

КОРРЕКЦИЯ СУТОЧНОГО ГРАФИКА ОТКЛЮЧЕНИЙ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЭС ПРИ РАЗРЕШЕНИИ ОПЕРАТИВНЫХ РЕМОНТНЫХ ЗАЯВОК

Инж. БАБКЕВИЧ Г. Г.

РУП «Минскэнерго»

Инженеры ЖУКОВСКАЯ Т. Е., САЦУКЕВИЧ Е. М.

Белорусская государственная политехническая академия

В настоящее время задача оперативного планирования отключений основного оборудования электроэнергетической системы (ЭЭС) решается неформализованными методами, без систематического использования компьютерной техники, на основе существующего опыта эксплуатации, инструкций оперативно-диспетчерскому персоналу, профессиональной интуиции и опыта персонала ЦДС и других служб энергосистемы, многократного уточнения с нижестоящими звеньями условий проведения запрашиваемых ремонтов с помощью телефонной и компьютерной связи, а также эпизодических режимных и изредка надежностных расчетов. Разработка графика отключений как одна из задач оперативно-диспетчерского управления энергосистемой имеет целью оптимизировать сроки проведения ремонтов оборудования, находящегося в оперативном ведении энергосистемы, предусмотренные в месячных планах ремонтов нижестоящих звеньев структуры административно-хозяйственного управления энергосистемой (ПОЭ, ПЭС, крупные электростанции) с учетом многих факторов [1].

При составлении оперативного графика отключений основного оборудования выполняется последовательная коррекция намеченных вариантов с учетом различных критериев и ограничений. Она включает процессы перемещения сроков ремонта и обновления информационной базы данных.

После выполнения функции коррекции информационной базы лицо, принимающее решение (ЛПР), располагает сведениями о текущем состоянии схемы; сроках окончания начатых ремонтов в соответствии с разрешенными заявками; набором разрешенных заявок, работы по которым еще не начинались, с указанием сроков начала и конца ремонтов. По этой информации определяется период планирования при составлении оптимального графика отключений на заданные сутки: началом периода является первый час заданных суток, а концом – час окончания наиболее длительного ремонта среди тех, которые предусмотрены подлежащими разрешению заявками. Определяется также базовая часть графика изменений схемы электрической сети, учитывающая моменты окончания выполняемых ремонтов, а также моменты начала и конца ремонтов, предусмотренных разрешенными заявками [2].

При решении задачи составления оптимального суточного графика отключений основного оборудования размещение заявок $a_j^{(l)} \in C$ на протяжении планируемых суток $T = \overline{t_\alpha, t_\alpha + 23}$ рассматривается как управляемый дискретный многошаговый процесс, характеризующийся множества-

ми возможных состояний $\sum(t)$ в момент времени $t \in \overline{t_\alpha - 1, t_\alpha + 23}$, и множествами допустимых управляющих воздействий $U(t)$ в момент $t \in \overline{t_\alpha, t_\alpha + 23}$. При этом выполняется коррекция множества возможных управлений по условиям совместимости ремонтных схем основной сети ЭЭС [2].

Исходная информация, используемая в процессе коррекции, включает:

1) множество $\sum(t-1)$ допустимых состояний на момент времени, предшествующий рассматриваемому часу $t \in T$ планируемых суток;

2) совокупность множеств $\tilde{U}_k(t)$ возможных управлений на рассматриваемый час $t \in T$ планируемых суток для всех планируемых состояний $\delta_k(t-1) \in \sum(t-1)$;

3) хранящаяся в разделе «Ремонтные схемы основной сети на период планирования» информационной базы последовательность базовых ремонтных схем основной сети, представленная графом $(X(t), \Gamma(t))$ и списком $H(t)$ для $t = \overline{t_\alpha, t_\omega}$;

4) хранящиеся в разделе «Нормальные и ремонтные схемы объектов основной сети энергосистемы» информационной базы ремонтные схемы объектов, соответствующие заявкам $\alpha_j^{(t)} \in C$.

Рассмотрим алгоритм коррекции множества $\tilde{U}_k(t)$ для $t \in T$ на основе проверки произвольного данного управления $U_v(t) \in \tilde{U}_k(t)$ на допустимость по критерию связности ремонтных схем основной сети на перспективную часть периода планирования по отношению к рассматриваемому часу t , т. е.

$$\overline{\tau_\alpha, \tau_\omega} \subset \overline{\tau_\alpha, \tau_\omega, \tilde{\tau}_\alpha} = t. \quad (1)$$

Он представляет собой последовательность действий:

1. Формируется ремонтная схема энергосистемы, соответствующая состоянию $\delta_h(t), t = \tilde{\tau}_\alpha$, в которое переводится состояние $\delta_k(t-1)$ управлением $U_v(t)$ в виде графа $(X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(t))$, образованного включенными в работу узлами и ветвями основной сети, и списка $H^{(h)}(t)$ ветвей, которые могут включиться при срабатывании АВР. Для этого выполняются следующие операции [2]:

1.1. По известному состоянию $\delta_k(t-1)$ определяется множество $\Delta P_k(t)$ заявок, закрываемых в момент $(t-1)$, а по известному управлению $U_v(t)$ — множество заявок, открываемых в момент t .

1.2. По известному состоянию $\delta_k(t-1)$ и множествам $\Delta P_k(t), \Delta Q_v(t)$ определяется множество $Q_h(t)$ заявок, не закрытых в состоянии $\delta_h(t)$.

1.3. При условии

$$\Delta \overset{+}{B}_t := Q_h(t) \quad (2)$$

по известной базовой ремонтной схеме энергосистемы на момент t , представленной графом $(X(t), \Gamma(t))$ и списком $H(t)$, а также известным ремонтным схемам объектов основной сети, соответствующим заявкам $\alpha_j^{(t)} \in \Delta \overset{+}{B}_t$, формируются множества $\Delta \overset{+}{X}_t$, $\Delta \overset{+}{\Gamma}_t$, $\Delta \overset{+}{H}_t$ соответственно узлов и ветвей, добавляемых к графу $(X(t), \Gamma(t))$ и списку $H(t)$ вследствие открытия заявок $\alpha_j^{(t)} \in \Delta \overset{+}{B}_t$, и аналогично — множества $\Delta \overset{+}{X}_t$, $\Delta \overset{+}{\Gamma}_t$, $\Delta \overset{+}{H}_t$ элементов, исключаемых из указанных графа и списка.

1.4. Граф $(X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(t))$ и список $H^{(h)}(t)$ формируются как:

$$X^{(h)}(t) = \left(X(t) \cup \Delta \overset{+}{X}_t \right) \setminus \Delta \overset{+}{X}_t ; \quad (3)$$

$$\Gamma^{(h)}(t) = \left(\Gamma(t) \cup \Delta \overset{+}{\Gamma}_t \right) \setminus \Delta \overset{+}{\Gamma}_t ; \quad (4)$$

$$H^{(h)}(t) = \left(H(t) \cup \Delta \overset{+}{H}_t \right) \setminus \Delta \overset{+}{H}_t .$$

2. Граф $(X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(t))$ проверяется на связность по алгоритму, описанному, например, в [3]. Если он не связан, рассматриваемое управление исключается из списка $\tilde{U}_k(t)$ возможных

$$\tilde{U}_k(t) := \tilde{U}_k(t) \setminus \{U_v(t)\},$$

и, если в списке $\tilde{U}_k(t)$ еще не все управления проверены аналогичным образом, то производится переход к проверке, начиная с п. 1, очередного управления:

$$U_\mu(t) \in \tilde{U}(t) = \bigcup \tilde{U}_k(t), \mu \neq v ; \quad (5)$$

$$\delta_k(t-1) \in \sum (t-1),$$

в противном случае — переход к п. 3; если же все управления проверены — переход к очередному блоку алгоритма составления оптимального графика отключений.

3. Определяются начальный момент времени $\tilde{\tau}_\alpha$ перспективной части периода планирования для рассматриваемого момента времени t , соответ-

ствующие моменту $\tilde{\tau}_\alpha$ состояние $\delta_h(\tilde{\tau}_\alpha)$, граф $(X^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha), \Gamma^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha))$ и список $H^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha)$ при состоянии $\delta_h(\tilde{\tau}_\alpha)$ соответственно:

$$\tilde{\tau}_2 := t;$$

$$\delta_h(\tilde{\tau}_\alpha) := \delta_h(t);$$

$$X^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha) := X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha) := \Gamma^{(h)}(t);$$

$$\tilde{H}^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha) := H^{(h)}(t).$$

4. Определяется наиболее поздний из моментов закрытия заявок $\alpha_j^{(\ell)} \in \theta_h(\tilde{\tau}_\alpha)$, открытых в состоянии $\delta_h(\tilde{\tau}_\alpha)$:

$$\tilde{\tau}_\omega := \tilde{\tau}_\alpha + \max \theta_j^{(\ell)} - 1 \leq \tau_\omega;$$

$$\alpha_j^{(\ell)} \in \theta_h(\tilde{\tau}_\alpha).$$

5. Производится проверка на связность последовательности ремонтных схем, представленных графами $(X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(t))$ при $t = \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$, которые имели бы место при состоянии $\delta_h(\tilde{\tau}_\alpha)$ и управлениях $U(t) = \emptyset$ для всех $t = \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$. Для этого необходимо:

5.1. Для очередного $t \in \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$ определяется множество $\Delta P_h(t) \subset Q_h(\tilde{\tau}_\alpha)$ заявок, запрашиваемых в момент $(t-1)$:

$$\Delta P_h(t) = \{ \alpha_j^{(\ell)} \mid \alpha_j^{(\ell)} \in Q_h(\tilde{\tau}_\alpha), t_j^{(\ell)} + \theta_j^{(\ell)} - 1 = t - 1 \}.$$

5.2. Для заданного $t \in \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$ определяется множество $R_h(t)$ заявок, закрытых в течение периода $\overline{\tilde{\tau}_\alpha, t-1}$:

$$R_h(t) = \bigcup_{r=\tilde{\tau}_\alpha+1}^t \Delta P_h(r).$$

5.3. Для заданного $t \in \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$ определяется множество $Q_h(t)$ заявок, не закрытых в момент t :

$$Q_h(t) = Q_h(\tilde{\tau}_\alpha) \setminus R_h(t).$$

5.4. Для данного $t \in \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$ при условии (2) формируются множества $\Delta X_i^{+(1)}$, $\Delta \Gamma_i^{+(1)}$ соответственно узлов и ветвей, добавляемых к графу $(X(t), \Gamma(t))$ базовой ремонтной схемы основной сети вследствие открытия заявок $\alpha_j^{(1)} \in \Delta B_i^+$, и аналогично — множества $\Delta X_i^{+(2)}$, $\Delta \Gamma_i^{+(2)}$ элементов, исключаемых из указанного графа.

5.5. Для данного $t \in \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$ образуется граф $(X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(t))$ ремонтной схемы в соответствии с (3) и (4).

5.6. Граф $(X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(t))$ проверяется на связность по алгоритму, описанному в [3]. Если он не связан, то управление $U_\nu(t)$ при $t = \tilde{\tau}_\alpha$ исключается из соответствующего списка $\tilde{U}_k(t)$ и, если в списке $\tilde{U}_k(t)$ еще не все управления проверены аналогичным образом, то производится переход к проверке, начиная с п. 1, очередного управления, удовлетворяющего (5), в противном случае — переход к п. 5.7; если же все управления проверены — переход к следующему блоку алгоритма составления оптимального графика отключений.

5.7. Текущее значение $t \in \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$ увеличивается на 1 и проводится проверка условия $t \leq \tilde{\tau}_\omega$. Если оно выполняется, то производится переход к п. 5.1, в противном случае — к п. 6.

6. Восстанавливается значение момента времени, к которому относятся все описание работы данного блока алгоритма $t := \tilde{\tau}_\alpha$, запоминаются состояние $\delta_h(t)$, соответствующее управление $U_\nu(t)$: граф $(X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(t))$ и список $H^{(h)}(t)$, соответствующие состоянию $\delta_h(t)$, т. е.

$$\delta_h(t) := \delta_h(\tilde{\tau}_\alpha);$$

$$X^{(h)}(t) := X^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha); \quad \Gamma^{(h)}(t) := \Gamma^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha);$$

$$H^{(h)}(t) := H^{(h)}(\tilde{\tau}_\alpha),$$

и, если не все управления проверены аналогичным образом, то производится переход к проверке очередного управления, удовлетворяющего (5). Если же все управления проверены — переход к очередному блоку алгоритма составления оптимального графика отключений.

Исходная информация для работы блока коррекции множества возможных управлений по условиям надежности включает:

- 1) множество $\Sigma(t-1)$;
- 2) совокупность множеств $\tilde{U}_k(t)$, соответствующих $\delta_k(t-1) \in \Sigma(t-1)$, скорректированных в результате исполнения предыдущего блока;
- 3) множество $\tilde{\Sigma}(t)$ возможных состояний на момент $t \in T$, полученных в результате исполнения предыдущего блока, причем для каждого со-

стояния $\delta_h(t) \in \tilde{\Sigma}(t)$ известно $\delta_k(t-1) \in \Sigma(t-1)$ и управление $U_v(t) \in \tilde{U}_k(t)$, образующие $\delta_h(t)$:

$$\Sigma(t) = \left\{ \delta_h(t) \mid \delta_h(t) = f(\delta_k(t-1), U_v(t)); \right. \\ \left. \delta_k(t-1) \in \Sigma(t-1), U_v(t) \in \tilde{U}_k(t) \right\},$$

где $f(\delta_k(t-1), U_v(t))$ — функции, заданные алгоритмом перевода состояния $\delta_k(t-1)$ под действием управления $U_v(t)$ в состояние $\delta_h(t)$;

4) множество ремонтных схем основной сети энергосистемы, соответствующих состоянию $\delta_h(t) \in \tilde{\Sigma}(t)$, каждая из которых представлена графом $(X^{(h)}(t), \Gamma^{(h)}(t))$ и списком $H^{(h)}(t)$, сформированным и заполненным предыдущим блоком;

5) множество L узлов основной сети, требующих двустороннего питания, хранящееся в соответствующем разделе информационной базы.

Рассмотрим алгоритм коррекции множества $\tilde{U}_k(t)$ для $t \in T$ на основе проверки произвольного данного управления $U_v(t) \in \tilde{U}_k(t)$ на допустимость по критерию двустороннего питания у множества узлов L в ремонтных схемах основной сети на перспективную часть (1) периода планирования. Он представляет собой последовательность действий:

1) для состояния

$$\delta_h(t) = f(\delta_k(t-1); U_v(t)) \in \tilde{\Sigma}(t), t = \tilde{t}_\alpha, \quad (6)$$

формируется граф $(\tilde{X}^{(h)}(t), \tilde{\Gamma}^{(h)}(t))$ ремонтной схемы, в которой выключатели, находящиеся под действием АВР, условно рассматриваются как включенные:

$$\tilde{X}^{(h)}(t) = X^{(h)}(t), \tilde{\Gamma}^{(h)}(t) = \Gamma^{(h)}(t) \cup H^{(h)}(t);$$

2) граф $(\tilde{X}^{(h)}(t), \tilde{\Gamma}^{(h)}(t))$ проверяется на наличие двустороннего питания у множества узлов по алгоритму, описанному, например, в [3]. Если наличие двустороннего питания у всех узлов из указанного множества не обеспечено, то рассматриваемое управление $U_v(t)$ исключается из списка $\tilde{U}_k(t)$ возможных управлений и производится переход к аналогичной проверке, начиная с п. 1 очередного управления $U_p(t)$, удовлетворяющего условию (5). В противном случае — переход к п. 3;

3–4) совпадают соответственно с п. 3, 4 предыдущего алгоритма;

5) производится проверка на наличие двустороннего питания у множества узлов L последовательности ремонтных схем, представленных графами $(\tilde{X}^{(h)}(t), \tilde{\Gamma}^{(h)}(t))$ при $t = \overline{\tilde{t}_\alpha + 1}, \overline{\tilde{t}_\omega}$, которые имели бы место при со-

стоянии $\delta_h(\tilde{\tau}_\alpha)$ и управлениях $U(t) = \emptyset$ для всех $t = \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$ при условии, что выключатели, находящиеся под действием АВР, считаются включенными. Для этого выполняются п. 5.1–5.5:

5.1–5.5) совпадают соответственно с п. 5.1–5.5 предыдущего алгоритма;

5.6) для данного $t \in \overline{\tilde{\tau}_\alpha + 1, \tilde{\tau}_\omega}$ образуется граф $(\tilde{X}^{(h)}(t), \tilde{\Gamma}^{(h)}(t))$ в соответствии с (6), где $H^{(h)}(t)$ определяется по (5), а $\Delta N_i^{+(1)}, \Delta N_i^{+(2)}$ находятся по $\Delta V_i^+, \Delta X_i^{+(1)}, \Delta \Gamma_i^{+(1)}, \Delta X_i^{+(2)}, \Delta \Gamma_i^{+(2)}$ [2];

5.7) граф $(\tilde{X}^{(h)}(t), \tilde{\Gamma}^{(h)}(t))$ проверяется на наличие двустороннего питания у множества узлов L . Если наличие двустороннего питания у всех узлов из указанного множества обеспечивается, то конец работы алгоритма, если нет — управление $U_v(t)$ при $t = \tilde{\tau}_\alpha$ исключается из соответствующего списка $\tilde{U}_k(t)$ и производится переход к аналогичной проверке, начиная с п. 1, очередного управления, удовлетворяющего (5), в противном случае — переход к п. 5.8;

5.8) совпадает с п. 5.7 алгоритма, описанного в предыдущем блоке;

6) совпадает с п. 6 алгоритма, описанного в предыдущем блоке.

ВЫВОДЫ

1. Составлен алгоритм разрешения заявок, не связанных с возможными ограничениями потребителей. Для каждой ремонтной стратегии, ведущей к недоотпуску электроэнергии, выявлена необходимость совмещения отдельных ремонтов и соответствующая коррекция раздела информационной базы «Журнал заявок, подлежащих разрешению».

2. Разработан алгоритм формирования множества возможных управлений при известном множестве допустимых состояний оборудования энергосистемы на предыдущий час.

3. Составлены алгоритмы коррекции множества возможных управлений с учетом топологических ограничений и возможных решений об отключении тех или иных электросетевых элементов, которые обеспечены заявкой на отключение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурский С. К., Александров О. И., Домников С. В. Математическое моделирование процессов принятия решений по оперативным заявкам на ремонт основного оборудования ЭЭС // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). — 1985. — № 12. — С. 13 — 18.

2. Определение недоотпуска электроэнергии при оперативном планировании ремонтных отключений в электроэнергетической системе / О. И. Александров, С. В. Домников, Г. В. Згаевская, Т. Е. Жуковская // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 2001. — № 3. — С. 3–15.

3. Учет режимно-топологических ограничений при оценке вариантов проектируемой электрической сети / О. И. Александров, С. В. Домников, Баро Бандия и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). — 1991. — № 5. — С. 27–35.

Представлена кафедрой
электротехники и электроники

Поступила 15.10.2001