

УДК 621.311.1.016:621.311.1.018.3

М. Й. Бурбело, д. т. н., доц.;

О. В. Бабенко, асп.;

С. М. Бурбело,

Л. М. Мельничук

## АНАЛІЗ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА УМОВ НЕСИМЕТРІЇ ТА НЕСИНУСОЇДНОСТІ НАПРУГ І СТРУМІВ

*Проаналізовано кількісні співвідношення для визначення втрат електричної енергії в лініях електропередач за умов несиметрії напруг та навантажень і несинусоїдності для лінійних та нелінійних навантажень.*

### Розгляд проблеми і постановка задачі

Аналізу втрат потужності в електричних мережах за умов несиметрії та несинусоїдності присвячені численні публікації [1, 2]. В [3] для визначення втрат потужності в лініях електропередач використано розкладання повної потужності на ортогональні складові

$$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2}{U^2} R,$$

де  $S$  – повна потужність навантаження;  $U$  – середнє діюче значення напруги;  $R$  – активний опір лінії;  $P$ ,  $Q$  – активна та реактивна потужності;  $N$  – пульсуюча потужність, що зумовлена несиметрією;  $D$  – потужність спотворення, що зумовлена несинусоїдністю.

Однак, під час аналізу втрат не враховано характер навантаження, що є істотним недоліком, оскільки не дозволяє кількісно оцінити реальні втрати електричної енергії в кожному конкретному випадку.

Ставиться задача аналізу впливу характеру навантаження на значення втрат електричної енергії в лініях електропередач за умов несиметрії та несинусоїдності.

Для аналізу доцільним є використання принципу декомпозиції. Спочатку слід розглянути синусоїдні режими з несиметричним джерелом, потім – з несиметричним навантаженням, а в подальшому проаналізувати лінійне навантаження з несинусоїдним джерелом і завершити розгляд нелінійним навантаженням. Такий підхід дозволить виокремити кожен складову і кількісно оцінити її частку в загальних втратах.

### Аналіз втрат, зумовлених несиметрією напруг і струмів

Несиметричні режими в трифазних мережах з ізольованою нейтраллю характеризуються такими рівняннями:

$$\dot{I}_1 = \underline{Y}_{11}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{12}\dot{U}_2;$$

$$\dot{I}_2 = \underline{Y}_{21}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{22}\dot{U}_2,$$

де  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_2$  – комплексні напруги прямої та зворотної послідовностей;  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  – комплексні струми прямої та зворотної послідовностей;  $\underline{Y}_{11}$ ,  $\underline{Y}_{12}$ ,  $\underline{Y}_{21}$ ,  $\underline{Y}_{22}$  – комплексні провідності навантаження, що зв'язують напруги та струми відповідних послідовностей.

За відсутності електричних машин в навантаженні

$$\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{22} = \underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB};$$

$$\underline{Y}_{12} = -\left(\underline{Y}_{BC} + a^2 \underline{Y}_{CA} + a \underline{Y}_{AB}\right);$$

$$Y_{21} = -\left(Y_{BC} + aY_{CA} + a^2 Y_{AB}\right),$$

де  $Y_{BC}, Y_{CA}, Y_{AB}$  – комплексні провідності фаз навантаження;  $a = e^{j120^\circ}$  – оператор повороту.

За наявності електричних машин  $Y_{22} \neq Y_{11}$  [4], а для несиметричного навантаження  $Y_{12} \neq Y_{21} \neq 0$ . Отже, за наявності несиметрії напруг або несиметрії навантаження

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2}.$$

Повну потужність можна подати у вигляді [5]

$$S = U_e I_e = \sqrt{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)},$$

де  $U_e, I_e$  – еквівалентні відповідно напруга та струм;  $U_A, U_B, U_C$  – діючі значення напруг;  $I_A, I_B, I_C$  – діючі значення струмів.

Активну та реактивну потужності можна виразити через провідності прямої послідовності

$$P = g_1 U_e^2; Q = b_1 \cdot U_e^2,$$

де  $g_1, b_1$  – активна та реактивна провідності навантаження прямої послідовності.

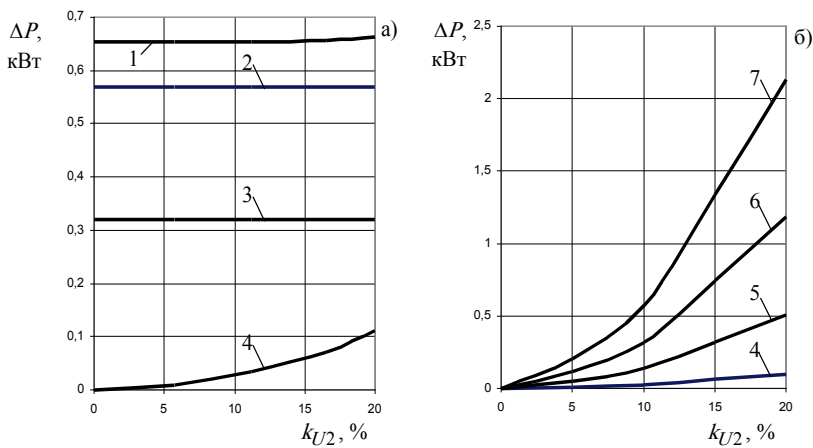


Рис. 1. Графіки залежностей втрат потужності в лінії від коефіцієнта зворотної складової напруги

На рис. 1а подано графіки залежностей втрат потужності  $\Delta P$  а також складових втрат потужності  $\Delta P_P, \Delta P_Q, \Delta P_N$  (графіки відповідно 1—4), зумовлених відповідно повною, активною, реактивною та пульсуючою потужностями, що побудовані за несиметричної системи напруг як функції коефіцієнта зворотної складової напруги  $k_{U2}$  у разі, якщо  $Y_{22} = 2Y_{11}$ . На рис. 1б побудовані графіки залежностей втрат, зумовлених пульсуючою потужністю, за несиметричної системи напруг для різних значень провідності

зворотної послідовності  $Y_{22} = (2; 4; 6; 8)Y_{11}$ .

Із графіків випливає, що складова втрат  $\Delta P_N$  різко зростає у разі збільшення частки двигунів в навантаженні (графіки 5, 6, 7).

Розрахунки, які виконані за симетричної системи напруг і несиметричного навантаження, показують що всі складові втрат мають аналогічний характер, а складова потужності  $\Delta P_N$  не перевищує 0,05 кВт в діапазоні коефіцієнта зворотної складової струму до 20 %.

### Аналіз втрат в несинусоїдному режимі

У разі дії періодичних несинусоїдних струмів та напруг процеси споживання електричної енергії характеризують за допомогою повної  $S$ , активної  $P$ , реактивної  $Q$  потужностей та потужності спотворення  $D$ , причому

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}.$$

Активну та реактивну потужності лінійного навантаження можна виразити через провідності навантаження на окремих гармоніках

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 g_n; Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 b_n,$$

де  $P_n, Q_n$  — активна та реактивна потужності на  $n$ -й гармоніці;  $U_n$  — діюче значення  $n$ -ї гармонічної складової напруги;  $g_n, b_n$  — активна та реактивна провідності на  $n$ -й гармоніці.

Потужність спотворення  $D_s$ , що споживається лінійним навантаженням можна виразити через провідності навантаження на окремих гармоніках

$$D_s = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=n+1}^{\infty} U_n^2 U_k^2 [(g_n - g_k)^2 + (b_n - b_k)^2]}.$$

З останнього виразу випливає, що потужність  $D_s$  наявна у разі частотної залежності активної або реактивної складових провідності навантаження, тобто, практично в усіх випадках.

В нелінійних електричних колах процеси істотно ускладнюються, оскільки нелінійне навантаження є джерелом вищих гармонік, а, отже, нелінійні навантаження генерують потужність спотворення.

Активна та реактивна потужності, що споживаються нелінійним навантаженням, знаходяться з виразів

$$P = U_1^2 g_{11}; \quad Q = U_1^2 b_{11},$$

а потужність спотворення  $D_f$ , що генерується нелінійним навантаженням, можна представити двома ортогональними складовими, наприклад, для навантажень з паралельною схемою заміщення у вигляді

$$D_f = U_1^2 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (g_{1k}^2 + b_{1k}^2)},$$

де  $g_{1k}(U_1), b_{1k}(U_1)$  — провідності, які зв'язують активну та реактивну складові  $k$ -ї гармоніки струму з першою гармонікою напруги.

Слід розрізняти сильно- та слабонелінійні навантаження. Для сильнонелінійних навантажень (тиристорні випрямлячі та перетворювачі) параметри  $g_{1k}, b_{1k}$  визначаються на основі аналізу процесів випрямлення та перетворення за різного характеру навантаження. Слабонелінійні навантаження можуть бути представлені з використанням різних математичних моделей апроксимації нелінійних характеристик.

Розглянемо модель слабонелінійного навантаження, нелінійні характеристики провідностей якого апроксимовані парними степеневими поліномами напруги

$$g(u) = \alpha_0 + \alpha_2 u^2 + \alpha_4 u^4; \quad b(u) = (\beta_0 + \beta_2 u^2 + \beta_4 u^4) / \omega,$$

де  $\alpha_0, \alpha_2, \alpha_4, \beta_0, \beta_2, \beta_4$  — статичні параметри відповідно активної та реактивної провідностей навантаження (коефіцієнти степеневих поліномів).

У разі дії синусоїдної напруги  $u(t) = U_{m1} \sin \omega t$  струм в нелінійному навантаженні  $i(t)$ , окрім основної гармоніки  $I_{m1} \sin(\omega t + \phi_1)$  містить вищі кратні непарні гармоніки  $I_{m3} \sin(3\omega t + \phi_3), I_{m5} \sin(5\omega t + \phi_5), \dots$  Комплексні діючі значення гармонік струму можуть бути визначені за формулами

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= [g_{11}(U_1) - jb_{11}(U_1)]U_1; \\ \dot{I}_3 &= -[g_{13}(U_1) - jb_{13}(U_1)]U_1; \\ \dot{I}_5 &= [g_{15}(U_1) + jb_{15}(U_1)]U_1. \end{aligned}$$

На рис. 2а наведено графіки залежностей втрат активної потужності  $\Delta P$ , а також складових втрат, зумовлених активною  $\Delta P_P$ , реактивною  $\Delta P_Q$  потужностями та потужністю спотворення  $\Delta P_D$  (графіки позначено цифрами відповідно 1–4), як функцій п'ятої гармоніки напруги  $v_5$  у випадку, якщо лінійне навантаження представлено двоелементною паралельною схемою заміщення з такими значеннями параметрів [6]:

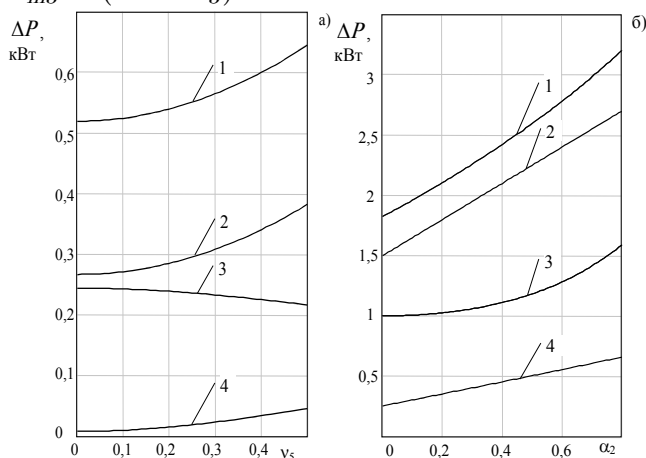


Рис. 2. Графіки залежностей втрат потужності за лінійного (а) та нелінійного (б) навантажень за умов несинусоїдності

$$g = \frac{0,1P_0n + 0,9P_0}{U^2}; \quad b = \frac{Q_0/n}{U^2},$$

де  $P_0$ ,  $Q_0$  – задані значення потужностей на частоті основної гармоніки.

На рис. 2б наведено графіки залежностей втрат активної потужності  $\Delta P$ , а також складових втрат, зумовлених активною  $\Delta P_P$ , реактивною  $\Delta P_Q$  потужностями та потужністю спотворення  $\Delta P_D$  (графіки позначено цифрами відповідно 1–4), як функцій  $\alpha_2$  у разі, якщо статичні параметри нелінійного навантаження  $\alpha_0 = \beta_0 = 1$ ;  $\beta_2 = 0,4$ ;  $\alpha_4 = \beta_4 = 0,2$ . Залежності втрат як функцій  $\alpha_4$  мають подібний вигляд.

З графіків випливає, що збільшення несинусоїдності напруг призводить до збільшення втрат потужності за рахунок збільшення перетоку головним чином активної енергії. Характер залежностей  $Q$  і  $D_s$  (рис. 2а) дозволяє об'єднати ці потужності під час розрахунків втрат електричної енергії в лініях електропередач, що живлять споживачів з лінійним навантаженням. З графіків (рис. 2б) випливає, що реактивна потужність і потужність спотворення можуть істотно збільшувати значення втрат активної потужності в лініях електропередач, що живлять нелінійні навантаження, оскільки із збільшенням нелінійності вони взаємно не компенсуються.

### Висновки

Проаналізовано кількісні співвідношення для визначення втрат електричної енергії в лініях електропередач за умов несиметрії напруг та навантажень і несинусоїдності для лінійних та нелінійних навантажень. Несиметрія напруг призводить до різкого збільшення втрат потужності споживачів з великою часткою електричних машин в навантаженні. Під час розрахунків втрат електричної енергії в лініях електропередач, що живлять споживачів з лінійним навантаженням, реактивна потужність і потужність спотворення взаємно компенсуються. Однак вони не компенсуються і істотно збільшують значення втрат потужності в лініях електропередач, що живлять нелінійні навантаження.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. — К.: Наукова думка, 1985. — 268 с.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.
3. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 112 с.
4. Жуков В. В., Неклепаев Б. Н. Эквивалентное сопротивление обратной последовательности узлов комплексной нагрузки // Электричество. — 1975. — № 10. — С. 57—60.
5. Schreder H.I. Zur Definition der Scheinleistung in Drehstromnetzen // Zeitschrift für Instrumentenkunde. — 1965. — № 11. — S. 96—102.
6. Арриллага Дж., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом VIII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2005, 24—27.10.2005 р)

Надійшла до редакції 10.11.05  
Рекомендована до друку 22.11.05

**Бурбело Михайло Йосипович** — завідувач кафедри, **Бабенко Олексій Вікторович** — аспірант, **Мельничук Людмила Михайлівна** — асистент.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження, Вінницький національний технічний університет.

**Бурбело Сергій Михайлович** — начальник бюро відділу АСУ.

ДАЕК «Вінницяобленерго», м. Вінниця