

УДК 621.311.1.016

Л.Н. Канов, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

СХЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Предложена нелинейная схемная модель электрической сети в стационарном режиме переменного тока, содержащая линейные и нелинейные управляемые источники тока. Показано ее применение для расчета режима электрической сети.

Электрическая сеть как элемент электроэнергетической системы обеспечивает возможность приема мощности электростанций, ее передачу на расстояние, преобразование параметров электроэнергии и ее распределение по территории. Расчеты установившихся режимов в электрических сетях составляют значительную часть общего объема исследований как на стадии проектирования, так и на стадии их эксплуатации. В условиях анализа сложных сетей не только решение, но и составление исходных уравнений установившихся режимов практически невозможно выполнить вручную. Составлению алгоритмов и программ расчета сетей на ЭВМ посвящена обширная литература. В частности, в [1] изложены алгоритмы расчета на основе матричного описания сети, в [2] приведены примеры расчета сложных сетей методами Зейделя и Ньютона. Эти алгоритмы требуют большого объема подготовительной работы по составлению уравнений режима сети и организации их решения. Поэтому представляется актуальной задача автоматизации как составления, так и решения подобных уравнений.

Для решения этой задачи предлагается применение метода схемного моделирования, суть которого заключается в построении схемных моделей электрических сетей, представляющих цепи постоянного тока, и в автоматизированном расчете этих моделей с помощью программного обеспечения персональных компьютеров.

Узловые уравнения электрической сети, содержащей активные и реактивные сопротивления, источники и потребители электроэнергии, могут быть записаны в матричном виде [1]

$$\underline{Y}\dot{\underline{U}} = -\underline{J}, \quad (1)$$

где $\underline{Y}$ – квадратная комплексная матрица узловых проводимостей порядка n ; $\dot{\underline{U}}$ – n -вектор-столбец линейных напряжений узлов; $\underline{J}$ – n -вектор токов источников заданных токов в узлах (полагаем, что все эти источники направлены от узла). Так как генераторы и нагрузки вводятся в расчеты за-

данными значениями мощностей, то можно записать выражение комплексной мощности источника или потребителя в i -м узле как

$$\dot{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{U}_i \bar{J}_i,$$

где знак $\bar{}$ означает комплексное сопряжение. Кроме того, полагаем, что генерируемая мощность отрицательна, а поглощаемая в нагрузках - положительна. Выражая из последнего уравнения ток источника тока i - го узла, получаем

$$J_i = \frac{\bar{S}_i}{\dot{U}_i} = \frac{P_i U'_i + Q_i U''_i}{|\dot{U}_i|^2} + j \frac{P_i U''_i - Q_i U'_i}{|\dot{U}_i|^2}. \quad (2)$$

Таким образом, уравнения (1) и (2) задают линейную электрическую цепь с источниками мощности в узлах [3]. Представляя матрицу узловых проводимостей и вектор линейных напряжений в виде суммы вещественных и мнимых частей

$$\underline{Y} = \underline{G} + j\underline{B}, \quad \dot{\underline{U}} = \underline{U}' + j\underline{U}'',$$

комплексное уравнение (1) можно представить в виде двух вещественных уравнений

$$\begin{cases} \underline{B}\underline{U}'' = \underline{J}_+ + \underline{G}\underline{U}'; \\ \underline{B}\underline{U}' = -\underline{J}_- - \underline{G}\underline{U}'' \end{cases}, \quad (3)$$

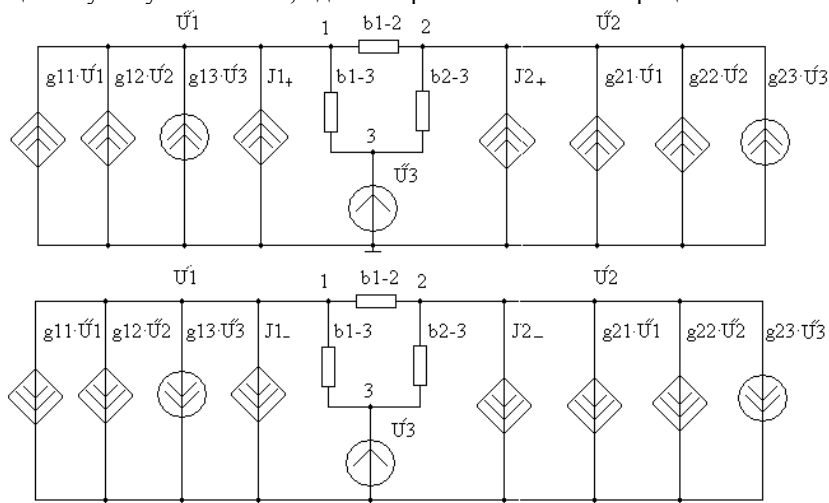
где n -вектор $\underline{J}_+$ составлен из компонентов $\frac{P_i U'_i + Q_i U''_i}{|\dot{U}_i|^2}$, а n -вектор $\underline{J}_-$ - из

компонентов $\frac{P_i U''_i - Q_i U'_i}{|\dot{U}_i|^2}$; $i = 1, 2, \dots, n$.

Первое уравнение в системе (3) можно трактовать как уравнение узловых потенциалов $\underline{U}''$ в резистивной цепи, в которой матрица узловых проводимостей совпадает с матрицей $\underline{B}$. В этой цепи присутствуют источники тока, направленные к узлам, которые определяются вещественной частью выражения (2), и управляемые источники вида $g_{ij} U'_j$, $i, j = 1, 2, \dots, n$, где g_{ij} - элементы матрицы $\underline{G}$.

Аналогично второе уравнение в системе (3) можно трактовать как уравнение узловых потенциалов $\underline{U}'$ в той же резистивной цепи с источниками токов, направленными от узлов, которые определяются мнимой частью (2), и с управляемыми источниками вида $g_{ij} U''_j$. Первая из этих цепей имеет в качестве узловых потенциалов мнимые части линейных напряжений сети, а вторая - вещественные части этих напряжений. Обе цепи связаны между собой через управляемые источники тока с коэффициентами управления g_{ij} , т.е. собственными и взаимными активными проводимостями.

Очевидно, что с ростом количества узлов сети схемная модель в общем случае усложняется, однако в реальных сетях матрицы **G** и **B** обычно

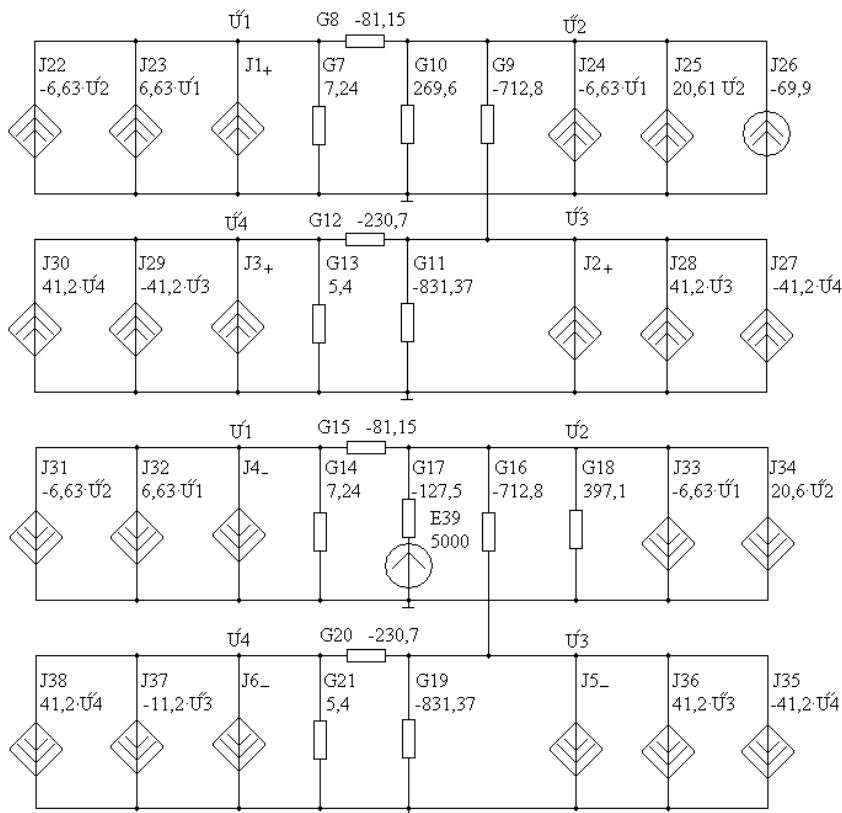


разрезены (и тем сильнее, чем больше число узлов), поэтому в целом схемная модель имеет приемлемую сложность даже для цепей с большим числом узлов.

В качестве примера рассмотрим расчет электрической сети, состоящей из пяти узлов [2] с параметрами (проводимости заданы в сименсах, мощности – в мегаваттах):

$$\begin{aligned}
\underline{Y}_{11} &= 6,63 \times 10^{-4} - j7,391 \times 10^{-3}; & \underline{Y}_{12} &= -6,63 \times 10^{-4} + j8,115 \times 10^{-3}; \\
\underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{14} = \underline{Y}_{15} &= 0; & \underline{Y}_{22} &= 2,061 \times 10^{-3} - j5,243 \times 10^{-2}; & \underline{Y}_{23} &= j7,128 \times 10^{-2}; \\
\underline{Y}_{24} &= 0; & \underline{Y}_{33} &= 4,18 \times 10^{-3} - j0,1775; & \underline{Y}_{25} &= -1,398 \times 10^{-3} + j1,275 \times 10^{-2}; \\
\underline{Y}_{33} &= 4,12 \times 10^{-3} - j0,1775; & \underline{Y}_{34} &= -4,12 \times 10^{-3} + j2,307 \times 10^{-2}; \\
\underline{Y}_{44} &= 4,12 \times 10^{-3} - j2,253 \times 10^{-2}; & \underline{Y}_{55} &= 1,398 \times 10^{-3} - j1,225 \times 10^{-2}; \\
\dot{S}_1 &= 1100 + j34,89; & \dot{S}_2 &= 0; & \dot{S}_3 &= -70 + j242,6; & \dot{S}_4 &= -230 - j120; & \dot{U}_5 &= 500 \text{ кВ}.
\end{aligned}$$

Схемная модель с учетом масштабирования (за базовые значения приняты: $Y_0 = 0,1 \text{ См}$, $U_0 = 10^5 \text{ В}$, $P_0 = 10^9 \text{ Вт}$) изображена на рисунке 2, где обозначено (в относительных единицах):



$$J_{+1} = \frac{-1,1U_1' - 0,0349U_1''}{|\dot{U}_1|^2}; \quad J_{+2} = \frac{0,07U_3' - 0,2426U_3''}{|\dot{U}_3|^2}; \quad J_{+3} = \frac{0,23U_4' + 0,12U_4''}{|\dot{U}_4|^2};$$

$$J_{-4} = \frac{-1,1U_1'' + 0,0349U_1'}{|\dot{U}_1|^2}; \quad J_{-5} = \frac{0,07U_3'' + 0,2426U_3'}{|\dot{U}_3|^2}; \quad J_{-6} = \frac{0,23U_4'' - 0,12U_4'}{|\dot{U}_4|^2}.$$

Расчет выполнен от начальных значений $\dot{U}_1 = 5,25$; $\dot{U}_3 = 2,2$; $\dot{U}_4 = 2,2$. Через 35 тысяч итераций с точностью 0,02% были получены следующие результаты: $\dot{U}_1 = 3,901 + j3,515$; $\dot{U}_2 = 5,026 + j1,1135$; $\dot{U}_3 = 2,358 + j0,4458$; $\dot{U}_4 = 2,084 + j0,01507$, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [1], полученными традиционными методами.

Библиографический список

1. Веников В.А. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков. — М.: Высш. шк., 1998. — 511 с.
2. Ежков В.В. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях / В.В. Ежков, Г.К. Зарудский, Э.Н. Зуев. — М.: Высш. шк., 1999. — 352 с.
3. Канов Л.Н. О применении источников мощности при изучении теоретической электротехники / Л.Н. Канов, К.О. Шадрин // Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. — Севастополь, 1994. — Вып. 1. — С. 32–34.
4. Канов Л.Н. К вопросу расчета электрических цепей на персональной ЭВМ / Л.Н. Канов // Изв. вузов. Сер. Электромеханика. — 1996. — № 1-2. — С. 99–101.

Поступила в редакцию 6.06.2001 г.