

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 621.311:622.32

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-56-59

АНАЛІЗ ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ ПРИЙМАЧАМИ

Б. Л. Грабчук, Ю. Ф. Романюк

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019,
grabchuk.bogdan@gmail.com; romanjykyf@ukr.net*

Розглянуті питання аналізу несинусоїдних режимів системи електропостачання з нелінійними елементами та їх вплив на економічність електропередачі. Проведено числовий аналіз потоків енергії на прикладі трифазної системи електропостачання з джерелом синусоїдної ЕРС, лінійними активними електроприймачами та нелінійними елементами (діодами). Процес передачі енергії розглядається як поширення первинного потоку енергії від джерела, частину якого нелінійні приймачі перетворюють і повертають назад у мережу вторинним потоком енергії нульової та вищих гармонік, яка споживається резистивними елементами кола, спричиняючи додаткові втрати потужності, внаслідок чого знижується ККД передачі й коефіцієнт потужності та погіршується якість електроенергії. Запропоновано з метою підвищення якості електроенергії нормувати відносне значення реактивної потужності спотворення для нелінійних електроприймачів та зобов'язати виробників електротехнічної продукції комплектувати їх фільтрами вищих гармонік. З метою правильного вибору типу і потужності компенсуючих пристроїв та моніторингу параметрів режиму електричної мережі запропоновано розширити функціональні можливості електронних лічильників, розділивши реактивну потужність на дві складові - потужність зсуву і потужність спотворення, а для об'єктивного аналізу потоків енергії запропоновано стандартизувати реактивну потужність спотворення. Показано, що в системі з нелінійними споживачами збільшується струм у нейтральному проводі за рахунок накладання струмів гармонік нульової послідовності, що потрібно враховувати при виборі його перерізу та розрахунку втрат потужності.

Ключові слова: електрична мережа, система електропостачання, нелінійні електроприймачі, несинусоїдність напруги, вищі гармоніки, втрати потужності, нейтральний провід.

Рассмотрены вопросы анализа несинусоидальных режимов системы электроснабжения с нелинейными приемниками и их влияние на экономичность электропередачи. Проведен численный анализ потоков электрической энергии на примере трехфазной системы электроснабжения с источником синусоидальной ЭДС, линейными активными электроприемниками и нелинейными элементами (диодами). Процесс передачи энергии рассматривается как распространение первичного потока энергии от источника, часть которого нелинейные приемники преобразуют и возвращают назад в сеть вторичным потоком энергии нулевой и высших гармоник, которая потребляется резистивными элементами цепи образуя дополнительные потери мощности, вследствие чего снижается КПД передачи и коэффициент мощности, ухудшается качество электроэнергии. Предложено с целью повышения качества электроэнергии нормировать относительное значение реактивной мощности искажения для нелинейных приемников и обязать производителей электротехнической продукции комплектовать ее фильтрами высших гармоник. С целью правильного выбора типа и мощности компенсирующих устройств и мониторинга параметров режима электрической сети предложено расширить функциональные возможности электронных счетчиков электрической энергии, разделив реактивную мощность на две составляющие – мощность сдвига и мощность искажения, а для объективного анализа потоков энергии предложено стандартизировать реактивную мощность искажения. Показано, что в системе с нелинейными приемниками увеличивается ток в нейтральном проводе за счет наложения токов гармоник нулевой последовательности, что необходимо учитывать при выборе его сечения и расчете потерь мощности.

Ключевые слова: электрическая сеть, система электроснабжения, нелинейные электроприемники, несинусоидальность напряжения, высшие гармоники, потери мощности, нейтральный провод.

The problem of the non-sinusoidal modes analysis of the power supply system with non-linear elements and their influence on the efficiency of the power transmission are considered. It is carried out numerical analysis of electric energy flows for three phase power supply system with sinusoidal electromotive force source, linear active load and non-linear elements (diodes). Power transfer is considered as distribution of the primary power flow from source. The part of this flow is converted by non-linear elements and return into the network like secondary power stream of zero sequence and high harmonics which is consumed by resistance elements and causes additional power losses. As a result transporting efficiency and power factor are reduced and energy quality becomes worse. In order to improve the quality of electricity, it is proposed to normalize the relative value of the reactive power of distortion for non-linear electric collectors and to oblige manufacturers of electrical products to complete them with filters of higher harmonics. With the purpose of correct selection of the type and power of compensating devices and monitoring the parameters of the electric network mode, it is proposed to expand the functionality of electronic meters by dividing the reactive power into two components - shear power and distortion power, and for the objective analysis of energy flows, it is proposed to standardize the reactive power of distortion. It is shown that in such system current in neutral line increases due to overlaying of zero sequence harmonics currents. This should be taking into account during neutral line cross-section choice and power losses calculation.

Keywords: electric network, power supply system, non-linear load, non-sinusoidal voltage, high harmonics, power losses, neutral line.

Постановка і актуальність проблеми.

На підприємствах нафтогазової галузі та інших галузей використовують потужні нелінійні електроприймачі: вентильні перетворювачі, магнітні підсилювачі, зварювальні установки тощо. Зокрема, поширені напівпровідникові перетворювачі змінного струму в постійний, які використовують як джерела живлення термічних установок, а також установок електродугового та контактного зварювання. Промисловість випускає тиристорні перетворювальні агрегати для автоматизованих електроприводів постійного струму, тиристорні регулятори напруги промислової частоти, тиристорні перетворювачі частоти для частотного регулювання швидкості обертання електродвигунів змінного струму тощо. Широко використовуються також малопотужні нелінійні електроприймачі: комп'ютери, телевізори, мікрохвильові печі, освітлювальні газорозрядні прилади, які при їх великій кількості споживають значну потужність.

Потужні нелінійні навантаження у трифазних електричних мережах із синусоїдними джерелами живлення призводять до того, що періодичні криві струмів і напруг істотно відрізняються від синусоїди і їх можна представити у вигляді рядів Фур'є, які в загальному випадку містять постійну складову, першу (основну) гармоніку та вищі гармоніки,

причому частота k -ої гармоніки в k разів більша від частоти першої гармоніки. Трифазне симетричне нелінійне навантаження можна розглядати як систему трифазних симетричних джерел постійних складових та синусоїдних гармонік, причому 1, 4, 7,...- гармоніки утворюють симетричні системи прямої послідовності, 2, 5, 8, ... гармоніки - симетричні системи зворотної послідовності, а 3, 6, 9, ... гармоніки - симетричні системи нульової послідовності. Вищі гармоніки в електричних мережах погіршують якість електроенергії та призводять до зменшення коефіцієнта потужності, збільшення втрат електроенергії в електропостачальних системах, перегрівання асинхронних двигунів і їх вібрації, пошкодження конденсаторів, резонансних явищ на частотах вищих гармонік тощо. Рівень вищих гармонік напруги в мережі залежить від потужності нелінійних приймачів, схеми і параметрів елементів мережі та нормується стандартом якості електроенергії [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питанням аналізу несинусоїдних режимів присвячена велика кількість наукових робіт [2-6] та інші. У більшості з них аналіз виконано на підставі теоретичних і експериментальних досліджень з використанням рядів Фур'є. У роботі [3] на підставі аналізу великої кількості робіт, в яких розглядаються енергетичні процеси за несинусоїдних режимів,

запропоновано найбільш прийнятний алгоритм розрахунку повної, активної та реактивної потужностей в колах з нелінійними приймачами. У роботах [4,5] наведені результати експериментальних досліджень несинусоїдних режимів кіл з нелінійними елементами різного типу, які підтвердили необхідність окремого врахування реактивної потужності зсуву (зумовленої наявністю індуктивності), і реактивної потужності спотворення (зумовленої вищими гармоніками і постійною складовою), що узгоджується з теоретичними положеннями [3]. У роботі [6] розглянуто вплив несинусоїдності на роботу електропостачальних систем та їх споживачів і наведені можливі способи та засоби компенсації вищих гармонік.

Невирішені частини загальної проблеми.

У зв'язку зі збільшенням останнім часом кількості нелінійних навантажень, які спотворюють синусоїдну форму напруг і струмів в системах електропостачання і погіршують роботу електроприймачів, питання підвищення якості електроенергії, зокрема покращення показників несинусоїдності напруги, є актуальними.

Одним з ефективних технічних заходів щодо зниження втрат електроенергії в розподільчих електричних мережах підприємств нафтогазової галузі є компенсація реактивної потужності, що дозволяє значно зменшити втрати електроенергії та видатки на її оплату. Проте в колах з нелінійними приймачами вибір та регулювання реактивної потужності компенсуючих установок ускладнюється у зв'язку з наявністю вищих гармонік.

Поки що в технічній літературі недостатня увага приділена практичним розрахункам несинусоїдних режимів і аналізу енергетичних процесів. Тому актуальними є питання аналізу потоків енергії в колах з нелінійними елементами з метою зменшення втрат електроенергії та підвищення енергоефективності електропостачальних систем. Потребують уваги також питання обліку реактивної електроенергії та компенсації реактивної потужності за несинусоїдних режимів, а також питання вимірювання та стандартизації реактивної потужності зсуву і спотворення.

Мета та завдання досліджень.

Метою роботи є аналіз потоків енергії у трифазному симетричному колі з активним навантаженням, синусоїдною напругою джерела живлення і нелінійними елементами (ідеальними діодами).

Для вирішення поставленої проблеми сформульовано такі завдання досліджень:

- для заданих параметрів схеми розрахувати потужності приймачів і втрати потужності в лінії живлення за несинусоїдного режиму, зумовленого наявністю нелінійних елементів;
- проаналізувати потоки енергії та баланс потужностей в колі з нелінійними елементами;
- оцінити вплив несинусоїдного режиму на додаткові втрати потужності в елементах кола;
- проаналізувати вплив несинусоїдності напруги і струму на повну потужність навантаження і коефіцієнт потужності;
- розглянути можливі практичні заходи щодо вдосконалення систем обліку реактивної потужності з метою її компенсації.

Результати досліджень

1. Аналіз енергетичних потоків

Під час розгляду енергетичних процесів у колах з нелінійними навантаженнями можна прийняти, що нелінійні приймачі, споживаючи електричну енергію з мережі, частково перетворюють її та повертають назад у мережу. Енергія поступає в електричну мережу від джерела живлення у вигляді основного (первинного) потоку, що визначається симетричними системами напруг і струмів прямої послідовності основної частоти. Частина енергії перетворюється спотворюючими навантаженнями і повертається назад в мережу у вигляді потоку енергії трифазних систем нульової послідовності та вищих гармонік, утворюючи вторинний потік енергії.

Використовуючи такий підхід, проаналізуємо потоки енергії на прикладі простої симетричної системи електропостачання з трифазним джерелом синусоїдної ЕРС, двома симетричними лінійними активними приймачами та діодами (рис. 1), розрахунок якої зводиться до розрахунку відповідного

однофазного кола (рис. 2). Нехай фазна ЕРС $R_a = R_b = 20$ Ом, опори фаз лінії $R_l = 2$ Ом, $e = 220\sqrt{2}\sin\omega t$, В, опори фаз лінійних а діоди D – ідеальні приймачів

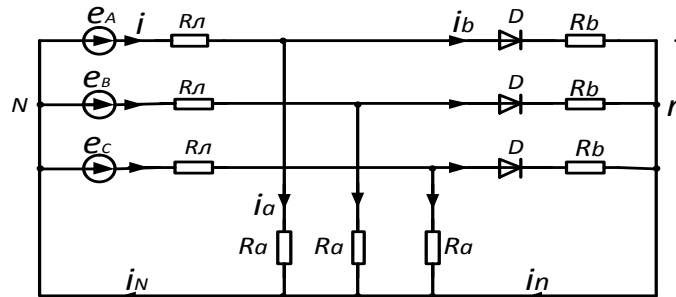


Рисунок 1 – Схема трифазного кола з діодами.

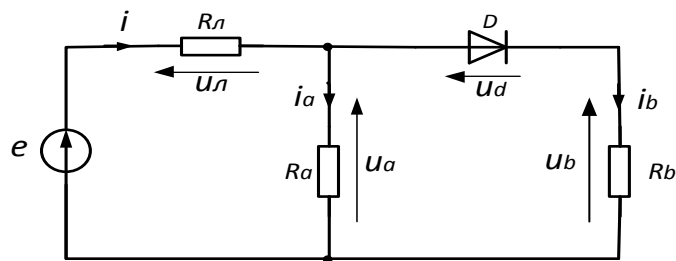


Рисунок 2 – Схема однофазного кола з ідеальним діодом.

Внаслідок наявності діода D у колі встановиться несинусоїдний режим. Ідеальний діод – це елемент, який миттєво (стрибокподібно) змінює опір від 0 до ∞ чи від ∞ до 0 в моменти переходу від однієї полярності напруги на діоді до іншої. Для коректного опису процесів у колі з діодом момент t стрибкоподібно змінює опору діода слід представляти як $(t)_-$ – момент безпосередньо до зміни опору і $(t)_+$ – момент безпосередньо після зміни опору діода.

В інтервалі часу $(0)_+ \leq t \leq (0,5T)_-$ за опору діода $R_d = 0$ маємо:

$$u_d = 0; u_a = u_b; I_m = 25,93 \text{ А};$$

$$I_{am} = I_{bm} = 0,5I_m = 12,97 \text{ А};$$

$$u_d = -\frac{U_{dm}}{\pi} + \frac{U_{dm}}{2} \sin \omega t + \frac{2U_{dm}}{3\pi} \cos 2\omega t + \frac{2U_{dm}}{15\pi} \cos 4\omega t + \frac{2U_{dm}}{35\pi} \cos 6\omega t = U_{d0} + u_{d1} + u_{d2} + u_{d4} + u_{d6} =$$

$$= -90,03 + 100\sqrt{2}\sin \omega t + 42,44\sqrt{2}\cos 2\omega t + 8,49\sqrt{2}\cos 4\omega t + 3,84\sqrt{2}\cos 6\omega t.$$

У результаті коло стає лінійним і для розрахунку струмів і напруг можна застосувати метод накладання. Почергово розрахуємо коло, вважаючи, що в ньому діють тільки джерела

$$U_{am} = U_{bm} = 259,3 \text{ В.}$$

$$U_{dm} = 51,86 \text{ В.}$$

В інтервалі часу $(0,5T)_+ \leq t \leq (T)_-$ за опору діода $R_d = \infty$:

$$i_b = 0; u_b = 0; u_d = u_a; i = i_a; I_m = I_{am} \text{ А};$$

$$U_{dm} = U_{am} = 282,8 \text{ В};$$

$$U_{im} = 28,28 \text{ А.}$$

Замінімо діод джерелом несинусоїдної напруги, яка дорівнює напрузі u_d на діоді, і розкладемо її в ряд Фур'є [2], враховуючи гармоніки до 6-ої включно:

однієї і тієї ж частоти. Часові залежності фазної ЕРС e , напруги u_d на діоді та її гармоніки наведені на рисунку 3.

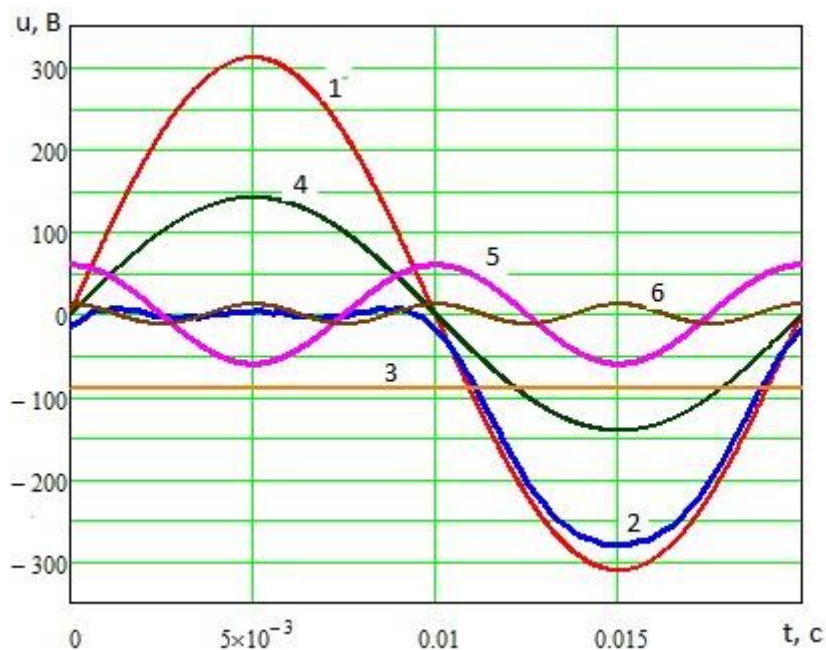


Рисунок 3 – Часові залежності ЕРС e (1), напруги на діоді u_d (2) та її гармонік u_{d0} (3), u_{d1} (4), u_{d2} (5), u_{d2} (6).

Розрахунок діючих значень перших гармонік струмів i_1, i_{a1}, i_{b1} , активних потужностей $P_{л1}, P_{a1}, P_{b1}$, які споживають приймачі на основній частоті, а також потужності P_{d1} частини основного потоку енергії, яку діод перетворює і повертає назад у коло генеруючи вторинний потік енергії у вигляді нульової та вищих гармонік, виконаємо

за схемою, наведеною на рисунку 4, а. Значення постійної складової струмів, діючі значення їх вищих гармонік I_k, I_{ak}, I_{bk} , потужностей P_{lk}, P_{ak}, P_{bk} , де k – порядок гармоніки ($k = 0, 2, 4, 6$), розрахуємо за схемою рисунка 4, б. Результати розрахунків зведені в таблицю 1.

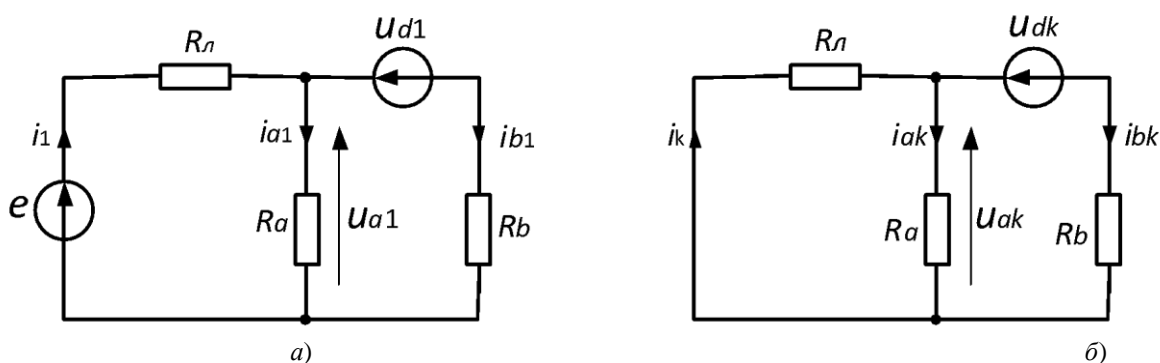


Рисунок 4 – Схеми для розрахунку перших гармонік (а) і нульової та вищих гармонік (б) струмів і напруг.

Таблиця 1– Розподіл струмів і потужностей потоків енергії у фазі трифазної системи.

k	I_k, A	$I_{ak},$	I_{bk}, A	$P_{ak}, Вт$	$P_{bk}, Вт$	$P_{lk}, Вт$	$\sum P_{npk}, Вт$	$P_d, Вт$
Струми і потужності первинного (основного) потоку енергії								
1	14,167	9,5833	4,5833	1836,81	420,14	401,39	2658,33	-458,3
Струми і потужності вторинного потоку енергії								
0	3,751	0,3751	4,1264	2,814	340,55	28,14	371,51	-371,5
2	1,7684	0,1768	1,9452	0,625	75,678	6,254	82,56	-82,56
4	0,3537	0,0354	0,389	0,025	3,027	0,25	3,302	-3,302
6	0,1516	0,0152	0,1667	0,0046	0,556	0,046	0,606	-0,606
Σ				3,47	420	34,69	458	-458

2. Потужності потоків енергії і баланс активних потужностей.

Як впливає з проведених розрахунків, потужність основного потоку електричної енергії, яка поступає в коло від джерела ЕРС із системою напруг і струмів основної частоти

$$P_e = EI_1 = 220 \cdot 14,167 = 3116,3 \text{ Вт.}$$

Потужність частини основного потоку енергії, яка споживається приймачами і втрачається в лінії на частоті першої гармоніки,

$$P_{np1} = P_{a1} + P_{b1} + P_{l1} = I_{a1}^2 R_a + I_{b1}^2 R_b + I_{c1}^2 R_c = 2658,3$$

Вт

$$P_{npg} = P_{np0} + P_{np2} + P_{np4} + P_{np6} = 371,5 + 82,56 + 3,3 + 0,61 = 458 \text{ Вт.}$$

Для лінійних приймачів потужності вторинних потоків енергії додатні, оскільки вони споживають енергію гармонік. Сумарна потужність приймачів кола складається з потужностей первинного і вторинного потоків енергії і дорівнює потужності основного потоку енергії:

$$P_{np} = P_{np1} + P_{npg} = P_e = 2658,3 + 458 = 3116,3$$

Вт.

3. Струми у вітках кола і напруги приймачів

Діючі значення струмів у вітках кола, обчислені через діючі значення струмів гармонік за формулою

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_4^2 + I_6^2}.$$

Потужність іншої частини основного потоку енергії, яку перетворює діод і повертає назад у коло у вигляді вторинного потоку енергії, що складається з потоків енергії нульової та вищих гармонік,

$$P_{d1} = -U_{d1} I_{b1} = -458,3 \text{ Вт.}$$

Потужності вторинного потоку енергії діода і його складові від'ємні, оскільки він переходить в режим генератора гармонік. Потужність енергії вторинного потоку, яку споживають приймачі,

практично збігаються зі значеннями, обчисленими безпосередньо за виразом

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

і відповідно дорівнюють $I = 14,766 \text{ А}$, $I_a = 5,593 \text{ А}$, $I_b = 4,482 \text{ А}$.

У чотирипровідному трифазному несиметричному лінійному колі в нейтральному проводі протікає струм, значення якого практично не перевищує фазний струм. За наявності нелінійного приймача через нейтральний провід (див. рис. 1) протікають додаткові струми гармонік, що утворюють симетричні системи нульової послідовності. Діючі значення цих струмів у нашому випадку (див. рис. 2) дорівнюють:

$$I_n = 3\sqrt{I_{b0}^2 + I_{b6}^2} = 12,39 \text{ А};$$

$$I_N = \sqrt{I_0^2 + I_6^2} = 11,262 \text{ А}.$$

Відношення цих струмів до відповідних лінійних струмів дорівнюють: $I_n / I_b = 1,91$; $I_N / I = 0,763$. Струми, зумовлені несинусоїдністю, накладається на струм, спричинений несиметрією (за її наявності). У результаті в нейтральному проводі протікає струм, який може перевищувати, інколи значно, відповідні лінійні струми, що необхідно враховувати виборі перерізу нейтрального проводу та визначенні сумарних втрат потужності в мережі.

Обчислимо коефіцієнт спотворення K_U синусоїдності напруги U_a на виводах приймачів, розрахувавши діюче значення її гармонік $U_{ag} = 8,33 \text{ В}$, відмінних від першої, та діюче значення напруги основної частоти $U_{a1} = 191,67 \text{ В}$. Згідно з [1] одержимо $K_U = (U_{ag} / U_{a1}) \cdot 100 = 4,34 \%$, що в даному випадку не перевищує нормально допустиме значення 8%.

У роботі [3] показано, що в колі з джерелом синусоїдної ЕРС, резистором і послідовно з'єднаним ключем, який у кожному півперіоді зміни ЕРС вмикає резистор і залишається замкненим до кінця півперіоду, не тільки генеруються гармоніки, але й виникає зсув фаз між ЕРС та основною гармонікою струму та напруги на резисторі. Наші результати показують, що в колі з джерелом синусоїдної ЕРС, діодом і резистивними приймачами діод генерує нульову та вищі гармоніки, але це не супроводжується зсувом фаз між ЕРС і основними гармоніками струмів. Перші гармоніки всіх струмів і напруг за фазою збігаються з ЕРС. Проте має місце зсув фаз між ЕРС і еквівалентними синусоїдами напруг та струмів.

4. Вплив несинусоїдності напруг і струмів на баланс потужностей та коефіцієнт потужності навантаження

Активна та повна потужності джерела живлення

$$P_e = EI_1 = 3116 \text{ Вт};$$

$$S_e = EI = 3248 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

За несинусоїдного режиму відношення активної до повної потужності називають еквівалентним коефіцієнтом потужності [2], який у нашому випадку дорівнює

$$\cos \nu = \frac{P_e}{S_e} = 0,959,$$

де ν – можна розглядати як кут зсуву фаз між еквівалентними синусоїдами напруги і струму, якими можна наближено замінити несинусоїдні напруги і струми. Діючі значення еквівалентних синусоїд приймають рівними діючим значенням несинусоїдних кривих (або їх перших гармонік), а кут ν визначають з наведеного вище виразу. Отже, поява гармонік, відмінних від основної, призводить до зниження коефіцієнта потужності порівняно з лінійним колом.

Взагалі теорію потужності в колах несинусоїдного струму остаточно не сформовано, хоч вона розглядається в чисельних публікаціях, огляд і аналіз яких проведено в [3].

Повну потужність джерела електроенергії можна представити у вигляді [2,3]:

$$S_e = \sqrt{P_e^2 + Q_e^2 + T_e^2},$$

де $Q_e = EI_1 \sin \varphi_1$ – реактивна потужність;

$$T_e = E \sqrt{\sum_{\substack{k=0 \\ k \neq 1}}^{\infty} I_k^2} - \text{потужність спотворення}.$$

Оскільки в даному колі всі приймачі чисто резистивні (відсутні індуктивні та ємнісні елементи), то обмін енергією між джерелом і приймачами не відбувається, струми всіх гармонік збігаються за фазою з напругами і реактивна потужність $Q_e = 0$.

Потужність спотворення для заданої схеми

$$T_e = E \sqrt{I_0^2 + I_2^2 + I_4^2 + I_6^2} = 916 \text{ Вт},$$

а повна потужність джерела

$$S_e = \sqrt{P_e^2 + T_e^2} = 3248 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Потужність спотворення не має фізичного змісту. Вона характеризує вплив спотворення кривої струму відносно синусоїдної кривої ЕРС

на потоки електричної енергії. Потужність спотворення дорівнює нулеві лише у випадку, коли криві струму $i(t)$ і ЕРС $e(t)$ однакові за формою, що має місце в колі з чисто резистивними лінійними елементами. Відношення потужності спотворення до повної потужності можна було б використовувати для оцінки якості електроенергії.

Реактивна потужність Q_e і потужність спотворення T_e , хоч мають різну природу, однаково впливають на повну потужність і коефіцієнт потужності, що може служити підставою для розгляду потужності спотворення як складової сумарної реактивної потужності [3]

$$D_e = \sqrt{Q_e^2 + T_e^2} = \sqrt{S_e^2 - P_e^2},$$

називаючи Q_e – реактивною потужністю зсуву, а T_e – реактивною потужністю спотворення.

На користь такого визначення реактивної потужності слугує і той факт, що в основу алгоритму обчислення реактивної потужності електронними лічильниками покладено [4] співвідношення

$$D_e = \sqrt{S_e^2 - P_e^2} = \sqrt{(EI)^2 - P_e^2}.$$

Звідси видно, що навіть при чисто активному навантаженні, але несинусоїдному струмі, електронні лічильники електроенергії фіксуватимуть споживання реактивної потужності. Проте спроба в цьому випадку компенсувати реактивну потужність увімкненням батареї конденсаторів призведе до збільшення повної потужності навантаження внаслідок збільшення реактивної потужності спотворення. Компенсувати реактивну потужність спотворення можна, обладнавши нелінійні електроприймачі фільтрами вищих гармонік, що повинен здійснювати їх виробник. Для цього необхідно нормувати допустиме відносне значення реактивної потужності спотворення $T_\partial = T/S$ для виробників електротехнічної продукції.

5. Вплив несинусоїдності напруг і струмів на економічність роботи систем електропостачання

За відсутності діода в колі (див. рис. 2) струм джерела живлення $I_L = 18,33$ А, повна потужність $S_{e,l} = P_{e,l} = 4033$ Вт, а потужність приймачів $P_{a,l} = P_{b,l} = 1680$ Вт. Порівняння енергетичних процесів у колі з діодом з процесами у цьому ж колі за відсутності діода показує, що увімкнення діода призводить до зменшення активної потужності первинного потоку енергії на 22,7 % і повної потужності джерела на 19,5 %. При цьому активна потужність P_b зменшується удвічі до 840 Вт, а потужність P_a зростає на 9,5 % і становить 1840 Вт (див. табл. 1).

Втрати потужності в лінії за відсутності діода $P_{л,л} = 672$ Вт, при цьому коефіцієнт корисної дії (ККД) передачі енергії становить $\eta_l = (P_{e,l} - P_{л,л}) / P_{e,l} \cdot 100 = 83,32$ %. Разом з тим, якщо енергію вторинного потоку розглядати як додаткові втрати від струмів вищих гармонік і постійної складової, то сумарні втрати в колі з діодом становитимуть $P_{втр} = P_{л1} + P_d = 404 + 458 = 862$ Вт, тобто збільшаться на 27,8 %, а ККД знизиться на 13 % і становитиме $\eta = (P_{a1} + P_{b1}) / P_e \cdot 100 = 72,4$ %. Отже, поява в електричних мережах значних потоків енергії гармонік, відмінних від основної, суттєво знижує економічність систем електропостачання, що робить необхідним використання заходів для їх зменшення.

Розвиток мікропроцесорної техніки дозволяє розширити функціональні можливості електронних приладів обліку електроенергії та контролю параметрів електричної мережі. З метою правильного вибору потужності компенсувальних пристроїв і моніторингу параметрів системи електропостачання багатофункціональні лічильники електроенергії повинні вимірювати, крім активної, реактивної та повної електроенергії та потужності, також складові реактивної потужності зсуву і спотворення та середні значення коефіцієнта потужності по першій гармоніці.

Висновки

1. У трифазній електромережі з нелінійними елементами (діодами) від джерела живлення з синусоїдною ЕРС поступає основний потік електричної енергії з напругами і струмами першої гармоніки, частина якої втрачається в лініях і споживається резистивними приймачами. Іншу частину енергії діоди перетворюють і повертають назад у мережу вторинним потоком у вигляді нульової та вищих гармонік, яка також споживається приймачами.

2. Енергія вищих гармонік у більшості випадків практично не використовується (за винятком пристроїв для перетворення електричної енергії в тепло), збільшує сумарні втрати в мережі і знижує ККД системи електропостачання.

3. Вищі гармоніки генерують реактивну потужність спотворення, що призводить до збільшення сумарної реактивної потужності та зниження коефіцієнта потужності.

4. Реактивна потужність спотворення не компенсується увімкненням конденсаторних батарей. Для зменшення реактивної потужності спотворення виробникам потрібно комплектувати нелінійні приймачі електричними фільтрами відповідних гармонік, які зменшать їх поширення в мережу.

5. У чотирипровідних мережах з нелінійними приймачами через нейтральний провід протікає додатковий струм, зумовлений гармоніками, кратними трьом, який накладається на струм, зумовлений несиметрією приймачів. У результаті струм у нейтральному проводі може перевищувати, інколи значно, струми в лінійних проводах, що потрібно враховувати під час вибору перерізу нейтрального проводу та розрахунку втрат потужності.

Література

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Київ : Госстандарт Украины, 1997.

2. Перхач В. С. Теоретична електротехніка: лінійні кола. Київ, 1992. 439 с.

3. Сегеда М. С. Электричні мережі та системи: підручник. Львів, 2007. 488 с.

4. Соломчак О. В., Гладь І. В. Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдним (нелінійним) навантаженням. *Енергетика і електрифікація*. 2008. № 6. С. 27-32.

5. Соломчак О. В., Гладь І. В. Реактивна потужність та електромагнітна сумісність світильників з газорозрядними лампами. *Промелектро*. 2011. № 4-5. С. 40-43.

6. Власюк Н. Искажения в электросети с нелинейной нагрузкой – новая проблема энергетиков. *Электрик*. 2012. № 7-8. С. 46-49. № 9. С. 62-65.

References

1. GOST 13109-97. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Kiev : Gosstandart Ukrainyi, 1978.

2. Perkhach V. S. Teoretychna elektrotehnika: liniini kola. Kiev, 1992. 439 s.

3. Seheda M. S. Elektrychni merezhi ta systemy: pidruchnyk. Lviv, 2007. 488 s.

4. Solomchak O. V. Hlad I. V. Problemy rozrakhunku ta kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti v merezhakh z nesynusoidnym (neliniinym) navantazhenniam. *Enerhetyka i elektryfikatsiia*. 2008. №6. S. 27-32.

5. Solomchak O. V., Hlad I. V. Reaktyvna potuzhnist ta elektromahnitna sumisnist svitylnykiv z hazorozriadnymy lampamy. *Promelektro*. 2011. № 4-5. S. 40-43.

6. Vlasyuk N. Iskazheniya v elektroseti s nelineynoy nagruzkoy – novaya problema energetikov. *Elektrik*. 2012. №7-8. – S. 46-49. №9. S. 62-65.