

## ВЫБОР АБОНЕНТОВ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСОМ ФАЗ

Яр-Мухамедов И. Г.

*Институт машиноведения и автоматике академии наук Кыргызской Республики,  
Бишкек, Кыргызстан, aldar@email.su*

**Аннотация.** Излагается метод анализа распределительной электросети или ее фрагмента для целей оптимального размещения переключателей фазных токов, предназначенных для оперативного устранения дисбалансов фазных нагрузок распределительной сети. Анализ включает этап выбора фазной линии и этап выбора абонентов.

**Ключевые слова:** энергоресурсы, баланс фаз, информационные системы, кибернетика предприятия.

**Abstract.** A method for analyzing the distribution network or its fragment is outlined for the purpose of optimal placement of phase current switches intended for prompt elimination of imbalances in the phase loads of the distribution network. The analysis includes a phase line selection stage and a subscriber selection stage.

**Key words:** energy resources, phase balance, information systems, enterprise cybernetics.

Рост потребности в энергоресурсах, с одной стороны, и их ограниченность, с другой, обуславливают необходимость их рационального преобразования, доставки и использования [1; 2]. В настоящее время процессы автоматизации энергосистем достигли низового и самого массового звена – низковольтных распределительных электросетей [3; 4]. Здесь кроются немалые резервы повышения эффективности энергосистем [2]. Мы рассмотрим одну из задач, связанных с автоматизацией оперативного управления распределительными сетями с целью обеспечения баланса фазных нагрузок.

Объектом анализа является фрагмент трехфазной четырехпроводной распределительной электросети (РЭС) напряжением 0,4 кВ, либо сеть в целом. Предполагается, что фрагмент может рассматриваться как включающий сравнительно однородных потребителей с точки зрения выбора мест подключения коммутаторов фазных токов (КФТ) [3]. Анализ базируется на данных о потребляемой энергии, собираемых автоматизированной системой коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) [4] за некоторый ретроспективный период времени.

*Обозначения.*

$n$  – количество потребителей энергии (абонентов) во фрагменте сети;

$i$  – индекс абонента;

$t$  – индекс времени, который может изменяться от 1 до  $T$ ;

$p, q$  – индекс фазного проводника;

$W_i^t$  – мощность нагрузок абонента  $i$  в момент или период времени  $t$  (вместо мощности может рассматриваться другая физическая величина, если она лучше подходит для решения данной задачи);

$W_{ip}^t$  – мощность нагрузок абонента  $i$ , подключенных к фазе  $p$  в момент или период времени  $t$ ;

$X_{ip}$  – логическая переменная, единичное значение которой показывает, что абонент с индексом  $i$  подключен к фазной линии  $p$ ;

$D^t, d^t$  – критические значения дисбалансов фазных токов.

*Модель фрагмента РЭС представлена следующими соотношениями.*

Каждый из абонентов обязательно подключен и только к одной из фазных линий (нормативно-справочная информация АСКУЭ):

$$\sum_{p=1}^3 X_{ip} = 1, \quad i = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$W_{ip}^t = W_i^t X_{ip}, \quad t = \overline{1, T}, \quad i = \overline{1, n}, \quad p = \overline{1, 3}. \quad (2)$$

Мощности, потребляемые по каждой из фазных линий, могут быть определены как суммы мощностей, потребляемых абонентами, по формуле:

$$W_p^t = \sum_{i=1}^n W_i^t X_{ip}, \quad p = \overline{1, 3}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (3)$$

Средняя мощность, потребляемая в каждый момент или период времени:

$$\overline{W}^t = \sum_{p=1}^3 W_p^t / 3. \quad (4)$$

Один из вариантов расчета дисбаланса может быть таким:

$$D_{p,q}^t = \max_{p=1}^3 W_p^t - \min_{q=1}^3 W_q^t. \quad (5)$$

Другой возможный вариант расчета показателя дисбаланса относительно средней мощности может быть предпочтительным в ряде случаев:

$$d_{ip}^t = W_{ip}^t - \overline{W}^t. \quad (6)$$

Для фазной линии в целом выражение примет вид:

$$d_p^t = \sum_{i \in I_p} d_{ip}^t, \quad t = \overline{1, T}, \quad p = \overline{1, 3}, \quad (7)$$

где:  $I_p = \{ i: X_{ip} = 1, \quad i = \overline{1, n} \}, \quad p = \overline{1, 3}$ .

Опишем область определения задачи:

$$D_{p,q}^t \leq D^t, \quad t = \overline{1, T}. \quad (8)$$

Если ограничения должны быть линейными, область определения задается как:

$$W_p^t - W_q^t \leq D^t, \quad t = \overline{1, T}, \quad p = \overline{1, 3}, \quad q = \overline{1, 3}, \quad p \neq q. \quad (9)$$

Другой вариант системы линейных ограничений может быть таким:

$$d_p^t \leq d^t, \quad t = \overline{1, T}, \quad p = \overline{1, 3}. \quad (10)$$

Определим три множества индексов моментов времени или временных периодов, для которых наблюдалось нарушение балансовых соотношений:

$$T_p = \{t: d_p^t > d^t, \quad t = \overline{1, T}\}, \quad p = \overline{1, 3}. \quad (11)$$

Обобщающий дисбаланс по каждой из фаз рассчитаем суммированием дисбалансов, превышающих критические, за весь период наблюдений:

$$d_p = \sum_{t \in T_p} d_p^t, \quad p = \overline{1, 3}. \quad (12)$$

Этот показатель по смыслу соответствует средней величине дисбаланса. Между тем, как мы знаем, нередко особое внимание уделяется экстремальным значениям. В этом случае более адекватным будет показатель:

$$d_p = \max_{t \in T_p} d_p^t, \quad p = \overline{1, 3}. \quad (14)$$

Общеизвестный недостаток такой оценки дисбаланса в том, что она акцентирует внимание лишь на максимальном значении и игнорирует остальные данные. По этой причине чаще всего используют квадратические характеристики, по смыслу близкие к средним арифметическим, но учитывающие в определенной мере значения, близкие к экстремальным:

$$d_p = \sum_{t \in T_p} (d_p^t)^2, \quad p = \overline{1, 3}. \quad (15)$$

Степень чувствительности к экстремальным значениям может регулироваться показателем степени. Чем он больше, тем ближе по свойствам данная оценка к оценке (14).

*Первый метод.*

Очевидно, что абонентов-кандидатов надо искать среди подключенных к фазе с наибольшим обобщающим дисбалансом:

$$p = \arg \max_p d_p. \quad (16)$$

Определим множество индексов абонентов, подключенных к данной фазе:

$$I = \{i: X_{ip} = 1, \quad i = \overline{1, n}\}. \quad (17)$$

Мы можем предположить, что наилучший эффект от установки КФТ будет в том случае, если характер распределения потребления энергии этим абонентом во времени максимально соответствует распределению для всего фрагмента РЭС. В качестве меры соответствия может быть использован линейный коэффициент корреляции [5]:

$$R_i = \frac{\text{cov}(W_{ip}^t, W_p^t)}{s(W_{ip}^t)s(W_p^t)}, \quad i \in I. \quad (18)$$

Индекс абонента для установки КФТ:

$$i = \arg \max_{i \in I} R_i. \quad (19)$$

Установка КФТ, независимо от логики его функционирования, приведет, как минимум, к уменьшению максимальных дисбалансов на линии, к которой был стационарно подключен соответствующий абонент. По поводу дисбалансов на других фазных линиях мы не можем выразиться столь же определенно. Поэтому скорректируем дисбалансы по формуле:

$$d_p^t = d_p^t - d_{ip}^t, \quad t = \overline{1, T}. \quad (20)$$

Затем мы сможем повторить расчеты для выявления следующего абонента-претендента на установку КФТ.

Следует отметить, что результаты установки могут кардинально изменить ситуацию в сети, и для ее оценки необходимо включить в рассмотрение динамический аспект моделирования, для чего могут быть задействованы имитационные методы [6]. Описанные выше расчеты над сетью статической конфигурации позволяют выявить фазные линии и абонентов, наиболее подходящих для оперативного регулирования фазных нагрузок, но результаты реализации оперативных управляющих воздействий выявляются моделированием динамики фрагмента сети.

Процессы переключений фиксируются изменением значений логических переменных, характеризующих состояние сети. Поэтому к переменным конфигурации необходимо добавить индекс момента или периода времени, с помощью которого мы будем различать состояния. Кроме того, для имитации процессов коммутации требуется задание функции, представляющей логику управления коммутатором фазных токов. Процесс имитации описывается следующей последовательностью шагов.

1. Актуализация данных о потребляемых мощностях и конфигурации сети.
2. Организация циклических вычислений для каждого из всех моментов или периодов времени.
  - 2.1. Расчет суммарных нагрузок по фазам.
  - 2.2. Определение абонента или нескольких абонентов, подлежащих переключению, а также фазных линий, на которые они будут переключены (логика коммутации).

2.3. Изменение значений соответствующих переменных, определяющих конфигурацию сети ( $X_{ip}^t$ ).

2.4. Корректировка данных.

3. Оформление рядов наблюдений для проведения вычислений по выявлению дисбалансов и выбора абонентов для подключения через КФТ (при необходимости).

Условием успешного завершения вычислений является допустимость полученного решения, т. е. оно должно удовлетворять условиям (9).

*Второй метод.*

Несколько иной метод поиска решения, включающий в свой состав элементы динамики, может основываться на показателе дисбаланса, вычисляемого по формуле (5). Для его реализации задаются показатели мощности, потребляемой абонентами, и начальная конфигурация сети:

$$X_{ip}^t, \quad t = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad p = \overline{1, 3}.$$

Процесс вычислений повторяется начиная с первого момента или периода времени и до последнего и включает в себя следующие шаги.

1. Для текущего значения индекса времени определяем текущее значение переменных состояния:

$$X_{ip}^t = X_{ip}^{t-1}, \quad i = \overline{1, n}, \quad p = \overline{1, 3}.$$

2. По формуле, аналогичной (2) и (3) вычисляем суммарные мощности, потребляемые от каждой из фазных линий:

$$W_p^t = \sum_{i=1}^n W_i^t X_{ip}^t, \quad p = \overline{1, 3}.$$

3. Для текущего значения индекса времени рассчитываем дисбаланс по формуле (5).

4. Если дисбаланс является допустимым, т. е.  $D_{p,q}^t \leq D^t$ , завершаем вычисления для данного значения индекса времени и переходим к следующему:  $t = t+1$ .

5. Если есть абонент, подключенный к фазе  $p$  через коммутатор фазных токов, то переключаем его на фазу  $q$  и переходим к шагу 2.

6. Выбираем абонента, наиболее подходящего для установки КФТ по критерию, рассмотренному выше в (18).

7. Осуществляем переключение выбранного абонента  $i$  с фазы  $p$  на фазу  $q$ :  
 $X_{ip}^t = 0, \quad X_{iq}^t = 1.$

Полагаем, что теперь он подключен через коммутатор фазных токов и добавляем его в соответствующий список. Переходим к шагу 2.

После окончания расчетов мы получаем список абонентов, которым следует установить коммутаторы фазных токов, а также данные о дисбалансах, которые могут быть устранены с их помощью.

*Заключение.*

Задача содержит нелинейности и элементы динамики. По этой причине рассмотренные методы являются эвристическими. Они позволяют получать если не

оптимальные, то близкие к ним субоптимальные решения. Эти методы не исчерпывают возможностей поиска оптимума. Например, во втором методе поиск может начинаться не с первого момента или периода времени, а того, для которого дисбаланс имеет наибольшее значение. За ним могут рассматриваться остальные локальные экстремумы в порядке их убывания.

#### **Список использованных источников:**

1. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В. Э. Воротницкий [и др.]: под ред. В. Н. Казанцева. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
2. Воротницкий, В. Э. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинин. – М. : ИПК Госслужбы, 2003. – 64 с.
3. Концепция совершенствования современных информационных систем контроля и учета электроэнергии в распределительных сетях / Т. Т. Оморов [и др.] // Машиноведение. – № 1 (15). – 2022. – С. 124–138.
4. Данилин, А. В. Принципы построения и работы АСКУЭ // Энергетика и промышленность России. № 5(45), 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/epr/45/2968.htm>. – Дата доступа: 03.10.2023.
5. Математическая статистика : учеб. для вузов / В. Б. Горяинов [и др.]: под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 424 с.
6. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / пер. с англ., общая редакция Д. М. Гвишиани. – М. : Прогресс, 1971. – 340 с.