ЛИТЕРАТУРА

1. Шубин Е. П. Новый метод подсчета тепловых потерь нескольких труб, уложенных в грунт // Изв. ВТИ. – 1934. – № 8. – С. 42.
2. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. – М., 1982. – С. 240–285.
3. Байрашевский Б. А., Седнин В. А., Абражевич С. И. Анализ теплопотерь одиночного теплопровода // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 5. – С. 99–109.
4. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. СНиП 2.04.14 – 88. – М., 1989.
5. Байрашевский Б. А. Оценка эффективности работы теплосетей // Электрические станции. – 1988. – № 2. – С. 74–76.
6. Байрашевский Б. А. Анализ сравнительной эффективности работы теплосетей // Весці НАН Беларусі. – Сер. ФТН. – 1999. – № 2. – С. 130.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и теплотехники

Поступила 19.09.2001

УДК 621.165

ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЭЦ

Канд. техн. наук, доц. ПАЩЕНКО А. В., инж. ПОПОВА Ю. Б.

Белорусская государственная политехническая академия

Данная работа посвящена рассмотрению некоторых случаев, встречающихся при решении задач оптимизации режимов работы ТЭЦ: распределению тепловых нагрузок при работе турбин по тепловому графику, в том числе при разных давлениях пара в производственных отборах.

При работе турбин по тепловому графику критерием оптимизации не может служить минимум расхода теплоты свежего пара, поскольку в этом случае конкретным значениям производственного и теплофикационного отборов соответствует некоторая электрическая мощность, определяемая минимальным пропуском пара в конденсатор [1]. По этой причине авторы используют критерий максимума экономии расхода теплоты на турбины против варианта раздельного производства электроэнергии [2]

$$\Delta Q_{эк} = Q_{п\Sigma} + Q_{т\Sigma} + N_{\Sigma} q_{зам} - Q_{0\Sigma}, \tag{1}$$

где $Q_{п\Sigma}, Q_{т\Sigma}$ – суммарный отпуск теплоты из производственных и теплофикационных отборов турбин;

N_{Σ} – суммарная мощность турбоустановок;

$q_{зам}$ – удельный расход теплоты на выработку электроэнергии на замещающей КЭС (принимая в качестве замещающей Лукомльскую ГРЭС, $q_{зам}$ = 1,9 Гкал/(МВт·ч), или 7,961 ГДж/(МВт · ч));

$Q_{0\Sigma}$ – суммарный расход теплоты свежего пара на параллельно работающие турбины.

Задача распределения нагрузок при работе турбин по тепловому графику становится двумерной и может быть представлена в виде следующей математической модели:

$$\Delta Q_{\text{эк}} = \sum_{i}^{m} Q_{\text{п}\,i} + \sum_{i}^{m} Q_{\text{т}\,i} + q_{\text{зам}} \sum_{i}^{m} N_i - \sum_{i}^{m} Q_{0\,i} \rightarrow \max , \qquad (2)$$

или целевой функцией в общем виде для задачи на минимум

$$-\Delta Q_{\text{эк}} = \sum_{i=1}^{m} F_i\,(Q_{\text{п}i}, Q_{\text{т}i}) \rightarrow \min ; \qquad (3)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^{m} Q_{\text{п}i} = Q_{\text{п}\Sigma} ; \qquad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{m} Q_{\text{т}i} = Q_{\text{т}\Sigma} ; \qquad (5)$$

$$Q_{\text{п}i} \in [\ Q_{\text{п}i}^{\min};\ Q_{\text{п}i}^{\max}\ ],\ i = 1, 2, ..., m; \qquad (6)$$

$$Q_{\text{т}i} \in [\ Q_{\text{т}i}^{\min}; Q_{\text{т}i}^{\max}\ ],\ i = 1, 2, ..., m, \qquad (7)$$

где $Q_{\text{п}\Sigma}$, $Q_{\text{т}\Sigma}$ – заданные соответственно производственная и теплофикационная нагрузки;

$Q_{\text{п}i}{}^{\min}, Q_{\text{п}i}{}^{\max}, Q_{\text{т}i}{}^{\min}, Q_{\text{т}i}^{\max}$ – соответственно минимально и максимально возможные производственная и теплофикационная мощности i-й турбины;

m – количество турбин.

Решение (2)–(7) предлагается осуществлять методом двумерного динамического программирования [3, 4]. Данный выбор объясняется следующими причинами:

критерий оптимальности является сепарабельной функцией (следует из (2));

метод динамического программирования является методом глобального поиска;

метод динамического программирования позволяет решить задачу минимума для выпуклых и вогнутых, гладких и негладких, а также дискретных и непрерывных функций;

поскольку у поставленной выше задачи размерность равна двум, «проклятие размерности», введенное Беллманом [3], можно считать вполне преодолимым, учитывая возможности современной вычислительной техники.

На первом этапе динамического программирования для любого фиксированного $i \in [1, m]$ строится функция Беллмана $\mathrm{Bel}^i(X^i,\ Y^i)$ и определяются ее решения $Q_{\text{п}i}^{\text{opt}}(X^i,\ Y^i\ )$, $Q_{\text{т}i}^{\text{opt}}(X^i,\ Y^i\ )$. Здесь X^i, Y^i – введенные авторами вспомогательные переменные, которые изменяются в определенных пределах, указанных ниже, и являются соответственно возможной суммарной производственной и теплофикационной мощностью станции i работающих агрегатах (верхние индексы указывают на количество совместно работающих агрегатов, а нижние – на порядковый номер рассматриваемого агрегата). Величина функции Беллмана для некоторой пары X^i, Y^i равна значению экономии теплоты при i работающих агрегатах при условии, что суммарные нагрузки X^i, Y^i распределяются между этими агрегатами оптимально.

Для $i = 1$:

$$\mathrm{Bel}^1(X^1,Y^1) = F_1(X^1,Y^1); \tag{8}$$

$$Q_{\text{п}1}^{\text{opt}}(X^1,Y^1) = X^1; \tag{9}$$

$$Q_{\text{т}1}^{\text{opt}}(X^1,Y^1) = Y^1, \tag{10}$$

где X^1, Y^1 изменяются с некоторыми заданными шагами в интервалах

$$X^1 \in [\ Q_{\text{п}1}^{\min},\ \min(Q_{\text{п}1}^{\max},\ Q_{\text{п}\Sigma})\ ]; \tag{11}$$

при фиксированном X^1 из (11)

$$Y^1 \in [\ Q_{\text{т}1}^{\min},\ \min(\ Q_{\text{т}1}^{\max},\ Q_{\text{т}\Sigma})]. \tag{12}$$

При любом фиксированном $i \in (1, m]$

$$\mathrm{Bel}^i(X^i,Y^i) = \min_{Q_{\text{п}i},Q_{\text{т}i}} [\ F_i(Q_{\text{п}i},\ Q_{\text{т}i}) + \mathrm{Bel}^{i-1}(X^i - Q_{\text{п}i}, Y^i - Q_{\text{т}i})\ ], \tag{13}$$

где
$$X^i \in [\ \min_{1<\tau\le i}(Q_{\text{п}\tau}^{\min}),\ Q_{\text{п}\Sigma}\ ]; \tag{14}$$

при фиксированном X^i из (14)

$$Y^i \in [\ \min_{1<\tau\le i}(Q_{\text{т}\tau}^{\min}),\ Q_{\text{т}\Sigma}\ ]; \tag{15}$$

при фиксированных X^i, Y^i из (14), (15)

$$Q_{\text{п}i} \in [\ Q_{\text{п}i}^{\min},\ \min(Q_{\text{п}i}^{\max},\ X^i)\ ]; \tag{16}$$

при фиксированных $X^i, Y^i, Q_i^{\text{п}}$ из (14)–(16)

$$Q_{\text{т}i} \in \left[\ Q_{\text{т}i}^{\min},\ \min(Q_{\text{т}i}^{\max}, Y^i)\ \right]. \qquad (17)$$

В (11), (12) и (14), (15) интервалы изменения возможных суммарных производственной и теплофикационной мощностей колеблются от минимальных значений до заданных. Такие интервалы (по сравнению с аналогичными, представленными в [5], где верхней границей являются суммы максимумов) позволяют существенно сократить перебор возможных вариантов.

На втором этапе двумерного динамического программирования определяются искомые оптимальные значения производственной и теплофикационной мощностей каждого турбоагрегата в обратном порядке:

$$\begin{array}{ll} Q_{\text{п}m}^{*} = Q_{\text{п}m}^{\text{opt}}(Q_{\text{п}\Sigma}, Q_{\text{т}\Sigma}); & Q_{\text{т}m}^{*} = Q_{\text{т}m}^{\text{opt}}(Q_{\text{п}\Sigma}, Q_{\text{т}\Sigma}); \\ \vdots & \vdots \\ Q_{\text{п}1}^{*} = Q_{\text{т}1}^{\text{opt}}(Q_{\text{п}\Sigma} - \sum\limits_{i=2}^{m} Q_{\text{п}i}^{*}, Q_{\text{т}\Sigma} - \sum\limits_{i=2}^{m} Q_{\text{т}i}^{*}); & Q_{\text{т}1}^{*} = Q_{\text{т}1}^{\text{opt}}(Q_{\text{п}\Sigma} - \sum\limits_{i=2}^{m} Q_{\text{п}i}^{*}, Q_{\text{т}\Sigma} - \sum\limits_{i=2}^{m} Q_{\text{т}i}^{*}). \end{array} \qquad (18)$$

Очевидно, что многократное решение задачи оптимизации режимов работы теплофикационных турбин по описанной выше методике позволит построить оптимальную эквивалентную характеристику станции или группы агрегатов при их работе по тепловому графику.

С математической точки зрения, для построения оптимальной эквивалентной характеристики необходимо лишь один раз выполнить первый этап динамического программирования и многократно второй на интервале возможных суммарных производственных $[\ Q_{\text{п}\Sigma}^{\min};\ Q_{\text{п}\Sigma}^{\max}\ ]$ и теплофикационных $[\ Q_{\text{т}\Sigma}^{\min};\ Q_{\text{т}\Sigma}^{\max}\ ]$ нагрузок.

Первый этап динамического программирования полностью совпадает с описанным выше, а второй представляет собой итерационный процесс, который можно описать следующим алгоритмом.

1. Определяются оптимальные значения производственной и теплофикационной мощностей каждой турбины при минимальных значениях нагрузок из заданных интервалов:

для m-й работающей турбины:

$$Q_{\text{п}m}^{*} = Q_{\text{п}m}^{\text{opt}}(Q_{\text{п}\Sigma}^{\min}, Q_{\text{т}\Sigma}^{\min});$$

$$Q_{\text{т}m}^{*} = Q_{\text{т}m}^{\text{opt}}(Q_{\text{п}\Sigma}^{\min}, Q_{\text{т}\Sigma}^{\min}); \qquad (19)$$

для 1-й работающей турбины:

$$Q_{\text{п}1}^{*} = Q_{\text{п}1}^{\text{opt}}(Q_{\text{п}\Sigma}^{\min} - \sum_{i=2}^{m} Q_{\text{п}i}^{*}, Q_{\text{т}\Sigma}^{\min} - \sum_{i=2}^{m} Q_{\text{т}i}^{*});$$

$$Q_{\text{т}1}^{*} = Q_{\text{т}1}^{\text{opt}}(Q_{\text{п}\Sigma}^{\min} - \sum_{i=2}^{m} Q_{\text{п}i}^{*}, Q_{\text{т}\Sigma}^{\min} - \sum_{i=2}^{m} Q_{\text{т}i}^{*}). \qquad (20)$$

2. Повторяются вычисления п. 1 с той лишь разницей, что величина $Q_{\text{т}\Sigma}^{\min}$ принимает следующее значение из заданного интервала теплофикационной нагрузки, т. е. $Q_{\text{т}\Sigma}^{\min} := Q_{\text{т}\Sigma}^{\min} + \Delta Q_{\text{т}}$, где $\Delta Q_{\text{т}}$ – некоторый шаг изменения интервала теплофикационной мощности. Этап заканчивается, когда $Q_{\text{т}\Sigma}^{\min} = Q_{\text{т}\Sigma}^{\max}$.

3. Повторяются вычисления п. 1 с той лишь разницей, что величина $Q_{\text{п}\Sigma}^{\min}$ принимает следующее значение из заданного интервала производственной нагрузки, т. е. $Q_{\text{п}\Sigma}^{\min} := Q_{\text{п}\Sigma}^{\min} + \Delta Q_{\text{п}}$, где $\Delta Q_{\text{п}}$ – некоторый шаг изменения интервала производственной мощности.

4. Переход к п. 2 с новым значением $Q_{\text{п}\Sigma}^{\min}$.

5. Процесс расчета заканчивается, когда $Q_{\text{п}\Sigma}^{\min} = Q_{\text{п}\Sigma}^{\max}$.

На практике встречаются случаи, когда одни турбины отпускают в производственный отбор пар более низкого давления, а другие – более высокого. Давление же теплофикационного отбора остается одинаковым для всех турбин. Математическую модель данной задачи при работе турбин по тепловому графику можно представить в следующем виде:

$$-\Delta Q_{\text{эк}} = \sum_{i}^{k} Q_{\text{п}i}^{p_1} + \sum_{i}^{m-k} Q_{\text{п}i}^{p_2} + \sum_{i}^{m} Q_{\text{т}i} + q_{\text{зам}} \sum_{i}^{m} N_i - \sum_{i}^{m} Q_{0i} \to \min\,; \tag{21}$$

$$\sum_{i=1}^{k} Q_{\text{п}i}^{p_1} = Q_{\text{п}\Sigma}^{p_1}\,; \tag{22}$$

$$\sum_{i=1}^{m-k} Q_{\text{п}i}^{p_2} = Q_{\text{п}\Sigma}^{p_2}\,; \tag{23}$$

$$\sum_{i=1}^{m} Q_{\text{т}i} = Q_{\text{т}\Sigma}\,; \tag{24}$$

$$Q_{\text{п}i}^{p_1} \in [\, Q_{\text{п}i}^{p_1 \min},\ Q_{\text{п}i}^{p_1 \max} \,],\ i = 1, 2, ..., k; \tag{25}$$

$$Q_{\text{п}i}^{p_2} \in [\, Q_{\text{п}i}^{p_2 \min},\ Q_{\text{п}i}^{p_2 \max} \,],\ i = 1, 2, ..., m-k; \tag{26}$$

$$Q_{\text{т}i} \in [\, Q_{\text{т}i}^{\min},\ Q_{\text{т}i}^{\max} \,],\ i = 1, 2, ..., m, \tag{27}$$

где $Q_{\text{п}\Sigma}^{p_1}$, $Q_{\text{п}\Sigma}^{p_2}$ – заданные производственные нагрузки для давлений пара p_1 и p_2;

$Q_{\text{т}\Sigma}$ – заданная теплофикационная нагрузка;

$Q_{\text{п}i}^{p_1 \min}$, $Q_{\text{п}i}^{p_1 \max}$, $Q_{\text{п}i}^{p_2 \min}$, $Q_{\text{п}i}^{p_2 \max}$, $Q_{\text{т}i}^{\min}$, $Q_{\text{т}i}^{\max}$ – соответственно минимально и максимально возможные производственная (для давлений отбора p_1 и p_2) и теплофикационная мощности i-го агрегата;

m – количество агрегатов;

k – то же отпускающих пар давлением p_1.

Как видно из постановки задачи, совместная оптимизация агрегатов, отпускающих пар разного давления, не может быть произведена. Поэтому авторами предлагается провести декомпозицию задачи, которую можно описать следующим алгоритмом.

I. Прямой ход двумерного динамического программирования для оптимизации работы k агрегатов, отпускающих пар давлением p_1.

II. Формирование массива (назовем его Y^{p_1}) всех возможных суммарных значений теплофикационного отбора, соответствующего $Q_{\text{п}\Sigma}^{p_1}$ – заданной производственной нагрузке для давления p_1.

III. Прямой ход двумерного динамического программирования для оптимизации работы $(m - k)$ агрегатов, отпускающих пар давлением p_2.

IV. Формирование массива (назовем его Y^{p_2}) всех возможных суммарных значений теплофикационного отбора, соответствующего $Q_{\text{п}\Sigma}^{p_2}$ – заданной производственной нагрузке для давления p_2.

V. Создание новой переменной C, физический смысл которой – суммарно возможная теплофикационная нагрузка для i работающих турбин ($i = 1, 2, ..., m$) при заданных производственных нагрузках давлений пара p_1 и p_2. Таким образом, значения переменной C будут изменяться с некоторым заданным шагом согласно

$$C \in \left[\ \min(Y^{p_1 \min},\ Y^{p_2 \min}),\ Q_{\text{т}\Sigma}\ \right], \tag{28}$$

где $Y^{p_1 \min}$, $Y^{p_2 \min}$ – минимальные и максимальные значения массивов Y^{p_1} и Y^{p_2}.

VI. Применение одномерного динамического программирования для оптимального распределения суммарной теплофикационной нагрузки C между массивами Y^{p_1} и Y^{p_2}.

VII. Обратный ход двумерного динамического программирования для оптимизации работы k агрегатов, отпускающих пар давлением p_1.

VIII. Обратный ход двумерного динамического программирования для оптимизации работы $(m - k)$ агрегатов, отпускающих пар давлением p_2.

Очевидно, что последовательность действий данного алгоритма будет аналогичной при наличии разных давлений пара в производственных отборах в количестве, большем двух.

Описанная выше методика решения задачи оптимизации режима работы теплофикационных турбин по тепловому графику реализована в виде программного обеспечения (ПО) на языке программирования Delphi v. 5.0 с использованием Borland Data Base Engine.

Созданное ПО позволяет решить задачу оптимизации как для заданных значений производственной и теплофикационной нагрузок, так и для интервала нагрузок. В программе также предусмотрено распределение нагрузки между турбинами при производственном отборе пара разных давлений. Результаты расчетов представляются в виде таблиц, которые могут быть экспортированы в Microsoft Excel для последующего вывода на печать, сохранения или дальнейшего использования в качестве оптимальной эквивалентной характеристики.

Время расчета программы при работе турбин с одинаковым давлением в производственном отборе зависит от количества агрегатов и заданных нагрузок и для реальных нагрузок колеблется от нескольких секунд до 10 минут (для ЭВМ с процессором Intel Pentium-III–500 МГц). Время расчета программы значительно уменьшается при работе турбин с разными давлениями в производственном отборе.

Разработанное ПО может быть использовано для ведения оптимального режима работы агрегатов диспетчером ТЭЦ. Результаты работы переданы на Минскую ТЭЦ-3 для оптимального распределения тепловых нагрузок между турбоустановками первой очереди этой ТЭЦ.

ВЫВОДЫ

1. Предложены методика и алгоритм оптимизации режимов работы ТЭЦ или группы агрегатов по тепловому графику методом двумерного динамического программирования.
2. В качестве критерия оптимизации выбран максимум экономии расхода теплоты на турбины против варианта раздельного производства электроэнергии и теплоты.
3. Предложен алгоритм построения оптимальной эквивалентной характеристики ТЭЦ при работе турбин по тепловому графику.
4. Предложен алгоритм оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами для случая разных давлений в производственных отборах.
5. Предложенные алгоритмы реализованы в виде ПО для оптимизации режимов работы турбин 1-й очереди МТЭЦ-3.
6. Тестирование программы на контрольном примере показало ее работоспособность, надежность и возможность практического применения в составе АСУ ТЭЦ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бененсон Е. И., Иоффе Л. С. Теплофикационные паровые турбины. – М.: Энергия, 1986. – 272 с.
2. Качан А. Д. Оптимизация режимов и повышение эффективности работы паротурбинных установок ТЭС. – Мн.: Выш. шк., 1985. – 176 с.
3. Беллман Р. Динамическое программирование. – М.: Наука, 1960.
4. Габасов Р., Кириллова Ф. М. Основы динамического программирования. – Мн.: БГУ, 1975. – 259 с.
5. Попова Ю. Б. Математическое и программное обеспечение для оптимизации режима ТЭЦ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 6. – С. 79–87.

Представлена кафедрой
ПОВТ и АС

Поступила 26.09.2001