

## ОПТИМИЗАЦИЯ С УТОЧНОГО РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В ПЕРИОД РЕМОНТНОЙ КАМПАНИИ

Александров О.И. – доцент БГТУ, Минск, Беларусь  
Жуковская Т.Е. – ст. преподаватель БНТУ, Минск, Беларусь

### *Аннотация*

Разработка эффективных методов повышения экономичности текущих режимов электроэнергетической системы (ЭЭС) приобретает особую актуальность в период массовых отключений основного оборудования во время проведения ремонтной кампании. Здесь приводятся постановка задачи и описание алгоритма оптимального планирования активных мощностей электростанций (ЭС) ЭЭС в период ремонтной кампании. *Алгоритм* составлен с учетом необходимых ограничений на допустимые расходы топлива на отдельных ЭС с использованием процедур *функциональной, временной и пространственной декомпозиций*.

### *Текст доклада:*

Оптимизация выполняется по известной стратегии метода ветвей и границ, причем сам процесс нахождения оптимальных значений активных мощностей определяется на каждом уровне функциональной и режимной иерархии. Задача решается на двух уровнях иерархии: ЭС и ЭЭС – с использованием прогнозируемых величин активных и реактивных нагрузок узлов потребления, а также заданных значений предельно допустимых перетоков мощности по межсистемным связям. Для эффективного решения комплексной задачи оптимизации применяется метод пространственной декомпозиции, который позволяет снизить размерность задачи и дает приемлемое решение в условиях недостаточно определенной информации.

Метод дает возможность выполнять оперативную коррекцию оптимального режима ЭЭС при введении внеплановых искусственных ограничений, в том числе при дефиците топлива на отдельных ЭС.

*Критерий оптимизации* – суммарный расход топлива на ЭС с учетом пусковых расходов. Целевая функция минимизируется в замкнутой области, определяемой системой режимно-технических ограничений. Различные состояния агрегатов ЭС и ЭЭС характеризуются множеством кортежей с логическими переменными (0, 1 и 2), определяющими планируемые моменты включения, отключения и вывода оборудования в резерв (ремонт). Состояние возможных переходов каждой ЭС могут быть описаны в виде графа, вершины которого суть составы оборудования, а ветви – наличие самих переходов.

В *функциональном* аспекте в данной задаче выделяются две подзадачи: выбор оптимального состава включенных в работу агрегатов на электростанциях (нижний уровень иерархии) и определение оптимальных суточных графиков активных нагрузок станций (верхний уровень).

Задача выбора оптимальных составов генерирующего оборудования формулируется следующим образом:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T [B_j(i_j(t), P_j(t)) + D_j(s_j(t-1), i_j(t))] \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$S(0) = \{s_j(0) \mid j = \overline{1, n}\}; \quad (2)$$

$$(i_j(t-1), i_j(t)) = (v, \mu), \quad v \in X_j, \quad (v, \mu) \in \Gamma_j^{(v)}; \quad (3)$$

$$y_{\nu\mu}(s_j(t-1), t) = 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T};$$

$$\sum_{j=1}^n P_j(t) - P(t) - \pi(t) = 1, \quad t = \overline{1, T}; \quad (4)$$

$$P_j^{\min}(i_j(t)) \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}(i_j(t)), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\min}(i_j(t)) \leq (1-r_-)(P(t) + \pi(t)), \quad t = \overline{1, T}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\max}(i_j(t)) \geq (1-r_+)(P(t) + \pi(t)), \quad t = \overline{1, T}; \quad (7)$$

Здесь  $S(t) = \{s_j(0) \mid j = \overline{1, n}\}$ ,  $t = \overline{0, T}$ , – состояние ЭЭС, т. е. множество кортежей, характеризующих состояния агрегатов станций к  $t$ -му моменту времени;

$$S_j(t) = ((Z_j^{(1)}(t), \tau_j^{(1)}(t)), (Z_j^{(2)}(t), \tau_j^{(2)}(t)), \dots, (Z_j^{(n_j)}(t), \tau_j^{(n_j)}(t))), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{0, T}; \quad (8)$$

$Z_j^k(t)$ ,  $k = \overline{1, n_j}$ ,  $j = \overline{1, n}$ ,  $t = \overline{0, T}$  – логическая переменная, значения которой определяются как

$Z_j^k(t) = \begin{cases} 0, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени отключен в ремонт;} \\ 1, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени отключен в резерв;} \\ 2, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени включен в работу;} \end{cases}$   $\tau_j^k(t)$  – планируемый момент окончания ремонта при  $Z_j^k(t)=0$ , либо момент отключения в резерв  $\tau_j^k(t) < \theta^{(t)}$  при  $Z_j^k(t)=1$ , либо момент включения в работу  $\tau_j^k(t) < \theta^{(t)}$  при  $Z_j^k(t)=2$ ;

$$i_j(t) \in A = \{1, 2, \dots, m\}, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{0, T},$$

где  $m = \sum_{j=1}^n |x_j|$ , – номер состава включенных в работу агрегатов на  $j$ -й станции к  $i$ -му моменту;  $(X_j, \Gamma_j)$ ,  $j = \overline{1, n}$ , – граф переходов составов агрегатов на  $j$ -й станции, произвольный узел которого  $v \in X_j, X_j \in A$ , соответствует одному из возможных составов агрегатов, а ветвь  $(v, \mu) \in \Gamma_j$  указывает на возможность непосредственного перехода в фиксированный момент времени из состава  $v$  в состав  $\mu$ ;  $\Gamma_j^{(v)} \subset \Gamma_j, v \in X_j, j = \overline{1, n}$ , – множество ветвей графа  $(X_j, \Gamma_j)$ , выходящих из узла  $v$ ;  $y_{\nu\mu}, v \in X_j, \mu \in X_j, (v, \mu) \in \Gamma_j, j = \overline{1, n}$  – логическая переменная, значения которой определяется как

$$y_{\nu\mu}(s_j(t-1), t) = \begin{cases} 1, & \text{переход от состава } v \text{ к составу } \mu \text{ возможен из состояния} \\ & s_j(t-1) \text{ в момент } t \text{ возможен;} \\ 0, & \text{переход от состава } v \text{ к составу } \mu \text{ из состояния} \\ & s_j(t-1) \text{ в момент } t \text{ невозможен, } t = \overline{1, T}, \end{cases}$$

$P_j(t)$ ,  $j = \overline{1, n}$ ,  $t = \overline{1, T}$  – мощность  $j$ -й станции на  $t$ -м интервале времени, т.е. интервале  $[\theta^{(t-1)}, \theta^{(t)}]$ ;  $P_j^{\min}(t)$ ,  $P_j^{\max}(t)$ ,  $j = \overline{1, n}$ ,  $t = \overline{1, T}$ , – технический минимум нагрузки и располагаемая мощность  $j$ -й станции при составе агрегатов  $i_j(t)$ ;  $P(t)$  – суммарная активная нагрузка ЭЭС с учетом перетоков по межсистемным связям;  $\pi(t)$  – потери активной мощности в основной сети ЭЭС  $t$ -м интервале;

$D_j(s_j(t-1), i_j(t))$ ,  $j = \overline{1, n}, t = \overline{1, T}$ , – расход топлива на переход из состояния  $s_j(t-1)$  к составу  $i_j(t)$ ;  $B_j(i_j(t), P_j(t))$ ,  $j = \overline{1, n}, t = \overline{1, T}$ , – расход топлива на  $t$ -м интервале при составе  $i_j(t)$  и нагрузке  $P_j(t)$   $j$ -й станции, определяемый по соответствующей расходной характеристике  $B_j(i_j, P_j)$  как

$$B_j(i_j(t), P_j(t)) = (\theta^t - \theta^{t-1})B_j(i_j, P_j);$$

$r_+, r_-, 0 < r_- < 1, 0 < r_+ < 1$  – заданные коэффициенты резерва соответственно по техническому минимуму и располагаемой мощности ЭЭС.

Из определения (8) компонент  $s_j(t)$  состояния  $S(t)$  следует, что в случае когда составы  $i_j(t-1), i_j(t)$  удовлетворяют ограничению (3), состояние  $S(t)$  однозначно определяется состоянием  $S(t-1)$  и составом

$$i_j(t), j = \overline{1, n},$$

$$S(t) = f(S(t-1), I(t)),$$

где  $I(t) = \{i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)\}$ .

Составы  $i_j(0)$ , и множество  $S(0)$  будут известны из решения соответствующей задачи на предшествующие сутки. Графы переходов, расходные характеристики  $B_j(i_j, P_j)$ , зависимости расходов на пуск или останов агрегатов  $D_j(s_j(t-1), i_j(t))$ , логические функции  $y_{v\mu}(s_j(t-1), t)$ , функции  $P_j^{\min}(t)$ ,  $P_j^{\max}(t)$  могут быть заблаговременно определены на нижнем уровне пространственной иерархии, т.е. решением ряда оптимизационных задач для каждой станции. Величины  $P(t)$  находятся суммированием прогнозов активных нагрузок в узлах и заданных диспетчерской службой ЭЭС перетоков активной мощности по межсистемным связям.

Для согласования решений проблем смежных уровней временной иерархии используется традиционная задача краткосрочного планирования, в виде

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n B_{ij}(P_j^t) \rightarrow \min \\ & \sum_{j=1}^n P_j^t - \sum_{v=1}^l P_v^t - \pi^t(P^t, p^t), \quad t = \overline{1, T}; \\ & P_{j \min}^t \leq P_j^t \leq P_{j \max}^t, \quad t = \overline{1, T}, \quad j = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Сформулированная задача распадается на независимо решаемые подзадачи нижних уровней временной иерархии (ЭС, ПЭС, РЭС и т. д.). Интегральная оценка, полученная путем агрегирования накопленной информации, используется при решении подзадач нижнего уровня уже в цикле оперативного управления текущим режимом ЭЭС.