

МОДЕЛІ АНАЛІЗУ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

А.А. БЄЛЯЄВ¹, *магістрант*

E-mail: Artem.Bielyaiv@kname.edu.ua

В.М. ОХРІМЕНКО¹, *к.т.н., доцент*

доцент кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст

¹⁾ Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова 17, м. Харків, Україна 61002

Розрахунок ustalених режимів електричних мереж виконують з метою оцінки технічних умов та визначення економічної ефективності їх роботи. Параметри режиму визначають на основі розрахункової схеми електричної мережі (її заступної схеми). Ряд параметрів заступних схем, таких як активна провідність лінії, а також активна і реактивна провідності трансформаторів, опори й провідності електроприймачів та параметри інших елементів електричної мережі залежать від параметрів режиму мережі, тобто є нелінійними. Однак в багатьох практичних розрахунках нелінійністю параметрів схеми нехтують і схему мережі вважають лінійною [1]. Методи розрахунку режимів електричних мереж можна поділити на традиційні й формалізовані. Традиційні методи базуються на простому використанні основних законів електричних кіл і методів еквівалентних перетворень схем електричних мереж. Перевагою цих методів, які склалися і вдосконалювалися протягом багатьох років, є їх простота і наочність. Вони використовуються при розрахунках простих розімкнених і замкнених електричних мереж.

Формалізовані методи розрахунку побудовані на основі теорії графів і матричної алгебри. Конфігурація електричної мережі (її геометрична схема або граф) аналітично описується матрицею з'єднань, яка враховує всі зв'язки між вузлами (вершинами) схеми. За допомогою цієї матриці автоматично за допомогою обчислювальної техніки формуються рівняння стану мережі (математична модель), після чого ці рівняння розв'язують одним із чисельних методів. Таким чином, формалізація складання рівнянь стану (у векторній або координатній формах) дає можливість повністю автоматизувати розрахунок електричних мереж будь-якої конфігурації.

Розрахунки режимів здійснюють як на стадії проєктування, так і на стадії експлуатації електричних мереж. Точність розрахунків залежить від точності вихідних даних, методики розрахунку і припущень, що приймаються при розрахунку.

У багатьох практичних випадках обмежуються наближеним розрахунком, особливо на стадії проєктування, коли вихідні дані про навантаження задані наближено. В умовах експлуатації при оптимізації параметрів режимів електричної мережі точність розрахунку повинна бути достатньо високою.

Для розрахунку режиму задається однолінійна схема електричної мережі, значення активних і реактивних потужностей навантаження у вузлах, а також величина напруги в одному з вузлів. На основі заданої однолінійної схеми згідно з послідовністю з'єднання елементів мережі складають розрахункову схему й визначають її параметри (опори і провідності елементів), а також розрахункові навантаження вузлів, після чого розраховують параметри режиму [2].

Методи розрахунку режиму ліній електропередачі розрізняються в залежності від типу електричної мережі, класу номінальної напруги та способу задання навантаження. Розглянемо задачу на прикладі схеми лінії, наведеної на рисунку 1,а. Визначимо напругу U_1 і потужність S_1 на початку радіальної трифазної лінії електропередачі за відомими значеннями напруги U_2 і потужності навантаження S_2 в кінці цієї лінії. Схема заміщення для розрахунку параметри режиму показана на рисунку 1,б. Фазну напругу $U_{1\phi}$ на початку лінії визначимо за другим законом Кірхгофа

$$U_{1\phi} = U_{2\phi} + I_2 \cdot Z_{12}, \quad (1)$$

де $U_{2\phi}$ – фазна напруга в кінці лінії;
 I_2 – розрахунковий струм навантаження.

При активно-індуктивному характері навантаження вектор струму $\dot{I}_2$ відстає за фазою від вектора напруги $\dot{U}_{2\phi}$ на деякий кут зсуву фаз φ_2 . Модуль струму і його фазу можна визначати за даними параметрів режиму кінця лінії:

$$I_2 = \frac{S_2^*}{\sqrt{3} U_2^*}, \quad (2)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{Q_2}{P_2}. \quad (3)$$

Векторна діаграма лінії показана на рисунку 1,в, де вектор $\dot{U}_{2\phi}$ суміщений з віссю дійсних величин. Спад напруги $I_2 \cdot r_{12}$ в активному опорі лінії збігається з фазою струму навантаження I_2 , а спад напруги $jI_2 \cdot x_{12}$ в індуктивному опорі – випереджає цей струм на 90° . Спади напруг в активному та індуктивному опорах в сумі з вектором $\dot{U}_{2\phi}$ згідно з (1), дадуть фазну напругу на початку лінії $\dot{U}_{1\phi}$.

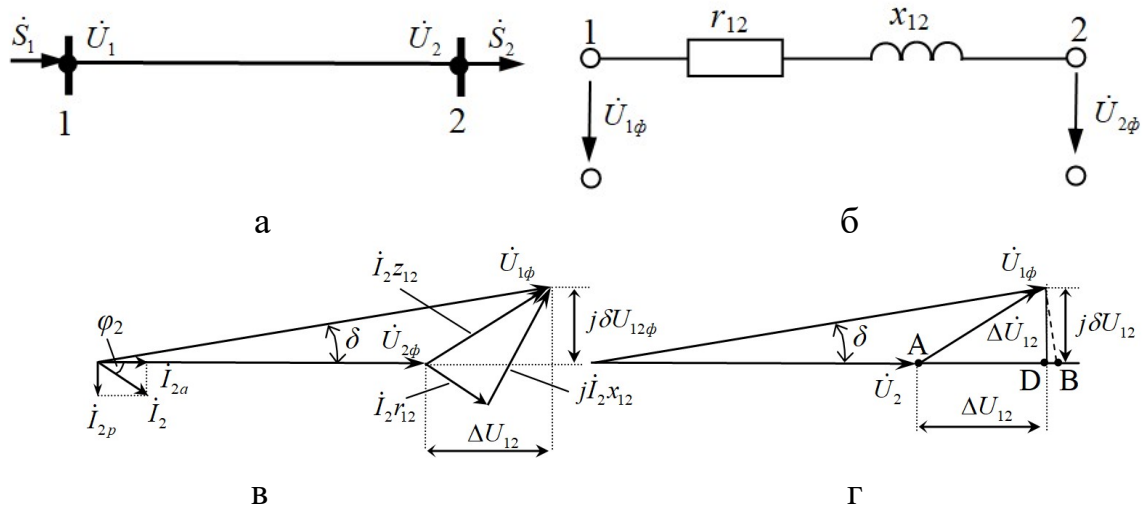


Рисунок 1 – Схеми і векторні діаграми лінії:
а – однолінійна схема; б – заступна схема; в – векторна
діаграма фазних напруг; г – векторна діаграма лінійних напруг

Як видно з векторної діаграми, напруги $\dot{U}_{1\phi}$ та $\dot{U}_{2\phi}$ зміщені у фазі на кут δ , величина якого залежить від модуля і фази вектора спаду напруги в лінії $I_2 \cdot z_{12}$. Вектор спаду напруги на комплексній площині розкладається на його повздовжню $\Delta U_{12\phi}$ та поперечну $j\delta U_{12\phi}$ складові:

$$I_2 \cdot z_{12} = (I_{2a} - jI_{2p}) \cdot (r_{12} + jx_{12}) = \Delta U_{12\phi} + j\delta U_{12\phi}, \quad (4)$$

$$\Delta U_{12\phi} = I_{2a} \cdot r_{12} + I_{2p} \cdot x_{12} = I_2 (r_{12} \cdot \cos \varphi + x_{12} \sin \varphi), \quad (5)$$

$$\delta U_{12\phi} = I_{2a} \cdot x_{12} + I_{2p} \cdot r_{12} = I_2 (x_{12} \cdot \cos \varphi - r_{12} \sin \varphi), \quad (6)$$

З врахуванням (4) комплексне значення фазної напруги на початку лінії можна виразити таким чином:

$$\dot{U}_{1\phi} = \dot{U}_{2\phi} + \Delta U_{12\phi} + j\delta U_{12\phi}, \quad (7)$$

звідки модуль фазної напруги на початку лінії буде визначений

$$U_{1\phi} = \sqrt{(U_{2\phi} + \Delta U_{12\phi})^2 + (\delta U_{12\phi})^2}. \quad (8)$$

Як відомо, фазні напруги відрізняються від лінійних в $\sqrt{3}$ рази. Відповідна векторна діаграма лінійних напруг зображена на рисунку 1,г. За цією діаграмою, напруга на початку лінії:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \sqrt{3}\dot{I}_2 \cdot z_{12} = U_2 + \Delta U_{12} + j\delta U_{12}. \quad (9)$$

Модуль і фаза лінійної напруги U_1 на початку лінії:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12\phi})^2 + (\delta U_{12\phi})^2}, \quad (10)$$

$$\delta = \arctg \frac{\delta U_{12}}{U_2 + \Delta U_{12}}. \quad (11)$$

Оскільки розрахунок режиму переважно виконується в потужностях, то складові ΔU та δU вектора спаду напруги записують через потужність навантаження:

$$\Delta U_2 = \frac{S_2}{U_2} (r_{12} \cos \varphi + x_{12} \sin \varphi) = \frac{P_2 r_{12} + Q_2 x_{12}}{U_2}, \quad (12)$$

$$\delta U_2 = \frac{S_2}{U_2} (x_{12} \cos \varphi + r_{12} \sin \varphi) = \frac{P_2 x_{12} + Q_2 r_{12}}{U_2}. \quad (13)$$

З рисунку 1 видно, що спад напруги в лінії є геометричною (векторною) різницею напруг на початку і в кінці лінії

$$\sqrt{3}\dot{I}_2 z_{12} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2. \quad (14)$$

На практиці користуються поняттям втрати напруги, яка визначається як алгебраїчна різниця модулів напруг початку і кінця лінії. Втрата напруги на рисунку 1,г відповідає довжині відрізка $AB = U_1 - U_2$. У лініях номінальною напругою $U_n < 110$ кВ поперечна складова спаду напруги δU невелика (кут зсуву фаз δ між напругами U_1 і U_2 малий), тому втрата напруги приблизно прирівнює повздовжній складовій спаду напруги ΔU . Тоді модуль напруги на початку лінії:

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_{12}, \quad (15)$$

а кут зсуву фаз між напругами U_1 і U_2 прирівнюють до нуля. Для визначення решти параметрів режиму розраховують втрати активної і реактивної потужності в лінії

$$\Delta P_{12} = 3I_2^2 r_{12} = \frac{S_2^2}{U_2^2} r_{12} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} r_{12}. \quad (16)$$

З врахуванням втрат потужності в лінії потужність на початку лінії:

$$\dot{S}_1 = \dot{S}_2 + \Delta P_{12} + j\Delta Q_{12}. \quad (17)$$

Аналогічно проводиться розрахунок параметрів режиму в кінці лінії за даними параметрів режиму на початку лінії. Напруга в кінці лінії, визначена за

другим законом Кірхгофа

$$U_2 = U_1 - \sqrt{3}I_1 z_{12} = U_1 - \Delta U_{12} - j\delta U_{12} . \quad (18)$$

Векторна діаграма напруг лінії для даного випадку показана на рисунку 2.

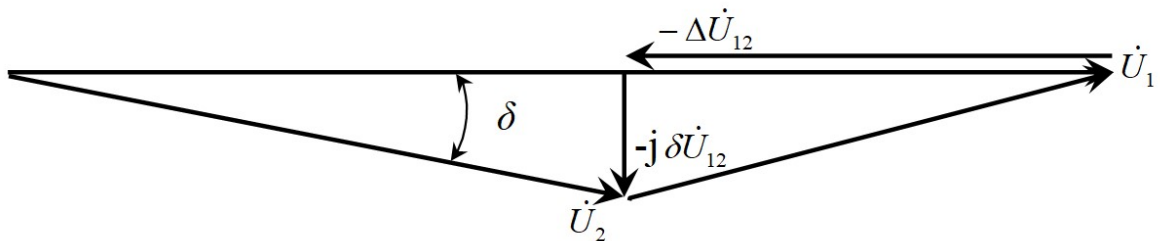


Рисунок 2 – Визначення напруги на початку лінії

Згідно з діаграмою напруг (рис. 2) і виразом (17) модуль напруги в кінці лінії:

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U_{12})^2 + \delta U_{12}^2} , \quad (19)$$

а фаза напруги U_2 :

$$\delta = \arctg \frac{-\delta U_{12}}{U_1 - \Delta U_{12}} . \quad (20)$$

Потужність в кінці лінії визначають з балансу потужностей як

$$S_2 = S_1 - \Delta P_{12} - j\Delta Q_{12} , \quad (21)$$

де втрати ΔP_{12} , ΔQ_{12} визначають за формулами, аналогічними (15) та (16) за даними параметрів режиму на початку лінії.

У моделях електричних мереж, для спрощення розрахунків приймають ряд припущень:

- в заступних схемах повітряних ліній напругою до 35 кВ включно не враховують ємнісну провідність;
- в заступних схемах кабельних ліній не враховують індуктивний опір кабелів, оскільки його величина набагато менша від величини активного опору;
- при розрахунку електричних мереж напругою 110 кВ і нижче не враховують поперечну складову спаду напруги, при цьому втрата напруги прирівнюється до його повздовжньої складової;
- у місцевих мережах відхилення напруги від номінальної незначні, тому втрату напруги розраховують за номінальною напругою мережі;
- при визначенні розподілу потужностей у місцевих електричних мережах втратами потужності в лініях нехтують (якщо за умовою задачі не потрібно оцінювати їх величину).

ВИСНОВОК

Розглянуті особливості моделей дозволяють на підставі закону Ома та законів Кірхгофа виконувати інженерні розрахунки параметрів сталих режимів електричних мереж.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дьяков, А. Ф., Максимов, Б. К., Борисов, Р. К., Кужекин, И. П. & Жуков А. В. (2003). Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. *Москва, Энергоатомиздат.*
2. Онищенко, В. А., Самойленко, И. А., Гриб, О. Г., Жаркин, А. Ф. Васильченко, В. И., Ущаповский, К. В. ... Захаренко, Н. С. (2013). Анализ и оценка экономических ущербов от низкого качества электрической энергии : монография. *Харьков, ХНУРЭ.*