

## К РАСЧЕТУ СЛОЖНЫХ ЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗОК

Г. А. Назаренкова

(Представлена профессором, доктором техн. наук В. К. Щербаковым)

При рассмотрении необходимости учета статических характеристик нагрузок в расчете линий электропередачи было выяснено [6], что ошибка в расчете без учета статических характеристик нагрузок достигает порядка 10%. При этом ошибка возрастает с увеличением отклонения напряжения у потребителя от номинального, а отклонение напряжения от номинального у потребителя будет тем больше, чем больше передаваемая мощность и длина передачи.

Современные замкнутые сети имеют протяженность отдельных участков сети порядка 80—100 км и более. Конфигурация замкнутых сетей может быть очень сложная. Поэтому определение потокораспределения в таких сетях — задача весьма трудоемкая.

Нагрузки в узлах замкнутой сети задаются обычно мощностями, которые при определении потокораспределения считаются неизменными. В действительности мощность питаемых от сети нагрузок изменяется в зависимости от подведенного напряжения.

В практике расчета замкнутых сетей имеется несколько методов их расчета (метод преобразования сети, метод контурных уравнений, метод узловых напряжений и др.).

Наиболее общим из них является метод узловых напряжений. Используя этот метод расчета, можно наиболее просто учесть статические характеристики нагрузок. По закону Кирхгофа составляются уравнения равновесия токов в узлах сети. Нагрузки по звеньям сети можно выразить через напряжение узлов и постоянные звеньев. В результате получится система уравнений с неизвестными напряжениями в узлах [1].

Для рис. 1 уравнения баланса токов узлов имеют следующий вид:

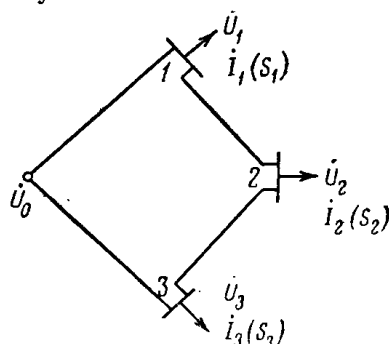


Рис. 1.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{U}_0 - \dot{A}_{01}\dot{U}_1}{\dot{B}_{01}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{A}_{21}\dot{U}_1}{\dot{B}_{21}} &= \dot{I}_1; \\ \frac{\dot{U}_1 - \dot{A}_{12}\dot{U}_2}{\dot{B}_{12}} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{A}_{32}\dot{U}_2}{\dot{B}_{32}} &= \dot{I}_2; \\ \frac{\dot{U}_0 - \dot{A}_{03}\dot{U}_3}{\dot{B}_{03}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{A}_{23}\dot{U}_3}{\dot{B}_{23}} &= \dot{I}_3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Токи в узлах должны быть известны. Кроме того, напряжением одного из узлов необходимо задаться. Таким образом, составляется  $(n-1)$  уравнение ( $n$ —число узлов). Ввиду того, что нагрузки узлов обычно задаются в мощностях, токи правых частей уравнений можно заменить отношениями мощностей к сопряженным значениям напряже-

Полученную систему уравнений (1) можно записать в общепринятой форме [2]:

ИЛИ

В общем виде система уравнений узловых напряжений может быть записана:

Таким образом, получается система нелинейных уравнений. Решить эту систему уравнений прямым путем — задача очень трудная. Наиболее просто система нелинейных уравнений решается методом итерации [2 и 4]. Прежде чем воспользоваться методом итерации, необходимо систему уравнений привести к виду, удобному для итерирования. Это можно сделать двумя способами. В одном из способов предполагается, что сеть имеет одну ступень напряжения, а узел с заданным напряжением совпадает с узлом, примыкающим к регулирующей станции (например,  $\dot{U}_2$ ). Из соответствующих узловых уравнений (3) выделяется по одному напряжению узлов. Для этого все уравнения системы делятся на свои диагональные коэффициенты.

178

В результате получается:

[illegible]

[illegible]

Рис. 2.

или

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_\kappa &= A\dot{U}_\kappa + B\dot{I}_\kappa; \dot{I}_\kappa = C\dot{U}_\kappa + D\dot{I}_\kappa, \\ \dot{U}_\mu &= D\dot{U}_\mu - B\dot{I}_\mu; \dot{I}_\mu = -C\dot{U}_\mu + A\dot{I}_\mu, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Уравнения балансов тока по узлам можно записать:

$$I_{III} = I_{2III} - I_{\theta III}.$$

$$\begin{aligned} & \left( \dot{C}_1 + \frac{\dot{A}_1 \dot{A}_a}{\dot{B}_a} + \frac{\dot{A}_1 \dot{A}_6}{\dot{B}_6} \right) \dot{U}_1 - \frac{\dot{A}_2}{\dot{B}_6} \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{B}_a} - \left( \frac{\dot{A}_a \dot{B}_1}{\dot{B}_a} + \frac{\dot{A}_6 \dot{B}_1}{\dot{B}_6} + \dot{D}_1 \right) \dot{I}_1 + \frac{\dot{B}_2 \dot{I}_2}{\dot{B}_6}; \\ & - \frac{\dot{A}_1 \dot{U}_1}{\dot{B}_6} + \left( \dot{C}_2 + \frac{\dot{A}_6 \dot{A}_2}{\dot{B}_6} + \frac{\dot{A}_6 \dot{A}_2}{\dot{B}_6} \right) \dot{U}_2 - \frac{\dot{A}_3 \dot{U}_3}{\dot{B}_6} = \\ & = \frac{\dot{B}_1 \dot{I}_1}{\dot{B}_6} - \left( \dot{D}_2 + \frac{\dot{A}_6 \dot{B}_2}{\dot{B}_6} + \frac{\dot{A}_6 \dot{B}_2}{\dot{B}_6} \right) \dot{I}_2 + \frac{\dot{B}_3 \dot{I}_3}{\dot{B}_6}; \\ & - \frac{\dot{A}_2 \dot{U}_2}{\dot{B}_6} + \left( \dot{C}_3 + \frac{\dot{A}_2 \dot{A}_3}{\dot{B}_2} + \frac{\dot{A}_6 \dot{A}_3}{\dot{B}_6} \right) \dot{U}_3 = \\ & = \frac{\dot{U}_0}{\dot{B}_2} + \frac{\dot{B}_2 \dot{I}_2}{\dot{B}_6} - \left( \frac{\dot{A}_6 \dot{B}_3}{\dot{B}_2} + \frac{\dot{A}_6 \dot{B}_3}{\dot{B}_6} + \dot{D}_3 \right) \dot{I}_3. \end{aligned}$$

В случае учета при расчете статических характеристик мощности, потребляемые нагрузками, будут функциями подведенного к ним напряжения:  $\dot{S}_m = f(\dot{U}_m)$ .

[illegible]
$$\dot{A}_{mn} \dot{U}_n = \dot{C}.$$

или иначе:

$$\begin{bmatrix} -\dot{a}_{11}, & -\dot{a}_{12}, & \dots, & -\dot{a}_{1n} \\ -\dot{a}_{21}, & \dot{a}_{22}, & \dots, & -\dot{a}_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\dot{a}_{n1}, & -\dot{a}_{n2}, & \dots, & -\dot{a}_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \cdot \\ \dot{U}_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{C}_1 \\ \dot{C}_2 \\ \cdot \\ \dot{C}_n \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Полученная система уравнений невелика и решать такую систему наиболее просто методом итераций.

Привести систему уравнений (7) к виду, удобному для итерации, можно путем деления каждого уравнения системы на диагональный элемент (так как диагональные элементы матрицы  $A$  преобладают над остальными элементами).

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - \frac{\dot{a}_{12}}{\dot{a}_{11}} \dot{U}_2 - \dots - \frac{\dot{a}_{1n}}{\dot{a}_{11}} \dot{U}_n &= \frac{\dot{C}_1}{\dot{a}_{11}}, \\ . &. . . . . \\ - \frac{\dot{a}_{n1}}{\dot{a}_{nn}} \dot{U}_1 - \frac{\dot{a}_{n2}}{\dot{a}_{nn}} \dot{U}_2 - \dots + \dot{U}_n &= \frac{\dot{C}_n}{\dot{a}_{nn}}, \end{aligned}$$

ИЛИ

[illegible]

Преобразовать полученную систему уравнений к виду, удобному для итерации, можно и другим путем. Для этого нужно решить систему уравнений (8) относительно неизвестных напряжений узлов.

В общем виде это решение может быть записано так:

$$(\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n) = A^{-1} (C_1, C_2, \dots, C_n),$$

где  $A^{-1}$  — обратная матрица.

В развернутом виде:

[illegible]

Таким образом, система узловых уравнений может быть составлена в виде системы уравнений (9) и в виде системы уравнений (10). Необходимо выяснить, в каких условиях будет обеспечена стоимость процесса итерации при решении подобных уравнений. Быстрота сходимости процесса итерации зависит от того, как удачно будет выбрана форма уравнений и как удачно выбраны первоначальные значения неизвестных, на основе которых будет строиться весь итеративный процесс. Предполагается, что расчет ведется с учетом статических характеристик на-



## Выводы

1. Наиболее просто учесть статические характеристики нагрузок в расчете замкнутых сетей при использовании метода узловых напряжений.
2. Расчет желательно при этом вести с учетом понижающих трансформаторов методом итерации.
3. Процесс итерации сходится быстрее для системы уравнений вида (10).

## Литература

1. Щербakov В. К., Расчет напряжений и токораспределения мощностей в сложных электрических системах при нормальном режиме, Юбилейный сборник Томского индустриального института, 1940.
  2. Фазылов Х. Ф., Теория и методы расчета электрических систем, АН УзССР, 1953.
  3. Мельников Н. А., Расчеты режимов работы сетей электрических систем, Госэнергоиздат, 1950.
  4. Фадеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры, Гостехтеоретиздат, 1950.
  5. Скарборо Дж., Численные методы математического анализа, Гостехтеоретиздат, 1934.
  6. Щербakov В. К. и Назаренкова Г. А., Допустимо ли в расчетах электрических сетей пренебрегать изменением мощности нагрузок при отклонениях напряжений на потребительских подстанциях? Известия ТПИ, т. 72, 1952.
-