НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження
Кафедра електропостачання імені професора В.М. Синькова

Математичні задачі в енергетиці

01Тема 1. Основні поняття.

Лектор: Гай О.В.

Лекція 3

ЗМІСТ

1.3.Постановка та математична формалізація задачі розрахунку усталеного режиму

1.3.1.Загальні положення та поняття балансуючого вузла

Розрахунки усталених режимів складають основну частину загального обсягу досліджень електричних систем, що виконуються як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації. Такі розрахунки необхідні при виборі конфігурації схеми електричної системи та параметрів її елементів, аналізі стійкості та оцінці струмів КЗ, визначенні найбільш економічних режимів її роботи. Крім того розрахунки усталених режимів мають і велике самостійне значення, так як дозволяють відповісти на ряд практично важливих питань [8, 9, 18]:

- чи можлива передача необхідної потужності від джерела електричної енергії до споживача;

- чи не перевищують струми в елементах електричної системи як в нормальних, так і в після аварійних режимах;

- чи напруга у вузлах системи не перевищує допустимих границь.

Для виконання розрахунку любого усталеного режиму необхідна наступна інформація:

- схема з'єднань та параметри елементів системи;

- навантаження споживачів та генеруючих джерел (електростанцій).

Мережа електричної системи в розрахунках усталених режимів представляється схемою заміщення, конфігурація та параметри заміщення елементів якої відображаються тією чи іншою матрицею.

Вихідними даними щодо навантаження реальних електричних систем при їх проектуванні та експлуатації за звичай служать значення споживання активних і реактивних потужностей $(P_{нi} + jQ_{нi}) = S_{нi}$, які можуть задаватись як постійними величинами $(S_{нi} = const)$, так і залежними від напруги в місцях підключення навантаження до мережі $(S_{нi} = f(\mathring{U}_{нi}))$. Вихідними даними щодо джерел живлення, як правило виступають активні потужності $(P_{гj} = const)$, що видаються генераторами в систему, та модулі напруг $(|U_{гj}| = const)$ в місцях їх підключення до мережі. В ряді випадків джерела живлення можуть бути задані постійними значеннями активної та реактивної потужностей $(P_{гj} = const,\ Q_{гj} = const)$. Проте одне із джерел (як правило найбільш потужна електростанція або підстанція) задається комплексним значенням напруги і грає роль балансуючого вузла $(\mathring{U}_б = const)$ – за рахунок вільної генерації якого $(P_{гj} = Var,\ Q_{гj} = Var)$ підтримується баланс потужності в системі (безпосереднє споживання споживачів та втрати в електричній мережі). Балансуючий вузол має ще одне важливе значення при розрахунках усталеного режиму – як правило в балансуючому вузлі вектор напруги задається з нульовим кутом для встановлення точки відліку кутів напруг других вузлових точок електричної системи.

Для розрахунку усталених режимів існує ряд математичних методів – основними з яких згідно ТОЕ [13] є: метод контурних струмів та метод вузлових напруг.

Для ілюстрації вказаних методів використаємо фрагмент схеми електричної мережі приведений на рис.1.9.

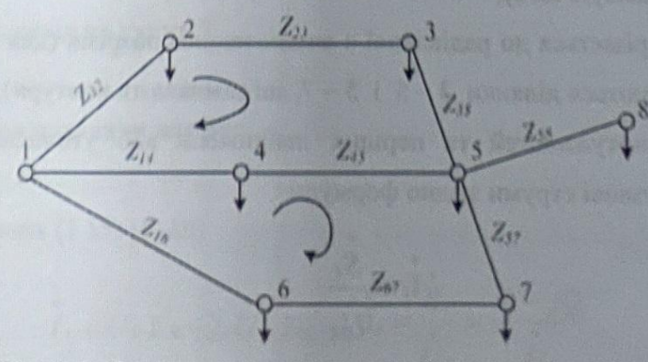


Рис.1.9. Фрагмент схеми електричної мережі.

Для розрахунку усталеного режиму згідно фрагменту схеми (рис.1.9) необхідно задати наступні дані:

1) вектор напруги у балансуючому вузлі;

2) параметри ділянок;

3) вузлові навантаженнях;

4) точність розрахунку.

1.3.2. Метод контурних струмів

В класичній постановці (ТОЕ) використання методу (моделі) контурних струмів є складним процесом (необхідно визначитись з контурами та ЕРС, скласти систему рівнянь згідно контурних струмів з врахуванням параметрів схеми та ЕРС) [13].

Тому на практиці модель контурних струмів модифікована і вирішується набагато простіше. Згідно фрагменту рис.1.9 [6]:

1) задаються точністю розрахунку ε;
2) вибирається в якості балансуючого один із вузлів за звичай з найбільшою генерацією в якому задається вектор напруги (модуль та кут U), наприклад вузол *1*;

3) задаються першим наближенням напруг (як правило номінальні) у всіх вузлах (крім балансуючого);

4) схема розрізається до радіальної з виключенням розрізів (для фрагменту рис.1.9 виключаються ділянки 3 – 5 і 5 – 7, які замикають контури);

5) згідно потужностей та перших наближень або уточнених напруг визначаються вузлові струми згідно формули

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_i}$$

6) розраховані вузлові струми накладаються на ділянки ідучи по схемі від кінцевих вузлів до вузла в якому заданий вектор напруги;

7) згідно отриманих струмів ділянок та їх параметрів ідучи від вузла з заданим вектором напруги до кінцевих вузлів визначаються втрати напруги на ділянках та вектори напруг вузлів за виразами

$$\Delta\dot{U}_{ij} = \dot{I}_{ij}\cdot\dot{Z}_{ij}, \qquad \dot{U}_j = \dot{U}_i - \Delta\dot{U}_{ij}$$

8) визначається різниця напруг на кінцях видалених ділянок та опір контуру, який вони замикають;

9) згідно даних пункту 8 визначаються струми контурів

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_P}{\dot{Z}_K}$$

10) отримані струми контурів добавляються у вузли (– +) кінців видалених ділянок;

11) по розрахованих напругах та заданих потужностях уточняються струми вузлів;

12) проводиться перевірка на збіжність ітераційного процесу:

по $\left|\,|U_i|^{(K+1)} - |U_i|^{(K)}\right| < \varepsilon_U$ або по потужності $\left|\dot{U}_i\cdot\dot{I}_i - S_{зад.}\right| < \varepsilon_S$

для всіх вузлів (крім балансуючого).

Якщо точність розрахунків у всіх вузлах досягнута – кінець розрахунку, інакше – перехід на пункт 5.

1.3.3. Метод вузлових напруг

Із рівнянь (1.15) [6, 19]

$$\dot{I}_i = \dot{U}_i\,\dot{Y}_{ii} - \sum\dot{U}_j\,\dot{Y}_{ij} \text{ та } \dot{I}_i = \frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_i} = \frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i} \tag{1.15}$$

отримуємо рівняння вузлових напруг

$$\dot{U}_i = \frac{\dfrac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i} + \sum \dot{U}_j \dot{Y}_{ij}}{\dot{Y}_{ii}}, \tag{1.16}$$

яке записується для кожної вузлової точки схеми (рис.1.9), крім балансуючого вузла, тобто необхідно вирішити систему нелінійних рівнянь порядку (2n – 2).

Така система вирішується ітераційним методом відносно напруг у вузлах з лінеаризацією на кожному кроці ітерації.

Лінеаризація виконується наступним чином.

1. Задаються точністю розрахунку ε та першими наближеннями векторів напруг у всіх вузлах крім балансуючого.

2. Визначаються почергово вузлові струми $\dot{I}_i = \dfrac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i}$ – лінеаризація.

3. Уточнюються напруги $\dot{U}_i = \dfrac{\dot{I}_i + \sum \dot{U}_j \dot{Y}_{ij}}{\dot{Y}_{ii}}$ в кожному вузлі (крім балансуючого) на кожному кроці ітераційного процесу.

4. Проводиться перевірка на збіжність ітераційного процесу по всіх вузлах згідно

$$\left|\, |U_i|^{(K+1)} - |U_i|^{(K)} \right| < \varepsilon_U$$

Якщо умова для усіх вузлів схеми виконується то розрахунок закінчується. Якщо ж хоч в одному із вузлів умова п.4 не виконується – перехід на п.2.

Розробка ефективних алгоритмів розрахунку усталених режимів вимагає максимального врахування всіх специфічних особливостей, якими характеризуються схеми заміщення реальних електричних систем та відповідні їм матриці узагальнених параметрів. Ці особливості необхідно враховувати як при формуванні рівнянь усталеного режиму, так і при виборі найбільш раціонального методу їх вирішення в тому числі методів вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

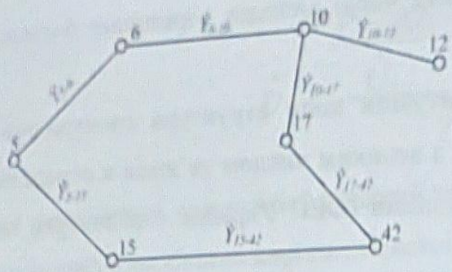
На практиці часто зустрічається ситуація коли структура електричної системи характеризується групами вузлів з великим числом зв'язків в середині груп та малою кількістю зв'язків між групами (ОЕС України – обленерго та системо утворююча).

Для задач такого типу існує два класи слабої заповненої матриці [21]: один в середині груп вузлів з великим числом зв'язків (підсистеми) і другий – між підсистемами. В таких випадках доцільно матрицю коефіцієнтів розбити на блоки, кожний із яких відповідає підсистемі з великим числом вузлів, тобто електрична система розбивається на ряд підсистем. Такий підхід називається *декомпозицією.*

Існує ще один підхід – використання *діакоптики* – система поділяється на підсистеми шляхом видалення зв'язків між підсистемами. Кожна підсистема розв'язується своїм методом незалежно, а всі підсистеми ув'язуються між собою методом систематичного алгоритму.

1.3.4. Матриця вузлових провідностей

На рис.1.10 приведені фрагмент схеми електричної мережі та відповідна йому матриця узагальнених параметрів (матриця провідностей), які є складовими математичних виразів в задачах розрахунку усталених режимів [5, 7]. Матриця є симетричною відносно діагоналі. Діагональні елементи матриці $\dot{Y}_{ii}$, відображають власні провідності вузлів схеми, а недіагональні $\dot{Y}_{ij}$ – взаємні провідності.



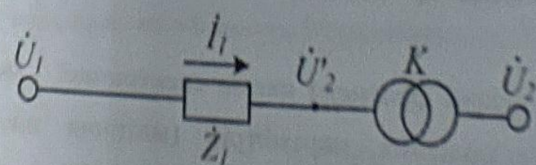
$\dot{Y}_{ij}$

	6	10	17	12	42	15	5
6	$\dot{Y}_{6\text{-}6}$	X					X
10	X	$\dot{Y}_{10\text{-}10}$	X	X			
17		X	$\dot{Y}_{17\text{-}17}$		X		
12		X		$\dot{Y}_{12\text{-}12}$			
42			X		$\dot{Y}_{42\text{-}42}$	X	
15					X	$\dot{Y}_{15\text{-}15}$	X
5	X					X	$\dot{Y}_{5\text{-}5}$

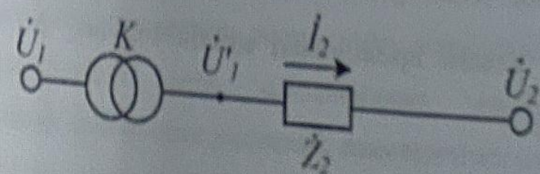
Рис.1.10. Фрагмент схемиелектричної мережі та відповідна йому матриця узагальнених параметрів (матриця провідностей).

Якщо записати $\dot{Y}_{ii} = g_{ii} + jb_{ii}$ і $\dot{Y}_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ то матрицю з елементами $\dot{Y}$ можна розділити на дві матриці: матрицю g_{ij} та матрицю b_{ij}.

Якщо ділянка *i-j* трансформатор з дійсними коефіцієнтами трансформації, то при переході від вузла *i* до вузла *j* необхідно провести перерахунок провідності до своєї напруги. Розглянемо це через приведення опорів $\dot{Z}$ до своїх напруг.



$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 \dot{Z}_1; \quad \dot{U}'_2 = \dot{U}_2 K; \quad \dot{U}_2 K = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 \dot{Z}_1; \quad \dot{U}_1 - \dot{U}_2 K = \dot{I}_1 \dot{Z}_1.$$



$$\dot{U}_1' = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{Z}_2; \quad \dot{U}_1' = \frac{\dot{U}_1}{K}; \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_1' K = K\dot{U}_2 + K\dot{I}_2\dot{Z}_2; \quad \dot{U}_1 - K\dot{U}_2 = K\dot{I}_2\dot{Z}_2.$$

$$\dot{I}_1\dot{Z}_1 = K\dot{I}_2\dot{Z}_2; \quad \dot{Z}_1 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}\dot{Z}_2 K; \quad \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = K; \quad \dot{Z}_1 = K^2\dot{Z}_2; \quad \dot{Z}_2 = \frac{\dot{Z}_1}{K^2}.$$

$$R_2 + jX_2 = \frac{R_1 + jX_1}{K^2}; \quad \frac{|U_2|}{|U_1|} = \frac{1}{K}.$$

Дякую за увагу