

Г. А. БУРНАЧЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ
 ЭНЕРГОСИСТЕМ С НА—ГЭС

Задача выбора оптимального суточного режима работы НА—ГЭС в сложной энергосистеме, состоящей из m теплостанций и n гидроэлектростанций, исходя из критерия минимума расхода условного топлива, сводится к обычной вариационной задаче на безусловный экстремум [1, 2], где отыскивается минимум некоторого функционала

$$J = \int_{t_0}^{t_k} \left(\sum_{i=1}^m B_i - \mu_i \epsilon_i \right) dt = \int_{t_0}^{t_k} F[P_i(t), V_i(t), V_i'(t), V_n(t), V_n'(t)] dt, \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} \text{а) } V_{ij}(t_0) = 0; \quad V_{ij}(t_k) = V_{ij}^3, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ \text{б) } V_n^-(t_0) = 0; \quad V_n^-(t_k) = V_{n0}^- \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\epsilon_i = \sum_{j=1}^m P_{ij} - \sum_{j=1}^n P_{ji}(V_{ij}, V_{ij}') \pm P_n(V_n, V_n') - P_c - \Delta P = 0; \quad (3)$$

$$V_i' = \frac{dV_i}{dt} = q_i - Q; \quad V_n' = \frac{dV_n}{dt} = q_n - Q_n. \quad (4)$$

В выражениях (1) — (4)

- B_i — часовой расход условного топлива на i -ой теплостанции;
- μ_i — переменный по времени множитель;
- P_{-j}, P_j — соответственно нагрузки i -ой теплостанции ($i = 1, 2, \dots, m$) и j -ой гидроэлектростанции ($j = 1, 2, \dots, n$);
- P_n — нагрузка НА—ГЭС (знак плюс соответствует циклу разряда, а минус — заряда);
- $P_c, \Delta P$ — соответственно нагрузка энергосистемы и потери в линиях электропередач;
- P_i, V_i, V_i' — соответственно векторы с компонентами $(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im}), (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}), (V_{i1}', V_{i2}', \dots, V_{in}')$;
- q_i, Q — соответственно векторы с компонентами $(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in})$ и $(Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{1n})$, представляющие притоки в водохранилища и расходы через турбины гидроэлектростанций системы;

q_n — боковая приточность в верхнее водохранилище НА-ГЭС;
 Q_n — расход воды на НА-ГЭС (знак плюс соответствует циклу заряда, а минус — разряда);

V_{ij}^0, V_n^0 — соответственно используемые в течение цикла регулирования ($t_k - t_0$) объемы воды на j ГЭС и на НА-ГЭС.

Кривые, реализующие экстремум рассматриваемого функционала, как известно, должны удовлетворять дифференциальным уравнениям Эйлера-Лагранжа, которые применительно к рассматриваемой задаче могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial B_j}{\partial P_j} + \lambda_j \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_j} \right) = 0; \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$\lambda_j \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_j} \right) \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ij}} - \frac{d}{dt} \left| \lambda_j \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_j} \right) \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ij}} \right| = 0; \quad (5)$$

$$\lambda_n \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_n} \right) \frac{\partial P_n}{\partial V_n} - \frac{d}{dt} \left| \lambda_n \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_n} \right) \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \right| = 0.$$

Если полученную систему $m + n - 1$ уравнений дополнить уравнением (3), то число уравнений достаточно для определения $m + n - 2$ неизвестных функций $P_{1j}, \dots, P_{mj}, P_{1n}, \dots, P_{nn}, P_n, t$, а граничные условия

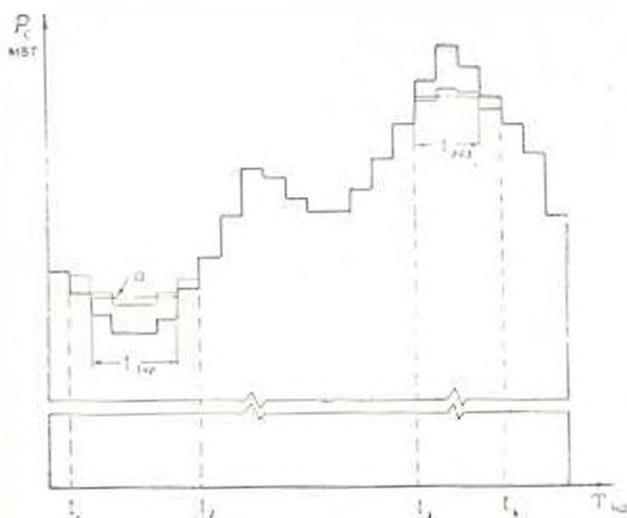


Рис. 1.

для ГЭС и НА-ГЭС (соответственно в циклах заряда и разряда) дают возможность определить $2n - 4$ произвольных постоянных в общем решении системы уравнений Эйлера-Лагранжа.

Но поскольку моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 (рис. 1), в которых

выполняются граничные условия для НА—ГЭС, заранее неизвестны ввиду свойственной ей цикличности работы и возможности использования заданного объема воды при разных продолжительностях циклов заряда и разряда, то данная задача относится к более широкому классу вариационных задач с подвижными границами. В этом случае четыре недостающие условия для определения произвольных постоянных общего решения уравнений Эйлера-Лагранжа могут быть получены из условий трансверсальности, которые соответственно для циклов заряда и разряда в развернутом виде записываются так:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^m B_i - \lambda_i (q_n + Q_n) \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ii}} \right) \frac{\partial P_{ii}}{\partial Q_i} \Big|_{t_k - t_0}^{t_k - t_1} + \\ + \lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ii}} \right) \frac{\partial P_{ii}}{\partial Q_n} \Big|_{t_k - t_1}^{t_k - t_0} \delta V = 0; \\ \sum_{i=1}^m B_i + \lambda_i (q_n - Q_n) \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ii}} \right) \frac{\partial P_{ii}}{\partial Q_n} \Big|_{t_1 - t_0}^{t_k - t_1} + \\ - \lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ii}} \right) \frac{\partial P_{ii}}{\partial Q_n} \Big|_{t_1 - t_0}^{t_k - t_0} \delta V = 0. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

В такой строгой постановке непосредственное решение рассматриваемой задачи в аналитическом виде вряд ли возможно, особенно, если учесть, что оптимальные управления могут иметь разрывы первого рода. Поэтому ниже излагается способ назначения оптимальных режимов работы НА—ГЭС в сложной энергосистеме с учетом продолжительности циклов заряда и разряда, основанный на численном решении уравнений Эйлера-Лагранжа.

Из уравнений (5), приняв напоры на ГЭС и гидроаккумулирующей станции постоянными, после несложных преобразований получим:

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ii}}} = \lambda_j \frac{q_j}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{jj}}} = \lambda_n \frac{q_n}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{nn}}} \quad (7)$$

где $b_i = \frac{\partial P_i}{\partial P_{ii}}$, $q_j = \frac{\partial Q_j}{\partial P_{jj}}$, $q_n = \frac{\partial Q_n}{\partial P_{nn}}$ — соответственно относительные приросты i -ой теплостанции, j -ой гидростанции и НА—ГЭС;

$\frac{\partial \Delta P}{\partial P}$ — относительные приросты потерь активной мощности в линиях электропередачи;

λ_j, λ_n — постоянные в течение цикла регулирования множители.

Уравнение (7) представляет собой условие оптимального режима работы станций энергосистемы.

Используя полученное условие, а также (2) и (3) рассмотрим последовательность расчетов по назначению оптимального режима работы станций системы с одновременным выбором оптимальной продолжительности циклов заряда и разряда НА-ГЭС.

Проведем из начала координат (рис.2) прямую, касательную к расходной характеристике НА-ГЭС $Q_n = \varphi_1(P_{11})$ в насосном режиме работы. Эта прямая, выражая зависимость Q_n от P_{11} , позволяет определить величину средней удельной подведенной мощности $P_{11}^* = P_{11}^*/Q_n$ для подкачки 1 м^3 воды в единицу времени. По P_{11}^* определяется величина средней удельной подведенной энергии $M_{втч}$ для подкачки 1 м^3 воды. Умножив величину необходимого объема воды, перекачиваемого из нижнего бассейна в верхний (V^0), на значение средней удельной подведенной энергии, получим общее количество энергии в $M_{втч}$ для подкачки всего объема воды, т. е. энергию заряда Δ_1 . Влияя полученную энергию и провал графика нагрузки по прямой (а) (рис. 1) с соблюдением условия $0 < P_{11} < P_{11}^{\max}$, получим некоторую продолжительность периода заряда $t_{з}$. Аналогичным образом устанавливается продолжительность периода разряда $t_{рз}$.

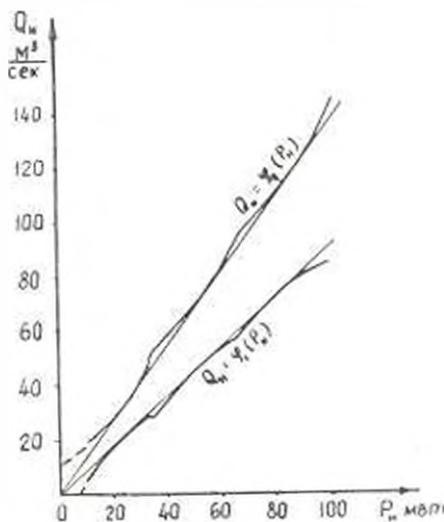


Рис. 2.

Допуская такую конфигурацию сети, потери в которой можно учитывать соответствующими коррективами в характеристиках относительных приростов станций, строим эквивалентную расходную характеристику и характеристику относительных приростов тепловой подсистемы. Задаваясь некоторыми значениями коэффициентов λ_1, λ_{11} и имея продолжительности циклов заряда и разряда, согласно условию (7) по часовым интервалам определяем значения P_{1j} ($j = 1, 2, \dots, n$) и P_{11} . При этом для периода заряда P_{11} будем иметь одни значения, а для

периода разряда — другие. Значения коэффициента λ_2 для обоих циклов могут быть как одинаковыми (предельный случай), так и различными и зависимости от емкости верхнего водохранилища [2]. Имея часовые значения P_{11} и P_{12} для обоих циклов работы НА—ГЭС, по расходным характеристикам ГЭС и НА—ГЭС определяем часовые, а затем суточные объемы использованной воды и сопоставляем соответственно с V_{11}^0 и V_{12}^0 . Если полученные для ГЭС значения объемов воды V_{11}^0 больше (или меньше) заданных V_{11}^0 , то коэффициенты λ_1 соответственно увеличиваем (или уменьшаем). Если полученное для НА—ГЭС в цикле заряда значение объема воды V_{12}^0 больше (или меньше) заданного V_{12}^0 , то коэффициент λ_2 соответственно уменьшаем (или увеличиваем). Корректирование коэффициента λ_2 для цикла разряда выполняется как для ГЭС.

Имея скорректированные значения указанных коэффициентов, и вышеизложенной последовательности вновь определяются P_{11} и P_{12} (для той же продолжительности циклов заряда и разряда) и подсчитываются новые значения суточных объемов воды, которые сопоставляются с заданными. Этот процесс расчета продолжается до получения необходимого соответствия между полученными и заданными величинами объемов воды, т. е. до выполнения конечных условий (2). После этого, имея P_{11} и P_{12} , определяется мощность эквивалентной тепловой станции и по ней — расход топлива по системе. Конкретные расчеты показали, что выбор оптимального режима системы при наличии в ней кроме тепловых станций трех ГЭС и НА—ГЭС (при принятой продолжительности циклов заряда и разряда) посредством подбора коэффициентов λ можно осуществить в процессе трех-четырех итераций.

Дальнейший процесс решения поставленной задачи сводится к следующему. Продолжительность циклов заряда и разряда соответственно увеличивая на 1 час, снова выполняем весь расчет и полученное значение расхода топлива по системе сопоставляем с предыдущим. Если в этом случае расход топлива по системе уменьшается, то снова увеличиваем продолжительность циклов и расчет производим до тех пор, пока расход топлива увеличивается. В таком же порядке выполняем расчеты при уменьшении продолжительности циклов заряда и разряда.

Обычно такие расчеты выполняются при нескольких значениях продолжительности циклов заряда и разряда (2—4), так как не могут иметь место большие отклонения от первоначально определенного среднего значения. Оптимальным будет то значение продолжительности циклов заряда и разряда, при котором расход топлива по системе принимает наименьшее значение. При этом, как видно, в процессе решения одновременно получаем и оптимальный режим работы станций системы.

Предложенная методика легко может быть реализована на ЭВМ и даст возможность оптимизацию режимов работы НА—ГЭС в сложной

звергосистеме выполнить с одновременным учетом оптимальной продолжительности циклов заряда и разряда. Она в равной мере может быть использована и в проектной практике для обоснованного выявления затрат по топливной составляющей связанных с включением НА - ГЭС в энергосистему.

АрмНИИЭ

Получено 13IV 1971

Հ. Ա. ԲԱՐՍԵՂՅԱՆԻ

ԲԱՐԻ ԷՆԵՐԳԱԶՈՐԱՆԱԿՐԿՐԻՆԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԹԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԳՎ-ՇԿ-Ի ԱՐԿԱՆՑՈՒՓՅԱԿԸ

Ա մ փ ո լ ո լ ո մ

Հողվածուստ բարց էներգամատակարարչիում ԳՎ-ՇԿ-ի աշխատանքի օպտիմալ ունեմիի բնարման խնդիրը, քանի որ ԳՎ-ՇԿ-ին հատուկ է աշխատանքի ցիկլիկ բնույթը, դիտվում է որպես վարիացիոն խնդիր՝ շարժվող սահմաններով, նշնելով այդպիսի դրվածքից, ստացված են այն անհրաժեշտ պայմանները, որոնք թույլ են տալիս օպտիմալացնել ԳՎ-ՇԿ-ի աշխատանքի ունեմը, միաժամանակ բնորոշով լիցրավորման և լիցրաթափման ցիկլերի կրկարատևությունը: Տրված է խնդրի լուծման մեթոդիկան:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Горюштин В. М. Наиболее эффективные режимы работы гидро-станций в энергетических системах. Госэнергоиздат, 1959.
2. Бурнация Г. А. Топливный эффект НА ГЭС при оптимальном режиме работы. Сб. «Выравнивание графиков нагрузки энергетических систем и выбор типа электростанций для покрытия пиковых нагрузок». Изд. «Наука», М., 1968.