

**ВІСНИК ПРИАЗОВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**  
2008 р. Вип. №18

УДК 621.311

Лежнюк П.Д.<sup>1</sup>, Кулик В.В.<sup>2</sup>, Бурикін О.Б.<sup>3</sup>

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНЗИТНИХ ПЕРЕТІКАНЬ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

*В статті пропонується нова методика визначення транзитних втрат потужності для розподільних електричних мереж розімкненої конфігурації. Методика базується на використанні методу накладання та результатів розрахунку нормального режиму з представленням навантаження у вигляді струмів. Отримана модель цілком еквівалентна початковій нелінійній моделі для даного моменту часу.*

*Вступ*

В теперішній час проблеми обліку, планування та зменшення втрат електроенергії в електричних мережах (ЕМ) є досить актуальними. Особливо якщо мережі є взаємопов'язаними або об'єднаними та мають різних власників. Така постановка задачі передбачає фінансові (комерційні) взаєморозрахунки між власниками електричних мереж за транзити електроенергії між ЕМ. Тому, дослідження з пошуку ефективних методів аналізу, прогнозування та планування транзитних втрат потужності ЕМ викликають великий інтерес у енергопостачальних компаній.

На даний момент в інженерній практиці різних країн використовується ряд методів, що дозволяють виконувати розрахунок втрат, як з однозначно заданою інформацією, так і з імовірнісно-статистичним оцінюванням втрат (регресійний аналіз) [1-3]. Вони є загально визнаними та фізично обґрунтованими. Похибка визначення загальних втрат по кожній вітці мережі для вказаних методів, як правило, є припустимою. Однак, універсальної методики розподілу втрат між учасниками енергообміну, для виділення транзитних втрат потужності із загальносистемних, на даний час не існує.

У технічній літературі представлено три групи методів розподілу втрат потужності:

1. Пропорційні методи (Pro Rata Procedures) [2].
2. Граничні методи (Marginal procedures), що базуються на коефіцієнтах питомого приросту втрат на передачу потужності (Incremental transmission loss (ITL) coefficients) [2, 4].
3. Дольові методи (Proportional Sharing Procedures) [2, 5, 6].

В ряді робіт автори наголошують на неможливості прямого розділення втрат потужності, визначених за виразом  $3|I|^2 R$ , між складовими струму  $I$ , що їх викликає. Таким чином, фізично обґрунтованої схеми вимірювання втрат потужності від кожного перетоку або методології їх розрахунку не існує [4-7].

Однак, для розподільних ЕМ розімкненої конфігурації можливе використання методу розрахунку та розподілу втрат потужності на основі методу накладання з використанням часткових струмів. Даний метод передбачає проведення  $n$  розрахунків електричних режимів (по кількості суб'єктів енергообміну).

На відміну від інших методів в даному методі не використовується припущення про відсутність спаду напруги в лініях електропередач (ЛЕП) [8]. Відмовитись від даного припущення дозволяє обґрунтований перехід до лінійної моделі нормального режиму ЕМ.

*Розрахунок транзитних втрат потужності за допомогою методу накладання*

Розглянувши режим роботи ЕМ в довільний момент часу, за відомих потужностей навантаження  $\dot{S}_j$  та напруг у вузлах  $\dot{U}_j$  можна визначити задаючі струми вузлів ЕМ:

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет, д-р техн. наук, проф.

<sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет, канд. техн. наук, доц.

<sup>3</sup> Вінницький національний технічний університет, канд. техн. наук, ст. викладач

$$j_j = \frac{\dot{S}_{pj}}{\sqrt{3}\dot{U}_j},$$

де  $\dot{S}_{pj}$  – розрахункова потужність навантаження (генерації), що враховує власну потужність навантаження (генерації)  $\dot{S}_j$ , а також зарядну потужність суміжних ліній.

Лінійна модель нормального режиму, що отримана за рахунок представлення навантаження та генерації вузлів ЕМ у вигляді розрахованих задаючих струмів, буде цілком еквівалентна початковій нелінійній моделі для даного моменту часу (рис. 1).

Розглянемо найпростішу схему електричної мережі, що виконує транзит потужності (рис.1). Навантаження вузлів ЕМ задається постійними по модулю та фазі струмами. Поперечна складова заступної схеми еквівалентується у розрахункових навантаженнях вузлів.

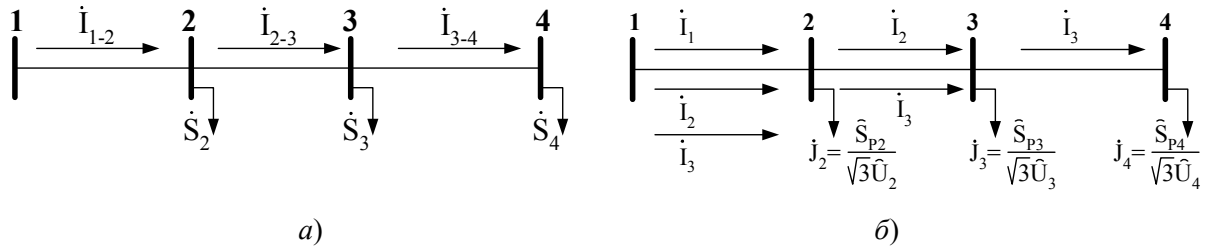


Рис.1 – Схема найпростішого випадку транзиту потужності

Згідно з методом накладання через лінію 1-2 будуть протікати узгоджено спрямовані часткові струми  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ , та  $\dot{I}_3$ , що зумовлені навантаженням окремих споживачів (суб'єктів енергоринку). Для даного випадку часткові струми дорівнюють відповідним задаючим струмам  $\dot{I}_1 = \dot{J}_2$ ,  $\dot{I}_2 = \dot{J}_3$ ,  $\dot{I}_3 = \dot{J}_4$ . Таким чином втрати потужності у даній ЛЕП дорівнюють

$$\Delta\dot{S} = 3 \cdot |\dot{I}_{1-2}|^2 \cdot \dot{Z}_{1-2} = 3 \cdot |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3|^2 \cdot \dot{Z}_{1-2}.$$

Розклавши струми на дійсну та уявну складові рівняння прийме вигляд:

$$\Delta\dot{S}_\Sigma = 3 \cdot \left[ (I'_1 + I'_2 + I'_3)^2 + (I''_1 + I''_2 + I''_3)^2 \right] \cdot \dot{Z}_{1-2},$$

де  $I'$ ,  $I''$  – дійсні та уявні складові часткових струмів.

Виконавши ряд алгебраїчних перетворень даний вираз можна звести до вигляду (1), отримавши значення втрат потужності в лінії 1-2 від усіх часткових струмів, що визначені шляхом розрахунку часткових режимів:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{S}_\Sigma = 3 \cdot \left[ I_1'^2 \left( 1 + \frac{I_2' + I_3'}{I_1'} \right) + I_2'^2 \left( 1 + \frac{I_1' + I_3'}{I_2'} \right) + I_3'^2 \left( 1 + \frac{I_2' + I_1'}{I_3'} \right) + \right. \\ \left. + I_1''^2 \left( 1 + \frac{I_2'' + I_3''}{I_1''} \right) + I_2''^2 \left( 1 + \frac{I_1'' + I_3''}{I_2''} \right) + I_3''^2 \left( 1 + \frac{I_2'' + I_1''}{I_3''} \right) \right] \cdot \dot{Z}_{1-2} \end{aligned} \quad (1)$$

або від кожного часткового струму окремо:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{S}_{(I_1)} &= 3 \left[ I_1'^2 \left( 1 + \frac{I_2' + I_3'}{I_1'} \right) + I_1''^2 \left( 1 + \frac{I_2'' + I_3''}{I_1''} \right) \right] \dot{Z}_{1-2}; \\ \Delta\dot{S}_{(I_2)} &= 3 \left[ I_2'^2 \left( 1 + \frac{I_1' + I_3'}{I_2'} \right) + I_2''^2 \left( 1 + \frac{I_1'' + I_3''}{I_2''} \right) \right] \dot{Z}_{1-2}; \\ \Delta\dot{S}_{(I_3)} &= 3 \left[ I_3'^2 \left( 1 + \frac{I_2' + I_1'}{I_3'} \right) + I_3''^2 \left( 1 + \frac{I_2'' + I_1''}{I_3''} \right) \right] \dot{Z}_{1-2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Останні вирази можна узагальнити на довільну кількість часткових струмів, що протікають по елементу ЕМ. Вираз для визначення втрат потужності в  $i$ -й вітці мережі від навантажень  $j$ -го вузла прийме наступний вигляд:

$$\Delta \dot{S}_i = 3 \cdot \left( \sum_{j=1}^m I_{ij}'^2 \mu_j' + \sum_{j=1}^m I_{ij}''^2 \mu_j'' \right) \cdot z_i, \quad (3)$$

де  $m$  – кількість часткових струмів, що протікають по даній вітці;  $I_{ij}$  – струм в  $i$ -й вітці від струму навантаження  $j$ -го вузла, що визначається за методом одиничних струмів або на основі матриці коефіцієнтів струморозподілу;  $\mu_j'$ ,  $\mu_j''$  – коефіцієнти впливу, які визначаються за виразами:

$$\mu_j' = 1 + \frac{\sum_{\eta=1, \eta \neq j}^m I_{i\eta}'}{I_{ij}'}; \quad \mu_j'' = 1 + \frac{\sum_{\eta=1, \eta \neq j}^m I_{i\eta}''}{I_{ij}''}. \quad (4)$$

З (3) видно, що втрати потужності в поздовжній частині лінії електропередач від  $i$ -го часткового струму  $I_i$  залежать не тільки від значення його складових, але і від значень інших часткових струмів, що протікають даною лінією. Величину даного впливу можна охарактеризувати коефіцієнтами впливу (4).

Використовуючи (3), можна визначити втрати в мережі  $\ell$  від протікання в її вітках  $\theta_{\text{в}\ell}$  струму, що викликаний транзитом електроенергії до  $k$ -ї мережі:

$$\Delta \dot{S}_{\ell,k} = \sum 3 \cdot (I_{ik}'^2 \mu_k' + I_{ik}''^2 \mu_k'') \cdot z_i, \quad i \in \theta_{\text{в}\ell}, \quad (5)$$

де  $\mu_k' = 1 + \frac{\sum_{\eta=1, \eta \neq k}^{\theta_M} I_{i\eta}'}{I_{ik}'}$ ,  $\mu_k'' = 1 + \frac{\sum_{\eta=1, \eta \neq k}^{\theta_M} I_{i\eta}''}{I_{ik}''}$  – коефіцієнти впливу струмових навантажень решти

електричних мереж на втрати, викликані сукупністю навантаження  $k$ -ї мережі;  $\theta_M$  – кількість транзитних електричних мереж;  $\theta_{\text{в}\ell}$  – множина віток мережі  $\ell$ .

За виразом (5) можуть бути визначені частки втрат потужності електричної мережі від окремих транзитних перетікань. Розподіл втрат потужності згідно виразу (5) може застосовуватись для аналізу втрат від транзитних перетікань у розподільних електричних мережах енергопостачальних компаній та їх розподілу між районними електричними мережами (РЕМ).

#### Результати використання запропонованого методу

В якості прикладу розглянемо електричну мережу, схема якої приведена на рис. 2. Слід зазначити, що тут показано найбільш просту мережу для ілюстрації розробленого методу та його аналітичної перевірки.

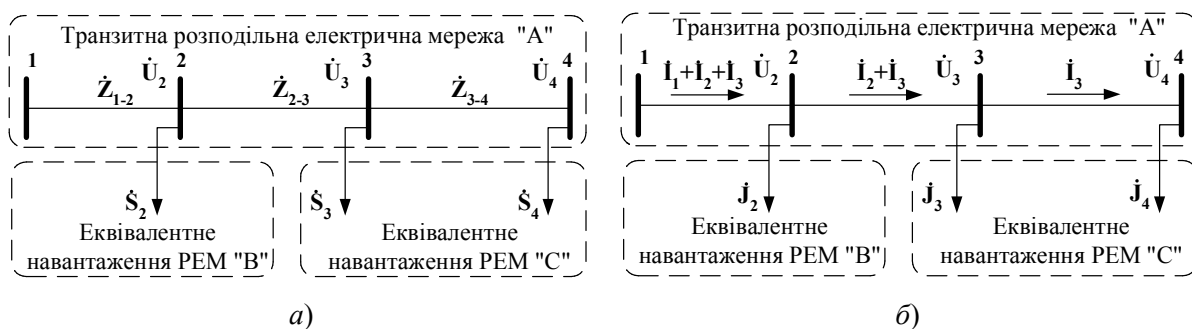


Рис. 2 – Районні мережі А, В, С

Припустимо, що розподільна мережа "А" 110кВ, що включає в себе вузол 1 і лінії 1-2, 2-3, 3-4 та забезпечує живленням районні електричні мережі "В" і "С". Навантаження мережі "В" еквівалентовано у вузлі 2. Навантаження мережі "С" еквівалентовано у вузлах 3 та 4. Позначимо навантаження споживачів ЕМ, як вказано на рис. 2, та задамо їх навантаженням у вигляді струмів. Припустимо, що:  $\dot{J}_2 = 0,131 - j0,043$  кА;  $\dot{J}_3 = 0,158 - j0,052$  кА;  $\dot{J}_4 = 0,106 - j0,032$  кА. Задамо параметри ЛЕП:  $\dot{Z}_{1-2} = 0,27 + j0,391$  Ом;  $\dot{Z}_{2-3} = 0,54 + j0,782$  Ом;  $\dot{Z}_{3-4} = 0,81 + j1,173$  Ом.

В результаті розрахунку часткових струмів та втрат потужності за виразом (5) отримано втрати потужності у мережі "А" від навантаження РЕМ "В", що дорівнюють  $\Delta \dot{S}_B^A = 0,047 + j0,067$  МВА. Втрати потужності у мережі "А" від навантаження РЕМ "С" складають  $\Delta \dot{S}_C^A = 0,247 + j0,358$  МВА. Сумарні втрати потужності тестового прикладу складають  $\Delta \dot{S}_\Sigma^A = 0,294 + j0,424$  МВА та співпадають з результатами отриманими за допомогою системи "ГрафАКМЭС", що розроблена Головним Інформаційно-обчислювальним Центром (ГІВЦ) Національної енергетичної компанії Укренерго (НЕК "Укренерго"). Використані значення струмових навантажень відповідають навантаженням заданих у потужностях:  $\dot{S}_2 = 25 + j8,22$  МВА,  $\dot{S}_3 = 30 + j9,86$  МВА,  $\dot{S}_4 = 20 + j6$  МВА та номінальній напрузі ЕМ 110 кВ.

Отримані значення втрат потужності від транзитних перетікань, що зумовлені навантаженнями окремих РЕМ, дозволяють виконувати більш детальне їх структурування, і таким чином, узгодження економічних відносин між суб'єктами.

#### *Алгоритм визначення втрат потужності від транзитних перетікань*

В сучасній практиці оперативних розрахунків розрахунок ustalених режимів виконується із представленням навантаження вузлів ЕМ еквівалентною потужністю споживання. Враховуючи даний факт та спираючись на викладене вище пропонується наступний алгоритм використання запропонованого вище методу за наявності кількох ( $n$ ) суб'єктів енергоринку:

1. Базовий розрахунок ustalеного режиму та втрат потужності в електричній мережі за фактичних значень потужностей навантажень всіх  $n$  енергетичних компаній.
2. Визначення розрахункових струмових навантажень всіх вузлів електричної мережі.
3. Видалення з пасивної частини мережі поперечних віток заступної схеми електричної мережі (оскільки вони враховуються у струмових навантаженнях вузлів).
4. Розрахунок  $n$  часткових режимів (по кількості РЕМ); для  $i$ -го режиму задаються розрахункові струмові навантаження  $i$ -ї РЕМ та нульові значення навантажень вузлів решти РЕМ. Результатом розрахунку будуть часткові струми у вітках розподільної мережі від кожної районної електричної мережі.
5. Визначення втрат від транзитного перетікання потужності в районну мережу  $k$  вітками  $\theta_{v\ell}$  розподільної мережі  $\ell$  за виразом (5).

Наведений алгоритм дозволяє, на основі розробленого методу, визначати втрати потужності від транзитних перетікань радіальних розподільних електричних мереж одного класу напруги. Результати отримані на основі розробленого методу та алгоритму дозволяють виконувати якісну оцінку енергоощадних заходів в розподільних ЕМ розімкненої конфігурації, виконувати планування та нормування втрат потужності від кожної РЕМ.

#### *Висновки*

1. Представлено та проілюстровано метод, що базується на фізично обґрунтованій схемі розрахунку втрат потужності від кожного перетоку для розімкненої мережі.
2. Метод базується на основних поняттях електротехніки та загальноприйнятих методах розрахунку ustalеного режиму, що забезпечує високу міру адекватності.
3. Розроблено алгоритм використання запропонованого методу, що дозволяє виконувати розрахунок транзитних втрат потужності в розподільних ЕМ розімкненої конфігурації та їх розподіл між учасниками енергообміну.

4. Розроблений метод дозволить розв'язати задачі обґрунтування значення втрат від транзитних перетікань, їх планування та нормування.

*Перелік посилань*

1. Железко Ю.С. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: ЭНАС, 2003. – 280 с.
2. Transmission Loss Allocation: A Comparison of Different Practical Algorithms / J. Conejo, J.M. Arroyo, N. Alguacil, and A.L. Guijarro // Power Systems. IEEE Trans. Power Syst. – 2002. – Vol. 17. – P. 571-576.
3. Таласов А.Г. Потери на транзит электроэнергии и их распределение между участниками энергообмена / А.Г. Таласов // Электрические станции. – 2002. – №1. – С. 20-25.
4. Galiana F.D. Incremental transmission loss allocation under pool dispatch / F.D. Galiana, A.J. Conejo, and I. Kockar // IEEE Trans. Power Syst. – 2002. – Vol. 17. – P. 26-33.
5. Стогний Б. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний / Б. Стогний, В. Павловский // Энергетическая политика Украины. – 2004. – № 5. – С. 26-31.
6. Kirschen D. Contributions of individual generators to loads and flows / D. Kirschen, R. Allan, and G. Strbac // IEEE Trans. Power Syst. – 1997. – Vol. 12. – P. 52-60.
7. Gross G. A physical-flow-based approach to allocating transmission losses in a transaction framework / G. Gross and S. Tao // IEEE Trans. Power Syst. – 2000. – Vol. 15. – P. 631-637.
8. Потребич А.А. Расчёт потерь электроэнергии, возникающих вследствие её транзита между энергокомпаниями / А.А. Потребич, Г.Н. Катренко // Энергетика и Электрификация. – 2004. – № 4. – С. 29–34.

Рецензент: О.Д. Демов,  
канд. техн. наук, ВНТУ

Стаття надійшла 10.04.2008