

УДК 621.316.727

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ
ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИМ ПРИСТРОЄМ**

С.А. СТЕПЕНКО, О.О. ГУСЕВ, С.А. ІВАНЕЦЬ, О.А. ВЕЛІГОРСЬКИЙ

Чернігівський державний технологічний університет

В даній статті розглянуто роботу паралельного трифазного фільтро-компенсуючого пристрою при різних методах керування – з постійною тривалістю комутації силових вентилів та з використанням широтно-імпульсної модуляції. Проведено порівняння якості фазного струму та втрат потужності при кожному методі керування. Отримано залежності коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта гармонічних спотворень фазного струму від частоти комутації силових вентилів.

Проблема забезпечення якості електричної енергії є надзвичайно актуальною, адже кількість нелінійних навантажень щорічно збільшується, а їх використання призводить до появи у спектрі напруги та струму вищих гармонік. Наявність вищих гармонік негативно впливає на обладнання, призводить до перегріву провідників і виходу з ладу елементів системи. Тому в даний час встановлюються жорсткі вимоги не лише до рівня реактивної потужності за основною гармонікою, але й до загального спектрального складу напруги і струму [1]. Необхідність забезпечення компенсації реактивної потужності як основних, так і неосновних гармонік обумовлює використання різноманітних фільтро-компенсуючих пристроїв (ФКП) [2, 3], які потребують спеціальних, досить складних алгоритмів керування.

Об'єкти та методи дослідження

На даний час відомі роботи [4-7], де розглядаються різні алгоритми керування фільтро-компенсуючими пристроями. Однак слід зауважити, що в цих роботах, на жаль, не проводилася паралельна оцінка ефективності алгоритмів за такими двома важливими параметрами, як коефіцієнт гармонічних спотворень (total harmonic distortion – THD) фазного струму та коефіцієнт корисної дії (ККД) досліджуваного фільтро-компенсуючого пристрою.

Наприклад, в [7] при моделюванні та аналізі роботи ФКП було встановлено, що збільшення частоти комутації силових вентилів призводить до більш якісної компенсації фазного струму (зниження THD). В роботі зазначалося, що підвищення частоти комутації силових вентилів у реальних системах імовірно призводитиме до зниження коефіцієнта корисної дії, однак якісна та кількісна оцінка такого впливу не проводилася.

Постановка завдання

Метою даної роботи є оцінка ефективності паралельного трифазного фільтро-компенсуючого пристрою при різних методах керування: з постійною тривалістю комутації силових вентилів та з використанням принципу широтно-імпульсної модуляції.

Результати та їх обговорення

В електротехнічних системах, де використовуються фільтро-компенсуючі пристрої, можливі різноманітні варіанти їх розміщення. Зокрема, підключення ФКП до мережі живлення може бути здійснено послідовно або паралельно з навантаженням. В залежності від варіанту підключення ФКП

називають послідовним або паралельним відповідно. У даному випадку для оцінки ефективності розглядалася система з паралельним ФКП (рисунок 1).

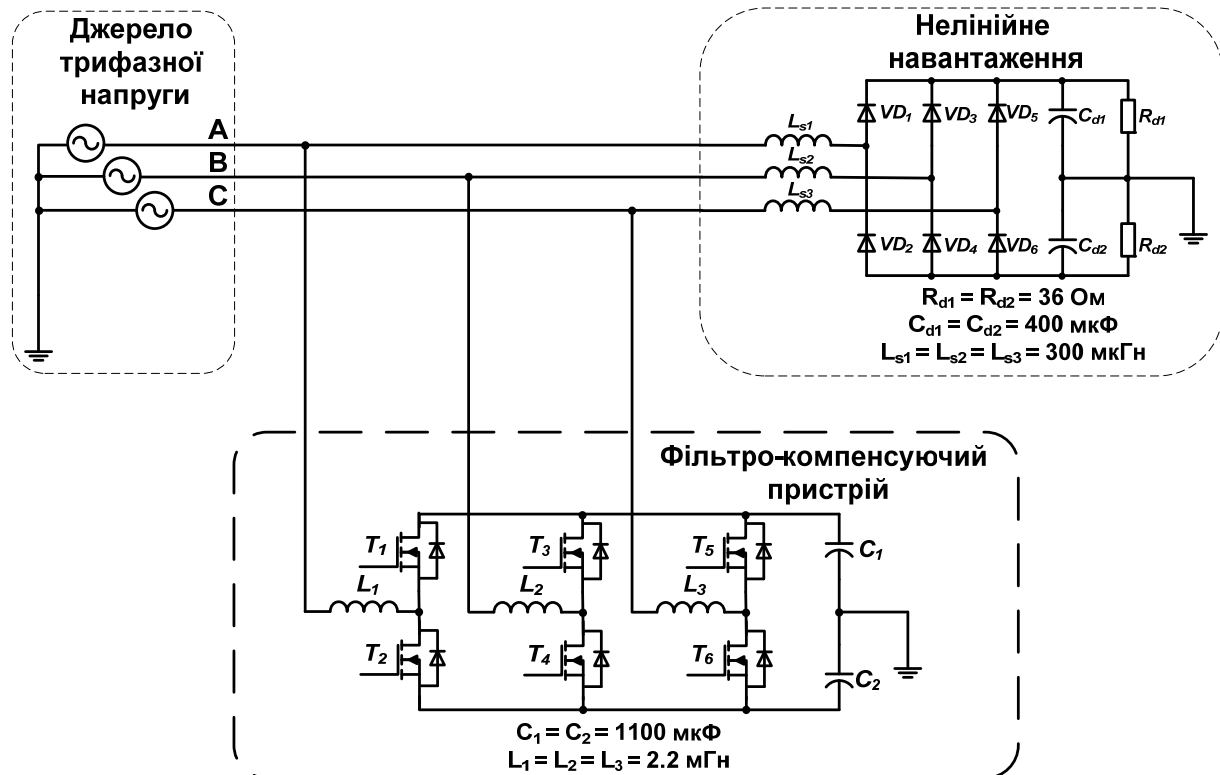


Рис. 1. Система з паралельним ФКП

В даній роботі при дослідженні ФКП використовувалось ідеальне джерело трифазної синусоїдальної напруги з нульовим проводом. Діюче значення фазної напруги $V = 220 \text{ В}$.

В якості нелінійного навантаження використовувався трифазний випрямляч (схема Ларіонова) з активно-ємнісним навантаженням, активна потужність якого:

$$P_a = 2 \cdot \frac{V_H^2}{R_H} = 2 \cdot \frac{283^2}{36} = 4450 \text{ Вт.} \quad (1)$$

Коефіцієнт гармонічних спотворень фазного струму при такому навантаженні $\text{THD} = 160 \%$. Максимальна швидкість наростання струму в навантаженні у номінальному режимі $I'_m = 80 \text{ кА/с}$.

Паралельно з навантаженням встановлено фільтро-компенсуючий пристрій, задача якого – максимально наблизити форму фазного струму до синусоїдальної.

Параметри пасивних елементів (ємності C_1 , C_2 та дроселі L_1 , L_2 , L_3), які слугують для накопичення і віддачі енергії, розраховані за методикою [7]:

$$L_1 = L_2 = L_3 = \frac{V_C - V_m}{I'_m} = \frac{490 - 310}{80000} = 0,0022 = 2,2 \text{ мГн,} \quad (2)$$

$$C_1 = C_2 = \frac{4 \cdot \gamma \cdot Q_m}{K \cdot V_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_m} = \frac{4 \cdot \frac{1}{12} \cdot 310 \cdot 49}{0,1 \cdot 490 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 310} = 0,0011 = 1100 \text{ мкФ.} \quad (3)$$

У формулах (2) і (3):

L_1, L_2, L_3 – індуктивності ФКП, встановлені у фазах;

V_c – напруга на ємностях;

V_m – амплітуда фазної напруги;

I'_m – максимальна швидкість наростання струму навантаження, $I'_m = \Delta I / \Delta t$;

ΔI – амплітуда наростання струму в навантаженні;

Δt – час наростання струму в навантаженні;

C_1, C_2 – ємності ФКП, на яких побудовано джерело напруги;

γ – відносна тривалість пульсацій реактивної потужності;

Q_m – амплітуда пульсацій реактивної потужності;

K – коефіцієнт пульсацій напруги на ємності;

f – частота мережі.

Рівень напруги на ємностях C_1, C_2 регулюється транзисторними ключами $T_1 \dots T_6$ (рисунок 1), в ролі яких виступають MOSFET. Схематичне позначення використаного MOSFET та його модель з чисельними значеннями параметрів наведено на рисунку 2.

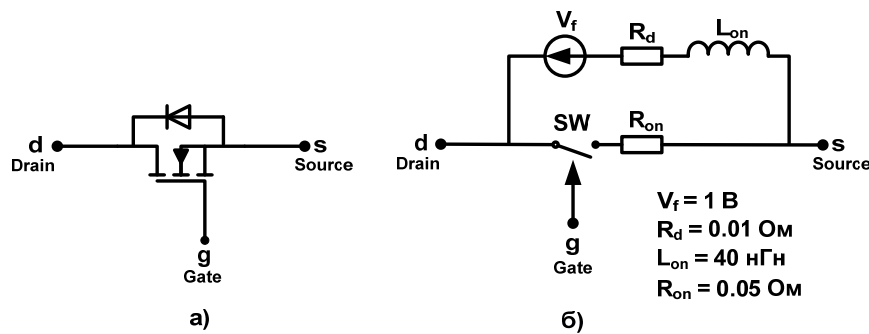


Рис. 2. Схематичне позначення (а) та модель (б) MOSFET

Для керування транзисторними ключами використовуються два методи. В основі кожного методу лежить порівняння значення опорного струму компенсатора, що формується на основі P-Q-теорії миттєвої потужності, зі значенням фазного струму в даний момент часу.

При використанні першого методу керування (без ШІМ) перемикання силових вентилів проводились у фіксовані моменти часу зі сталою частотою і максимальною тривалістю відкритого стану транзистора. Номінальна частота роботи тактового генератора в даному випадку 75 кГц.

При використанні другого методу (з ШІМ) тривалість інтервалу часу відкритого стану транзистора пропорційна амплітуді похибки встановлення струму компенсатора. При цьому збільшується фактична кількість перемикань транзисторних ключів, що може призвести до більших втрат енергії у ФКП.

Моделювання процесів роботи фільтро-компенсуючого пристрою з системою керування проводилося в середовищі MATLAB Simulink. На рисунках 3 і 4 наведено результати моделювання роботи системи при керуванні силовими вентилями без ШІМ і з ШІМ відповідно. На цих рисунках:

V_s – фазна напруга;

I_L – струм навантаження;

I_{fA}, I_{fB}, I_{fC} – струми у фазах;
 I_C – струм компенсатора.

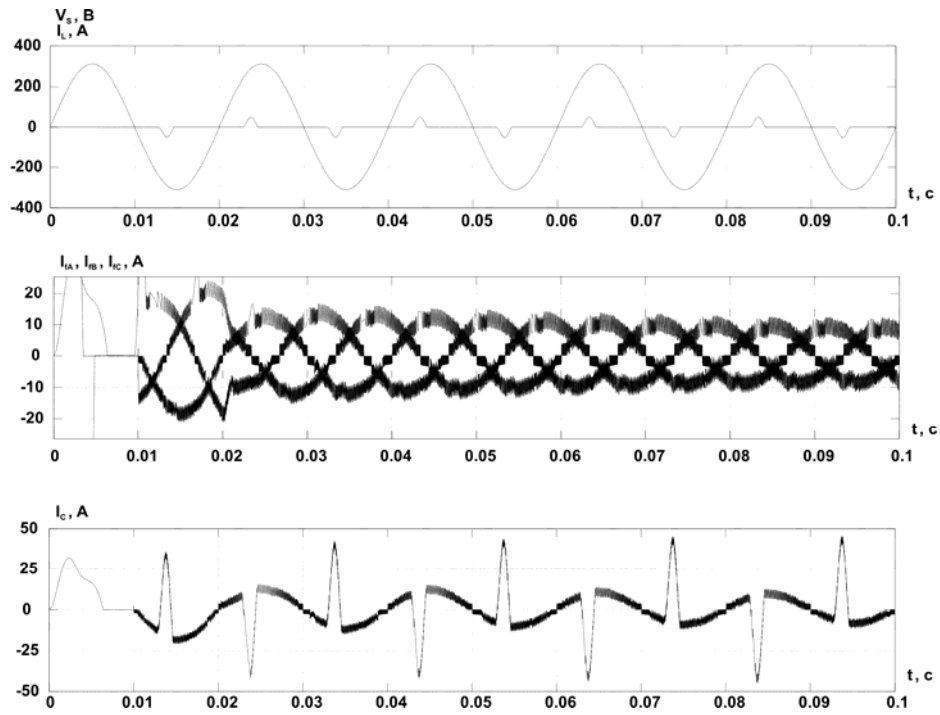


Рис. 3. Часові діаграми роботи ФКП при керуванні без ШІМ

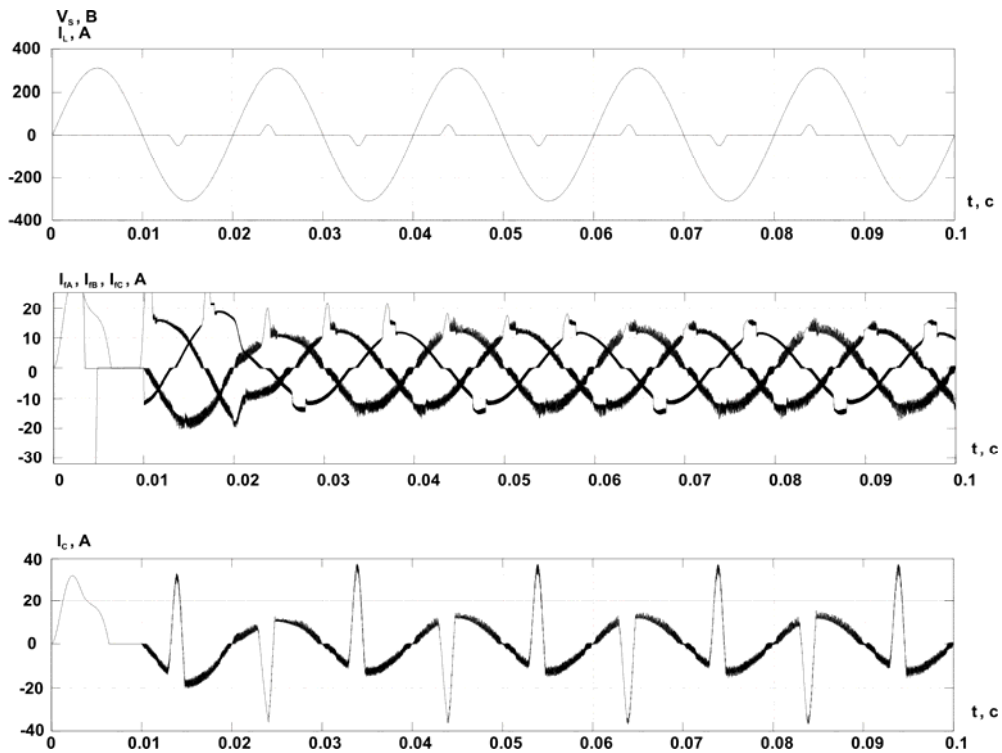


Рис. 4. Часові діаграми роботи ФКП при керуванні з ШІМ

За результатами моделювання видно, що фазні струми за формою наближаються до синусоїдальних, однак помітно відрізняються при кожному методі керування. Якість фазного струму оцінимо за коефіцієнтом гармонічних спотворень [8].

Наприклад, для частоти 75 кГц при роботі системи керування без ШІМ коефіцієнт гармонічних спотворень фазного струму складає 15,0%, а при використанні ШІМ – 12,6%.

На рисунку 5 показано отримані графічні залежності THD від частоти опорного генератора при різних методах керування. Видно, що криві подібні за формою, однак THD фазного струму при використанні ШІМ на кілька відсотків нижче, ніж при використанні методу без ШІМ.

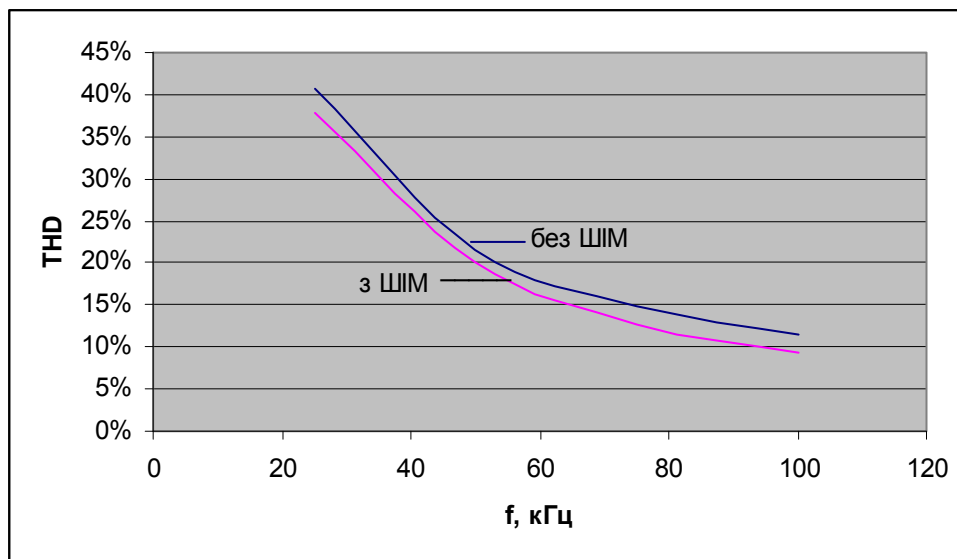


Рис. 5. Залежність коефіцієнта гармонічних спотворень фазного струму від частоти комутації

За отриманими при моделюванні значеннями середніх втрат потужності на силовому вентилі оцінимо значення ККД для кожного методу при різних частотах опорного генератора. Вважаючи, що основні втрати потужності відбуваються на силових вентилях, ККД оцінюється за формулою (4):

$$\eta = \frac{P_a}{P_a + 6 \cdot \Delta P}, \quad (4)$$

де P_a – корисна активна потужність, що віддається у навантаження, розрахована за формулою (1), ΔP – середні втрати потужності на силовому вентилі.

На рисунку 6 показано отримані графічні залежності ККД від частоти опорного генератора при різних методах керування.

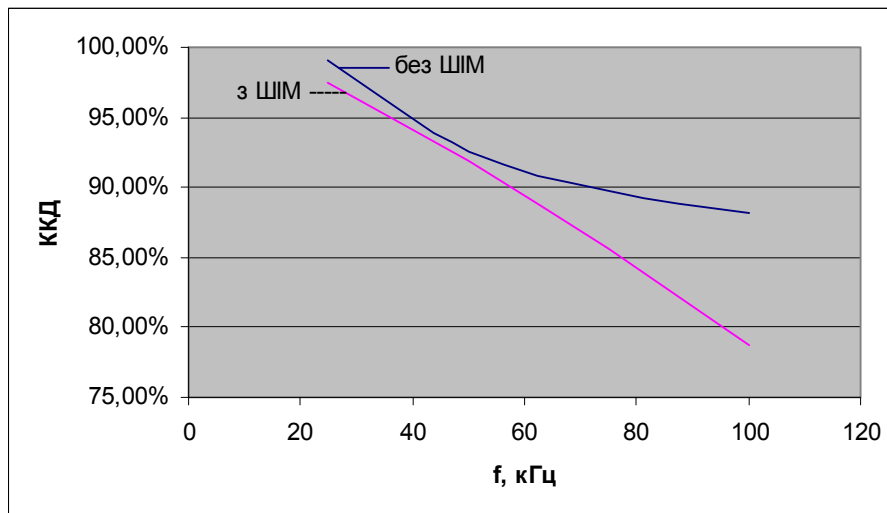


Рис. 6. Залежність коефіцієнта корисної дії від частоти комутації

Видно, що при збільшенні частоти комутації для системи з ШІМ коефіцієнт корисної дії зменшується майже лінійно і на частоті 100 кГц становить менше 80%, в той час, як для системи без ШІМ вигляд кривої залежності відрізняється – зниження ККД відбувається повільніше.

На частоті 75 кГц ККД фільтро-компенсуючого пристрою при роботі без ШІМ в системі керування складатиме 89,7%, а при використанні ШІМ – 85,6%. Зниження ККД при використанні ШІМ можна пояснити наявністю додаткових втрат потужності при перемиканні силових вентилів.

Зниження частоти призводить до зменшення втрат потужності, а отже до збільшення ККД. В той же час, при зниженні частоти опорного генератора знижується якість компенсації, а отже – погіршується якість фазного струму (коефіцієнт гармонічних спотворень зростає).

Висновки

В даній роботі в результаті порівняльного аналізу було встановлено взаємозв'язок між якістю компенсації фазного струму (за параметром ТНД) і втратами електричної енергії (за параметром ККД) у фільтро-компенсуючому пристрої при різних алгоритмах керування силовими ключами.

Показано, що використання ШІМ при комутації силових вентилів дозволяє отримати на 2-3% нижчий ТНД у порівнянні з методом без ШІМ. В той же час при використанні методу з ШІМ на вищих частотах комутації (понад 50 кГц) значно більші втрати потужності (ККД близько 78%), ніж при використанні методу без ШІМ (ККД близько 88%).

Таким чином, можна стверджувати, що при використанні ШІМ відбувається незначне покращення якості компенсації при незначному зниженні ККД. На вищих частотах використання ШІМ є невиправданим, оскільки ККД в цьому випадку на 10% нижче. При цьому коефіцієнт гармонічних спотворень фазного струму знижується не значно (лише на 2%) у порівнянні з системою без ШІМ.

ЛІТЕРАТУРА

1. IEEE Std 519-1992. American National Standard. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.

2. Akagi H. Trends in active power line conditioners. / Hirofumi Akagi // IEEE Trans. on Power Electronics. – 1994. – Vol. 9. – №3 – P. 263–268.
3. Akagi H., Modern Active Filters and traditional passive filters / H. Akagi // Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical sciences. – 2006. – № 3. – P. 255–269.
4. Montero M.I.M. Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems / M.I.M. Montero, E.R. Cadaval, F. B. Gonzalez // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006 – Vol. 22. – № 1. – P. 229 –236.
5. Morán L.A Three-Phase Active Power Filter Operating with Fixed Switching Frequency for Reactive Power and Current Harmonic Compensation / L. Morán, J. Dixon, R. Wallace // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 42. – № 4. – P. 402–408.
6. Wojciechowski D. Novel Predictive Control of 3-Phase LCL-based Active Power Filter / D. Wojciechowski // Compatibility and Power Electronics CPE2009, IEEE. – 2011. – P. 298 – 305.
7. Іванець С.А. Методика вибору елементів фільтро-компенсуючого перетворювача / С.А. Іванець, О.О. Гусев, А.І. Чуб // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2009. – №40 – с. 223–232.
8. IEC 61000–3–12 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3–12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase, 2004.