

ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА АВТОНОМНУ ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА

ВЛАСЕНКО Р.В. асистент, асистент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Запорізького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: ruslan.vlasenko@i.ua;

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

Мета роботи. Метою статті є дослідження режимів роботи трифазного силового активного фільтра у складі автономної електричної мережі при підключенні до мережі трифазного нелінійного навантаження різного спектрального характеру.

Методи дослідження. Для проведення досліджень використовувалися положення р_q-теорії потужності, теорія електричних кіл, теорія автоматичного управління, математичне моделювання в пакеті Matlab.

Отримані результати. Отримані графіки і спектральний склад напруги мережі, струму навантаження, що дозволяє оцінити ефективність застосування силового активного фільтра у режимі фільтрації у складі автономної електричної мережі, що представляє собою синхронний генератор.

Наукова новизна. Доведено ефективність паралельної роботи силового активного фільтра у режимі фільтрації з синхронним генератором при різко змінному нелінійному навантаженні.

Практична цінність. Використання запропонованої методики дозволить створити трифазний силовий активний фільтр для застосування його у автономних електричних мережах, що представлені синхронним генератором з автоматичним регулюванням напруги збудження.

Ключові слова: силовий активний фільтр, р_q-теорія потужності, синхронний генератор, якість електричної енергії, нелінійне навантаження.

I. ВСТУП

У якості джерела живлення змінного струму для автономних електричних мереж або резервного джерела живлення поширення отримали синхронні генератори (СГ). СГ також використовують на потужних теплових, гідро і атомних електростанціях. Але робота СГ при генерації енергії у складі електричних станцій відрізняється від роботи у складі технологічних комплексів чи систем підприємств. Достатньо високі вимоги до якості електричної енергії, які відбиті у нормативних документах, та вимагають відповідних заходів до підтримки показників якості в мережах загального призначення забезпечують генеруючим установкам електричних станцій сприятливі умови функціонування. На відміну від генеруючих установок підприємств де, зважаючи на відсутність жорсткого контролю до якості електричної енергії у вузлах цехових мереж, чи розподільчих та понижуючих підстанцій, синхронні генератори генеруючи установок працюють на несиметричне та нелінійне навантаження [1].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

При роботі СГ на нелінійне навантаження вини-

кає ряд проблем із забезпеченням якості електроенергії у самій електричній машині. При активно-ємнісному навантаженні зміна напруги буде від'ємною величиною. Зміна напруги синхронних генераторів достатньо велика, що ускладнює роботу споживачів. В даний час досконалі швидкодіючі регулятори збудження дозволяють підтримувати заданий рівень напруги. З їх допомогою за необхідним законом змінюється струм збудження, а значить і магнітний потік. При чисто активному і активно-індуктивному навантаженні напруга генератора зі зростанням струму зменшується, а при активно-ємнісному навантаженні – зростає. Це пояснюється тим, що в останньому випадку діє поздовжньо-намагнічувальна реакція якоря, що збільшує магнітний потік, а у двох перших – поздовжньо-розмагнічувальна, що зменшує потік. При чисто активному навантаженні обмотка статора володіє значною індуктивністю. Регулюючи напругу збудження СГ компенсують реактивну потужність навантаження та підтримують напругу СГ на заданому рівні [2].

Але при цьому, коли активно-індуктивне або активно-ємнісне навантаження зі змінним спектральним складом, то відбувається додатковий вплив на спотворення синусоїдальності форми кривої напруги. СГ

не здатен впливати на зниження вищих гармонік і потребує додаткової установки фільтруючих засобів [3]-[5].

Для компенсації реактивної потужності застосовують і фільтрації вищих гармонік струму застосовують силові активні фільтри (САФ), що здатні знижувати дані величини при зміні амплітуди або спектрального складу навантаження, а також враховувати спотворену напругу мережі живлення при своїй роботі. Також САФ має можливість, як одночасно так і окремо працювати у режимі компенсації-фільтрації чи тільки фільтрації. Його перевага полягає у тому, що при зміні спектрального складу струму навантаження САФ ураховує дані показники у реальному часі [6].

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження впливу нелінійного навантаження на параметри режиму синхронного генератора з регулюванням напруги збудження у складі автономної електричної мережі з та без паралельного САФ.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Спрощена схема електричної мережі підприємства, яку обрано для дослідження наведена на рис. 1, де Н1 – RL навантаження, Н2 – RC навантаження, В1, В2, В3 – вимикачі, СГ – синхронний генератор, ЗГ – збуджувач синхронного генератора, В – випрямляч, ДВЗ-ДГ – дизель генератор, САФ – силовий активний фільтр результатів.

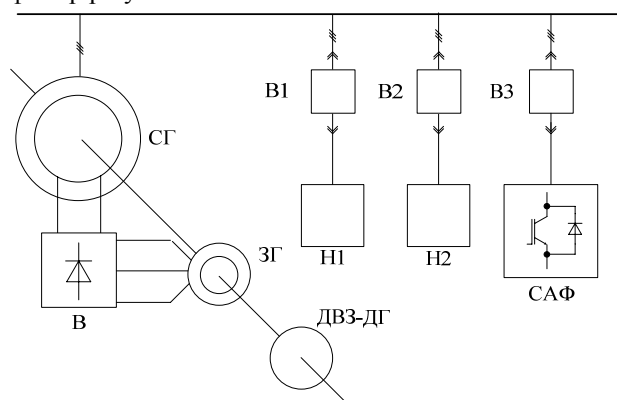


Рисунок 1. Схема системи електричної мережі підприємства з САФ

У СГ система збудження забезпечується невеликою синхронною машиною ЗГ, з'єднаною на одному валу. Випрямлення виконується діодним мостом В, встановленим на синхронному машинному валу, що дозволяє уникнути ковзаючих кілець для забезпечення постійного струму на полі синхронного генератора. Механічне зчеплення СГ і ЗГ здійснюється за допомогою дизель генератора ДВЗ-ДГ. ЗГ є синхронна машина невеликої потужності. СГ є синхронна машина великої потужності, керована дизельним двигуном. Регулювання напруги генератора здійснюється за до-

помогою контролю напруги поля ЗГ. Дизельний двигун забезпечує загальну механічну потужність, необхідну для основної синхронної машини СГ та ЗГ [7]-[9].

Представлення складових потужності за допомогою pq -теорії миттєвої потужності. Ефективність роботи САФ залежить від визначеної компенсаційної характеристики, що підлягає компенсації. Для визначення неактивних складових застосовують різні теорії потужності [10]-[12]. Популярність серед застосовуваних теорій потужностей на базі яких створюється алгоритм визначення заданого струму САФ найбільше отримала – pq -теорія потужності [13], [14].

Застосовуючи pq -теорію потужності [10], виконують перетворення миттєвої напруги мережі та миттєвого струму навантаження в координати $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де x_a, x_b, x_c – значення миттєвої напруги мережі або миттєвого струму навантаження в координатах abc .

Миттєву реальну і уявну потужність навантаження знаходять:

$$\begin{bmatrix} p_l \\ q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де u_α, u_β – миттєва напруга мережі в координатах $\alpha\beta$; $i_{l\alpha}, i_{l\beta}$ – миттєвий струм навантаження в координатах $\alpha\beta$.

Миттєву реальну і уявну потужність представляють двома складовими: постійною P_l, Q_l та змінною \tilde{p}_l, \tilde{q}_l :

$$\begin{aligned} p_l &= P_l + \tilde{p}_l \\ q_l &= Q_l + \tilde{q}_l \end{aligned} \quad (3)$$

Постійну реальну і уявну потужність визначають інтегруванням:

$$P_l = \frac{1}{T} \int_0^T p dt; \quad Q_l = \frac{1}{T} \int_0^T q dt, \quad (4)$$

де T – період напруги мережі:

Звичайно на САФ покладають функцію компенсації \tilde{p}_l і \tilde{q}_l , тобто компенсація реактивної потужності за основною гармонікою і фільтрація вищих гармонік струму, Але можливо застосовуючи алгоритм визначення заданого струму САФ на основі pq -теорії потужності покласти функцію компенсації \tilde{p}_l і \tilde{q}_l , тобто робота САФ у режимі фільтрації вищих гармонік струму. Тоді заданий струм САФ в координатах $\alpha\beta$ відповідно для першого і другого варіанту буде:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_l \\ q_l \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_l \\ q_l \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Визначення заданого струму САФ в координатах abc виконують шляхом зворотного перетворення (1) [10].

Моделювання у візуальному середовищі. Для дослідження впливу трифазного нелінійного навантаження на процеси розподілу електричної енергії у вузлі системи електроспоживання (рис. 1) в пакеті візуального програмування за аналогією з [7] складена модель (рис. 2) з паралельним підключенням трифазного САФ.

Модель рис. 2 включає: Synchronous Generator 2MVA 400V – СГ, Field Connection – система регулювання напруги збудження СГ, Rectifier – випрямляч, Transformer 10kVA 400V/12V – трансформатор потужністю 10 кВА, Exciter System 8,1kVA 400V – ЗГ, 500W – активне навантаження у колі ЗГ, 500kW Load – активне навантаження у колі СГ, Voltage Regulator – регулювання напруги ЗГ, Diesel Engine & Speed Regulator – дизельний двигун і система регулювання швидкості, Reference Speed(pu) – опорна швидкість у в.о., Reference Voltage(pu) – опорна напруга у в.о., BSM, ВЕхс – шини для вимірювання напруги і струму у колі СГ і ЗГ.

Нелінійне навантаження представлено – трифазним діодним мостом (*Universal Bridge*) з активно-індуктивним навантаженням (*RL load*) $R_{ld1} = 2 \text{ Ом}$; $L_{ld1} = 0,0116 \text{ Гн}$, що підключається до мережі через вимикач (*Breaker1*) в час $t = 1 \text{ с}$; та трифазним діодним мостом (*Universal Bridge1*) з активно-ємнісним навантаженням (*RC load*) $R_{ld2} = 2 \text{ Ом}$; $C_{ld2} = 0,0116 \text{ Ф}$, що підключається до мережі через вимикач (*Breaker2*) в час $t = 2 \text{ с}$.

Трифазний САФ підключається паралельно до мережі в час $t = 1,5 \text{ с}$. Через блок трифазного реактору (*Reactor*) підключений трифазний транзисторний перетворювач зібраний по мостовій схемі на IGBT-модулях та знаходиться в підсистемі блоку (*Transistor converter*). До сторони постійного струму блоку транзисторного перетворювача (*Transistor converter*) підключений конденсатор (C). Для керування трифазним САФ використовуються два блоки: блок визначення заданого струму САФ (*Current generation block*) та блок формування імпульсів управління ключовими елементами перетворювача (*Pulse shaping block*). Блок

визначення заданого струму САФ (*Current generation block*) реалізує два алгоритми: 1) режим фільтрації на основі pq -теорії миттєвої потужності – формула (5); 2) режим компенсації-фільтрації на основі pq -теорії миттєвої потужності – формула (6), обидва алгоритми визначення заданого струму САФ розкриті в роботі [10]. Блок формування імпульсів управління ключовими елементами перетворювача (*Pulse shaping block*) реалізує систему релейного регулювання струму використану в роботі [13]. Параметри моделі САФ розраховані відповідно до [15], з урахуванням особливостей регулювання [16]: індуктивність реактора $L = 0,0054 \text{ Гн}$; конденсатор ємністю $C = 0,04 \text{ Ф}$; напруга конденсатору $U_C = 4000 \text{ В}$. Значення зони гістерезису для регулювання похибки струму в методи релейного регулювання струму дорівнює $HB = 15$.

Дослідження виконано при розподілі у часі стану комутаційного обладнання наступним чином: спочатку запускається СГ (Synchronous Generator 2MVA 400V), у час $t = 1 \text{ с}$ включається нелінійне навантаження представлено трифазним діодним мостом (*Universal Bridge1*) з активно-індуктивним навантаженням (*RL load*), у час $t = 1,5 \text{ с}$ включається трифазний САФ з алгоритмом у режимі фільтрації, у час $t = 2 \text{ с}$ включається нелінійне навантаження представлено трифазним діодним мостом (*Universal Bridge1*) з активно-ємнісним навантаженням (*RC load*), у час $t = 2,5 \text{ с}$ включається трифазний САФ з алгоритмом у режимі компенсації-фільтрації. Перемикання з режиму фільтрації у режим компенсації-фільтрації виконується ключем (*Switch1*).

У ході проведеного дослідження отримані осцилограми напруги і струму СГ і навантаження у різні моменти часу і режими роботи автономної системи електропостачання.

На рис. 3 приведена осцилограма напруги u_g і струму i_g СГ за весь проміжок розрахунку (3 с).

З загальної осцилограми рис. 3 спостерігається у певні моменти часу регулювання напруги u_g СГ при зростанні амплітуди струму i_g СГ. При підключенні САФ і зміні його режиму з фільтрації на компенсацію-фільтрацію спостерігається зростання амплітуди струму i_g . Для подальшого дослідження вирішено у певні моменти часу деталізувати осцилограму рис. 3 і представити їх у вигляді графіків з спектральним складом.

На рис. 4 наведений графік і спектральний склад напруги u_g (рис. 4, а) і струму i_g (рис. 4, б) СГ у режимі холостого ходу (XX).

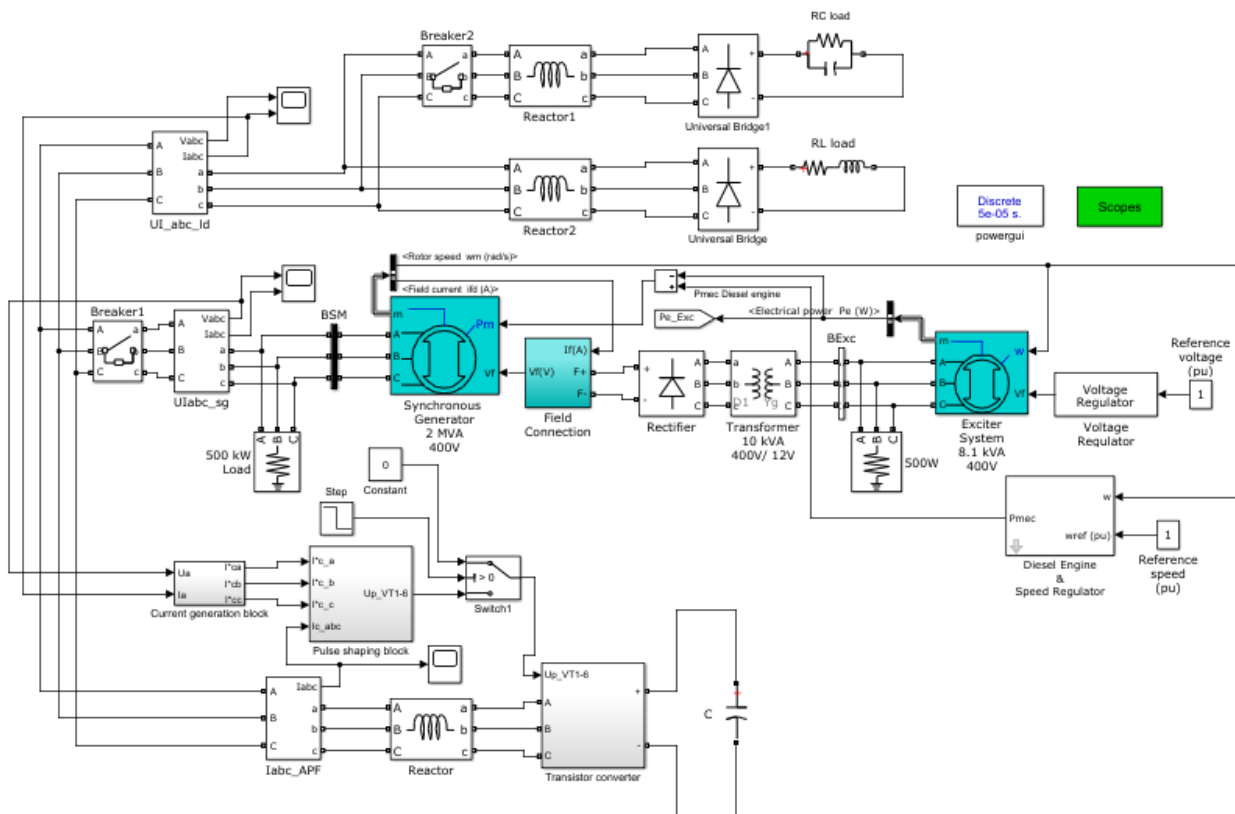


Рисунок 2. Модель схеми вузла системи електроживлення підприємства з САФ

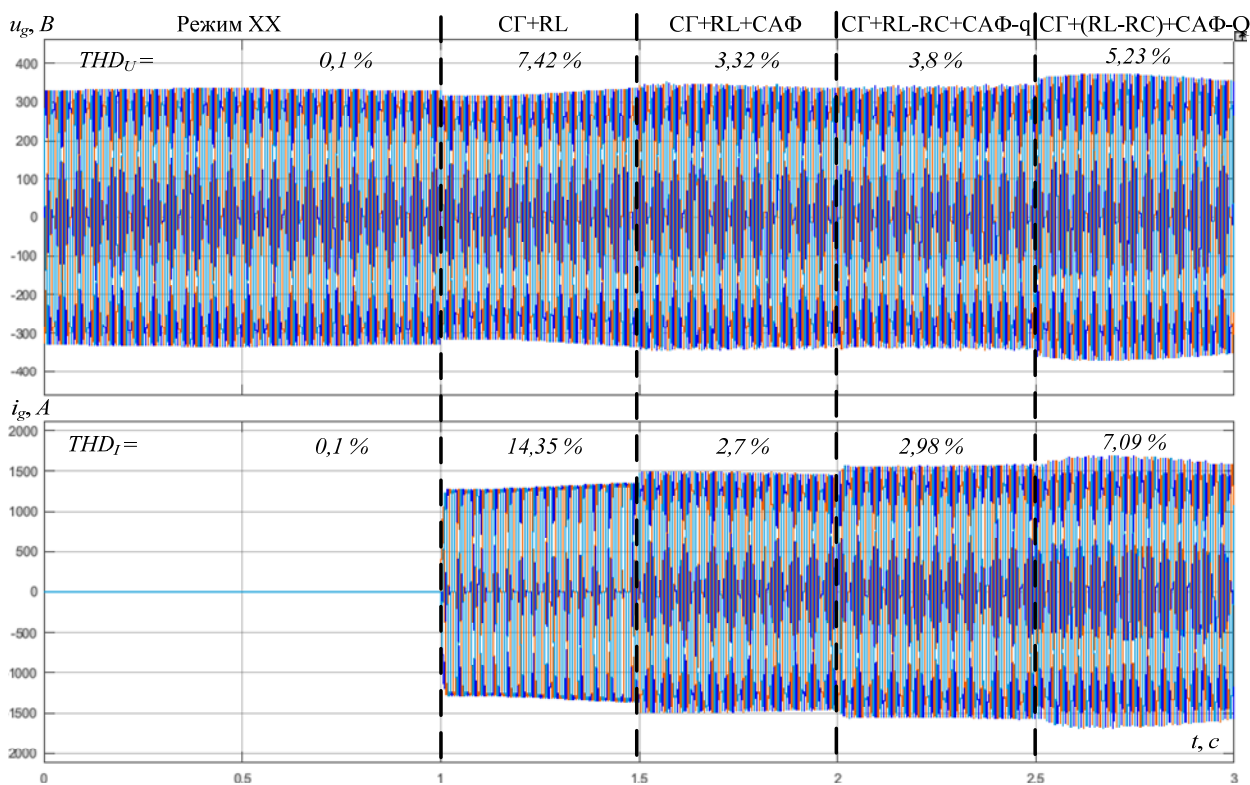


Рисунок 3. Осцилограма напруги u_g і струму i_g СГ. Умовні позначення: XX – холостий хід; RL - трифазне нелінійне навантаження актив-но-індуктивного характеру; RC - трифазне нелінійне навантаження актив-но-емнісного характеру; САФ-q – силовий активний фільтр працює у режимі фільтрації; САФ-Q – силовий активний фільтр працює у режимі компенсації-фільтрації

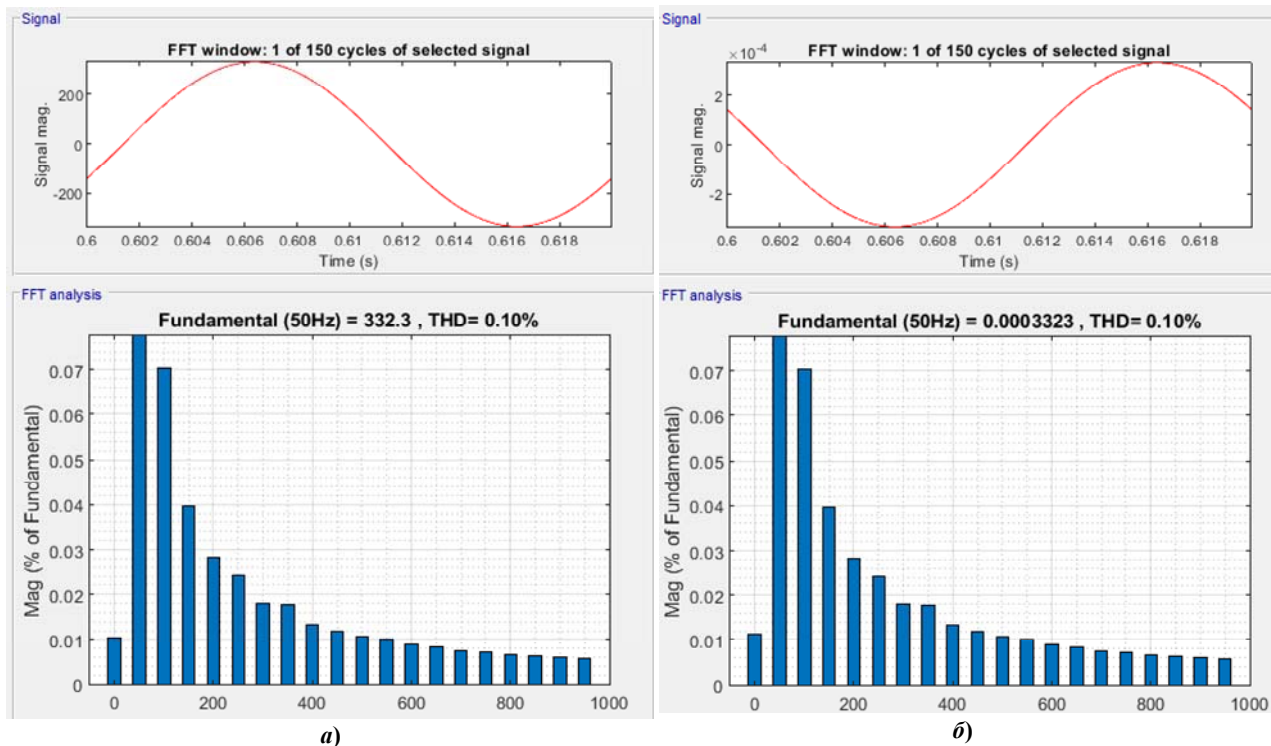


Рисунок 4. Графік і спектральний склад СГ у режимі ХХ: а) напруги u_g і б) струму i_g

Як бачимо з рис. 4 напруга і струм СГ мають синусоїдальний характер без гармонійних спотворень.

На рис. 5 наведена осцилограма напруги і струму СГ при включенні нелінійного навантаження, що

представлене трифазним діодним мостом (*Universal Bridge1*) з активно-індуктивним навантаженням (*RL load*) у час $t = 1$ с.

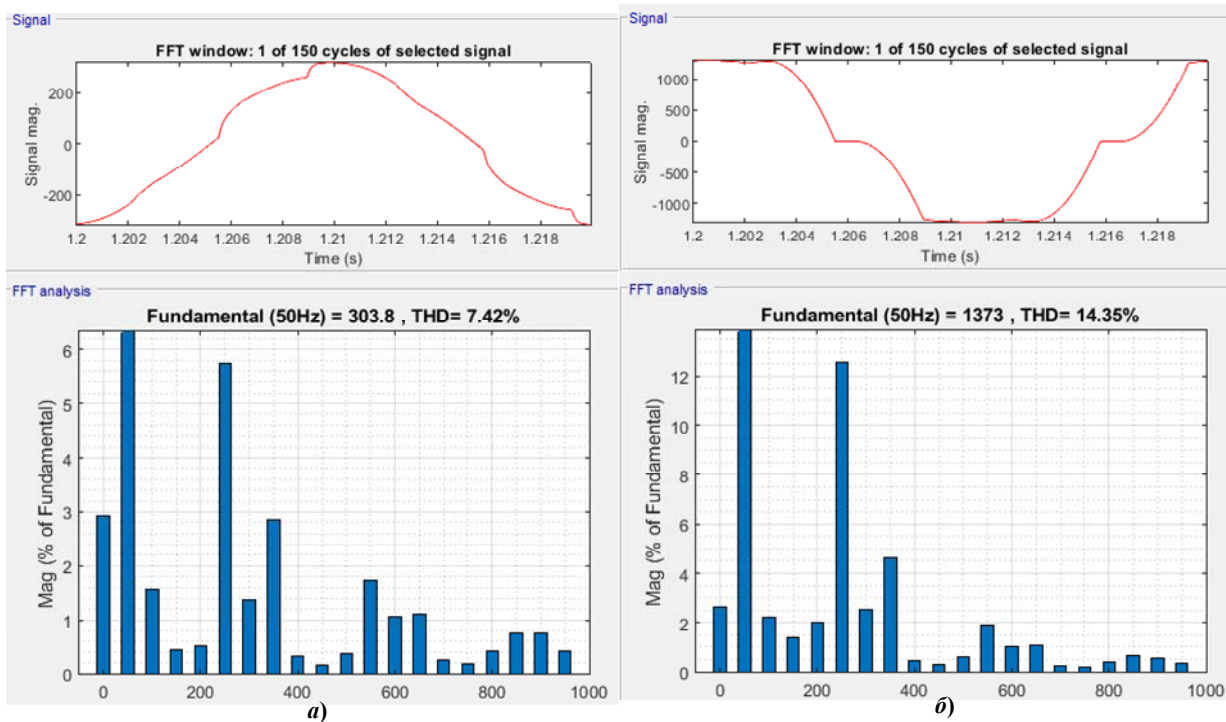


Рисунок 5. Графік і спектральний СГ при активно-індуктивному навантаженні: а) напруги u_g і б) струму i_g

Як видно, що при роботі СГ на активно-індуктивне навантаження напруга і струм СГ спотворюються вищими гармоніками напруги і струму. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги і струму відповідно складає – $THD_U = 7,42\%$ і $THD_I = 14,35\%$.

На рис. 6 наведена осцилограма напруги і струму СГ при включенні САФ, що працює у режимі фільтрації в час $t = 1,5\text{ с}$.

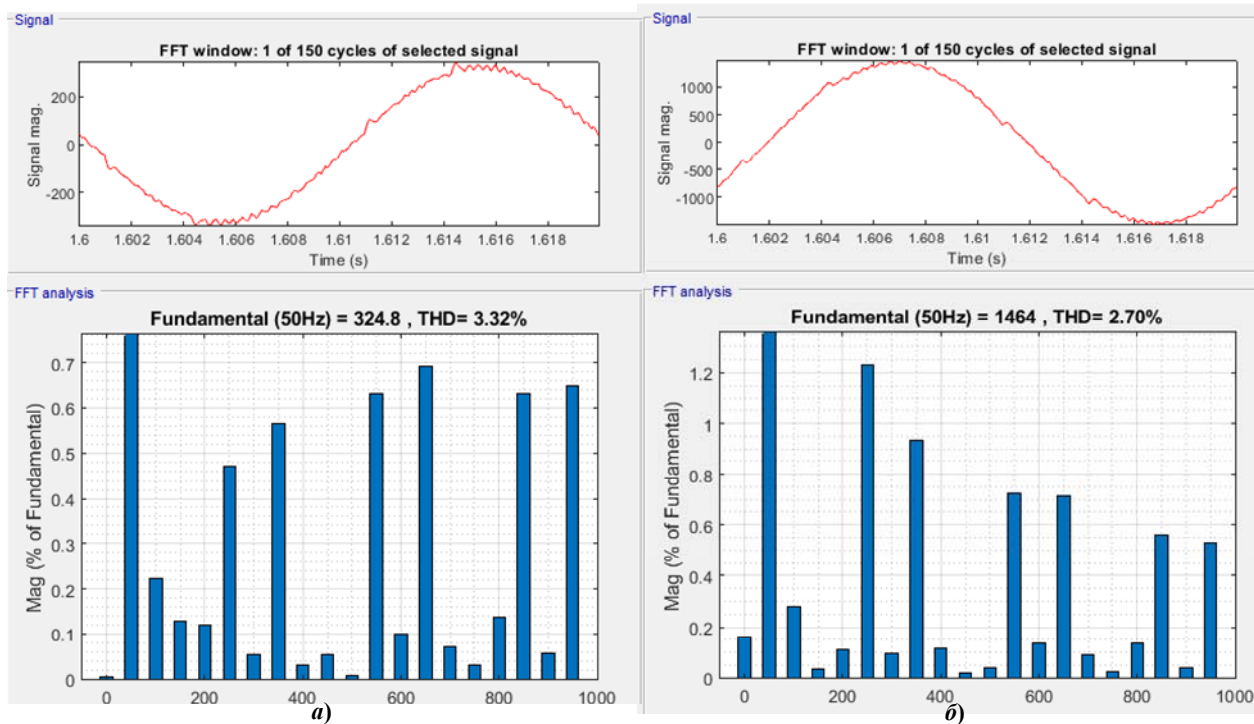


Рисунок 6. Графік і спектральний СГ при роботі САФ у режимі фільтрації: а) напруги u_g і б) струму i_g

При роботі СГ на активно-індуктивне навантаження з САФ у режимі фільтрації можна відмітити деякі особливості – коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги і струму СГ знизився відповідно на 55,26 %, 81,18 % і складає $THD_U = 7,42\%$ і $THD_I = 14,35\%$.

В час $t = 2\text{ с}$ включається активно-ємнісне навантаження з паралельною роботою САФ у режимі фільтрації. На рис. 7 приведена графік і спектральний склад струму навантаження (рис. 7, а) і СГ (рис. 7, б).

При активно-ємнісному навантаженні коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму навантаження складає $THD_I = 16,56\%$, тоді як СГ – $THD_I = 2,98\%$. Тобто у ході своєї роботи САФ знижує рівень вищих гармонік струму на 82 %.

У час $t = 2,5\text{ с}$ включається у роботу САФ у режимі компенсації-фільтрації. На рис. 8 приведена графік і спектральний склад струму навантаження (рис. 8, а) і СГ (рис. 8, б).

При цьому режимі роботі САФ знижує коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму СГ у порівнянні до навантаження на 57,18 %. Коефіцієнт СГ складає $THD_I = 7,09\%$. Це гірші показники при роботі САФ у режимі фільтрації, чим у режимі компенсації-фільтрації.

Також додатково оцінені енергетичні показники такі як: активна потужність СГ і навантаження та реактивна потужність СГ і навантаження. Дані занесені до табл. 1. Умовні позначення по аналогії з рис. 3.

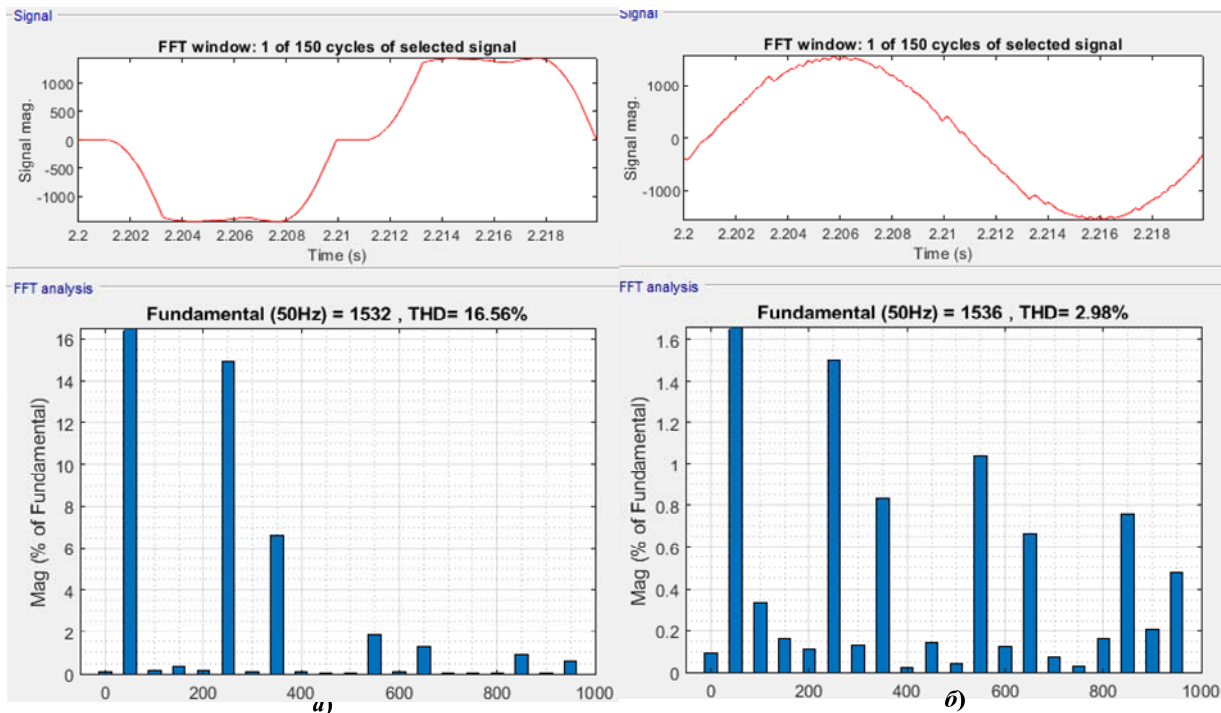


Рисунок 7. Графік і спектральний склад струму: а) навантаження і б) СГ

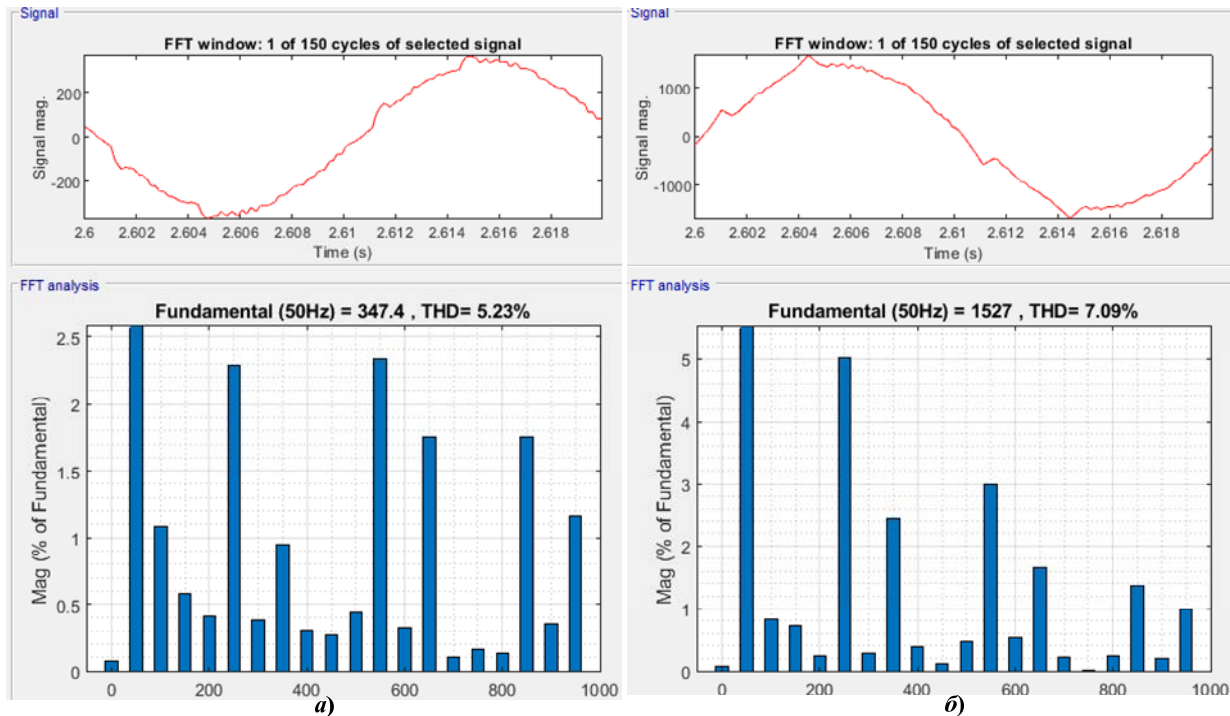


Рисунок 8. Графік і спектральний склад СГ: а) напруги і б) струму при роботі САФ у режимі компенсації-фільтрації

Таблиця 1. Показники потужності автономної системи електропостачання з паралельним підключенням САФ

При $t = 1,4$ с СГ+RL				
фаза	$P_{ld}, \text{Вт}$	$Q_{ld}, \text{ВАр}$	$P_g, \text{Вт}$	$Q_g, \text{ВАр}$
A	211600	-98800	-211600	98800
B	206300	-97990	-206300	97990
C	207900	-97590	-207900	97590
При $t = 1,8$ с СГ+RL+САФ-q				
фаза	$P_{ld}, \text{Вт}$	$Q_{ld}, \text{ВАр}$	$P_g, \text{Вт}$	$Q_g, \text{ВАр}$
A	207900	-103200	-208800	103500
B	205400	-103400	-210200	103200
C	208900	-103500	-210200	103500
При $t = 2,4$ с СГ+RL-RC+САФ-q				
фаза	$P_{ld}, \text{Вт}$	$Q_{ld}, \text{ВАр}$	$P_g, \text{Вт}$	$Q_g, \text{ВАр}$
A	220200	-109300	-221500	108000
B	220700	-109000	-221800	108000
C	221200	-109200	-221200	108000
При $t = 2,8$ с СГ+RL-RC+САФ-Q				
фаза	$P_{ld}, \text{Вт}$	$Q_{ld}, \text{ВАр}$	$P_g, \text{Вт}$	$Q_g, \text{ВАр}$
A	256300	-128000	-261500	-11370
B	256100	-127900	-259000	-11140
C	252400	-128700	-267500	-11030

Слід відмітити, що у перших варіантах експерименту дотримується баланс активної і реактивної потужності між: СГ – нелінійне навантаження, СГ – нелінійне навантаження – силовий активний фільтр. Але слід відмітити, що САФ працює у режимі фільтрації вищих гармонік струму. У четвертому варіанті експерименту порушується баланс активної і реактивної потужності при її перетіканні між СГ – нелінійне навантаження – силовий активний фільтр. Це пов'язано з тим, що САФ (у режимі компенсації-фільтрації) і СГ одночасно впливають на основну гармоніку складової реактивної потужності (визначається методом інтегрування).

V. ВИСНОВКИ

При роботі СГ з регулюванням напруги збудження на нелінійне навантаження погіршуються показники якості електроенергії, зокрема спотворюється синусоїдальність напруги ($THD_U = 7,42$ %) і доцільним є застосування САФ, що покращує показники напруги і струму СГ на 55,26 %, 81,18 %.

Так як з автоматичним регулюванням напруги збудження СГ виконується відповідне регулювання реактивної потужності по основній гармоніці, тому більш ефективним є застосування САФ тільки у режимі фільтрації вищих гармонік струму. Це покращує його роботу і при цьому знижується THD_U на 25,74 %, а THD_I на 24 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Чередник, Н.Г. Дослідження режиму синхронного генератора когенераційної установки при паралельній та автономній роботі з урахуванням явища насичення магнітної системи генератора / Н.Г. Чередник, О.В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: Національний університет "Запорізька політехніка", 2016. – № 1. – С. 49–56.

[2] Бялобржеський, О.В. Автоматизовані системи керування в електроенергетиці: навчальний посібник. / О.В. Бялобржеський, Н.Г. Чередник. – Кременчук, ПП Щербатих О. В., 2016. – 204 с.

[3] Бересин, О.О. Особливості побудови випробувальної станції синхронних генераторів, що працюють зі змінною частотою обертання / О.О. Бересин, А.О. Бойко, С.М. Радімов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса: Одеський національний політехнічний університет, 2012. – № 7. – С. 42-46.

[4] Котеленец, Н.Ф. Способ и устройство синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью / Н.Ф. Котеленец, А.В. Богачев, Е.В. Ежов // Электричество. – 2014. – №4. – С. 50-54.

[5] Фролов, М.Ю., Фишов А.Г. "Идентификация электрических параметров синхронного генератора при включении в распределительную сеть" / Фролов, М.Ю., Фишов А.Г. / Проблемы региональной энергетики, no. 1 (33), 2017, pp. 32-39.

[6] Vlasenko R. Analysis of Three-Phase Parallel Active Power Filter Operation Mode With Arc Furnace Active Power's Fluctuations / R. Vlasenko, O. Bialobrzheskyi, A. Gladyr // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems. Conference proceedings. September. – 2018. – pp. 80-84. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559547.

[7] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/mechanical-coupling-of-synchronous-generator-with-exciter-system.html#d117e20163.htm>

[8] Вайнштейн, Р.А. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся и переходных процессов: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 114 с.

[9] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных – СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

[10] Akagi, H., Watanabe, E. H., Aredes, M. Instantaneous Power Theory And Applications To Power Conditioning, Wile-IEEE Press., 2007. – 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.

- [11] Tugay, D. Three theorems of the instantaneous power theory. /Tugay, D., Zhemerov, G., Korneliuk, S., & Kotelevets, S. // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, 289-294. doi:10.1109/UKRCON.2019.887990
- [12] Агунов, А. В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах / А. В. Агунов - СПб. : СПбГМТУ, 2009. – 134 с.
- [13] Власенко, Р.В. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму / Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: Національний університет "Запорізька політехніка", 2014. – № 2. – С. 20-27. DOI: 10.15588/1607-6761-2014.
- [14] Zagirnyak, M. Analysis of operation of power components compensation systems at harmonic distortions of mains supply voltage /Zagirnyak, M. Maliakova, M. Kalinov, A. // Paper presented at the Joint International Conference - ACEMP 2015: Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, OPTIM 2015: Optimization of Electrical and Electronic Equipment and ELECTROMOTION 2015: International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, 2016 - pp. 355-362. DOI:10.1109/OPTIM.2015.7426958
- [15] Власенко, Р.В. Вплив потужності спотворення на параметри елементів силової частини трифазного силового активного фільтра / Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2019. – № 1. – С. 14-19. DOI: 10.30929/1995-0519.2019.1.14-19.
- [16] Burlaka, V. V. Residential uninterruptible power supply system with renewable energy sources and battery pack. / Burlaka, V. V., Podnebennaya, S. K., & Gulakov, S. V. // Paper presented at the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2018 - Proceedings, 2018 – pp. 125-128. doi:10.1109/IEPS.2018.8559498

Стаття надійшла до редакції 18.05.2020

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА АВТОНОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

ВЛАСЕНКО Р.В. ассистент, ассистент кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: ruslan.vlasenko@i.ua;

БЯЛОБРЖЕСКИЙ А.В. к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

Цель работы. Целью статьи исследование режимов работы трехфазного силового активного фильтра в составе автономной электрической сети при подключении к сети трехфазной нелинейной нагрузки различного спектрального характера.

Методы исследования. Для проведения исследований использовались положения р-q-теории мощности, теория электрических цепей, теория автоматического управления, математическое моделирование в пакете Matlab.

Полученные результаты. Получено графики и спектральный состав напряжения сети, тока нагрузки, что позволяет оценить эффективность применения силового активного фильтра в режиме фильтрации в составе автономной электрической сети, которая представляет собой синхронный генератор.

Научная новизна. Доказана эффективность параллельной работы силового активного фильтра в режиме фильтрации с синхронным генератором при резкопеременной нелинейной нагрузке.

Практическая ценность. Использование предложенной методики позволит создать трехфазный силовой активный фильтр для применения его в автономных электрических сетях, представленных синхронным генератором с автоматическим регулированием напряжения возбуждения.

Ключевые слова: силовой активный фильтр, р-q-теория мощности, синхронный генератор, качество электрической энергии, нелинейная нагрузка.

THE INFLUENCE OF NONLINEAR LOAD ON THE AUTONOMOUS ELECTRICAL NETWORK AT PARALLEL WORK OF THE ACTIVE POWER FILTER

VLASENKO R.V. Assistant department of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: ruslan.vlasenko@i.ua;

BIALOBRZYESKYI O.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the technical science department of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

Purpose. The purpose of the article is to investigate the modes of operation of a three-phase active power filter in the composition of an autonomous electrical network when connected to a network of three-phase nonlinear load of different spectral character.

Methodology. For the research, the provisions of the pq-theory of power, the theory of electrical circuits, the theory of automatic control, mathematical modeling in the Matlab package were used.

Findings. The graphs and spectral composition of the mains voltage and load current have been obtained, which makes it possible to evaluate the effectiveness of using a power active filter in the filtration mode as part of an autonomous electrical network, which is a synchronous generator.

Originality. The efficiency of the parallel operation of a power active filter in the filtration mode with a synchronous generator at an abruptly variable nonlinear load is proved.

Practical value. The use of the proposed technique will make it possible to create a three-phase power active filter for its use in autonomous electrical networks, represented by a synchronous generator with automatic regulation of the excitation voltage.

Keywords: active power filter, pq-theory power, synchronous generator, electrical energy quality, non-linear load.

REFERENCES

- [1] Cherednyk, N.G., Bialobrzzeski, O.V. (2016). Doslidgen'ya regymu synhron'ogo generator kogeneratchiynoyi ustanovky pry paralelniy ta avtonomniy roboti z urahuvan'yam yavyscha nasychen'ya magnitnoyi systemy generatora [The study of the mode of synchronous generator cogeneration unit in parallel and autonomous work considering the phenomenon of magnetic saturation of generator system]. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 1, 49-56.
- [2] Bialobrzzeski, O.V., Cherednyk, N.G. (2016). Avtomatyzovani systemy keruvan'ya v elektroenergetychni [Automated control systems in power engineering]. Kremenchuk, *PP Scherbatyh O.V.*, 204.
- [3] Beresyn, O.O., Boyko, A.O., Radimov, S.M. (2012). Osoblyvosti pobudovy vyprobuval'noyi stantchiyi synhron'yh generatoriv, scho pratchyu't' zi zmin'oyu chastotoyu obertan'ya [Features of construction of the proof-of-compliance test station for variable speed synchronous generators]. *Electrotechnic and computer systems*, 7(83), 42-46.
- [4] Kotelenets, N.F., Bogachev, A.V., Ezhov, E.V. (2014). The method and apparatus of synchronization excited synchronous generator with the network, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 50– 54.
- [5] Frolov, M.Yu., and Fishov, A.G. (2017). Identifikatsiya elektricheskikh parametrov sinkhronnogo generat-tora pri vklyuchenii v raspre-delitel'nyuy set' [Identification of electrical parameters of a synchronous generator when connected to the distribution network] *Problems of the regional energetics*, no. 1 (33), pp. 32-39.
- [6] Vlasenko, R., Bialobrzzeski, O., and Gladyr, A. (2018). Analysis of three-phase parallel active power filter operation mode with arc furnace active power's fluctuations, 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, pp. 80-84, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559547.
- [7] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/mechanical-coupling-of-synchronous-generator-with-exciter-system.html#d117e20163.htm>
- [8] Vaynshteyn, R.A. (2010). Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh sistem v raschetah ustanovivshih-sya i perehodnykh protsessov [Mathematical models of electric power systems elements in the calculation of steady-state and transient], Tomsk, Russia, 114 p.
- [9] Chernyih, I.V. (2008). Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink], SPbSMTU, Sankt-Peterburg, Russia, 288p.
- [10] Akagi, H., Watanabe, E. H., Aredes, M. Instantaneous Power Theory And Applications To Power Conditioning, Wile-IEEE Press., 2007. – 379 p. ISBN 978-0-470-10761-4.
- [11] Tugay, D., Zhemerov, G., Korneliuk, S., &

- Kotelevets, S. (2019). Three theorems of the instantaneous power theory. Paper presented at the 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, 289-294. doi:10.1109/UKRCON.2019.887990
- [12] Agunov, A. V. (2009). Upravlenie kachestvom electrenergiyi pri nesinusoidal'nyh rezhymah [Power quality management with non-sinusoidal modes], SPbSMTU, Sankt-Peterburg, Russia, 134p.
- [13] Vlasenko, R.V., Bialobrzheski, O.V. (2014). Porivnyan'ya metodiv kompensatchiyi neaktyvnoyi potugnosti tryfaznym sylovym aktyvnym fil'trom z adaptivnym releynym regulyatorom strumu [Adaptive control of current controller relay for three-phase active power filter]. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2, 20-27.
- [14] Zagirnyak, M., Maliakova, M., and Kalinov, A. (2016). Analysis of operation of power components compensation systems at harmonic distortions of mains supply voltage, Paper presented at the Joint International Conference - ACEMP 2015: Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, OPTIM 2015: Optimization of Electrical and Electronic Equipment and ELECTROMOTION 2015: International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, pp. 355-362. DOI:10.1109/OPTIM.2015.7426958
- [15] Vlasenko, R.V., Bialobrzheski, O.V. (2019). Vplyv potugnosti spotvoren'ya na parametry elementiv sylovoyi chastyny tryfaznogo sylovogo aktyvnogo fil'tra [The influence of the distortion power on the parameters of the power components of a three-phase active power filter]. *Scientific journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"*, 1(114), 14-19.
- [16] Burlaka, V. V., Podnebennaya, S. K., and Gulakov, S. V. (2018). Residential uninterruptible power supply system with renewable energy sources and battery pack. Paper presented at the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2018 - Proceedings, pp. 125-128. doi:10.1109/IEPS.2018.8559498