ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2002. Т. LV, №2.

УДК 621.311.21 ЭНЕРГЕТИКА

Г.А. БУРНАЧЯН, С.Л. НАСИБЯН

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПОРА НА ГИДРОСТАНЦИЯХ

Рассматривается решение задачи выбора оптимальных режимов работы ГЭС в сложной энергосистеме с учетом изменения напора на станции, обусловленного колебаниями уровня воды в нижнем и верхнем бьефах. Приведен алгоритм задачи и дана численная реализация для гипотетической энергосистемы.

Ключевые слова: гидростанция, теплостанция, энергосистема, мощность, график нагрузки, энергетические характеристики, напор, бьеф, режимы, оптимизация.

Использование водохранилищ гидростанций для регулирования суточных режимов связано с изменениями уровня верхнего бьефа, которые, в свою очередь, могут вызвать соответствующие изменения уровня воды нижнего бьефа, что в целом оказывает заметное влияние на величину напора.

При значительном изменении напора (более 3-5%) его влияние на экономичность работы гидростанции может быть существенным и требует учета при выборе режимов ее работы в энергосистеме.

Постановка задачи. Рассмотрим энергетическую систему, состоящую из m КЭС и n регулируемых ГЭС. При этом суммарный расход условного топлива тепловых электростанций в любой момент времени t (с учетом состава работающего оборудования и нестационарных процессов в переменном режиме) определяется следующей зависимостью:

$$\sum_{i=1}^{m} B_{к_i} = F\left(t, \overline{P}_к, \overline{P}'_к\right), \tag{1}$$

где $B_{к_i}$ - расход условного топлива на i-й КЭС (i=1,2,...,m); $\overline{P}_к\left(P_{к_1}, P_{к_2}, ..., P_{к_m}\right)$ - вектор, составляющие которого представляют собой мощности тепловых электростанций; $\overline{P}'_к = d\overline{P}_к / dt$ - скорость изменения нагрузок тепловых электростанций.

Для некоторого промежутка времени $T=t_к-t_o$ (сутки) задача определения оптимального режима работы электростанций системы сводится к выбору такого режима, которому соответствует минимум расхода условного топлива:

$$B = \int_{t_0}^{t_к} \sum_{i=1}^{m} B_{к_i} dt = \int_{t_0}^{t_к} F\left(t, \overline{P}_к, \overline{P}'_к\right) dt \to \min . \tag{2}$$

Поиск оптимального режима работы должен удовлетворять определенным режимным ограничениям, предъявляемым как к энергосистеме, так и к отдельным ее станциям:

1) Во избежание перерыва в электроснабжении в каждый момент времени t в энергосистеме должно выполняться условие баланса нагрузок:

$$\varphi_t = \sum_{i=1}^{m} P_{к_i}(t) + \sum_{j=1}^{n} P_{г_j}(t) - P_c(t) - \Delta P(t) = 0, \qquad (3)$$

где $P_{к_i}(t)$, $P_{г_j}(t)$ - соответственно мощности i-й КЭС и j-й ГЭС в момент времени t; $P_c(t)$ - нагрузка системы в момент t; (P(t) - потери мощности в линиях электропередач в момент t.

2) Работа водохранилищ ГЭС описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$V'_{г_j}(t) = dV_{г_j}(t)/dt = q_{г_j}(t) - Q_{г_j}(t)$$

или

$$\gamma_t = V'_{г_j}(t) - q_{г_j}(t) + Q_{г_j}(t) = 0 \qquad (4)$$

с граничными условиями

$$V_{г_j}(t_0) = V^0_{г_j}, V_{г_j}(t_k) = V^k_{г_j},$$

где $q_{г_j}(t)$ - боковая приточность в водохранилище j-й ГЭС; $Q_{г_j}(t)$ - расход воды через турбины j-й ГЭС; $V^0_{г_j}$, $V^к_{г_j}$ - соответственно объем водохранилища j-й ГЭС в начале и в конце цикла регулирования.

Энергетическая система рассматривается как регулируемый объект. Параметром, характеризующим состояние энергосистемы в каждый момент времени t, принимается заданный объем воды в водохранилищах ГЭС (фазовые координаты) $V_{г_j}$ (j=1,2,...,n). Управляемыми переменными приняты мощности КЭС $P_{к_i}$ (i=1,2,...,m) и ГЭС $P_{г_j}$ (j=1,2,...,n).

Область управления определяется следующими неравенствами:

а) для тепловых электростанций:

$$P^{min}_{к_i} \le P_{к_i} \le P^{max}_{к_i}, \qquad (5)$$

$$P_{к_i} = 0, \text{ когда } P_{к_i} < P^{min}_{к_i};$$

б) для гидроэлектростанций:

$$P^{min}_{г_j} \le P_{г_j} \le P^{max}_{г_j}. \qquad (6)$$

При этих предпосылках заданная задача оптимального управления может быть сформулирована следующим образом: требуется найти такие оптимальные управляемые переменные, под воздействием которых при соблюдении заданных ограничений (3)-(6) система из начального состояния $V_{г_j}(t_0) = V^0_{г_j}$ перейдет в конечное $V_{г_j}(t_к) = V^к_{г_j}$, при этом критерий оптимальности (2) достигнет своего минимального значения.

Выражения (2)-(6) представляют собой математическую модель определения оптимального режима работы энергосистем, имеющих в своем составе конденсационные и гидравлические станции.

Задача в вышеуказанной постановке является типичной вариационной задачей на условный экстремум с закрепленными концами.

Используя множители Лагранжа, рассматриваемую задачу можно свести к задаче на безусловный экстремум следующего функционала:

$$B = \int_{t_0}^{t_k} \left[\sum_{i=1}^{n} B_{к_i} + \lambda_t \varphi_t + \lambda_{г_j}(t) \gamma_t \right] dt = \int_{t_0}^{t_к} F^* dt, \qquad (7)$$

где $F^* = \sum_{i=1}^{n} B_{к_i} + \lambda_t \varphi_t + \lambda_{г_j}(t) \gamma_t$; (t, $\lambda_{г_j}(t)$ - переменные по времени множители.

Кривые, реализующие функции (экстремумы) рассматриваемого функционала, должны удовлетворять дифференциальным уравнениям Эйлера-Лагранжа:

$$\begin{gathered} F^*_{P_{кi}} - dF^*_{P'_{кi}} / dt = 0, \ i=1,2,...,m, \\ F^*_{P_{гj}} - dF^*_{P'_{гj}} / dt = 0, \ j=1,2,...,n, \\ F^*_{V_{гj}} - dF^*_{V'_{гj}} / dt = 0. \end{gathered} \qquad (8)$$

Записав уравнения Эйлера-Лагранжа в раскрытом виде, а также пренебрегая влиянием переходных процессов на тепловых станциях и гидростанциях, получим

$$\begin{gathered} \partial B_{к_i} / \partial P_{к_i} + \lambda_t \left(1 - \partial \Delta P / \partial P_{к_i}\right) = 0, \\ \lambda_t \left(1 - \partial \Delta P / \partial P_{г_i}\right) + \lambda_{г_j}(t) \partial Q_{г_j} / \partial P_{г_j} = 0, \\ \lambda_{г_j}(t) \partial Q_{г_j} / \partial V_{г_j} - d\lambda_{г_j}(t) / dt = 0. \end{gathered} \qquad (9)$$

Определив из третьего уравнения системы (9) $\lambda_{г_j}(t)$ и подставив его во второе уравнение, после определенных преобразований получим

$$\frac{b_i}{1 - \partial \Delta P / \partial P_{к_i}} = \left[C_j + \Delta \lambda_{г_j}(t)\right] \frac{q_{г_j}}{1 - \partial \Delta P / \partial P_{г_j}}, \qquad (10)$$

где $\Delta \lambda_{г_j}(t) = \int \frac{\lambda_t}{q_{г_j}} \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{г_j}}\right) \frac{\partial Q_{г_j}}{\partial V_{г_j}} dt$ - поправка, учитывающая влияние изменения напора на оптимальные режимы j-й ГЭС; $b_i = \partial B_{к_i} / \partial P_{к_i}$ - относительный прирост расхода топлива i-й тепловой станции; $q_{г_j} = \partial Q_{г_j} / \partial P_{г_j}$ - относительный прирост расхода воды j-й гидроэлектростанции; $\partial \Delta P / \partial P$ - относительный прирост потерь электроэнергии в высоковольтных линиях.

В случае, когда изменениями потерь электроэнергии в линиях электропередач можно пренебречь, условие (10) примет вид

$$b_i = \left[C_j + \Delta\lambda_{\Gamma_j}(t)\right] q_{\Gamma_j} . \qquad (11)$$

Если принять, что напоры на ГЭС в течение цикла регулирования остаются постоянными, условие (11) может быть записано в виде

$$b_i = C_j q_{\Gamma_j} . \qquad (12)$$

Алгоритм задачи. Для решения задачи необходимы следующие исходные данные:

- суточный график нагрузки системы;
- энергетические характеристики тепловых и гидравлических станций (расходные характеристики и характеристики относительных приростов);
- суммарный расход воды, используемой j-й ГЭС (j=1,2,…,n);
- объемы водохранилищ каждой ГЭС (V_j,*м*³) для суточного регулирования и их боковые приточности;
- кривая зависимости уровней и объемов водохранилищ, а также производная кривой связи объемов и уровней воды в водохранилище по объему (dH/dV_j).

Решение задачи осуществляется в следующей последовательности:

I. Первое приближение. Производя предварительное распределение суточной нагрузки между электростанциями при постоянном среднем значении напора H и соблюдая условие использования заданного объема воды, определяем режим работы ГЭС в энергосистеме [2].

II. Второе приближение. Имея первоначальное распределение нагрузки и часы работы ГЭС, производим новое распределение нагрузки с учетом изменения напора, обусловленного колебаниями верхнего бьефа ГЭС.

В этом случае расчет ведется в следующей последовательности:

1. За начало цикла регулирования принимаем некоторый момент времени t, где водохранилище должно быть заполнено (H_{max}) при определенном $\lambda_{\Gamma_j} = C_{\Gamma_j}$, полученном во время первого приближения. Для значения λ_{Γ_j} (по условию $\lambda_{\Gamma_j} = b/q_{\Gamma_j}$) при данном напоре имеем мощности и относительные приросты ГЭС и ТЭС в момент времени t.

2. Имея нагрузку гидроэлектростанции, по расходной характеристике находим расход воды при текущем значении уровня верхнего бьефа. По кривой зависимости производной dH/dV_j от V_j находим значение dH/dV_j при заполненном водохранилище.

3. Далее по формуле (13) находим поправку ((для (t+1) - го интервала времени:

$$\Delta\lambda_j = \Delta\tau \frac{dH}{dV_j} bQ10^{-2} . \qquad (13)$$

4. После использования из j-го водохранилища некоторого объема воды определяем оставшийся объем к началу интервала времени (t+1) по зависимости

$$V_{j_{(t+1)}} = V_{j_t}^{max} - \Delta V_{j_t} , \qquad (14)$$

где

$$\Delta V_{j_t} = \Delta\tau\left(Q_j^n - Q_j\right). \qquad (15)$$

Здесь $Q_j^п$ - приток воды в j-е водохранилище, *м³/с*; Q_j - расход воды через турбины i-й ГЭС, *м³/с*; ((- расчетный промежуток времени, *с*.

5. По значению $V_{j_{(t+1)}}$, используя зависимость уровня от объема водохранилища j - й ГЭС, находим напор на станции в момент времени (t+1) - H_{t+1}.

6. Расчет для следующего (t+1) - го часа начинаем для значения напора H_{t+1} при $\lambda_{j_{(t+1)}} = C_{j_t} + \Delta\lambda_{j_{(t+1)}}$. Диапазон относительных приростов “b” ТЭС для всего цикла регулирования остается постоянным. Далее по условию $b = \lambda_{j_{(t+1)}} q_{j_{(t+1)}}$ находим относительные приросты, нагрузки, а также расход воды ГЭС за данный (t+1) - й промежуток времени. При помощи уравнений (14), (15) находим объем воды в водохранилище $V_{j_{(t+1)}}$ и соответственно уровень воды для промежутка времени (t+2) - $H_{(t+2)}$, а по уравнению (13) - поправку $\Delta\lambda_{j_{(t+2)}}$.

7. Расчеты в вышеизложенной последовательности производим для периодов времени (t+3, t+4,..., t+n), где t+n=24, и строим график колебаний уровня водохранилища в течение цикла регулирования.

8. Проверяем граничные условия по объему и уровню воды в водохранилище ГЭС, согласно которому за период регулирования объем используемой воды должен быть равен заданному объему (с точностью (2%), а уровень воды к началу t-го часа должен соответствовать уровню полного объема водохранилища.

9. Если не выполняется вышеуказанное ограничение и водохранилище переполняется, то по условию (15) определяем максимальное значение $\lambda_{Г_j}^{max}$, далее по вышеизложенному алгоритму рассчитываем режим работы всего цикла регулирования и снова строим график колебаний уровня водохранилища. Если при $\lambda_{Г_j}^{max}$ водохранилище не заполняется, то искомое значение (находится между ранее определенным $\lambda_{Г_j}$ и $\lambda_{Г_j}^{max}$, т.е. (должно быть в этой зоне. Таким образом, методом последовательных приближений можно найти такое (, при котором будут выполнены указанные ограничения:

$$b_i^{min} / q_{Г_j}^{max} \le \lambda_{Г_j} \le b_i^{max} / q_{Г_j}^{min}, \qquad (16)$$

где b_i^{min}, b_i^{max} - минимальные и максимальные значения относительных приростов расхода топлива тепловой подсистемы; $q_{Г_j}^{min}, q_{Г_j}^{max}$ - минимальные и максимальные значения относительных приростов расхода воды ГЭС.

Если же при $\lambda_{Г_j}^{max}$ опорожнения не происходит и водохранилище опять находится в переполненном состоянии, то увеличиваем продолжительность работы ГЭС на 1 час. В случае незаполнения водохранилища определяется $\lambda_{Г_j}^{min}$, и расчет производится в вышеизложенной последовательности.

10. Если выполняется условие (16), то процесс считается завершенным, а режим работы ГЭС оптимальным. В этом случае, имея почасовые расходы воды через турбины ГЭС, подсчитываем колебания уровня нижнего бьефа с учетом переходных процессов и переходим к следующему приближению.

Таблица

t, *час*	P_c, *МВт*	λ_t=b/q	$\Delta\lambda_t$	C_j	b, *т.у.т./МВтч*	$P_т$, *МВт*	q, *м³/МВтч*	$P_г$, *МВт*	Q, *м³/с*	$P_{п.г.}$, *МВт*	ΔV, *10⁶м³*	V, *10⁶м³*	$H_в$-$H_н$, *м*
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
1	4080	-	-	-	-	4080	-	-	-	-	1,170	5,480	57,83
2	3900	-	-	-	-	3900	-	-	-	-	1,170	6,650	60,14
3	3780	-	-	-	-	3780	-	-	-	-	1,170	7,820	60,13
4	3780	-	-	-	-	3780	-	-	-	-	1,170	8,990	60,97
5	3900	-	-	-	-	3900	-	-	-	-	1,170	10,160	61,73
6	4080	-	-	-	-	4080	-	-	-	-	1,170	11,330	62,35
7	4440	-	-	-	-	4440	-	-	-	-	1,170	12,500	62,89
8	4660	-	-	-	-	4660	-	-	-	-	1,170	13,670	63,34
9	4980	0,2114	0,00140	0,2100	0,3200	4683	1,514	297	580	-	-0,918	12,752	63,63
10	4860	0,2119	0,00187	0,21003	0,3180	4675	1,500	185	360	-	-0,126	12,626	63,53
11	4740	0,2112	0,00120	0,2100	0,3115	4644	1,475	96	190	-	0,486	13,112	63,21
12	4500	-	-	-	-	4500	-	-	-	-	1,170	14,282	63,46
13	4380	-	-	-	-	4380	-	-	-	-	1,170	15,452	63,79
14	4440	-	-	-	-	4440	-	-	-	-	1,170	16,622	64,06
15	4680	-	-	-	-	4680	-	-	-	-	1,170	17,792	64,34
16	5040*	0,2100	-	-	0,3080	4600	1,467	440	810	-	-1,746	15,254	66,00
17	5520	0,2113	0,00130	0,2100	0,3520	4826	1,666	655	1210	39	-3,186	12,068	64,02
18	5820	0,2149	0,00490	0,2100	0,3750	5009	1,745	654	1230	157	-3,258	8,810	63,13
19	6000*	-	-	-	0,3800	5040	2,870	770	1440	190	-4,014	4,796	61,91
20	5720	0,2281	0,01810	0,2100	0,3640	4942	1,596	644	1280	134	-3,438	1,358	59,71
21	5422*	-	-	-	0,3800	5040	1,710	213	480	169	-0,558	0,800	55,96
22	4950	-	-	-	-	4950	-	-	-	-	1,170	1,970	53,55
23	4560	-	-	-	-	4560	-	-	-	-	1,170	3,140	54,42
24	4200	-	-	-	-	4200	-	-	-	-	1,170	4,310	56,27

* Вынужденные режимы по условию обеспечения баланса мощностей.

III. Третье приближение. По вышеизложенному алгоритму (второе приближение) рассчитываем оптимальное распределение нагрузки между станциями, но уже при заданном (реальном) напоре ГЭС для каждого часа (разность суточных среднечасовых уровней верхнего и нижнего бьефов).

Результаты расчетов приведены в таблице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурначян Г.А.** К вопросу о краткосрочной оптимизации режимов работы гидротепловой энергосистемы // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.- 1973. - №1. – С.43 - 49.
2. **Горнштейн В.М.** Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах. - М.: Гос. энерг. изд-во, 1959. - 248 с.
3. **Цветков Е.В.** и др. Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергосистемах. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 304 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.12.2001.

Հ.Ա. ԲՈՒՌՆԱՉՅԱՆ, Ս.Լ. ՆԱՍԻԲՅԱՆ

ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԲԵՌԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԲԱՇԽՈՒՄԸ՝ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ ՀԻԴՐՈԿԱՅԱՆՆԵՐՈՒՄ ԷՋՔԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Դիտարկվում է բարդ էներգահամակարգերում ՀԷԿ-երի աշխատանքի օպտիմալ ռեժիմների որոշման խնդիրը՝ հաշվի առնելով կայանների ստորին և վերին բիեֆներում ջրի մակարդակների տատանումներով պայմանավորված էջքերի փոփոխությունը: Բերված են խնդրի լուծման ալգորիթմը և թվային իրացումը ենթադրական էներգահամակարգի համար:

H.A. BURNACHYAN, S.L. NASIBYAN

OPTIMAL SHEDULING OF THE POWER SYSTEM LOAD, CONSIDERING HEAD CHANGES IN THE HYDROPOWER PLANT

The problem solution of optimal HPP working regime selection in a compound power system, taking into accountthe changes of the head in the plant due to fluctuation of the water level in afterbay and forebay is viewed. The algorithm of the problem and numerical realization for the HPP are given.