ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 621.3.016.45

ОБЛІК ЕНЕРГІЇ З УРАХУВАННЯМ ВИЩИХ ГАРМОНІК

Ковальов В.М., Білоха Д.О.

В умовах постійного зростання цін на енергоресурси великого значення набувають питання адекватного, точного і достовірного обліку електроенергії. Для здійснення взаєморозрахунків між споживачем та енергопостачальником підприємства зазвичай використовують індукційні або електронні лічильники активної і реактивної енергії.

Застосування цих приладів дозволяє проводити комерційні розрахунки при синусоїдальній напрузі і струмі в точці реалізації електроенергії. Проте, як зазначено в [1] використання лічильників при несинусоїдальному режимі призводить до неадекватності їх показів, а отже і сумнівної можливості їх використання для комерційних розрахунків.

Неадекватність показів реактивної потужності електронних лічильників обумовлена не лише апаратними похибками реалізації алгоритму, побудованого на формулі

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}\ , \qquad (1)$$

а і неоднозначністю фізичного змісту отриманого з (1) значення Q в несинусоїдальному режимі, щодо чого існує велика кількість робіт вітчизняних та іноземних авторів (наприклад [2]).

Стосовно активної потужності автори дослідження [1] зазначають: “… покази лічильників визначаються алгебраїчною сумою активної потужності першої гармоніки і всіх активних потужностей вищих гармонік з урахуванням їх знаку. Виходячи з отриманих результатів, можна зробити наступний висновок: за неякісну електричну енергію, що споживається з мережі, споживач, який не вносить викривлень, платить більше, а споживач, який сам вносить викривлення, – платить менше, ніж за споживану електроенергію без викривлень. Ця різниця … може бути досить суттєвою” (переклад з російської).

Відсутність теорії, придатної для комерційного обліку електричної енергії в мережах з відхиленням форми кривих струму та напруги від синусоїдальної в умовах зростання долі нелінійних навантажень (дугові сталеплавильні печі, зварювальні агрегати, потужні тиристорні випрямлячі, статичні перетворювачі напруги і частоти для живлення регульованих електроприводів постійного і змінного струму і т.д.) викликала розробку різними авторами альтернативних методик обліку реактивної енергії [3-4].

Слід зазначити, що ці методики не дають змоги визначити винуватця відхилення форми кривої напруги від синусоїдальної. Тобто, і у випадку коли несинусоїдальність напруги обумовлена нелінійністю електроприймача, і у випадку коли несинусоїдальність присутня з вини енергосистеми, за додаткові складові потужності, поява яких викликана несинусоїдальністю напруги, платитимуть усі споживачі, а не лише винуватець.

Існують роботи присвячені питанню визначення винуватця зниження якості електроенергії [5-7]. Методики, викладені в цих роботах, пропонують оцінювати ступінь внеску споживача в погіршення якості електроенергії “коефіцієнтом дольового внеску в погіршення якості електроенергії”. Розрахунок цього коефіцієнта базується на понятті вторинної потужності, яка є частиною споживаної нелінійним електроприймачем потужності, що перетворюється в потужність вищих гармонік і спотворює напругу мережі. Ця потужність споживається іншими споживачами і елементами електромережі. Судити про споживання чи генерацію вторинної потужності електроприймачем дозволяє її знак (або кут між відповідними векторами струму та напруги). Розрахований коефіцієнт внеску споживача в

погіршення якості електроенергії має використовуватися для встановлення знижок чи надбавок до тарифу.

Спільним недоліком методик, що викладені в [5-7] є відсутність врахування залежності негативного впливу вищих гармонік від їх частоти. Крім того, у розрахунках [7] використовується значення опору системи, яке може змінюватися або бути невідомим.

Метою статті є висвітлення нової методики обліку електроенергії в несинусоїдальних режимах, яка дозволяє не лише адекватно оцінити активну і реактивну енергію споживану електроприймачем, а і визначити ступінь внеску споживача та енергосистеми в погіршення синусоїдальності напруги в точці реалізації електроенергії. Запропонована методика, як і вже відомі, ґрунтується на понятті вторинних потужностей. При цьому її характерними відмінностями є:

– відмова від визначення знижок і надбавок до тарифу, а використання для комерційних розрахунків за неякісну електроенергію значень вторинних енергій;

– визначення вторинних потужностей для кожної гармоніки окремо, що дозволяє встановити окремі тарифи для кожної гармоніки, залежно від її негативного впливу на електрообладнання споживача та енергосистеми, підвищити точність обліку і внести ясність в ситуаціях, коли споживач генерує в мережу гармоніку однієї частоти і одночасно споживає потужність гармоніки іншої частоти;

– використання при розрахунках лише миттєвих значень струму та напруги без використання значень опорів мережі, опорів навантаження і т.ін.

Основою методу є визначення вторинних потужностей вищих гармонік навантаження. З цією метою над струмом і напругою споживача приладом обліку проводиться перетворення Фур‘є, в результаті якого для струму та напруги отримуємо матриці – вектори максимальних значень складових гармонік U_V та I_V виду

$$X = \begin{bmatrix} X_{1S} + jX_{1C} \\ X_{2S} + jX_{2C} \\ X_{3S} + jX_{3C} \\ .... \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

де X_{1C} та X_{1S} – амплітуди косинусної і синусної складових першої гармоніки відповідно (наявність постійної складової тут і далі не враховується).

З курсу ТОЕ відомо, що якщо максимальні значення струму та напруги однієї частоти представлені у вигляді

$$\dot{U}_m = U_S + jU_C; \qquad \dot{I}_m = I_S + jI_C,$$

то активна і реактивна потужність даної гармоніки виражаються формулою

$$\begin{aligned} P + jQ = \dot{U}\tilde{I} &= \left(\frac{U_S}{\sqrt{2}} + j\frac{U_C}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{I_S}{\sqrt{2}} - j\frac{I_C}{\sqrt{2}}\right) = \\ &= \frac{U_C I_C + U_S I_S}{2} + j\frac{U_C I_S - U_S I_C}{2}. \end{aligned} \qquad (3)$$

Тобто

$$P_i = \frac{U_{iC} I_{iC} + U_{iS} I_{iS}}{2}, \qquad (4)$$

$$Q_i = \frac{U_{iC} I_{iS} - U_{iS} I_{iC}}{2}, \qquad (5)$$

де P_i та Q_i – активна і реактивна потужності і-тої гармоніки;

U_{iS} та U_{iC} – дійсна і уявна (синусна і косинусна) частина максимального значення напруги і-тої гармоніки відповідно;

I_{iS} та I_{iC} – дійсна і уявна частина максимального значення струму і-тої гармоніки відповідно.

 ISBN 7-776-8361-7

Формули (4) і (5) є основою для визначення вторинних потужностей навантаження, які з врахуванням (2) в матричній формі запису набувають виду

$$P_V = \frac{1}{2}\left(\mathrm{Re}U_V .* \mathrm{Re}\, I_V + \mathrm{Im}U_V .* \mathrm{Im}\, I_V\right), \quad (6)$$

$$Q_V = \frac{1}{2}\left(\mathrm{Im}U_V .* \mathrm{Re}\, I_V - \mathrm{Re}U_V .* \mathrm{Im}\, I_V\right), \quad (7)$$

де P_V та Q_V – шукані вектори значень вторинних активних та реактивних потужностей навантаження відповідно;

U_V та I_V – отримані в результаті перетворення Фур‘є вектори напруги і струму виду (2);

Re та Im – оператори, що служать для виділення дійсної і уявної частини комплексного числа;

“.*” – оператор поелементного множення матриць (результатом дії цього оператора є матриця, кожен елемент якої дорівнює добутку відповідних елементів матриць, що стоять ліворуч і праворуч від оператора).

Після проведення описаних вище дій (перетворення Фур‘є над миттєвими значеннями струму та напруги, виконання дій (4)-(5) або (6)-(7), що те саме) отримуємо вектор значень активної потужності навантаження та вектор значень реактивної потужності навантаження, що мають вигляд

$$P_V = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots. \end{bmatrix}, Q_V = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ \dots. \end{bmatrix} \quad (8)$$

За знаком кожного елемента вектора активної потужності P_V, можна визначити генерує (якщо “-“) чи споживає (якщо “+”) активну потужність цієї частоти електроприймач.

Знаки елементів вектора реактивної потужності Q_V, дозволяють визначити характер процесів обміну енергією на даній частоті: індуктивний (якщо “+“) чи ємнісний (якщо “-”).

Ідеальним споживачем прийнято вважати електроприймач, схема заміщення якого являє собою активний опір. У такого споживача всі елементи вектора Q_V завжди дорівнюватимуть нулю, так як при будь-якій формі прикладеної напруги гармоніки струму через активний опір співпадають по фазі з відповідними гармоніками напруги. Значення елементів вектора P_V цього споживача при синусоїдальній напрузі будуть дорівнювати нулю крім P_1, який дорівнюватиме потужності, що споживається навантаженням по першій гармоніці. При несинусоїдальній напрузі мережі деякі елементи вектора активної потужності крім першого матимуть додатні значення, рівні потужностям, що споживаються навантаженням на відповідних частотах.

Тобто модулі і знаки елементів векторів потужності навантаження (8) дозволяють визначити на даний момент величину внеску вищих гармонік споживача або енергосистеми в погіршення якості електроенергії в точці її реалізації для кожної гармоніки окремо. Величина цього внеску за розрахунковий період може бути отримана шляхом інтегрування значень векторів (8), причому додатні значення слід інтегрувати окремо від від‘ємних.

Здійснивши інтегрування отримаємо чотири вектори. Назвемо їх W_+, W_-, V_+, V_-. Вектор W_+ складається з проінтегрованих додатних значень вектора P_V і має вигляд

$$W_+ = \begin{bmatrix} W_{+1} \\ W_{+2} \\ W_{+3} \\ \dots \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Кожний його елемент, дорівнює енергії, що була спожита електроприймачем з мережі за розрахунковий період. За енергію, споживану на основній частоті (W_{+1}) підприємство має платити енергопостачальнику, а за всі інші складові вектора W_+ енергопостачаююча організація має платити споживачеві компенсацію. Тобто, розмір плати підприємства за спожиту електроенергію (вектор W_+) можна визначити за формулою

$$\Pi_{W+} = k_1 W_{+1} - k_2 W_{+2} - k_3 W_{+3} - \ldots, \qquad (10)$$

де k_1 – вартість однієї кіловат-години спожитої електроенергії для підприємства, грн/кВт·год;

k_2 та k_3 – вартість компенсації, яку має сплатити енергосистема підприємству за збитки, обумовлені споживанням ним однієї кіловат-години електроенергії на частоті другої та третьої гармонік відповідно, грн/кВт·год.

Аналогічно обчислюється частина оплати, обумовлена вектором генерованої активної потужності W_- , з тією різницею, що за генеровану на основній частоті активну енергію енергосистема має платити підприємству (звичайно, якщо це передбачено угодою), а за всі інші складові W_- підприємство має компенсувати системі збитки від погіршення якості електроенергії, що обумовлене його діяльністю.

Розрахунок плати за реактивну енергію (вектори V_+, V_-) проводиться за тією ж методикою, що і за активну енергію, з тією різницею, що зазвичай енергосистема не потребує генерації чи споживання реактивної потужності на вищих гармоніках, тому за всі елементи цих векторів з індексами більше одиниці, ймовірно, платитиме споживач.

Величини коефіцієнтів для споживаної і генерованої активної та реактивної енергій кожної гармоніки (k_2 ,k_3 і т.д.) мають визначатися виходячи з величини її негативного впливу на енергосистему і підприємства-споживача. Визначення цих коефіцієнтів є окремою науковою задачею.

Приклад. Практичне використання пропонованої методики проілюструємо на прикладі оцінки вторинних потужностей підключеного до системи енергопостачання тиристорного регулятора, навантаження якого носить індуктивно-активний характер. Схема заміщення мережі зображена на рисунку 1.

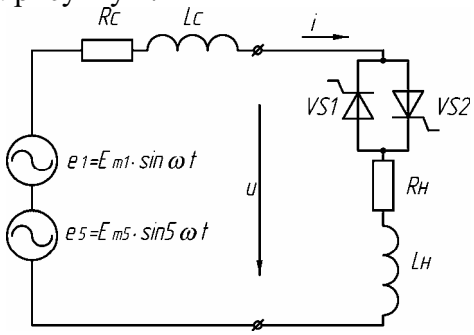

Рисунок 1 – Схема мережі

Для даної мережі був проведений розрахунок миттєвих значень струму та напруги при куті відкривання тиристорів 2,2 радіан*. Розрахунки проводились для двох випадків:

1. ЕРС системи є синусоїдальною (E_{m5}=0) – в такому випадку винуватцем погіршення якості електроенергії є споживач.

2. ЕРС системи є несинусоїдальною, присутня п‘ята гармоніка (E_{m5}=0,1E_{m1}) – в цьому випадку винними в погіршенні якості електроенергії є і система і споживач.

З отриманими миттєвими значеннями струму та напруги були проведені розрахунки, за описаною вище методикою, обчислені значення елементів векторів потужності P_V та Q_V для обох випадків наведені у таблиці 1 (всі значення вказані відносно активної потужності першої гармоніки при синусоїдальній ЕРС системи).

З таблиці видно, що при синусоїдальній ЕРС мережі винуватцем погіршення якості електроенергії є лише споживач, причому найбільша вторинна потужність генерується

* програма для розрахунку миттєвих значень струму та напруги була надана проф. Ягупом В.Г.

 ISBN 7-776-8361-7

ним на третій гармоніці, також має місце генерація реактивної потужності на сьомій гармоніці. При несинусоїдальній ЕРС мережі споживач одночасно сприяє погіршенню якості електроенергії по третій і сьомій гармоніках та сам потерпає від наявності в ЕРС мережі п‘ятої гармоніки.

Таблиця 1

Результати розрахунків

Номер гармоніки	ЕРС системи синусоїдальна		ЕРС системи несинусоїдальна	
	P_{Vi}, в.о.	Q_{Vi}, в.о.	P_{Vi}, в.о.	Q_{Vi}, в.о.
1	1	31,32	0,99181	30,933
2	0	0	0	0
3	-0,08015	-0,86538	-0,08914	-0,95604
4	0	0	0	0
5	0	0	0,01827	0,13532
6	0	0	0	0
7	0	-0,0505	0	-0,02745

Висновок. Таким чином, основна відмінність запропонованої методики полягає у визначенні активної і реактивної потужностей споживача у формі векторів, аналіз елементів яких за їх величиною і знаком дозволяє визначити споживану чи генеровану на кожній частоті електроенергію, знайти винуватця погіршення якості електроенергії і, отже, вирішити конфліктну ситуацію між споживачем та енергопостачальником при несинусоїдальному режимі.

Accounting electrical energy in non-sinusoidal mode methods are treated. New method is presented. The method allows evaluate contribution of the customer and energy system into power quality reduction. Paper can be useful to a wide circle of the scientists and engineers which elucidate energy saving and power quality issues.

1. Киселев В.В., Пономаренко И.С. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроэнергии // Промышленная энергетика. – 2004,№2.

2. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Реактивная мощность в системах электроснабжения. – Киев, УМК ВО, 1989.

3. Агунов М.В., Агунов А.В., Вербова Н.М. Новый подход к измерению электрической мощности // Промышленная энергетика. – 2004, №2.

4. Кизилов В.У., Светелик А.Д., Иванов В.В., Гваришвили А.И. К вопросу об алгоритме функционирования реактивного счетчика // Промышленная энергетика. – 1995, №12.

5. Зыкин Ф.А. Оценка степени участия искажающих нагрузок в снижении качества энергии // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1987, №10.

6. Зыкин Ф.А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии // Электричество. – 1992, №11.

7. Майер В.Я., Борисенко А.М., Пономаренко В.П. Методика определения источников высших гармоник и величин, вносимых ими в ухудшение синусоидальности напряжений на границе раздела балансовой принадлежности электрических сетей // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1989, №7.