УДК 621.311

# О РАСЧЕТАХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## К. А. Ларионов

<sup>1</sup> larkirill2017@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)

**Аннотация.** В настоящей статье приведена модель сложной электроэнергетической системы, по своим свойствам схожая с реальными системами. Ее установившийся режим рассчитан двумя популярными методами: составлены системы уравнений, произведено решение этих систем различными способами. Проведен анализ процессов решения и полученных результатов.

**Ключевые слова:** электрические сети, электроэнергетические системы, установившийся режим, математическая модель, анализ, расчет.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Электроэнергетические системы (ЭЭС) – это большие сложные динамические системы, управляемые различными способами на различных уровнях системы (от ручного до полностью автоматического) с широко настраиваемыми обратными связями.

Управление ЭЭС требует расчета режимов, в частности, квазиустановившихся.

Расчет режимов работы производится с помощью различных методов (математических моделей).

Обычно, реальные ЭЭС содержат несколько генерирующих узлов.

На рис. 1 представлена схема модели сложнозамкнутой изолированной ЭЭС 220 кВ.

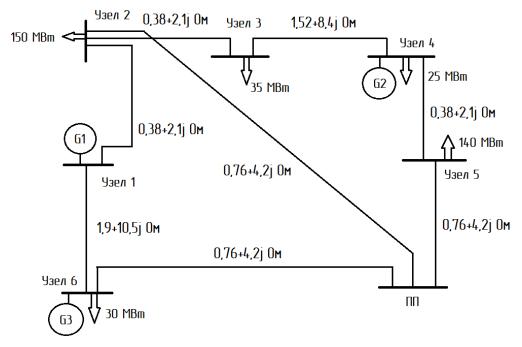


Рис. 1. Схема ЭЭС

Схема содержит 7 узлов, 3 из которых – генерирующие, 8 ветвей, образующих 2 независимых контура. Модель обладает свойствами реальных, сложных ЭЭС.

Режим ЭЭС рассчитан 2-мя основными методами и произведено сравнение с результатами расчетов для этой схемы, полученных в сертифицированной программной среде RastrWin.

Рассмотрим расчет методом контурных мощностей в матричной форме [1],[4]:

- 1) сначала пронумеровываются ветви в произвольном положительном направлении;
- 2) пронумеровываются все узлы, кроме балансирующего. Пронумеровываются контуры, обычно по часовой стрелке;
  - 3) составляются матрицы инциденций (соединений в ЭЭС):

Первая матрица инциденций M заполняется в соответствии с ветвями и узлами ЭЭС: строки соответствуют узлам, столбцы — ветвям. Если ветвь входит в узел то в соответствующей клетке матрицы записывается «-1», если выходит из узла — «1», если ветвь не связана с узлом — «0» (таб. 1). Далее составляется вторая матрица инциденций N, в которой столбцы соответствуют ветвям, строки — контурам;

4) Составляется матрица сопротивлений Z, куда, в диагональные клетки, вписываются сопротивления ветвей, эта матрица умножается на вторую матрицу инциденций и, путем соединения полученной матрицы и первой матрицы инциденций, составляется матрица A (таблица1).

Объединенная матрица А

Таблица 1

-1	1	0	0	0	0	0	1	
0	-1	1	0	0	0	0	0	
0	0	-1	1	0	0	0	0	
0	0	0	-1	1	0	0	0	
0	0	0	0	-1	-1	0	-1	
0	0	0	0	0	1	-1	0	
0,38+2,1j	0	0	0	0	-0,76-4,2i	-1,9-10,5j	0,76+4,2j	
0	0,38+2,1j	1,52+8,4j	0,38+2,1j	0,76+4,2j	0	0	-0,76-4,2j	

Далее составляется вектор-столбец мощностей в узлах S, где нагрузки берутся со знаком «-», генерации — со знаком «+», после них в последующих клетках вписываются алгебраические суммы ЭДС каждого контура, в нашем случае они равняются нулю, при умножении S на  $A^{-1}$  получим вектор-столбец мощностей в ветвях, знаки которых соответствуют произвольно-положительно взятым направлениям потокораспределения. В таблице 2 представлены полученные значения мощностей в ветвях по модулю.

Объединенная матрица А

Таблица 2

Ветви	1-2	2-3	3-4	4-5	5-ПП	6-ПП	1-6	2-ПП
Мощности (MBA)	192,917	44,583	9,583	64,593	75,417	77,083	7,083	1,667

Полученные значения относительны произвольно положительно взятым направлениям ветвей, их мнимая составляющая пренебрежимо мала.

Аналогично выполнен расчет по методу узловых потенциалов [2],[3]. Для составления системы уравнений по методу узловых потенциалов необходимо вычислить матрицу собственных и взаимных проводимостей Y:

$$Y = M \cdot Z^{-1} \cdot M^T. \tag{1}$$

где M — первая матрица инциденций,

 $Z^{-1}$  – обратная матрица сопротивлений,

 $M^{T}$ - транспонированная первая матрица инциденций.

Система уравнений, составленная по методу узловых потенциалов, имеет структуру:

$$\begin{cases} \frac{S_2}{\overline{U}_2} \cdot Y_{22}^{-1} + \frac{S_3}{\overline{U}_3} \cdot Y_{23}^{-1} + \frac{S_4}{\overline{U}_4} \cdot Y_{24}^{-1} + \frac{S_5}{\overline{U}_5} \cdot Y_{25}^{-1} + \frac{S_6}{\overline{U}_6} \cdot Y_{26}^{-1} - U_{\rm B} = U_2, \\ \vdots \\ \frac{S_2}{\overline{U}_2} \cdot Y_{62}^{-1} + \frac{S_3}{\overline{U}_3} \cdot Y_{63}^{-1} + \frac{S_4}{\overline{U}_4} \cdot Y_{64}^{-1} + \frac{S_5}{\overline{U}_5} \cdot Y_{65}^{-1} + \frac{S_6}{\overline{U}_6} \cdot Y_{66}^{-1} - U_{\rm B} = U_6. \end{cases}$$

$$(2)$$

где:  $Y_{ij}$  – взаимная проводимость узлов і и j;

 $Y_{ii}$  — собственная проводимость i-го узла. Эти значения берутся из матрицы  $Y^{-1}$ ;

 $S_i$  — мощность *i*-го узла;

 $\overline{U}_i$  – комплексно-сопряженное напряжение i-го узла;

 $rac{S_{m{i}}}{\overline{U}_{m{i}}}$  – узловой ток  $J_{m{i}}$ ;

 $U_{\rm B}$  – напряжение базисного узла.

 $S_{\Pi\Pi}$  рассматриваемой ЭЭС равен 0, поэтому в системе уравнений не записан.

В таблицах 3–5 представлены результаты последних итераций, полученные в процессе расчета различными методами при допустимой погрешности  $\epsilon \leq 0.00001$ .

Таблица 3 Значения узловых напряжений и погрешностей є, полученные методом простой итерации

Узлы	2	3	4	5	ПП	6
Напряжения (кВ)	219,65016	219,57010	219,49416	219,38091	219,64587	219,91625
$arepsilon \cdot 10^6$	4,8	6,3	9,7	12,0	7,0	4,0

Таблица 4 Значения узловых напряжений и погрешностей є, полученные методом Зейделя

Узлы	2	3	4	5	ПП	6
Напряжения (кВ)	219,67449	219,60147	219,53935	219,43607	219,67999	219,93909
$\varepsilon \cdot 10^6$	6,5	6,2	11,0	19,0	0,17	0,15

Таблица 5

one remain journelment in not permitted of notify remained metodom reported								
Узлы	2	3	4	5	ПП	6		
Напряжения (кВ)	219,66601	219,58878	219,52213	219,41026	219,67146	219,93810		
$\varepsilon \cdot 10^6$	1,7	2,2	37,8	46,0	0,28	0,19		

Значения узловых напряжений и погрешностей г. полученные метолом Ньютона

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод контурных уравнений реализован системой линейных уравнений, ее решение дало точные результаты. Решение нелинейной системы узловых уравнений потребовало применения итерационных методов.

Кроме того, первая матрица инциденций включает 6 строк, в то время как вторая — всего 2. В случае приведенной ЭЭС, метод контурных уравнений более предпочтителен. Однако в реальных ЭЭС количество узлов сопоставимо с количеством ветвей, выделение каждого независимого контура может оказаться трудной задачей, в таком случае метод узловых потенциалов более универсален, поэтому оба метода актуальны на сегодняшний день.

Также рассмотрены методы решения систем нелинейных уравнений, которые заключаются в повторяющихся расчетах до достижения заданной точности. Метод Ньютона потребовал в 2 раза (квадратично) меньше итераций, чем методы простой итерации и Зейделя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Блок В. М.** Электрические сети и системы: учебное пособие для электроэнергетических специальностей вузов. М.: Высшей школы, 1986. 430 с.
  - 2. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
- 3. **Идельчик В. И.** Расчеты установившихся режимов электрических сетей энергосистем на ЭВМ: Учеб. Пособие Новочеркасск: НПИ, 1982. 89 с.
- 4. **Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В.** Применение ЭВМ для расчета и проверки устойчивости режима сложной энергосистемы: учебное пособие. Уфимск. Гос. авиац. Техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2011. 155 с.

#### ОБ АВТОРАХ

ЛАРИОНОВ Кирилл Александрович, магистр ПИШ «Моторы будущего» Уфимский университет науки и технологий (2024).

#### **METADATA**

Title: On calculations of electric power systems modes.

Authors: K.A. Larionov

Affiliation:

Ufa University of science and technology (UUST), Russia.

Email: larkirill2017@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (31), pp. 79-82, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** This article presents a model of a complex electric power system, similar in its properties to real systems. Its steady state is calculated using two popular methods: systems of equations are compiled, and these systems are solved in various ways. An analysis of the solution processes and the results obtained is conducted.

Key words: electrical networks, electric power systems, steady state, mathematical model, analysis, calculation.

About authors

LARIONOV Kirill Aleksandrovich, Master of the AES "Motors of the Future" Ufa University of Science and Technology (2024).