УДК: 620.9: 658.011.56

Яр-Мухамедов И.Г., с.н.с., НАН КР, aldar@email.su
Осмонова Р.Ч., к.т.н., НАН КР, osmnvarimma@rambler.ru
Закиряев К.Э., kubz1@mail.ru, ИГУ *им. К.Тыныстанова,*
Койбагаров Т.Дж., аспирант НАН КР, koibagarov@bk.ru

К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

В статье рассматривается несимметричная распределительная электрическая сеть в условиях функционирования автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). Сформулирована задача идентификации ее математической модели в комплексной форме, которая сводится к определению фазовых сдвигов переменных (токов, напряжений), определяющих электрическое состояние трехфазной сети. Предложен метод ее решения, основанный на математических соотношениях, описывающих функциональные связи между переменными состояниями, и использовании алгоритмов параметрической оптимизации. Реализация процедуры идентификации модели распределительной сети осуществляется с непосредственным использованием исходных данных, полученных по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии. Метод можно использовать для решения ряда функциональных задач в составе АСКУЭ, ориентированных для диагностики состояний магистральной линии и мониторинга потерь электроэнергии в распределительной сети.

***Ключевые слова**: трехфазная сеть, несимметрия, модель распределительной сети.*

Яр-Мухамедов И.Г., ага илимий кызматкер, aldar@email.su КР ИУА
Осмонова Р.Ч., т.и.к. osmnvarimma@rambler.ru, КР ИУА
Закиряев К.Э., kubz1@mail.ru, К.Тыныстанов ат. ЫМУ
Койбагаров Т. Дж., аспирант, koibagarov@bk.ru КР УИА

СИММЕТРИЯЛУУ ЭМЕС БӨЛҮШТҮРҮҮ ТАРМАКТАРЫНЫН МОДЕЛИН ТҮЗҮҮ ТУУРАЛУУ

Асимметриялык электр бөлүштүрүү тармагы электр энергиясын башкаруунун жана өлчөөнүн автоматташтырылган тутумунун (ЭБӨАТ) иштөө шартында каралат. Комплекстүү формада анын математикалык моделин аныктоо маселеси түзүлгөн, ал үч фазалуу тармактын электрдик абалын аныктоочу өзгөрүлмөлүүлөрдүн (токтордун, чыңалуулардын) фазалык жылыштарын эске алат. Көйгөйдүн өзгөрмөлөрүнүн ортосундагы функционалдык байланыштарды сүрөттөгөн математикалык байланыштарга негизделген жана параметрдик оптималдаштыруу алгоритмдерин колдонуп, аны чечүү ыкмасы сунушталат. Бөлүштүрүүчү тармактын *моделин аныктоонун жол-жобосун ишке ашыруу абоненттик электр эсептегичтеринен байланыш каналдары аркылуу алынган баштапкы маалыматтарды түздөн-түз пайдалануу менен жүзөгө ашырылат. Бул ыкма магистралдык линиянын абалын диагностикалоого жана бөлүштүрүү тармагындагы электр энергиясынын жоготууларын көзөмөлдөөгө багытталган ЭБӨАТ тутумунун бир катар функционалдык милдеттерин чечүүдө колдонулушу мүмкүн.*

Өзөктүү сөздөр: *үч фазалуу тармак, асимметриялуулук, бөлүштүрүү тармагынын модели.*

Yar-Mukhamedov I.G., Senior Researcher, National Academy of Sciences (NAS KR), E-mail: aldar@email.su
Osmonova R.Ch., Ph.D., NAS KR, E-mail: osmnvarimma@rambler.ru
Zakiriaev K.E., E-mail: kubz1@mail.ru, K. Tynystanov IKSU ,
Koibagarov T.Dz., graduate student, NAS KR, E-mail: koibagarov@bk.ru

TO BUILDING A MODEL OF A NON-SYMMETRIC DISTRIBUTION NETWORKS

An asymmetric electrical distribution network is considered under the conditions of the functioning of the automated control and metering system for electricity (ACMSE). The problem of identifying its mathematical model in a complex form is formulated, which is reduced to determining the phase shifts of variables (currents, voltages) that determine the electrical state of a three-phase network. A method for its solution is proposed based on mathematical relationships describing functional relationships between state variables and using parametric optimization algorithms. The implementation of the procedure for identifying the model of the distribution network is carried out with the direct use of the initial data received via communication channels from subscriber electricity meters. The method can be used to solve a number of functional tasks as part of the ACMSE system, aimed at diagnosing the states of the main line and monitoring electricity losses in the distribution network.

Key words: *three-phase network, asymmetry, distribution network model.*

Введение. В целях автоматизации и информатизации процессов энергопотребления в распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 0,4 кВ применяются цифровые технологии в виде автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1, 2]. Главной функцией современных АСКУЭ является коммерческий учет электроэнергии. В то же время такие важные задачи, как диагностика состояний функциональных элементов сети [3-5], мониторинг технических и коммерческих потерь электроэнергии [6-8], а также оптимизация режимов работы несимметричных РЭС [9-12] в составе традиционных АСКУЭ по существу не решаются. Эти обстоятельства приводят к тому, что в существующих АСКУЭ в неполной мере используются потенциальные возможности цифровых технологий, что не позволяет достигать высоких технико-экономических показателей распредсетей и внедряемых автоматизированных систем. Основная причина такого положения дел состоит в том, что к настоящему времени не разработаны эффективные математические модели распредсетей в условиях несимметрии токов и напряжений [13, 14], адаптированные к условиям работы АСКУЭ. В связи с этим актуальной является разработка новых конструктивных математических моделей, ориентированных для решения указанных выше функциональных задач. Существующие методы идентификации моделей распределительных сетей [15-18] в условиях несимметрии токов и напряжений в недостаточной степени адаптированы для их применения в режиме реального времени. В работах [19-21] рассматриваются подходы к построению моделей, учитывающих фактор несимметрии распределительных сетей напряжением 0,4 кВ.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с развитием указанных подходов, и предлагается новый метод идентификации математической модели несимметричной РЭС, в котором используются первичные измерительные данные АСКУЭ, полученные по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии.

Постановка задачи. В качестве объекта рассматривается четырехпроводная РЭС, расчетная схема которой показана на рис.1.

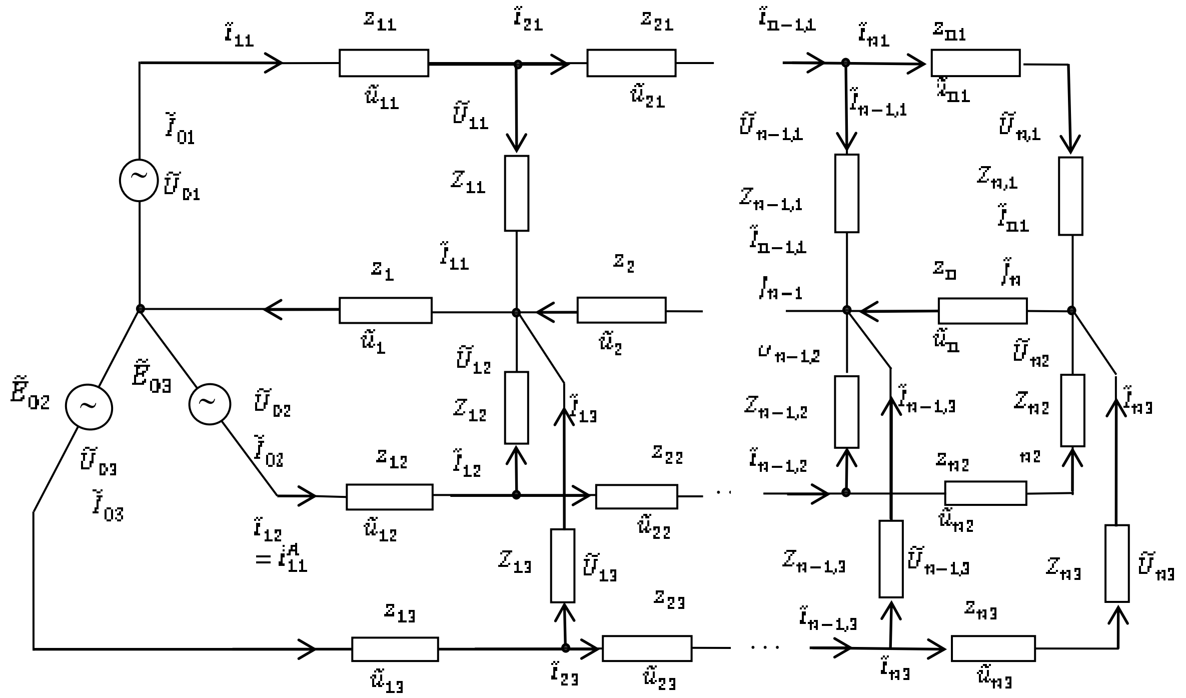

Рис. 1. Расчетная схема трехфазной сети.

Обозначения имеют следующий смысл: k,ν - индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С $(k=\overline{1,3})$ и электрических контуров сети $(\nu=\overline{1,n})$; $\tilde{E}_{0k}$ – ЭДС k-ой фазы; $\tilde{U}_{0k}$, $\tilde{I}_{0k}=\tilde{i}_{1k}$ – мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз; $\tilde{I}_{\nu k}$, $\tilde{U}_{\nu k}$, $Z_{\nu k}$ – синусоидальные мгновенные ток, напряжение и сопротивление нагрузки (электроприемника) с координатой (ν,k); $\tilde{i}_{\nu k}$, $z_{\nu k}$ – мгновенный ток и комплексное сопротивление ι-го межабонентского участка (МАУ) k-ой фазы; $\tilde{u}_{\nu k}$, $\tilde{u}_{\nu}$ – напряжения соответственно на ι-ом МАУ k-й фазы и нейтрального провода; $\tilde{J}_{\nu}$,z_{ν} – мгновенный ток и комплексное сопротивление ι-го участка нейтрального провода.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

1) распределительная сеть функционирует в штатном режиме;

2) фазные и нейтральные провода сети имеют разные сечения;

3) в системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети;

4) со счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети и в трансформаторной подстанции (ТП), в базу данных АСКУЭ по каналам связи в

дискретные моменты времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ с шагом дискретизации $\Delta t_\xi = t_{\xi+1} - t_\xi$ $(\xi = 1,2,\ldots)$ поступают следующие данные:

- действующие значения токов $I_{\nu k}$ и напряжений $U_{\nu k}$ на нагрузках сети;
- коэффициенты мощности $c_{\nu k} = \cos\varphi_{\nu k}$, определяемые фазовыми сдвигами $\varphi_{\nu k}$ между соответствующими напряжениями $\tilde{U}_{\nu k}$ и токами $\tilde{I}_{\nu k}$ $(k = \overline{1,3},\ \nu = \overline{0,n})$.

Как известно, мгновенные синусоидальные переменные трехфазной сети ($\tilde{I}_{\nu k}$, $\tilde{U}_{\nu k}, \tilde{i}_{\nu k}, \tilde{J}_{\nu}$) и сопротивления на нагрузках $(Z_{\nu k})$ в установившемся режиме можно представить в комплексной форме [15]:

$$\dot{I}_{\nu k} = I_{\nu k} e^{j(\beta_k + \alpha_{\nu k})}$$
$$\dot{U}_{\nu k} = U_{\nu k} e^{j(\beta_k + \psi_{\nu k})},$$
$$Z_{\nu k} = \bar{Z}_{\nu k} e^{j\varphi_{\nu k}}, \quad \nu = \overline{0,n}, \quad k = \overline{1,3},$$
$$i_{\nu k} = l_{\nu k} e^{j(\beta_k + \tilde{\alpha}_{\nu k})},$$
$$\dot{J}_{\nu} = i_{\nu 1} + i_{\nu 2} + i_{\nu 3}, \quad \nu = \overline{1,n},$$

где $I_{\nu k}, U_{\nu k}, \bar{Z}_{\nu k}, l_{\nu k}$ – модули комплексных переменных $\dot{I}_{\nu k}, \dot{U}_{\nu k}, Z_{\nu k}, i_{\nu k}$ соответственно; $\alpha_{\nu k}, \psi_{\nu k}, \tilde{\alpha}_{\nu k}$ – приращения фазовых сдвигов соответствующих токов и напряжений относительно их базовых значений β_k , обусловленные несимметрией токов и напряжений в сети. При этом

$$\varphi_{\nu k} = \psi_{\nu k} - \alpha_{\nu k}, \qquad \beta_k = 2(k-1)\pi/3.$$

Отметим, что действующие значения токов $I_{\nu k}$, напряжений $U_{\nu k}$, коэффициентов мощностей $c_{\nu k} = \cos\varphi_{\nu k}$ и модули сопротивлений $\bar{Z}_{\nu k}$ являются известными величинами, которые определяются по данным счетчиков электроэнергии АСКУЭ. Таким образом, из выражений (1) и (2) видно, что задача построения математической модели трехфазной сети в комплексной форме сводится к идентификации приращений фазовых сдвигов $\alpha_{\nu k}$ и $\tilde{\alpha}_{\nu k}$, а также действующих значений (модулей) $l_{\nu k}$ межабонентских токов $i_{\nu k}$ $(\nu = \overline{1,n},\ k = \overline{1,3})$.

Метод решения задачи. Решение сформулированной задачи включает следующие основные этапы:

1. Декомпозиция структуры исходной трехфазной сети.
2. Получение исходных уравнений для конечных контуров сети.
3. Формирование системы алгебраических уравнений для идентификации фазовых сдвигов.
4. Идентификация комплексных токов и напряжений элементов трехфазной сети.

Декомпозиция структуры исходной трехфазной сети. В целях упрощения решения сформулированной выше задачи предварительно выполним декомпозицию структуры исходной трехфазной сети (рис.1), предполагая, что она относится к классу линейных систем. С учетом свойства линейности ее можно расчленить на три электрические цепи (подсистемы), каждая из которых представляет собой соответствующую фазу сети при отключенном состоянии двух других фаз (рис.2).

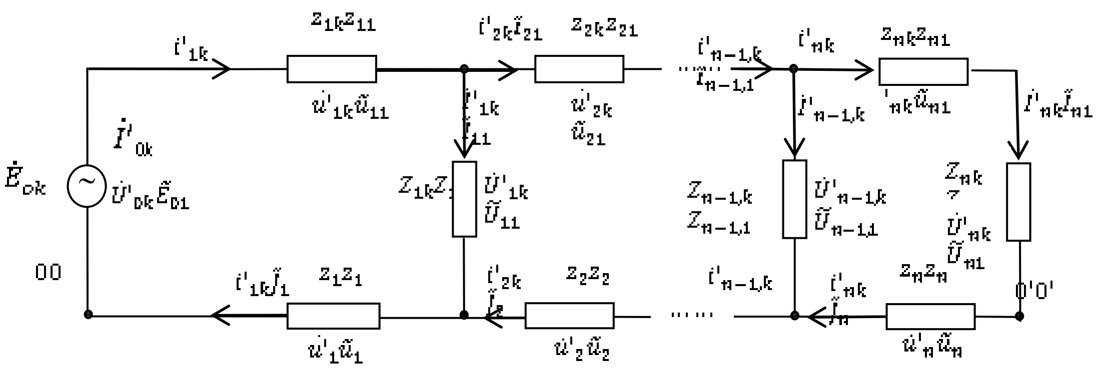

Рис.2. Структура k −й подсистемы распределительной сети.

Эти подсистемы можно рассматривать как условно независимые (автономные) структуры, на входах которых действуют ЭДС $\dot{E}_{D1}$, $\dot{E}_{D2}$ и $\dot{E}_{D3}$, формируемые источником питания (ТП) сети. При этом комплексные токи $\dot{I}'_{\nu k}$ и напряжения $\dot{U}'_{\nu k}$ на нагрузках, а также межабонетские токи $\dot{i}'_{\nu k}$ и напряжения $\dot{u}'_{\nu k}$, $\dot{u}'_{\nu}$ новых подсистем отличаются от прежних их значений (рис.1). В частности, комплексные токи $\dot{I}'_{\nu k}$, $\dot{i}'_{\nu k}$ и напряжения $\dot{U}'_{\nu k}$ можно представить следующими выражениями:

$$\dot{I}'_{\nu k} = I'_{\nu k} e^{j\tilde{\alpha}_{\nu k}},$$

$$\dot{U}'_{\nu k} = U'_{\nu k} e^{j\tilde{\psi}_{\nu k}},$$

$$\dot{i}'_{\nu k} = i'_{\nu k} e^{j\tilde{\gamma}_{\nu k}}, \quad \nu = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,3},$$

где $I'_{\nu k}, U'_{\nu k}, i'_{\nu k}, \tilde{\alpha}_{\nu k}, \tilde{\psi}_{\nu k}, \tilde{\gamma}_{\nu k}$ – модули и аргументы соответствующих комплексных переменных, которые являются неизвестными величинами.

В отличие от токов и напряжений при такой декомпозиции значения комплексных сопротивлений ($Z_{\nu k}$, $z_{\nu k}$, z_k) исходной трехфазной сети сохраняются, т.е. не изменяются. В частности, сопротивления нагрузок $Z_{\nu k}$ можно представить в виде

$$Z_{\nu k} = \bar{Z}_{\nu k} e^{j\varphi_{\nu k}}, \quad \nu = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,3},$$

где $\bar{Z}_{\nu k}$, $\varphi_{\nu k}$ - модули и аргументы соответствующих комплексных сопротивлений $Z_{\nu k}$ соответственно, определяемые по исходным данным задачи:

$$\bar{Z}_{\nu k} = \frac{U_{\nu k}}{I_{\nu k}}, \quad \varphi_{\nu k} = arccos\, c_{\nu k}, \quad c_{\nu k} = cos\varphi_{\nu k}$$

Получение исходных уравнений для конечных контуров сети. Для этой цели рассмотрим конечные электрические контуры новых подсистем (рис. 2). Балансовые соотношения для напряжений для этих контуров имеют вид:

$$\dot{U}'_{n-1,k} = \dot{u}'_{nk} + \dot{u}'_{n} + \dot{U}'_{nk}, \quad k = \overline{1,3},$$

которые на основе закона Ома можно представить в виде:

$$Z_{n-1,k}\dot{I}'_{n-1,k} = (z_{nk} + z_n + Z_{nk})\dot{I}'_{n-1,k}, \; k = \overline{1,3}.$$

С другой стороны для этих контуров справедливы следующие равенства:

$$\frac{\dot{U}'_{n-1,k}}{\dot{i}'_{n-1,k}} = Z_{nk}^{экв}, \quad k = \overline{1,3},$$

где $Z_{nk}^{экв}$ - эквивалентное сопротивление конечной цепи k-той фазы, которое является известной величиной и определяется по формуле:

$$Z_{nk}^{экв} = \frac{Z_{n-1,k}(z_{nk} + z_n + Z_{n,k})}{Z_{n-1,k} + z_{nk} + z_n + Z_{n,k}}.$$

С учетом того, что межабонентские токи $\dot{i}'_{n-1,k} = \dot{I}'_{n-1,k} + \dot{I}'_{nk}$ выражения (4) можно записать в виде:

$$(Z_{n-1,k} - Z_{nk}^{экв})\dot{I}'_{n-1,k} = Z_{nk}^{экв}\dot{I}'_{nk}, \; k = \overline{1,3}.$$

Объединяя соотношения (3) и (5), получаем следующие уравнения относительно неизвестных токов $\dot{I}'_{n-1,k}$ и $\dot{I}'_{nk}$:

$$Z_{n-1,k}\dot{I}'_{n-1,k} - (z_{nk} + z_n + Z_{n,k})\dot{I}'_{n,k} = 0,$$
$$\left(Z_{n-1,k} - Z_{nk}^{экв}\right)\dot{I}_{n-1,k} - Z_{nk}^{экв}\ \dot{I}'_{nk} = 0, \qquad k = \overline{1,3}\ .$$

Система уравнений (6) имеет определитель:

$$\Delta_{nk} = \begin{vmatrix} Z_{n-1,k} & -(z_{nk} + z_n + Z_{n,k}) \\ (Z_{n-1,k} - Z_{nk}^{экв}) & -Z_{nk}^{экв} \end{vmatrix}.$$

Как известно [22], система линейных уравнений (6) имеет нетривиальное решение, если ее определитель Δ_{nk} для k-той фазы (подсистемы) равен нулю, т.е. при выполнении следующего условия:

$$\left(Z_{n-1,k} - Z_{nk}^{экв}\right)\left(z_{nk} + z_n + Z_{n,k}\right) - Z_{n-1,k}Z_{nk}^{экв} = 0.$$

Непосредственная проверка показывает, что равенства (7) выполняется.

Теперь для краткости записи введем следующие обозначения:

$$a_{1k} = Z_{n-1,k}, \qquad a_{2k} = -\left(z_{nk} + z_n + Z_{n,k}\right),$$
$$a_{3k} = (Z_{n-1,k} - Z_{nk}^{экв}), a_{4k} = -Z_{nk}^{экв}, k = \overline{1,3}.$$

Комплексные токи $\dot{I}'_{n-k}$, $\dot{I}'_{nk}$ и сопротивления $a_{1k}, a_{2k}, a_{3k}, a_{4k}$ представим в виде вещественных и мнимых частей:

$$\dot{I}'_{n-1,k} = I_{n-1,k}^{в} + jI_{n-1,k}^{м},$$
$$\dot{I}'_{n,k} = I_{n,k}^{в} + jI_{n,k}^{м},$$
$$a_{lk} = a_{lk}^{в} + ja_{lk}^{м}, \qquad l = \overline{1,4}\ .$$

С учетом (8) и введенных обозначений уравнения (6) можно записать в виде:

$$(a_{1k}^{в} + ja_{1k}^{м})(I_{n-1,k}^{в} + jI_{n-1,k}^{м}) + +(a_{2k}^{в} + ja_{2k}^{м})(I_{n,k}^{в} + jI_{n,k}^{м}) = 0,$$
$$(a_{3k}^{в} + ja_{3k}^{м})(I_{n-1,k}^{в} + jI_{n-1,k}^{м}) + +(a_{4k}^{в} + ja_{4k}^{м})(I_{n,k}^{в} + jI_{n,k}^{м}) = 0, \qquad k = \overline{1,3}.$$

После несложных преобразований соотношения (8) представим в виде:

$$\boldsymbol{C}_1^{в} + j\boldsymbol{C}_1^{м} = 0,$$
$$\boldsymbol{C}_2^{в} + j\boldsymbol{C}_2^{м} = 0,$$

где:

$$C_1^{в} = c_{11}I_{n-1,k}^{в} + c_{12}I_{n-1,k}^{м} + c_{13}I_{n,k}^{в} + c_{14}I_{n,k}^{м},$$
$$C_1^{м} = c_{21}I_{n-1,k}^{м} + c_{22}I_{n-1,k}^{м} + c_{13}I_{n,k}^{в} + c_{14}I_{n,k}^{м},$$
$$C_2^{в} = c_{31}I_{n-1,k}^{в} + c_{32}I_{n-1,k}^{м} + c_{33}I_{n,k}^{в} + c_{34}I_{n,k}^{м},$$
$$C_2^{м} = c_{41}I_{n-1,k}^{м} + c_{42}I_{n-1,k}^{м} + c_{43}I_{n,k}^{в} + c_{44}I_{n,k}^{м}.$$

Очевидно, что для того, чтобы выполнялись соотношения (9), должны выполняться следующие равенства:

$$\begin{aligned} &c_{11}I_{n-1,k}^{в} + c_{12}I_{n-1,k}^{м} + c_{13}I_{n,k}^{в} + c_{14}I_{n,k}^{м} = 0, \\ &c_{21}I_{n-1,k}^{в} + c_{22}I_{n-1,k}^{м} + c_{23}I_{n,k}^{в} + c_{24}I_{n,k}^{м} = 0, \\ &c_{31}I_{n-1,k}^{в} + c_{32}I_{n-1,k}^{м} + c_{33}I_{n,k}^{в} + c_{34}I_{n,k}^{м} = 0, \\ &c_{41}I_{n-1,k}^{в} + c_{42}I_{n-1,k}^{м} + c_{43}I_{n,k}^{в} + c_{44}I_{n,k}^{м} = 0. \end{aligned} \tag{10}$$

Соотношения (10) представляют собой систему линейных алгебраических уравнений относительно искомых величин $I_{n-1,k}^{в}$, $I_{n-1,k}^{м}$, $I_{n,k}^{в}$, $I_{n,k}^{м}$ и для заданного k можно представить в векторно-матричной форме:

$$\boldsymbol{C}_k\ \bar{I}_k = 0, \qquad k = \overline{1,3}\ , \tag{11}$$

где матрица $C_k = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix}$,

а вектор $\dot{I}_k = \begin{bmatrix} I^{\text{в}}_{n-1,k} \\ I^{\text{м}}_{n-1,k} \\ I^{\text{в}}_{n,k} \\ I^{\text{м}}_{n,k} \end{bmatrix}$,

причем матрица C_k с учетом введенных выше кратких обозначений, может быть представлена в виде:

$$C_k = \begin{bmatrix} a^{\text{в}}_{1k} & -a^{\text{м}}_{1k} & a^{\text{в}}_{2k} & -a^{\text{м}}_{2k} \\ a^{\text{м}}_{1k} & a^{\text{в}}_{1k} & a^{\text{м}}_{2k} & a^{\text{в}}_{2k} \\ a^{\text{в}}_{3k} & -a^{\text{м}}_{3k} & a^{\text{в}}_{4k} & -a^{\text{м}}_{4k} \\ a^{\text{м}}_{3k} & a^{\text{в}}_{3k} & a^{\text{м}}_{4k} & a^{\text{в}}_{4k} \end{bmatrix}, \quad k = \overline{1,3} .$$

Так как условия (7) выполняются, то определители ΔC_k матриц C_k также равны нулю, т.е.

$$\Delta C_k = 0, \qquad k = \overline{1,3} . \tag{12}$$

Как известно [21], при выполнении условий система линейных алгебраических уравнений (11) имеет нетривиальные решения с точностью до параметра η:

$$I^{\text{в}}_{n-1,k} = \eta A_{m1} , \qquad I^{\text{м}}_{n-1,k} = \eta A_{m2} , \tag{13}$$
$$I^{\text{в}}_{nk} = \eta A_{m3} , \qquad I^{\text{м}}_{nk} = \eta A_{m4} ,$$

где: η – произвольная постоянная величина; A_{ml} – алгебраическое дополнение элемента C_{ml} матрицы C_k.

При этом искомые аргументы (приращения фазовых сдвигов) $\alpha_{n-1,k}$ и α_{nk} комплексных токов $\dot{I}'_{n-1,k}$ и $\dot{I}'_{nk}$ определяются однозначным образом по следующим формулам:

$$\alpha_{n-1,k} = arctg \frac{A_{m1}}{A_{m2}} , \qquad \alpha_{nk} = arctg \frac{A_{m3}}{A_{m4}} , \qquad k = \overline{1,3} . \tag{14}$$

Полученный результат на основе законов Кирхгоффа и Ома позволяет определить комплексные переменные (токи, напряжения), описывающие состояния всех нагрузок и межабонентских участков трехфазной сети. Действительно, на основе найденных комплексных токов $\dot{I}_{n-1k}$ и $\dot{I}_{nk}$ остальные переменные конечных электрических контуров межабонентских участков сети определяются выражениями:

$$\dot{J}_n = \dot{i}_{n1} + \dot{i}_{n2} + \dot{i}_{n3} ,$$
$$\dot{U}_n = \dot{J}_n z_n, \quad \dot{U}_{n-1,k} = Z_{n-1,k} \dot{I}_{n-1,k} ,$$

где $\dot{i}_{nk} = \dot{I}_{nk}$, а напряжения $\dot{u}_{nk} = \dot{i}_{nk} z_{nk}$.

Далее рассматриваются контуры трехфазной сети при $v = n - 1$, $v = n - 2$, …, $v = 1$, для которых определяются комплексные переменные на основе законов Кирхгоффа и Ома.

Таким образом, обобщенный алгоритм идентификации модели распредсети напряжением 0,4 кВ, включает следующие основные этапы:

1. Опрос счетчиков.
2. Декомпозиция задачи и формирование новых подсистем (рис. 2).
3. Формирование уравнений (6), описывающих процессы в конечных контурах $(v = n)$ новых подсистем.
4. Формирование матрицы С на основе вычислений эквивалентных

сопротивлений $Z_{nk}^{экв}$ и коэффициентов C_{ml} по формулам (11), где $m = \overline{1,4}\,, l = \overline{1,4}$.

5. Вычисление алгебраических дополнений A_{ml} , определителя матрицы С, где $m = \overline{1,4}\,, l = \overline{1,4}$.

6. Оценка $\alpha_{n-1,k}$ и $\alpha_{n,k}$ приращений фазовых сдвигов комплексных токов по формулам (14).

7. На основе токов $\dot{I}_{n-1,k}$ и $\dot{I}_{n,k}$, законов Кирхгоффа и Ома определение комплексных токов и напряжений для всех нагрузок и межабонентских участков трехфазной сети.

Выводы. Предложен новый метод решения задачи идентификации математической модели распределительной электрической сети напряжением 0,4 кВ в установившемся режиме. Предполагается, что трехфазная сеть функционирует в условиях несимметрии токов и напряжений. В отличие от известных подходов к решению указанной задачи алгоритм метода использует первичные исходные данные, полученные по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии. При этом переменные модели (токи, напряжения) представляются в комплексной форме. Проблема идентификации модели сводится к определению вещественных и мнимых частей комплексных переменных, определяющих электрическое состояние трехфазной сети. Получены математические соотношения, описывающие функциональные связи между переменными состояния и параметрами распредсети. Решение задачи идентификации искомой математической модели определяется аналитически на основе решения системы линейных алгебраических уравнений четвертого порядка относительно искомых вещественных и мнимых частей. Полученные результаты ориентированы на решение задач диагностики состояний магистральной линии и мониторинга потерь электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ.

Литература:

1. Якушков К.В. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии для розничного рынка // Информатизация и системы управления в промышленности. 2009. №3 (23) [Электронный ресурс]. –Режим доступа: URL: https://isup.ru/articles/6/335//. (04.11.2019).

2. Еремина М.А. Развитие автоматических систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) // Молодой ученый, 2015. №3. - С. 135-138.

3. Ершов А.М., Филатов О.В., Молоток А.В. и др. Система защиты электрической сети напряжением 380В от обрывов воздушной линии // Электрический станции, 2016. №5. - С.28-33.

4. Клочков А.Н. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода. // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, № 1, 2011, - С. 221-223.

5. Оморов Т.Т. Такырбашев Б. К. Метод идентификации неизмеряемых параметров электрической сети в системах автоматизации контроля и учета электроэнергии // Электротехника, 2018. № 3.- С. 18-21.

6. Сапронов А.А., Кужеков С.Л., Тынянский В.Г. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением

до 1 кВ // Изв.вузов. Электромеханика, 2004. №1. - С.55-58.

7. Данилов М.И., Романенко И.Г. Метод выявления мест неконтролируемого потребления энергии в электрических сетях 0,4 кВ. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2019. Т. 62. № 4. - С. 90-96.

8. Оморов Т.Т. К проблеме локализации несанкционированного отбора электроэнергии в распределительных сетях в составе АСКУЭ // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика, 2017. №7.- С. 27-32.

9. Киселев М.Г., Лепанов М.Г. Симметрирование токов в сетях электроснабжения силовым электрическим регулятором неактивной мощности // Электротехника, 2018. №11. -С.63-70.

10. Оморов Т.Т. Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление, 2018. Т. 19. № 3.- С. 194-200

11. Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника, 2014. №6. - С. 8-12.

12. Патент № 2490768 (РФ). И.В. Наумов, Д.А.Иванов, С.В. Подъячих, Гантулга Дамдинсурэн. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом // Бюлл. № 23. 20.08.2013.

13. Пономаренко О.И., Холиддинов И.Х. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения //Энергетик, 2015. №12. - С.6-8.

14. Оморов Т.Т. Оценка влияния несимметрии токов и напряжений на потери электроэнергии в распределительной сети с использованием АСКУЭ // Электричество, 2017. № 9. -С. 17-23.

15. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1, –СПб.: Питер, 2009. -512 с.

16. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А., Киташин П.А., Терехов К.И. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ // Fractal simulation, 2013. №1. - С.5-13.

17. Степанов А.С., Степанов С.А., Костюкова С.С. Идентификация параметров моделей элементов электрических сетей на основе теоремы Теллегена //Электротехника, 2016. №7. - С. 8-11.

18. Зеленский Е.Г., Кононов Ю.Г., Левченко И.И. Идентификация параметров распределительных сетей по синхронизированным измерениям токов и напряжений //Электротехника, 2016. №7. - С.3-8.

19. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К расчету трехфазных распределительных сетей в системах автоматизации контроля и учета электроэнергии //Энергетик, 2017. № 4. - С. 28-31.

20. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2020. №1. - С. 93-102.

21. Оморов Т.Т. К проблеме локализации несанкционированного отбора электроэнергии в распределительных сетях в составе АСКУЭ // Приборы и системы.

Управление, контроль, диагностика, 2017, №7. -С. 27-32.
22. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. -М.: Наука, 1973. -832 с.