

А.П. Сінолиций, В.А. Кольсун, В.С. Козлов

ЗАХОДИ МОДЕРНІЗАЦІЇ P-Q ТЕОРІЇ МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ РОБОТИ В УМОВАХ НЕСИНУСОЇДНОЇ НЕСИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ НАПРУГ

В роботі проаналізовано два методи модернізації математичного апарату p-q теорії миттєвої потужності для пристроїв активної фільтрації струму мережі. Обидва методи модернізації мають однакову сутність при різних способах практичної реалізації. Розглянуті концепції модернізації p-q теорії дозволяють виправити недолік некоректного визначення струму компенсації при несиметричній та несинусоїдній системі напруг живлення.

В работе проанализированы два метода модернизации математического аппарата p-q теории мгновенной мощности для устройств активной фильтрации тока сети. Оба метода модернизации имеют одинаковую сущность при разных способах их технической реализации. Рассмотренные концепции модернизации позволяют исправить недостаток p-q теории, возникающий в условиях несимметричной и несинусоидальной системы питающего напряжения.

ПРОБЛЕМА ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З НАУКОВИМИ ТА ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Інтелектуальну частину приладів активної корекції енергетичного потоку можна розділити на наступні основні складові: визначення струму корекції та його формування (керування силовими ключами). Стосовно визначення струму корекції, доволі розповсюдженою є p-q теорія миттєвої потужності, запропонована в [1], та її похідні. Ця теорія має ряд недоліків, на які вказують роботи [3-5]. Сутність критики вищезазначеної теорії можна звести до фактів некоректного визначення складових потужності мережі при несиметрії та несинусоїдності напруги живлення. В такому разі активний фільтр генерує у мережу неправильний струм корекції. Симетрування фазних струмів у такому випадку є неможливим.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Для вирішення зазначеної проблеми більшість науковців пропонують власні математичні апарати визначення складових потужності [3], які у свою чергу теж не позбавлені недоліків. Вдале технічне рішення щодо застосування p-q теорії для пристроїв компенсації, які працюють в умовах "неідеальної" напруги живлення, запропоновано в [6]. Аналогічна до вищезазначеного методу корекція математичного апарату для роботи в умовах несиметрії напруг згадується в [9].

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Проаналізувати ідею модернізації p-q теорії для виявлення струму корекції в умовах несинусоїдної несиметричної напруги живлення, представлено в [6] та [9]. На основі попереднього аналізу модернізувати існуючу p-q теорію миттєвої потужності для задач керування активним фільтром гармонік струму в умовах несинусоїдної несиметричної напруги живлення.

ВИКЛАДЕННЯ МАТЕРІАЛУ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

P-q теорія визначає сукупність миттєвих потужностей трипровідних та чотирипровідних з нульовим проводом мереж у часовому просторі. Основою p-q теорії є так зване перетворення Кларка, яке дозволяє перейти від системи координат А-В-С до ортогональної нерухомої системи координат α - β . Після переходу до нової системи координат розраховуються складові миттєвої потужності. Нижче представлені перетворення Кларка для трифазної чотирипровідної системи напруг та струмів.

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де u_0, u_α, u_β – миттєві значення напруги нульового провідника, проєкцій узагальненого вектору напруги на вісі α та β відповідно; u_A, u_B, u_C – миттєві значення напруг фаз А, В, С відповідно; $[C]$ – матриця прямого перетворення системи координат А-В-С до системи координат α - β ;

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де i_0, i_α, i_β – миттєві значення струмів нульового проводу, проєкцій узагальненого вектору струму на вісі α та β відповідно; i_A, i_B, i_C – миттєві значення струмів фаз А, В, С відповідно.

У випадку трифазної трипровідної мережі струм i_0 відсутній.

Миттєву активну та реактивну потужності системи визначають, як [1]:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & 0 \\ 0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де p_0 – миттєва потужність нульової послідовності; p – миттєва активна потужність; q – миттєва реактивна потужність.

Миттєва активна та реактивна потужності розкладаються на постійну та осцилюючу складові [2]:

$$p = P + \tilde{p}, \quad (5)$$

де P – постійна складова миттєвої активної потужності; \tilde{p} – осцилююча складова миттєвої активної потужності.

$$q = Q + \tilde{q}, \quad (6)$$

де Q – постійна складова миттєвої реактивної потужності; \tilde{q} – осцилююча складова миттєвої реактивної потужності.

Значення P та Q є інтегральними значеннями миттєвих активної та реактивної потужностей.

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot dt, \quad (7)$$

де T – період напруги живлення;

$$Q = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T q \cdot dt. \quad (8)$$

Осцилюючі значення знаходять з виразів (5) та (6), маючи інтегральні значення P та Q , знайдені у виразах (7) та (8). Необхідно зауважити, що в дискретних цифрових системах значення інтегралів обчислюється, зазвичай, через ковзаюче середнє.

Дослідження показують, що корисною складовою є тільки складова $P[2]$, та у більшості випадків, усі інші складові потужності \tilde{p} , Q , \tilde{q} необхідно компенсувати. Струм, що повинен генерувати активний фільтр, знаходиться через зворотні перетворення Кларка:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} - p_0 \\ q \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де $i_{c\alpha}$, $i_{c\beta}$ – скореговані проекції узагальненого вектору струми в ортогональних координатах α - β відповідно.

$$\begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = [C]^T \cdot \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де i_{cA} , i_{cB} , i_{cC} – струми активного фільтру у фазах А, В, С.

Факти неправильного визначення складових потужностей мережі при несиметрії та несинусоїдності напруги живлення розглянуті в [3-5]. Сутність недоліку математичного апарату p - q теорії полягає в тому, що матриці перетворення координат А-В-С в α - β та α - β в А-В-С не враховують несиметрію напруг (струмів). Спроба врахувати несиметрію через складову u_0 (i_0) є неефективною у більшості випадків.

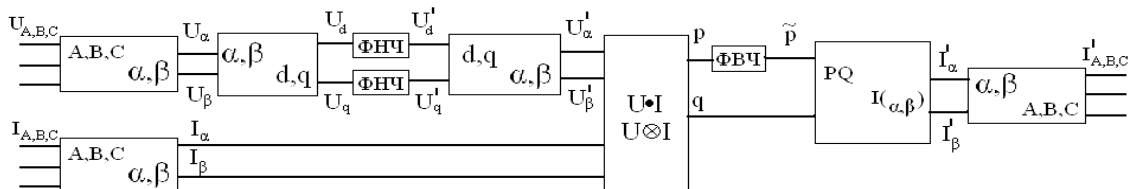


Рис. 1. Структурна визначення струму корекції мережі, запропонована в [6]

Для аналізу вище приведеної техніки корекції, необхідно записати узагальнений вектор напруги через системи прямої, зворотної та нульової послідовностей, за відомими із теоретичних основ електротехніки виразами [8]. В такому разі система напруг через симетричні складові набуде вигляду:

$$\begin{cases} U_A = U_{fA} + U_{rA} + U_0 \\ U_B = U_{fB} + U_{rB} + U_0 \\ U_C = U_{fC} + U_{rC} + U_0 \end{cases} \quad (17)$$

де U_A , U_B , U_C – вектори напруги фаз А, В, С; U_{fA} , U_{fB} , U_{fC} – вектори фазних напруг А, В, С системи прямої послідовності; U_{rA} , U_{rB} , U_{rC} – вектори фазних напруг А, В, С системи зворотної послідовності; U_0 – вектор нульової послідовності.

Тоді, узагальнений вектор напруги:

Рішення, запропоноване в [6], полягає в додатковому перетворенні проекцій вектора напруги u_α та u_β до системи координат d-q, що обертається з частотою першої гармоніки мережі ω_1 .

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1, \quad (11)$$

де f_1 – частота першої гармоніки напруги мережі.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = [\theta] \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де u_d , u_q – проекції узагальненого вектору напруги в системі координат d-q, що обертається; $[\theta]$ – матриця прямого перетворення системи координат α - β до системи координат d-q;

$$[\theta] = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 \cdot t) & \sin(\omega_1 \cdot t) \\ -\sin(\omega_1 \cdot t) & \cos(\omega_1 \cdot t) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Далі, до отриманих значень проекцій вектора напруги u_d та u_q застосовують низькочастотну фільтрацію, залишаючи постійні складові, та перетворюють до нерухої системи координат α - β .

$$u_d^* = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_d dt, \quad (14)$$

де u_d^* – постійна складова проекції u_d .

$$u_q^* = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_q dt, \quad (15)$$

де u_q^* – постійна складова проекції u_q .

$$\begin{bmatrix} u_\alpha^* \\ u_\beta^* \end{bmatrix} = [\theta]^T \cdot \begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix}, \quad (16)$$

де u_α^* та u_β^* – скореговані проекції узагальненого вектору напруги на вісі α та β відповідно.

Нижче (рис. 1) представлена структурна схема математичного апарату, що визначає струм корекції, який має генерувати в мережу активний фільтр [6].

$$U = \frac{2}{3} \cdot (U_A + a \cdot U_B + a^2 \cdot U_C), \quad (18)$$

де U – узагальнений вектор напруги; a – оператор трифазної системи;

$$a = e^{\frac{2}{3} \pi \cdot j}. \quad (19)$$

Розклавши кожен з векторів фазної напруги на симетричні складові, (18) можна переписати в іншій формі:

$$U = \frac{2}{3} \cdot [(U_{fA} + U_{rA} + U_0) + a \cdot (U_{fB} + U_{rB} + U_0) + a^2 \cdot (U_{fC} + U_{rC} + U_0)] = \frac{2}{3} \cdot [(U_{fA} + U_{rA}) + a \cdot (U_{fB} + U_{rB}) + a^2 \cdot (U_{fC} + U_{rC}) + U_0(1 + a + a^2)] = U_f + U_r, \quad (20)$$

де U_f , U_r – вектори напруг прямої та зворотної послідовностей.

Із (20) видно, що узагальнений вектор напруги при будь-якому виді несиметрії завжди буде містити тільки складові прямої та зворотної послідовностей [7].

Перетворення узагальненого вектору напруги до системи координат d-q, що обертається, виглядатиме, як [7]:

$$U^{(dq)} = U^{(\alpha\beta)} \cdot e^{-j\omega t}, \quad (21)$$

де $U^{(dq)}$, $U^{(\alpha\beta)}$ – узагальнені вектори напруги в d-q та α - β координатах відповідно.

Враховуючи (19) отримуємо:

$$U^{(dq)} = [U_f^{(\alpha\beta)} + U_r^{(\alpha\beta)}] \cdot e^{-j\omega t}, \quad (22)$$

де $U_f^{(\alpha\beta)}$, $U_r^{(\alpha\beta)}$ – вектори прямої та зворотної послідовностей в α - β координатах відповідно.

Вираз (22), записаний через експоненціальну форму:

$$U^{(dq)} = [U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot e^{j(\omega t + \delta_f)} + U_{rm}^{(\alpha\beta)} \cdot e^{-j(\omega t + \delta_r)}] \cdot e^{-j\omega t}, \quad (23)$$

де $U_{fm}^{(\alpha\beta)}$, $U_{rm}^{(\alpha\beta)}$ – амплітуди векторів прямої та зворотної послідовностей в α - β координатах відповідно; δ_f , δ_r – кути зсуву векторів прямої та зворотної послідовностей відносно початку d-q системи координат.

Перетворивши попередній вираз:

$$U^{(dq)} = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot e^{j\delta_f} + U_{rm}^{(\alpha\beta)} \cdot e^{-j(2\omega t + \delta_r)}. \quad (24)$$

Перша та друга складові відповідають проєкціям узагальненого вектору напруги на вісі d та q:

$$\begin{cases} u_d = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \cos(\delta_f) + U_{rm}^{(\alpha\beta)} \cdot \cos(2\omega t + \delta_r) \\ u_q = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \sin(\delta_f) - U_{rm}^{(\alpha\beta)} \cdot \sin(2\omega t + \delta_r) \end{cases} \quad (25)$$

Отже, для корекції несиметричної системи живлення необхідно видалити осцилюючі складові системи рівнянь (25). Таким чином, скорегована несиметрична система буде виглядати як симетрична система напруг:

$$\begin{cases} u_d = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \cos(\delta_f) \\ u_q = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \sin(\delta_f) \end{cases} \quad (26)$$

Проєкції узагальненого скорегованого вектора в системі координат α - β запишуться через зворотне перетворення Парка (16), враховуючи (26):

$$\begin{cases} u_\alpha^* = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \cos(\delta_f) \cdot \cos(\omega_1 t) - U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \sin(\delta_f) \cdot \sin(\omega_1 t); \\ u_\beta^* = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \cos(\delta_f) \cdot \sin(\omega_1 t) - U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \sin(\delta_f) \cdot \cos(\omega_1 t). \end{cases} \quad (27)$$

У такому випадку доцільно кут δ_f прийняти рівним нулю, використовуючи наступний аргумент: за умови ідеальної трифазної системи напруги живлення проєкції її узагальненого вектора в координатній площині α - β зсунуті на кут 90° (ортогональні). Тому, при перетворенні проєкцій вектора із системи α - β до системи d-q можна чітко зв'язати початок координат системи d-q віссю α . У такому разі кут δ_f дорівнює нулю. За наявності несиметрії напруг, проєкції вектору U_α та U_β не ортогональні. Відповідно під час вибору нульової фази обертової системи координат d-q, яка співпадає з віссю α кут δ_f може мати відмінне від нуля значення. В поданій роботі пропонується зв'язати початок d-q системи координат з нульовою

фазою вектору U_f для будь-яких станів системи напруги живлення.

Іншими словами проблему можна сформулювати так: "За наявності зсувів векторів фазних напруг, що не дорівнюють 120° , який вектор брати за точку відліку?".

Отже, (27) запишеться:

$$\begin{cases} u_\alpha^* = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \cos(\omega_1 t) \\ u_\beta^* = U_{fm}^{(\alpha\beta)} \cdot \sin(\omega_1 t) \end{cases} \quad (28)$$

Таким чином, несиметрична система векторів:

$$\begin{cases} U_A = k_A \cdot U_m \cdot e^{j\varphi_A} \\ U_B = k_B \cdot U_m \cdot e^{j(\frac{2}{3}\pi + \varphi_B)} \\ U_C = k_C \cdot U_m \cdot e^{j(\frac{4}{3}\pi + \varphi_C)} \end{cases} \quad (29)$$

де k_A , k_B , k_C – коефіцієнти несиметрії амплітуд векторів напруги фаз A, B, C відповідно; U_m – амплітуда фазної напруги A, B, C; φ_A , φ_B , φ_C – кути зсуву фаз A, B, C, що характеризують несиметрію відповідно.

Задача корекції зводиться до визначення вектора прямої послідовності трифазної системи [9], який можна знайти, як [8]:

$$U_{correct} = \frac{U_A + U_B \cdot e^{\frac{4}{3}\pi \cdot j} + U_C \cdot e^{\frac{2}{3}\pi \cdot j}}{3}. \quad (30)$$

Зазначений вектор $U_{correct}$ у системі координат α - β матиме вигляд:

$$\begin{cases} u_\alpha^* = \text{Im}(U_{correct}) \\ u_\beta^* = \text{Re}(U_{correct}) \end{cases} \quad (31)$$

Отже, перший крок вдосконаленої системи: визначення проєкцій узагальненого вектора напруги $U_{correct}$ на вісі α - β (30). Цей захід вдало виконує дискретне перетворення Фур'є.

$$\begin{cases} u_\alpha^* = \frac{\text{Im}(U_A^{(d)}) + \text{Im}(U_B^{(d)}) + \text{Im}(U_C^{(d)})}{3} \\ u_\beta^* = \frac{\text{Re}(U_A^{(d)}) + \text{Re}(U_B^{(d)}) + \text{Re}(U_C^{(d)})}{3} \end{cases} \quad (32)$$

де $U_A^{(d)}$, $U_B^{(d)}$, $U_C^{(d)}$ – дискретні комплексні представлення векторів фазних напруг.

$$U_A^{(d)} = \sum_{n=0}^{N-1} u_A(n) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}\right) + j \cdot \sum_{n=0}^N u_A(n) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}\right), \quad (33)$$

де $u_A(n)$ – поточне значення дискретного виміру; N – кількість кроків дискретизації за один період; n – порядковий номер дискретного виміру.

Значення $U_B^{(d)}$, $U_C^{(d)}$ обраховуються аналогічно. Для зручності обрахування в дискретному вигляді значення косинусів та синусів замінюються на складові (обертові коефіцієнти) $W_{RE}[i]$ та $W_{IM}[i]$, що є константами та зберігаються в таблицях пам'яті цифрового обчислюючого пристрою. Спроєктувавши вектор $U_{correct}$ на вісі α - β :

$$\begin{cases} X_\alpha[i] := \frac{1}{3} \cdot (u_A[i] \cdot W_{IM}[i] + u_B[i] \cdot W_{IM}[i + \frac{1}{3}N] + \\ + u_C[i] \cdot W_{IM}[i + \frac{2}{3}N]); \\ X_\beta[i] := \frac{1}{3} \cdot (u_A[i] \cdot W_{RE}[i] + u_B[i] \cdot W_{RE}[i + \frac{1}{3}N] + \\ + u_C[i] \cdot W_{RE}[i + \frac{2}{3}N]) \end{cases}, \quad (34)$$

де i – порядковий номер поточного виміру в межах одного періоду напруги живлення; $W_{RE}[i]$, $W_{IM}[i]$ – поточне значення обертового косинусного та синусного коефіцієнтів відповідно; $X_\alpha[i]$, $X_\beta[i]$ – проміжні значення для обрахунку проєкцій узагальненого вектору напруги.

$$\begin{cases} u_\alpha^* := u_\alpha^* - X_\alpha[i-N] + X_\alpha[i] \\ u_\beta^* := u_\beta^* - X_\beta[i-N] + X_\beta[i] \end{cases}, \quad (35)$$

де $X_\alpha[i-N]$, $X_\beta[i-N]$ – минулі за період проміжні значення для обрахунку проєкцій узагальненого вектору напруги.

Наступним кроком визначається постійна складова активної потужності (7) за формулою:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C) \cdot dt. \quad (36)$$

На практиці вище приведений вираз (36) зручно обчислювати через "ковзаюче середнє":

$$p[i] := u_A[i] \cdot i_A[i] + u_B[i] \cdot i_B[i] + u_C[i] \cdot i_C[i]. \quad (37)$$

$$P := P - \frac{p[i-N]}{N} + \frac{p[i]}{N}, \quad (38)$$

де $p[i-N]$ – минуле за період значення миттєвої потужності; $p[i]$ – поточне значення миттєвої потужності на i -му кроці дискретизації.

Далі значення струму, що має генерувати активний фільтр, обраховується як i в оригінальній р-q теорії:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_\beta^*)^2 + (u_\alpha^*)^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha^* & -u_\beta^* \\ u_\beta^* & u_\alpha^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - [C]^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Миттєвий коефіцієнт потужності k_p системи обраховується за таким виразом:

$$k_p = \frac{u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C}{\sqrt{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} \cdot \sqrt{i_A^2 + i_B^2 + i_C^2}}. \quad (41)$$

Для прикладу взято несиметричну несинусоїдну трифазну трипровідну систему живлення, до якої підключено нелінійний споживач, що є генератором вищих гармонік струму та споживачем реактивної потужності в її класичному розумінні (рис. 2).

На рис. 3,а видно струм, який генерує в мережу активний фільтр та форми фазних струмів (рис. 3,б) після корекції, які є симетричними та синусоїдними. Миттєвий коефіцієнт потужності системи (рис. 4,б) після корекції наближений до 1 та змінюється більш монотонно. Необхідно зауважити, що при генерації струму корекції, який забезпечує утворення синусоїдного симетричного струму в мережі живлення неможливо у повній мірі

компенсувати реактивну потужність (рис. 4,б).

В табл. 1 наведено приблизне порівняння обчислювальних затрат за один дискретний період обрахунку. Для порівняння обрані оригінальна р-q теорія, модифікація р-q теорії, запропонованої в [6], та алгоритм, представлений у даній роботі.

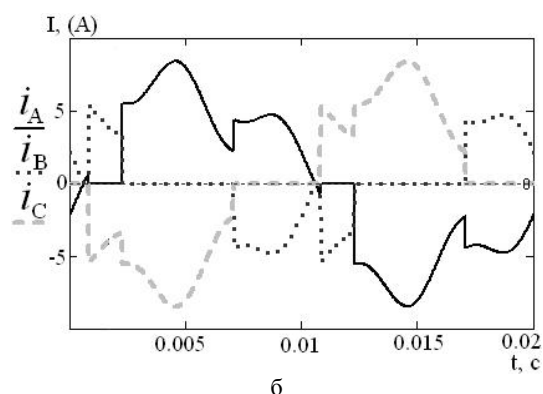
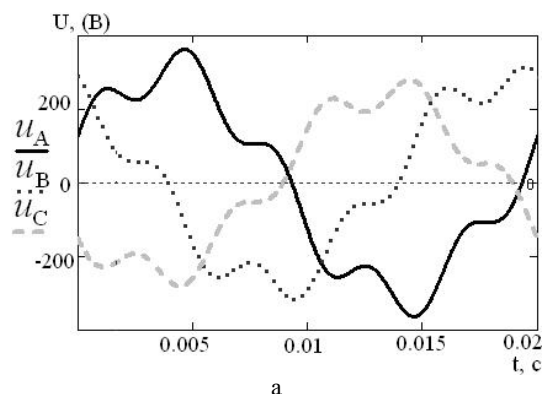


Рис. 2. Напруги та струми тестової несиметричної трифазної системи до корекції.

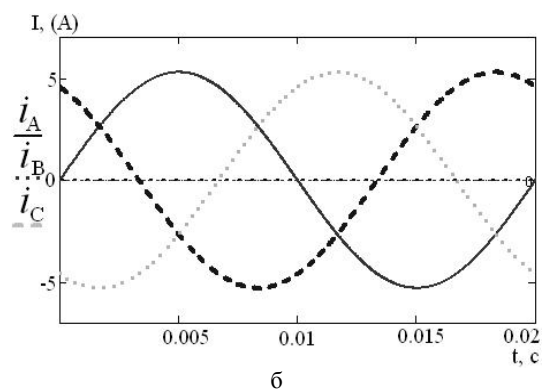
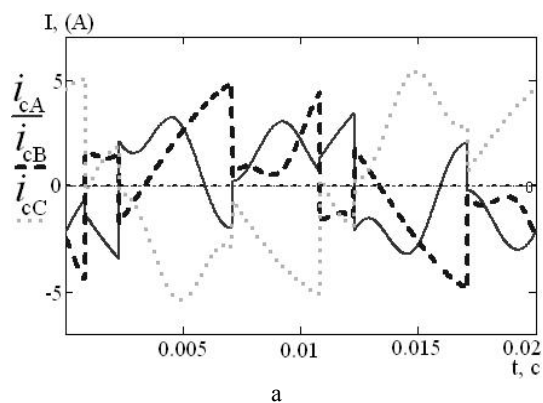


Рис. 3. Струм фільтру (а) та фазні струми мережі після корекції (б)

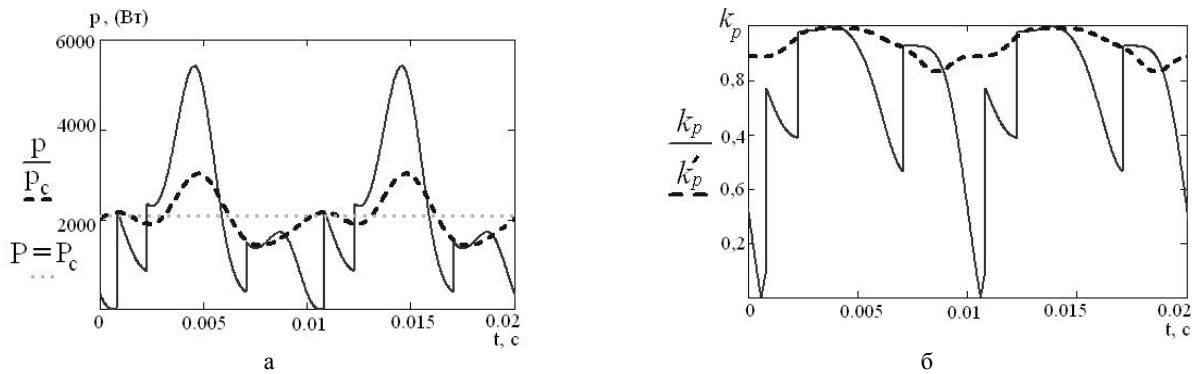


Рис. 4. Миттєва потужність до (p) та після (p_c) корекції, її інтегральне значення P (а) та коефіцієнт потужності (б) до (k_p) та після (k'_p) корекції

Таблиця 1

Порівняння апаратних затрат трьох розглянутих алгоритмів

Дія \ Алгоритм	Оригінальна p-q теорія	Модифікація з d-q перетворенням [5]	Запропонований алгоритм
Складання	14	19	17
Множення	20	28	23
Наявність фільтрів та ФАПЧ	1 ФВЧ	1 ФВЧ, 2 ФНЧ + ФАПЧ	1 ФНЧ + ФАПЧ

ВИСНОВКИ

Проаналізовано ідеї [6, 9], що дозволяють усунути недоліки p-q теорії, які виникають при роботі в умовах несинусоїдної несиметричної напруги живлення. На основі проведеного аналізу показано зв'язок "технічного" рішення [6] та математичного заходу [9] модернізації апарату p-q теорії. Запропоновано модифікацію вищезначеної теорії, що вдало виконує функцію симетрування фазних струмів при несинусоїдній несиметричній напрузі живлення. Наведено приклад роботи використання скорегованого математичного апарату для трифазної три провідної несиметричної та несинусоїдної мережі живлення з нелінійним навантаженням. Обчислювальні затрати запропонованої модифікації є близькими до затрат оригінальної теорії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. H. Akagi. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf. - 1983. - pp. 1375-1386.
2. H. Akagi. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. - New York: Wiley, 2007. - 379 p.
3. L.S. Czarnecki. On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. On Power Electronics Vol. 19. - 2004. - No. 3, pp. 828-836.
4. L.S. Czarnecki. Effects of supply voltage asymmetry on IRP p-q theory based switching compensator control / L.S. Czarnecki // Accepted in IET Power Electronics. - 2009.
5. L.M. Tolbert. Comparison of Time Based Nonactive Power Definitions for Active Filtering / L.M. Tolbert, T.G. Halbetler // Power Electronics Congress CIEP 2000. - 2000. - October 2000. - pp 73-79.
6. M. Kale Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage / M. Kale, E. Ozdemir // Electric Power Syst. - 2005. - Res 77. - pp. 363-370.
7. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие / Усольцев А.А. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. - 94 с.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. - 9-е изд., перераб. и доп. / Л.А. Бессонов - М.: Высш. шк., 1996. - 638 с.
9. Колб А.А. Системы группового питания приводов с

ёмкостными накопителями и параллельными активными фильтрами / А.А. Колб // Электротехнические та комп'ютерні системи. - 2011. - Вип. 03(79). - С. 404-407.

- Bibliography (transliterated):** 1. H. Akagi. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf. - 1983. - pp. 1375-1386. 2. H. Akagi. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. - New York: Wiley, 2007. - 379 p. 3. L.S. Czarnecki. On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. On Power Electronics Vol. 19. - 2004. - No. 3, pp. 828-836. 4. L.S. Czarnecki. Effects of supply voltage asymmetry on IRP p-q theory based switching compensator control / L.S. Czarnecki // Accepted in IET Power Electronics. - 2009. 5. L.M. Tolbert. Comparison of Time Based Nonactive Power Definitions for Active Filtering / L.M. Tolbert, T.G. Halbetler // Power Electronics Congress CIEP 2000. - 2000. - October 2000. - pp 73-79. 6. M. Kale Harmonics and reactive power compensation with shunt active power filter under non-ideal mains voltage / M. Kale, E. Ozdemir // Electric Power Syst. - 2005. - Res 77. - pp. 363-370. 7. Usol'tsev A.A. Chastotnoe upravlenie asinhronnymi dvigatelyami: uchebnoe posobie / Usol'tsev A.A. - SPb.: SPbGU ITMO, 2006. - 94 s. 8. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy `elektrotehnicheskikh, `energeticheskikh i priborostroitel'nykh special'nostej vuzov. - 9-e izd., pererab. i dop. / L.A. Bessonov - M.: Vyssh. shk., 1996. - 638 s. 9. Kolb A.A. Sistemy gruppovogo pitaniya privodov s emkostnymi nakopitelyami i parallel'nymi aktivnymi fil'trami / A.A. Kolb // Elektrotehnichni ta komp'yuterni sistemi. - 2011. - Vip. 03(79). - S. 404-407.

Надійшла 20.05.2013

Сінолиций Анатолій Пилипович, д.т.н, проф.
Кольсун В'ячеслав Анатолійович, к.т.н, доц.
Козлов Владислав Сергійович
ДВНЗ "Криворізький національний університет"
кафедра автоматизованого електропривода
50027, Кривий Ріг, ул. XXII Партсъезда, 11
тел. (0564) 090647
e-mail: kolsun_va@3g.ua, vskpost@yandex.ru

Sinolitsyy A.F., Kolsun V.A., Kozlov V.S.

Ways of p-q theory modernization for work in non-sinusoidal unbalanced voltage conditions.

Two different techniques of P-Q instantaneous power theory mathematical apparatus modernization for shunt active filters are analyzed. Both techniques are equal in nature while different in implementation. The modernization concepts introduced allow correcting imperfection of the P-Q theory under conditions of unbalanced and non-sinusoidal supply voltage systems.

Key words – energy saving technology, P-Q theory, instantaneous power, active filter, reactive power compensation, balancing currents.