ЛИТЕРАТУРА

1. Моеров М.В., Литвак Б.Л. Оптимизация систем многосвязного управления. – М.: Наука, 1972. – 344 с. 2. А. с. 1174902 СССР, G 05 B 5/00. Адаптивная система управления. 3. Birnstiel H. Zur Projektierung von Mehrgrößenregelungen bei geringer und besser Streckenkentnis // Messen–Steuern–Regeln. – (21) 1978. – N. 4. – S. 209–214. 4. Литвинец В.И. К вопросу синтеза многосвязных систем автоматического регулирования // Изв. вузов. Энергетика. – 1981. – № 5. – С. 114–115. 5. А. с. 1224503 СССР, G 05 B 5/00. Автоматическая система регулирования температуры пара котлоагрегата.

УДК 621.311.1

Г.П. СБРОДОВ

УПРАВЛЯЕМОСТЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Под управлением электропотреблением понимается совокупность организационно-технических мероприятий, направленная на принудительное ограничение потребителей по мощности и энергии. Целесообразно выяснить, управляемо ли электропотребление в буквальном смысле, т. е. может ли оно рассматриваться как объект управления, перемещаемый по заданной траектории под воздействием управляющего устройства.

Процессы производства и потребления электроэнергии совпадают во времени, но разобщены в пространстве (географически и агрегатно). Поэтому целесообразно ввести три пространства (множества) – временнóе, географическое и агрегатное. Технологический расход электроэнергии на ее производство, передачу и распределение не учитывается.

Под временны́м пространством понимается двухмерный континуум, одна из осей которого является осью времени, а другая – осью активных нагрузок. Таким образом, временнóе пространство совпадает с плоскостью графика электропотребления или генерирования электроэнергии.

В работе [1] показано, что на продолжительных интервалах времени $(0, T)$ графики нагрузок $P(t), 0 \leqslant t \leqslant T$, могут отождествляться с дифференциальным законом распределения электропотребления во времени, т. е.

$$P(t) = \frac{dW(t)}{dt}, \quad 0 \leqslant t \leqslant T. \tag{1}$$

Интегрирование этого уравнения приводит к интегральному закону распределения электропотребления во времени

$$W(t) = \int_0^t P(t)\,dt, \quad 0 \leqslant t \leqslant T.$$

Таким образом $W(t)$ тождественно электроэнергии, потребленной на интервале $(0, t)$ с переменным верхним пределом t, $0 \leqslant t \leqslant T$.

Поскольку никаких ограничений на T не накладывается (вплоть до $T \to \infty$), то условие нормировки плотности электропотребления во времени может быть записано в виде

$$W = \int_0^T P(t)\,dt = 1. \qquad (2)$$

Но условие (2) соблюдается лишь при нормировке $W(t)$ по W. Так как нормировка "в точке" смысла не имеет, то, переходя в уравнении (1) к конечным приращениям, получим

$$p(\Delta t_i) = \frac{\Delta W_i^{п}}{W_T^{п} \Delta t_i}, \quad W_T^{п} = \sum_{i=1}^{n} \Delta W_i^{п}, \quad \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = T, \; i = \overline{1, n},$$

где $p(\Delta t_i)$ – плотность электропотребления во времени; $\Delta W_i^{п}$ – электроэнергия, потребленная за i-й шаг дискретизации Δt_i оси времени; $W_T^{п}$ – электроэнергия, потребленная на интервале времени $(0, T)$.

При равномерной дискретизации оси времени шаг дискретизации Δt_i можно считать единичным: $\Delta t_1 = \Delta t_2 = ... = \Delta t_i = ... = \Delta t_n = 1$. Тогда вместо $p(\Delta t_i)$ можно ввести переменную

$$x_i^{п} = \frac{\Delta W_i^{п}}{W_T^{п}}, \quad i = \overline{1, n}, \; 0 \leqslant x_i^{п} \leqslant 1, \quad \sum_{i=1}^{n} x_i^{п} = 1, \qquad (3)$$

имеющую смысл доли суммарного потребления электроэнергии, приходящейся на i-й шаг дискретизации.

Из соотношений (3) видно, что значение $x_i^{п}$ может быть истолковано как вероятность потребления электроэнергии на данном шаге дискретизации. Поэтому ничто не препятствует считать последовательность этих переменных некоторым конечным распределением вероятностей $X^{п} = (x_1^{п}, x_2^{п}, ..., x_i^{п}, ..., x_n^{п})$ и дать численную оценку энтропии этого распределения $H(X^{п}) = -\sum_{i=1}^{n} x_i^{п} \log_2 x_i^{п}$, $i = \overline{1, n}$.

Абсолютное значение энтропии $H(X^{п})$ пропорционально равномерности графика электропотребления и для графика, нивелированного на уровне "среднее за период" $\overline{P} = T^{-1} \int_0^T P(t)\,dt$, $0 \leqslant t \leqslant T$, достигает своего максимального значения $H(X^{п}) = \log_2 n = \max$.

Аналогичные рассуждения для графика генерирования электроэнергии приводят к соотношениям:

$$x_i^{г} = \frac{\Delta W_i^{г}}{W_T^{г}}; \quad i = \overline{1, n}; \quad 0 \leqslant x_i^{г} \leqslant 1; \quad \sum_{i=1}^{n} x_i^{г} = 1,$$

$$X^{г} = \left\{ x_1^{г}, x_2^{г}, ..., x_i^{г}, ..., x_n^{г} \right\},$$

$$H(X^{г}) = -\sum_{i=1}^{n} x_i^{г} \log_2 x_i^{г}, \quad i = \overline{1, n},$$

где $x_i^{г}$ — вероятность генерирования электроэнергии на данном шаге дискретизации; $\Delta W_i^{г}$ — электроэнергия, генерированная за i-й шаг дискретизации Δt_i оси времени; $W_T^{г}$ — электроэнергия, генерированная на интервале времени $(0,\ T)$; $X^{г}$ — распределение вероятностей генерирования электроэнергии по временно́й оси; $H(X^{г})$ — энтропия распределения вероятностей $X^{г}$.

Из условий баланса генерирования и потребления электроэнергии следует, что

$$-\sum_{i=1}^{n} x_i^{п} \log_2 x_i^{п} = -\sum_{i=1}^{n} x_i^{г} \log_2 x_i^{г}, \quad i = \overline{1,n}.$$

Известно [2], что разнообразие состояний произвольной системы может быть ограничено введением в нее некоторого дополнительного разнообразия. В технических системах это достигается добавлением элемента, выполняющего роль ограничителя (фильтра) разнообразия.

По современным представлениям в системе "производство электроэнергии — потребление электроэнергии" в качестве фильтров разнообразия состояний могут использоваться только буферные накопители электрической энергии (емкостные или индуктивные, линейные или шунтовые). В отсутствие таких накопителей управление электропотреблением со стороны энергосистемы сводится к принудительным ограничениям потребителей по мощности и энергии и тем самым не может рассматриваться как управление в буквальном смысле.

Под географическим пространством понимается двухмерный континуум площадью S, имитирующий территорию энергорайона и состоящий из попарно непересекающихся площадок ΔS_j, $j = \overline{1,m}$, имитирующих территории предприятий электрических сетей (ПЭС).

Таким образом,

$$\bigcup_{j=1}^{m} \Delta S_j = S, \quad \bigcap_{j=1}^{m} \Delta S_j = \varnothing, \quad j = \overline{1,m}.$$

Площадке ΔS_j, $j = \overline{1,m}$, можно поставить в соответствие плотность нагрузки $\Delta p_j^{п}$, $j = \overline{1,m}$, и плотность генерирующей мощности $\Delta p_j^{г}$, $j = \overline{1,m}$. Не имеет значения, что для некоторых (возможно, многих) площадок ΔS_j, $j = \overline{1,m}$, переменная $\Delta p_j^{г} = 0$.

Нормируя плотность нагрузки $\Delta p_j^{п}$, $j = \overline{1,m}$, по установленной мощности потребителей на всей территории S ($P_S^{п} = \sum_{j=1}^{m} \Delta p_j^{п}$, $j = \overline{1,m}$), а плотность генерирующей мощности $\Delta p_j^{г}$, $j = \overline{1,m}$, по установленной мощности генераторов на этой же территории ($P_S^{г} = \sum_{j=1}^{m} \Delta p_j^{г}$, $j = \overline{1,m}$), получим

$$y_j^{п} = \frac{\Delta p_j^{п}}{P_S^{п}}, \quad j = \overline{1,m}, \quad 0 \leqslant y_j^{п} \leqslant 1, \quad \sum_{j=1}^{m} y_j^{п} = 1; \tag{4}$$

$$y_j^{\text{г}} = \frac{\Delta p_j^{\text{г}}}{P_S^{\text{г}}}, \quad j = \overline{1,m}, \quad 0 \leqslant y_j^{\text{г}} \leqslant 1, \quad \sum_{j=1}^{m} y_j^{\text{г}} = 1. \tag{5}$$

Переменная $y_j^{\text{п}}, j = \overline{1,m}$, имеет смысл доли суммарной мощности потребителей $P_S^{\text{п}}$, приходящейся на j-ю площадку $\Delta S_j, j = \overline{1,m}$, а $y_j^{\text{г}}, j = \overline{1,m}$, – доли суммарной генерирующей мощности $P_S^{\text{г}}$, приходящейся на эту же площадку.

Соотношения (4) и (5) позволяют истолковать значения переменных как вероятности принадлежности мощностей потребителей $(y_j^{\text{п}}, j = \overline{1,m})$ и генераторов $(y_j^{\text{г}}, j = \overline{1,m})$ площадке ΔS_j, $j = \overline{1,m}$. Такое толкование в свою очередь позволяет считать последовательность $y_j^{\text{п}}$, $j = \overline{1,m}$, и $y_j^{\text{г}}$, $j = \overline{1,m}$, некоторыми конечными распределениями вероятностей

$$Y^{\text{п}} = (y_1^{\text{п}}, y_2^{\text{п}}, \ldots, y_j^{\text{п}}, \ldots, y_m^{\text{п}});$$

$$Y^{\text{г}} = (y_1^{\text{г}}, y_2^{\text{г}}, \ldots, y_j^{\text{г}}, \ldots, y_m^{\text{г}})$$

и дать численные оценки энтропии этих распределений:

$$H(Y^{\text{п}}) = -\sum_{j=1}^{m} y_j^{\text{п}} \log_2 y_j^{\text{п}}, \quad j = \overline{1,m},$$

$$H(Y^{\text{г}}) = -\sum_{j=1}^{m} y_j^{\text{г}} \log_2 y_j^{\text{г}}, \quad j = \overline{1,m}. \tag{6}$$

Централизация производства электрической энергии намного превышает централизацию ее потребления. Поэтому в уравнении (6) бóльшинство слагаемых будет равно нулю. Действительно, поскольку $y_j^{\text{г}} \geqslant 0, j = \overline{1,m}$, то $y_j^{\text{г}} \to 0+$ и $\lim_j^{\text{г}} \log_2 y_j^{\text{г}} = 0$. Кроме того, для тех ΔS_j, $j = \overline{1,m}$, для которых $y_j^{\text{г}} \neq \neq 0$, имеет место неравенство $y_j^{\text{г}} \gg y_j^{\text{п}}$, $j = \overline{1,m}$. Это приводит к тому, что

$$H(Y^{\text{п}}) \gg H(Y^{\text{г}}).$$

Условие необходимого разнообразия для географического пространства примет вид

$$-\sum_{j=1}^{m} y_j^{\text{п}} \log_2 y_j^{\text{п}} \gg -\sum_{j=1}^{m} y_j^{\text{г}} \log_2 y_j^{\text{г}}, \quad j = \overline{1,m}. \tag{7}$$

Смысл уравнения (7) в том, что на фиксированной территории генерирующие мощности распределены гораздо неравномернее мощностей потребителей. Изменить знак неравенства в уравнении (7) на обратный можно лишь путем увеличения избыточности энергосистемы по мощности. Только в этом случае электропотребление станет управляемым в буквальном смысле. Но в избыточной энергосистеме (без учета обязательств по поставкам энергии за ее пределы) необходимость управления электропотреблением отпадает.

Под агрегатным пространством понимается совокупность двух множеств – множества потребляющих агрегатов и множества генераторов электростанций.

Исходные равенства будут иметь вид

$$P^{\text{п}}_{l_1} = \sum_{k_1=1}^{l_1} \Delta p^{\text{п}}_{k_1}, \quad P^{\text{г}}_{l_2} = \sum_{k_2=1}^{l_2} \Delta p^{\text{г}}_{k_2}, \quad P^{\text{п}}_{l_1} = p^{\text{г}}_{l_2},$$

где $P^{\text{п}}_{l_1}$ – суммарная мощность потребляющих агрегатов; $\Delta p^{\text{п}}_{k_1}$, $k_1 = \overline{1, l_1}$ – мощность k_1-го потребляющего агрегата; $P^{\text{г}}_{l_2}$ – суммарная мощность генерирующих агрегатов; $\Delta p^{\text{г}}_{k_2}$, $k_2 = \overline{1, l_2}$ – мощность k_2-го генерирующего агрегата.

Нормируя единичные мощности агрегатов по их суммарной мощности, получим относительные переменные:

$$z^{\text{п}}_{k_1} = \frac{\Delta p^{\text{п}}_{k_1}}{P^{\text{п}}_{l_1}}, \quad k_1 = \overline{1, l_1}, \quad 0 \leqslant z^{\text{п}}_{k_1} \leqslant 1, \quad \sum_{k_1=1}^{l_1} z^{\text{п}}_{k_1} = 1,$$

$$z^{\text{г}}_{k_2} = \frac{\Delta p^{\text{г}}_{k_2}}{P^{\text{г}}_{l_2}}, \quad k_2 = \overline{1, l_2}, \quad 0 \leqslant z^{\text{г}}_{k_2} \leqslant 1, \quad \sum_{k_2=1}^{l_2} z^{\text{г}}_{k_2} = 1.$$

Переменные $z^{\text{п}}_{k_1}$, $k_1 = \overline{1, l_1}$, и $z^{\text{г}}_{k_2}$, $k_2 = \overline{1, l_2}$, имеют смысл долей соответствующих суммарных мощностей $P^{\text{п}}_{l_1}$ и $P^{\text{г}}_{l_2}$, заключенных в конкретных k_1-м и k_2-м агрегатах и могут быть истолкованы как вероятности концентрации мощности в этих агрегатах. Тогда можно считать последовательности этих переменных некоторыми конечными распределениями вероятностей

$$Z^{\text{п}} = (z^{\text{п}}_1, z^{\text{п}}_2, \ldots, z^{\text{п}}_{k_1}, \ldots, z^{\text{п}}_{l_1}),$$

$$z^{\text{г}} = (z^{\text{г}}_1, z^{\text{г}}_2, \ldots, z^{\text{г}}_{k_2}, \ldots, z^{\text{г}}_{l_2})$$

и дать численные оценки энтропии этих распределений

$$H(Z^{\text{п}}) = -\sum_{k_1=1}^{l_1} z^{\text{п}}_{k_1} \log_2 z^{\text{п}}_{k_1}, \quad k_1 = \overline{1, l_1},$$

$$H(Z^{\text{г}}) = -\sum_{k_2=1}^{l_2} z^{\text{г}}_{k_2} \log_2 z^{\text{г}}_{k_2}, \quad k_2 = \overline{1, l_2}.$$

Условие необходимого разнообразия для агрегатного пространства примет вид

$$- \sum_{k_1=1}^{l_1} z^{\text{п}}_{k_1} \log_2 z^{\text{п}}_{k_1} \geqslant - \sum_{k_2=1}^{l_2} z^{\text{г}}_{k_2} \log_2 z^{\text{г}}_{k_2}, \; k_1 = \overline{1, l_1}, \; k_2 = \overline{1, l_2}, \tag{8}$$

потому, что $z^{\text{п}}_{k_1} < z^{\text{г}}_{k_2}$, а $l_1 \geqslant l_2$.

Смысл неравенства (8) в том, что агрегатное разнообразие электроустановок потребителей значительно превышает агрегатное разнообразие генераторов энергосистемы. Изменить знак неравенства на обратный здесь невозможно.

Знак равенства достижим только при условиях

$$l_1 = l_2 = l, \; k_1 = k_2 = k, \; z^{\text{п}}_k = z^{\text{г}}_k, \forall k \in (1, l),$$

которые выполняются при изоморфизме множеств потребляющих и генерирующих агрегатов, т. е. при совпадении источника и потребителя электроэнергии в одном агрегате.

ЛИТЕРАТУРА

1. D a l c h a u J. Ein einfaches Verfahren zur Auswertung von Registrierstreifen // Elektrotechnische Zeitschrift. – 1933. – N 11. – P. 24–29. 2. Э ш б и У.Р. Введение в кибернетику. – М.: Изд-во иностр. лит.,1959. – 432 с.

УДК 621:311

Е.Н. СЕНЧУК

ПЛАНИРОВАНИЕ ЛИМИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ НЕОДНОВРЕМЕННОСТИ МАКСИМУМОВ НАГРУЗКИ

Одной из задач текущего управления потреблением электроэнергии является планирование разрешенного лимита мощности промышленных предприятий в момент максимума нагрузки энергосистемы.

В настоящее время планирование осуществляется путем расчета совмещенного максимума энергосистемы [1], т. е. считается, что значения максимальной мощности $P_{\max}$ всех потребителей совпадают во времени. В действительности же происходит некоторое несовпадение максимумов отдельных предприятий. За счет этого энергосистема располагает некоторым резервом мощности, который из-за несовершенства существующего метода планирования не используется потребителем.

Таким образом происходит чрезмерное ограничение лимитируемых промышленных предприятий, что приводит к нарушению нормального ритма работы потребителей и потере денежных средств энергосистемой. Указанный недостаток текущего управления можно устранить путем использования в алгоритме планирования разрешенного лимита мощности коэффициента (α_{it}),