

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Т. Л. Кацадзе
О. М. Янковська

РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

ЧАСТИНА 3. ПРОЄКТУВАННЯ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Електричні системи і мережі»
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент *Бардик Є. І.*, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри відновлювальних джерел енергії КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Баженов В. А.*, канд. техн. наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 7.04.2022 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 6 від 21.01.2022 р.)*

Навчальний посібник містить розв'язання типових задач, які охоплюють розділи кредитного модуля «Регулювання режимів електричних систем. Частина 3. Проектування дальньої електропередачі». Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Матеріал навчального посібника може виявитися корисним під час виконання електричних розрахунків дальніх електропередач в процесі курсового та дипломного проектування студентами спеціальності.

Реєстр. № НП 21/22-337 Обсяг 3,08 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© Т. Л. Кацадзе, О. М. Янковська
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ВИБІР ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	6
Задача 1.1.	6
Задача 1.2	7
Задача 1.3	8
Задача 1.4	14
Задача 1.5	16
Задача 1.6	18
2. КОМПЕНСАЦІЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	24
Задача 2.1	24
Задача 2.2	28
Задача 2.3	35
3. РОЗРАХУНКИ ТА ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	37
Задача 3.1	37
Задача 3.2	48
Задача 3.3	54
Задача 3.4	58
Задача 3.5	61
Задача 3.6	65
Задача 3.7	69
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	73

ВСТУП

Навчальний посібник містить розв'язання типових задач, які охоплюють розділи кредитного модуля «Регулювання режимів електричних систем. Частина 3. Проектування дальньої електропередачі». Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електричні системи і мережі» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Дисципліна «Регулювання режимів електричних систем» належить до складу базових у циклі підготовки фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні системи і мережі». Метою вивчення кредитного модуля «Регулювання режимів електричних систем. Частина 3. Проектування дальньої електропередачі змінного струму» є формування у студента системи ґрунтовних знань та практичних навичок в області конструктивного виконання ліній електропередавання надвисокої номінальної напруги, обґрунтування вибору основного технологічного устаткування електропередач, пристроїв компенсації та налагодження параметрів лінії, необхідних для вирішення експлуатаційних та проектно-конструкторських завдань, які виникають під час проектування, будівництва та експлуатації дальніх електропередач змінного струму.

В навчальному посібнику представлено приклади розв'язання типових задач, які охоплюють такі розділи кредитного модуля.

1. Вибір основного технологічного устаткування дальньої електропередачі, зокрема

- обґрунтування вибору номінальної напруги електропередачі;
- визначення конструктивного виконання лінії, конструкції фази, вибір перерізу проводів повітряної лінії;
- обґрунтування вибору силових автотрансформаторів для зв'язку електропередачі із суміжними енергосистемами;
- розрахунок погонних та хвильових параметрів лінії електропередавання;
- розрахунок параметрів еквівалентного чоририполюсника електропередачі.

2. Компенсація та налагодження параметрів дальньої електропередачі, у тому числі:

- обґрунтування вибору пристроїв компенсації надлишкової зарядної потужності лінії дальньої електропередачі;
- обґрунтування вибору пристроїв забезпечення пропускної здатності електропередачі;

- обґрунтування вибору додаткових джерел реактивної потужності для балансування реактивної потужності в суміжних з електропередачею енергосистемах.

3. Розрахунки та інженерний аналіз ustalених режимів дальньої електропередачі:

- розрахунок ustalеного режиму електропередачі за умовами початку (кінця) лінії, дослідження розподілу напруги вздовж ділянок електропередачі;
- розрахунок режиму однобічного увімкнення лінії електропередавання та визначення умов синхронізації електропередачі на її «відкритому» кінці;
- формування кругової діаграми потужності та кутової характеристики потужності дальньої електропередачі;
- дослідження режиму ненавантаженої електропередачі;
- розрахунок режиму максимальних навантажень електропередачі;
- формування робочих характеристик електропередачі в діапазоні навантажувальних режимів лінії.

Матеріал навчального посібника може виявитися корисним під час виконання електричних розрахунків дальніх електропередач в процесі курсового та дипломного проєктування студентами спеціальності.

РОЗДІЛ 1. ВИБІР ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ



ЗАДАЧА 1.1.

Лінія електропередавання призначена для транзиту потужності 1800 MW на відстань 750 км.

Визначити номінальну напругу електропередачі.

Відповідно до умов задачі характеристики електропередачі становлять

довжина електропередачі $l := 750 \text{ km}$

розрахунковий транзит потужності $P := 1800 \text{ MW}$

Визначимо номінальну напругу електропередачі за емпіричною формулою Залеського:

$$U_n := \sqrt{P \cdot kW^{-1} \cdot (0.1 + 0.015 \cdot \sqrt{l \cdot km^{-1}})} \cdot kV = 958.9 \text{ kV}$$

З урахуванням системи номінальної напруги ОЕС України для електропередачі слід приймати напругу 750 кВ.

Аналогічний результат можна отримати у разі застосування "шведської" формули:

$$U_n := 17 \sqrt{\frac{l}{16 \text{ km}} + \frac{P}{1000 \text{ kW}}} \cdot kV = 730.6 \text{ kV}$$

Таким чином, для проектованої електропередачі слід прийняти номінальну напругу

$$U_n := 750 \text{ kV}$$



ЗАДАЧА 1.2

Лінія електропередавання напругою 750 кВ завдовжки 750 км призначена для транзиту потужності 1800 МВт із коефіцієнтом потужності 0,9. Потужність приймальної системи становить 10000 МВА.

Визначити конструктивне виконання лінії електропередавання, вибрати конструкцію розщепленої фази та переріз проводів лінії.

Відповідно до умов задачі характеристики електропередачі становлять

номінальна напруга електропередачі	$U_n = 750 \text{ kV}$
довжина електропередачі	$l = 750 \text{ km}$
розрахунковий транзит потужності	$P = 1800 \text{ MW}$
коефіцієнт потужності	$\lambda := 0.9$
потужність приймальної системи	$S_{II} := 10000 \text{ MVA}$

Визначимо співвідношення між транзитом потужності по лінії та потужністю приймальної системи:

$$\frac{P}{S_{II}} = 18\%$$

Оскільки транзит потужності по лінії не перевищує 20% потужності приймальної системи, лінії електропередавання можна виконати за одноколовою схемою із перемикальним пунктом, розташованими на відстані 400 км від початку лінії, який секціонує електропередачу, поділяючи її на дві частини довжиною 400 та 350 км.

Для вибору перерізів проводів лінії скористаємось методом економічних інтервалів струмових навантажень. За розрахункового транзиту потужності робочий струм лінії дорівнює

$$I := \frac{P}{\sqrt{3} U_n \cdot \lambda} = 1539.6 \text{ A}$$

Відповідно до методу економічних струмових інтервалів для кожної фази лінії слід прийняти конструкцію 5хАС-300/66, для якої граничне економічне струмове навантаження становить 1620 А.



ЗАДАЧА 1.3.

Повітряна лінія напругою 750 кВ виконана на проміжних опорах ПП-750-1. Конструкція фази 5хАС-300/66 із кроком розщеплення 50 см. Фазні конструкції закріплено на ізоляційних підвісах завдовжки 6 м.

Розрахувати погонні параметри лінії електропередавання.

Відповідно до умов задачі загальні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга

$$U_n = 750 \text{ kV}$$

Геометричні характеристики закріплення фазних конструкцій на опорі відповідно до умов задачі та конструктивної схеми опори ПП-750-1, представленої на рис. 1.1, становлять:

відстань між фазними проводами

$$D_{12} := 18 \text{ m}$$

висота закріплення ізоляційного підвісу

$$h := 35 \text{ m}$$

висота ізоляційного підвісу

$$l_{ins} := 6 \text{ m}$$

габарит лінії

$$Dim := 12 \text{ m}$$

крок розщеплення

$$a := 500 \text{ mm}$$

кількість складників в пучку

$$n := 5$$

Технічні характеристики проводу АС 300/66 (див. рис. 1.2) складають:

діаметр алюмінієвих проволоч

$$d_{al} := 3.5 \text{ mm}$$

кількість алюмінієвих проволоч

$$n_{al} := 30$$

діаметр проводу

$$d := 24.5 \text{ mm}$$

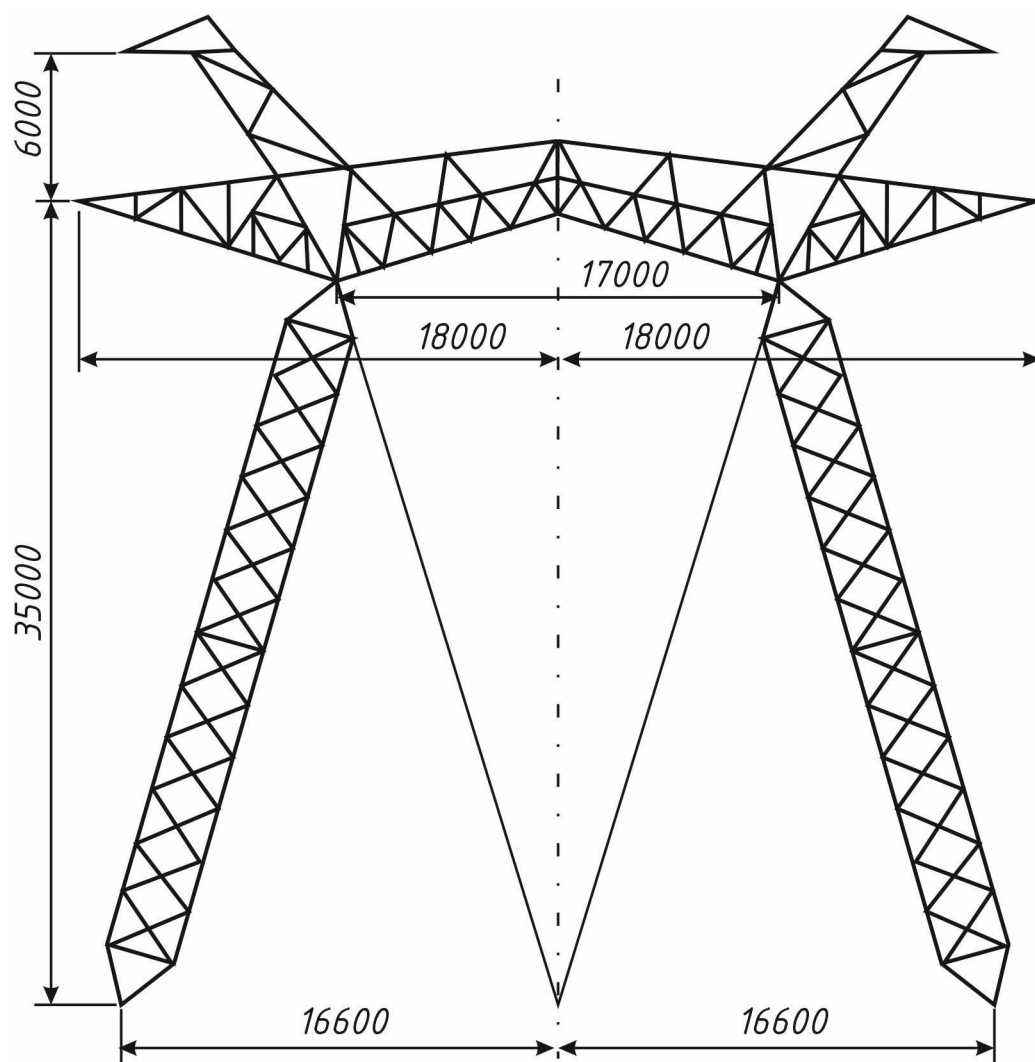


Рис. 1.1. Конструкція опори ПП-750-1

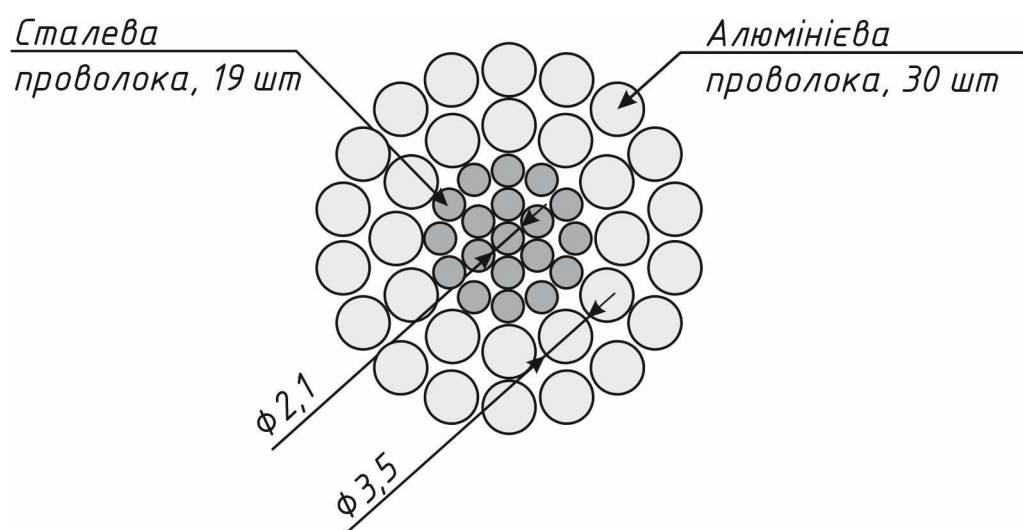


Рис. 1.2. Конструкція проводу АС 300/66

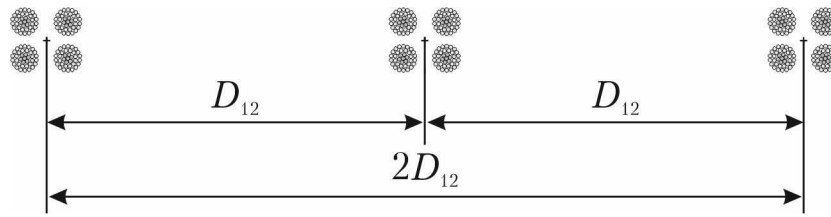


Рис. 1.3. Схема горизонтального розташування фазних конструкцій

До електротехнічних параметрів лінії електропередавання відносять поздовжні резистанс та індуктивний реактанс, поперечні кондуктанс та ємнісний суццептанс.

Для визначення параметрів лінії електропередавання розрахуємо геометричні характеристики конструкції повітряної лінії.

Для сталевалюмінієвого проводу, який містить 30 проволон у зовнішньому алюмінієвому шарі коефіцієнт середнього геометричного радіусу становить

$$k := 0.826$$

Еквівалентний радіус пучка розщепленої фази та середній геометричний радіус пучка розщепленої фази дорівнюють

$$R_{eq} := \sqrt[n]{\frac{d}{2} \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \right)^{(n-1)}} \cdot n = 288.668 \text{ mm}$$

$$R_g := R_{eq} \cdot \sqrt[n]{k} = 277.84 \text{ mm}$$

Середня геометрична відстань між розташованими горизонтально фазними конструкціями (див. рис. 1.3) дорівнює

$$D_g := \sqrt[3]{2} \cdot D_{12} = 22.679 \text{ m}$$

Відповідно до схеми, представленої на рис. 1.4, висота розташування центру мас проводу у прогоні становить

$$h_c := \frac{h - l_{ins} + 2 \text{ Dim}}{3} = 17.667 \text{ m}$$

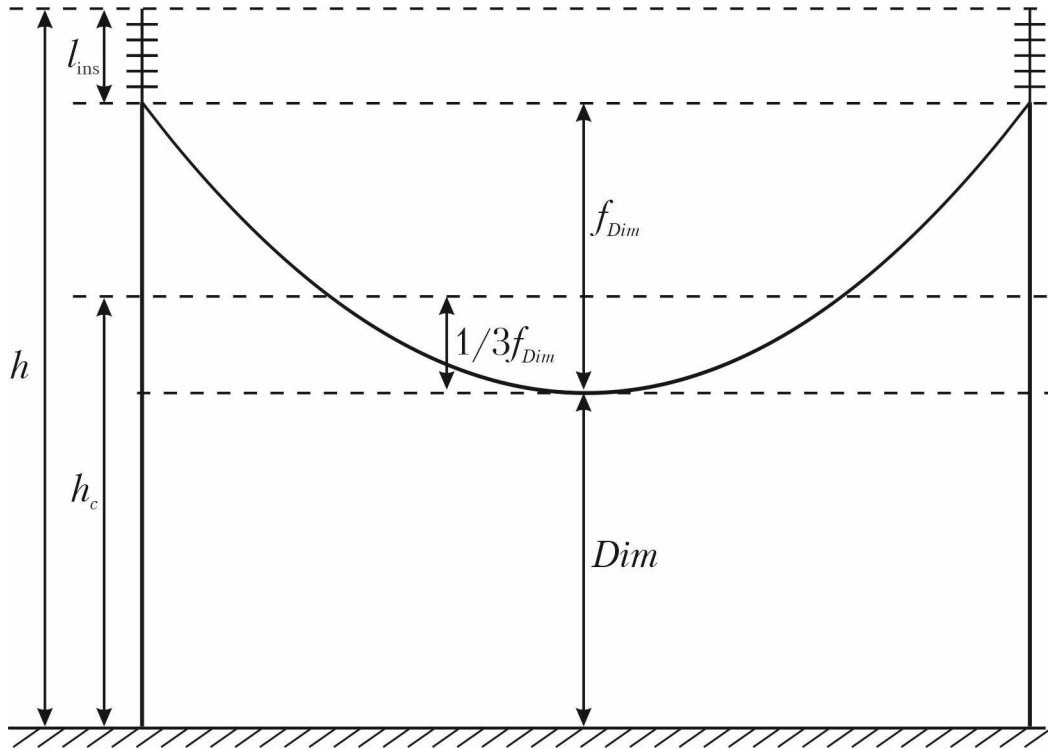


Рис. 1.4. Ілюстрація розрахунку висоти розташування центру мас проводу

Оскільки проводи на опорах розташовані горизонтально, середня геометрична висота розташування центру мас проводу дорівнює

$$h_g := h_c = 17.667 \text{ m}$$

Відповідно до схеми на рис. 1.5 відстані між фазними проводами та їх дзеркальними відображеннями дорівнюють

$$D_{12'} := \sqrt{4 h_c^2 + D_{12}^2} = 39.654 \text{ m}$$

$$D_{23'} := D_{12'} = 39.654 \text{ m}$$

$$D_{1'3} := \sqrt{4 h_c^2 + 4 D_{12}^2} = 50.442 \text{ m}$$

Отже, середня геометрична відстань між фазними проводами та їх дзеркальними відображеннями становить

$$D'_g := \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{1'3}} = 42.966 \text{ m}$$

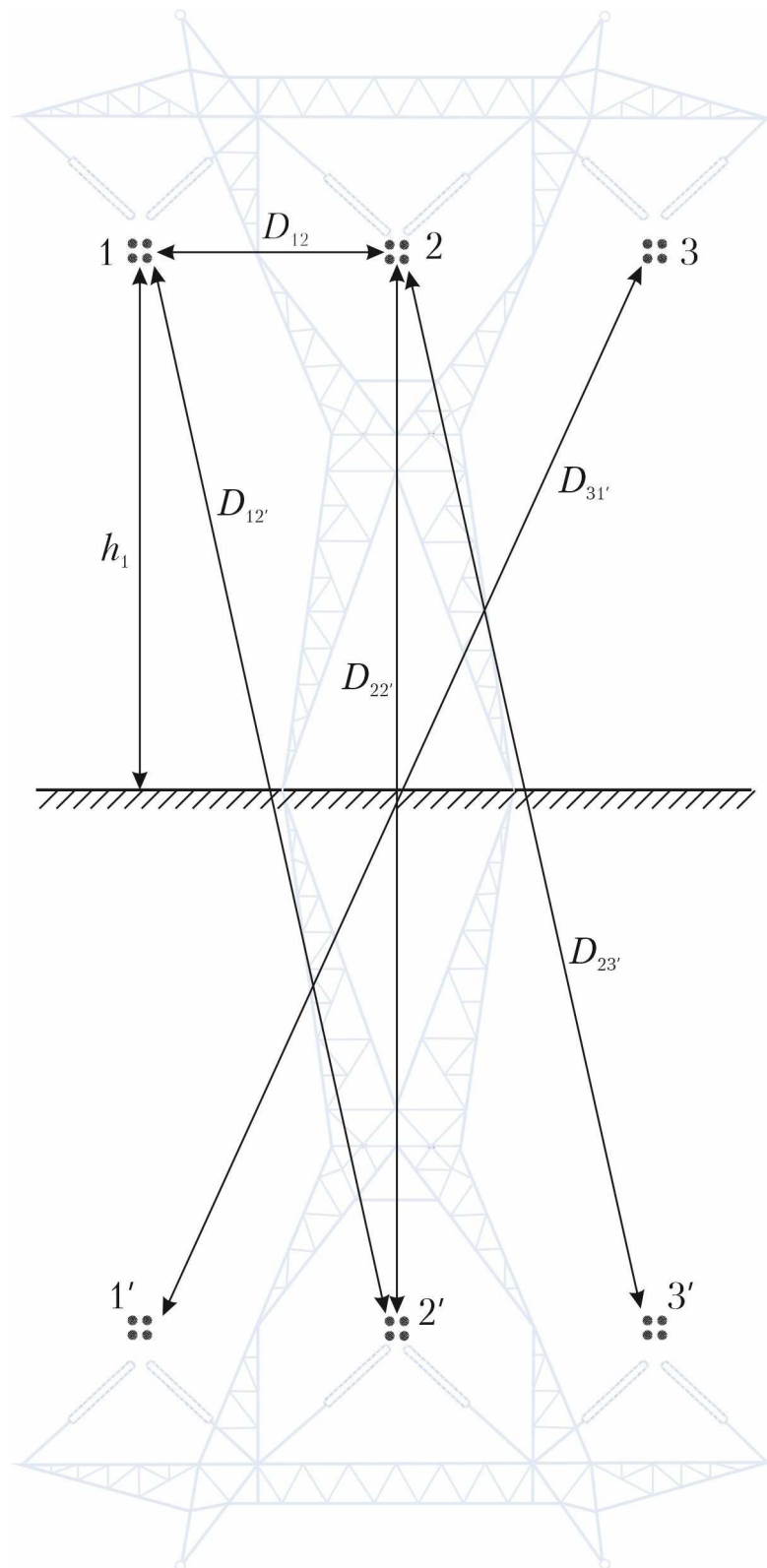


Рис. 1.5. Розрахункова схема за методом дзеркальних відображень

Коефіцієнт укрутки сталюалюмінієвого проводу, який містить 30 алюмінієвих проволок становить

$$k_l := 0.03408$$

Для визначення погонного резистансу повітряної лінії електропередавання врахуємо, що питомий опір алюмінієвих проваолок становить

$$\rho_{al} := 28.25 \, \Omega \cdot \frac{mm^2}{km}$$

Електричний опір одиничного проводу дорівнює:

$$R_0 := \frac{\rho_{al}}{0.25 \pi \cdot d_{al}^2} \cdot k_l = 0.1001 \, \frac{\Omega}{km}$$

Погонний резистанс пучка розщепленої фази становить

$$r_0 := \frac{R_0}{n} = 0.02 \, \frac{\Omega}{km}$$

Середньорічні втрати на корону в досліджуваній лінії дорівнюють

$$\Delta P_{c0} := 13 \, \frac{kW}{km}$$

Таким чином, середнє значення погонного поперечного кондуктансу лінії електропередавання становить

$$g_0 := \frac{\Delta P_{c0}}{U_n^2} = 0.023 \, \frac{\mu S}{km}$$

Поздовжній індуктивний реактанс лінії електропередавання дорівнює

$$x_0 := 0.02 \pi \cdot \ln \left(\frac{D_g}{R_g} \right) \cdot 1 \, \frac{\Omega}{km} = 0.27659 \, \frac{\Omega}{km}$$

Для визначення погонного susceptансу лінії врахуємо, що відносна діелектрична проникність повітря становить

$$\varepsilon_r := 1.00059$$

Погонний ємнісний суццептанс лінії становить

$$b_0 := \frac{2 \cdot 10^2 \pi^2 \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \left(\frac{2 h_g D_g}{R_{eq} \cdot D'_g} \right) 1 \text{ s}} = 4.195 \frac{\mu S}{km}$$

Таким чином, погонні імпеданс та адмітанс прямої послідовності лінії дорівнюють

$$z_0 := r_0 + 1j \quad x_0 = (0.02 + 0.277i) \frac{\Omega}{km}$$

$$y_0 := g_0 + 1j \cdot b_0 = (0.023 + 4.195i) \frac{\mu S}{km}$$



ЗАДАЧА 1.4.

Погонні параметри повітряної лінії напругою 750 кВ відповідають результатам розв'язання задачі 1.3.

Розрахувати хвильові параметри лінії електропередавання та її натуральну потужність.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга	$U_n = 750 \text{ kV}$
погонний резистанс	$r_0 = 0.02 \frac{\Omega}{km}$
погонний реактанс	$x_0 = 0.277 \frac{\Omega}{km}$
погонний кондуктанс	$g_0 = 0.023 \frac{\mu S}{km}$
погонний суццептанс	$b_0 = 4.195 \frac{\mu S}{km}$

Хвильовий опір фактичної лінії електропередавання дорівнює

$$Z_c := \sqrt{\frac{z_0}{y_0}} = (256.955 - 8.575i) \Omega$$

У разі ідеалізації електропередачі хвильовий опір визначається дійсним числом:

$$Z'_c := \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = 256.764 \Omega$$

Коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі фактичної електропередачі становить

$$\gamma_0 := \sqrt[2]{z_0 \cdot y_0} = (4.1916 \cdot 10^{-5} + 1.0778i \cdot 10^{-3}) \frac{1}{km}$$

де дійсна складова представляє коефіцієнт загасання

$$\alpha_0 := \operatorname{Re}(\gamma_0) = (4.1916 \cdot 10^{-5}) \frac{1}{km}$$

а уявна – коефіцієнт фази

$$\beta_0 := \operatorname{Im}(\gamma_0) = (1.0778 \cdot 10^{-3}) \frac{rad}{km}$$

Для ідеалізованої електропередачі коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі (коефіцієнт фази) дорівнює

$$\beta'_0 := \sqrt[2]{x_0 \cdot b_0} = (1.0772 \cdot 10^{-3}) \frac{rad}{km}$$

Натуральна потужність електропередачі дорівнює

$$P_c := \frac{U_n^2}{Z'_c} = 2190.73 MW$$



ЗАДАЧА 1.5.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано перемикальним пунктом, який поділяє лінію на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. Лінія характеризується хвильовими параметрами, які відповідають результатам розв'язання задачі 1.4.

Розрахувати параметри еквівалентного чотириполюсника, який заміщує кожен ділянку лінії та всю лінію електропередавання в цілому.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга	$U_n = 750 \text{ kV}$
довжина лінії	$l = 750 \text{ km}$
довжини ділянок	$l_1 := 400 \text{ km} \quad l_2 := 350 \text{ km}$
хвильовий опір	$Z_c = (256.955 - 8.575i) \Omega$
коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі	$\gamma_0 = (4.192 \cdot 10^{-5} + 1.078i \cdot 10^{-3}) \frac{1}{\text{km}}$

Визначимо параметри еквівалентного чотириполюсника першої ділянки електропередачі завдовжки 400 км:

$$A_1 := \cosh(\gamma_0 \cdot l_1) = 0.909 + 0.007i$$

$$B_1 := Z_c \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot l_1) = (7.498 + 107.266i) \Omega$$

$$C_1 := Z_c^{-1} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot l_1) = (4.992 \cdot 10^{-3} + 1.627i) \text{ mS}$$

$$D_1 := A_1 = 0.909 + 0.007i$$

Таким чином, ланцюгова матриця еквівалентного чотириполюсника першої ділянки електропередачі має вигляд

$$M_1 := \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.909 + 0.007i & (7.498 + 107.266i) \Omega \\ (4.992 \cdot 10^{-3} + 1.627i) \text{ mS} & 0.909 + 0.007i \end{bmatrix}$$

Перевіримо правильність проведених розрахунків за визначником ланцюгової матриці параметрів чотириполюсника:

$$A_1^2 - B_1 \cdot C_1 = 1$$

В аналогічний спосіб визначаємо параметри еквівалентного чотириполюсника другої ділянки електропередачі довжиною 350 км:

$$A_2 := \cosh(\gamma_0 \cdot l_2) = 0.93 + 0.005i$$

$$B_2 := Z_c \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot l_2) = (6.664 + 94.544i) \Omega$$

$$C_2 := Z_c^{-1} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot l_2) = (5.228 \cdot 10^{-3} + 1.434i) mS$$

$$D_2 := A_2 = 0.93 + 0.005i$$

$$A_2^2 - B_2 \cdot C_2 = 1$$

Матриця еквівалентного чотириполюсника другої ділянки електропередачі має вигляд

$$M_2 := \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.93 + 0.005i & (6.664 + 94.544i) \Omega \\ (5.228 \cdot 10^{-6} + 0.001i) S & 0.93 + 0.005i \end{bmatrix}$$

Для всієї лінії в цілому маємо

$$A := \cosh(\gamma_0 \cdot l) = 0.691 + 0.023i$$

$$B := Z_c \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot l) = (11.785 + 185.726i) \Omega$$

$$C := Z_c^{-1} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot l) = (-9.447 \cdot 10^{-3} + 2.815i) mS$$

$$D := A = 0.691 + 0.023i$$

$$A^2 - B \cdot C = 1$$

Матриця еквівалентного чотириполюсника всієї лінії має вигляд

$$M := \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.691 + 0.023i & (11.785 + 185.726i) \Omega \\ (-9.447 \cdot 10^{-6} + 0.003i) S & 0.691 + 0.023i \end{bmatrix}$$

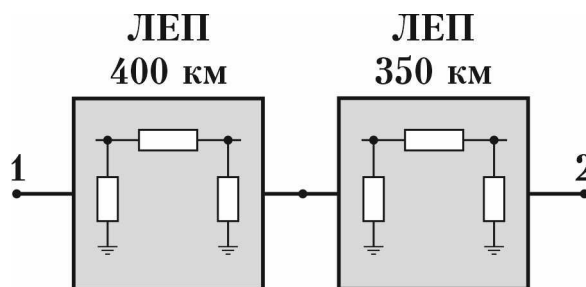


Рис. 1.6. Ланцюгова схема каскадного з'єднання чотиріполюсників ділянок електропередачі

Той самий результат можна отримати шляхом еквівалентування каскадного з'єднання чотиріполюсників першої та другої ділянок електропередачі (див. рис. 1.6):

$$M := M_1 \cdot M_2 = \begin{bmatrix} 0.691 + 0.023i & (11.785 + 185.726i) \, \Omega \\ (-9.447 \cdot 10^{-6} + 0.003i) \, S & 0.691 + 0.023i \end{bmatrix}$$



ЗАДАЧА 1.6.

Повітряна лінія напругою 750 кВ завдовжки 750 км призначена для транзиту активної потужності в обсязі 1800 МВт. Коефіцієнт потужності в режимі максимальних навантажень дорівнює 0,9. Характеристики заступної схеми лінії відповідають результатам розв'язання задачі 1.3.

Вибрати тип та визначити кількість автотрансформаторів для зв'язку дальньої електропередачі із енергосистемою, номінальна напруга якої становить 330 кВ. Розрахувати параметри заступної схеми автотрансформаторів та визначити їх регульовальні можливості.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга

$$U_n = 750 \, \text{kV}$$

довжина лінії

$$l = 750 \, \text{km}$$

погонний резистанс

$$r_0 = 0.02 \, \frac{\Omega}{\text{km}}$$

питомі втрати потужності на корону	$\Delta P_{c0} = 13 \frac{kW}{km}$
розрахунковий транзит потужності	$P = 1800 MW$
коефіцієнт потужності	$\lambda = 0.9$

Для зв'язку електропередачі з енергосистемою слід встановити автотрансформатори класу 750/330 кВ. З таким коефіцієнтом трансформації виготовляють однофазні агрегати типу АОДЦТН-333000/750/330.

Номинальна потужність однофазного автотрансформатора становить

$$S_{AT} := 333000 \text{ kVA}$$

Таким чином, завдання вибору силових автотрансформаторів на передавальному кінці лінії полягає у визначенні необхідної кількості агрегатів

Оцінимо сумарні втрати активної потужності в лінії електропередавання

$$\Delta P_{\Sigma} := \left(\left(\frac{P}{\lambda \cdot U_n} \right)^2 r_0 + \Delta P_{c0} \right) l = 116.488 MW$$

Необхідна кількість груп однофазних автотрансформаторів дорівнює

$$n_{AT} := \text{ceil} \left(\frac{P + \Delta P_{\Sigma}}{\lambda \cdot 3 \cdot S_{AT} \cdot 1.3} \right) = 2$$

Таким чином, для зв'язку з енергосистемою необхідно встановити дві групи однофазних автотрансформаторів типу АОДЦТН-333000/750/330.

Відповідно до довідникових даних паспортні дані автотрансформатора АОДЦТН-333000/750/330 становлять:

номинальна напруга обмотки ВН	$U_{hv} := 750 \text{ kV}$
номинальна напруга обмотки СН	$U_{mv} := 330 \text{ kV}$
номинальна потужність	$S_{AT} = 333000 \text{ kVA}$

втрати активної потужності
в досліді короткого замикання

$$\Delta P_{kv_m} := 580 \text{ kW}$$

втрати активної потужності
в досліді неробочого ходу

$$\Delta P_o := 250 \text{ kW}$$

напруга короткого замикання

$$u_{kv_m} := 10\%$$

струм неробочого ходу

$$i_o := 0.35\%$$

відносна кількість витків РПН

$$\omega_0 := 0\%$$

$$\omega_{min} := 10\%$$

$$\omega_{max} := -10\%$$

В задачах проектування та аналізу режимів дальніх електропередач силові автотрансформатори подають за допомогою Г-подібних заступних схем, як показано на рис. 1.7.

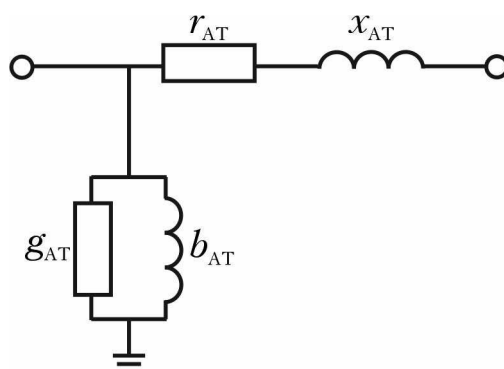


Рис. 1.7. Лінійна частина Г-подібної заступної схеми силового автотрансформатора

Параметри заступної схеми, зведені до номінальної напруги електропередачі, двох груп з трьох однофазних автотрансформаторів складають:

$$r_{AT} := \frac{3 \Delta P_{kv_m} \cdot U_n^2}{n_{AT} \cdot (3 S_{AT})^2} = 0.49 \text{ } \Omega$$

$$x_{AT} := \frac{u_{kv_m} \cdot U_n^2}{n_{AT} \cdot (3 S_{AT})} = 28.153 \text{ } \Omega$$

$$g_{AT} := \frac{n_{AT} \cdot 3 \Delta P_o}{U_n^2} = 2.667 \text{ } \mu S$$

$$b_{AT} := -\frac{n_{AT} \cdot (3 S_{AT}) \cdot i_o}{U_n^2} = -12.432 \text{ } \mu S$$

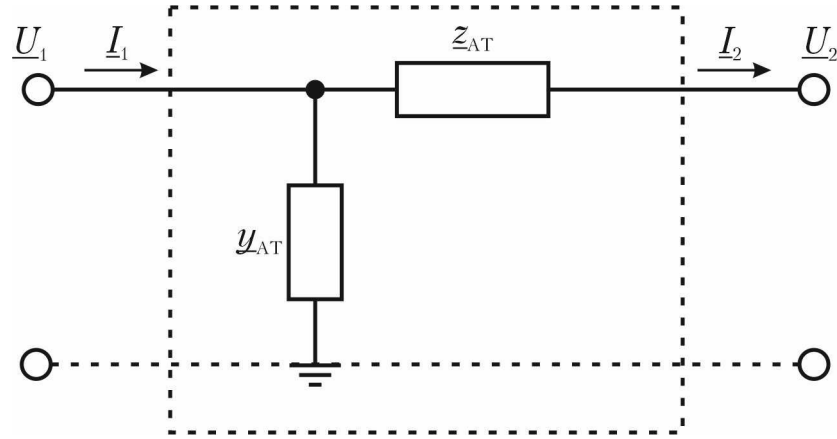


Рис. 1.8. Формування еквівалентного чотириполюсника для Г-подібної заступної схеми силового автотрансформатора

Узагальнені сталі еквівалентного чотириполюсника (див. рис. 1.8) для двох груп з трьох однофазних автотрансформаторів становлять:

$$A_{AT} := 1$$

$$B_{AT} := r_{AT} + 1j \cdot x_{AT} = (0.49 + 28.153i) \, \Omega$$

$$C_{AT} := g_{AT} + 1j \cdot b_{AT} = (2.667 - 12.432i) \, \mu S$$

$$D_{AT} := 1 + B_{AT} \cdot C_{AT} = 1 + 6.898i \cdot 10^{-5}$$

Матриця сталих еквівалентного чотириполюсника автотрансформаторів має вигляд:

$$M_{AT} := \begin{bmatrix} A_{AT} & B_{AT} \\ C_{AT} & D_{AT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (0.49 + 28.153i) \, \Omega \\ (2.667 \cdot 10^{-6} - 1.243i \cdot 10^{-5}) \, S & 1 + 6.898i \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$$

Визначник матриці дорівнює

$$|M_{AT}| = 1$$

Визначимо регулювальні можливості автотрансформаторів.

Зазначимо, що хоча автотрансформатор типу АОДЦТН-333000/750/330 являє собою однофазний агрегат, для розрахунку будемо використовувати лінійні значення номінальної напруги обмоток. Регулювальна схема пристрою РПН автотрансформатора типу АОДЦТН-333000/750/330 відповідає рис. 1.9.

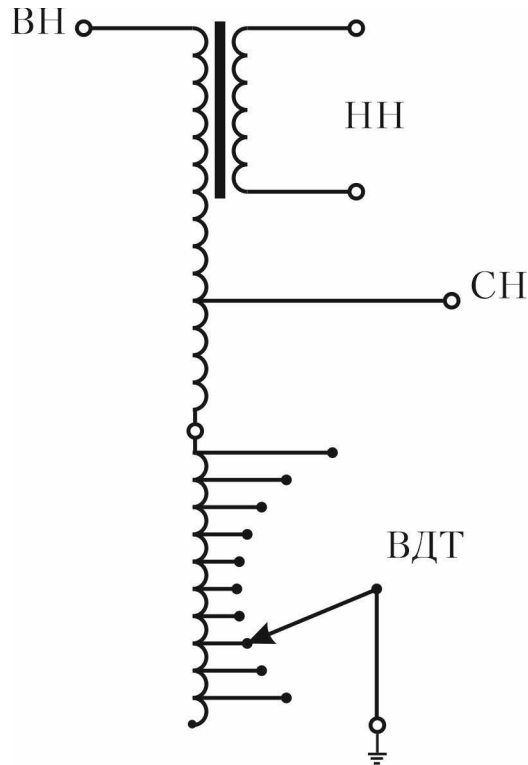


Рис. 1.9. Схема регулювання напруги в силовому автотрансформаторі напругою 75 кВ

Можливі значення коефіцієнтів трансформації складають:

$$k_{t0} := \frac{U_{hv} + U_{mv} \cdot \omega_0}{U_{mv} + U_{mv} \cdot \omega_0} = 2.273$$

$$k_{tmin} := \frac{U_{hv} + U_{mv} \cdot \omega_{min}}{U_{mv} + U_{mv} \cdot \omega_{min}} = 2.157$$

$$k_{tmax} := \frac{U_{hv} + U_{mv} \cdot \omega_{max}}{U_{mv} + U_{mv} \cdot \omega_{max}} = 2.414$$

Таким чином, у разі, якщо до обмоток середньої напруги автотрансформатора підвести номінальну напругу 330 кВ, то, відповідно до положення анцампф пристрою РПН, зведена до номінальної напруги обмотки ВН напруга з боку живлення автотрансформатора може приймати одне з наступних значень:

$$U'_{m_0} := U_{mv} \cdot k_{t0} = 750 \text{ kV}$$

$$U'_{m_{min}} := U_{mv} \cdot k_{tmin} = 711.818 \text{ kV}$$

$$U'_{m_{max}} := U_{mv} \cdot k_{tmax} = 796.667 \text{ kV}$$

РОЗДІЛ 2. КОМПЕНСАЦІЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ



ЗАДАЧА 2.1.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. Лінія призначена для транзиту активної потужності в обсязі 1800 МВт. Коефіцієнт потужності в режимі максимальних навантажень дорівнює 0,9. Параметри лінії відповідають результатам розв'язання задач 1.3 та 1.4.

Розрахувати сумарну потужність шунтувальних реакторів, необхідних для компенсації зарядної потужності електропередачі. Визначити загальну кількість реакторів та місця їх розташування вздовж траси лінії. Визначити склад некоммутованих реакторів. Розрахувати параметри заступних схем для груп шунтувальних реакторів.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга	$U_n = 750 \text{ kV}$
довжина лінії	$l = 750 \text{ km}$
погонний реактанс	$x_0 = 0.277 \frac{\Omega}{\text{km}}$
погонний суццептанс	$b_0 = 4.195 \frac{\mu S}{\text{km}}$
натуральна потужність лінії	$P_c = 2190.73 \text{ MW}$
коефіцієнт фази електропередачі	$\beta_0 = (1.078 \cdot 10^{-3}) \frac{\text{rad}}{\text{km}}$
електрична довжина лінії	$\Theta_e := \beta_0 \cdot l = 46.316^\circ$
розрахунковий транзит потужності	$P = 1800 \text{ MW}$
коефіцієнт потужності	$\lambda = 0.9$

Зарядна потужність лінії електропередавання орієнтовно становить

$$Q_c := U_n^2 \cdot b_0 \cdot l = 1769.94 \text{ MVar}$$

Сумарна потужність шунтувальних реакторів, необхідних для компенсації зарядної потужності електропередачі в режимі однобічного увімкнення лінії дорівнює

$$Q_R := P_c \cdot \frac{1 - \cos(\Theta_e)}{\sin(\Theta_e)} = 937.05 \text{ MVar}$$

Зазначимо, що отримана величина відповідає абсолютному значенню потужності шунтувальних реакторів без урахування індуктивного характеру такої потужності.

Для компенсації зарядної потужності ліній електропередавання з номінальною напругою 750 кВ використовують однофазні шунтувальні реактори типу РОДЦ-110000/750. Характеристики таких реакторів становлять:

номінальна напруга	$U_{Rn} := 787 \text{ kV}$
номінальна потужність	$Q_{R0} := 110000 \text{ kVar}$
втрати активної потужності	$\Delta P_{Ro} := 320 \text{ kW}$

Визначимо загальну кількість реакторів, необхідних для компенсації зарядної потужності лінії:

$$n_R := \text{ceil}\left(\frac{Q_R}{3 Q_{R0}}\right) = 3$$

Таким чином, для компенсації зарядної потужності лінії за умовами забезпечення прийнятного режиму напруги вздовж траси лінії слід передбачити встановлення трьох груп однофазних ректорів типу РОДЦ-110000/750.

Оцінімо надлишкову зарядну потужність лінії, яка буде поступати в енергосистему в режимів однобічного увімкнення.

$$Q_{ex} := U_n^2 \cdot b_0 \cdot l - n_R \cdot 3 \cdot Q_{R0} = 779.935 \text{ MVar}$$

Отриманий результат свідчить про перевищення реактивної потужності, яка поступає в приєднану енергосистему допустимого значення 300-500 *MVar*. Це обумовлює необхідність встановлення принаймні однієї додаткової групи шунтувальних реакторів:

$$n_{R_add} := \text{ceil} \left(\frac{Q_{ex} - 500 \text{ MVar}}{3 Q_{R0}} \right) = 1$$

Таким чином, сумарна кількість груп шунтувальних реакторів, які необхідно встановити в електропередачу становить

$$n_R := n_R + n_{R_add} = 4$$

Встановлення цих реакторів в електропередачі зумовить компенсацію зарядної потужності лінії в обсязі

$$\frac{3 n_R \cdot Q_{R0}}{U_n^2 \cdot b_0 \cdot l} = 74.6\%$$

Відповідно до рекомендацій щодо розміщення реакторів вздовж траси лінії передбачаємо встановлення двох груп на перемикальному пункті та двох груп на підстанції наприкінці електропередачі.

Склад некомутованих реакторів визначають за умовами режиму максимальних навантажень з урахуванням індуктивних втрат реактивної потужності. Такі втрати за розрахункового транзиту потужності по лінії орієнтовно становлять:

$$\Delta Q_L := \left(\frac{P}{U_n \cdot \lambda} \right)^2 \cdot x_0 \cdot l = 1475.17 \text{ MVar}$$

Отже, надлишкова зарядна потужність лінії електропередавання становить:

$$Q_c - \Delta Q_L = 294.767 \text{ MVar}$$

Отриманий результат свідчить про можливість організації сталого балансу реактивної потужності в суміжних з електропередачою енергосистемах. Це обумовлює можливість вимкнення всіх груп шунтувальних реакторів в режимі максимальних навантажень.

Зазначимо, що загальна кількість, розміщення та склад некомутованих груп шунтувальних реакторів має бути уточнені після моделювання відповідних режимів електропередачі.

В задачах проектування та аналізу режимів дальніх електропередач шунтувальні реактори подають за допомогою елементарної заступної схеми, яка містить контур поперечної провідності, як показано на рис. 2.1.

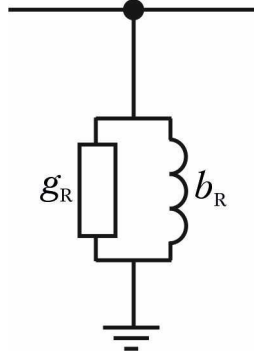


Рис. 2.1. Заступна схема шунтувального реактора

Визначимо параметри заступної схеми однієї та двох груп шунтувальних реакторів:

$$g_R := \frac{3 \Delta P_{Ro}}{U_{Rn}^2} = 1.55 \mu S$$

$$g_{R2} := 2 \frac{3 \Delta P_{Ro}}{U_{Rn}^2} = 3.1 \mu S$$

$$b_R := -\frac{3 Q_{R0}}{U_{Rn}^2} = -532.8 \mu S$$

$$b_{R2} := -2 \frac{3 Q_{R0}}{U_{Rn}^2} = -1.066 \cdot 10^3 \mu S$$

Формування еквівалентного чотириполюсника для заступної схеми шунтувального реактора проілюстровано на рис. 2.2.

Параметри еквівалентного чотириполюсника для однієї та двох груп шунтувальних реакторів становлять:

$$A_R := 1 \quad B_R := 0 \Omega \quad C_R := g_R + 1j \cdot b_R = (1.55 - 532.8i) \mu S \quad D_R := 1$$

$$A_{R2} := 1 \quad B_{R2} := 0 \Omega \quad C_{R2} := g_{R2} + 1j \cdot b_{R2} = (3.1 - 1065.6i) \mu S \quad D_{R2} := 1$$

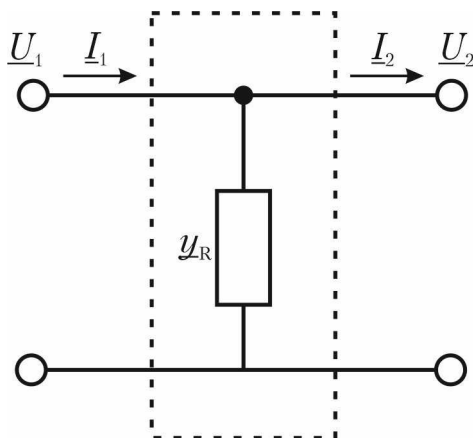


Рис. 2.2. Формування еквівалентного чотириполюсника для заступної схеми шунтувального реактора

$$M_R := \begin{bmatrix} A_R & B_R \\ C_R & D_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \, \Omega \\ (1.55 \cdot 10^{-6} - 5.328i \cdot 10^{-4}) \, S & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{R2} := \begin{bmatrix} A_{R2} & B_{R2} \\ C_{R2} & D_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \, \Omega \\ (3.1 \cdot 10^{-6} - 0.001i) \, S & 1 \end{bmatrix}$$



ЗАДАЧА 2.2.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км поєднує на паралельну роботу дві енергосистеми з номінальною напругою 330 кВ. Встановлені потужності навантаження енергосистем становлять 15000 МВт та 10000 МВт відповідно. Параметри лінії та автотрансформаторів відповідають результатам розв'язання задач 1.3 - 1.6.

Перевірити пропускну здатність електропередачі для режиму навантаження натуральною потужністю та розрахувати установку поздовжньої ємнісної компенсації, призначену для забезпечення достатньої пропускну здатності електропередачі.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга

$$U_n = 750 \, \text{kV}$$

довжина лінії	$l=750 \text{ km}$
погонний реактанс лінії	$x_0=0.277 \frac{\Omega}{\text{km}}$
натуральна потужність лінії	$P_c=2190.73 \text{ MW}$
встановлена потужність системи 1	$S_I:=15000 \text{ MW}$
встановлена потужність системи 2	$S_{II}:=10000 \text{ MW}$
параметри чотириполюсника ділянок лінії електропередавання	$A_1=0.909+0.007i$ $B_1=(7.498+107.266i) \Omega$ $C_1=(4.992+1.627i \cdot 10^3) \mu S$ $D_1=0.909+0.007i$ $A_2=0.93+0.005i$ $B_2=(6.664+94.544i) \Omega$ $C_2=(5.228+1.434i \cdot 10^3) \mu S$ $D_2=0.93+0.005i$
параметри чотириполюсника груп автотрансформаторів	$A_{AT}=1$ $B_{AT}=(0.49+28.153i) \Omega$ $C_{AT}=(2.667-12.432i) \mu S$ $D_{AT}=1+6.898i \cdot 10^{-5}$

Відповідно до результатів розв'язання задачі 2.1 в режимі максимальних навантажень необхідно вимикати всі шунтувальні реактори, встановлені в електропередачі для компенсації її зарядної потужності.

Таким чином, в режимі навантаження натуральною потужністю електропередача складається із лінії електропередавання завдовжки 750 км та груп автотрансформаторів, встановлених на початку та наприкінці електропередачі.

Ланцюгова схема електропередачі у досліджуваному режимі показана на рис. 2.3.

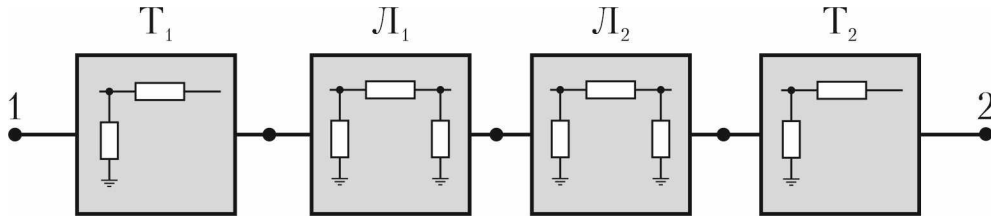


Рис. 2.3. Ланцюгова схема електропередачі

Параметри еквівалентного чотирьохполюсника досліджуваної електропередачі становлять

$$M_{eq} := M_{AT} \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot M_{AT}$$

$$M_{eq} = \begin{bmatrix} 0.614 + 0.024i & (11.102 + 222.499i) \Omega \\ (-5.381 \cdot 10^{-6} + 0.003i) S & 0.615 + 0.024i \end{bmatrix}$$

Еквівалентний реактанс електропередачі становить

$$x_{eq} := \text{Im}(M_{eq_{0,1}}) = 222.499 \Omega$$

Отже, ідеальна межа потужності електропередачі дорівнює

$$P_{max} := \frac{U_n^2}{x_{eq}} = 2528.1 MW$$

що більше за натуральну потужність лінії

$$P_{max} > P_c$$

Разом з тим, запасу статичної стійкості для забезпечення необхідної пропускної здатності електропередачі недостатньо.

Амплітуда нерегулярних коливань активної потужності навантаження електропередачі складає

$$\Delta P := 1.5 \cdot \sqrt{\frac{S_I \cdot S_{II}}{S_I + S_{II}}} \cdot 1 MW = 116.19 MW$$

де коефіцієнт 1,5 прийнято для ручного регулювання перетоку потужності по електропередачі.

Таким чином, коефіцієнт запасу статичної стійкості дорівнює

$$K_P := 1 - \frac{P_c + \Delta P}{P_{max}} = 8.7\%$$

Отриманий результат свідчить про недостатню пропускну здатність досліджуваної електропередачі та необхідність встановлення установки поздовжньої ємнісної компенсації.

Еквівалентний реактанс електропередачі, який буде забезпечувати нормативний запас статичної стійкості становить

$$x'_{eq} := \frac{U_n^2 \cdot (1 - 20\%)}{P_c + \Delta P} = 195.066 \, \Omega$$

де 20% - нормоване значення коефіцієнту запасу статичної стійкості електропередачі.

Визначимо параметри еквівалентних чотириполіусників перед та після встановлення УПК:

$$M_I := M_{AT} \cdot M_1 = \begin{bmatrix} 0.863 + 0.008i & (7.747 + 132.85i) \, \Omega \\ (7.392 \cdot 10^{-6} + 0.002i) \, S & 0.91 + 0.007i \end{bmatrix}$$

$$M_{II} := M_2 \cdot M_{AT} = \begin{bmatrix} 0.931 + 0.006i & (6.964 + 120.757i) \, \Omega \\ (7.775 \cdot 10^{-6} + 0.001i) \, S & 0.89 + 0.006i \end{bmatrix}$$

$$A_I := M_{I_{0,0}} = 0.863 + 0.008i \quad A'_I := \operatorname{Re}(A_I) \quad A''_I := \operatorname{Im}(A_I)$$

$$B_I := M_{I_{0,1}} = (7.75 + 132.85i) \, \Omega \quad B'_I := \operatorname{Re}(B_I) \quad B''_I := \operatorname{Im}(B_I)$$

$$B_{II} := M_{II_{0,1}} = (6.96 + 120.76i) \, \Omega \quad B'_{II} := \operatorname{Re}(B_{II}) \quad B''_{II} := \operatorname{Im}(B_{II})$$

$$D_{II} := M_{II_{1,1}} = 0.89 + 0.006i \quad D'_{II} := \operatorname{Re}(D_{II}) \quad D''_{II} := \operatorname{Im}(D_{II})$$

Таким чином, реактанс УПК, яка буде забезпечувати нормативну пропускну здатність електропередачі дорівнює

$$x_c := \frac{(A'_I \cdot B''_{II} + A''_I \cdot B'_{II} + B'_I \cdot D''_{II} + B''_I \cdot D'_{II}) - x'_{eq}}{A''_I \cdot D''_{II} - A'_I \cdot D'_{II}} = -35.737 \, \Omega$$

Від'ємний знак отриманого значення свідчить про ємнісний характер реактансу.

Визначимо співвідношення між ємнісним реактансом УПК та реактансом лінії електропередавання

$$\frac{|x_c|}{x_0 \cdot l} = 17.2\%$$

Отриманий результат свідчить про можливість встановлення однієї УПК на перемикальному пункті на відстані 400 км від початку лінії.

В задачах проектування та аналізу режимів дальніх електропередач УПК подають за допомогою елементарної заступної схеми, як показано на рис. 2.4.

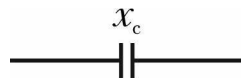


Рис. 2.4. Заступна схема установки поздовжньої компенсації

Визначимо характеристики УПК, яка комплектується із силових конденсаторів типу КС2А-0,66-40.

Паспортні дані силового конденсатора становлять

номінальна напруга $U_{c0} := 0.66 \text{ kV}$

номінальна потужність $Q_{c0} := 40 \text{ kVar}$

Отже, номінальний струм силового конденсатора становить

$$I_{c0} := \frac{Q_{c0}}{U_{c0}} = 60.606 \text{ A}$$

Ємнісний реактанс конденсатора дорівнює

$$x_{c0} := -\frac{U_{c0}^2}{Q_{c0}} = -10.89 \Omega$$

Кількість паралельних кіл УПК визначимо за умовою забезпечення пропускну здатності пристрою в режимі максимальних навантажень електропередачі

$$m_c := \text{ceil} \left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot \lambda \cdot U_n \cdot I_{c0}} \right) = 26$$

Кількість послідовно увімкнених силових конденсаторів у кожному колі дорівнює

$$n_c := \text{ceil} \left(\frac{x_c \cdot m_c}{x_{c0}} \right) = 86$$

Таким чином, УПК комплектують з 26 паралельних кіл по 86 силових конденсаторів в кожній фазі пристрою.

Фактичний ємнісний опір установки становить

$$x_c := x_{c0} \cdot \frac{n_c}{m_c} = -36.021 \, \Omega$$

Зазначимо, що отримане значення ємнісного опору УПК більше за розрахункове, що свідчить про забезпечення необхідної пропускну здатності електропередачі.

Формування еквівалентного чотириполюсника для УПК проілюстровано на рис. 2.5.

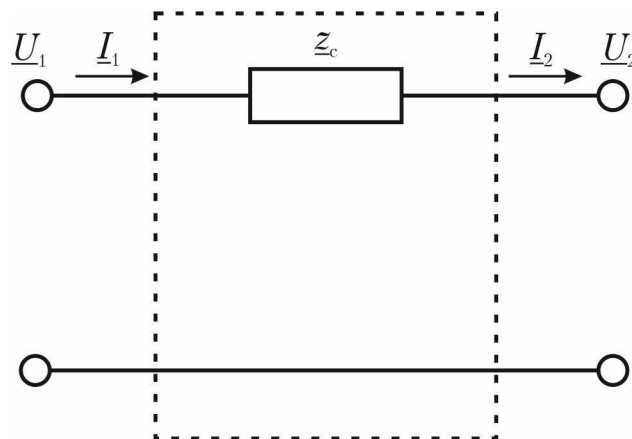


Рис. 2.5. Формування еквівалентного чотириполюсника для заступної схеми УПК

Визначимо параметри еквівалентного чотирьохполосника для УПК:

$$A_c := 1 \quad B_c := 1j \cdot x_c = -36.021i \, \Omega \quad C_c := 0 \, S \quad D_c := 1$$

$$M_c := \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -36.021i \, \Omega \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ланцюгова схема електропередачі з УПК представлена на рис. 2.6.

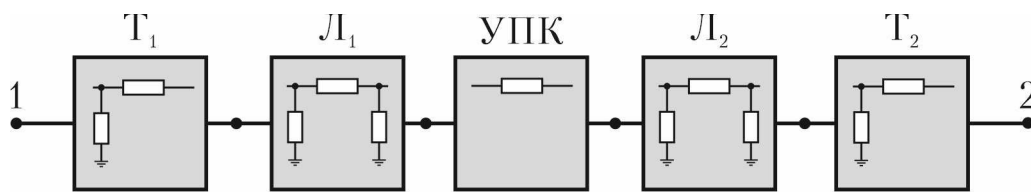


Рис. 2.6. Ланцюгова схема електропередачі з УПК

Параметри еквівалентного чотирьохполосника для електропередачі з УПК становлять

$$M_{eq} := M_{AT} \cdot M_1 \cdot M_c \cdot M_2 \cdot M_{AT}$$

$$M_{eq} = \begin{bmatrix} 0.659 + 0.024i & (11.553 + 194.848i) \, \Omega \\ (-4.55 \cdot 10^{-6} + 0.003i) \, S & 0.667 + 0.024i \end{bmatrix}$$

Таким чином, еквівалентний реактанс електропередачі становить

$$x_{eq} := \text{Im}(M_{eq0,1}) = 194.848 \, \Omega$$

Ідеальна межа потужності електропередачі становить

$$P_{max} := \frac{U_n^2}{x_{eq}} = 2886.87 \, MW$$

Отже, коефіцієнт запасу статичної стійкості дорівнює

$$K_P := \frac{P_{max} - P_c - \Delta P}{P_{max}} = 20.1\%$$

Отриманий результат свідчить про забезпечення нормованої пропускної здатності електропередачі в режимі навантаження натуральною потужністю.



ЗАДАЧА 2.3.

Дальня електропередача напругою 750 кВ в режимі максимальних навантажень несе навантаження 1800-j200 МВА. Коефіцієнт потужності, який необхідно забезпечити на шинах приймальної системи становить 0,9. На приймальній підстанції встановлено автотрансформатори типу АОДЦТН-333000/750/330.

Визначити склад заходів щодо забезпечення балансу реактивної потужності на шинах приймальної підстанції електропередачі.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики дальньої електропередачі становлять:

номінальна напруга	$U_n = 750 \text{ kV}$
максимальне навантаження	$S_{max} := (1800 - j200) \text{ MVA}$ $P_{max} := \operatorname{Re}(S_{max}) = 1800 \text{ MW}$ $Q_{max} := \operatorname{Im}(S_{max}) = -200 \text{ MVar}$
коефіцієнт потужності на шинах приймальної підстанції	$\lambda_2 := 0.95$

Коефіцієнт потужності навантаження, яке несе електропередача дорівнює

$$\lambda_{max} := \cos(\arg(S_{max})) = 0.994$$

Отриманий результат свідчить про те, що обсяг реактивної потужності, який надходить із лінії до приймальної системи, недостатній для забезпечення балансу реактивної потужності. Тобто необхідна генерація додаткової реактивної потужності на шинах приймальної системи. Із цією метою передбачаємо установку синхронних компенсаторів на шинах нижчої напруги обмоток автотрансформаторів підстанції наприкінці електропередачі.

Дефіцит реактивної потужності, який необхідно покрити за рахунок установки синхронних компенсаторів, становить

$$Q_{2def} := -P_{max} \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda_2^2} - 1} - Q_{max} = -391.631 \text{ MVar}$$

Автотрансформатори типу АОДЦТН-333000/750/330, установлені на приймальній підстанції електропередачі, обладнані обмоткою нижчої напруги з номінальною напругою 15,75 кВ.

Для покриття дефіциту реактивної потужності приймаємо до установки синхронні компенсатори типу КСВБ-160-15. Такі синхронні компенсатори характеризуються наступними граничними значеннями потужності в режимах додатного і від'ємного збудження:

$$Q_{SC_L} := 80 \cdot \text{MVar} \qquad Q_{SC_C} := -160 \cdot \text{MVar}$$

Кількість синхронних компенсаторів визначаємо з умови повного покриття дефіциту реактивної потужності

$$n_{SC} := \text{ceil} \left(\frac{Q_{2def}}{Q_{SC_C}} \right) = 3$$

Зазначимо, що в режимах малих навантажень дальньої електропередачі встановлені синхронні компенсатори можуть працювати в режимі недозбудження, компенсуючи до

$$n_{SC} \cdot Q_{SC_L} = 240 \text{ MVar}$$

зарядної потужності лінії, що сприяє поліпшенню умов роботи генераторів приймальної системи.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ДАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ



ЗАДАЧА 3.1.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. На перемикальному пункті електропередачі встановлено установку поздовжньої ємнісної компенсації з опором 36,021 Ом (ємн) та дві групи шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110000/750. Ще одну групу шунтувальних реакторів встановлено на початку електропередачі. Електропередача пов'язана із суміжними енергосистемами за допомогою груп силових автотрансформаторів АОДЦТН-333000/750/330 (по дві групи на початку та наприкінці електропередачі). Параметри лінії, автотрансформаторів, шунтувальних реакторів та установки поздовжньої компенсації відповідають результатам розв'язання задач 1.4 - 1.6, 2.1 та 2.2.

В досліджуваному режимі напруга наприкінці електропередачі дорівнює 735 кВ, а потужність навантаження електропередачі становить 500-7350 МВА.

Реалізувати розрахунок усталеного режиму дальньої електропередачі. Дослідити розподіл напруги вздовж ділянок лінії електропередавання.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга

$$U_n = 750 \text{ kV}$$

довжина лінії

$$l = 750 \text{ km}$$

хвильовий опір лінії

$$Z_c = (256.955 - 8.575i) \Omega$$

коефіцієнт поширення
електромагнітної хвилі

$$\gamma_0 = (4.192 \cdot 10^{-5} + 0.001i) \frac{1}{\text{km}}$$

параметри чотириполіусника
ділянок лінії електропередавання
(ділянка 1 завдовжки 400 км і
ділянка 2 завдовжки 350 км)

$$A_1 = 0.909 + 0.007i$$

$$B_1 = (7.498 + 107.266i) \Omega$$

	$C_1 = (4.99 + 1626.75i) \mu S$
	$D_1 = 0.909 + 0.007i$
	$A_2 = 0.93 + 0.005i$
	$B_2 = (6.664 + 94.544i) \Omega$
	$C_2 = (5.23 + 1433.88i) \mu S$
	$D_2 = 0.93 + 0.005i$
параметри чотириполюсника груп автотрансформаторів	$A_{AT} = 1$
	$B_{AT} = (0.49 + 28.153i) \Omega$
	$C_{AT} = (2.667 - 12.432i) \mu S$
	$D_{AT} = 1 + 6.898i \cdot 10^{-5}$
параметри чотириполюсника УПК	$A_c = 1$
	$B_c = -36.021i \Omega$
	$C_c = 0 \mu S$
	$D_c = 1$
параметри чотириполюсників однієї та двох груп ШР	$A_R = 1$
	$A_{R2} = 1$
	$B_R = 0 \Omega$
	$B_{R2} = 0 \Omega$
	$C_R = (1.55 - 532.8i) \mu S$
	$C_{R2} = (3.1 - 1065.6i) \mu S$
	$D_R = 1$
	$D_{R2} = 1$
напруга наприкінці електропередачі	$U_2 := 750 kV$
навантаження наприкінці електропередачі	$S_2 := (500 - 350j) MVA$
	$P_2 := \operatorname{Re}(S_2) = 500 MW$
	$Q_2 := \operatorname{Im}(S_2) = -350 MVAr$

Ланцюгова схема досліджуваної дальньої електропередачі представлена на рис. 3.1.

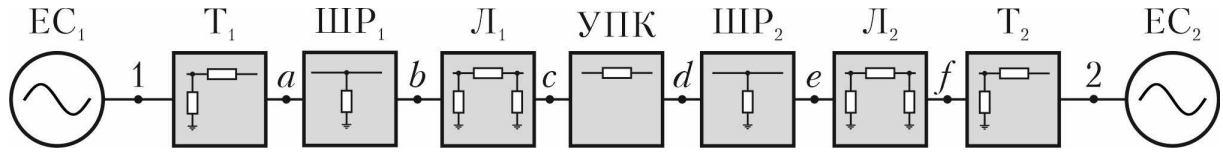


Рис. 3.1. Ланцюгова схема досліджуваної електропередачі

Відповідно до ланцюгової схеми параметри еквівалентного чотириполіюсника електропередачі становлять

$$M_{eq} := M_{AT} \cdot M_R \cdot M_1 \cdot M_c \cdot M_{R2} \cdot M_2 \cdot M_{AT}$$

$$M_{eq} = \begin{bmatrix} 0.772 + 0.017i & (13.546 + 210.671i) \, \Omega \\ (2.084 \cdot 10^{-5} + 0.001i) \, S & 0.89 + 0.012i \end{bmatrix}$$

Визначимо струм в усталеному режимі наприкінці електропередачі

$$I_2 := \frac{S_2}{U_2} = (666.667 - 466.667i) \, A$$

Таким чином, вектор-стовпець режимних параметрів наприкінці електропередачі становить:

$$UI_2 := \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750000 \, V \\ (666.667 - 466.667i) \, A \end{bmatrix}$$

Напруга та струм на початку електропередачі складають

$$UI_1 := M_{eq} \cdot UI_2 = \begin{bmatrix} (686179.968 + 147188.928i) \, V \\ (614.606 + 708.064i) \, A \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_1 := UI_{1_0} = (686.18 + 147.189i) \, kV \quad |U_1| = 701.789 \, kV$$

$$I_1 := UI_{1_1} = (614.606 + 708.064i) \, A$$

Потужність на початку електропередачі становить

$$S_1 := \overline{U_1} I_1 = (525.949 + 395.396i) \text{ MVA}$$

або

$$P_1 := \operatorname{Re}(S_1) = 525.949 \text{ MW}$$

$$Q_1 := \operatorname{Im}(S_1) = 395.396 \text{ MVAr}$$

Отже, сумарні втрати активної потужності в електропередачі дорівнюють

$$\Delta P := P_1 - P_2 = 25.949 \text{ MW}$$

що складає $\frac{\Delta P}{P_2} = 5.2\%$ навантаження, яке несе лінія

Здійснимо розрахунок режимних параметрів у вузлових точках електропередачі за умовами початку.

Матриці еквівалентних чотириполіусників для такої задачі набувають вигляду:

для групи автотрансформаторів

$$M1_{AT} := \begin{bmatrix} D_{AT} & -B_{AT} \\ -C_{AT} & A_{AT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + 6.9i \cdot 10^{-5} & (-0.49 - 28.15i) \Omega \\ (-2.67 \cdot 10^{-6} + 1.24i \cdot 10^{-5}) S & 1 \end{bmatrix}$$

для ділянок лінії електропередавання

$$M1_1 := \begin{bmatrix} D_1 & -B_1 \\ -C_1 & A_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.909 + 0.007i & (-7.498 - 107.266i) \Omega \\ (-4.992 \cdot 10^{-6} - 0.002i) S & 0.909 + 0.007i \end{bmatrix}$$

$$M1_2 := \begin{bmatrix} D_2 & -B_2 \\ -C_2 & A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.93 + 0.005i & (-6.664 - 94.544i) \Omega \\ (-5.228 \cdot 10^{-6} - 0.001i) S & 0.93 + 0.005i \end{bmatrix}$$

для установки поздовжньої компенсації

$$M1_c := \begin{bmatrix} D_c & -B_c \\ -C_c & A_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 36.021i \Omega \\ 0 S & 1 \end{bmatrix}$$

для груп шунтувальних реакторів

$$M1_R := \begin{bmatrix} D_R & -B_R \\ -C_R & A_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \, \Omega \\ (-1.55 \cdot 10^{-6} + 5.328i \cdot 10^{-4}) \, S & 1 \end{bmatrix}$$

$$M1_{R2} := \begin{bmatrix} D_{R2} & -B_{R2} \\ -C_{R2} & A_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \, \Omega \\ (-3.1 \cdot 10^{-6} + 0.001i) \, S & 1 \end{bmatrix}$$

Відповідно до результатів проведених розрахунків напруга та струм на початку електропередачі становлять

$$UI_1 = \begin{bmatrix} (686179.968 + 147188.928i) \, V \\ (614.606 + 708.064i) \, A \end{bmatrix}$$

Напруга та струм після групи автотрансформаторів на початку електропередачі (у вузловій точці a на рис. 3.1) становлять

$$UI_{a.} := M1_{AT} \cdot UI_1 = \begin{bmatrix} (706043.743 + 129637.682i) \, V \\ (610.946 + 716.202i) \, A \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_{a.} := UI_{a.,0} = (706.044 + 129.638i) \, kV \quad |U_{a.}| = 717.847 \, kV$$

$$I_{a.} := UI_{a.,1} = (610.946 + 716.202i) \, A$$

Потік потужності після групи автотрансформаторів на початку електропередачі становить

$$S_{a.} := \overline{U_{a.}} \cdot I_{a.} = (524.201 + 426.469i) \, MVA$$

або

$$P_{a.} := \operatorname{Re}(S_{a.}) = 524.201 \, MW$$

$$Q_{a.} := \operatorname{Im}(S_{a.}) = 426.469 \, MVAr$$

Втрати активної потужності в групі автотрансформаторів дорівнюють

$$\Delta P_{1_a} := P_1 - P_{a.} = 1.748 \, MW$$

Напруга та струм після першої групи шунтувальних реакторів (в точці b електропередачі) становлять

$$UI_{b.} := M1_R \cdot UI_{a.} = \begin{bmatrix} (706043.743 + 129637.682i) \text{ V} \\ (540.781 + 1092.182i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_{b.} := UI_{b._0} = (706.044 + 129.638i) \text{ kV} \quad |U_{b.}| = 717.847 \text{ kV}$$

$$I_{b.} := UI_{b._1} = (540.781 + 1092.182i) \text{ A}$$

Звернемо увагу на однакові значення напруги перед та після пристрою компенсації зарядної потужності лінії, що обумовлено відсутністю поздовжніх елементів у розрахунковій схемі пристрою.

Потужність після групи шунтувальних реакторів дорівнює

$$S_{b.} := \overline{U_{b.}} \cdot I_{b.} = (523.403 + 701.023i) \text{ MVA}$$

або

$$P_{b.} := \operatorname{Re}(S_{b.}) = 523.403 \text{ MW}$$

$$Q_{b.} := \operatorname{Im}(S_{b.}) = 701.023 \text{ MVar}$$

Втрати активної потужності в групі шунтувальних реакторів дорівнюють

$$\Delta P_{a_b} := P_{a.} - P_{b.} = 0.799 \text{ MW}$$

Напруга та струм наприкінці першої ділянки лінії електропередавання (у вузловій точці c електропередачі) становлять

$$UI_{c.} := M1_1 \cdot UI_{b.} = \begin{bmatrix} (753716.454 + 56541.985i) \text{ V} \\ (691.075 - 153.035i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_{c.} := UI_{c._0} = (753.716 + 56.542i) \text{ kV} \quad |U_{c.}| = 755.834 \text{ kV}$$

$$I_{c.} := UI_{c._1} = (691.075 - 153.035i) \text{ A}$$

Потужність наприкінці першої ділянки лінії електропередавання дорівнює

$$S_{c.} := \overline{U_{c.}} \cdot I_{c.} = (512.222 - 154.42i) \text{ MVA}$$

або

$$P_c := \operatorname{Re} \langle S_c \rangle = 512.222 \text{ MW}$$

$$Q_c := \operatorname{Im} \langle S_c \rangle = -154.42 \text{ MVar}$$

Втрати активної потужності на ділянці лінії електропередавання дорівнюють

$$\Delta P_{b_c} := P_b - P_c = 11.181 \text{ MW}$$

Напруга та струм після пристрою поздовжньої компенсації (в точці d електропередачі) становлять

$$UI_d := M1_c \cdot UI_c = \begin{bmatrix} (759228.907 + 81435.039i) \text{ V} \\ (691.075 - 153.035i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_d := UI_{d_0} = (759.229 + 81.435i) \text{ kV} \quad |U_d| = 763.584 \text{ kV}$$

$$I_d := UI_{d_1} = (691.075 - 153.035i) \text{ A}$$

Звернемо увагу на однакові значення струму перед та після пристрою поздовжньої компенсації, що обумовлено відсутністю струмів витоку у розрахунковій схемі пристрою.

Водночас на пристрої поздовжньої компенсації спостерігається "скачок" напруги

$$|U_d| - |U_c| = 7.749 \text{ kV}$$

Потужність після пристрою поздовжньої компенсації дорівнює

$$S_d := \overline{U_d} \cdot I_d = (512.222 - 172.467i) \text{ MVA}$$

або

$$P_d := \operatorname{Re} \langle S_d \rangle = 512.222 \text{ MW}$$

$$Q_d := \operatorname{Im} \langle S_d \rangle = -172.467 \text{ MVar}$$

Звернемо увагу на відсутність втрат активної потужності в пристрої поздовжньої компенсації, розрахункова схема якого характеризується виключно ємнісним реактансом:

$$\Delta P_{c_d} := P_c - P_d = 0 \text{ MW}$$

Напруга та струм після групи шунтувальних реакторів (в точці e електропередачі) становлять

$$UI_e := M1_{R2} \cdot UI_d = \begin{bmatrix} (759228.907 + 81435.039i) \text{ V} \\ (601.944 + 655.747i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_e := UI_{e,0} = (759.229 + 81.435i) \text{ kV} \quad |U_e| = 763.584 \text{ kV}$$

$$I_e := UI_{e,1} = (601.944 + 655.747i) \text{ A}$$

Потужність після групи шунтувальних реакторів дорівнює

$$S_e := \overline{U_e} \cdot I_e = (510.414 + 448.843i) \text{ MVA}$$

або

$$P_e := \operatorname{Re}(S_e) = 510.414 \text{ MW}$$

$$Q_e := \operatorname{Im}(S_e) = 448.843 \text{ MVar}$$

Втрати активної потужності в групі шунтувальних реакторів наприкінці електропередачі дорівнюють

$$\Delta P_{d_e} := P_d - P_e = 1.807 \text{ MW}$$

Напруга та струм наприкінці другої ділянки лінії електропередавання (в точці e електропередачі) становлять

$$UI_f := M1_2 \cdot UI_e = \begin{bmatrix} (763465.042 + 18539.936i) \text{ V} \\ (668.933 - 476.109i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_f := UI_{f,0} = (763.465 + 18.54i) \text{ kV} \quad |U_f| = 763.69 \text{ kV}$$

$$I_f := UI_{f,1} = (668.933 - 476.109i) \text{ A}$$

Потужність наприкінці другої ділянки лінії електропередавання дорівнює

$$S_f := \overline{U_f} \cdot I_f = (501.88 - 375.894i) \text{ MVA}$$

або

$$P_f := \operatorname{Re}(S_f) = 501.88 \text{ MW}$$

$$Q_f := \operatorname{Im}(S_f) = -375.894 \text{ MVar}$$

Втрати активної потужності в лінії електропередавання дорівнюють

$$\Delta P_{e_f} := P_e - P_f = 8.534 \text{ MW}$$

Напруга та струм після групи автотрансформаторів наприкінці електропередачі становлять

$$UI_2 := M1_{AT} \cdot UI_f = \begin{bmatrix} 750000 \text{ V} \\ (666.667 - 466.667i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_2 := UI_{2_0} = 750 \text{ kV}$$

$$I_2 := UI_{2_1} = (666.667 - 466.667i) \text{ A}$$

Потік потужності після групи автотрансформаторів становить

$$S_2 := \overline{U_2} I_2 = (500 - 350i) \text{ MVA}$$

або

$$P_2 := \operatorname{Re}(S_2) = 500 \text{ MW}$$

$$Q_2 := \operatorname{Im}(S_2) = -350 \text{ MVar}$$

Звернемо увагу на збіг отриманих результатів із вихідними даними до задачі, що свідчить про правильність проведених розрахунків.

Втрати активної потужності в групі автотрансформаторів дорівнюють

$$\Delta P_{f_2} := P_f - P_2 = 1.88 \text{ MW}$$

Сформуємо епюри розподілу напруги вздовж ділянок електропередачі.

Розглянемо першу ділянку електропередачі завдовжки 400 км.

$$x := 0 \text{ km}, 1 \text{ km} \dots 400 \text{ km}$$

Функція розподілу напруги вздовж ділянки лінії електропередавання має вигляд

$$U_{1.}(x) := |\cosh(\gamma_0 \cdot x) \cdot U_{b.} - Z_c \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x) \cdot I_{b.}|$$

Графік епюри розподілу напруги вздовж першої ділянки лінії електропередавання представлено на рис. 3.2.

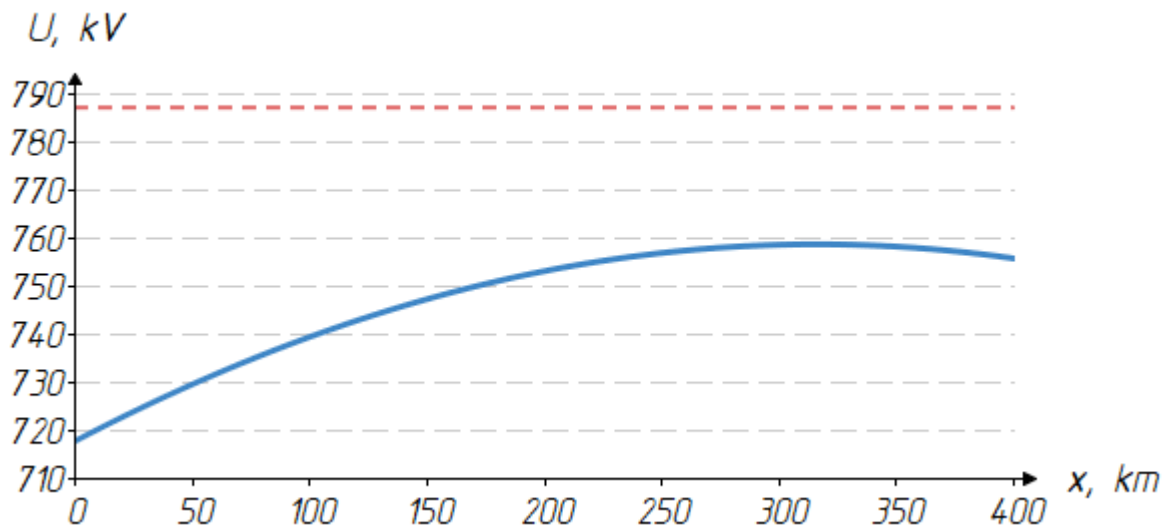


Рис. 3.2. Епюра розподілу напруги вздовж першої ділянки електропередачі

Розглянемо другу ділянку електропередачі завдовжки 350 км.

$$x := 0 \text{ км}, 1 \text{ км} \dots 350 \text{ км}$$

Функція розподілу напруги вздовж ділянки лінії електропередавання має вигляд

$$U_{2.}(x) := |\cosh(\gamma_0 \cdot x) \cdot U_{e.} - Z_c \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x) \cdot I_{e.}|$$

Графік епюри розподілу напруги вздовж першої ділянки лінії електропередавання представлено на рис. 3.3.

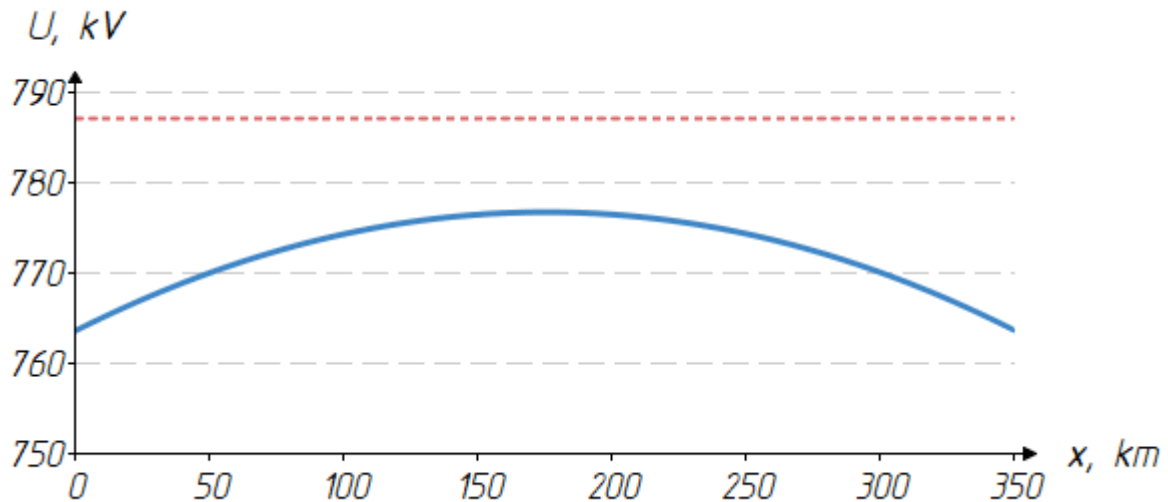


Рис. 3.3. Епюра розподілу напруги вздовж другої ділянки електропередачі

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що в жодній вузловій та проміжній точках електропередачі відсутня недопустима перенапруга, що свідчить про допустимість параметрів досліджуваного усталеного режиму електропередачі.

На рис. 3.4 представлена векторна діаграма напруги та струму у відносних одиницях на початку та наприкінці електропередачі в досліджуваному режимі.

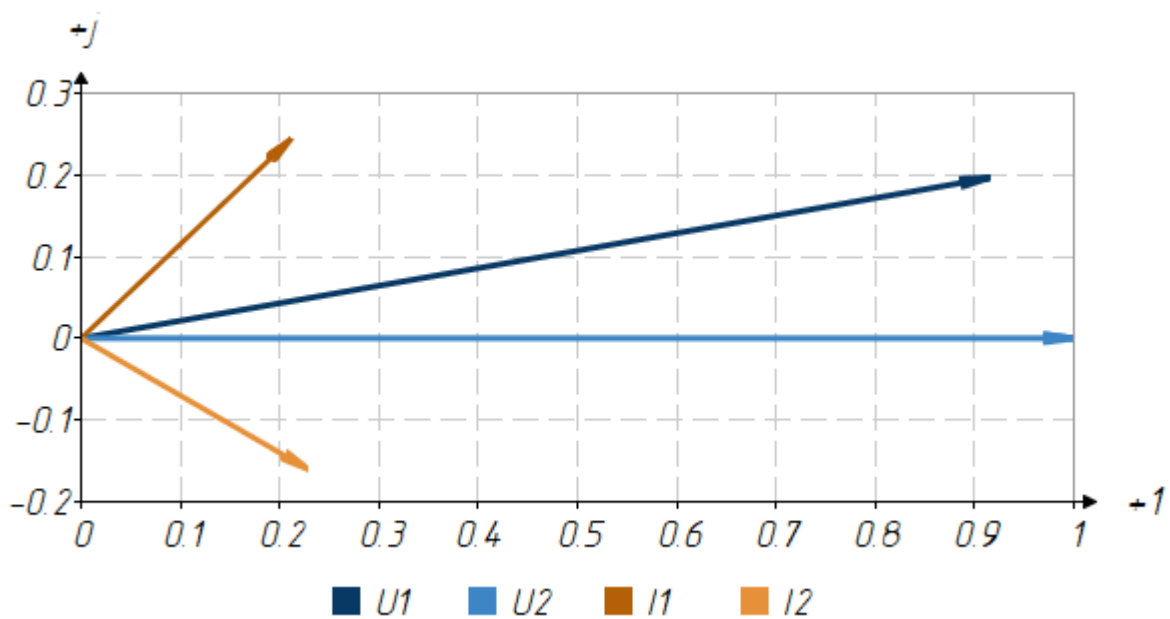


Рис. 3.4. Векторна діаграма напруги та струму електропередачі в навантажувальному режимі

Аналіз векторної діаграми напруги та струму дальньої електропередачі в досліджуваному навантажувальному режимі свідчить про індуктивний характер струму наприкінці електропередачі та ємнісний характер - на початку лінії, що обумовлене стіканням надлишкової зарядної потужності лінії надвисокої номінальної напруги в суміжні енергосистеми.



ЗАДАЧА 3.2.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. На перемикальному пункті електропередачі встановлено установку поздовжньої ємнісної компенсації та дві групи шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110000/750. Ще дві групи шунтувальних реакторів встановлено на початку електропередачі. Електропередача пов'язана із суміжними енергосистемами за допомогою груп силових автотрансформаторів АОДЦТН-333000/750/330. Параметри лінії, автотрансформаторів, шунтувальних реакторів та УПК відповідають результатам розв'язання задач 1.4 - 1.6, 2.1 та 2.2.

В режимі неробочого ходу лінія підключена до шин приймальної енергосистеми наприкінці електропередачі. Напруга з боку приєднаного кінця електропередачі становить 712 кВ.

Визначити регулювальні положення пристрою РПН автотрансформатора на "відкритому" кінці лінії, за яких можливо здійснення синхронізації електропередачі; розрахувати зарядну потужність лінії електропередавання, яка стікає в приєднану енергосистему; дослідити розподіл напруги вздовж лінії електропередавання.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга

$$U_n = 750 \text{ kV}$$

параметри чотирьох полюсника
ділянок лінії електропередавання
(ділянка 1 завдовжки 400 км і
ділянка 2 завдовжки 350 км)

$$A_1 = 0.909 + 0.007i$$

$$B_1 = (7.498 + 107.266i) \Omega$$

$$C_1 = (4.99 + 1626.75i) \mu S$$

$$D_1 = 0.909 + 0.007i$$

	$A_2=0.93+0.005i$
	$B_2=(6.664+94.544i) \Omega$
	$C_2=(5.23+1433.88i) \mu S$
	$D_2=0.93+0.005i$
параметри чотирьохполісника УПК	$A_c=1 \quad D_c=1$
	$B_c=-36.021i \Omega \quad C_c=0 \mu S$
параметри чотирьохполісника двох груп ШР	$A_{R2}=1 \quad D_{R2}=1$
	$B_{R2}=0 \Omega$
	$C_{R2}=(3.1-1065.6i) \mu S$
параметри чотирьохполісника груп автотрансформаторів	$A_{AT}=1$
	$B_{AT}=(0.49+28.153i) \Omega$
	$C_{AT}=(2.667-12.432i) \mu S$
	$D_{AT}=1+6.898i \cdot 10^{-5}$
можливі значення коефіцієнту трансформації автотрансформаторів	$k_{tmin}=2.157$
	$k_{t0}=2.273$
	$k_{tmax}=2.414$
напруга з боку живлення електропередачі	$U_2:=712 \text{ kV}$
номінальна напруга енергосистеми з боку "відкритого" кінця лінії	$U_{1n}:=330 \text{ kV}$

Визначимо границі регулювання напруги на кінці електропередачі з урахуванням можливості регулювання напруги засобами генераторів передавальної системи ($\pm 5\%$):

$$U_{1min}:=0.95 \cdot k_{tmin} \cdot U_{1n}=676.227 \text{ kV}$$

$$U_{1max}:=1.05 \cdot k_{tmax} \cdot U_{1n}=836.5 \text{ kV}$$

Слід зазначити, що розрахований найбільший можливий рівень напруги на "відкритому" кінці лінії, перевищує максимально допустимий за умовами роботи лінійної ізоляції 787 кВ. Таким чином, діапазон регулювання напруги на шинах передавальної підстанції знаходиться в межах 676,2...787 кВ.

Необхідно пам'ятати, що отримані значення напруги не є фактичними, а являють собою величини, зведені до базисної напруги електропередачі 750 кВ.

Виконаємо розрахунок режиму неробочого ходу електропередачі. Ланцюгова схема досліджуваного режиму представлена на рис. 3.5. Під час моделювання режиму слід зважати на те, що електропередача підключена до енергосистеми наприкінці лінії, що обумовлює розрахунок параметрів еквівалентного чотирьохполюсника у зворотному напрямі від кінця до початку електропередачі.

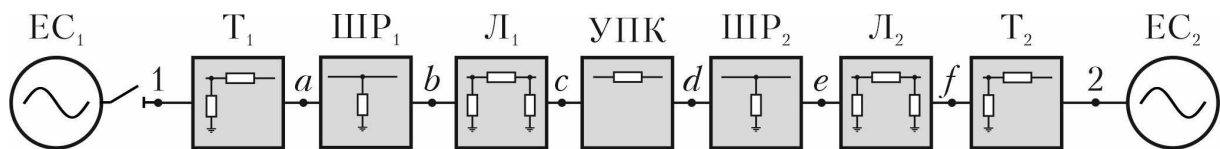


Рис. 3.5. Ланцюгова схема електропередачі в режимі однобічного увімкнення

Параметри еквівалентного чотирьохполюсника електропередачі визначаються матричним виразом

$$M0_{eq} := M_{AT} \cdot M_2 \cdot M_{R2} \cdot M_c \cdot M_1 \cdot M_{R2} \cdot M_{AT}$$

$$M0_{eq} = \begin{bmatrix} 0.989 + 0.005i & (13.788 + 213.452i) \, \Omega \\ (3.075 \cdot 10^{-5} + 0.001i) \, S & 0.785 + 0.018i \end{bmatrix}$$

тобто

$$A_{eq} := M0_{eq_{0,0}} = 0.989 + 0.005i \quad C_{eq} := M0_{eq_{1,0}} = (0.031 + 1.054i) \, mS$$

Напруга на "відкритому" кінці електропередачі становить

$$U_1 := \frac{U_2}{A_{eq}} = (720.236 - 3.428i) \, kV \quad |U_1| = 720.244 \, kV$$

Визначимо діапазон коефіцієнтів трансформації автотрансформаторів відкритого кінця електропередачі, за якого можливе здійснення її синхронізації з енергосистемою.

$$k_{max} := \frac{|U_1|}{0.95 \cdot U_{1n}} = 2.297 \quad k_{min} := \frac{|U_1|}{1.05 \cdot U_{1n}} = 2.079$$

Зіставлення отриманого результату із можливими значеннями коефіцієнтів трансформації автотрансформаторів з "відкритого" кінця електропередачі свідчить про те, що синхронізацію можна здійснювати за будь-якого можливого регульовального відгалуження РПН автотрансформаторів, оскільки прилеглі до підстанції генератори мають достатній регульовальний діапазон для здійснення синхронізації.

Визначимо струм та потужність з боку живлення електропередачі:

$$I_2 := U_2 \cdot C_{eq} = (21.894 + 750.33i) \text{ A}$$

$$S_2 := U_2 \cdot I_2 = (15.588 + 534.235i) \text{ MVA}$$

$$P_2 := \operatorname{Re}(S_2) = 15.588 \text{ MW}$$

$$Q_2 := \operatorname{Im}(S_2) = 534.235 \text{ MVar}$$

Зазначимо, що в досліджуваному режимі активна потужність обумовлена втратами неробочого ходу в лінії та направлена із системи в лінію, а реактивна потужність являє собою надлишкову зарядну потужність лінії, яка стікає із електропередачі в систему.

На рис. 3.6 представлена векторна діаграма напруги та струму на початку та наприкінці електропередачі в режимі однобічного увімкнення.

Аналіз даних векторної діаграми напруги та струму електропередачі свідчить про надмалий розворот векторів напруги між початком та кінцем лінії, що обумовлено відсутністю навантаження, яке несе лінія. Вектор струму з боку живлення електропередачі випереджає відповідний вектор напруги на кут, близький до 90° , що обумовлено переважно ємнісним характером струму електропередачі.

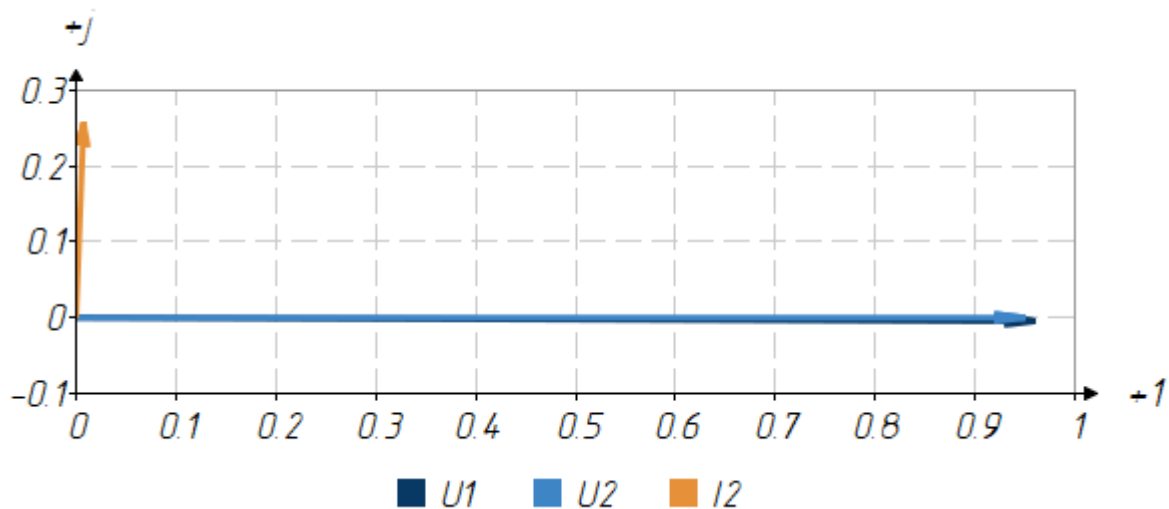


Рис. 3.6. Векторна діаграма напруги та струму електропередачі в режимі однобічного увімкнення

Отримані результати свідчать про те, що обсяги реактивної потужності, яка стікає з лінії до енергосистеми дещо перевищує середнє гранично допустиме значення (для мереж напругою 330 кВ допустиме стікання реактивної потужності до 500 МВАр), що обумовлює порушення балансу реактивної потужності в енергосистемі. Тому, для забезпечення прийняттого режиму генераторів енергосистеми, розташованих поблизу кінцевої підстанції електропередачі, необхідно передбачати встановлення додаткових пристроїв компенсації, призначених для перерозподілу потоків реактивної потужності. Такими засобами можуть бути, наприклад, синхронні компенсатори, встановлені на приймальній підстанції електропередачі, які в режимі недозбудження можуть споживати частину зарядної потужності лінії, знижуючи стікання останньої до прийнятних значень.

Розрахунок режиму напруги в проміжних точках виконаємо за умовами кінця електропередачі. Вектор-стовпець напруги-струму наприкінці електропередачі становить

$$UI_2 := \begin{bmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (7.12 \cdot 10^5) \text{ V} \\ (-21.894 - 750.33i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

У проміжній точці e ланцюгової схеми (на початку другої ділянки лінії завдовжки 350 км) напруга та струм визначаються матричним виразом

$$UI_e := M_2 \cdot M_{AT} \cdot UI_2 = \begin{bmatrix} (7.533 \cdot 10^5 - 3.9i \cdot 10^3) \text{ V} \\ (-9.202 + 344.958i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

де добуток матриць параметрів чотириполіусників другої ділянки лінії та групи автотрансформаторів являє собою матрицю еквівалентного чотириполіусника між точкою e та кінцем електропередачі.

Отже, напруга та струм в точці e ланцюгової схеми становлять

$$U_e := UI_{e_0} = (753.311 - 3.9i) \text{ kV} \quad I_e := UI_{e_1} = (-9.2 + 344.96i) \text{ A}$$

В аналогічний спосіб визначаємо режимні характеристики у проміжній точці b ланцюгової схеми (на початку першої ділянки лінії завдовжки 400 км):

$$UI_b := M_1 \cdot M_c \cdot M_{R2} \cdot UI_e = \begin{bmatrix} (7.185 \cdot 10^5 - 2.635i \cdot 10^3) \text{ V} \\ (2.57 + 782.578i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

де добуток матриць параметрів чотириполіусників першої ділянки лінії, установки поздовжньої компенсації та групи шунтувальних реакторів являє собою матрицю еквівалентного чотириполіусника між точками b та e ланцюгової схеми електропередачі.

Отже, напруга та струм в точці b ланцюгової схеми становлять

$$U_b := UI_{b_0} = (718.538 - 2.635i) \text{ kV} \quad I_b := UI_{b_1} = (2.57 + 782.58i) \text{ A}$$

Отримані результати дозволяють організувати розрахунок в проміжних точках ділянок лінії електропередавання в діапазоні довжин

$$x := 0 \text{ km}, 1 \text{ km} \dots l_1 + l_2$$

Аналітичний вираз розподілу напруги вздовж дальньої електропередачі має вигляд

$$U_x(x) := \text{if} \left(x \leq l_1, \left| \begin{matrix} U_b \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot x) \\ -Z_c \cdot I_b \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x) \end{matrix} \right|, \left| \begin{matrix} U_e \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot (x - l_1)) \\ -Z_c \cdot I_e \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot (x - l_1)) \end{matrix} \right| \right)$$

Епюра розподілу напруги вздовж електропередачі в режимі однобічного увімкнення представлена на рис. 3.7.

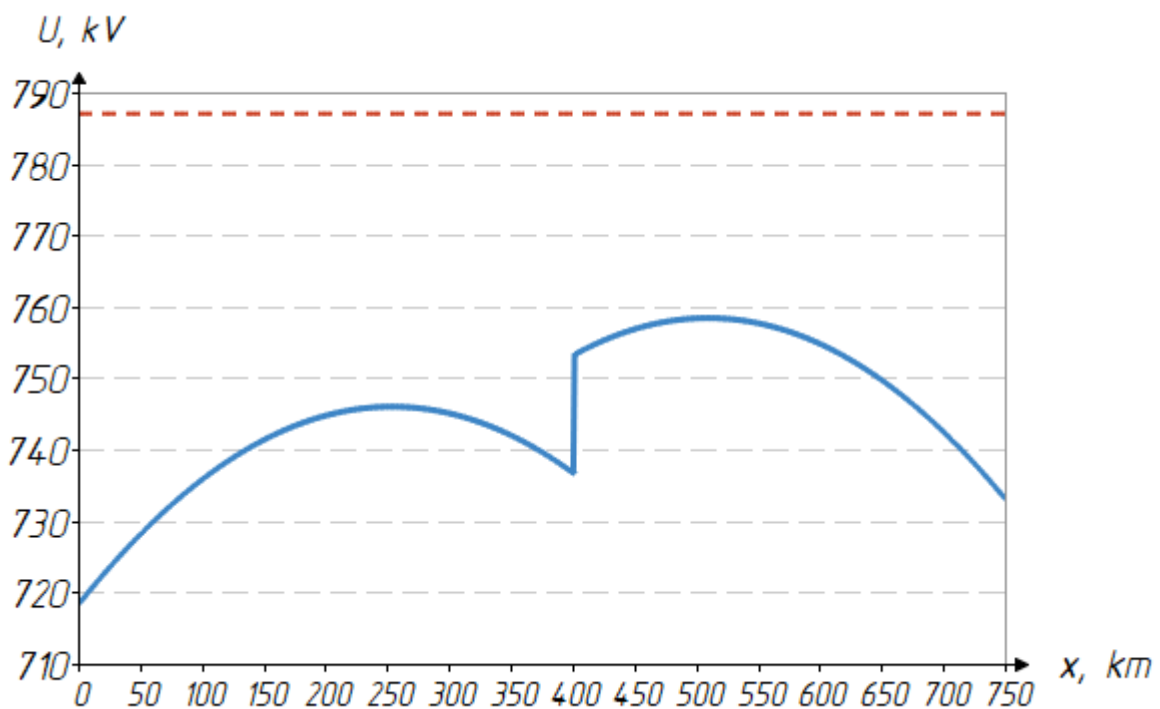


Рис. 3.7. Епюра розподілу напруги вздовж електропередачі в режимі однобічного увімкнення

Аналіз інформації, представленій на рис. 3.7 свідчить про те, що в жодній проміжній точці електропередачі не порушуються умови допустимості режиму напруги, що свідчить про правильність вибору складу та розташування вздовж лінії пристроїв компенсації зарядної потужності.



ЗАДАЧА 3.3.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. На перемикальному пункті електропередачі встановлено установку поздовжньої ємнісної компенсації та дві групи шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110000/750. Ще одну групу шунтувальних реакторів встановлено на початку електропередачі. Електропередача пов'язана із суміжними енергосистемами за допомогою груп силових автотрансформаторів АОДЦТН-333000/750/330. Параметри еквівалентного чотириполюсника електропередачі відповідають результатам розв'язання задачі 3.1.

В навантажувальних режимах підтримується номінальна напруга на початку та наприкінці електропередачі.

Сформуувати кругову діаграму потужності за умовами кінця електропередачі. Визначити реактивну потужність наприкінці електропередачі в режимі ненавантаженої лінії та активну потужність навантаження в збалансованому за реактивною потужністю режимі.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга $U_n = 750 \text{ kV}$

матриця параметрів еквівалентного чотириполусника

$$M_{eq} = \begin{bmatrix} 0.772 + 0.017i & (13.546 + 210.671i) \Omega \\ (2.084 \cdot 10^{-5} + 0.001i) S & 0.89 + 0.012i \end{bmatrix}$$

$$A_{eq} := M_{eq_{0,0}} = 0.772 + 0.017i$$

$$B_{eq} := M_{eq_{0,1}} = (13.546 + 210.671i) \Omega$$

напруга на початку електропередачі $U_1 := U_n = 750 \text{ kV}$

напруга наприкінці електропередачі $U_2 := U_n = 750 \text{ kV}$

Радіус кола кругової діаграми потужності дорівнює

$$R_2 := \frac{U_1 \cdot U_2}{|B_{eq}|} = 2664.54 \text{ MW}$$

Для розрахунку зсуву центру кола кругової діаграми потужності відносно початку координат визначимо коефіцієнти втрат активної та реактивної потужності в досліді короткого замкнення за умовами початку електропередачі:

$$d_{1kP} := \operatorname{Re}(A_{eq} \cdot \overline{B_{eq}}) = 14.123 \Omega$$

$$d_{1kQ} := \operatorname{Im}(A_{eq} \cdot \overline{B_{eq}}) = -162.356 \Omega$$

Таким чином, координати центру кола кругової діаграми потужності становлять:

$$\delta_{P_2} := \frac{-d_{1kP}}{|B_{eq}|^2} \cdot U_2^2 = -178.26 \text{ MW} \quad \delta_{Q_2} := \frac{-d_{1kQ}}{|B_{eq}|^2} \cdot U_2^2 = 2049.22 \text{ MW}$$

Сформуємо графік кругової діаграми потужності в діапазоні навантажень електропередачі

$$P_2 := -3000 \text{ MW}, -2999 \text{ MW}..3000 \text{ MW}$$

Аналітичний вираз кривої кругової діаграми потужності за умовами кінця електропередачі має вигляд

$$Q_2(P_2) := \delta_{Q_2} - \sqrt{R_2^2 - (P_2 - \delta_{P_2})^2}$$

Зазначимо, що наведений аналітичний вираз відповідає нижньому півколу кругової діаграми потужності для статично стійких режимів.

Кругова діаграма потужності дальньої електропередачі для поточної задачі представлена на рис. 3.8.

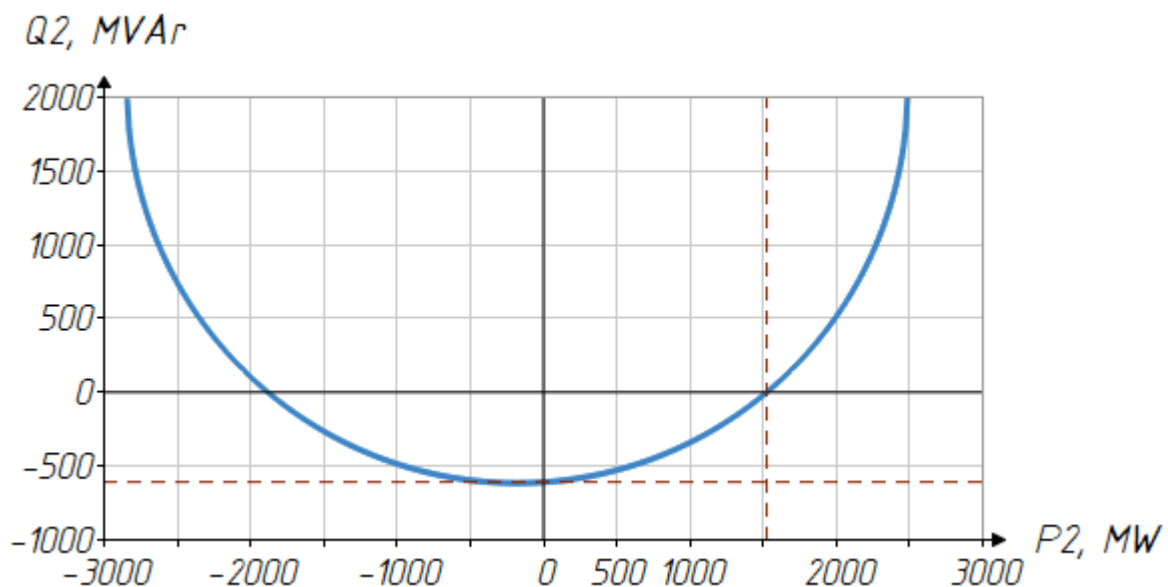


Рис. 3.8. Кругова діаграма потужності електропередачі

Кругова діаграма потужності на рис. 3.8 дозволяє організувати графоаналітичне розв'язання режимних задач за умовами кінця електропередачі, зокрема визначати режим реактивної потужності наприкінці електропередачі за відомого навантаження, яке несе лінія.

Так, наприклад, в режимі ненавантаженої електропередачі реактивна потужність наприкінці лінії визначається ординатою точки перетину кругової діаграми потужності з віссю ординат. Відповідно до даних рис. 3.8 реактивна потужність наприкінці електропередачі в такому режимі приблизно дорівнює

$$Q_2 := -608 \cdot MVar$$

Для отримання більш точного результату необхідно скористатись аналітичним виразом

$$Q_2 := \delta_{Q2} - \sqrt{R_2^2 - (-\delta_{P2})^2} = -609.341 \text{ MVar}$$

В аналогічний спосіб можна визначити характеристики режиму, збалансованого за реактивною потужністю. Навантаження електропередачі в такому режимі визначається координатою точки перетину кругової діаграми потужності з віссю абсцис. Відповідно до даних рис. 3.8 активна потужність наприкінці електропередачі в такому режимі приблизно дорівнює

$$P_2 := 1525 \text{ MW}$$

Для отримання більш точного результату необхідно скористатись аналітичним виразом

$$P_2 := \delta_{P2} + \sqrt{R_2^2 - (-\delta_{Q2})^2} = 1524.8 \text{ MW}$$



ЗАДАЧА 3.4.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. На перемикальному пункті електропередачі встановлено установку поздовжньої ємнісної компенсації та дві групи шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110000/750. Ще одну групу шунтувальних реакторів встановлено на початку електропередачі. Електропередача пов'язана із суміжними енергосистемами за допомогою груп силових автотрансформаторів АОДЦТН-333000/750/330. Параметри еквівалентного чотириполюсника електропередачі відповідають результатам розв'язання задачі 3.1.

В навантажувальних режимах підтримується номінальна напруга на початку та наприкінці електропередачі.

Сформуувати кутову характеристику потужності дальньої електропередачі. Організувати графоаналітичний розрахунок режиму електропередачі за навантаження 1000 МВт.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга $U_n = 750 \text{ kV}$

матриця параметрів еквівалентного чотириполюсника

$$M_{eq} = \begin{bmatrix} 0.772 + 0.017i & (13.546 + 210.671i) \Omega \\ (2.084 \cdot 10^{-5} + 0.001i) S & 0.89 + 0.012i \end{bmatrix}$$

$$B_{eq} := M_{eq_{0,1}} = (13.546 + 210.671i) \Omega$$

напруга на початку електропередачі $U_1 := U_n = 750 \text{ kV}$

напруга наприкінці електропередачі $U_2 := U_n = 750 \text{ kV}$

коефіцієнти втрат потужності $d_{1kP} = 14.123 \Omega$

в досліді короткого замикання $d_{1kQ} = -162.356 \Omega$

навантаження наприкінці електропередачі $P_2 := 1000 \text{ MW}$

Аналітичні вирази для кутових характеристик потужності дальньої електропередачі мають вигляд:

$$P_{2.}(\delta) := \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot (\operatorname{Re}(B_{eq}) \cdot \cos(\delta) + \operatorname{Im}(B_{eq}) \cdot \sin(\delta))}{|B_{eq}|^2} - \frac{U_2^2 \cdot d_{1kP}}{|B_{eq}|^2}$$

$$Q_{2.}(\delta) := \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot (\operatorname{Re}(B_{eq}) \cdot \sin(\delta) - \operatorname{Im}(B_{eq}) \cdot \cos(\delta))}{|B_{eq}|^2} - \frac{U_2^2 \cdot d_{1kQ}}{|B_{eq}|^2}$$

Кутові характеристики потужності електропередачі представлено на рис. 3.9.

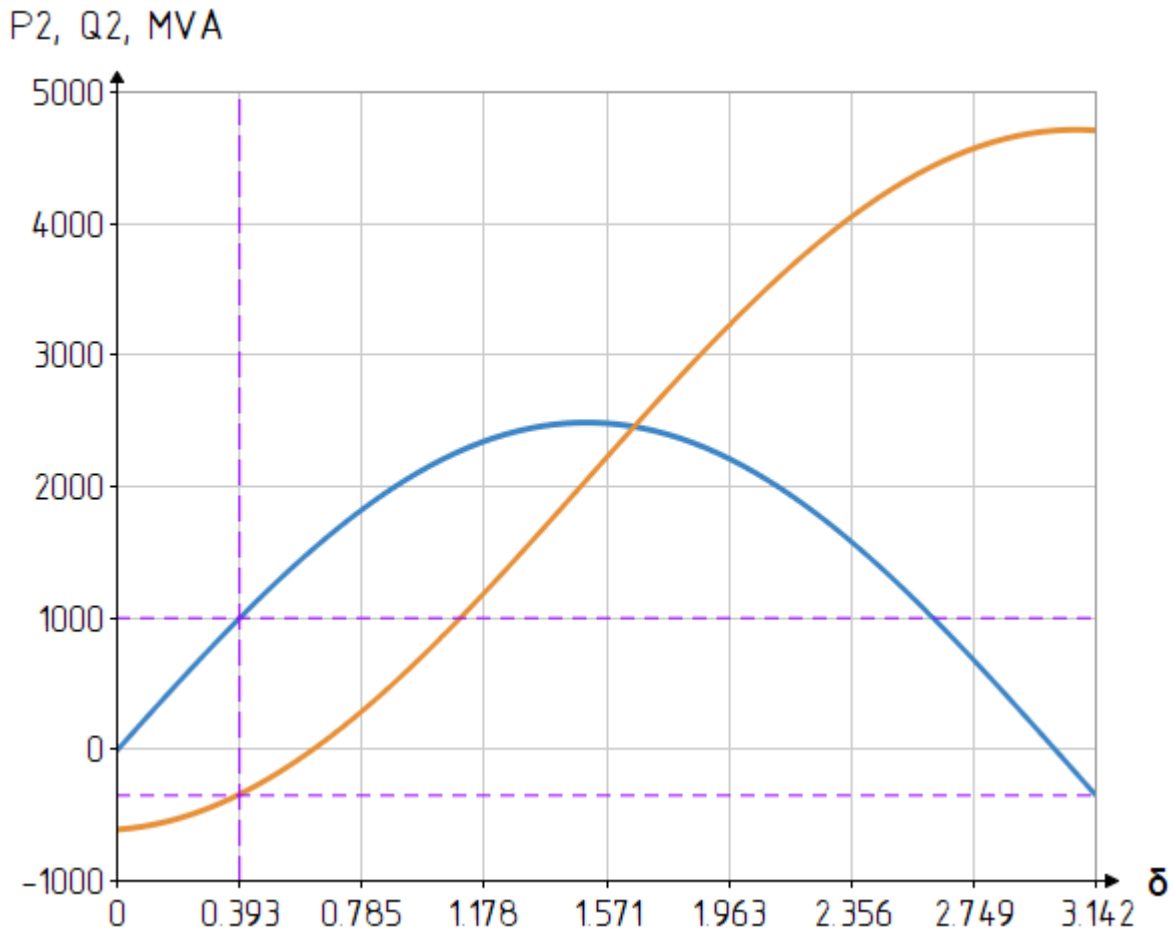


Рис. 3.9. Кутові характеристики потужності електропередачі

Для організації графоаналітичного розв'язання задачі на кутовій характеристиці потужності на рис. 3.9 необхідно провести горизонтальну лінію на рівні заданого навантаження 1000 MW . Перетин цієї лінії з характеристикою активної потужності визначає робочу точку усталеного режиму. Абсциса цієї точки визначає різницевий кут між векторами напруги на початку та наприкінці електропередачі. Такий кут можна визначити, якщо опустити перпендикуляр від робочої точки на вісь абсцис. Відповідно до даних рис. 3.9 такий кут приблизно дорівнює

$$\delta_{12} := \frac{\pi}{8} \text{ rad} = 22.5^\circ$$

Перетин опущеного перпендикуляру з кутовою характеристикою реактивної потужності визначає робочу точку усталеного режиму за реактивною потужністю. Ордината цієї точки визначає реактивну потужність наприкінці електропередачі в досліджуваному режимі. Відповідно до даних рис. 3.9 реактивна потужність наприкінці електропередачі приблизно становить

$$Q_2 := -350 \text{ MVar}$$

Для більш точного визначення режимних характеристик необхідно організувати аналітичний розрахунок за наступною схемою.

Для визначення різницевого фазового кута векторів напруги на початку та наприкінці електропередачі організуємо числове розв'язання рівняння за початкового наближення, визначеного графоаналітичним шляхом.

Решатель Начальное приближение

$$\delta := \delta_{12}$$

$$P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot (\operatorname{Re}(B_{eq}) \cdot \cos(\delta) + \operatorname{Im}(B_{eq}) \cdot \sin(\delta))}{|B_{eq}|^2} - \frac{U_2^2 \cdot d_{1kP}}{|B_{eq}|^2}$$

$$\delta_{12} := \text{find}(\delta) = 0.394 \text{ rad}$$

Реактивна потужність наприкінці електропередачі становить

$$Q_2 := Q_2(\delta_{12}) = -340.638 \text{ MVar}$$



ЗАДАЧА 3.5.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. На перемикальному пункті електропередачі встановлено установку поздовжньої ємнісної компенсації та дві групи шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110000/750. Ще дві групи шунтувальних реакторів встановлено на початку електропередачі. Електропередача пов'язана із суміжними енергосистемами за допомогою груп силових автотрансформаторів АОДЦТН-333000/750/330. Параметри лінії, автотрансформаторів, шунтувальних реакторів та установки поздовжньої компенсації відповідають результатам розв'язання задач 1.4 - 1.6, 2.1 та 2.2.

В режимі ненавантаженої лінії на початку електропередачі підтримується напруга 725 кВ, а наприкінці - 750 кВ.

Визначити обсяги реактивної потужності, яка поступає із електропередачі в суміжні електричні системи.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга	$U_n = 750 \text{ кВ}$
параметри чотириполіусника ділянок лінії електропередавання (ділянка 1 завдовжки 400 км і ділянка 2 завдовжки 350 км)	$A_1 = 0.909 + 0.007i$ $B_1 = (7.498 + 107.266i) \Omega$ $C_1 = (4.99 + 1626.75i) \mu S$ $D_1 = 0.909 + 0.007i$ $A_2 = 0.93 + 0.005i$ $B_2 = (6.664 + 94.544i) \Omega$ $C_2 = (5.23 + 1433.88i) \mu S$ $D_2 = 0.93 + 0.005i$
параметри чотириполіусника УПК	$A_c = 1 \quad D_c = 1$ $B_c = -36.021i \Omega$ $C_c = 0 \mu S$

параметри чотириполіюсника
двох груп ШР

$$A_{R2}=1 \quad D_{R2}=1$$

$$B_{R2}=0 \, \Omega$$

$$C_{R2}=(3.1-1065.6i) \, \mu S$$

параметри чотириполіюсника
груп автотрансформаторів

$$A_{AT}=1$$

$$B_{AT}=(0.49+28.153i) \, \Omega$$

$$C_{AT}=(2.667-12.432i) \, \mu S$$

$$D_{AT}=1+6.898i \cdot 10^{-5}$$

напруга на початку електропередачі $U_1:=725 \, kV$

напруга наприкінці електропередачі $U_2:=750 \, kV$

Ланцюгова схема досліджуваної дальньої електропередачі відповідає рис. 3.1. Для такої схеми параметри еквівалентного чотириполіюсника електропередачі становлять

$$M_{eq}:=M_{AT} \cdot M_{R2} \cdot M_1 \cdot M_c \cdot M_{R2} \cdot M_2 \cdot M_{AT}$$

$$M_{eq}=\begin{bmatrix} 0.784+0.017i & (13.787+213.454i) \, \Omega \\ (3.075 \cdot 10^{-5}+0.001i) \, S & 0.989+0.005i \end{bmatrix}$$

тобто

$$A_{eq}:=M_{eq_{0,0}}=0.784+0.017i$$

$$B_{eq}:=M_{eq_{0,1}}=(13.787+213.454i) \, \Omega$$

Визначимо коефіцієнти втрат активної та реактивної потужності в досліді короткого замкнення за умовами початку електропередачі

$$d_{1kP}:=\operatorname{Re}(A_{eq} \cdot \overline{B_{eq}})=14.541 \, \Omega$$

$$d_{1kQ}:=\operatorname{Im}(A_{eq} \cdot \overline{B_{eq}})=-167.105 \, \Omega$$

Реактивна потужність наприкінці електропередачі в режимі ненавантаженої лінії становить

$$Q_2 := \frac{-d_{1kQ}}{|B_{eq}|^2} \cdot U_2^2 - \sqrt{\left(\frac{U_1 \cdot U_2}{|B_{eq}|}\right)^2 - \left(\frac{d_{1kP}}{|B_{eq}|^2} \cdot U_2^2\right)^2} = -481.339 \text{ MVAr}$$

Від'ємний знак реактивної потужності наприкінці електропередачі свідчить про те, що надлишкова зарядна потужність поступає із лінії в приймальну енергосистему.

Визначимо струм в усталеному режимі наприкінці електропередачі

$$I_2 := \frac{1j Q_2}{U_2} = -641.785i \text{ A}$$

Таким чином, вектор-стовпець режимних параметрів наприкінці електропередачі становить:

$$UI_2 := \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 750000 \text{ V} \\ -641.785i \text{ A} \end{bmatrix}$$

Напруга та струм на початку електропередачі складають

$$UI_1 := M_{eq} \cdot UI_2 = \begin{bmatrix} (724987.466 + 4263.125i) \text{ V} \\ (26.172 + 155.492i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_1 := UI_{1_0} = (724.987 + 4.263i) \text{ kV} \quad |U_1| = 725 \text{ kV}$$

$$I_1 := UI_{1_1} = (26.172 + 155.492i) \text{ A}$$

На рис. 3.10 представлена векторна діаграма напруги та струму на початку та наприкінці електропередачі в режимі ненавантаженої електропередачі.

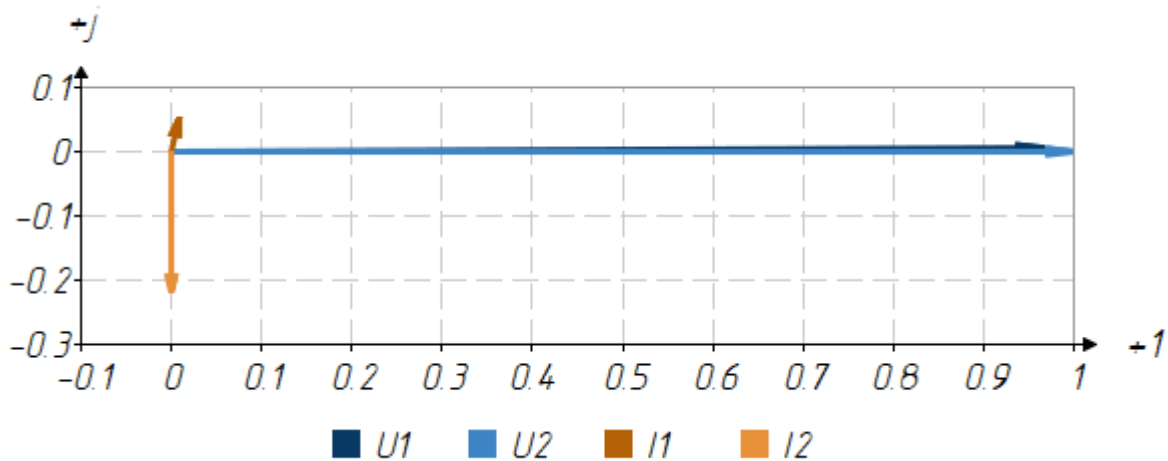


Рис. 3.10. Векторна діаграма напруги та струму в режимі ненавантаженої електропередачі

Аналіз даних векторної діаграми напруги та струму електропередачі свідчить про надмалий розворот векторів напруги між початком та кінцем лінії, що обумовлено відсутністю навантаження, яке несе лінія. Вектор струму на початку електропередачі випереджає вектор напруги на кут, близький до 90° , а вектор напруги наприкінці електропередачі відстає від відповідного вектору напруги на кут, близький до 90° . Це обумовлено стіканням надлишкової зарядної потужності електропередачі в суміжні електричні системи.

Потужність на початку електропередачі становить

$$S_1 := \overline{U_1} I_1 = (19.638 + 112.618i) \text{ MVA}$$

або

$$P_1 := \operatorname{Re}(S_1) = 19.638 \text{ MW}$$

$$Q_1 := \operatorname{Im}(S_1) = 112.618 \text{ MVar}$$

Додатний знак реактивної потужності на початку електропередачі свідчить про те, що надлишкова зарядна потужність поступає із лінії у відправну енергосистему.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про допустимість режиму реактивної потужності в енергосистемах, поєднаних на паралельну роботу за допомогою дальньої електропередачі, адже обсяги реактивної потужності, які поступають із електропередачі в енергосистеми не перевищують середні граничні значення для підстанцій напругою 330 кВ.



ЗАДАЧА 3.6.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. На перемикальному пункті електропередачі встановлено установку поздовжньої ємнісної компенсації та дві групи шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110000/750. Ще дві групи шунтувальних реакторів встановлено на початку електропередачі. Електропередача пов'язана із суміжними енергосистемами за допомогою груп силових автотрансформаторів АОДЦТН-333000/750/330. Параметри лінії, автотрансформаторів, шунтувальних реакторів та установки поздовжньої компенсації відповідають результатам розв'язання задач 1.4 - 1.6, 2.1 та 2.2.

В режимі максимальних навантажень транзит активної потужності по лінії становить 1800 МВт, на початку електропередачі підтримується напруга 750 кВ, а наприкінці - 712 кВ.

Визначити склад шунтувальних реакторів, увімкнених в роботу в режимі максимальних навантажень; розрахувати обсяги реактивної потужності, яка поступає із електропередачі в приймальну енергосистему та сформувати векторну діаграму напруги та струму в досліджуваному режимі.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга	$U_n = 750 \text{ kV}$
довжина лінії	$l = 750 \text{ km}$
погонний реактанс лінії	$x_0 = 0.277 \frac{\Omega}{\text{km}}$
параметри чотирьохполюсника ділянок лінії електропередавання (ділянка 1 завдовжки 400 км і ділянка 2 завдовжки 350 км)	$A_1 = 0.909 + 0.007i$ $B_1 = (7.498 + 107.266i) \Omega$ $C_1 = (4.99 + 1626.75i) \mu S$ $D_1 = 0.909 + 0.007i$ $A_2 = 0.93 + 0.005i$ $B_2 = (6.664 + 94.544i) \Omega$

	$C_2 = (5.23 + 1433.88i) \mu S$
	$D_2 = 0.93 + 0.005i$
параметри чотириполіусника УПК	$A_c = 1 \quad D_c = 1$
	$B_c = -36.021i \Omega$
	$C_c = 0 \mu S$
параметри чотириполіусника груп автотрансформаторів	$A_{AT} = 1$
	$B_{AT} = (0.49 + 28.153i) \Omega$
	$C_{AT} = (2.667 - 12.432i) \mu S$
	$D_{AT} = 1 + 6.898i \cdot 10^{-5}$
номінальна потужність ШР	$Q_{R0} = 110 MVA$
навантаження електропередачі	$P_2 := 1800 MW$
напруга на початку електропередачі	$U_1 := 750 kV$
напруга наприкінці електропередачі	$U_2 := 712 kV$

Оцінимо втрати реактивної потужності в лінії електропередавання в режимі максимальних навантажень:

$$\Delta Q_L := \frac{P_2^2}{U_n^2} x_0 \cdot l = 1194.89 MVar$$

Загальна кількість реакторів, які слід вивести з роботи в режимі максимальних навантажень становить

$$n := \text{ceil} \left(\frac{\Delta Q_L}{3 \cdot Q_{R0}} \right) = 4$$

Отриманий результат свідчить про те, що в досліджуваному режимі необхідно вивести з роботи всі шунтувальні реактори.

Ланцюгова схема дальньої електропередачі в режимі максимальних навантажень представлена на рис. 3.11.

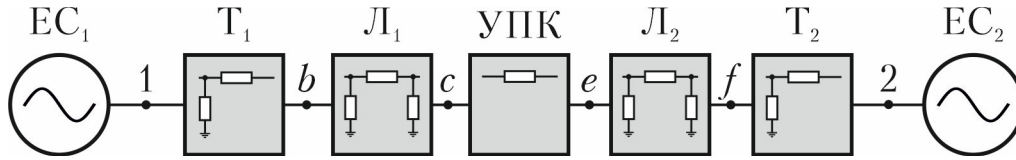


Рис. 3.11. Ланцюгова схема електропередачі в режимі максимальних навантажень

Відповідно до ланцюгової схеми параметри еквівалентного чотирьохполюсника електропередачі становлять

$$M_{eq} := M_{AT} \cdot M_1 \cdot M_c \cdot M_2 \cdot M_{AT}$$

$$M_{eq} = \begin{bmatrix} 0.659 + 0.024i & (11.553 + 194.848i) \Omega \\ (-4.55 \cdot 10^{-6} + 0.003i) S & 0.667 + 0.024i \end{bmatrix}$$

тобто

$$A_{eq} := M_{eq_{0,0}} = 0.659 + 0.024i$$

$$B_{eq} := M_{eq_{0,1}} = (11.553 + 194.848i) \Omega$$

Визначимо коефіцієнти втрат активної та реактивної потужності в досліді короткого замкнення за умовами початку електропередачі

$$d_{1kP} := \operatorname{Re}(A_{eq} \cdot \overline{B_{eq}}) = 12.367 \Omega$$

$$d_{1kQ} := \operatorname{Im}(A_{eq} \cdot \overline{B_{eq}}) = -128.033 \Omega$$

Реактивна потужність наприкінці електропередачі становить

$$Q_2 := \frac{-d_{1kQ}}{|B_{eq}|^2} \cdot U_2^2 - \sqrt{\left(\frac{U_1 \cdot U_2}{|B_{eq}|}\right)^2 - \left(P_2 + \frac{d_{1kP}}{|B_{eq}|^2} \cdot U_2^2\right)^2} = -200.386 \text{ MVAr}$$

Від'ємний знак реактивної потужності наприкінці електропередачі свідчить про те, що надлишкова зарядна потужність поступає із лінії в приймальну енергосистему.

Визначимо струм в усталеному режимі наприкінці електропередачі

$$I_2 := \frac{P_2 + 1j Q_2}{U_2} = (2528.09 - 281.441i) \text{ A}$$

Таким чином, вектор-стовпець режимних параметрів наприкінці електропередачі становить:

$$UI_2 := \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 712000 \text{ V} \\ (2528.09 - 281.441i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

Напруга та струм на початку електропередачі складають

$$UI_1 := M_{eq} \cdot UI_2 = \begin{bmatrix} (552924.172 + 506729.573i) \text{ V} \\ (1688.831 + 1926.398i) \text{ A} \end{bmatrix}$$

тобто

$$U_1 := UI_{1_0} = (552.924 + 506.73i) \text{ kV} \quad |U_1| = 750 \text{ kV}$$

$$I_1 := UI_{1_1} = (1688.831 + 1926.398i) \text{ A}$$

На рис. 3.12 представлена векторна діаграма напруги та струму на початку та наприкінці електропередачі в режимі ненавантаженої електропередачі.

Аналіз даних векторної діаграми напруги та струму електропередачі свідчить про розворот векторів напруги між початком та кінцем лінії, обумовлений навантаженням, яке несе лінія. Вектор струму на початку електропередачі випереджає вектор напруги, а вектор напруги наприкінці електропередачі відстає від відповідного вектору напруги, що обумовлено стіканням надлишкової зарядної потужності електропередачі в суміжні електричні системи. Разом з тим кути зсуву по фазі між векторами напруги та струму на початку та наприкінці електропередачі набагато менші від 90° , що обумовлено наявністю активної складової в робочому струмі електропередачі та менші обсяги надлишкової зарядної потужності порівняно з режимом ненавантаженої лінії.

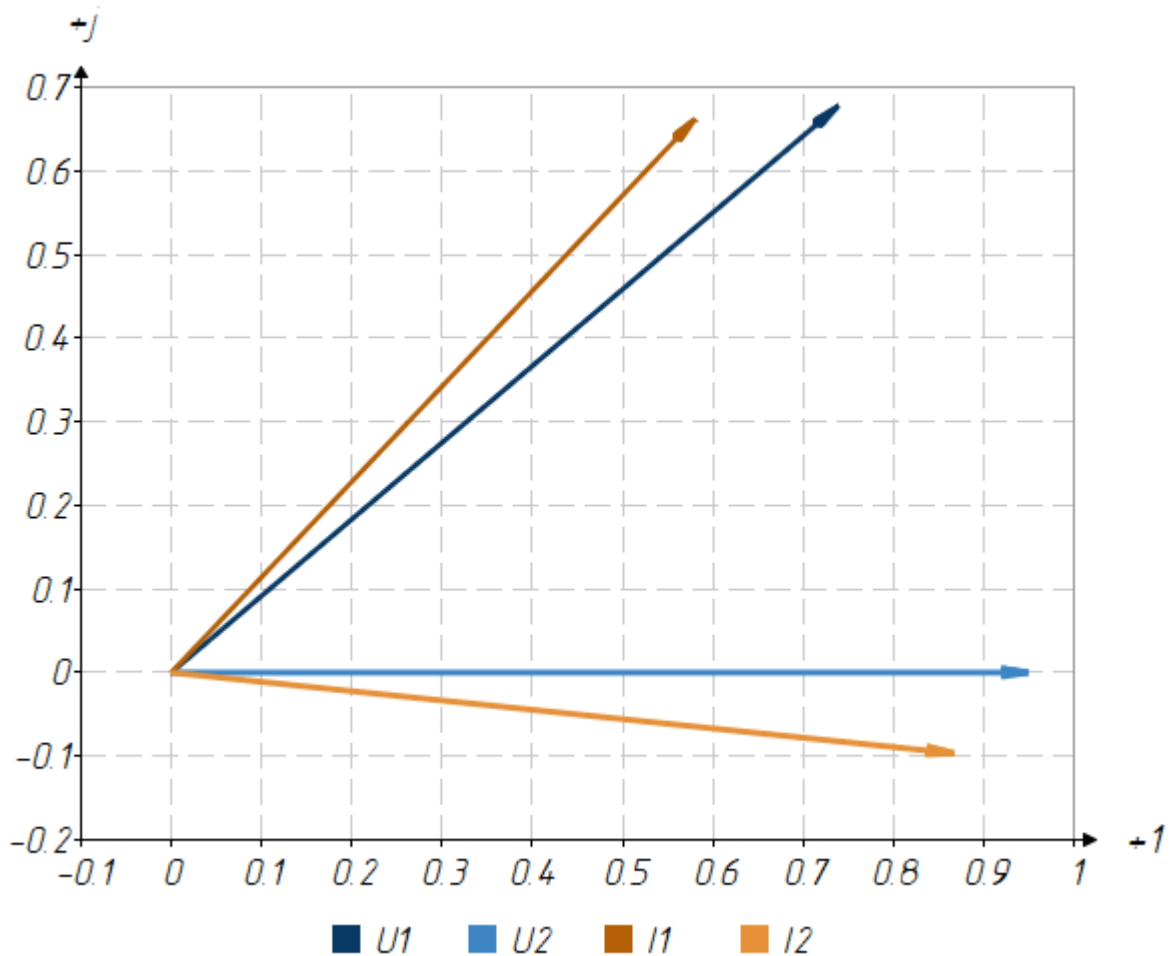


Рис. 3.12. Векторна діаграма напруги та струму в режимі максимальних навантажень



ЗАДАЧА 3.7.

Повітряну лінію напругою 750 кВ завдовжки 750 км секціоновано на дві ділянки довжиною 400 та 350 км відповідно. На перемикальному пункті електропередачі встановлено установку поздовжньої ємнісної компенсації та дві групи шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110000/750. Ще одну групу шунтувальних реакторів встановлено на початку електропередачі. Електропередача пов'язана із суміжними енергосистемами за допомогою груп силових автотрансформаторів АОДЦТН-333000/750/330. Параметри еквівалентного чотириполюсника електропередачі відповідають результатам розв'язання задачі 3.1.

В навантажувальних режимах підтримується номінальна напруга на початку та наприкінці електропередачі.

Сформувані робочі характеристики дальньої електропередачі в діапазоні навантажень до натуральної потужності лінії.

Відповідно до умов задачі електротехнічні характеристики лінії електропередавання становлять:

номінальна напруга $U_n = 750 \text{ kV}$

матриця параметрів еквівалентного чотириполюсника

$$M_{eq} = \begin{bmatrix} 0.659 + 0.024i & (11.553 + 194.848i) \Omega \\ (-4.55 \cdot 10^{-6} + 0.003i) S & 0.667 + 0.024i \end{bmatrix}$$

коефіцієнти втрат потужності $d_{1kP} = 12.367 \Omega$

в досліді короткого замкнення $d_{1kQ} = -128.033 \Omega$

напруга на початку електропередачі $U_1 := U_n = 750 \text{ kV}$

напруга наприкінці електропередачі $U_2 := U_n = 750 \text{ kV}$

натуральна потужність лінії $P_c = 2190.73 \text{ MW}$

Дослідження режимів дальньої електропередачі будемо проводити в діапазоні навантажень

$$P_2 := 0 \text{ MW}, 1 \text{ MW}..2190 \text{ MW}$$

Сформуємо аналітичні вирази для характеристик електропередачі в навантажувальних режимах.

Реактивна потужність наприкінці електропередачі

$$Q_2(P_2) := \frac{-d_{1kQ}}{|B_{eq}|^2} \cdot U_2^2 - \sqrt{\left(\frac{U_1 \cdot U_2}{|B_{eq}|}\right)^2 - \left(P_2 + \frac{d_{1kP}}{|B_{eq}|^2} \cdot U_2^2\right)^2}$$

Коефіцієнт потужності наприкінці електропередачі

$$PF_2(P_2) := \frac{P_2}{\sqrt{P_2^2 + Q_2(P_2)^2}}$$

Вектор напруги-струму наприкінці електропередачі

$$UI_2(P_2) := \left[\begin{array}{c} U_2 \\ \frac{P_2 + 1j \cdot Q_2(P_2)}{U_2} \end{array} \right]$$

Вектор напруги-струму на початку електропередачі

$$UI_1(P_2) := M_{eq} \cdot UI_2(P_2)$$

Потужність та коефіцієнт потужності на початку електропередачі

$$S_1(P_2) := \overline{UI_1(P_2)_0} \cdot UI_1(P_2)_1$$

$$P_1(P_2) := \operatorname{Re}(S_1(P_2)) \quad Q_1(P_2) := \operatorname{Im}(S_1(P_2))$$

$$PF_1(P_2) := \frac{P_1(P_2)}{\sqrt{P_1(P_2)^2 + Q_1(P_2)^2}}$$

Втрати потужності та коефіцієнт корисної дії електропередачі

$$\Delta P(P_2) := P_1(P_2) - P_2 \quad \Delta Q(P_2) := Q_1(P_2) - Q_2(P_2)$$

$$\eta(P_2) := \frac{P_2}{P_1(P_2)}$$

Робочі характеристики дальньої електропередачі представлено на рис. 3.13. Зазначимо, що такі характеристики не враховують зміну складу устаткування дальньої електропередачі відповідно до поточного навантаження та регулювання напруги на кінцевих підстанціях електропередачі.

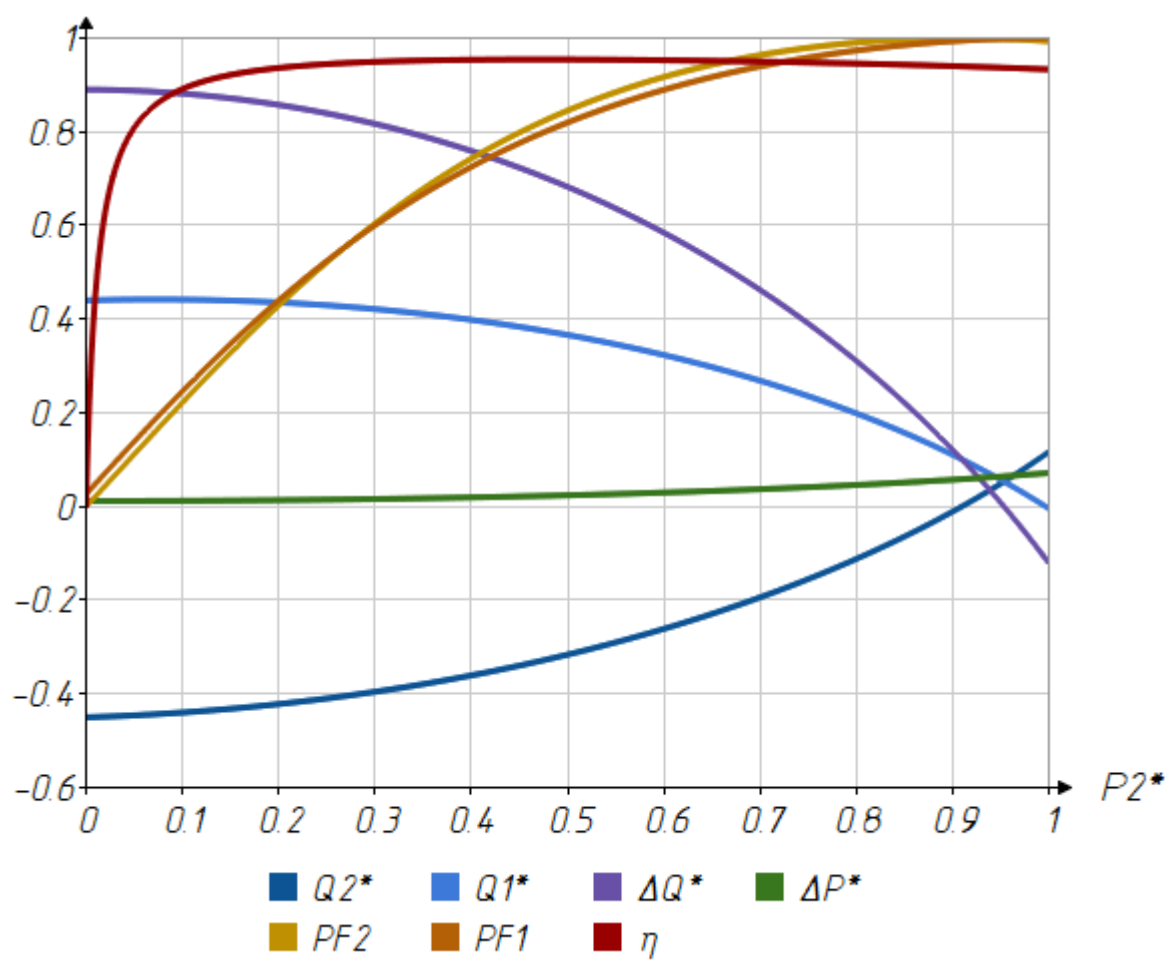


Рис. 3.13. Робочі характеристики дальньої електропередачі

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сулейманов В. М. Электричні мережі та системи / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008.
2. Александров Г. Н. Передача электрической энергии / Г. Н. Александров – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2009.
3. Александров Г. Н. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г. Н. Александров. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1983.
4. Александров Г. Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи / Г. Н. Александров – 2006.
5. Ананичева С. С. Передача энергии на большие расстояния / С. С. Ананичева, П. И. Бартоломей, А. Л. Мызин – Екатеринбург: УрФУ, 2012.
6. Ананичева С. С. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей / С. С. Ананичева, А. Л. Мызин. – Екатеринбург: УрФУ, 2012.
7. Веников В. А. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока: учебное пособие для вузов / В. А. Веников, Ю. П. Рыжов. – Москва: Энергоатомиздат, 1985.
8. Веников В. А. Электрические системы. Передача энергии переменным и постоянным током / В. А. Веников. – Москва: Высшая школа, 1972.
9. ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (у редакції наказу від 21.06.2019 № 271).
10. ДСТУ EN 50160-2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення, 2014.
11. ДСТУ ІЕС 60038:2015 Еталонна напруга за ІЕС (ІЕС 60038:2009, IDT).
12. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. – Москва: Энергия, 1979.
13. Зеличенко А. С. Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения / А. С. Зеличенко, Б. И. Смирнов. – Москва: Энергоиздат, 1981.
14. Кодекс системи передачі, 2018.
15. Линии электропередачи 345 кВ и выше: Сб. трудов научно-исследовательского института энергетики США, Москва: Энергия, 1980.

16. Правила улаштування електроустановок, Харків: Видавництво "Форт", 2017.
17. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ / Н. А. Мельников, С. С. Рокотян, А. Н. Шеренцис. – Москва: Энергия, 1974.
18. Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю. П. Рыжов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2007.
19. Сенди К. Современные методы анализа электрических систем / К. Сенди – Москва: Энергия, 1971.
20. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-82:2013 Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання, 2013.
21. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-68:2012 Стійкість енергосистем. Керівні вказівки, Київ, 2012.
22. Специальные расчёты электропередач сверхвысокого напряжения / С. Х. Брацлавский, А. И. Гершенгорн, С. Б. Лосев. – Москва: Энергоатомиздат, 1985.
23. Справочник по проектированию электрических сетей / под. ред. Д. Л. Файбисовича, Москва: НИЦ ЭНАС, 2005.
24. Grigsby L. L. Electric Power Generation, Transmission and Distribution / L. L. Grigsby. – CRC Press, 2007.
25. J. A. Martinez-Velasco, Power System Transients. Parameter Determination, CRC Press, 2010.
26. Zhou Hao, Ultra-high Voltage AC/DC Power Transmission, Springer, 2018.