

Аналіз взаємовпливу електроенергетичних систем

Лежнюк П.Д., д.т.н., проф., Кулик В.В., к.т.н., Бурикін О.Б. асп.

Резюме – В статті пропонується нова методика визначення втрат потужності на її передачу для розподільних електричних мереж розімкненої конфігурації. В основу методики покладено метод накладання. Розрахунки виконуються на базі поточкорозподілу лінійної моделі нормального режиму, що цілком еквівалентна початковій нелінійній моделі для даного моменту часу.

I. Вступ

В теперішній час проблеми обліку, планування та зменшення втрат електроенергії в електричних мережах електроенергетичних систем (ЕЕС) є досить актуальними. Особливо якщо ЕЕС є взаємопов'язаними або об'єднаними та мають різних власників. Така постановка задачі передбачає фінансові (комерційні) взаєморозрахунки між власниками ЕЕС за транзити електроенергії та взаємні перетоки потужності між енергосистемами. Тому, дослідження з пошуку ефективних методів аналізу, прогнозування та планування взаємовпливу ЕЕС 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 імовірно-статистичним оцінюванням втрат (регресійний аналіз) [1-3]. Вони є загально визначеними та фізично обґрунтованими. Похибка визначенням загальних втрат по кожній вітці мережі для вказаних методів, як правило, є припустимою. Однак, однозначної методики розподілу втрат між учасниками енергообміну на даний час не існує.

У технічній літературі представлено три групи методів розподілу втрат потужності:

1) Пропорційні методи (Pro Rata Procedures), що базуються на припущенні про рівні внески у втрати мережі генерацій і споживачів. Дані методи, як правило не враховують особливості поточкорозподілу та структуру електричної мережі (ЕМ) [2];

2) Так звані, граничні методи (Marginal

procedures), що базуються на коефіцієнтах диференційних втрат на передачу потужності (Incremental transmission loss (ITL) coefficients) [2, 4].

3) Дольові методи (Proportional Sharing Procedures), що базуються на визначенні поточкорозподілу та лінеаризованому розподілі втрат від кожного учасника енергообміну [2,5,6].

В ряді робіт автори наголошують про неможливість 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 $n+1$ розрахунків електричних режимів (по кількості суб'єктів енергообміну). Дані розрахунки можуть виконуватись цілком автоматично [1], що на даний час є цілком досяжним зважаючи на сучасний рівень автоматизації систем комерційного обліку електроенергії, апаратного забезпечення та запровадження телеметрії.

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.

В наступній секції статі викладено розроблену методика визначення втрат потужності на її передачу для розподільних електричних мереж розімкненої конфігурації. Результати застосування розробленого методу на основі найпростішої схеми електричної мережі представлено у Секції III. У Секції IV представлено алгоритм використання розробленого методу. У заключній секції представлені висновки по використанню розробленого методу та окреслено межі його застосування.

II. РОЗРАХУНОК ТРАНЗИТНИХ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ НАКЛАДАННЯ

Розглянувши режим роботи ЕМ в довільний

Authors are with the Institute of the Electrical Power Engineering, Ecology and Electrical Mechanics, Vinnytsya National Technical University, 95 Khmelnytske Shose str., 21021 Vinnytsya, Ukraine, e-mail: mr.burykin@mail.ru

момент часу, за відомих потужностей навантаження \hat{S}_i та напруг у вузлах \hat{U}_i можна визначити задаючі струми вузлів ЕМ:

$$\hat{j}_i = \frac{\hat{S}_{pi}}{\sqrt{3}\hat{U}_i}$$

де \hat{S}_{pi} – розрахункова потужність навантаження (генерації), що враховує власну потужність навантаження (генерації) \hat{S}_i , а також зарядну потужність в суміжних лініях.

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 постійним по модулю та фазі струмом. Поперечна складова заступної схеми еквівалентується у розрахункових навантаженнях вузлів.

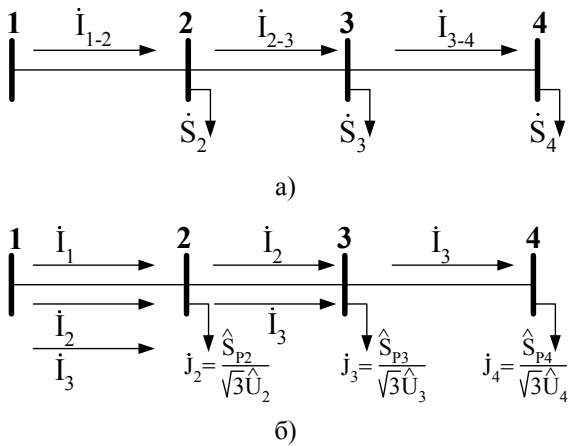


Рис.1. Схема найпростішого випадку транзиту потужності

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

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

Для дійсної площини рівняння прийме вигляд:

$$\Delta \hat{S}_\Sigma = 3 \cdot \left[(I_1' + I_2' + I_3')^2 + (I_1'' + I_2'' + I_3'')^2 \right] \cdot \hat{Z}_{1-2};$$

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:

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

або від кожного часткового струму окремо:

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

Природно, що останні вирази можна узагальнити на довільну кількість часткових струмів, що протікають по елементу ЕМ. Вираз втрат потужності в k -й вітці мережі від струмів i -го режиму (навантажень i -го учасника енергообміну) прийме наступний вигляд:

$$\Delta \hat{S}_k(I_i) = 3 \left[I_i'^2 \left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{I_j'}{I_i'} \right) + I_i''^2 \left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{I_j''}{I_i''} \right) \right] \hat{Z}_k \quad (3)$$

де k – номер вітки мережі; n – кількість часткових струмів, що протікають по даній вітці; i, j – номер часткового струму.

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

$$\mu_k'(I_i) = \sum_{j=1}^n \frac{I_j'}{I_i'}; \quad \mu_k''(I_i) = \sum_{j=1}^n \frac{I_j''}{I_i''}. \quad (4)$$

Вказані коефіцієнти можуть приймати довільні значення в залежності від величини та напрямку часткових струмів, що протікають у k -ій ЛЕП. Нульові значення відповідають відсутності у даній вітці часткових струмів крім I_i .

З урахуванням (4) вираз для визначення втрат потужності у k -ій вітці ЕМ від i -го струму може бути переписаний у такому вигляді:

$$\Delta \hat{S}_k(I_i) = 3 \left[I_i'^2 (1 + \mu_k'(I_i)) + I_i''^2 (1 + \mu_k''(I_i)) \right] \hat{Z}_k \quad (5)$$

Втрати в j -й електроенергетичній системі від навантажень i -ї визначаються, як сума втрат по кожній вітці j -ї ЕМ від струмів i -го часткового режиму (струмових навантажень i -ї ЕМ)

$$\Delta \hat{S}_j(i)_\Sigma = \sum_{k \in M_j} \Delta \hat{S}_k(i) \quad (6)$$

де M_j – підмножина віток j -ї електроенергетичної

системи.

Розподіл втрат потужності, згідно з останнім виразом, може використовуватись для визначення та розподілу втрат потужності у розподільних ЕМ розімкненої конфігурації різних енергопостачальних компаній.

Сумарні втрати в об'єднаній електроенергетичній системі визначаються по формулі:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Delta \dot{S}_j (\dot{I}_i)_z \quad (7)$$

III. РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

В якості прикладу розглянемо, вже згадувану, електричну мережу на рис.1. Слід зазначити, що тут приведено найбільш просту мережу для ілюстрації розробленого методу та його аналітичної перевірки.

Припустимо, що мережа, яка аналізується включає в себе мережі трьох енергетичних компаній – “А”, “В”, “С”. Мережа “А” включає в себе вузли 1, 2 та лінію 1-2. Мережі “В” та “С” включають у себе по одному вузлу 3 та 4, і по одній лінії 2-3 та 3-4 відповідно. Позначимо навантаження споживачів кожної з компаній, як вказано на рис. 2, та задамо їх струмовими навантаженнями. 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.

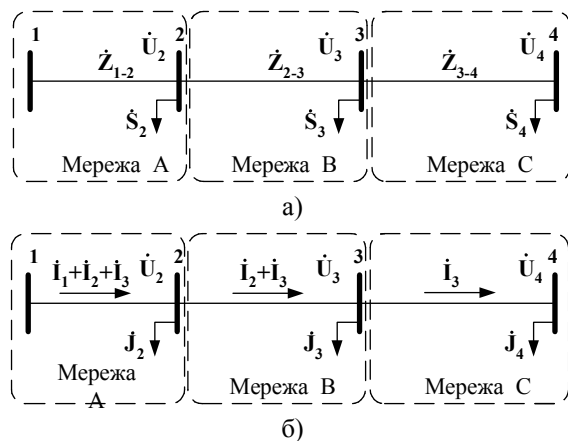


Рис.2. Районні мережі А, В, С

Виконаємо розрахунок часткових струмів та втрат потужності мережах. Отримані результати занесемо у таблицю 1.

Втрати при фактичних значеннях навантажень електричних мереж отримано за допомогою системи “ГрафАКМЭС”, що розроблена Головним Інформаційно-обчислювальним Центром (ГІВЦ) Національної енергетичної компанії Укренерго (НЕК “Укренерго”). Використані значення

струмових навантажень відповідають навантаженням, що задано у потужностях:

$$\dot{S}_2 = 25 + j8.22 \text{ (MVA)}; \dot{S}_3 = 30 + j9.86 \text{ (MVA)}; \dot{S}_4 = 20 + j6 \text{ (MVA)}.$$

ТАБЛИЦЯ I
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ

	Мережа А	Мережа В	Мережа С
Втрати при фактичних значеннях навантажень електричних мереж	0,14+0,202j	0,124+0,179j	0,03+0,043j
Втрати в мережах від навантажень мережі А	0,047+0,067j	0	0
Втрати в мережах від навантажень мережі В	0,056+0,081j	0,074+0,108j	0
Втрати в мережах від навантажень мережі С	0,037+0,054j	0,050+0,072j	0,030+0,043j
Сумарні втрати по електричних мережах	0,14+0,202j	0,124+0,18j	0,030+0,043j

IV. АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ ВІД ВЗАЄМОВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

В сучасній практиці оперативних розрахунків розрахунок ustalених режимів ЕЕС виконується із заданням навантаження вузлів ЕЕС 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 енергетичних компаній); для i-го режиму задаються розрахункові струмові навантаження i-ї компанії та нульові значення навантажень вузлів решти компаній;
5. Визначення часткових струмів у вітках ЕЕС та втрат від них за виразом (5);
6. Визначення фактичних втрат потужності для кожної енергетичної компанії за формулами (6, 7) від власних навантажень та навантажень інших учасників енергообміну;

Наведений алгоритм дозволяє, на основі розробленого методу, визначати втрати потужності від взаємовпливу електричних мереж одного класу напруги. Результати отримані на основі розробленого методу та алгоритму дозволяють виконувати якісну оцінку оптимізації втрат в розподільних ЕМ розімкненої конфігурації.

V. 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 усталеного режиму, що забезпечує високу міру адекватності.

3. Розроблено алгоритм використання запропонованого методу, що дозволяє виконувати розрахунок втрат потужності в розподільних ЕМ розімкненої конфігурації та їх розподіл між учасниками енергообміну.

ЛІТЕРАТУРА

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