

АГРЕГОВАНА МОДЕЛЬ МЕРЕЖІ МІЖСИСТЕМНИХ ТА МІЖДЕРЖАВНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ОЕС УКРАЇНИ

Анотація. У статті запропоновано агреговану модель високовольтних ліній електропередачі з регіональною деталізацією

Ключові слова: магістральні лінії електропередачі, агрегована мережа, модель межсистемних перетоків електроенергії

Abstract. We present an aggregated model of high-voltage transmission network with regional details.

Keywords: network of transmission lines, aggregated network, model of inter-system flows of electricity

В електроенергетичній системі мережа магістральних ліній електропередачі використовується для перерозподілу і балансування потоків електроенергії в вузлах її виробництва і споживання. З метою відображення в математичних моделях ринку електричної енергії основних властивостей мережі приймають до уваги її топологію і основні електричні параметри ліній електропередачі [1–3].

В Україні до магістральних ліній електропередачі відносяться мережі напругою 220 кВ та вище, по яким здійснюється передача електроенергії між регіональними ЕС всередині країни, а також між об'єднаною ЕС (ОЕС) України і ЕС сусідніх країн.

Кожна регіональна ЕС є підрозділом державного підприємства Національна енергетична компанія «Укренерго».

НЕК «Укренерго» в межах своєї території здійснює певний комплекс заходів:

- експлуатацію мережі високовольтних ліній електропередачі;
- її централізоване управління для підтримки паралельної роботи у складі ОЕС;
- облік електроенергії, що відпускається оптовим споживачам;
- розрахунки між регіональними учасниками оптового ринку електроенергії.

Враховуючи регіональні відмінності рівнів споживчого попиту та концентрації генеруючих потужностей в регіонах, в якості вузлів агрегованої мережі було обрано регіональні ЕС: Західна, Центральна, Південно-Західна, Північна, Донбаська, Дніпровська, Південна та Кримська енергосистеми (ЕС) [4]. Регіональні ЕС було об'єднано в ОЕС України за допомогою міжвузлових інтерфейсів. Міжвузлові інтерфейси в агрегованому вигляді представляють наявну мережу міжрегіональних та міждержавних високовольтних ліній електропередачі (див. табл. 1 і рис.1).

Таблиця 1.
Регіональні ЕС України

Номер вузла	Назва регіональної ЕС
1	Західна
2	Центральна
3	Північна
4	Донбаська
5	Південно-Західна
6	Дніпровська
7	Південна
8	Кримська

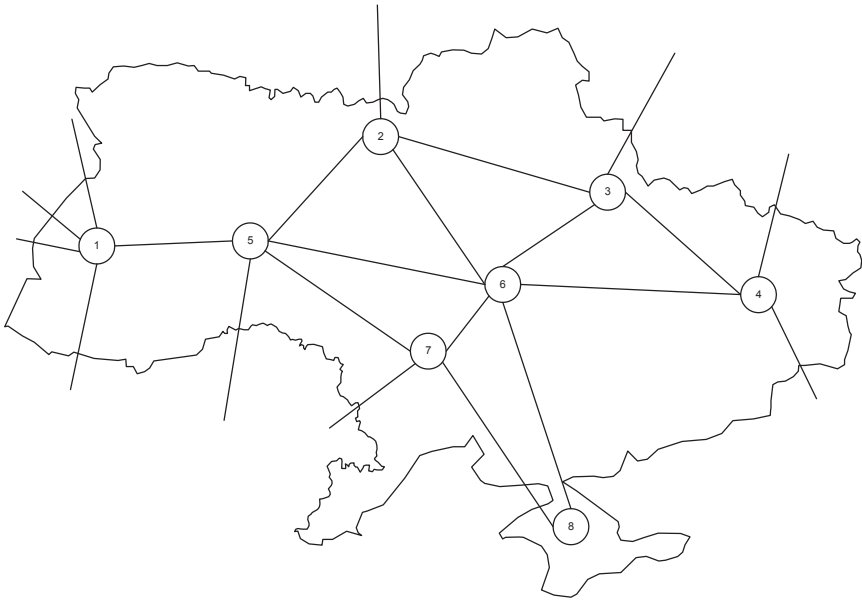


Рис. 1. Еквівалентна мережа магістральних ліній електропередачі України: 1 —8— вузли мережі, що відповідають регіональним ЕС (див. табл. 1)

На жаль таке представлення мережі в математичній моделі лібералізованого ринку електроенергії України суттєво обмежує можливість відображення в ній особливостей регіонального енергоспоживання та концентрації генеруючих потужностей. Для покращення адекватності математичної моделі ринку передавальну мережу високовольтних ліній електропередачі необхідно представляти в агрегованому вигляді з 25 вузлами (див. табл.2) та 48 міжвузловими інтерфейсами.

Таблиця 2.

Регіональні вузли виробництва та споживання електроенергії

Номер вузла	Назва	Номер вузла	Назва
1	Винниця	14	Полтава
2	Луцьк	15	Івано-Франківськ
3	Дніпро	16	Рівне
4	Донецьк	17	Суми
5	Житомир	18	Тернопіль
6	Ужгород	19	Харків
7	Запоріжжя	20	Херсон
8	Київ	21	Хмельницький
9	Кіровоград	22	Черкаси
10	Луганськ	23	Чернівці
11	Львів	24	Чернігів
12	Миколаїв	25	Крим
13	Одеса		

Формування агрегованої мережі і параметрів її елементів здійснюється шляхом послідовного виконання наступних кроків [4]:

- територіальний поділ електроенергетичної системи країни на регіони з характерними рівнями споживчого попиту і концентрації генеруючих потужностей.
- заміна регіональних ЕС узагальненими вузлами шляхом об'єднання внутрішніх вузлів мережі кожного регіону та нехтування внутрішніми регіональними електричними зв'язками між внутрішніми вузлами.
- об'єднання магістральних ліній електропередачі ЕС у міжвузловій інтерфесі з урахуванням можливого паралельного або послідовного їхнього приєднання до утворених на кроці 2 узагальнених вузлів.

Схема агрегованої мережі ліній електропередачі представлена на рис. 2.

Визначені параметри агрегованої мережі високовольтних ліній електропередачі використовуються в моделях мережі, які представлено нижче [5].

Модель електричної мережі у вигляді лінійного кола постійного струму без втрат. Звертаючись до рис. 3, можна бачити, що при незмінних величинах частоти ω , амплітуди U_i і U_j , а також фазових кутів δ_i і δ_j змінних напруг $u_i(t)$ і $u_j(t)$ активні потужності $flow_{i \rightarrow m}$ і $flow_{m \rightarrow j}$ потоків електроенергії з енерговузла i в лінію m і з лінії m в енерговузол j в будь-який момент часу t є постійними величинами і визначаються постійною величиною різниці напруг $u_j(t) - u_i(t)$.

Нехай електрична мережа утворена з M ліній електропередачі, що

з'єднують I енерговузлів. Для лінії $m \in M$, приєднаної до енерговузлів $i \in I$ і $j \in I$, що має активний опір R_m і реактивний опір X_m , яка знаходиться під напругою V_m , запишемо вирази для активних потужностей $flow_{i \rightarrow m}$ і $flow_{m \rightarrow j}$ у вигляді

$$flow_{i \rightarrow m} = \frac{R_m}{R_m^2 + X_m^2} [U_i^2 - U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j)] + \frac{X_m}{R_m^2 + X_m^2} U_i U_j \sin(\delta_i - \delta_j), \quad (1)$$

$$flow_{m \rightarrow j} = \frac{R_m}{R_m^2 + X_m^2} [U_j^2 - U_i U_j \cos(\delta_j - \delta_i)] + \frac{X_m}{R_m^2 + X_m^2} U_i U_j \sin(\delta_j - \delta_i). \quad (2)$$

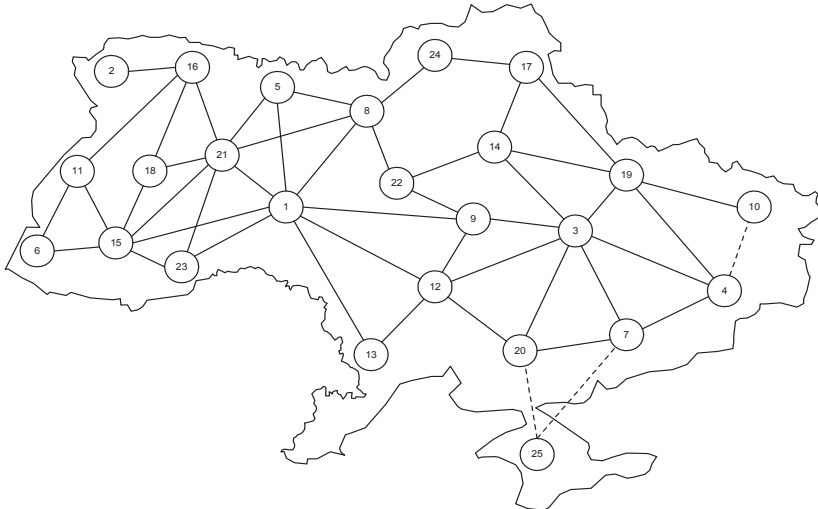


Рис. 2. Агрегована мережа ліній електропередачі ОЕС України:
 - - - - інтерфейси, які тимчасово не використовуються в роботі

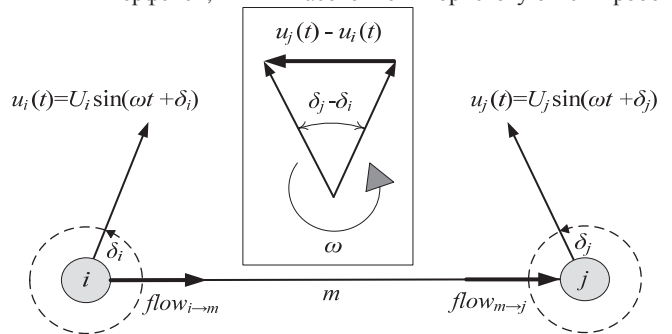


Рис. 3. Потужності $flow_{i \rightarrow m}$ і $flow_{m \rightarrow j}$ потоків електроенергії з енерговузла i в лінію m і з лінії m в енерговузел j в момент часу t при незмінних величинах частоти ω , амплітуди U_i і U_j , а також фазових кутів δ_i і δ_j і змінних напруг $u_i(t)$ і $u_j(t)$

Вважаючи близькість амплітуд U_i і U_j напруг $u_i(t)$ і $u_j(t)$ у вузлах i і j до амплітуди V_m напруги на лінії m , маємо

$$U_i \cong U_j \cong V_m. \quad (3)$$

Крім того, вважаючи відносно малими аргументи $(\delta_i - \delta_j)$ і $(\delta_j - \delta_i)$ функцій косинуса і синуса входять до виразу (1) і (2), представимо їх у вигляді многочленів Тейлора з залишковими членами у формі Лагранжа [6]. У разі многочленів нульового і першого порядку, відповідно, запишемо

$$\cos(\delta_i - \delta_j) = \cos(\delta_j - \delta_i) = 1 + \frac{\cos^{(2)}(\theta_c(\delta_i - \delta_j))}{2!} (\delta_i - \delta_j)^2, \quad (4)$$

$$\sin(\delta_i - \delta_j) = -\sin(\delta_j - \delta_i) = (\delta_i - \delta_j) + \frac{\sin^{(3)}(\theta_s(\delta_i - \delta_j))}{3!} (\delta_i - \delta_j)^3, \quad (5)$$

де параметри $0 < \theta_c < 1$ і $0 < \theta_s < 1$.

З урахуванням виразів (3)—(5) співвідношення (1)—(2) можна представити в наближеному вигляді

$$flow_{m \rightarrow j} \cong -\frac{V_m^2 X_m}{R_m^2 + X_m^2} (\delta_i - \delta_j), \quad (6)$$

$$flow_{i \rightarrow m} \cong +\frac{V_m^2 X_m}{R_m^2 + X_m^2} (\delta_i - \delta_j). \quad (7)$$

В такому випадку втрати електроенергії в лінії m дорівнюють нулю, оскільки

$$L_m = flow_{i \rightarrow m} + flow_{m \rightarrow j} = 0 \quad (8)$$

У кожному енерговузлі $i \in I$ потоки електроенергії підпорядковані першому закону Кірхгофа, тобто

$$\sum_{m \in M_-(i)} flow_{i \rightarrow m} + \sum_{m \in M_+(i)} flow_{m \rightarrow i} + y_i = 0, \quad i \in I, \quad (9)$$

де y_i — алгебраїчна сума потоків електроенергії виробленої і споживаної в цьому енерговузлі, а множини $M_-(i)$ і $M_+(i)$ предствляють дві групи ліній, за якими потоки електроенергії залишають енерговузол i і надходять в нього, відповідно (рис. 4).

Враховуючи (6) — (7), безліч співвідношень (9) зручно розглядати в векторно-матричній формі виду

$$y = DXD^T \delta, \quad (10)$$

де вектори y і δ складаються з елементів $\{y_i, i = \overline{1, I}\}$ і $\{\delta_i, i = \overline{1, I}\}$;

діагональна матриця $X = diag \left\{ \frac{V_m^2 X_m}{R_m^2 + X_m^2}, m = \overline{1, M} \right\}$ містить елементи, які

розраховуються за заданими фізичними параметрами ліній; матриці \mathbf{D} і $\bar{\mathbf{D}}$ є матрицями інцидентності орієнтованого і неорієнтованого графів мережі; матриця \mathbf{D}^T утворена транспонуванням матриці \mathbf{D} .

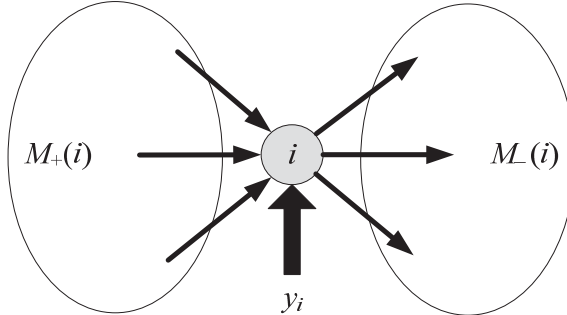


Рис. 4. Результуючий потік електроенергії y_i виробленої і споживаної в енерговузлі i , а також потоки електроенергії, що залишають цей енерговузол і надходять в нього за відповідними множинами $M_-(i)$ і $M_+(i)$ ліній електропередачі

Оскільки активні потужності $flow_{i \rightarrow m}$ і $flow_{m \rightarrow j}$ потоків електроенергії з енерговузла i в лінію i з лінії m в енерговузол j задовольняють рівнянню (8) і $flow_{i \rightarrow m} = -flow_{m \rightarrow j} = flow_m$, тоді з урахуванням прийнятих позначень, множини співвідношень (6) —(7) можна представити в векторно-матричній формі виду

$$\mathbf{flow} = \mathbf{X}\mathbf{D}^T \boldsymbol{\delta} . \quad (11)$$

Тут вектор \mathbf{flow} складається з елементів $\{flow_m, m = \overline{1, M}\}$.

Вирази (10) і (11) використовуються для виключення вектора $\boldsymbol{\delta}$ і отримання співвідношення

$$\mathbf{flow} = \boldsymbol{\Omega} \mathbf{y} , \quad (12)$$

яке безпосередньо зв'язує активні потужності \mathbf{flow} потоків електроенергії в лініях з алгебраїчними сумами потоків електроенергії, виробленої і споживаної в енерговузлах. Тут PTDF (Power Transfer Distribution Factors) — матриця $\boldsymbol{\Omega}$ визначається виразом

$$\boldsymbol{\Omega} = \left\langle \mathbf{X}\hat{\mathbf{D}}^T \left(\hat{\mathbf{D}}\mathbf{X}\hat{\mathbf{D}}^T \right)^{-1} , \mathbf{0} \right\rangle \quad (13)$$

де $\hat{\mathbf{D}} - M \times (I - 1)$ — матриця, утворена з матриці інцидентності \mathbf{D} видаленням в ній довільно обраного стовпця з номером h , що відповідає вибору номера базового вузла (вузла-хаба) електричної мережі; $\langle \rangle$ — оператор об'єднання $M \times (I - 1)$ матриці $\mathbf{X}\hat{\mathbf{D}}^T \left(\hat{\mathbf{D}}\mathbf{X}\hat{\mathbf{D}}^T \right)^{-1}$ і нульового вектор-

стовпця $\mathbf{0}$, результатом дії якого є утворення $M \times I$ матриці Ω з нульовим h -м стовпцем.

Подання потужностей $flow_{i \rightarrow m}$ і $flow_{m \rightarrow j}$ у вигляді наближених співвідношень (6)–(7) є найбільш широко використовуваним в рівноважних моделях енергоринків. Такі співвідношення відрізняються простотою і є основою уявлення електричної мережі у вигляді лінійного кола постійного струму. Однак, їх використання знижує адекватність математичного опису технологічних процесів, які спостерігаються в електричній мережі.

Модель електричної мережі у вигляді нелінійного кола постійного струму з втратами. Якщо для представлення функції косинуса використовувати многочлен Тейлора другого порядку, тобто замість (4) взяти вислів

$$\cos(\delta_i - \delta_j) = \cos(\delta_j - \delta_i) = 1 - \frac{(\delta_i - \delta_j)^2}{2} + \frac{\cos^{(4)}(\theta_c(\delta_i - \delta_j))}{4!} (\delta_i - \delta_j)^4, \quad (14)$$

то співвідношення (1) – (2) можна представити у вигляді

$$flow_{i \rightarrow m} \cong + \frac{V_m^2 X_m}{R_m^2 + X_m^2} (\delta_i - \delta_j) + \frac{V_m^2 R_m}{R_m^2 + X_m^2} \frac{(\delta_i - \delta_j)^2}{2}, \quad (15)$$

$$flow_{m \rightarrow j} \cong - \frac{V_m^2 X_m}{R_m^2 + X_m^2} (\delta_i - \delta_j) + \frac{V_m^2 R_m}{R_m^2 + X_m^2} \frac{(\delta_i - \delta_j)^2}{2}. \quad (16)$$

Тоді втрати потужності в лінії m складають величину

$$L_m = flow_{i \rightarrow m} + flow_{m \rightarrow j} = \frac{V_m^2 R_m}{R_m^2 + X_m^2} (\delta_i - \delta_j)^2 \quad (17)$$

Враховуючи (15)–(16), множину співвідношень (9) представимо в векторно-матричній формі

$$y = DXD^T \delta - \frac{1}{2} \bar{D}R \left[(D^T \delta) \circ (D^T \delta) \right]. \quad (18)$$

Тут діагональна матриця $R = \text{diag} \left\{ \frac{V_m^2 R_m}{R_m^2 + X_m^2}, m = \overline{1, M} \right\}$ містить елементи, які

визначаються за заданими фізичними параметрами ліній, а символ \circ позначає добуток Адамара.

Співвідношення (18) відрізняється від наведеного вище співвідношення (10) наявністю квадратичного доданка, що враховує втрати електроенергії в лініях електропередачі. Це співвідношення є основою уявлення електричної мережі у вигляді нелінійної кола постійного струму.

Висновки.

Таким чином, в статті запропоновано агреговану модель високовольтних ліній електропередачі з її регіональною деталізацією. Моделі агрегованої

мережі у вигляді лінійного кола постійного струму без втрат і у вигляді нелінійного кола постійного струму з втратами забезпечують адекватне представлення передавальної мережі ОЕС України в математичних моделях мережі лібералізованого ринку електроенергетики України

1. *Борисенко А.В., Саух С.Є.* Рівноважна модель вводу генеруючих потужностей в умовах недосконалої конкуренції // Новини енергетики. – 2009. – №11. – С. 36—39; №12. – С. 23—39.
2. *Костюковський Б.А., Шульженко С.В., Гольденберг І.Я., Власов С.В.* Методи та засоби дослідження перспектив розвитку електроенергетики в умовах впровадження ринкових відносин // Проблеми загальної енергетики. —2002.— № 2. – С. 6—13.
3. *Hobbs B.F., Metzler C.B., Pang J.S.* Strategic gaming analysis for electric power system: an MPEC approach // IEEE Transactions on Power Systems. – 2000. – Vol. 15, № 2. – P. 638—645.
4. *Саух С.Є., Борисенко А.В., Джигун О.М.* Модель сети магистральных линий электропередачи в задачах планирования развития электроэнергетических систем.– Электронное моделирование. – 2014. – 34, № 4. – С. 3-14.
5. *Саух С.Є.* Модель конкурентного равновесия на рынке электроэнергии с улучшенной адекватностью математического описания генерирующих компаний, системного оператора и электрической сети.– Электронное моделирование. – 2016. – 38, № 4. – С. 49-6414.
6. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables / M.Abramowitz, I.Stegun.* – National Bureau of Standards, USA. – 1972. – 1046p.

Поступила 10.04.2017р.

УДК004.94

А. А.Чемерис, г. Киев

ОСОБЕННОСТИ ТЕКСТА КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ В ПРОЦЕССЕ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ

Abstract.The paper considers some questions of preliminary preparation of C source for automatic parallelization and optimization. It is shown that some parallelism cannot be found due to not appropriate text syntax of the source of the program. Some ways of text correction are shown.

Введение

Автоматическое распараллеливание программ, представленных на языке высокого уровня, есть один из эффективных путей повышение производительности компьютерных систем. Однако, не любая программа,