

УРАВНЕНИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

Предложена новая форма записи уравнений установившегося режима электроэнергетических систем для расчетов в фазных координатах с целью моделирования следующих элементов: двухполюсников нагрузок со статическими характеристиками, включенных между узлами; регулируемых источников реактивной мощности в ветвях; ветвей с генерацией активной и реактивной мощностей; источников электроэнергии, включенных между узлами; ветвей с источниками тока.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, уравнения установившегося режима, фазные координаты

Введение. Традиционные методы расчета режимов электроэнергетических систем базируются на однолинейном представлении трехфазных цепей. Большинство элементов электроэнергетических систем (ЭЭС) отличаются различием пофазных параметров, что приводит к погрешностям при их однолинейном моделировании и усложняет принятие обоснованных технических решений при проектировании и эксплуатации. Поэтому задача создания методов, алгоритмов и программных средств, обеспечивающих моделирование, расчет и анализ режимов электрических сетей, имеющих продольную и поперечную несимметрию, имеет несомненную актуальность.

Наиболее эффективно расчет несимметричных режимов может быть выполнен на основе применения фазных координат. При их использовании электрическая система может описываться трехлинейной схемой или представляться в виде компаунд-сети. В первом случае каждый трехфазный элемент задается тремя сопротивлениями с электромагнитными связями или соответствующими схемами замещения. Число узлов расчетной схемы по отношению к однолинейной сети при

этом утраивается. Во втором случае трехфазная сеть рассматривается, как однолинейная, в которой каждая ветвь представляется матрицей размерности 3×3 , а токи и напряжения – векторами размерности 3. Первый способ позволяет рассматривать любые многофазные элементы, например, линии электропередачи (ЛЭП) с грозозащитными тросами. При втором способе учет таких элементов существенно затрудняется. Для расчета несимметричных режимов ЭЭС и систем электроснабжения железных дорог переменного тока наиболее приемлемым является первый способ представления электрической сети в фазных координатах.

Постановка задачи и методика моделирования. Основную трудность при описании ЭЭС в фазных координатах создают элементы со взаимоиндуктивными связями, к которым относятся многопроводные линии и трансформаторы. В работе [1] предложен единый методологический подход к построению моделей таких элементов, отличающийся математической строгостью получаемых моделей, реализуемых решетчатыми схемами

* - автор, с которым следует вести переписку.

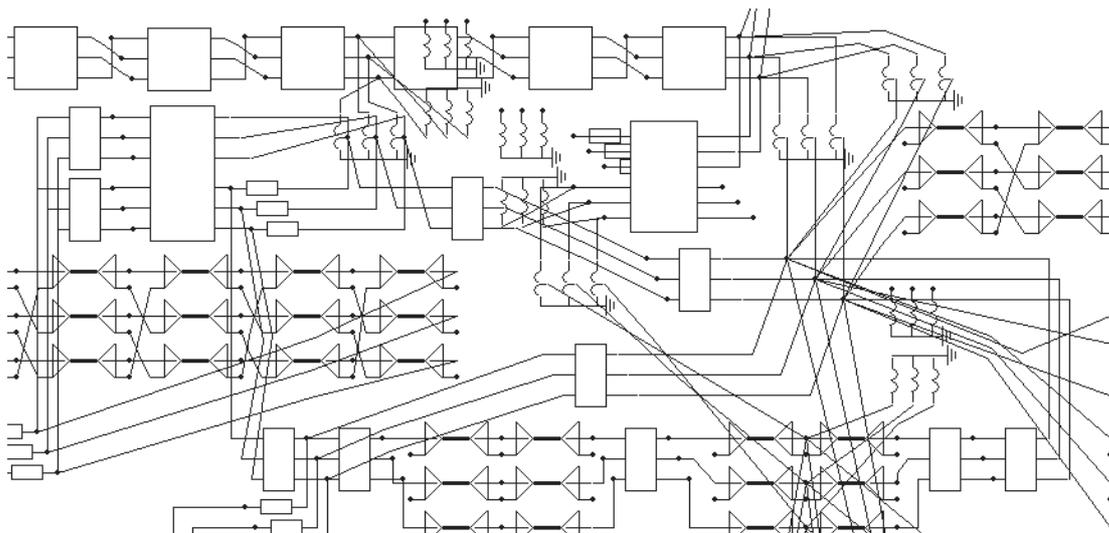


Рис. 1. Графическое представление модели сети

замещения в виде наборов RLC -элементов, соединенных по схеме полного графа. Методика получения решетчатой схемы замещения и отвечающей ей матрицы \underline{Y}_S описана в работах [1, 2]. На основании матриц $\underline{Y}_{Sk} \cdot k=1...n$, отдельных элементов ЭЭС формируется модель сети, пример графического представления которой, сформированный средствами программного комплекса «FAZONORD-качество» [3], разработанного в ИрГУП-Се, показан на рис. 1.

Формирование математической модели сети в виде матрицы проводимостей \underline{Y}_Σ можно проиллюстрировать на примере кольцевой сети, показанной на рис. 2. Эта матрица может быть получена на основе следующего преобразования

$$\underline{Y}_\Sigma = \underline{M}_O \underline{Y}_V \underline{M}_O^T,$$

где $\underline{M}_O = \begin{bmatrix} -\underline{P} & -\underline{P} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{P} & -\underline{P} \\ \underline{P} & \underline{0} & \underline{P} \end{bmatrix}$ – обобщенная

матрица инцидентий, состоящая из подматриц размерностью 3×6 . Строковые блоки, включающие три строки, отвечают трехфазным узлам сети. Столбцовые блоки, состоящие из 6 столбцов, соответ-

ствуют ветвям в однолинейном представлении. В каждом строковом блоке матрицы \underline{M}_O есть хотя бы одна подматрица вида

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [\underline{E} \quad \underline{0}].$$

Она указывает на наличие связи между соответствующим трехфазным узлом и трехфазными ветвями графа схемы сети. Знак плюс означает, что направление ветви задано «от узла», а знак минус – «к узлу». Блочно-диагональная матрица \underline{Y}_V имеет вид

$$\underline{Y}_V = \text{diag } \underline{Y}_{Sk}.$$

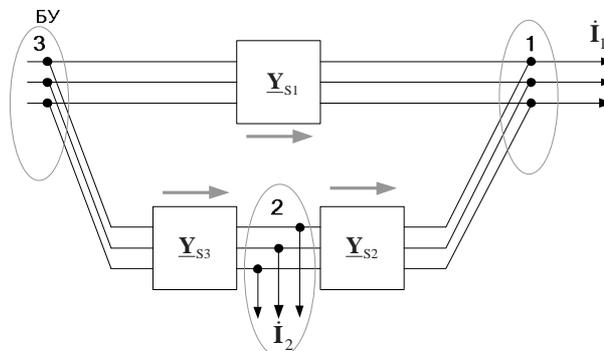


Рис. 2. Схема сети: $\underline{Y}_{Sk}, k=1...3$ – матрицы проводимостей решетчатых схем ЛЭП, серыми стрелками показаны положительные направления токов

На основании полученной матрицы \underline{Y}_Σ формируется система уравнений установившегося режима, которая может быть представлена так

$$\underline{Y}_\Sigma \dot{\underline{U}} = \dot{\underline{I}}, \quad (1)$$

где $\dot{\underline{U}}$ – вектор узловых напряжений; $\dot{\underline{I}}$ – вектор задающих токов.

При фиксации напряжений в балансирующих узлах система (1) может быть сформирована в виде

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_1 & \underline{Y}_{1B} \\ \underline{Y}_{B1} & \underline{Y}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{U}} \\ \dot{\underline{U}}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{I}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

где $\dot{\underline{U}}_B$ – вектор напряжений балансирующих узлов; $\underline{Y}_{1B} = \underline{Y}_{B1}^T$, \underline{Y}_B – блоки, соответствующие ветвям сети, связанным с балансирующими узлами.

После исключения уравнений, отвечающих балансирующим узлам, можно записать

$$\underline{Y}_1 \dot{\underline{U}} = \dot{\underline{I}} - \underline{Y}_{1B} \dot{\underline{U}}_B. \quad (2)$$

Замена токов мощностями приводит к следующей системе нелинейных уравнений установившегося режима (УУР)

$$\underline{Y}_1 \dot{\underline{U}} = \frac{\tilde{\underline{S}}}{\tilde{\underline{U}}} - \underline{Y}_{1B} \dot{\underline{U}}_B, \quad (3)$$

где $\tilde{\underline{S}}$ – вектор комплексно-сопряженных узловых мощностей; $\tilde{\underline{U}}$ – вектор комплексно-сопряженных узловых напряжений.

После разделения действительных и мнимых составляющих система (3) может быть представлена в следующем общем виде:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{0}, \quad (4)$$

где \mathbf{X} – вектор зависимых переменных, включающий действительные и мнимые составляющие (U_k', U_k'') или модули и фазы (U_k, δ_k) узловых напряжений; \mathbf{Y} – вектор независимых переменных, включающий активные и реактивные мощности генераторов и нагрузок.

При моделировании в фазных координатах методика формирования вектора \mathbf{Y} существенно отличается от принятой в традиционной однолинейной по-

становке, при которой нагрузки и генераторы включаются по отношению к общему заземленному узлу. При использовании фазных координат требуется учет нагрузок и генераторов, включенных между незаземленными узлами, что меняет структуру уравнений (4). Кроме того, необходимо иметь возможность включения в ветви источников ЭДС и тока, двухполюсников с заданным модулем или фазой напряжения.

Предполагая наличие в системе n узлов в трехлинейной постановке задачи, полагаем в качестве базисного узла $(n+1)$ -й узел с нулевым потенциалом (землю). Двухполюсники нагрузок в узле k , включенные между данным узлом и землей, могут быть заданы неизменной активной P_{nk} и реактивной Q_{nk} мощностями или полиномиальными моделями статических характеристик [4]:

$$P_{nk} = P_{n0k} \left(a_{0k} + a_{1k} \frac{U_k}{U_{номk}} + a_{2k} \frac{U_k^2}{U_{номk}^2} \right);$$

$$Q_{nk} = Q_{n0k} \left(b_{0k} + b_{1k} \frac{U_k}{U_{номk}} + b_{2k} \frac{U_k^2}{U_{номk}^2} \right).$$

В этих уравнениях: $a_{0k} + a_{1k} + a_{2k} = 1$,

$$b_{0k} + b_{1k} + b_{2k} = 1, \quad U_k = |\dot{U}_k|,$$

$$\dot{U}_k = U_k' + jU_k'', \quad U_k = \sqrt{U_k'^2 + U_k''^2}.$$

Двухполюсники нагрузок, включаемые между двумя узлами, представлены также двумя типами, но статические характеристики становятся более сложными из-за необходимости учета модуля разности напряжений между узлами:

$$P_{nki} = P_{n0ki} \left(a_{0ki} + a_{1ki} \frac{U_k - U_i}{U_{номki}} + a_{2ki} \frac{(U_k - U_i)^2}{U_{номki}^2} \right);$$

$$Q_{nki} = Q_{n0ki} \left(b_{0ki} + b_{1ki} \frac{U_k - U_i}{U_{номki}} + b_{2ki} \frac{(U_k - U_i)^2}{U_{номki}^2} \right);$$

$$U_{ki} = \sqrt{(U_k' - U_i')^2 + (U_k'' - U_i'')^2}.$$

Узлы сети могут содержать нагрузки между узлом и землей, источники активной и реактивной мощности, одним

плюсом соединенные с землей, и шунты на землю. По характеру нагрузок узлы ЭЭС можно разделить на шесть типов:

- узлы без нагрузок и генераций;
- узлы с нагрузками, включенными между узлом и землей и заданными неизменными мощностями (рис. 3а);
- узлы с нагрузками, изменяющимися по статическим характеристикам (рис. 3б);
- узлы с регулируемыми источниками реактивной мощности, с нулевой активной мощностью и тремя диапазонами изменения напряжения для задания закона изменения реактивной нагрузки (рис. 3в);
- узлы с фиксированными генерациями активной и (или) реактивной мощности (рис. 3г);
- узлы, балансирующие активную и (или) реактивную мощность.

В алгоритмическом плане выделение отдельных типов узлов нецелесообразно, поскольку чаще встречаются не отдельные типы узлов, а их сочетания. Традиционно принятая система представления информации об узлах предполагает наличие всех характеристик, часть из которых могут быть нулевыми.

Нагрузочные ветви системы могут быть семи типов, поскольку при расчетах режимов систем электроснабжения железных дорог требуются однофазные источники тока:

- ветви с последовательно соединенными активным и индуктивным элементами и идеальным трансформатором;
- ветви с активной и реактивной нагрузками, заданными величинами потребляемых мощностей, не зависящих от величины напряжения;
- ветви с активной и реактивной нагрузками, заданными статическими характеристиками;
- ветви с регулируемыми источниками реактивной мощности (ИРМ);
- ветви с заданными величинами генерации активной и реактивной мощности;

• ветви с источниками, балансирующими активную и (или) реактивную мощность;

• ветви с источниками тока.

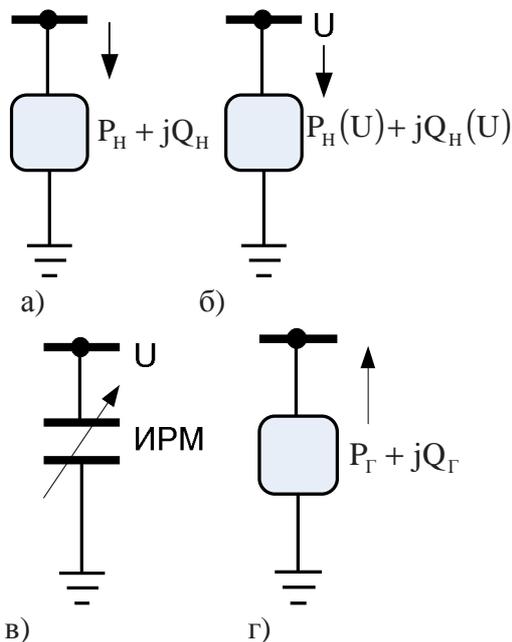


Рис. 3. Типы нагрузочных и генераторных узлов

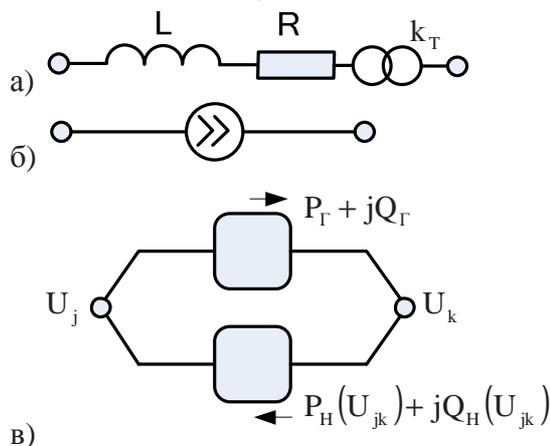


Рис. 4. Типы нагрузочных и генераторных ветвей

Источники ЭДС могут быть преобразованы в источники тока или представлены ветвью, балансирующей одновременно активную и реактивную мощность.

В отличие от узлов ветви разных типов сильно отличаются, и с целью оптимизации алгоритма ветви можно объединить в три группы:

- пассивные RL -ветви с идеальными трансформаторами, рис. 4а;
- ветви с источниками тока, рис. 4б;
- ветви с неизменными или меняю-

щимися по статическим характеристикам нагрузками, обладающие возможностью генерации постоянной активной и реактивной мощности, с разделением в алгоритме нагрузки и генерации, рис. 4в.

В развернутом виде k -е уравнение системы (3) может быть представлено так:

$$-\dot{U}_1 \tilde{U}_k \underline{Y}_{k1} - \dot{U}_2 \tilde{U}_k \underline{Y}_{k2} - \dots - \dot{U}_i \tilde{U}_k \underline{Y}_{ki} - \dots - \dot{U}_n \tilde{U}_k \underline{Y}_{kn} = \tilde{S}_k.$$

Выделив из диагонального члена $\dot{U}_k \tilde{U}_k \underline{Y}_{kk}$ мощность

$\dot{U}_k \tilde{U}_k \underline{Y}_{шк} = P_{шк} - jQ_{шк}$, рассеиваемую в шунте на землю, для ветви ki можно записать

$$-\dot{U}_i \tilde{U}_k \underline{Y}_{ki} + \dot{U}_k \tilde{U}_k \underline{Y}_{ki} = \tilde{U}_k (\dot{U}_k - \dot{U}_i) \underline{Y}_{ki} = \tilde{U}_k \dot{I}_{ki}. \quad (4)$$

Соотношение (4) можно интерпретировать следующими способами в соответствии с типами ветвей:

– как поток мощности в RL -ветви от узла k к узлу i :

$$\tilde{S}_{ki} = P_{ki} - jQ_{ki} = \tilde{U}_k \dot{I}_{ki};$$

– как нагрузку и генерацию в ветви ki за вычетом потока мощности от узла i к узлу k :

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ki\text{нг}} &= P_{ki\text{нг}} - jQ_{ki\text{нг}} = \tilde{U}_k \dot{I}_{ki} = \\ &= (\tilde{U}_k - \tilde{U}_i + \tilde{U}_i) \dot{I}_{ki} = \\ &= P_{hki} - jQ_{hki} - P_{\Gamma ki} + jQ_{\Gamma ki} - P_{ik} + jQ_{ik}, \end{aligned} \quad (5)$$

причем значения мощности нагрузки и мощности генерации вторично оказываются в уравнении для узла i с тем же знаком, что и в уравнении для узла k , а потери мощности в ветви при этом отсутствуют;

– как источник тока в ветви ki с фиксированными модулем и углом тока (с выделением его из суммарного источника тока узла и перенесением в левую часть уравнения):

$$\tilde{S}_{ki\text{ИТ}} = P_{ki\text{ИТ}} - jQ_{ki\text{ИТ}} = \pm \tilde{U}_k \dot{J}_{ki} = \mp \tilde{U}_k \dot{J}_{ik},$$

где первый знак соответствует направлению стрелки источника тока от узла k , второй – в узел k .

В обозначениях индексируемых величин принята система обозначений, в которой номера ветви, следующие первыми в индексе, определяют величины, отнесенные к узлу (k), связанные с ветвью (ki), например, $\tilde{S}_{ki\text{ИТ}}$ означает сопряженный поток мощности из узла k в ветвь ki с источником тока. Если же номера узлов не первые, то это означает величину, отнесенную к элементу, находящемуся в ветви: $Q_{ki\text{ИРМ}}$ – это поток мощности в ветвь с ИРМ, а $Q_{\text{ИРМ}ki}$ – это реактивное потребление ИРМ, находящегося в ветви ki .

В уравнениях (5) правые части определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_k \dot{I}_{ki} - \tilde{U}_i \dot{I}_{ki} &= P_{hki} - jQ_{hki} - P_{\Gamma ki} + jQ_{\Gamma ki} = \\ &= P_{hki} - jQ_{hki}; \\ \dot{I}_{ki} &= \frac{P_{hki} - jQ_{hki}}{\tilde{U}_k - \tilde{U}_i}; \\ P_{ik} - jQ_{ik} &= \tilde{U}_i \dot{I}_{ik} = -\tilde{U}_i \dot{I}_{ki} = \frac{P_{hki} - jQ_{hki}}{1 - \frac{\tilde{U}_k}{\tilde{U}_i}}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ki\text{нг}} &= \tilde{U}_k \dot{I}_{ki} = P_{ki\text{нг}} - jQ_{ki\text{нг}} = \\ &= P_{hki} - jQ_{hki} - P_{ik} + jQ_{ik} \end{aligned}$$

После несложных преобразований для декартовых координат можно записать следующее:

$$\tilde{S}_{ki\text{нг}} = \frac{(P_{hki} - jQ_{hki}) [U_k' (U_k' - U_i') - U_k'' (U_k'' - U_i'')] }{U_{ki}^2} - \frac{j(P_{hki} - jQ_{hki}) [U_k'' (U_k' - U_i') + U_k' (U_k'' - U_i'')] }{U_{ki}^2};$$

$$\text{где } P_{ki\text{нг}} = \frac{A_{ki}}{B_{ki}}; \quad Q_{ki\text{нг}} = \frac{C_{ki}}{B_{ki}};$$

$$\begin{aligned} A_{ki} &= P_{hki} (U_k'^2 - U_k''^2 - U_k' U_i' + U_k'' U_i'') - \\ &- Q_{hki} (2U_k' U_k'' - U_k'' U_i' - U_k' U_i''); \end{aligned}$$

$$B_{ki} = (U_k' - U_i')^2 + (U_k'' - U_i'')^2;$$

$$C_{ki} = Q_{нг ki} (U_k'^2 - U_k''^2 - U_k' U_i' + U_k'' U_i'') + P_{нг ki} (2U_k' U_k'' - U_k'' U_i' - U_k' U_i'')$$

Потоки мощности в RL-ветвь ki из узла k определяются так:

$$P_{ki} = (U_k'^2 + U_k''^2 - U_k' U_i' - U_k'' U_i'') Y_{kia} + (U_k' U_i'' - U_k'' U_i') Y_{kir};$$

$$Q_{ki} = (U_k' U_i'' - U_k'' U_i') Y_{kia} - (U_k'^2 + U_k''^2 - U_k' U_i' - U_k'' U_i'') Y_{kir}.$$

Мощности, рассеиваемые в шунтах, можно найти следующим образом:

$$P_{ш k} = (U_k'^2 + U_k''^2) Y_{kia};$$

$$Q_{ш k} = (U_k'^2 + U_k''^2) Y_{kir}.$$

Потоки мощности в ветви с источниками тока определяются следующими формулами:

$$\tilde{S}_{ki ИТ} = P_{ki ИТ} - jQ_{ki ИТ} = \pm \tilde{U}_k \tilde{J}_{ki} = \pm (U_k' - jU_k'') (J_{ki}' + jJ_{ki}'');$$

Отсюда

$$P_{ki ИТ} = \pm (U_k' J_{ki}' + U_k'' J_{ki}'');$$

$$Q_{ki ИТ} = \pm (-U_k' J_{ki}'' + U_k'' J_{ki}');$$

где знак плюс соответствует направлению стрелки источника тока из узла k , минус – в узел k .

Задание фиксированной генерации в ветви между узлами аналогично заданию нагрузки при смене знака. Сложнее обстоит дело с заданием фиксированного модуля напряжения между узлами для ветви, балансирующей реактивную мощность. В этом случае система уравнений должна быть дополнена уравнением типа

$$U_{ki}^2 = (U_k' - U_i')^2 + (U_k'' - U_i'')^2 = \text{const}.$$

Узел, балансирующий реактивную мощность, характеризуется уравнением такого вида:

$$U_k'^2 + U_k''^2 - U_k^2 = 0.$$

Уравнение для узла k будет содержать нагрузки в узлах, потери мощности в шунтах узлов, потоки мощности в нагрузочно-генераторные ветви, RL-ветви, в ветви-источники тока, а в правой части – генерации в узле:

$$P_{нк} - jQ_{нк} + P_{шк} - jQ_{шк} + \sum_{i \in k, ИТ} (P_{ki ИТ} - jQ_{ki ИТ}) + \sum_{i \in k} (P_{ki} - jQ_{ki}) + \sum_{i \in k, ИТ} (P_{ki ИТ} - jQ_{ki ИТ}) = P_{гk} - jQ_{гk}$$

После разделения вещественных и мнимых частей можно получить уравнения вида (4):

$$f_{Pk} = -P_{гk} + P_{нк} + P_{шк} + \sum_{i \in k, ИТ} P_{ki ИТ} + \sum_{i \in k} P_{ki} + \sum_{i \in k, ИТ} P_{ki ИТ};$$

$$f_{Qk} = -Q_{гk} + Q_{нк} + Q_{шк} + \sum_{i \in k, ИТ} Q_{ki ИТ} + \sum_{i \in k} Q_{ki} + \sum_{i \in k, ИТ} Q_{ki ИТ}.$$

Уравнения для ветвей, балансирующих реактивную мощность, записываются так:

$$f_{Qk} = U_{ki}^2 - (U_k' - U_i')^2 - (U_k'' - U_i'')^2. \quad (8)$$

Уравнения для узлов, балансирующих реактивную мощность, имеют вид

$$f_{Qk} = U_k^2 - U_k'^2 - U_k''^2. \quad (9)$$

Уравнения (6)...(9) образуют полную систему УУР для сети с ветвями, в которых могут быть нагрузки и источники активной и реактивной мощности.

Пример моделирования. В качестве иллюстрации практического использования предложенных уравнений рассматривается задача расчета режимов сети, схема которой показана на рис. 5. Сеть включает источник питания, воздушную линию (ВЛ) напряжением 0.4 кВ (рис. 6) и нагрузки, подключенные между нулевым и фазными проводниками. Расчетная схема, сформированная средствами комплекса программ «FAZONORD-Качество», представлена на рис. 7.

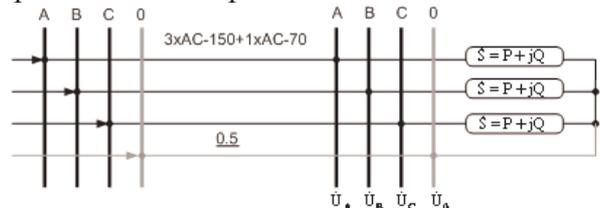


Рис. 5. Схема сети

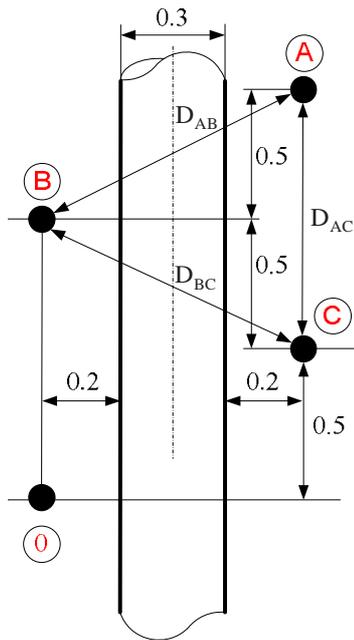


Рис. 6. Расположение проводов ВЛ

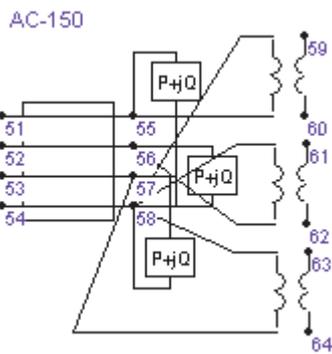


Рис. 7. Расчетная схема

Результаты расчета режимов при симметричных ($\dot{S}_A = \dot{S}_B = \dot{S}_C$) и несимметричных ($\dot{S}_B = \dot{S}_C = 0$) нагрузках сети проиллюстрированы графиками, показанными на рис. 8 и 9. Из анализа полученных результатов можно заключить, что ввиду структурной несимметрии ВЛ (рис. 6) наблюдается различие фазных напряжений даже в симметричных режимах. Это различие становится наиболее заметным при наличии поперечной несимметрии в виде неравенства нагрузок фаз (рис. 9). Следует отметить, что описанные результаты невозможно получить на основе однолинейного моделирования и при использовании симметричных составляющих [6].

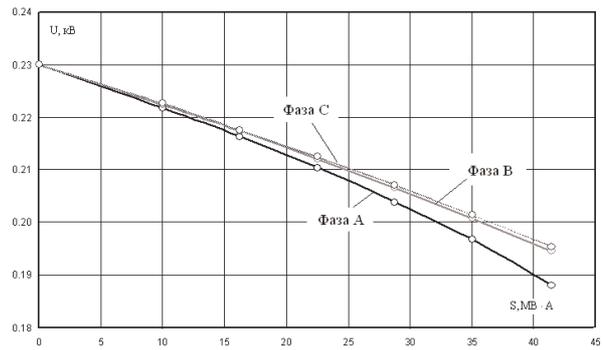


Рис. 8. Изменение напряжений при симметричном нагружении сети

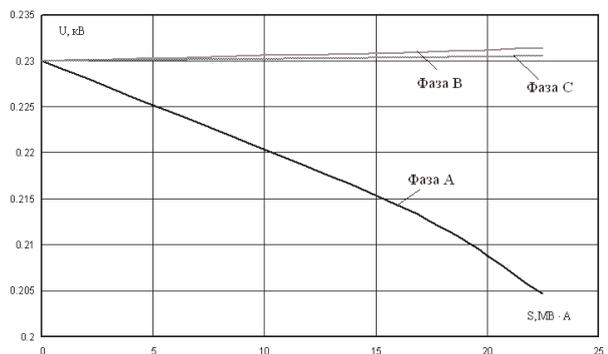


Рис. 9. Изменение напряжений при несимметричном нагружении сети

Выводы

Предложена новая форма записи уравнений установившегося режима ЭЭС для расчетов в фазных координатах с целью моделирования следующих элементов:

- двухполюсников нагрузок со статическими характеристиками, включенных между узлами;
- регулируемых источников реактивной мощности в ветвях;
- ветвей с генерацией активной и реактивной мощностей;
- источников электроэнергии, включенных между узлами;
- ветвей с источниками тока.

Представлен алгоритм и пример расчета режима ЭЭС, содержащей нагрузки между узлами сети.

Литература

1. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Асташин С.М. Управление режимами сис-

тем тягового электроснабжения: монография / Под ред. А.В. Крюкова. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения. 2009. 124 с.

2. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Токо-распределение в проводах высоковольтных линий электропередачи // Системы. Методы. Технологии. №3.2010. С. 68-74.

3. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество / Закарюкин В.П., Крюков А.В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товар-

ным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.

4. В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. В. А. Веникова и В. А. Строева. М: Высш. шк., 1998. 511 с.

5. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

6. Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих. Л.: ОНТИ НКПТ СССР, 1936.

УДК 621.315.1.001.63

Г. А. Большанин, Л. Ю. Большанина*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ОДНОРОДНОМУ УЧАСТКУ ТРЕХФАЗНОЙ ЛЭП ТРЕХПРОВОДНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Предложены расчетная электрическая схема замещения элементарного однородного участка линии электропередачи трехпроводного исполнения для постоянной составляющей напряжения и тока, математическая модель и методика прогнозирования передачи постоянной составляющей по этому участку. Построены графики распределения постоянной составляющей фазного напряжения и линейного тока вдоль несимметричного однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения протяженностью 1000 км.

Ключевые слова: линия электропередачи, постоянные составляющие фазных напряжений, постоянные составляющие линейных токов, постоянная распространения, собственные волновые сопротивления.

В спектрах напряжений и токов, характеризующих электрическую энергию, транспортируемую по участкам электроэнергетических систем, вполне могут присутствовать и постоянные составляющие. Законы распределения постоянных составляющих напряжений и токов по токоведущим частям линии электропередачи (ЛЭП) заметно отличаются от законов распределения гармонических

составляющих напряжений и токов по этим же токоведущим частям.

Построение математической модели энергетического объекта следует выполнять на основании его электрической схемы замещения, элементы которой иллюстрируют процессы преобразования электрической энергии, происходящие в этом объекте.