

Г. А. БУРНАЧЯН

РЕЖИМЫ РАБОТЫ НАСОСНО-АККУМУЛИРУЮЩИХ
 ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

В системе при наличии m тепловых станций и гидроэлектростанций, включая и НА-ГЭС в цикле разряда, с заданным суммарным расходом воды на каждой из них в течение цикла регулирования и НА-ГЭС в цикле заряда, суммарный расход топлива на тепловых станциях в каждый момент времени с учетом нестационарных явлений при переменном режиме работы можно выразить следующей зависимостью

$$\sum_{i=1}^m B_i = F(t, N_{T_1}, N_{T_2}), \quad (1)$$

где $N_T = \bar{N}(N_{T_1}, N_{T_2}, \dots, N_{T_m})$ — нагрузка тепловых станций;

$N_{T_i} = \frac{dN_{T_i}}{dt}$ — скорость изменения нагрузок тепловых станций;

t — время.

Задача определения оптимального режима работы всех станций системы в целом в течение некоторого промежутка времени $\Delta t = t_k - t_0$ — заключается в выборе такого режима, которому соответствовал бы минимум расхода топлива по системе, т. е.

$$B = \int_{t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^m B_i dt = \int_{t_0}^{t_k} F(t, N_{T_i}, N_{T_i}) dt = \min, \quad (2)$$

при наличии уравнения связи, удовлетворяющей балансу мощностей энергосистемы

$$\sum_{i=1}^m N_{T_i} + \sum_{a=1}^n N_{a_0} - P_c - N_n - \Delta P = 0, \quad (3)$$

где $N_{T_i}, N_{a_0} = \varphi_1(t, V_{a_0}, V_{a_0}), N_n = \varphi_2(t, V_n, V_n)$ — соответственно нагрузки i -ой теплостанции, a -ой гидроэлектростанции и НА-ГЭС в цикле заряда в момент времени t ;

$P_c, \Delta P$ — нагрузка энергосистемы и потери активной мощности в электрической сети.

а также предельным условиям

$$V_a(t_0) = 0, \quad V_a(t_k) = V_a; \quad a = 1, 2, \dots, n$$

$$V_n(t_0) = 0, \quad V_n(t_k) = V_n.$$

где V_a, V_n — соответственно заданные объемы воды на a -ой гидроэлектростанции и ГА-ГЭС в цикле заряда.

Исследуемая задача выбора оптимального режима работы станций энергетической системы — обычная вариационная задача, в которой отыскивается экстремум функционала (2) при наличии уравнения (3). Применяя правило множителей, можно вместо исследования на условный экстремум функционала (2) при наличии вышеприведенной связи исследовать на безусловный экстремум следующий функционал

$$B^* = \int_{t_0}^{t_k} \left| \sum_{i=1}^m B_i + \lambda_i \varphi_i \right| dt - \int_{t_0}^{t_k} F^* dt, \quad (4)$$

где

$$F^* = \sum_{i=1}^m B_i + \lambda_i \varphi_i$$

λ_i — переменный по времени множитель.

Из теории вариационного исчисления известно, что кривые, реализующие экстремум рассматриваемого функционала должны удовлетворять уравнением Эйлера.

$$\begin{aligned} F_{N_{i_1}}^* - \frac{d}{dt} F_{N_{i_1}}^* &= 0; \\ F_{V_{i_a}}^* - \frac{d}{dt} F_{V_{i_a}}^* &= 0; \\ F_{V_{i_n}}^* - \frac{d}{dt} F_{V_{i_n}}^* &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$V_a = \frac{dV_a}{dt} = Q_a; \quad V_n = \frac{dV_n}{dt} = Q_n; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad a = 1, 2, \dots, n.$$

Принимая напор на гидроэлектростанциях и ГА-ГЭС постоянным в нашем уравнения (5) в раздробленном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_i}{\partial N_{i_1}} + \lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{i_1}} \right) - \frac{d}{dt} \frac{\partial B_i}{\partial N_{i_1}} &= 0; \\ \frac{d}{dt} \left[\lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{i_a}} \right) \frac{\partial N_{i_a}}{\partial Q_a} \right] &= 0; \\ \frac{d}{dt} \left[\lambda_i \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{i_n}} \right) \frac{\partial N_{i_n}}{\partial Q_n} \right] &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\frac{\partial B_i}{\partial N_{i_1}} = b_i$ — относительный прирост i -ой теплоэлектростанции;

$\frac{\partial N_{1a}}{\partial Q_a} = \frac{1}{q_a}$, $\frac{\partial N_{1a}}{\partial Q_a} = \frac{1}{q_a}$ — соответственно обратные величины относительных приростов a -ой гидростанции и НА-ГЭС в цикле заряда:

$\frac{\partial \Delta P}{\partial N_{(1a)} \partial N_{(1a)}}$ — относительные приросты потерь активной мощности в линиях электропередачи.

Пренебрегая влиянием переходных процессов на теплостанциях системы [3], т. е. принимая последний член первого равенства уравнений (6) равным нулю, определим из него значение λ_a . Подставив его во второе и третье равенства и проинтегрировав, получим:

$$\begin{aligned} \frac{b_i}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{1i}}\right)} \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{1a}}\right) \frac{1}{q_a} &= C_a = \lambda_a; \\ \frac{b_i}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{1i}}\right)} \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_n}\right) \frac{1}{q_n} &= C_n = \lambda_n. \end{aligned} \quad (7)$$

Из уравнений (7) непосредственно находим условие оптимального режима работы всех станций системы:

$$\frac{b_i}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{1i}}\right)} = \lambda_a \frac{q_a}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{1a}}\right)} = \lambda_n \frac{q_n}{\left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_n}\right)} \quad (8)$$

Однако учитывая, что в энергосистемах, где намечается строительство НА-ГЭС, провалы графиков нагрузки в основном покрываются тепловыми станциями и нерегулирующими электростанциями работающими по вынужденному режиму, условие оптимальности (8) может быть представлено для двух периодов:

а) период заряда НА-ГЭС, когда последняя работает только с тепловыми станциями

$$\frac{b_i}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{1i}}\right)} = \lambda_n \frac{q_n}{\left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_n}\right)}. \quad (9)$$

При этом продолжительность работы НА-ГЭС в цикле заряда предварительно устанавливается исходя из возможной мощности насосов, конфигурации графика нагрузки и наиболее полного заполнения его провалов с учетом подачи заданного количества воды:

б) период разряда НА-ГЭС, когда последняя как обычная гидростанция параллельно работает с другими станциями системы

$$\frac{b_i}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{1i}}\right)} = \lambda_a \frac{q_a}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{1a}}\right)}. \quad (10)$$

Таким образом режим системы является оптимальным, если удовлетворяются вышеприведенные условия, т. е. в каждый момент времени, с учетом потерь в сетях, относительные приросты всех тепловых станций должны быть одинаковыми и соответственно равными относительным приростам ГЭС и ПА-ГЭС, умноженным на коэффициенты λ_1 , λ_2 , значения которых в течение всего цикла регулирования остаются постоянными. Величина λ_2 положительная и характеризует собой меру перерасхода топлива, вызванной подкачкой 1 м^3 воды на ПА-ГЭС.

В энергетической системе, между коэффициентами циклов зарядки λ_1 и разряда λ_2 могут быть следующие соотношения:

$\lambda_1 < \lambda_2$ и в этом случае работа ПА-ГЭС обеспечивает некоторую экономию условного топлива;

$\lambda_1 = \lambda_2$ и в этом случае перерасход и экономия топлива при работе ПА-ГЭС в энергетической системе равны;

$\lambda_1 > \lambda_2$ и в этом случае работа ПА-ГЭС вызывает перерасход условного топлива.

Приведенные условия были получены в предположении, что напор на ПА-ГЭС остается постоянным. Такое положение является характерным для большинства ПА-ГЭС с суточным циклом регулирования, особенно для высоконапорных установок, а также установок колебания напора которых, вызванные изменениями уровня воды в верхнем водохранилище, незначительны и ими можно пренебречь. Однако, для ряда ПА-ГЭС изменения уровня воды в верхнем водохранилище вызывают значительные колебания напора станции и поэтому являются фактором, влияющим на оптимальный режим работы ПА-ГЭС в энергетической системе. Это влияние ощутимо будет проявляться при колебаниях напора свыше 5%, что является характерным для установок с напорами порядка 100 м, например для проектируемых и строящихся ПА-ГЭС систем Мокэнерго, Харьковэнерго, Киевэнерго и других. Поэтому, если изменение напора в течение цикла регулирования значительно, то его влияние на экономичность работы ПА-ГЭС может быть существенным и требующим соответствующего учета при выборе оптимального режима. Вывод условий оптимального режима ПА-ГЭС в турбинном режиме с учетом колебаний напора нами не рассматривается ввиду того, что работа ПА-ГЭС в турбинном режиме принципиально ничем не отличается от обычных ГЭС и эти условия для последних подробно освещены в [1, 3, 4, 5].

Для вывода условия оптимального режима работы ПА-ГЭС в насосном цикле предварительно рассмотрим физическую картину, имеющую место вследствие влияния наполнения водохранилища на режим работы ПА-ГЭС. Допустим, что для какого-то выбранного режима имеем график подачи воды и соответствующий ему график уровня воды в верхнем водохранилище (рис. 1а, б). Увеличим в произвольный момент времени t_0 количество подаваемой воды на некоторую величину ΔV . Тогда вследствие увеличения количества подаваемой во-

ды увеличивается и нагрузка насосов, что приводит к повышению нагрузки тепловых станций и соответственному увеличению дополнительного расхода топлива. Чтобы сохранить количество подаваемой воды в течение всего цикла заряда неизменным, необходимо в какой-то другой момент времени t_2 его уменьшить на ту-же величину ΔV . Это вызывает уменьшение нагрузки насосов и приводит к относительному снижению дополнительного расхода топлива на тепловых станциях системы. Кроме того, в рассматриваемом интервале, вследствие повышения напора, расход условного топлива дополнительно увеличивается за счет повышения нагрузки теплостанций, вызванного повышением нагрузки НА-ГЭС. Если режим НА-ГЭС в цикле заряда выбрать таким образом, чтобы он был оптимальным, то для любых моментов времени сумма этих изменений расхода условного топлива должна равняться нулю. Математически условие оптимального режима работы НА-ГЭС в цикле заряда, с учетом изменения напора при наполнении верхнего водохранилища, совместно с тепловыми станциями может быть легко получено методами вариационного исчисления.

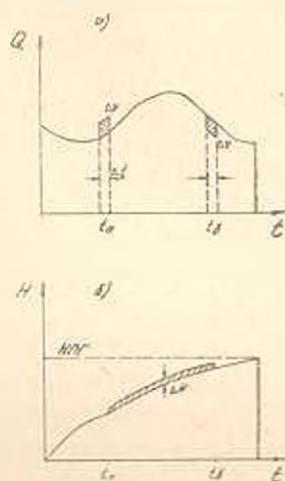


Рис. 1.

Принимая напор на НА-ГЭС переменным напишем уравнения (5) для цикла заряда в развернутом виде

$$\frac{\partial B_1}{\partial N_{T_1}} + \lambda_1 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial N_{T_1}} \right) - \frac{d}{dt} \frac{\partial B_1}{\partial N_{T_1}} = 0; \quad (11)$$

$$-\lambda_1 \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{T_1}} \right) \frac{\partial N_{T_1}}{\partial V_{T_1}} + \frac{d}{dt} \left[\lambda_1 \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{T_1}} \right) \frac{\partial N_{T_1}}{\partial Q_{T_1}} \right] = 0.$$

Так же как и в случае постоянного напора, разреши уравнения (11) относительно λ_1 получим

$$\frac{\partial B_1}{\partial N_{T_1}} \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{T_1}} \right) \frac{\partial N_{T_1}}{\partial V_{T_1}} + \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial B_1}{\partial N_{T_1}} \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{T_1}} \right) \frac{\partial N_{T_1}}{\partial Q_{T_1}} \right] = 0 \quad (12)$$

Обозначим отношение $\left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{T_1}} \right) \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial N_{T_1}} \right)$ через k и проинтегрировав уравнение (12), получим

$$k \lambda_1 - \Delta \lambda_1' = C, \quad (13)$$

где

$$\Delta \lambda_1' = \int k \frac{\partial B_1}{\partial N_{T_1}} \frac{\partial N_{T_1}}{\partial H} - \frac{\partial H}{\partial V_{T_1}} dt.$$

Значит при оптимальном режиме работы НА-ГЭС в цикле заряда значения ($k_k - \Delta k'$) в любые моменты времени рассматриваемого цикла должны быть одинаковыми.

В обоих рассмотренных случаях, т. е. при постоянном и переменном напорах, принято, что объем перекачиваемой воды (V_n) строго задан. Однако в общем случае, когда величина V_n не задана, а известен лишь величина физического объема верхнего водохранилища (V_Φ), необходимо определить тот целесообразный объем перекачиваемой воды, при котором расход топлива по системе будет минимальным. С этой целью для нескольких значения объема воды V ($0 < V < V_\Phi$) определяется расход топлива по системе и строится кривая зависимости $V = f(B)$ по которой и устанавливается величина объема воды, соответствующая минимуму расхода топлива по системе. Пример расчета оптимального режима работы НА-ГЭС в энергетической системе по предложенной методике при заданном V_n и $H = \text{const}$ приведен в [2].

Ереванский политехнический институт

инж. К. Маркса

Поступило 15.VII 1964

Հ. Ա. ՄՈՒՐԱՆՅԱՆ

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՍԻՍՏԵՄՈՒԹՅ ՊՈՐՊԱԿՈՒՄՏԱՆԻԶ ԶԻՒՐՈՎԱՅԱԼԻ (ՊԿ-ՀԷԿ)

ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՈՒՇԻՄՐ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. ռ. մ.

Աշխատանքում փորձադիտն հաշվի մեթոդներով դուրս են բերված էներգետիաների բերի օպտիմալ բաշխման պայմանները, երբ սխտեմի գումարային բերը ծածկվում է չերմաէլեկտրակայանների, հիդրոէլեկտրակայանների և օդումպակոտակիչ հիդրոէլեկտրակայանի համատեղ աշխատանքով: Էներգիա օպտիմալ բաշխման պայմանները դուրս են բերված հետևյալ ղեկավարի համար:

1) Երբ ՊԿ-ՀԷԿ-ի հիդրոփյիկ ճնշումն ընդունվում է հաստատուն՝ ամբողջ հաշվային ժամանակաշրջանում (բանաձևեր 8, 9, 10):

2) Երբ հաշվի է առնվում նաև ՊԿ-ՀԷԿ-ի ճնշման փոփոխությունը հաշվային ժամանակամիջոցում, այսինքն վերին ջրամբարի տատանումները (բանաձև 13):

Գումարային բերի օպտիմալ բաշխման բերված մեթոդները թույլ են տալիս որոշելու ՊԿ-ՀԷԿ-ի աշխատանքի ամենաձեռնառու ռեժիմը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Беляев Л. С. О режиме годичного регулирования гидроэлектростанций, входящих в энергосистему. "Электрические станции", 1957, № 7.
2. Буркачян Г. А., Саркисян С. М. Выбор оптимального режима работы насосно-аккумулирующей гидроэлектростанции в энергетической системе. Известия АН Армянской ССР (серия ТН), № 4, 1964.
3. Гарништейн В. М. Навыгоднейшие режимы работы гидроэлектростанций в энергетических системах. Госэнергоиздат, 1959.
4. Никитин Б. И. Гидроэлектростанции в единой энергетической системе. Изв. АН СССР, 1960.
5. Шахвердян С. В. К выбору режимов регулирования каскада ГЭС, работающих параллельно с тепловыми станциями. Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденского т. 74, 1964.