Что касается металлических (никель-хромовых) электропроводников аналогичной мощности, взятых нами для сравнения, с их применением все происходило более равномерно, — как по показателям мощности W_m , так и температуры Δt_m . Однако при равенстве показателей температуры Δt_n и Δt_m расход электроэнергии был ниже в случаях, когда использовались полимерные электропроводники.

Такая направленность снижению наблюдалась во всех других случаях применения полимерных электропроводников с числом основных «утков»-волокон в пределах от 36 до 94 шт. Отсюда и производственные реальные показатели их эксплуатации в греющих полах жилищно-гражданских и других помещениях были эффективнее. Например, при обогреве полов помещений ванных, прихожих, кухонь в одинаковых условиях расход электроэнергии составлял 65...80 Вт·ч/м², тогда как с использованием металлических греющих проводов отечественного и зарубежного производства достигали 110...120 Вт·ч/м². По нашему мнению, здесь отсутствует упоминаемая ранее скученность волокон, металлический греющий электропроводник состоял из одной проволочной нити. Теплота в данном случае, помимо собственного нагрева, в значительной мере от-

давалась в окружающую среду. Из-за меньшего сопротивления вынужденно принималась его рабочая длина в 2...3 раза больше, чем полимерного. Отсюда, безусловно, и затраты электроэнергии выше, чем при использовании полимерных электропроводников (в наших примерах на 15...20 %, что подтверждается проверками, проводимыми совместно со службами «Электросетей» г. Минска).

Таким образом, применяя полимерные греющие провода в различных теплообразующих процессах, используемых в строительстве, можно существенно снизить затраты электроэнергии, что может стать важнейшим средством энергосбережения в отраслях народного хозяйства. Однако считаем также, что следует продолжить дальнейшие исследования, направленные на уточнение и обоснование этих особенностей специалистами-энергетиками высокого уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Симамура С. Углеродистые волокна и углекомпози́ты. — М.: Мир, 1978. — 532 с.
2. Лысов В. П. Полимерный провод в греющих полах и устройствах. — Мн.: НПО «Стринко», 1999. — 152 с.

УДК 621.311

СНИЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСХОДА ЭНЕРГИИ ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПЕРЕТОКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Канд. техн. наук, доц. АЛЕКСАНДРОВ О. И., магистрант ГОРЯЧКО Д. Г.

*Белорусский национальный технический университет,
Государственное научно-производственное объединение «АГАТ»*

В условиях недостатка энергоресурсов неизменно возрастает роль режимных оптимизационных расчетов. Решение комплексной задачи оптимизации режимов энергосистем требует всестороннего и точного анализа технических и экономических вопросов, что связано с трудно-

стями как чисто математического, так и расчетно-вычислительного характера. В общем случае подготовка исходных данных для решения задач оптимизации требует значительных затрат времени, что неприемлемо для повседневных оперативных расчетов. Это заставляет пре-

небрегать рядом второстепенных зависимостей и подразделять общую эксплуатационную задачу оптимизации на ряд частных. Здесь наиболее перспективными представляются способы решения, учитывающие возможность варьирования многих величин не одновременно, а постепенно, путем последовательных приближений [1].

Как известно, потери активной мощности пропорциональны квадрату полного тока и соответственно разлагаются на алгебраическую сумму двух слагаемых [2]

$$\pi = \sum_{l=1}^m \frac{r_l}{U^2} P_l^2 + \sum_{l=1}^m \frac{r_l}{U^2} Q_l^2 = \pi_p + \pi_q, \quad l=1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где r_l – активное сопротивление ветви l ; P_l – поток активной мощности в ветви l ; Q_l – поток реактивной мощности ветви l ; U – среднее значение напряжения системы; π_p – составляющая потерь, обусловленная протеканием потоков активной мощности по ветвям сети; π_q – то же для реактивной мощности; m – количество всех ветвей исследуемой сети.

Следовательно, как видно из (1), можно независимо решать вопросы экономической загрузки элементов электроэнергетической системы (ЭЭС) перераспределяемой активной и реактивной мощностью. Поскольку генерация реактивной мощности не связана с какими-либо затратами, принимая условно активные мощности заданными и неизменными, будем считать, что потери зависят только от реактивных мощностей

$$\pi_q = f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n).$$

Распределение реактивных мощностей влияет только на режим работы электрической части энергосистемы. Для установленных агрегатов изменение их реактивной нагрузки в пределах располагаемой мощности не требует дополнительных капиталовложений. Следовательно, экономичность режима энергосистемы при распределении реактивных мощностей можно оценивать по величине суммарных потерь энергии, и задача сводится к определению таких значений нагрузок источников реактивной мощности, при которых эти потери наименьшие.

При решении задачи предполагаем введение некоторых упрощающих допущений: пренебрегаем поперечной составляющей напряжения; считаем электрическую сеть приблизительно однородной; уровни напряжения и потери рассчитываем по узловым мощностям и номинальному напряжению.

Пусть имеется электрическая сеть произвольной конфигурации, связывающая $(0, 1, 2, \dots, i, \dots, n, n+1, \dots, j, \dots, N)$ узловых пунктов. Нагрузки источников реактивной мощности, подключенные в $(1, 2, \dots, n)$ узлах, полагаем варьируемыми. Значения остальных величин, влияющих на режим работы сети (активные нагрузки источников, напряжение балансирующего узла и коэффициенты трансформации регулируемых трансформаторов), на первом этапе решения общей задачи считаются заданными. Возможности выбора оптимального режима ограничены следующими условиями:

а) варьируемые реактивные нагрузки могут изменяться в определенных пределах, обусловленных располагаемыми мощностями источников:

$$(Q_i)_d^H \leq Q_i \leq (Q_i)_d^B, \quad (2)$$

где i – текущий индекс, который проходит значения номеров пунктов с варьируемой реактивной мощностью ($i = 1, 2, \dots, n$); $(Q_i)_d^H, (Q_i)_d^B$ – соответственно нижние и верхние допустимые значения варьируемых мощностей;

б) напряжения всех узловых пунктов сети (в частном случае некоторых контрольных точек, выбранных из инженерных соображений) должны находиться в пределах, обусловленных электрической прочностью изоляции и требованиями к качеству энергоснабжения:

$$(U_s)_d^H \leq U_s \leq (U_s)_d^B, \quad (3)$$

где s – произвольный пункт сети, который проходит значения номеров всех контрольных точек;

в) в сети всегда должно соблюдаться условие баланса мощностей.

Сформулированная задача относится к задачам нелинейного программирования, которые в общем виде ставятся следующим обра-

зом. Требуется определить минимум скалярной нелинейной функции F , зависящей от ряда варьируемых величин $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ при определенных ограничивающих условиях, выраженных в виде неравенств и подразделяющихся на две группы. К первой группе относятся ограничения по величине варьируемых аргументов

$$(X_i)_d^a \leq X_i \leq (X_i)_d^b. \quad (4)$$

Ко второй группе относятся ограничения по величине некоторых (в общем случае нелинейных) функций f от тех же аргументов

$$(f_i)_d^a \leq f_i(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq (f_i)_d^b. \quad (5)$$

Задача имеет решение, если ограничивающие условия (4) и (5) являются непротиворечивыми. В поставленной задаче целевая функция суть составляющая суммарных потерь активной мощности π_q , вызванных реактивными потоками в сети. Искомые реактивные мощности $(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ соответствуют аргументам целевой функции $(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$. Ограничения по располагаемым мощностям (2) относятся к первой группе, а ограничения по уровням напряжения (3) – ко второй. Туда же относится и ограничение, вытекающее из условия баланса реактивных мощностей в сети.

В приближенной постановке задачи зависимости (3) принимаются линейными, и таким образом, сформулированная задача отвечает всем требованиям задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями в виде неравенств и квадратичной целевой функцией [3].

В матричном виде потери активной мощности, обусловленные распределением реактивных потоков в сетях энергосистем, могут быть достаточно точно определены с помощью уравнения [4]

$$\pi_q = \frac{1}{U^2} \mathbf{Q}^* \mathbf{R}_b \mathbf{Q}, \quad (6)$$

где $\mathbf{R}_b$ – диагональная матрица приведенных активных сопротивлений звеньев сети; $\mathbf{Q}$ – вектор-столбец реактивных мощностей в звеньях; * – знак транспонирования матрицы.

Матрица $\mathbf{R}_b$ считается заданной и определенной для каждого расчетного интервала. Пе-

реходя от $\mathbf{R}_b$ к $\mathbf{R}$, где $\mathbf{R} = \text{Re}[\mathbf{Z}]$ – действительная часть матрицы узловых собственных и взаимных сопротивлений электрической сети, и подставив в (6), получим

$$\pi_q = \mathbf{q}^* \mathbf{B} \mathbf{q}, \quad (7)$$

где $\mathbf{q}$ – вектор-столбец реактивных узловых мощностей; $\mathbf{B} = \frac{1}{U^2} \mathbf{R}$.

Реактивные нагрузки обозначим вектором $\mathbf{q}$, компоненты которого $q_i, i \in \overline{1, n}$, считаются неизвестными (варьируемыми), а $q_j, j \in \overline{1, m}$, – заданными (фиксированными). Задана также величина суммарной распределяемой реактивной мощности источников энергии, которая определяется из уравнения баланса с учетом прогноза нагрузок:

$$G = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{j=n+1}^N q_j + \xi, \quad i \in \overline{1, n}, \quad j \in \overline{n+1, N}, \quad (8)$$

где ξ – потери реактивной мощности.

Мощности генераторных узлов имеют двусторонние ограничения:

$$\underline{q}_i \leq q_i \leq \overline{q}_i, \quad i \in \overline{1, n}, \quad (9)$$

где $\underline{q}_i, \overline{q}_i$ – соответственно нижняя и верхняя границы мощностей генерирующих узлов. Разобьем вектор $\mathbf{q}$ на подвекторы

$$\mathbf{q}^* = [\mathbf{q}_I \mid \mathbf{q}_J]^*,$$

где $\mathbf{q}_I$ – вектор искомых мощностей (вектор источников); $\mathbf{q}_J$ – то же заданных мощностей (вектор нагрузок). Вектор $\mathbf{q}_I$ имеет размер $(n \times 1)$, а вектор $\mathbf{q}_J$ – размер $[(N - n) \times 1]$ или $(m \times 1)$.

Переходя к матричной форме, условие (9) получим в виде

$$\underline{\mathbf{q}}_I \leq \mathbf{q}_I \leq \overline{\mathbf{q}}_I, \quad (10)$$

где $\underline{\mathbf{q}}_I, \overline{\mathbf{q}}_I$ – векторы, составляющие суть которых – ограничения по нижнему и верхнему

пределам располагаемых мощностей соответственно.

Представим неравенство (10) в виде системы двух матричных неравенств:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_I \leq \overline{\mathbf{q}}_I; \\ -\mathbf{q}_I \leq \underline{\mathbf{q}}_I. \end{cases}$$

Аналогично представим равенство (8) в виде системы двух неравенств:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_I^* \mathbf{h} \leq \mathbf{G}; \\ -\mathbf{q}_I^* \mathbf{h} \leq \mathbf{G}, \end{cases}$$

где $\mathbf{h} = \text{colon } (1 \ 1 \ \dots \ 1)$ – столбцовая единичная матрица размером n .

Напряжение в узлах сети определяем как функцию нагрузок, пользуясь принципом наложения [5]:

$$\underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{U}}_0 + \mathbf{U}_n^{-1}(\mathbf{R}\mathbf{p} - \mathbf{X}\mathbf{q}), \quad (11)$$

где $\underline{\mathbf{U}}$ – вектор узловых напряжений сети; $\underline{\mathbf{U}}_0 = \mathbf{E}\mathbf{U}_0$; $\mathbf{E}$ – единичная диагональная матрица размером N ; $\mathbf{U}_0$ – напряжение балансирующего узла сети; $\mathbf{U}_n = \mathbf{E}\mathbf{U}_n$; $\mathbf{U}_n$ – номинальное (среднее) напряжение рассчитываемой схемы; $\mathbf{p}$ – вектор активных мощностей узлов; $\mathbf{X}$ – мнимая часть матрицы $\underline{\mathbf{Z}}(\mathbf{X} = \text{Im}[\underline{\mathbf{Z}}])$.

Разделив компоненты матричного уравнения на блочные субматрицы, получим уравнение (11) в виде

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_I \\ \underline{\mathbf{U}}_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_I \\ \underline{\mathbf{U}}_J \end{bmatrix}_0 + \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_I \\ \underline{\mathbf{U}}_J \end{bmatrix}_n^{-1} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{II} & \mathbf{R}_{IJ} \\ \mathbf{R}_{JI} & \mathbf{R}_{JJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_I \\ \mathbf{p}_J \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{II} & \mathbf{X}_{IJ} \\ \mathbf{X}_{JI} & \mathbf{X}_{JJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_I \\ \mathbf{q}_J \end{bmatrix} \right), \quad (12)$$

В результате умножения клеточных матриц выражение (12) разбивается на два матричных уравнения:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{U}}_I &= \underline{\mathbf{U}}_{I0} + [\underline{\mathbf{U}}_I]_n^{-1}(\mathbf{R}_{II}\mathbf{p}_I + \mathbf{R}_{IJ}\mathbf{p}_J - \mathbf{X}_{II}\mathbf{q}_I - \mathbf{X}_{IJ}\mathbf{q}_J); \\ \underline{\mathbf{U}}_J &= \underline{\mathbf{U}}_{J0} + [\underline{\mathbf{U}}_J]_n^{-1}(\mathbf{R}_{JI}\mathbf{p}_I + \mathbf{R}_{JJ}\mathbf{p}_J - \mathbf{X}_{JI}\mathbf{q}_I + \mathbf{X}_{JJ}\mathbf{q}_J). \end{aligned} \quad (13)$$

Выразив из первого уравнения системы (13) вектор $\mathbf{q}_I$, получим

$$\mathbf{q}_I = [\mathbf{X}_{II}]^{-1} \{ \underline{\mathbf{U}}_n (\underline{\mathbf{U}}_{I0} - \underline{\mathbf{U}}_I) + \mathbf{R}_{II}\mathbf{p}_I + \mathbf{R}_{IJ}\mathbf{p}_J - \mathbf{X}_{JJ}\mathbf{q}_J \}. \quad (14)$$

Для узлов с варьируемыми реактивными нагрузками формируются неравенства

$$\underline{\mathbf{U}}_I^h \leq \underline{\mathbf{U}}_I \leq \underline{\mathbf{U}}_I^b. \quad (15)$$

Представив неравенства (15) в виде двух неравенств, из (13) и (14) имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_I &\leq [\mathbf{X}_{II}]^{-1} \{ \underline{\mathbf{U}}_n (\underline{\mathbf{U}}_I^b - \underline{\mathbf{U}}_{I0}) + \mathbf{R}_{II}\mathbf{p}_I + \mathbf{R}_{IJ}\mathbf{p}_J - \mathbf{X}_{JJ}\mathbf{q}_J \}; \\ -\mathbf{q}_I &\leq [\mathbf{X}_{II}]^{-1} \{ \underline{\mathbf{U}}_n (\underline{\mathbf{U}}_{I0} - \underline{\mathbf{U}}_I^h) - \mathbf{R}_{II}\mathbf{p}_I - \mathbf{R}_{IJ}\mathbf{p}_J + \mathbf{X}_{JJ}\mathbf{q}_J \}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для сетей с невысокой степенью неоднородности при расчете напряжений в узлах можно воспользоваться более простой формулой

$$\underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{U}}_0 + [\mathbf{U}_n]_0^{-1} \mathbf{R}\mathbf{q}.$$

Разбивая последнее выражение на клеточные субматрицы, имеем

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_I \\ \underline{\mathbf{U}}_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_I \\ \underline{\mathbf{U}}_J \end{bmatrix}_0 + \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_I \\ \underline{\mathbf{U}}_J \end{bmatrix}_n^{-1} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{II} & \mathbf{R}_{IJ} \\ \mathbf{R}_{JI} & \mathbf{R}_{JJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_I \\ \mathbf{q}_J \end{bmatrix} \right),$$

после чего получим два матричных уравнения:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{U}}_I &= \underline{\mathbf{U}}_{I0} + [\underline{\mathbf{U}}_I]_n^{-1}(\mathbf{R}_{II}\mathbf{q}_I + \mathbf{R}_{IJ}\mathbf{q}_J); \\ \underline{\mathbf{U}}_J &= \underline{\mathbf{U}}_{J0} + [\underline{\mathbf{U}}_J]_n^{-1}(\mathbf{R}_{JI}\mathbf{q}_I + \mathbf{R}_{JJ}\mathbf{q}_J). \end{aligned}$$

По аналогии с (16) имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_I &\leq [\mathbf{R}_{II}]^{-1} \{ \underline{\mathbf{U}}_n (\underline{\mathbf{U}}_I^b - \underline{\mathbf{U}}_{I0}) - \mathbf{R}_{IJ}\mathbf{q}_J \}; \\ -\mathbf{q}_I &\leq [\mathbf{R}_{II}]^{-1} \{ \underline{\mathbf{U}}_n (\underline{\mathbf{U}}_{I0} - \underline{\mathbf{U}}_I^h) + \mathbf{R}_{IJ}\mathbf{q}_J \}. \end{aligned}$$

Обозначив правые части векторных неравенств (16) через $\mathbf{q}_I^b(\mathbf{U})$ и $\mathbf{q}_I^h(\mathbf{U})$, получим систему:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_I \leq \mathbf{q}_I^p(\mathbf{U}); \\ -\mathbf{q}_I \leq -\mathbf{q}_I^h(\mathbf{U}). \end{cases}$$

Обозначим:

$\mathbf{A} = \text{colon}(\mathbf{E} \quad -\mathbf{E} \quad \mathbf{h}^* \quad -\mathbf{h}^*)$ – матрица размерами $\{2(n+1) \times n\}$;

$\mathbf{W} = \text{colon}(\mathbf{D} \quad -\mathbf{C} \quad \mathbf{G} \quad -\mathbf{G})$ – вектор-столбец формируемых ограничений с $2(n+1)$ компонентами

где

$$D_i = \min \left[\max q_i', \max q_i'' \right]; \\ C_i = \min \left[\min q_i', \min q_i'' \right] \left. \vphantom{D_i} \right\}, \text{ если } \{q_i'\} \cap \{q_i''\} \neq \emptyset;$$

$$\left. \begin{aligned} D_i &= \frac{1}{2}(q_i' + q_i''); \\ -C_i &= \frac{1}{2}(-q_i' + q_i'') \end{aligned} \right\}, \text{ если } \{q_i'\} \cap \{q_i''\} = \emptyset,$$

q_i' – i -й элемент множества значений интервала $[(q_i')^h \dots (q_i')^p]$, определяемого крайними величинами ограничений (9); q_i'' – i -й элемент множества значений интервала $[(q_i'')^h \dots (q_i'')^p]$, определяемого крайними величинами ограничений (15).

Представив формулу (7) в развернутом виде, получим

$$\begin{aligned} \pi_q &= [\mathbf{q}_I \quad \mathbf{q}_J] \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{II} & \mathbf{B}_{IJ} \\ \mathbf{B}_{JI} & \mathbf{B}_{JJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_I \\ \mathbf{q}_J \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{q}_I^* \mathbf{B}_{II} \mathbf{q}_I + 2\mathbf{q}_I^* \mathbf{B}_{IJ} \mathbf{q}_J + \mathbf{q}_J^* \mathbf{B}_{JJ} \mathbf{q}_J. \end{aligned}$$

Обозначив $\mathbf{B}_{II} = \mathbf{H}$; $-\mathbf{B}_{IJ} \mathbf{q}_J = \mathbf{P}$; $\mathbf{q}_I = \mathbf{X}$, переходим от поставленной задачи квадратичного программирования в классической форме к модифицированной: требуется определить минимум квадратичной формы

$$\mathbf{C} = \frac{1}{2} \mathbf{X}^* \mathbf{H} \mathbf{X} + \mathbf{P}^* \mathbf{X} \quad (17)$$

при условиях:

$$\mathbf{A} \mathbf{X} \leq \mathbf{W}; \quad \mathbf{X} \geq \mathbf{0}. \quad (18)$$

Таким образом, если известно начальное приближение реактивных узловых мощностей, то для реализации алгоритма определим порядок выполнения операций процесса вычисления оптимального вектора $\mathbf{q}^{\text{opt}}$:

1. По данным прогнозным величинам графиков нагрузки получим оценку потерь реактивной мощности.

2. Из уравнения (8) находится суммарная распределяемая реактивная мощность источников энергии.

3. Формируется система ограничений для задачи минимизации $\pi_q(q)$ по формулам (8), (10), (15).

4. Выполняется обращение к подпрограмме минимизации квадратичной формы (17), (18) и находится оптимальный вектор $\mathbf{q}_I$, обеспечивающий минимальные потери π_q активной мощности, вызванные реактивными потоками.

5. Производится расчет установившегося режима исследуемой сети с учетом найденных значений узловых реактивных мощностей. Находятся значения потерь активной и реактивной мощностей.

Исходя из описанного выше алгоритма, был разработан программный комплекс, находящий оптимальный вектор-столбец независимых переменных $\mathbf{X}$, значения которого соответствуют компонентам вектора реактивных мощностей генерирующих источников $\mathbf{q}_I$. Комплекс состоит из ряда взаимодействующих программ, в числе которых: ядро программного комплекса; база данных; система управления базами данных; блок оптимизации режима. Ядро программного комплекса включает программу, предоставляющую пользователю интерфейс ввода/вывода информации и управления всеми задачами программного комплекса. При разработке использовались такие программные продукты, как Borland Delphi 6 и Visual Fortran 6.0. Исходные данные до их обработки, а также результаты расчетов хранятся в базе данных, созданной при помощи Microsoft Access. В работе широко использовался такой базовый компонент операционной системы, как динамически связываемая библиотека (DLL – модуль).

Для экспериментального расчета оптимального распределения реактивных нагрузок между генерирующими источниками был взят фрагмент питающей сети Белорусской объединенной энергосистемы, который представлен сетью, состоящей из 71 узла и включающей 17 линий электропередачи напряжением 330 кВ, четыре линии напряжением 220 кВ и 46 линий напряжением 110 кВ. В качестве регулируемых источников реактивной мощности были взяты турбогенераторы Лукомльской ГРЭС, Минской ТЭЦ-3, Минской ТЭЦ-4 и Минской ТЭЦ-5. Нагрузки потребителей для контрольного часа соответствуют показаниям, зафиксированным в утренний максимум (9 ч) 19 декабря 2001 г. Загрузку приведенных ниже агрегатов станций по активной мощности на первом этапе расчета считаем постоянной ($P = const$) и соответствующей данным, измеренным в это же время. Расчет оптимального режима проводился в следующей последовательности:

1. При помощи программы расчета установившегося режима «RASTR» рассчитывался установившийся режим исследуемой сети. В результате расчета было определено, что суммарные потери активной мощности составляют $\pi'_\Sigma = 29,082$ МВт.

2. При помощи программного комплекса, реализованного по описанному выше алгоритму, было найдено оптимальное распределение реактивных мощностей между синхронными машинами электростанций в режиме перевозбуждения. Распределение реактивных мощностей между генерирующими источниками до и после оптимизации представлено в табл. 1.

Таблица 1
Выдача реактивной мощности источниками до и после оптимизации

Название электростанции	Состав оборудования	Загрузка по активной мощности, МВт	Загрузка по реактивной мощности до оптимизации, Мвар	Загрузка по реактивной мощности после оптимизации, Мвар
Минская ТЭЦ-3	Тг 1,2,3, 5...8	223	120	182
Минская ТЭЦ-4	Тг 1,3	160	75	36,6
Минская ТЭЦ-4	Блок 4	250	60	205
Минская ТЭЦ-4	Блоки 5,6	515	220	157,8
Минская ТЭЦ-5	Блок 1	303	100	75,9
Лукомльская ГРЭС	Блоки 1...4	326	99,4	0,9

3. После оптимального распределения реактивных нагрузок между генерирующими источниками был вновь проведен расчет установившегося режима, определены суммарные потери активной мощности после оптимизации, которые составили $\pi''_\Sigma = 27,250$ МВт. Следовательно, в результате оптимизации достигнуто снижение суммарных потерь активной мощности в Минской ЭЭС на $\Delta\pi_\Sigma = \pi'_\Sigma - \pi''_\Sigma = 29,082 - 27,250 = 1,832$ МВт, или 6,3 % от суммарных потерь. При этом потери в сетях 330 кВ снизились на 0,659 МВт, в сетях 220 кВ – на 0,105 МВт, в сетях 110 кВ – на 0,831 МВт, а в трансформаторах – на 0,239 МВт, что представлено в табл. 2 и 3.

Таблица 2
Структурный анализ потерь активной мощности в ЭЭС до оптимизации

Потери в ЛЭП						Потери в трансформаторах		
330 кВ		220 кВ		110 кВ		МВт	% от суммарных	
МВт	% от суммарных	МВт	% от суммарных	МВт	% от суммарных			
14,055	48,33	3,095	10,64	7,491	25,76	4,441	15,27	
Суммарные потери, МВт							29,082	

Таблица 3
Структурный анализ потерь активной мощности после оптимизации

Потери в ЛЭП						Потери в трансформаторах		
330 кВ		220 кВ		110 кВ		МВт	% от суммарных	
МВт	% от суммарных	МВт	% от суммарных	МВт	% от суммарных			
13,396	49,16	2,990	10,97	6,660	24,44	4,202	15,43	
Суммарные потери, МВт							27,250	

ВЫВОДЫ

Напряжения во всех контролируемых узлах сети находились в пределах $(1,05...1,15)U_{ном}$, что, согласно рекомендациям ПУЭ, допустимо для режима максимальных нагрузок, который рассматривался при расчетах [6, 7].

4. Вычисленное новое значение суммарных потерь активной мощности π''_{Σ} подставляем в основное уравнение баланса по активной мощности программы «RASTR» и повторяем расчет, т. е. выполняем несколько итераций до получения заранее задаваемой погрешности в вычислениях невязок при балансировании режима.

5. Выполняем аналогичное балансирование режима по реактивной мощности с учетом нового значения суммарных реактивных потерь в исследуемой сети.

6. Образует внешний итерационный цикл, уточняющий компоненты вектор-столбца q_1 , т. е. производим очередное обращение к основной программе минимизации до получения заданной точности расчетов. При необходимости выполняется проверка устойчивости режима.

Следовательно, если считать режим неизменным в течение часа, то экономия электроэнергии составит $\Delta W_{\Sigma} = 1,832 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Если средний расход на выработку 1 кВт·ч. электроэнергии на электростанциях Минской энергосистемы составляет $b = 223,3 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$, то в течение часа можно сэкономить $\Delta B = \Delta W_{\Sigma} b = 1832 \cdot 0,2233 = 409,1 \text{ кг}$ условного топлива. Учитывая, что 1 т у. т. по состоянию на 2001 г. составляла 61335 бел. руб., то экономия 0,4091 т у. т. эквивалентна 25092 бел. руб./ч. Таким образом, при использовании разработанного программного комплекса можно обеспечить снижение потерь активной мощности для Минской энергосистемы в среднем на 1 МВт, что даст экономию: $\Delta B = \Delta W_{\Sigma} b \cdot 8760 = 1,0 \cdot 0,2233 \cdot 8760 = 1956 \text{ т у. т./год}$, или около \$ 7,0 млн.

1. В ходе выполнения данного исследования проведена оптимизация распределения реактивных нагрузок между генерирующими источниками. В качестве базового алгоритма для расчета использовался метод квадратичного программирования, который позволяет получить решение поставленной задачи оптимизации за конечное число шагов.

2. Для проведения расчетов на основе созданного алгоритма разработан программный комплекс по оптимизации установившегося режима работы энергосистемы. В результате расчетов достигнуто снижение суммарных потерь активной мощности в среднем на 1 МВт, что эквивалентно экономии для Минской энергосистемы около 2 тыс. т у. т./год.

3. Таким образом, применение разработанного программного комплекса позволит при помощи грамотного регулирования возбуждения синхронных машин без привлечения капитальных вложений добиться дополнительного снижения расхода топлива на выработку и передачу электроэнергии в ОЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В. А., Журавлев В. Г., Филиппова Т. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 464 с.
2. Маркович И. М. Режимы энергетических систем. – М.: Энергия, 1969. – 351 с.
3. Кюнц Г., Крелле В. Нелинейное программирование. – М.: Сов. радио, 1965. – 303 с.
4. Мельников Н. А., Солдаткина Л. А. Регулирование напряжения в электрических сетях. – М.: Энергия, 1968. – 153 с.
5. Холмский В. Г., Щербина Ю. В. Основы расчета оптимального распределения реактивных мощностей в электрических сетях с помощью ЭВМ // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1962. – № 4.
6. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 1989.