

УДК 621.316

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.;

М. В. Кузьменко, асп.

АНАЛІЗ ЦІЛЬОВИХ ФУНКЦІЙ СИМЕТРУВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ ЗА БАГАТОКРАТНОЇ НЕСИМЕТРІЇ

Проведено аналіз, який дозволяє за багатократної несиметрії в розподільних мережах енергопостачальних компаній в якості критерію симетрування навантажень використовувати мінімум суми квадратів діючих значень напруг зворотної послідовності в усіх вузлах мережі або мінімум втрат активної потужності, що зумовлені струмами зворотної послідовності.

Вступ

В розподільних мережах енергопостачальних компаній характерним є існування режимів, які характеризуються багатократною несиметрією за наявності декількох споживачів з несиметричним навантаженням. В [1] розглянуто питання часткового симетрування навантажень за багатократної несиметрії. Однак кількісний аналіз умов відсутній.

Зв'язок між струмами і напругами прямої та зворотної послідовностей у вузлі навантаження описується виразом

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{12} , \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{22} — комплексні провідності навантаження, які зв'язують напруги і струми прямої та зворотної послідовностей; \dot{U}_1 , \dot{U}_2 — комплексні напруги відповідно прямої та зворотної послідовностей; \dot{I}_1 , \dot{I}_2 — комплексні струми відповідно прямої та зворотної послідовностей.

Комплексні провідності навантаження розподільних мереж енергопостачальних компаній можуть бути визначені за формулами

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB}; \\ \underline{Y}_{12} &= -(\underline{Y}_{BC} + a^2 \underline{Y}_{CA} + a \underline{Y}_{AB}); \\ \underline{Y}_{21} &= -(\underline{Y}_{BC} + a \underline{Y}_{CA} + a^2 \underline{Y}_{AB}); \\ \underline{Y}_{22} &= \underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB}, \end{aligned} \quad (2)$$

де \underline{Y}_{BC} , \underline{Y}_{CA} , \underline{Y}_{AB} — комплексні провідності фаз навантаження; $a = e^{j120^\circ}$ — оператор повороту трифазної системи.

В [2] показано, що для забезпечення повного симетрування навантажень за однократної несиметрії напруг достатньо забезпечити виконання умови

$$\underline{Y}_{21} = 0. \quad (3)$$

У цьому випадку за відсутності несиметрії джерела $U_2 = 0$, $I_2 = 0$.

Важливим є виявлення та аналіз умов симетрування навантажень за багатократної несиметрії.

Умови симетрування навантажень за багатократною несиметрією

Розглянемо магістральну мережу з двома несиметричними споживачами, які підключені до вузлів А та Б (рис. 1).

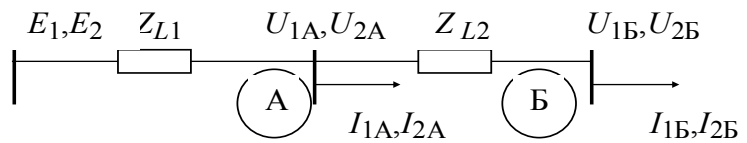


Рис. 1. Схема магістральної мережі з двома несиметричними споживачами

Напруги прямої та зворотної послідовностей у вузлах А та Б відповідно будуть

$$\dot{U}_{1A} = \dot{E}_1 - \underline{Z}_{L1} \dot{I}_{1A} - \underline{Z}_{L1} \dot{I}_{1B}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_{1B} = \dot{E}_1 - \underline{Z}_{L1} \dot{I}_{1A} - (\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}) \dot{I}_{1B};$$

$$\dot{U}_{2A} = \dot{E}_2 - \underline{Z}_{L1} \dot{I}_{2A} - \underline{Z}_{L1} \dot{I}_{2B}; \quad (5)$$

$$\dot{U}_{2B} = \dot{E}_2 - \underline{Z}_{L1} \dot{I}_{2A} - (\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}) \dot{I}_{2B},$$

де \dot{E}_1, \dot{E}_2 — комплексні ЕРС прямої та зворотної послідовностей джерела живлення; $\dot{I}_{1A}, \dot{I}_{1B}; \dot{I}_{2A}, \dot{I}_{2B}$ — комплексні струми прямої та зворотної послідовностей навантаження споживачів відповідно вузлів А та Б; $\underline{Z}_{L1}, \underline{Z}_{L2}$ — комплексні опори ліній (див. рис. 1).

Підставивши з (1) вирази струмів навантаження вузлів, записані через комплексні провідності нульової, прямої та зворотної послідовностей навантаження вузлів і напруги прямої та зворотної послідовностей у вузлах, в (4) та (5), а також ввівши вузлові опори $\underline{Z}_A = \underline{Z}_{L1}$, $\underline{Z}_B = (\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2})$, отримаємо:

$$\dot{U}_{1A} = \dot{E}_1 - \underline{Z}_A (\underline{Y}_{11A} \dot{U}_{1A} + \underline{Y}_{11B} \dot{U}_{1B} + \underline{Y}_{12A} \dot{U}_{2A} + \underline{Y}_{12B} \dot{U}_{2B}); \quad (6)$$

$$\dot{U}_{1B} = \dot{E}_1 - \underline{Z}_A \underline{Y}_{11A} \dot{U}_{1A} - \underline{Z}_B \underline{Y}_{11B} \dot{U}_{1B} - \underline{Z}_A \underline{Y}_{12A} \dot{U}_{2A} - \underline{Z}_B \underline{Y}_{12B} \dot{U}_{2B};$$

$$\dot{U}_{2A} = \dot{E}_2 - \underline{Z}_A (\underline{Y}_{21A} \dot{U}_{1A} + \underline{Y}_{21B} \dot{U}_{1B} + \underline{Y}_{22A} \dot{U}_{2A} + \underline{Y}_{22B} \dot{U}_{2B}); \quad (7)$$

$$\dot{U}_{2B} = \dot{E}_2 - \underline{Z}_A \underline{Y}_{21A} \dot{U}_{1A} - \underline{Z}_B \underline{Y}_{21B} \dot{U}_{1B} - \underline{Z}_A \underline{Y}_{22A} \dot{U}_{2A} - \underline{Z}_B \underline{Y}_{22B} \dot{U}_{2B}.$$

Нехтуючи складовими другого порядку малості, вирази (6) можна подати у такому вигляді:

$$\dot{U}_{1A} \approx \dot{E}_1 - \underline{Z}_A (\underline{Y}_{11A} \dot{U}_{1A} + \underline{Y}_{11B} \dot{U}_{1B}); \quad (8)$$

$$\dot{U}_{1B} \approx \dot{E}_1 - \underline{Z}_A \underline{Y}_{11A} \dot{U}_{1A} - \underline{Z}_B \underline{Y}_{11B} \dot{U}_{1B}.$$

Підставивши з (8) напруги прямої послідовності у вузлах А та Б в (7) та розв'язавши систему двох лінійних рівнянь з двома невідомими, а також нехтуючи величинами другого порядку малості, отримаємо вирази для напруг зворотної послідовності у вузлах А та Б:

$$\dot{U}_{2A} \approx \frac{\dot{E}_2 - \underline{Z}_A \underline{Y}_{21A} \dot{U}_{1A} - \underline{Z}_A \underline{Y}_{21B} \dot{U}_{1B}}{1 + \underline{Z}_A \underline{Y}_{22A} + \underline{Z}_B \underline{Y}_{22B}}; \quad (9)$$

$$\dot{U}_{2B} \approx \frac{\dot{E}_2 - \underline{Z}_A \underline{Y}_{21A} \dot{U}_{1A} - \underline{Z}_B \underline{Y}_{21B} \dot{U}_{1B}}{1 + \underline{Z}_A \underline{Y}_{22A} + \underline{Z}_B \underline{Y}_{22B}}.$$

З виразів (9) випливає, що встановлення СП у вузлі А або Б не може забезпечити повну симетрію напруг і струмів в обох вузлах одночасно.

Якщо, наприклад, для СП вузла А дотримуватись виконання умови повного симетрування напруги

$$\dot{E}_2 - \underline{Z}_A \underline{Y}_{21A} \dot{U}_{1A} - \underline{Z}_A \underline{Y}_{21B} \dot{U}_{1B} = 0,$$

то

$$\dot{U}_{2A} \approx 0; \quad \dot{U}_{2B} \approx \frac{-(Z_B - Z_A)Y_{21B}\dot{U}_{1B}}{1 + Z_A Y_{22A} + Z_B Y_{22B}}$$

Однак останній підхід може виявитись нераціональним через значні втрати потужності, зумовлені необхідністю формування істотних струмів зворотної послідовності.

Наближені вирази для струмів зворотної послідовності вузлів А та Б відповідно будуть

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2A} &\approx Y_{21A}\dot{U}_{1A} + Y_{22A} \frac{\dot{E}_2 - Z_A Y_{21A}\dot{U}_{1A} - Z_A Y_{21B}\dot{U}_{1B}}{1 + Z_A Y_{22A} + Z_B Y_{22B}}; \\ \dot{I}_{2B} &\approx Y_{21B}\dot{U}_{1B} + Y_{22B} \frac{\dot{E}_2 - Z_A Y_{21A}\dot{U}_{1A} - Z_B Y_{21B}\dot{U}_{1B}}{1 + Z_A Y_{22A} + Z_B Y_{22B}}. \end{aligned}$$

Якщо симетрування здійснювати за критерієм $I_{2A} = 0$, то в обох вузлах буде залишкова напруга, викликана несиметрією напруг джерела та навантажень вузлів А та Б. Крім того, сумарна провідність зворотної послідовності навантаження та СП Y_{21A} не буде дорівнювати нулю. Отже такий критерій теж не буде забезпечувати оптимальність рішень.

Якщо, наприклад, симетрування здійснювати у вузлі А за критерієм $Y_{21A} = 0$, то в обох вузлах буде залишкова напруга, викликана несиметрією напруг джерела та навантаження вузла Б:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{2A} &\approx \frac{\dot{E}_2 - Z_A Y_{21B}\dot{U}_{1B}}{1 + Z_A Y_{22A} + Z_B Y_{22B}}; \\ \dot{U}_{2B} &\approx \frac{\dot{E}_2 - Z_B Y_{21B}\dot{U}_{1B}}{1 + Z_A Y_{22A} + Z_B Y_{22B}}, \end{aligned} \tag{10}$$

а залишкові струми зворотної послідовності вузлів А та Б відповідно будуть

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2A} &\approx Y_{22A} \frac{\dot{E}_2 - Z_A Y_{21B}\dot{U}_{1B}}{1 + Z_A Y_{22A} + Z_B Y_{22B}}; \\ \dot{I}_{2B} &\approx Y_{21B}\dot{U}_{1B} + Y_{22B} \frac{\dot{E}_2 - Z_B Y_{21B}\dot{U}_{1B}}{1 + Z_A Y_{22A} + Z_B Y_{22B}}. \end{aligned} \tag{11}$$

Необхідно оцінити ефективність симетрування навантажень з використанням різних цільових функцій.

Аналіз цільових функцій симетрування навантажень

Для прикладу, на рис. 2 зображено заступну схему розімкнутої мережі, що містить чотири вузли навантаження, а в двох вузлах (другому і четвертому) містяться несиметричні споживачі.

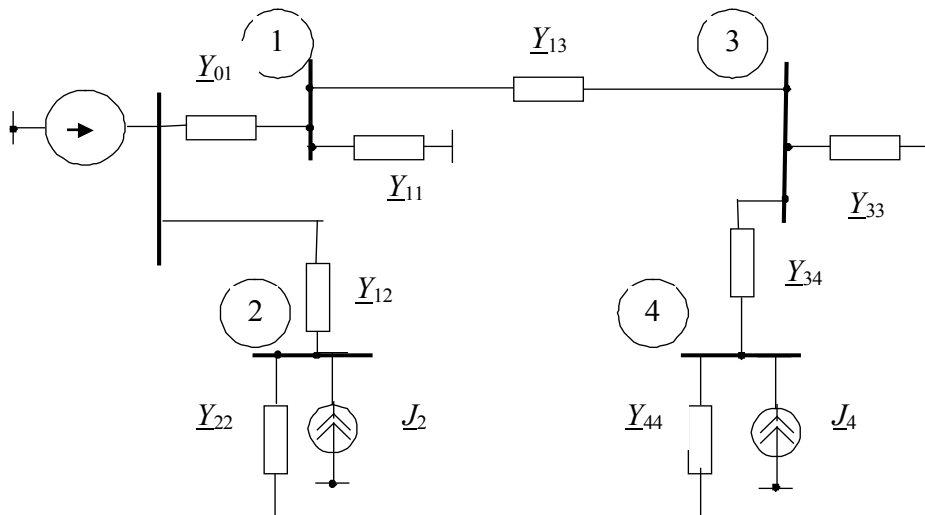


Рис. 2. Заступна схема розімкнутої мережі з двома джерелами несиметрії

Вектор комплексних напруг зворотної послідовності відносно базового вузла

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\Delta 1} \\ \dot{U}_{\Delta 2} \\ \dot{U}_{\Delta 3} \\ \dot{U}_{\Delta 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{01} + \underline{Y}_{11} + \underline{Y}_{12} + \underline{Y}_{13} & -\underline{Y}_{12} & -\underline{Y}_{13} & 0 \\ -\underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{12} + \underline{Y}_{22} & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_{13} & 0 & \underline{Y}_{13} + \underline{Y}_{33} + \underline{Y}_{34} & -\underline{Y}_{34} \\ 0 & 0 & -\underline{Y}_{34} & \underline{Y}_{34} + \underline{Y}_{44} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{J}_2 \\ 0 \\ \dot{J}_4 \end{bmatrix}.$$

Умову симетрування за багатократної несиметрії навантажень можна подати як мінімум суми квадратів діючих значень напруг зворотної послідовності в усіх вузлах мережі

$$U_{2\Delta} = \sqrt{U_{2\Delta 1}^2 + U_{2\Delta 2}^2 + U_{2\Delta 3}^2 + U_{2\Delta 4}^2} = \min. \quad (12)$$

Недоліком цієї умови є однакова вага усіх напруг вузлів споживачів. Наприклад, за наявності малопотужних віддалених споживачів напруги їх вузлів однаково будуть враховані, як і напруги наближених вузлів потужних споживачів. Крім того, як вже було вказано вище, такий підхід може виявитись нерациональним через значні втрати потужності, зумовлені необхідністю формування істотних струмів зворотної послідовності.

Становить інтерес використання в якості критерію симетрування за багатократної несиметрії навантажень втрат активної потужності. Втрати активної потужності, що зумовлені струмами зворотної послідовності, будуть

$$\Delta P_2 = 3(\hat{\mathbf{J}}_2^t \mathbf{R}_2 \mathbf{J}_2) = \min, \quad (13)$$

де \mathbf{J}_2 — вектор-стовпець комплексних струмів зворотної послідовності навантажень споживачів; $\hat{\mathbf{J}}_2^t$ — вектор-рядок комплексних спряжених струмів зворотної послідовності навантажень споживачів; \mathbf{R}_2 — матриця вузлових активних опорів зворотної послідовності мережі.

Матрицю вузлових активних опорів зворотної послідовності мережі \mathbf{R}_2 визначають як дійсну частину матриці \mathbf{Z}_2 зворотної послідовності.

На рис. 3а, б наведено залежності напруги зворотної послідовності $U_{2\Delta}$ (криві 1) та втрат потужності ΔP_2 (криві 2) від струму зворотної послідовності вузла 4, якщо у вузлі 2 струм зворотної послідовності 1 А та якщо у вузлі 2 струм зворотної послідовності 2 А (причому струми у вузлах 2 та 4 мають однаковий зсув фаз).

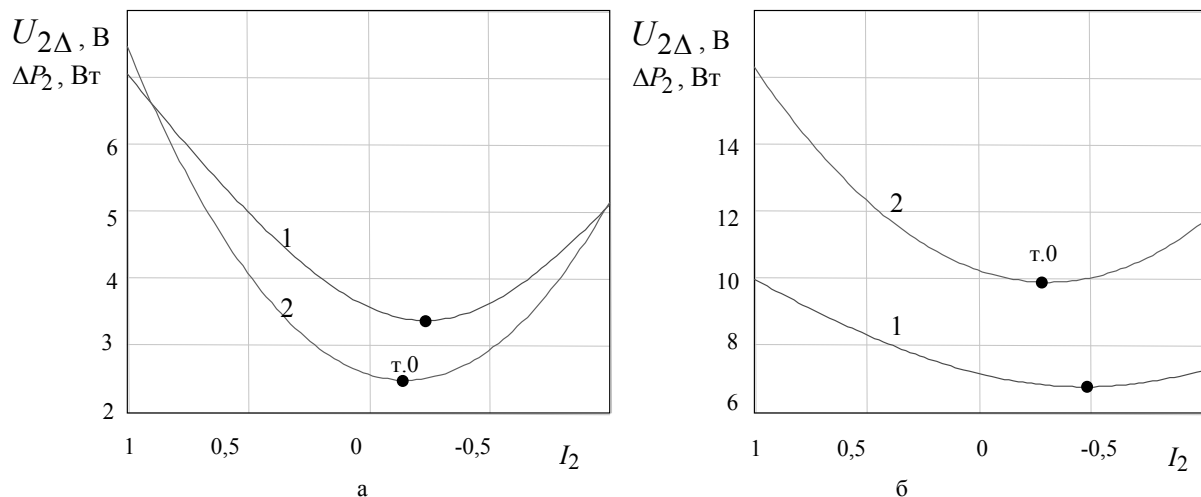


Рис. 3. Залежності напруги зворотної послідовності та втрат потужності від струму зворотної послідовності вузла 4:

а — якщо у вузлі 2 струм зворотної послідовності 1 А;

б — якщо у вузлі 2 струм зворотної послідовності 2 А

В обох випадках оптимальні розв'язки зміщені в сторону перекомпенсації струму зворотної послідовності у вузлі 4, що забезпечує часткову компенсацію струму зворотної послідовності у вузлі 2. (Зазначимо, що у разі коли струми зворотної послідовності у протифазі, розв'язки будуть зміщені в сторону недокомпенсації струму зворотної послідовності у вузлі 4). Природно, що перекомпенсація у другому випадку повинна бути значно більшою, оскільки більшим є струм зворотної

послідовності у вузлі 2). Водночас, застосування умови (12) дає значно більше значення перекомпенсації струму зворотної послідовності, ніж у разі застосування умови (13), які на графіках позначено як оптимальні розв'язки (т. 0).

Порівняємо отримані оптимальні розв'язки із розв'язками, які можуть бути прийняті на основі мінімального значення напруги зворотної послідовності у цьому вузлі, в якому передбачено регулювання СП. На рис. 4 наведено залежності втрат потужності ΔP_2 (криві 0), а також напруг зворотної послідовності U_{2k} у вузлах мережі (криві k характеризують напруги у вузлах k) від струму зворотної послідовності вузла 4, якщо у вузлі 2 струм зворотної послідовності 1 А (рис. 4а) та якщо у вузлі 2 струм зворотної послідовності 2 А (рис. 4б).

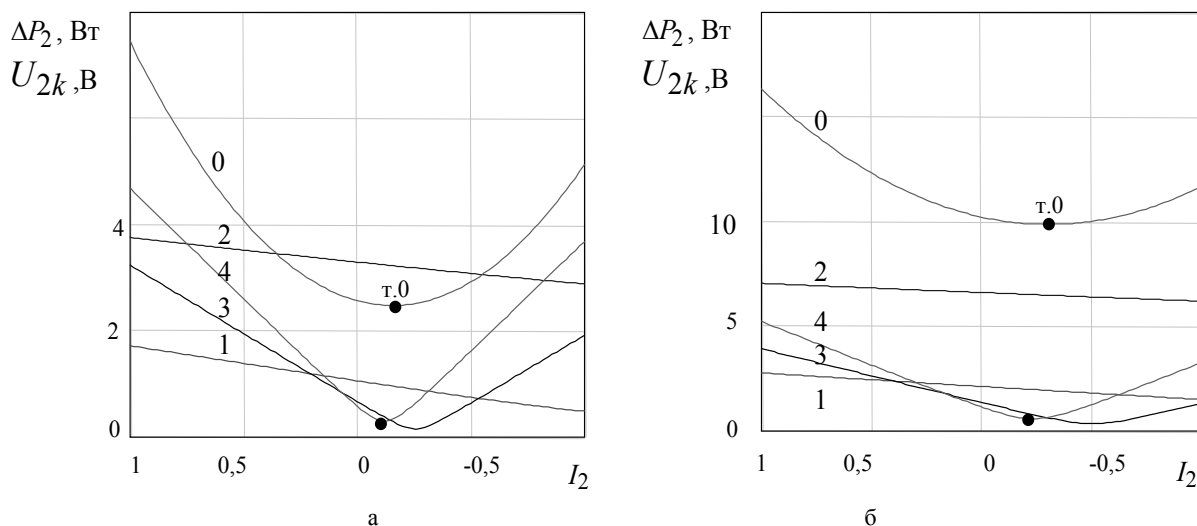


Рис. 4. Залежності втрат потужності та напруг зворотної послідовності у вузлах мережі від струму зворотної послідовності вузла 4:

- а — якщо у вузлі 2 струм зворотної послідовності 1 А;
б — якщо у вузлі 2 струм зворотної послідовності 2 А

В обох випадках розв'язки, які приймаються за значенням напруги зворотної послідовності у вузлі 4 регулювання СП, зміщені від розв'язків, які приймаються за втратами потужності в мережі, в сторону зменшення перекомпенсації струму зворотної послідовності у вузлі 4.

Висновки

За багатократної несиметрії в розподільних мережах енергопостачальних компаній в якості критерію симетрування навантажень можна використовувати мінімум суми квадратів діючих значень напруг зворотної послідовності в усіх вузлах мережі або мінімум втрат активної потужності, що зумовлені струмами зворотної послідовності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Григорьев А. С. Частичная компенсация токов обратной последовательности в трехфазных цепях с несимметричными нагрузками : дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.09.05 «Теоретические основы электротехники» / А. С. Григорьев. — К. : ИЭД АН УССР, 1982. — 207 с.
2. Кузнецов В. Г. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками / В. Г. Кузнецов // Электричество. — 1983. — № 2. — С. 64—67.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Надійшла до редакції 30.09.10
Рекомендована до друку 11.10.10

Бурбело Михайло Йосипович — завідувач кафедри, **Кузьменко Марина Василівна** — аспірантка.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет