

УДК 621.311

РАСЧЕТ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ МЕТОДОМ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТАХ

Рогацевич В.Р.

Научный руководитель – м.т.н., старший преподаватель Волков А.А.

Расчет установившихся режимов ЭС в классическом виде заключается в определении напряжений в узлах сети, используя которые, находят потокораспределение и потери мощности. Математически эта задача формулируется как решение системы нелинейных алгебраических или тригонометрических уравнений, описывающих режим. В основе такого описания состояния ЭС лежат законы Кирхгофа и Ома, устанавливающие связи между токами, напряжениями и параметрами сети. Непосредственно применение уравнений Кирхгофа неэффективно и в алгоритмах для ЭВМ не используется. Для построения соответствующих алгоритмов электрического расчета наиболее эффективными и удобными для реализации на ЭВМ являются уравнения узловых напряжений (потенциалов), связывающие напряжения в узлах ЭС и мощности (токи), подводимые к этим узлам, через параметры схемы.

Уравнения узловых напряжений (УУН) следуют из первого закона Кирхгофа в результате представления по закону Ома токов во всех ветвях через узловые напряжения и проводимости ветвей.

Существуют 2 способа записи УУН:

- в прямоугольных координатах;
- в полярных координатах/

УУН в прямоугольной системе координат бывают в форме баланса мощностей и токов [2, 321].

При расчетах электрических режимов ЭЭС на ЭВМ целесообразно использовать наиболее точные модели электрических нагрузок. Узловые нагрузки генераторов и потребителей задаются их нелинейной зависимостью от узловых напряжений в виде узлового тока (нелинейного источника тока) [2, 321], т. е.

$$I_i = \frac{S_i^*}{3 \cdot U_{\phi i}} = \frac{S_i^*}{\sqrt{3} \cdot U_i} \quad (1)$$

Отмеченная нелинейность проявляется при представлении в узлах нагрузки потребителей или генераторов неизменной мощностью:

$$S_i = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot I_i = P_i + j \cdot Q_i = const, \quad (2)$$

Если во всех n узлах (кроме балансирующего, имеющего номер $n + 1$) заданы нагрузки указанными моделями, то для ЭС трехфазного переменного тока имеем систему n нелинейных УУН с комплексными коэффициентами. Различают две формы таких уравнений:

уравнение баланса токов:

$$w_{li} = Y_{ii} \cdot \dot{U}_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} \cdot \dot{U}_j - Y_{i\delta} \cdot \dot{U}_\delta + \frac{S_i^*}{U_i} = 0, \quad i = \overline{1, n} \quad (3)$$

уравнение баланса мощностей:

$$w_{Si} = Y_{ii} \cdot U_i^2 - U_i \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} \cdot \dot{U}_j - U_i \cdot Y_{i\delta} \cdot \dot{U}_\delta + S_i = 0, \quad i = \overline{1, n}; \quad (4)$$

В данных уравнениях функции w_{li}, w_{Si} комплексных переменных напряжений узлов соответствуют небалансу полного тока или полной мощности в i -м узле.

В системе нелинейных уравнений (1.3) наряду с комплексами напряжений в число неизвестных входит реактивная мощность PV узлов. Недостаток этого способа является увеличение размерности системы нелинейных уравнений на число PV узлов, которое в ЭС может быть довольно большим.

В системе (4) w_{Si} есть небаланс квадрата модуля напряжения. Порядок системы равен $2n$. По сравнению с (3) число решаемых уравнений меньше на число PV узлов

Регулируемые узлы типа PV – узлы с заданным модулем напряжения, в которых имеется регулятор или любое другое средство поддержания модуля напряжения.

УУН в прямоугольной системе координат. Примем комплексные величины в виде:

$$Y_{ij} = g_{ij} + j \cdot b_{ij}, \quad U_i = U_i' + j \cdot U_i'', \quad S_i = P_i + j \cdot Q_i; \quad (5)$$

В результате замены комплексов через их составляющие и выполнения несложных алгебраических преобразований в уравнениях (1.3) и (1.4), выделив в них отдельно действительные и мнимые составляющие небалансов токов:

$$w_{li} = w_{lai}(\overline{U}', \overline{U}'') + j \cdot w_{lri}(\overline{U}', \overline{U}''), \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

и небаланса мощностей:

$$w_{Si} = w_{Pi}(\overline{U}', \overline{U}'') + j \cdot w_{Qi}(\overline{U}', \overline{U}''), \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Получим следующие системы нелинейных уравнений двойного порядка с вещественными коэффициентами:

в форме баланса активных и реактивных составляющих токов:

$$w_{lai} = g_{ii} \cdot U_i' - b_{ii} \cdot U_i'' - \sum_{j=1, j \neq i}^n (g_{ij} \cdot U_j' - b_{ij} \cdot U_j'') - \operatorname{Re}\left(\frac{S_i^*}{U_i}\right) = 0, \quad (8a)$$

$$w_{lri} = b_{ii} \cdot U_i' + g_{ii} \cdot U_i'' - \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} (b_{ij} \cdot U_j' + g_{ij} \cdot U_j'') - \operatorname{Im}\left(\frac{S_i^*}{U_i}\right) = 0, \quad (8б)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

и в форме баланса активных и реактивных мощностей:

$$w_{P_i}(\overline{U}', \overline{U}'') = g_{ii} \cdot (U_i'^2 + U_i''^2) - \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij} \cdot (U_i' \cdot U_j' + U_i'' \cdot U_j'') -$$

$$- \sum_{j=1, j \neq i}^n b_{ij} \cdot (U_i' \cdot U_j'' - U_i'' \cdot U_j') - P_i = 0 \quad (9a)$$

$$w_{Q_i}(\overline{U}', \overline{U}'') = b_{ii} \cdot (U_i'^2 + U_i''^2) - \sum_{j=1, j \neq i}^n b_{ij} \cdot (U_i' \cdot U_j' + U_i'' \cdot U_j'') -$$

$$- \sum_{j=1, j \neq i}^n g_{ij} \cdot (U_i' \cdot U_j'' - U_i'' \cdot U_j') + Q_i = 0 \quad (9b)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

где $\overline{U}' = \{U_1' U_2' \dots U_n'\}$, $\overline{U}'' = \{U_1'' U_2'' \dots U_n''\}$ - векторы действительных и мнимых составляющих напряжений, относительно которых решаются данные системы нелинейных уравнений.

Выполним расчет электрической сети [3], представленной на рисунке 1, с помощью УУН в прямоугольной системе координат [1].

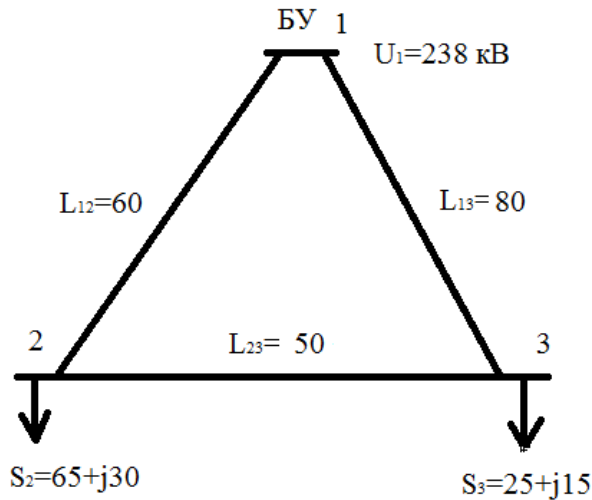


Рисунок 1 – Расчетная схема электрической сети

Номинальное напряжение электрической сети равно 220 кВ, а напряжение в балансирующем узле принимаем равным 238 кВ.

Первая матрица соединений «узлы-ветви»:

$$M_s := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Первая матрица инцидентности без БУ:

$$M := \text{submatrix}(M_s, 2, 3, 1, 3) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Диагональная матрица сопротивлений ветвей, Ом:

$$dZ_v := \text{diag}(Z_v) = \begin{pmatrix} 5.88 + 25.74i & 0 & 0 \\ 0 & 6 + 33.6i & 0 \\ 0 & 0 & 6.05 + 21.75j \end{pmatrix}$$

Найдем матрицу узловых проводимостей, См:

$$Y_y := M_s \cdot dZ_v^{-1} \cdot M_s^T = \begin{pmatrix} 0.014 - 0.066i & -8.435 \times 10^{-3} + 0.037i & -5.15 \times 10^{-3} + 0.029i \\ -8.435 \times 10^{-3} + 0.037i & 0.02 - 0.08i & -0.012 + 0.043i \\ -5.15 \times 10^{-3} + 0.029i & -0.012 + 0.043i & 0.017 - 0.072i \end{pmatrix}$$

Матрица действительных и мнимых составляющих проводимостей:

$$G := \text{Re}(Y_y) = \begin{pmatrix} 0.014 & -8.435 \times 10^{-3} & -5.15 \times 10^{-3} \\ -8.435 \times 10^{-3} & 0.02 & -0.012 \\ -5.15 \times 10^{-3} & -0.012 & 0.017 \end{pmatrix}$$

$$B := \text{Im}(Y_y) = \begin{pmatrix} -0.066 & 0.037 & 0.029 \\ 0.037 & -0.08 & 0.043 \\ 0.029 & 0.043 & -0.072 \end{pmatrix}$$

Принимаем V – действительная часть напряжения и W – мнимая часть напряжения.

Зададим начальные приближения:

$$V1 := U1 = 238 \quad V2 := 220 \quad V3 := 220$$

$$W1 := 0 \quad W2 := 10 \quad W3 := 10$$

Блок решения в программе Mathcad:

Given

$$\begin{aligned} \text{Re}(-S2) - G_{2,2} \cdot (V2^2 + W2^2) - [G_{2,1} \cdot (V2 \cdot V1 + W2 \cdot W1) + G_{2,3} \cdot (V2 \cdot V3 + W2 \cdot W3)] + [B_{2,1} \cdot (V2 \cdot W1 - W2 \cdot V1) + B_{2,3} \cdot (V2 \cdot W3 - W2 \cdot V3)] &= 0 \\ \text{Re}(-S3) - G_{3,3} \cdot (V3^2 + W3^2) - [G_{3,1} \cdot (V3 \cdot V1 + W3 \cdot W1) + G_{3,2} \cdot (V3 \cdot V2 + W3 \cdot W2)] + [B_{3,1} \cdot (V3 \cdot W1 - W3 \cdot V1) + B_{3,2} \cdot (V3 \cdot W2 - W3 \cdot V2)] &= 0 \\ \text{Im}(-S2) + B_{2,2} \cdot (V2^2 + W2^2) + [B_{2,1} \cdot (V2 \cdot V1 + W2 \cdot W1) + B_{2,3} \cdot (V2 \cdot V3 + W2 \cdot W3)] + [G_{2,1} \cdot (V2 \cdot W1 - W2 \cdot V1) + G_{2,3} \cdot (V2 \cdot W3 - W2 \cdot V3)] &= 0 \\ \text{Im}(-S3) + B_{3,3} \cdot (V3^2 + W3^2) + [B_{3,1} \cdot (V3 \cdot V1 + W3 \cdot W1) + B_{3,2} \cdot (V3 \cdot V2 + W3 \cdot W2)] + [G_{3,1} \cdot (V3 \cdot W1 - W3 \cdot V1) + G_{3,2} \cdot (V3 \cdot W2 - W3 \cdot V2)] &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} V2 \\ W2 \\ V3 \\ W3 \end{pmatrix} := \text{Find}(V2, W2, V3, W3) = \begin{pmatrix} 233.633 \\ -5.296 \\ 234.285 \\ -4.475 \end{pmatrix}$$

Модули напряжений, кВ

$$U2 := \sqrt{V2^2 + W2^2} = 233.693$$

$$U3 := \sqrt{V3^2 + W3^2} = 234.327$$

Углы напряжений, градусы

$$d2 := \frac{\text{atan}\left(\frac{W2}{V2}\right)}{\text{deg}} = -1.299$$

$$d3 := \frac{\text{atan}\left(\frac{W3}{V3}\right)}{\text{deg}} = -1.094$$

Проверим правильность решения с помощью программы RastrWin.

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	В_ш	V	Delta	Тер...
1			База	1		238					90,6	47,8					238,00		
2			Нагр	2		220			65,0	30,0							233,69	-1,30	
3			Нагр	3		220			25,0	15,0							234,33	-1,09	

Рисунок 2 – Исходные данные и результат расчетов по узлам

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	В_ш	V	Delta	Тер...
1			База	1		238					90,6	47,8					238,00		
2			Нагр	2		220			65,0	30,0							233,69	-1,30	
3			Нагр	3		220			25,0	15,0							234,33	-1,09	

Рисунок 3 - Исходные данные и результат расчетов по ветвям

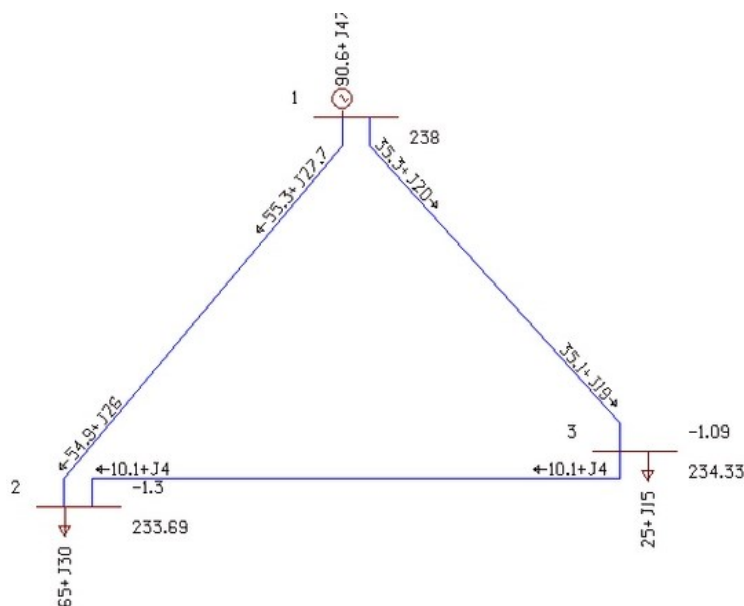


Рисунок 4 – Схема электрической сети с режимными параметрами

Вывод

При нахождении напряжения в узлах сети при помощи УУН в прямоугольной системе координат мы получили $U_2 = 233.693$ кВ и $U_3 = 234.327$ кВ. Этот результат так же подтверждается расчетом в программе RastrWin. Основным плюсом, при расчете режима электрической сети по УУН в прямоугольной системе координат, является исключение необходимости работы с комплексными числами.

Литература

1. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах: Учебное пособие/ Б.И. Аюев, В.В. Дамыдов. – Москва: Флинта: Издательские проекты, 2008.- 255 с.
2. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие/ А. А. Герасименко, В. Т. Федин. - Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. - 720 с.
3. Электрические системы и сети: Методическое пособие/ В. Т. Федин, А.М. Зорич.- Минск: БНТУ, 2000. – 54 с.