

УДК 321.61

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ВОДОСНАБЖАЮЩИХ КАСКАДНО ВКЛЮЧЕННЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Докт. экон. наук, проф. ПАДАЛКО Л. П.

Белорусский национальный технический университет

Инж. ТЕПЛЯКОВ А. М.

Минскводоканал

В системе водоснабжения г. Минска важное значение имеет Вилейско-Минская водная система, представляющая каскад из пяти последовательно соединенных через каналы насосных станций и осуществляющих перекачку воды из Вилейского водохранилища в столицу. На каждой станции установлено по четыре насоса осевого типа, в которых предусмотрено автоматическое регулирование величины подачи воды воздействием на углы разворота лопастей. В работе задействован, как правило, один насос, но в периоды повышенной водной нагрузки включается второй насос, а иногда и третий. Функция насосов состоит только в подъеме воды. Вода самотеком поступает от одной станции к следующей, так как каналы имеют определенный уклон. Общее годовое потребление электроэнергии комплексом – примерно 100 млн кВт·ч, удельный вес энергетической составляющей в себестоимости полезно отпущенной воды – не менее 70 %.

Предварительный анализ показывает, что имеются возможности экономии энергии за счет оптимального управления режимом работы насосных станций [1]. Размер этой экономии оценивается величиной порядка 1...3 % от общего годового расхода, что эквивалентно 1...3 млн кВт·ч и при цене электроэнергии 3,5 цент/кВт·ч составляет 35000...105000 дол. в год.

Как известно, потребление электрической мощности каждым насосным агрегатом для данной величины подачи воды зависит от величины геометрического напора [2]. Чем меньше его величина, тем меньше должна быть величина угла разворота лопастей и тем меньше, следовательно, величина электрической нагрузки насоса. Поэтому, казалось бы, что естественным путем снижения расхода электроэнергии на насосной станции стало бы поддержание уровня воды в нижнем бьефе при возможно более высоком

значении, а уровня воды в верхнем бьефе – при возможно более низком значении. Однако это оказалось бы осуществимо, если бы агрегаты не были режимно связаны друг с другом через каналы. Поддержание высокого уровня воды в нижнем бьефе той или иной насосной станции приводит к высокому уровню в верхнем бьефе предыдущей станции. Если на данной станции высокий уровень благоприятствует снижению электрической нагрузки, то на предыдущей станции он приводит к увеличению электрической нагрузки. Если рассматривать каналы как емкости, то возникает задача выбора такой величины их заполнения, при котором обеспечивается минимальный расход электроэнергии по всему комплексу в целом при заданной величине подачи воды от пятой станции. Разумеется, если такой режим существует, то в процессе работы должен поддерживаться требуемый уровень воды во всех каналах.

Обозначим через Q_i величины подачи на каждой станции. На время отвлекаемся от того, что эти подачи зависимы друг от друга. Через h_i обозначены уровни воды в каналах. В первом приближении предполагаем, что эти уровни одинаковы для двух смежных станций. В последующем покажем возможности учета дифференциации этого уровня в начале и в конце канала. Целевая функция, выражающая требование минимизации потребления электрической мощности, записывается в виде

$$\min \sum f_i(h_{i-1}, h_i).$$

Здесь $f_i(h_{i-1}, h_i)$ – энергетическая характеристика i -й станции, выражающая зависимость потребляемой ею электрической мощности от геометрического напора, равного $h_i - h_{i-1}$.

Необходимо учитывать ограничения на уровни вводы в каналах

$$h_i^{\min} < h_i < h_i^{\max}.$$

Решение задачи осуществляется в виде многошаговой вычислительной процедуры динамического программирования [3]. На первом шаге строится энергетическая характеристика для первой станции $f_1(h_0, h_1)$, где h_0 – уровень воды в Вилейском водохранилище. Так как величина Q_1 считается заданной, она в состав искомых параметров не введена, хотя функция строится в зависимости от различных значений h_1 и при заданных значениях h_0 и Q_1 . Таким образом, на первом шаге вводится при заданных значениях Q_1 и h_0 функция $f_1(h_1, h_0) = \varphi_1(h_1)$, выражаемая в зависимости только от одной переменной h_1 , так как вторая переменная считается заданной.

На втором шаге производится вычисление по рекуррентному соотношению функции

$$\varphi_2(h_2) = \min\{\varphi_1(h_1) + f_2(h_1, h_2)\}.$$

Здесь $f_2(h_1, h_2)$ – функция, выражающая зависимость электрической нагрузки второй станции от $h_1 - h_2$ при заданном значении Q_2 . Построение функции $\varphi_2(h_2)$ осуществляется следующим образом. Для каждой величины h_2 , находящейся в зоне допустимых значений уровня воды во втором

канале, перебираются все возможные значения h_1 и окончательно запоминается и фиксируется то значение, при котором функция $\varphi_2(h_2)$ приобретает минимальное значение. Выполнив такие расчеты для всех значений h_2 , получаем искомую функцию $\varphi_2(h_2)$.

На третьем шаге расчет ведется по рекуррентному соотношению

$$\varphi_3(h_3) = \min\{\varphi_2(h_2) + f_3(h_2, h_3)\}.$$

Здесь $f_3(h_2, h_3)$ – функция, выражающая зависимость электрической нагрузки третьей станции от $h_2 - h_3$ при заданном значении Q_3 . Расчет ведется так же, как и для второго шага. А именно: для каждого значения h_3 из диапазона возможных перебираются все величины h_2 и окончательно запоминается и регистрируется то значение h_2 , при котором $\varphi_3(h_3)$ минимально. Выполнив такие расчеты для всех значений h_3 , получаем искомую функцию $\varphi_3(h_3)$.

Произведя аналогичным образом расчеты для четвертого шага, переходим к пятой станции, для которой определяется функция:

$$\varphi_5(h_5) = \min\{\varphi_4(h_4) + f_5(h_4, h_5)\}.$$

Отыскивая для каждого значения h_5 соответствующее h_4 , получаем в итоге функцию $\varphi_5(h_5)$, которая выражает минимальные затраты электрической мощности по каскаду при данной величине h_5 и при заданном значении подачи Q_5 от пятой станции.

Однако нам еще неизвестны те электрические нагрузки насосов, которые обеспечивают минимум затрат электроэнергии. Для их нахождения требуется обратный ход, т. е. ход от пятой станции к первой. Этот ход осуществляется следующим образом.

Предположим, что h_5^* – это то значение уровня, при котором функция $\varphi_5(h_5)$ минимальна. Отталкиваясь от $\varphi_5(h_5)$, находим те значения $\varphi_4(h_4)$ и h_4^* , при которых достигнуто минимальное значение $\varphi_5(h_5)$ при данном h_5^* . Имея искомые величины h_4^* и h_5 , двигаемся к третьей станции и выявляем те значения $\varphi_3(h_3)$ и h_3^* , при которых получена предыдущая величина $\varphi_4(h_4)$. Если же значение h_5 задано, то величина функции $\varphi_5(h_5)$, от которой осуществляется ход назад, определяется однозначно.

Таким образом, осуществляя обратный ход до первой станции, определяем искомые значения уровней воды в каналах.

При реализации предложенного алгоритма необходимо принимать во внимание форму представления функций для f и φ . Если бы функции f имели бы аналитический вид, то функции φ формировались бы как аналитические и последняя функция для φ как результат решения задачи сформировалась бы в аналитическом виде. Однако решение задачи в аналитическом виде не позволяет учесть ограничения в виде неравенств. Для учета указанных ограничений для функций φ должны формироваться дискретные значения. И тогда надо задаваться шагом дискретности, равным, например, 1 см для высоты подъема, 1 кВт для мощности и т. д. Результаты расчета для φ будут формироваться в этом случае в табличном виде.

При освещении метода решения мы ввели ряд допущений. Одно из них – дифференцированные значения Q_i . На самом деле размеры подач для установившегося режима должны быть одинаковыми на всех станциях, если не учитывать потери в каналах. Одинаковые подачи обеспечивают поддержание оптимального уровня воды в каналах и стабильность функционирования комплекса.

Второе допущение касалось принятия одинакового уровня воды в концевых точках канала. В действительности каналы имеют естественный уклон, обеспечивающий сток воды самотеком, и разница в уровнях в начале и в конце канала может составлять несколько метров. Однако учет этого фактора не вносит принципиальных усложнений в методику решения задачи. Уровни воды в начале и в конце канала функционально связаны при известных параметрах канала (уклон, шероховатость, ширина и глубина) и величине подаваемой воды. Можно, например, в качестве искомого параметра ввести уровень воды в начале канала, а уровень в конце выразить в виде функции от уровня в начале. В результате для канала сохраняется один искомый параметр.

Чтобы реализовать полученное решение, необходимо заполнить каналы до оптимальных значений уровней в них и затем выбрать режим работы насосов с заданной величиной подачи. Если в канале имеют место потери воды вследствие фильтрации, испарения и т. д., то величину подачи на предыдущей станции по сравнению с последующей следует увеличивать на величину потерь.

Если величина подачи, задаваемой пятой станцией, меняется, то требуется повторное решение задачи, т. е. нахождение новых значений функций $\varphi_i(h_i)$, которые формируются, в свою очередь, на базе новых значений функций $f_i(h_{i-1}, h_i)$. В результате определяются искомые новые значения уровней воды в каналах.

Если по тем или иным причинам изменяется уровень воды в пятом канале, а величина подачи осталась прежней, то требуется из уже рассчитанных значений $\varphi_5(h_5)$ выбрать то, которое соответствует величине h_5 , и обратным ходом найти новые значения уровней. Если же изменяется уровень в Вилейском водохранилище, то необходимо решить задачу заново при новом значении h_0 .

Важно учитывать следующую режимную особенность рассматриваемой водной системы. Скорость потока воды в канале составляет примерно 0,5 м/с. Это означает, что время добегания воды от одной станции к следующей несколько часов, от первой станции до последней – около суток, что свидетельствует о большом запаздывании в реализации тех или иных управляющих воздействий. Если система работает в установившемся режиме (стабильная величина подачи и соответствующие оптимальные уровни заполнения каналов), то проблем, обусловленных малой скоростью потока, не возникает. Проблемы могут возникнуть только в переходном режиме, когда осуществляется переход от одного установившегося режима к другому. Такие ситуации возникают не так часто. И если они возникают, то необходимо считаться с инерционностью системы, не ожидая немедленно перехода к новому установившемуся режиму.

При наличии компьютерной программы, реализующей данный алгоритм, проблем, связанных с частыми в случае необходимости пересчетов, не должно быть. Важно лишь, чтобы в расчетах использовались реальные энергетические характеристики насосных агрегатов. А чтобы оптимально управлять режимом, реализуя результаты расчетов, следует иметь информацию о размерах подачи на базе расходомеров, об уровнях воды в каналах и Вилейском водохранилище.

Важное значение имеет выбор способа установления заданного оптимального уровня воды в каналах и управления переходом от одного установившегося режима к другому. Предположим, что на следующие сутки устанавливается новая, повышенная величина подачи воды от пятой станции. Тогда, исходя из этой величины, необходимо сделать повторный расчет оптимального режима и на его основе получить искомые значения уровней в каналах. Задача состоит в том, чтобы оптимальным образом перейти от прежнего установившегося режима к новому. По существу, речь идет о том, чтобы от прежних уровней воды в каналах перейти к новым.

Особенность задачи состоит в том, что необходимо учитывать четыре последовательно соединенных канала и их взаимосвязанность. Пусть имеется время для перехода к новой величине подачи. Это означает, что следует заблаговременно изменить подачу на первой станции. Первый канал начнет заполняться, и как только волна дойдет до второй станции, на ней увеличивается подача. Первая и вторая станции работают с одинаковой подачей, и уровень воды в канале оказывается выше прежнего. При увеличенной подаче на второй станции и прежней на третьей станции канал между ними заполняется. К моменту притекания волны от второй к третьей станции увеличивается подача на третьей. Такой процесс регулирования продолжается до тех пор, пока волна не дойдет до пятой станции, и на ней увеличивается подача. После этого осуществляется корректировка значений уровней в каналах, которую надо начинать с последнего, связывающего четвертую и пятую станции. Уровень воды в этом канале регулируется кратковременным изменением подачи на четвертой станции. После этого корректируется уровень в третьем канале, связывающем третью и четвертую станции, кратковременным изменением подачи от третьей станции. Процесс корректирования завершается на первой станции.

Номинальная величина подачи каждого насосного агрегата ВМВС составляет $5,5 \text{ м}^3/\text{с}$. С увеличением потребления воды со стороны потребителей возникает необходимость включения в работу второго агрегата, если ранее на станциях было включено по одному агрегату. Если насосы имеют различие в эксплуатационных энергетических характеристиках, то их необходимо проранжировать по эффективности, и состав включенного оборудования должен быть наиболее экономичным. С включением в работу нескольких агрегатов возникает задача оптимального распределения нагрузки между ними. Если бы их энергетические характеристики были полностью идентичны, то оптимальным было бы и равномерное распределение. Но так как эти характеристики различаются, возникает оптимизационная задача. Для двух агрегатов ее можно решить простым перебором всех

вариантов. Для трех и четырех включенных агрегатов необходима оптимизация и ее можно осуществить методом динамического программирования. Если же имеются энергетические характеристики вида $f_i(Q_i)$, выражающие зависимость потребления электрической мощности насосом от величины его подачи Q_i при заданных уровнях воды в каналах, то задача может быть сформулирована в виде $\min \Sigma f_i(Q_i)$ при ограничении $\Sigma Q_i = Q$. Условием оптимального решения будет равенство удельных приростов потребления электрической мощности насосов $df_1/dQ_1 = df_2/dQ_2 = df_3/dQ_3 = \dots = \lambda$. Оно выражает условие оптимальности в общем виде и может быть достигнуто либо путем, например, графического решения, либо, как указывалось выше, методом динамического программирования.

Следует заметить, что число включенного оборудования считается заданным и определяется величиной водной нагрузки. Если она превышает номинальную подачу одного агрегата, то в работе должно находиться два. В том случае, когда она превышает суммарную номинальную мощность двух агрегатов, в работе должно находиться три, и т. д. Задача состоит в определении того, какие агрегаты из заданного числа включенных надо держать в работе и как распределить нагрузку (суммарную подачу) между включенными агрегатами.

Для реализации предложенного подхода к управлению необходимы объективные энергетические характеристики насосных агрегатов. Идеальным было бы построение таких характеристик на базе экспериментальных данных режима работы насосов. Но для этого нужны уровнемеры, расходомеры и ваттметры, которые отсутствуют на станциях. В настоящее время проводится работа по их приобретению и установке. На первом этапе с целью испытания предложенного алгоритма управления режимом работы каскада насосных станций их энергетические характеристики были построены на базе заводских характеристик оборудования. Они, естественно, отличаются от реальных. Предварительные результаты расчетов показывают, что рассчитанные режимы экономически выгоднее тех, которые устанавливаются без оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л е з н о в Б. С. Экономия электроэнергии в насосных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Л о б а ч е в П. В. Насосы и насосные станции. – М.: Стройиздат, 1983.
3. Б е л л м а н Р. Динамическое программирование. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960.

Представлена кафедрой
экономики и организации энергетики

Поступила 29.03.2002