

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-514-527>

УДК 621.311:017

Совершенствование методики расчета установившихся режимов городских электрических сетей с учетом потребительских энергоисточников

М. И. Фурсанов¹⁾, А. А. Золотой¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Предложена методика расчета установившегося режима разомкнутой городской распределительной электрической сети с источниками малой генерации. Показано, что городская электрическая сеть состоит из пассивных и активных физических элементов. К пассивным относятся силовые трансформаторы и линейные регуляторы, воздушные и кабельные линии электропередачи, токоограничивающие реакторы и т. д. Активные элементы сетей – это источники электропитания (трансформаторные вводы низшего напряжения питающих подстанций и распределенные источники малой генерации) и нагрузки, математические модели которых могут быть разными. Источники питания в городских распределительных электрических сетях 10 кВ и ниже классифицируются по типу и мощности, могут быть двух видов – центры питания сети и источники малой генерации. Нагрузки потребителей моделируются источниками тока, подключаемыми к узлам сети. Параметрами источников тока обычно являются графики изменения модуля действующего значения тока и коэффициента мощности во времени. Значения этих параметров в однолинейных схемах замещения распределительных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью принимаются средними для трех фаз. Центры питания представляют собой трансформаторные вводы низкого напряжения питающих подстанций основных электрических сетей 35 кВ и выше, оснащенные цифровыми приборами учета электроэнергии, подключенными к АСКУЭ. Разработанная методика позволяет получить уточненную сбалансированную расчетную модель установившегося режима разомкнутой городской сети на заданное время суточного графика. Она состоит в последовательном распределении заданной мощности каждого источника питания сети между ее нагрузками с последующим уточнением потоков и потерь мощности на участках, а также напряжений и действительных нагрузок в узлах схемы методом наложения.

Ключевые слова: городская сеть, разомкнутый режим, пассивный элемент, активный элемент, распределенный источник, малая генерация, сбалансированная модель, нагрузка, потоки мощности, напряжение

Для цитирования: Фурсанов, М. И. Совершенствование методики расчета установившихся режимов городских электрических сетей с учетом потребительских энергоисточников / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 6. С. 514–527. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-514-527>

Адрес для переписки

Фурсанов Михаил Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Address for correspondence

Fursanov Mishail I.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Improvement of the Method of Calculation of Steady-State Modes of Urban Electric Networks Taking into Account Consumer Energy Sources

M. I. Fursanov¹⁾, A. A. Zalotoy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The method of calculation of the steady-state mode of the open city distribution electric network with small generation sources is offered. It is shown that the city electric network consists of passive and active physical elements. Passive elements include power transformers and linear regulators, overhead and cable power lines, current-limiting reactors, etc. Active elements of networks are power sources (transformer inputs of low voltage of feeding substations and distributed small generation sources) and loads, mathematical models of which can be various. Power sources in urban distribution networks of 10 kV and below are classified by type and power and can be of two kinds, viz. power feeding centers of the network and small generation sources. Consumer loads are modeled by current sources connected to network nodes. The parameters of the current sources are usually graphs of the change of the module of the actual current value and the power factor in time. The values of these parameters in single-line substitution schemes of 6–10 kV distribution networks with isolated neutral are assumed to be average for three phases. The power centers are transformer inputs of low voltage power substations of the main electric networks of 35 kV and above, equipped with digital devices of the account of the electric power connected to the automated system of control and accounting of power resources. The developed technique allows receiving the refined balanced calculation model of the steady mode of the open city network for the set time of the daily schedule. It includes the sequential distribution of the specified power of each network power supply between its loads, followed by clarification of flows and power losses in the sections, as well as voltages and actual loads in the nodes of the scheme by the overlay method.

Keywords: urban network, open mode, passive element, active element, distributed source, small generation, balanced model, load, power flows, voltages

For citation: Fursanov M. I., Zalotoy A. A. (2019) Improvement of the Method of Calculation of Steady-State Modes of Urban Electric Networks Taking into Account Consumer Energy Sources. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (6), 514–527. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-514-527> (in Russian)

Введение

Городские электрические сети как основной компонент электроснабжения любого города имеют замкнутую топологию, но по техническим причинам, как правило, работают в разомкнутых режимах [1, 2]. Изменение мест размыкания контуров городских электрических сетей оказывает существенное влияние на величину суммарных потерь активной мощности. Оптимизация мест размыкания городской электрической сети заключается в нахождении некоторого подмножества контурных ветвей схемы, при размыкании которых сеть становится разомкнутой и в ней обеспечиваются минимальные потери активной мощности при соблюдении всех технических ограничений [3].

Основная часть

На основании принципиальной схемы электрической сети составляется эквивалентная схема замещения из n узлов и m ветвей, которая описывается многокомпонентным связным направленным графом $G = (V, E)$, где V, E – соответственно множества его узлов и ветвей. Обозначим подмножество контурных ветвей графа $E_k \subset E$. Оно состоит из трех подмножеств $E_k = E_a \cup E_b \cup E_c$. Подмножество $E_a \subset E_k$ включает контурные ветви, которые по техническим причинам запрещается замыкать (фиксированные размыкания); $E_b \subset E_k$ включает контурные ветви, которые по техническим причинам запрещается размыкать (обычно из-за отсутствия на них коммутационных аппаратов). Подмножество $E_c \subset E_k$ составляют контурные ветви, на которые могут быть перенесены размыкания схемы, причем $E_c = E_k / (E_a \cup E_b)$.

Множество узлов V состоит из подмножеств узлов $V_c \subset V, V_g \subset V$ с подключенными источниками питания и подмножества нагрузочных узлов $V_n \subset V$. К узлам подмножества V_c подключены центры питания схемы в виде питающих подстанций основных электрических сетей напряжением 35 кВ и выше. К узлам V_g подключены источники малой генерации.

Пусть $E_r \subset E_c$ – подмножество контурных ветвей, на которых находятся текущие места размыкания контуров схемы. Задача определения оптимальных мест размыкания городской электрической сети сводится к нахождению такого подмножества $E_r^* \subset E_c$, которое обеспечивает минимум потерь активной мощности в схеме [3]

$$\Delta P(E_r^*) = \min_{\substack{e_{rj} \in E_c \\ j=1, m}} (\Delta P(E_r)) \quad (1)$$

при выполнении следующих технических ограничений:

- по связности графа (перенос мест размыкания не должен приводить к появлению изолированных узлов);
- по надежности электроснабжения потребителей (перенос мест размыкания не должен приводить к ограничениям электроснабжения или недопустимым понижениям надежности электроснабжения потребителей);
- по перегрузке отдельных участков схемы $I_j \leq I_{\text{доп } j}, j = \overline{1, m}$;
- по отклонению напряжений в узлах схемы $U_{\min i} \leq U_i \leq U_{\max i}, i = \overline{1, n}$.

Потери активной мощности при текущем положении мест размыкания сети E_r определяются в результате расчета ее установившегося режима на основе схемы замещения [1, 2]. Вид и состав элементов схемы замещения определяются применяемыми математическими моделями физиче-

ских элементов сети с учетом принятых допущений. Одним из них является допущение о том, что городская распределительная электрическая сеть 0,38–10 кВ состоит из пассивных и активных физических элементов с сосредоточенными электрическими параметрами [1]. Пассивные элементы сети (силовые трансформаторы и линейные регуляторы, воздушные и кабельные линии электропередачи, токоограничивающие реакторы и т. п.) не изменяют значения своих параметров при изменениях режима. Математические модели пассивных элементов сети выбираются с учетом традиционного ряда допущений, которые используются при расчетах режимов распределительных электрических сетей 10 кВ и ниже.

Участки линий в однолинейных схемах замещения городских распределительных сетей моделируются схемами, приведенными на рис. 1, где $r_{\text{л}}$, $x_{\text{л}}$ – активное и реактивное сопротивления проводников на участке; $Q_{\text{л}}$ – зарядная реактивная мощность емкостного характера на участке кабеля.

Активные и реактивные сопротивления проводников на участках воздушных и кабельных линий и зарядная реактивная мощность вычисляются по формулам [1, 2]:

$$\begin{aligned} r_{\text{л}} &= r_0 L; \\ x_{\text{л}} &= x_0 L; \\ Q_{\text{л}} &= q_0 L, \end{aligned} \quad (2)$$

где r_0 , x_0 – удельные активное при температуре 20 °С и реактивное сопротивления проводников линии, Ом/км; q_0 – удельная зарядная реактивная мощность, квар/км; L – длина участка, км.

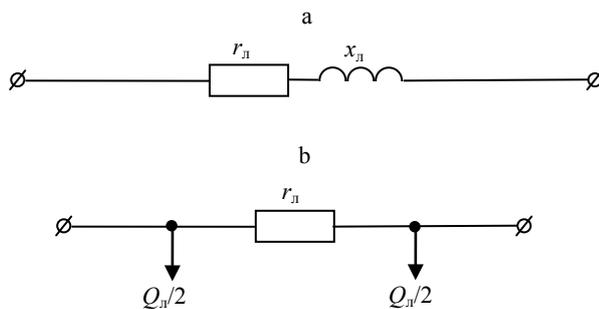


Рис. 1. Однолинейные схемы замещения участков воздушных (а) и кабельных (б) распределительных линий 6–10 кВ

Fig. 1. Single-line schemes of substitution of sections of overhead (a) and cable (b) distribution lines of 6–10 kV

Удельные активные сопротивления принимаются на основе паспортных данных и справочной информации по проводам воздушных и кабельных линий. Удельные реактивные сопротивления и значения зарядной реактивной мощности участков могут также приниматься на основе паспортных

данных и справочной информации или вычисляться по формулам, полученным с допущением о симметричном расположении проводников относительно друг друга и земли [1, 2]:

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}} + 0,016;$$

$$q_0 = \frac{7,58 U_{\text{НОМ}}^2}{\lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{пр}}}} \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

где $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение линии; $D_{\text{ср}}$ – среднегеометрическое расстояние между проводниками; $r_{\text{пр}}$ – радиус проводников.

Силовые двухобмоточные трансформаторы и линейные регуляторы в однолинейных схемах замещения городских распределительных сетей моделируются схемами, приведенными на рис. 2, где r_{T} , x_{T} – суммарные активное и реактивное сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора; ΔS_{x} – потеря мощности холостого хода в трех фазах трансформатора; k_{T} – коэффициент трансформации.

Активные и реактивные сопротивления схем замещения трансформаторов вычисляются по формулам [1, 2]:

$$r_{\text{T}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2};$$

$$x_{\text{T}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{к}\%} U_{\text{ВН}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}} \right)^2 - r_{\text{T}}^2}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{к}}$ – потеря активной мощности короткого замыкания в трех фазах трансформатора; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трех фаз трансформатора; $U_{\text{ВН}}$ – номинальное напряжение обмотки высокого напряжения трансформатора; $U_{\text{к}\%}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора в процентах от $U_{\text{ВН}}$.

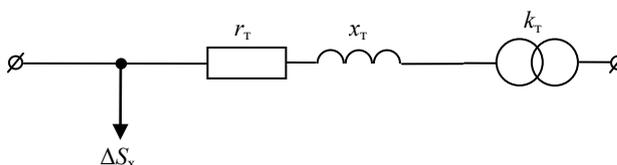


Рис. 2. Однолинейная схема замещения силового двухобмоточного трансформатора 6–10 кВ

Fig. 2. Single-line substitution circuit of the power double-winding transformer of 6–10 kV

Потери мощности холостого хода представляют собой комплексную величину $\Delta \underline{S}_x = \Delta P_x + j\Delta Q_x$, в которой значение реактивных потерь ΔQ_x вычисляется по формуле [1, 2]

$$\Delta Q_x = \sqrt{\left(\frac{I_x \% S_{\text{НОМ}}}{100}\right)^2 - \Delta P_x^2}, \quad (5)$$

где $I_x \%$ – фазный ток холостого хода в процентах от номинального тока.

Значения параметров ΔP_x , ΔP_k , $U_k \%$, $I_x \%$, $S_{\text{НОМ}}$, $U_{\text{ВН}}$ принимаются по данным заводов-изготовителей.

Коэффициент трансформации k_T трансформатора или линейного регулятора при расположении устройства переключения ответвлений (РПН или ПБВ) в обмотке высокого напряжения определяется по формуле [1]

$$k_T = \frac{U_{\text{ВН}} \left(1 + n_o \frac{\delta U_{\text{ВН}1\%}}{100}\right)}{U_{\text{НН}}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{НН}}$ – номинальное напряжение обмотки низкого напряжения трансформатора; n_o – номер ответвления; $U_{\text{ВН}1\%}$ – добавка напряжения в процентах при изменении коэффициента трансформации на одно ответвление.

Токоограничивающие реакторы в однолинейных схемах замещения городских распределительных сетей обычно моделируются схемами, приведенными на рис. 1а, где активное r и реактивное x сопротивления определяются на основании паспортных данных реакторов.

Активные элементы городской распределительной электрической сети могут изменять значения своих параметров в течение времени. Это приводит к изменениям параметров режима сети – токов на участках и напряжений в узлах схемы [1, 2]. К активным элементам сети относятся источники питания и нагрузки, математические модели которых выбираются с учетом допущений, принятых при расчетах распределительных электрических сетей 10 кВ и ниже. Однолинейные схемы замещения нагрузки и источников питания распределительных электрических сетей 0,38–10 кВ приведены на рис. 3.

Нагрузки потребителей в расчетах распределительных электрических сетей 0,38–10 кВ моделируются источниками тока, подключаемыми к узлам сети. Параметрами источников тока обычно являются графики изменения модуля действующего значения тока I и коэффициента мощности $\cos(\varphi)$ во времени (рис. 3а). Величины I и $\cos(\varphi)$ в однолинейных схемах замещения распределительных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью принимаются равными средним значениям для трех фаз [1].

Источники питания в рассматриваемых сетях 10 кВ и ниже классифицируются по типу и мощности и могут быть двух типов – центры питания сети и источники малой генерации [4–10].

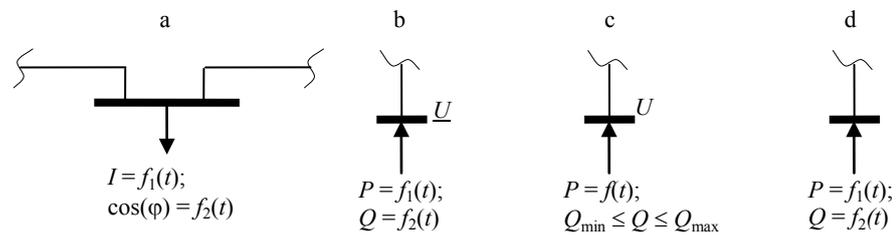


Рис. 3. Однолинейные схемы замещения нагрузки и источников питания распределительных электрических сетей 0,38–10 кВ: а – нагрузка; б – центр питания; в – источник малой генерации с регулированием напряжения; д – то же без регулирования напряжения

Fig. 3. Single-line load and power schemes of load supply sources substitution of distribution networks of 0.38–10 kV: а – load; б – power supply center; в – small generation source with voltage regulation; д – low-power source without voltage regulation

Центры питания (ЦП) представляют собой трансформаторные вводы низкого напряжения питающих подстанций основных электрических сетей напряжением 35 кВ и выше, оснащенные цифровыми приборами учета электроэнергии, подключаемыми к АСКУЭ. ЦП – основные источники питания потребителей, которые покрывают все небалансы мощности в схеме и оснащены средствами автоматического регулирования напряжения в широком диапазоне. Для распределительных линий 10 кВ и ниже ЦП могут быть источниками бесконечной мощности с постоянным напряжением. В однолинейных схемах замещения распределительных сетей 6–10 кВ ЦП моделируются источниками мощности с постоянным напряжением на шинах. Режимными параметрами источников мощности в ЦП являются графики изменения активных P и реактивных Q мощностей во времени (рис. 3б). Величины P и Q в однолинейных схемах замещения распределительных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью также принимаются равными средним значениям трех фаз. Угол напряжения ЦП совмещается с вещественной осью на комплексной плоскости [4].

Источники малой генерации (ИМГ) представляют собой генерирующие установки самых разных типов, которые оборудуются электронными приборами учета электроэнергии, подключаемыми к АСКУЭ, с обязательной передачей данных в диспетчерскую службу энергосистемы. В зависимости от поведения и влияния на режимы в однолинейных схемах замещения распределительных сетей 6–10 кВ ИМГ представляются тремя видами математических моделей.

Источники малой генерации, оснащенные средствами автоматического регулирования напряжения и частоты, работающие изолированно на выделенную для них сбалансированную нагрузку в однолинейных схемах замещения распределительных сетей 6–10 кВ, представляются моделями, приведенными на рис. 3в. Такие источники являются для своей выделенной нагрузки балансирующими ЦП.

Источники малой генерации, оснащенные только средствами автоматического регулирования напряжения, при параллельной работе с энергосистемой в однолинейных схемах замещения распределительных сетей 6–10 кВ представляются PU -моделями (рис. 3с). Параметрами PU -моделей являются модуль напряжения U в узле подключения источника, график изменения активной мощности генерации P во времени и пределы изменения реактивной мощности Q_{\min} , Q_{\max} . Кроме того, данные источники оснащены цифровыми приборами учета электроэнергии. Поэтому дополнительно по ним доступны измеренные графики активных P и реактивных Q генерируемых мощностей.

Источники малой генерации, не оснащенные средствами автоматического регулирования, при параллельной работе с энергосистемой в однолинейных схемах замещения распределительных сетей 6–10 кВ представляются PQ -моделями (рис. 3d). Параметрами PQ -моделей являются графики изменения активной P и реактивной Q мощностей генерации во времени, измеряемых цифровыми приборами учета электроэнергии.

Расчет установившегося режима городской распределительной электрической сети состоит в определении модулей и фаз напряжений в узлах, потоков и потерь активных и реактивных мощностей на участках схемы замещения сети. В узлах подключения источников малой генерации с регулированием напряжения определяются мощности активной и реактивной генерации источников [4].

Математическое описание задачи может быть построено на узловой или контурной модели сети. Опыт расчетов городских распределительных электрических сетей с разомкнутой разветвленной топологией схемы показал, что наиболее предпочтительным является использование контурных моделей сети, на основе которых удобнее реализовывать преимущества разомкнутой топологии. Контурные модели распределительных электрических сетей с разомкнутой топологией лишены традиционных недостатков, присущих им при расчетах сложнзамкнутых электрических сетей. В первую очередь это касается проблем с неоднозначностью выбора системы независимых контуров и сложностей моделирования работы режимной автоматики. В расчетах городских распределительных сетей используются упрощенные математические модели элементов сети и средств режимной автоматики, а разомкнутая топология схемы значительно упрощает методику выбора системы независимых контуров, образующихся между подключенными источниками питания. Главным аргументом в пользу контурного моделирования городских сетей является резкое уменьшение и ослабление зависимости порядка решаемой системы уравнений от размера схемы [4].

На этапе, предшествующем выполнению расчетов, по данным схемы замещения строится равнозначная и сбалансированная расчетная модель исходного режима сети на заданный момент времени суточного графика нагрузки. При построении сбалансированной расчетной модели исходного

режима схемы решаются две основные задачи. Первая – преобразование токовых математических моделей нагрузок к PQ -моделям (рис. 3d), унифицированным с математическими моделями источников питания без средств автоматического регулирования, вторая – согласование моделей нагрузок и источников питания схемы по точности задания параметров.

Методика построения сбалансированной расчетной модели исходного режима на заданное время суточного графика сводится к последовательному распределению заданной мощности каждого источника питания между нагрузками с последующим уточнением потоков и потерь мощности на участках, а также напряжений и действительных нагрузок в узлах схемы методом наложения. Блок-схема, описывающая данную методику, приведена на рис. 4.



Рис. 4. Блок-схема построения сбалансированной расчетной модели исходного режима сети

Fig. 4. The block diagram for building a balanced computational model of the initial network mode

Токовые модели нагрузок в узлах схемы преобразуются к PQ -моделям с параметрами, определяемыми по номинальному напряжению:

$$\underline{S}_i = \sqrt{3} U_{\text{ном}} \dot{I}_i = P_i + jQ_i; \quad (7)$$

$$\dot{I}_i = I_i \left(\cos(\varphi_i) - j\sqrt{1 - \cos^2(\varphi_i)} \right),$$

где \underline{S}_i – комплексное значение мощности нагрузки в i -м узле схемы; \dot{I}_i – комплексное значение тока нагрузки в i -м узле схемы; P_i , Q_i – активная

и реактивная мощности нагрузки в i -м узле схемы; I_i , $\cos(\varphi_i)$ – параметры токовой модели нагрузки в i -м узле схемы.

Режимные параметры моделей источников питания схемы определяются по данным цифровых систем учета электроэнергии, которые точнее источников данных, используемых для получения параметров моделей нагрузок схемы. Последние определяются на основании заданной обобщенной типовой информации о работе конкретных потребителей на интервалах времени суточного графика. К ней, прежде всего, относятся средняя мощность и обобщенные типовые графики потребителей. Совместное использование неравноточных данных источников питания и потребителей требует предварительного согласования их по точности и сбалансирования.

Согласование и сбалансирование неравноточных исходных данных выполняется путем электрического расчета исследуемой схемы по данным узлов подключенных источников питания (узлы начала) и нагрузочных узлов (узлы конца сети). Результатом расчета являются уточненные значения нагрузок схемы сети, в дальнейшем используемые в электрических расчетах с изменением топологии схемы.

Электрический расчет режима схемы по данным начала представляет собой линейную задачу, которая имеет однозначное решение. Однако если данные по отдельным нагрузкам схемы известны точно, то задача расчета режима становится нелинейной, так как напряжения в узлах подключения нагрузки неизвестны. В этом случае решение задачи выполняется на основе законов Ома и Кирхгофа. Схема общего участка городской распределительной электрической сети 10 кВ приведена на рис. 5. Узел i является началом, узел j – концом участка сети. В случае расчета режимных параметров участка схемы по данным начала в узле i должны быть известны комплексные значения напряжения \underline{U}_i и мощности $\underline{S}_{ij}^{(i)}$. Цель расчета – вычисление комплексных значений режимных параметров \underline{U}_j , $\underline{S}_{ij}^{(j)}$ в конце участка схемы [1, 2].

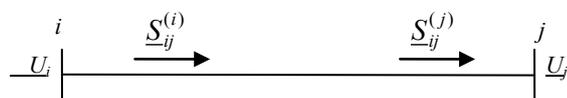


Рис. 5. Схема общего участка городской распределительной электрической сети 10 кВ

Fig. 5. The scheme of general section of the city distribution electric network of 10 kV

Аналитическая связь между напряжениями и мощностями произвольного участка схемы представлена формулами [1, 2]:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ij}^{(j)} &= \underline{S}_{ij}^{(i)} - \left| \frac{\underline{S}_{ij}^{(i)}}{\underline{U}_i} \right|^2 \underline{z}_{ij}^* ; \\ U_j &= \underline{U}_i - \frac{\underline{S}_{ij}^{(i)}}{\underline{U}_i} \underline{z}_{ij} . \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим схему усложненного фрагмента городской распределительной электрической сети 10 кВ, представленную на рис. 6. В узле j данной схемы подключен источник малой генерации мощностью $\underline{S}_{Гj}$.

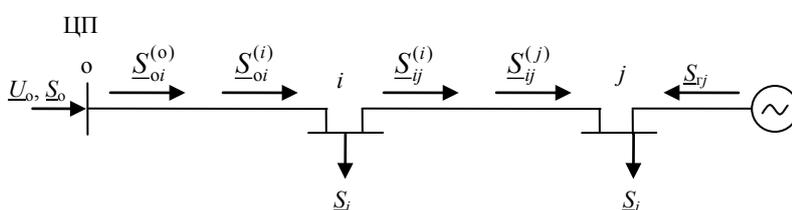


Рис. 6. Схема фрагмента городской распределительной электрической сети 10 кВ

Fig. 6. The scheme of the fragment of the city distribution electric network of 10 kV

Вначале распределим заданную в ЦП мощность \underline{S}_0 между нагрузками схемы \underline{S}_i и \underline{S}_j без учета работы источника малой генерации в узле j . По известным данным источника питания (U_0, P_0, Q_0) потоки мощности на головном участке и напряжение в i -м узле схемы находятся по формулам (8):

$$\underline{S}_{oi}^{(0)} = \underline{S}_0 ; \quad \underline{S}_{oi}^{(i)} = \underline{S}_{oi}^{(0)} - \left| \frac{\underline{S}_{oi}^{(0)}}{\underline{U}_0} \right|^2 \underline{z}_{oi}^* ; \quad \underline{U}_i = \underline{U}_0 - \frac{\underline{S}_{oi}^{(0)}}{\sqrt{3}\underline{U}_0} \underline{z}_{oi} .$$

Уточненное значение мощности нагрузки $\underline{S}_i^{(\text{уп})}$ в узле i при распределении мощности ЦП и поток мощности $\underline{S}_{ij}^{(i)}$ на участке $i-j$ около узла i определяются на основании исходных данных о нагрузках по первому закону Кирхгофа по формулам:

$$\underline{S}_i^{(\text{уп})} = \underline{S}_{oi}^{(i)} \frac{S_i}{S_i + S_j} ; \quad \underline{S}_{ij}^{(i)} = \underline{S}_{oi}^{(i)} - \underline{S}_i^{(\text{уп})} .$$

Поток мощности $\underline{S}_{ij}^{(j)}$ на участке $i-j$ около узла j и напряжение U_j в узле j также определяются по (8):

$$\underline{S}_{ij}^{(j)} = \underline{S}_{ij}^{(i)} - \left| \frac{\underline{S}_{ij}^{(i)}}{\underline{U}_i} \right|^2 \underline{z}_{ij}^*; \quad U_j = U_i - \frac{\underline{S}_{ij}^{(i)}}{\sqrt{3}\underline{U}_i} \underline{z}_{ij}.$$

Уточненное значение мощности нагрузки в узле j при распределении мощности ЦП $\underline{S}_j^{(\text{un})}$ равно потоку мощности $\underline{S}_{ij}^{(j)}$ в конце участка $i-j$

$$\underline{S}_j^{(\text{un})} = \underline{S}_{ij}^{(j)}.$$

Распределим между заданными нагрузками \underline{S}_i и \underline{S}_j мощность источника малой генерации \underline{S}_{vj} в узле j без учета ЦП схемы. Уточненное значение нагрузки $\underline{S}_j^{(r)}$ и поток мощности $\underline{S}_{ij}^{(j)}$ на участке $i-j$ около узла j определим по формулам:

$$\underline{S}_j^{(r)} = \underline{S}_{vj} \frac{\underline{S}_j}{\underline{S}_i + \underline{S}_j}; \quad \underline{S}_{ij}^{(j)} = \underline{S}_{vj} - \underline{S}_j^{(r)}.$$

Потери мощности и напряжения на участке $i-j$ определяются с использованием напряжения в узле j , вычисленного при распределении мощности ЦП.

Поток мощности $\underline{S}_{ij}^{(j)}$ на участке $i-j$ около узла i и напряжение U_i в узле i определяются по (8):

$$\underline{S}_{ij}^{(i)} = \underline{S}_{ij}^{(j)} - \left| \frac{\underline{S}_{ij}^{(j)}}{\underline{U}_j} \right|^2 \underline{z}_{ij}^*; \quad U_i = U_j - \frac{\underline{S}_{ij}^{(j)}}{\sqrt{3}\underline{U}_j} \underline{z}_{ij}.$$

Уточненное значение нагрузки $\underline{S}_i^{(r)}$ в узле i при распределении мощности источника малой генерации $\underline{S}_j^{(r)}$ равно потоку мощности $\underline{S}_{ij}^{(i)}$ на участке $i-j$ около узла i схемы

$$\underline{S}_i^{(r)} = \underline{S}_{ij}^{(i)}.$$

Результирующие значения нагрузок $\tilde{\underline{S}}_i$ и $\tilde{\underline{S}}_j$ в узлах, а также результирующие потоки мощности $\underline{S}_{ij}^{(i)}$ и $\underline{S}_{ij}^{(j)}$ на участке $i-j$ схемы находятся методом наложения:

$$\tilde{\underline{S}}_i = \underline{S}_i^{(\text{un})} + \underline{S}_i^{(r)}; \quad \tilde{\underline{S}}_j = \underline{S}_j^{(\text{un})} + \underline{S}_j^{(r)};$$

$$\underline{S}_{ij}^{(i)} = \underline{S}_{ij}^{(i)} + \underline{S}_{ij}^{(i)}; \quad \underline{S}_{ij}^{(j)} = \underline{S}_{ij}^{(j)} + \underline{S}_{ij}^{(j)}.$$

В итоге по известному напряжению в ЦП схемы и потокам мощности на участках сети $\underline{S}_{ij}^{(i)}$ и $\underline{S}_{ij}^{(j)}$, полученным методом наложения, уточняем значения потерь мощности на участках и напряжения в узлах сети по (8):

$$\underline{S}_{ij}^{(i)} = \underline{S}_{oi}^{(i)} - \tilde{\underline{S}}_i; \quad \underline{S}_{ij}^{(j)} = \underline{S}_{ij}^{(i)} - \left| \frac{\underline{S}_{ij}^{(i)}}{\underline{U}_i} \right|^2 \underline{z}_{ij}; \quad U_j = \underline{U}_i - \frac{\underline{S}_{ij}^{(i)}}{\sqrt{3}\underline{U}_i} \underline{z}_{ij}.$$

Таким образом завершается построение уточненной сбалансированной расчетной модели установившегося режима разомкнутой городской электрической сети. После ее формирования появляется возможность анализировать другие режимы сети при изменении топологии схем, что будет представлено в других публикациях.

ВЫВОДЫ

1. Проанализирована современная структура разомкнутой городской электрической сети с распределенными источниками малой генерации.
2. Показано, что городская электрическая сеть состоит из пассивных (трансформаторы, регуляторы, линии и др.) и активных (различные генерирующие источники) элементов, математические модели которых могут быть разными.
3. Разработана методика получения уточненной сбалансированной расчетной модели установившегося режима разомкнутой городской электрической сети с потребительскими энергоисточниками для заданного времени суточного графика источников питания.
4. Методика позволяет распределить замеренную цифровыми приборами учета режимную информацию между нагрузками сети с последующим уточнением потоков и потерь мощности на участках, а также нагрузок и напряжений в узлах схемы методом наложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов на/Д.: Феникс; Красноярск: Изд. проекты, 2006. 720 с.
2. Поспелов, Г. Е. Электрические системы и цепи / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин, П. В. Лычев. Минск: Технопринт, 2004. 720 с.
3. Фурсанов, М. И. О выборе оптимальных точек размыкания в городских электрических сетях в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. № 3. С. 207–219.
4. Фурсанов, М. И. Учет потребительских энергоисточников в расчетах распределительных электрических сетей 6–10 кВ / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 4. С. 11–15.
5. Фурсанов, М. И. Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 393–406. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406>.
6. Фурсанов, М. И. Об управлении режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведе-

- ний и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 15–27. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27>.
7. Кобец Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. М.: ИАЦ «Энергия», 2010. 208 с.
 8. Методические принципы расчета и анализа разомкнутых электрических сетей с несколькими источниками питания / М. И. Фурсанов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 3. С. 5–13.
 9. Фурсанов, М. И. Учет потребительских энергоисточников в расчетах распределительных электрических сетей 6–10 кВ / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 4. С. 11–15.
 10. Воропай, Н. И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах / Н. И. Воропай // Малая энергетика: труды Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 11–14 окт. 2005 г.; редкол.: В. И. Гладков (гл. ред.) [и др.]. М., 2005. С. 12–14.

Поступила 22.02.2019 Подписана в печать 07.05.2019 Опубликована онлайн 29.11.2019

REFERENCES

1. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2008) *Transmission and Distribution of Electrical Energy*. Rostov-on-the-Don, Feniks Publ.; Krasnoyarsk, Izdatel'skie Proekty Publ. 716 (in Russian).
2. Pospelov G. E., Fedin V. T., Lychev P. V. (2004) *Electrical Systems and Circuits*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 720 (in Russian).
3. Fursanov M. I., Zolotoy A. A. (2018) On the Choice of the Optimal Points of Opening in City Power Grids in the Conditions of the SMART GRID *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 207–219 (in Russian).
4. Fursanov M. I., Zalatoi A. A., Makarevich V. V. (2011) Account of Consumer Power Sources in Calculations of Distributive Electrical Networks of 6–10 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 11–15 (in Russian).
5. Fursanov M. I. (2017) Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 393–406 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406>.
6. Fursanov M. I., Zalotoy A. A. (2018) On the Management of Urban Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 15–27 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27>.
7. Kobets B. B., Volkova I. O. (2010) *Innovative Development of Electric Power Industry on the Basis of the SMART GRID Concept*. Moscow, IAC “Energy”. 208 (in Russian).
8. Fursanov M. I., Zolotoy A. A., Makarevich V. V., Moukha A. N. (2009) Methodical Principles of Calculation and Analysis of Opened Power Network with Several Power Supply Sources. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 5–13 (in Russian).
9. Fursanov M. I., Zalatoi A. A., Makarevich V. V. (2011) Account of Consumer Power Sources in Calculations of Distributive Electrical Networks of 6–10 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 11–15 (in Russian).
10. Voropai N. I. (2005) Distributed Generation in Electric Power Systems. V. I. Gladkov (eds.) [et al.]. *Malaya Energetika: Trudy Mezhdunar. Nauch-Tekhn. Konf., Moskva, 11–14 okt. 2005 g* [Small Power Engineering: Proceedings of the International Scientific-and-Technical Conference, Moscow, 11–14 Oct. 2005]. Moscow, 12–14 (in Russian).

Received: 22 February 2019

Accepted: 7 May 2019

Published online: 29 November 2019