; 10-4; 10-5; 10-7; 10-8; 11-1; 11-2; 11-3) в принципе не затрудняет производство расчетов. При этом параметры каждого элемента в именованных единицах рассчитываются на своей ступени напряжения. В схему замещения трансформаторы вводятся не только параметрами приведенными к любой ступени, но и элементами идеальной трансформации с комплексной матрицей ($\dot{A}$), параметры которой определяются по формулам:

$$\dot{A} = \dot{\kappa}; \quad \dot{B} = 0; \quad C = 0; \quad \dot{D} = \frac{1}{\hat{\kappa}}. \tag{15}$$

Значения модулей и аргументов величин $\dot{\kappa}$ образуют двусторонние неравенства:

$$\underline{\kappa}_{ij} \leqslant \kappa_{ij} \leqslant \bar{\kappa}_{ij}, \tag{16}$$

$$\underline{\Psi}_{\kappa_{ij}} \leqslant \Psi_{\kappa_{ij}} \leqslant \bar{\Psi}_{\kappa_{ij}}. \tag{17}$$

В соотношениях (10-1; 10-6; 10-9; 11-1; 11-3; 11-5), следуя первой форме расчетов э.д.с. генераторных станций, E_i можно вывести из уравнений балансов и ограничений по статической устойчивости, выразив их через параметры внешней части схемы.

Так, для первой станции

$$P_{01}(E_1;\ U_1;\ \delta_{01}) = \overset{*}{P}_{12}(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2),$$

поскольку

$$E_1 = v_{E_1}(U_1) + \pi_{E_1} P_{01} + q_{E_1} Q_{01} = v_{E_1} U_1 + \overset{*}{P}_{12}(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2) +$$
$$+ q_{E_1}(-Q_{21}(U_2;\ U_1;\ \delta_2;\ \delta_1)) = E_1(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2).$$

Тогда

$$P_{01}(E_1(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2);\ U_1;\ \delta_{01}) - \overset{*}{P}_{12}(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2) = 0$$

или

$$P_{\text{нб}_1}(U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2;\ \delta_{01}) = 0.$$

Число переменных по первой форме расчета (с исключением K и E из числа независимых переменных) для схемы на рис. 2 составит 19:

$$(\delta_{01};\ \delta_{06};\ \delta_{08};\ U_1;\ U_2;\ U_3;\ U_4;\ U_5;\ U_6;\ U_7;\ U_8;\ \delta_1;\ \delta_2;\ \delta_3;\ \delta_4;\ \delta_5;\ \delta_6;\ \delta_7;\ \delta_8)$$

По второй форме число независимых переменных будет равно 25 (добавляются 3 э.д.с. и 3 коэффициента трансформаций).

Ограничения по условиям статической устойчивости

Условия выражаются в виде одностороннего неравенства по всем переменным параметрам режима [5]

$$a_n(m\Pi) > 0. \tag{18}$$

Или в виде неравенств по взаимным углам генераторных станций:

$$0 < \delta_i - \delta_{0j} \leqslant \bar{\delta}_{ij}. \tag{19}$$

Условия по ограничениям токов короткого замыкания в энергосистемах

Требования ограничений т. к. з., как было показано в [4], сводятся к определению в специальной подпрограмме значений разделяющих реактивностей (x_{65} и x_{87}) при известных условиях о мощности трехфазного короткого замыкания в заданной точке и мощности источников питания. Эти значения реактивностей сказываются величинами известными и своими параметрами (A_{ij}) входят в схему замещения.

Обоснования по выбору метода решения задачи

Как отмечалось ранее, число переменных функционала цели равно двенадцати, число независимых переменных в соотношениях (10-1 — 10-9а, 11-1 — 11-5), заданных в виде равенств, 19 или 25. Кроме того, имеются дополнительные неравенства (5), (8), (9), (17), (18), (19) по переменным параметрам режима разного вида и числа.

Из соотношений в виде равенств или неравенств дополнительные переменные $M - m\Pi$ не могут быть явным образом выражены через основные переменные функционала ($m\Pi$). Это вызывает дополнительные трудности при использовании градиентного метода или его модификаций для решения задачи. Поэтому используется метод неопределенных множителей Лагранжа [6], для чего все неравенства посредством введения дополнительных переменных записываются в виде равенств в таком виде:

$$U_1 + \bar{x}_1 = 1{,}05, \quad (20\text{-}1) \qquad U_1 - \underline{x}_1 = 0{,}9, \quad (21\text{-}1)$$

$$U_2 + \bar{x}_2 = 1{,}05, \quad (20\text{-}2) \qquad U_2 - \underline{x}_2 = 0{,}9, \quad (21\text{-}2)$$

$$U_3 + \bar{x}_3 = 1{,}05, \quad (20\text{-}3) \qquad U_3 - \underline{x}_3 = 0{,}9, \quad (21\text{-}3)$$

$$U_4 + \bar{x}_4 = 1{,}05, \quad (20\text{-}4) \qquad U_4 - \underline{x}_4 = 0{,}9, \quad (21\text{-}4)$$

$$U_5 + \bar{x}_5 = 1{,}05, \quad (20\text{-}5) \qquad U_5 - \underline{x}_5 = 0{,}9, \quad (21\text{-}5)$$

$$U_6 + \bar{x}_6 = 1{,}05, \quad (20\text{-}6) \qquad U_6 - \underline{x}_6 = 0{,}9, \quad (21\text{-}6)$$

$$U_7 + \bar{x}_7 = 1{,}05, \quad (20\text{-}7) \qquad U_7 - \underline{x}_7 = 0{,}9, \quad (21\text{-}7)$$

$$U_8 + \bar{x}_8 = 1{,}05. \quad (20\text{-}8) \qquad U_8 - \underline{x}_8 = 0{,}9. \quad (21\text{-}8)$$

$$\delta_1 - \delta_6 + \bar{y}_{16} = \bar{\delta}_{16}, \quad (22\text{-}1)$$

$$\delta_1 - \delta_8 + \bar{y}_{18} = \bar{\delta}_{18}, \quad (22\text{-}2)$$

$$\delta_6 - \delta_8 + \bar{y}_{68} = \bar{\delta}_{68}, \quad (22\text{-}3)$$

$$\delta_1 + \bar{y}_1 = \bar{\delta}_1, \quad (23\text{-}1) \qquad \delta_1 - \underline{y}_1 = \underline{\delta}_1, \quad (24\text{-}1)$$

$$\delta_2 + \bar{y}_2 = \bar{\delta}_2, \quad (23\text{-}2) \qquad \delta_2 - \underline{y}_2 = \underline{\delta}_2, \quad (24\text{-}2)$$

$$\delta_3 + \bar{y}_3 = \bar{\delta}_3, \quad (23\text{-}3) \qquad \delta_3 - \underline{y}_3 = \underline{\delta}_3, \quad (24\text{-}3)$$

$$\delta_4 + \bar{y}_4 = \bar{\delta}_4, \quad (23\text{-}4) \qquad \delta_4 - \underline{y}_4 = \underline{\delta}_4, \quad (24\text{-}4)$$

$$\delta_5 + \bar{y}_5 = \bar{\delta}_5, \quad (23\text{-}5) \qquad \delta_5 - \underline{y}_5 = \underline{\delta}_5, \quad (24\text{-}5)$$

$$\delta_6 + \bar{y}_6 = \bar{\delta}_6, \quad (23\text{-}6) \qquad \delta_6 - \underline{y}_6 = \underline{\delta}_6, \quad (24\text{-}6)$$

$$\delta_7 + \bar{y}_7 = \bar{\delta}_7, \quad (23\text{-}7) \qquad \delta_7 - \underline{y}_7 = \underline{\delta}_7, \quad (24\text{-}7)$$

$$\delta_8 + \bar{y}_8 = \bar{\delta}_8, \quad (23\text{-}8) \qquad \delta_8 - \underline{y}_8 = \underline{\delta}_8, \quad (24\text{-}8)$$

$$\kappa_{45}+\bar{z}_{45}=\bar{\kappa}_{45},\ (25\text{-}1)\qquad \kappa_{12}-\underline{z}_{12}=\underline{\kappa}_{12},\qquad (26\text{-}1)\qquad (2)$$

$$E_1+\bar{s}_1=\bar{E}_1,\ (27\text{-}1)\qquad E_1-\underline{s}_1=\underline{E}_1,\qquad (28\text{-}3)$$

$$\kappa_{73}+\bar{z}_{73}=\bar{\kappa}_{73},\ (25\text{-}2)\qquad \kappa_{45}-\underline{z}_{45}=\underline{\kappa}_{45},\qquad (26\text{-}2)$$

$$E_6+\bar{s}_6=\bar{E}_6,\ (27\text{-}2)\qquad E_6-\underline{S}_6=\underline{E}_6,\qquad (28\text{-}2)$$

$$\kappa_{12}+\bar{z}_{12}=\bar{\kappa}_{12},\ (25\text{-}3)\qquad \kappa_{73}-\underline{z}_{73}=\underline{\kappa}_{73},\qquad (26\text{-}3)$$

$$E_8+\bar{s}_8=E_8,\ (27\text{-}2)\qquad E_8-\underline{S}_8=\underline{E}_8.\qquad (28\text{-}3)$$

Поскольку все ограничения сведены к равенствам, то для решения можно применить метод неопределенных множителей Лагранжа. Функция Лагранжа может быть записана так:

$$L=f(m\Pi)+\sum_i \lambda_i P_{\text{н}6i}(M\Pi)+\sum_i \mu_i Q_{\text{н}5i}(M\Pi)+\sum_i \nu_i(U_i+\bar{x}_i-\bar{U}_i)+$$

$$+\sum_i \varkappa_i(U_i-\underline{x}_i-\underline{U}_i)+\sum_i \vartheta_i(\delta_i+\bar{y}_i-\bar{\delta}_i)+\sum \Theta_i(\delta_i-\underline{y}_i-\underline{\delta}_i)+$$

$$+\sum_{ij} t_{ij}(\delta_i-\delta_j+\bar{y}_{ij}-\bar{\delta}_{ij})+\sum_i \eta_i(\kappa_{ij}+\bar{z}_{ij}-\bar{\kappa}_{ij})\sum_i \rho_i(\kappa_{ij}-\underline{z}^{ij}-\underline{\kappa}_{ij})+$$

$$+\sum_i \omega_i(E_i+\bar{s}_i-\bar{E}_i)+\sum_i \Omega(E-\underline{s}_i-\underline{E}_i),\qquad (29)$$

где λ; μ; ν; $\varkappa$; ϑ; Θ; t; η; ρ; ω; Ω — неопределенные множители Лагранжа.

Положив $dL=0$ в точке экстремума, можно образовать нужное числ уравнений для решения задачи:

$$dL=\sum_i^{M}\frac{\partial L}{\partial \Pi_i}d\Pi+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \lambda_i}d\lambda_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \mu_i}d\mu_i+\sum\frac{\partial L}{\partial \nu_i}d\nu_i+$$

$$+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \bar{x}_i}d\bar{x}_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \varkappa_i}d\varkappa_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial x_i}dx_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \vartheta_i}d\vartheta_i+$$

$$+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \bar{y}_i}d\bar{y}_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \Theta_i}d\Theta_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \underline{y}_i}d\underline{y}_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial t_{ij}}dt_{ij}+$$

$$+\sum_{ij}\frac{\partial L}{\partial \bar{y}_{ij}}d\bar{y}_{ij}+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \eta_i}d\eta_i+\sum_{ij}\frac{\partial L}{\partial \bar{Z}_{ij}}d\bar{Z}_{ij}+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \rho_i}d\rho_i+$$

$$+\sum_{ij}\frac{\partial L}{\partial \underline{Z}_{ij}}d\underline{Z}_{ij}+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \omega_i}d\omega_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \bar{S}_i}d\bar{S}_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \Omega_i}d\Omega_i+\sum_i\frac{\partial L}{\partial \underline{S}_i}d\underline{S}_i=0.$$

(30)

Приравняв выражение каждой суммы нулю, получим нужное число нелинейных алгебраических уравнений относительно всех неизвестных параметров режима (E_i; δ_i; $\underline{U}_i$; κ_{ij}) и дополнительных переменных формы Лагранжа (λ_i, μ_i, ν_i, $\bar{x}_i$, $\varkappa_i$, $\underline{x}_i$ и т. д.) Для решения систем алгебраических нелинейных уравнений используется метод линейной экстраполяции путем разложения функции Лагранжа в ряд Тейлора в точке допустимого решения и последующего решения систем линейных уравнений относительно приращений по схеме Гаусса — Зейделя [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. И. Борисов. Программированное управление и построение объединений электроэнергетических систем с дальними электропередачами переменного тока. Техн. отчет. № гос. рег. 71073552, Томск, 1971.

2. В. А. Веников. Развитие энергетики и социальный прогресс в свете ленинских идей о значении электрификации. «Электричество», 1970, № 12.

3. Н. А. Мельников. Электрические сети и системы. М., «Энергия», 1969.

4. Р. И. Борисов. Условия ограничений и функциональные соотношения между переменными параметрами режимов в математическом программировании выбора устройств и управления работой дальних электропередач и электрических систем. Статья в этом сборнике.

5. Р. И. Борисов. Ограничения к параметрам режима дальних электропередач с промежуточными системами по условиям статической устойчивости. Статья в этом сборнике.

6. Ч. Карр, Ч. Хоув. Количественные методы принятия решений в управлении и экономике. М., «Мир», 1966.

7. Р. И. Борисов. Оптимальное математическое программирование в электроэнергетике. Томск, ТПИ, 1973.