

5. Yamaoka A. Numerical Calculation Method for Galloping Oscillation of a bundle conductor Transmission Line // Trans. IEE Japan. – 1979. – В99. – № 9. – P. 569–576.

УДК 621.315

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАДИАЛЬНОЙ СЕТИ

Томкевич А. П., Янушкевич О. А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь (apt@odu.energo.net.by)*

Одним из приоритетных направлений в исследовании задач нелинейных электрических цепей является расчет установившегося режима, требующий решения соответствующей системы нелинейных алгебраических уравнений. К сожалению, в настоящее время в большинстве случаев используются лишь итерационные методы нахождения неизвестных параметров установившегося режима. Обычно такие методы предполагают большой объем вычислительных работ и не всегда являются сходящимися. В связи с этим стала актуальной проблема разрешимости задачи нахождения параметров установившегося режима, что напрямую связано с получением аналитического решения. Ранее [1, 2] предпринимались попытки найти аналитическое решение задачи путем сведения системы нелинейных алгебраических уравнений к параметрическому уравнению. Однако адекватность решения такого уравнения реальному режиму сети определяется выбором значений неизвестных параметров, что в большинстве случаев требует ряда вычислительных экспериментов. Позже [3] для системы уравнений установившегося режима одной линии электропередачи (ЛЭП) получено не только аналитическое решение, но и критерий его существования, что невозможно было сделать методами [1, 2]. Настоящая работа продолжает исследования [3] для случая радиальной сети, состоящей из двух последовательных ЛЭП.

В качестве физической модели линий для расчета режима используем П-образную схему замещения ЛЭП. Это позволяет распространить полученные результаты на линии различного исполнения (кабельные или воздушные) и всевозможных номинальных напряжений.

ЛЭП опишем при помощи направленного взвешенного графа, состоящего из трех узлов и двух ребер (рис. 1). Каждый узел характеризуется двумя параметрами мощностью \underline{S}_i и напряжением \underline{U}_i ($i = 1, 3$). Ребро взвешено четырехмерными векторами $r_{ik}; x_{ik}; g_{ik}; b_{ik}$, $i = 1, 3$, $k = 1, 3$. Компоненты которых будем считать известными величинами, не зависящими от параметров режима \underline{S}_i и \underline{U}_i . Направление графа отражает положительное направление перетока мощности по ЛЭП (на рисунке от узла 1 к узлам 2 и 3).

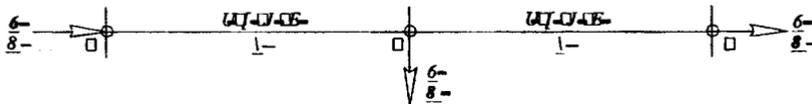


Рис. 1.

Для получения аналитического решения в качестве математической модели используем систему уравнений, полученную с помощью одного из электротехнических методов [4]. В зависимости от способа представления узлов сети система уравнений получается линейной или нелинейной. В случае известных параметров \underline{S}_i и \underline{U}_i одного из узлов рассматриваемой сети получается линейная система уравнений, решение которой приведено в [4]. В других случаях – система уравнений нелинейная и традиционно решается итерационными методами (Ньютона-Рафсона, Зейделя и др.), сходимость которых зависит от выбранного начального приближения и формы записи уравнений.

По аналогии с [3] рассмотрим математическую модель сети, полученную с помощью метода узловых напряжений. Отметим, что форма записи уравнений существенной роли не играет и зависит от известных и неизвестных параметров режима. В соответствии с основными положениями этого метода можно записать систему, в которой каждое уравнение соответствует узлу сети. В матричном виде система уравнений узловых напряжений в форме баланса мощности имеет вид

$$\text{diag} \underline{U} \cdot \bar{Y} \cdot \underline{U} = \underline{S}, \quad (1)$$

где $\text{diag} \underline{U}$ — диагональная матрица напряжений в узлах; \bar{Y} — матрица сопряженных собственных и взаимных проводимостей узлов, зависящая от векторов веса ребра $r_{ik}; x_{ik}; g_{ik}; b_{ik}$; \underline{U} — вектор сопряженных напряжений в узлах; \underline{S} — вектор мощностей в узлах.

Для рассматриваемой сети система (1) имеет вид

$$\begin{cases} \bar{y}_{11} \underline{U}_1 \bar{U}_1 + \bar{y}_{12} \underline{U}_1 \bar{U}_2 = \underline{S}_1; \\ \bar{y}_{21} \underline{U}_2 \bar{U}_1 + \bar{y}_{22} \underline{U}_2 \bar{U}_2 + \bar{y}_{23} \underline{U}_2 \bar{U}_3 = \underline{S}_2; \\ \bar{y}_{32} \underline{U}_3 \bar{U}_2 + \bar{y}_{33} \underline{U}_3 \bar{U}_3 = \underline{S}_3. \end{cases} \quad (2)$$

Узел 1 является балансирующим по мощности, т. е. известен комплекс напряжения \underline{U}_1 и неизвестна мощность \underline{S}_1 . В узлах 2 и 3 считаем напряжения $\underline{U}_2, \underline{U}_3$ неизвестным, а нагрузки $\underline{S}_2, \underline{S}_3$ заданными постоянными мощностями.

Введем следующие обозначения

$$\underline{S}_i = P_i + jQ_i = S_i e^{j\varphi_i}, \quad \underline{U}_i = U_i e^{j\psi_i}, \quad \underline{y}_{ik} = y_{ik} e^{j\alpha_{ik}}, \quad i = \overline{1,3}, \quad k = \overline{1,3}.$$

Опишем аналитический способ нахождения неизвестных параметров установившегося режима.

В начале методами [3] из последних двух уравнений системы (2) выведем

$$\begin{cases} a_1 U_2^4 + b_1 U_3^4 + c_1 U_2^2 U_3^2 + d_1 U_2^2 + e_1 U_3^2 + f_1 = 0; \\ b_2 U_3^4 + c_2 U_2^2 U_3^2 + e_2 U_3^2 + f_2 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь коэффициенты $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$ ($i = \overline{1,2}$) являются действительными числами, зависящими от модулей и аргументов известных параметров системы (2).

Далее после несложных преобразований из (3) получаем уравнение

$$U_3^8 + AU_3^6 + BU_3^4 + CU_3^2 + D = 0$$

где $A, B, C, D \in R$.

Подстановкой $t = U_3^2 - A/4$ последнее уравнение приводится к виду

$$t^4 + Ht^2 + Mt + N = 0,$$

которое равносильно двум квадратным уравнениям

$$2t^2 - 2vt + (H + v^2 + M/v) = 0, \quad (4)$$

$$2t^2 + 2vt + (H + v^2 - M/v) = 0. \quad (5)$$

Коэффициент v находится по формулам Кардано из кубического уравнения, составленного по методу Феррари [5].

Таким образом, нахождение модулей неизвестных напряжений свелось к решению нескольких уравнений второго или третьего порядка от одной действительной переменной. Строго говоря, U_2 легко вычисляем из второго уравнения системы (3) после нахождения U_3 на основании уравнений (4) и (5).

Теперь исключим при помощи второго уравнения из третьего уравнения системы (2) произведение $\underline{U}_3 \overline{\underline{U}}_2$

$$\underline{y}_{32} (\overline{\underline{S}}_2 - \underline{y}_{21} \underline{U}_1 \overline{\underline{U}}_2 - \underline{y}_{22} \underline{U}_2 \overline{\underline{U}}_2) + \underline{y}_{33} \underline{y}_{23} \underline{U}_3 \overline{\underline{U}}_3 = \underline{S}_3 \underline{y}_{23}.$$

Расписав мнимую и действительную часть нового уравнения, находим неизвестный аргумент ψ_2 . Аналогично находится аргумент ψ_3 из второго уравнения системы (2).

И наконец, комплекс мощности \underline{S}_1 очевидным образом вычисляется из первого уравнения системы (2).

Если положить $\underline{S}_2 = 0$, то полученные точные решения системы (2) позволяют определять напряжение в любой точке ЛЭП при заданном установившемся режиме.

В заключении отметим, что указанный аналитический способ нахождения неизвестных параметров позволяет получить необходимые и достаточные условия существования установившегося режима рассматриваемой сети, а также указать число теоретически возможных установившихся режимов.

Литература

1. Прокуроров Н. С. Общий метод решения системы нелинейных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы. *Электромеханика*. №9. 1988. С. 13 – 16.
2. Прокуроров Н. С. Аналитическое решение уравнений установившегося режима электроэнергетической системы. *Электромеханика*. №8. 1995. С. 57 – 60.
3. Томкевич А. П., Янушкевич О. А. О точном решении системы уравнений узловых напряжений в форме баланса мощности. *Вестник БГПА*. №1. 2002. С. 63 – 65.
4. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем.– М.: Энергоатомиздат, 1988.– 288 с.
5. Курош А. Г. Курс высшей алгебры – М.: Наука, 1968.– 431 с.

УДК 697.34

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА РАЙОННОЙ СТАНЦИИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Седнин В.А., Седнин А.В., Кухта А.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В связи с массовым внедрением средств регулирования тепловой нагрузки у потребителей теплоты в системах централизованного теплоснабжения актуальным является вопрос о влиянии их работы на режимы теплоисточника. Это касается как состояния полного охвата потребителей средствами регулирования, так и состояния, когда регуляторы установлены только у части потребителей. Автоматизация режимов потребления требует пересмотра и структуры, и схем энергогенерирующего оборудования, что в свою очередь требует проведения