

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.316.722

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310686

© Чорна В.О.¹, Кудряшов О.О.²

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАСИВНОГО ТА АКТИВНОГО ФІЛЬТРІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК В МЕРЕЖІ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Наявність нелінійного навантаження, підключеного до мережі електроживлення, викликає викривлення синусоїдальної форми кривих струму та напруги, призводячи до виникнення вищих гармонік. Вищі гармоніки призводять до перевантаження та перегріву обладнання, зниження надійності та зменшення терміну його експлуатації, здатні здійснювати негативний вплив на якість електричної енергії. В рамках завдання щодо забезпечення надійності електричних мереж важливим завданням є контроль рівня гармонійних складових та застосування спеціальних пристроїв для мінімізації їх впливу. Для боротьби з вищими гармоніками в електричних мережах роблені та використовують різні пристрої, до яких відносяться лінійні дроселі, пасивні фільтри, активні фільтри. Вибір конкретного пристрою залежить від параметрів електромережі, типу та характеристик підключеного навантаження, рівня гармонійних складових, вимог до якості електричної енергії. Лінійні дроселі здатні знижувати рівень гармонік в електромережі, але, маючи ряд недоліків, потребують додаткового обґрунтування при прийнятті рішення про їх застосування. Пасивний фільтр має контур, що складається з дроселя, резистора та ємності, може мати різні конфігурації та налаштовується на частоту конкретної гармоніки для пригнічення її впливу. Пасивні фільтри більш ефективні в боротьбі з вищими гармоніками, генерованими нелінійним навантаженням, економічніші та простіші в обслуговуванні, але мають обмежений діапазон частот, фіксовані параметри та значні масогабаритні розміри, що обмежує коло їх використання. Активні фільтри мають у своєму складі активні компоненти для генерування сигналів, протифазних гармонійним складовим, завдяки чому компенсують вищі гармоніки. Активні фільтри більш гнучкі, здатні до корекції викривлених та формування сигналів, є значно ефективнішими за дроселі та пасивні фільтри, але менш економічно привабливі та більш енергоємні. В представленій роботі досліджені пасивний шестиланковий LC-фільтр та шунтуючий активний фільтр на основі принципу миттєвої компенсації активного та реактивного струмів. В активному фільтрі компенсація гармонійних викривлень забезпечується пропорційно-інтегральним регулятором. В роботі проведено імітаційне моделювання пасивного та активного фільтрів у складі електротехнічного комплексу термічної обробки металів, проаналізовані отримані результати компенсації гармонійних викривлень.

Ключові слова: електрична мережа, активний фільтр, пасивний фільтр, гармоніка, моделювання, компенсація.

V.O. Chorna, O.O. Kudryashov. Comparative analysis of the effectiveness of passive and active filters of higher harmonics as part of the electrical complex of metal heat treatment. The presence of a nonlinear load connected to the power supply network causes a

¹ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3641-4152, chornajav@gmail.com

² магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, menetors@gmail.com

distortion of the sinusoidal shape of the current and voltage curves, resulting in higher harmonics. Higher harmonics lead to overloading and overheating of equipment, reduced reliability and reduced service life, and can have a negative impact on the quality of electricity. As part of the task of ensuring the reliability of power grids, an important task is to control the level of harmonic components and use special devices to minimize their impact. To combat higher harmonics in power grids, various devices have been developed and used, including line chokes, passive filters, and active filters. The choice of a particular device depends on the parameters of the power grid, the type and characteristics of the connected load, the level of harmonic components, and the requirements for the quality of electricity. Linear chokes are capable of reducing the level of harmonics in the power grid, but, having a number of disadvantages, require additional justification when deciding on their use. A passive filter has a circuit consisting of a choke, resistor, and capacitor, can have different configurations, and is tuned to the frequency of a specific harmonic to suppress its effects. Passive filters are more effective in combating higher harmonics generated by nonlinear noise, more economical and easier to maintain, but have a limited frequency range, fixed parameters and significant weight and dimensions, which limits their use. Active filters include active components to generate signals that are out of phase with harmonic components, thus compensating for higher harmonics. Active filters are more flexible, capable of correcting distorted and shaped signals, are much more efficient than chokes and passive filters, but are less cost-effective and more power-consuming. In the presented work, a passive six-link LC filter and a shunt active filter based on the principle of instantaneous compensation of active and reactive currents are investigated. In the active filter, harmonic distortion compensation is provided by a proportional-integral controller. In this paper, we have carried out simulation modeling of passive and active filters as part of an electrical complex for metal heat treatment and analyzed the results of harmonic distortion compensation.

Key words: *electrical network, active filter, passive filter, harmonic, modeling, compensation.*

Постановка проблеми. Зростання встановленої потужності нелінійних, несиметричних і різкозмінних навантажень промислових підприємств є причиною істотного збільшення рівня електромагнітних завад в системі електропостачання. Ці перешкоди, залежно від їх характеру, інтенсивності та тривалості, негативно впливають на силові електроустановки, системи автоматики, релейний захист. У ряді випадків це призводить до зниження надійності електропостачання, збільшення втрат електричної енергії, погіршення якості та зменшення кількості випущеної продукції, що обумовлює практичну значимість проблеми.

Найбільш розповсюдженими в промисловості є нелінійні пристрої, які здатні викривляти форму кривих напруги та струму, генерувати гармонійні складові напруги та струму. Ці явища обумовлені режимами роботи нелінійного обладнання, особливостями його внутрішньої структури та способами управління. Прикладом нелінійного навантаження можуть служити імпульсні перетворювачі (ІП), що здійснюють випрямлення змінного струму живлення в постійний струм, завдяки чому забезпечується ефективне регулювання електричними двигунами технологічних механізмів. Маючи значні переваги, такі як: невеликі масогабаритні розміри, невисока вартість, високий ККД, перетворювач має суттєвий недолік, який полягає в генеруванні імпульсних перешкод. Останні виникають через комутацію ключів силової схеми ІП та являють собою вищі гармонійні складові в сигналах струму та напруги, які поширюються електричною мережею та призводять до різного роду проблем [1]. Вони можуть спричинити перегрів провідників, зокрема нейтралі, особливо при наявності однофазних переключених навантажень; призводити до підвищення температури устаткування та, як наслідок, до його пошкодження; спричинити додаткові втрати енергії та погіршення енергетичної ефективності обладнання; створюючи електромагнітні завади, негативно впливати на обладнання, що отримує електроживлення від даної мережі; створювати перешкоди в телекомунікаційних системах та обладнанні [2, 3]. У зв'язку з цим контроль та компенсація вищих гармонік в електричних мережах з нелінійним навантаженням є

важливими задачами на шляху забезпечення стабільності та ефективності функціонування електроенергетичної системи в цілому.

Для захисту від гармонійних спотворень у мережі живлення використовують пасивні фільтри (ПФ) та активні фільтри гармонік (АФ), які допомагають зменшити або вилучити ці небажані компоненти з електричного сигналу. Порівняльний аналіз пасивних та активних фільтрів є об'єктом дослідження даної наукової роботи, виконаної в рамках підготовки випускної кваліфікаційної роботи.

Метою даної роботи є дослідження на імітаційних моделях ефективності застосування ПФ та АФ для боротьби з гармонійними складовими струму в електричній мережі з нелінійним навантаженням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За більш ніж півстоліття наукових пошуків та досліджень було отримано достатньо теоретичних основ для побудови пристроїв боротьби з негативним впливом, спричиненим наявністю вищих гармонік в електричній мережі. До них відносяться: пасивні фільтри гармонік, активні фільтри потужності, гібридні активні фільтри потужності, кожен з яких має певні переваги та недоліки [4, 5]. В [4-6] наводиться порівняльний аналіз схемотехнічних рішень різних видів пристроїв боротьби з гармонійними складовими струму. Автори проводять порівняльну оцінку енергетичної ефективності та економічної доцільності різних методів боротьби з вищими гармоніками. В дослідженнях дано високу оцінку та ефективність застосування ПФ (в частині витрат на їх встановлення) порівняно з іншими відомими методами. В [4] наведено результати дослідження ефективності роботи ПФ. Для підвищення ефективності ПФ гармонік запропоновано відділити фільтр реактором. В [7] представлені результати дослідження однонаштованого ПФ в системі електропостачання промислового підприємства та важливість правильного вибору елементної бази та налаштування фільтра. В [8, 9] показано переваги АФ порівняно з пасивними, пов'язані з масогабаритними розмірами та більш практичними схемними рішеннями перших, та показана реалізація схеми управління, що базується на р-q теорії миттєвої потужності. В [4] запропоновані алгоритми системи керування АФ потужності. В [10] розглянуто питання управління шунтуючим фільтром активної потужності на основі принципу компенсації d-q. Матеріали, викладені в [10], взяті за основу досліджень, проведених авторами даної наукової праці.

Виклад основного матеріалу. Як відомо, для захисту від гармонійних спотворень у мережі живлення використовують різні прилади, у тому числі лінійні дроселі, пасивні та активні фільтри гармонік, які допомагають зменшити або вилучити ці небажані компоненти з електричного сигналу. Вибір пристрою залежить від параметрів електричної мережі, типу та характеристик підключеного до неї навантаження, рівня гармонійних складових, вимог до якості електричної енергії. Лінійні дроселі здатні знижувати рівень гармонік в електромережі, але мають певні недоліки, тому потребують додаткового обґрунтування при прийнятті рішення про їх застосування. ПФ вищих гармонік встановлюється паралельно до навантаження з метою пригнічення небажаних гармонік в електричній мережі. Він має LC-контур, який налаштовується на частоту конкретної гармоніки для пригнічення її впливу. LC-контур створює резонанс на певній частоті гармоніки. Це призводить до розсіювання струмів цієї гармоніки у вигляді теплової енергії, що означає, що фільтр виводить її з електричної мережі, не допускаючи подальшого розповсюдження. Таким чином, ПФ «відсікає» небажані гармоніки, що дозволяє забезпечити чистий сигнал у мережі. Для пригнічення кількох гармонік доцільно встановити ряд ПФ з паралельним з'єднанням, кожен з яких налаштований на певну частоту гармоніки, формуючи ефективний бар'єр від небажаних гармонік в системі електропостачання.

Принцип роботи АФ полягає в тому, що він аналізує струм основної частоти та ідентифікує гармоніки вищих порядків, які можуть виникати в результаті використання несинусоїдальних навантажень. Після цього фільтр генерує компенсуючий струм і подає його до навантаження. Струм компенсації має протилежну фазу від гармонік, тобто компенсує негативний вплив гармонік шляхом їх анулювання. Цей процес призводить до зниження рівня гармонік у мережі та сприяє наближенню кривої струму до синусоїдальної форми. Аналіз швидкого розкладання Фур'є для різних навантажень показує значуще зменшення показника гармонійних спотворень (THD) вихідного струму [8]. Отже, АФ гармонік здатний компенсувати гармоніки у вихідному струмі, що виникають від імпульсного перетворювача як нелінійного навантаження.

В представленій роботі досліджена система «трифазний імпульсний перетворювач – двигун постійного струму» (ПІ–ДПС). Дослідження проведені на імітаційній моделі, створеній в середовищі Matlab Simulink (рис. 1, а). Модель включає, крім двигуна потужністю 50 к.с. та ПІ на базі тиристорної трифазної мостової схеми, трифазну мережу живлення 6 кВ, силовий трансформатор потужністю 630 кВт, генератор імпульсів для управління перетворювачем, блоки вимірювання напруги та струму.

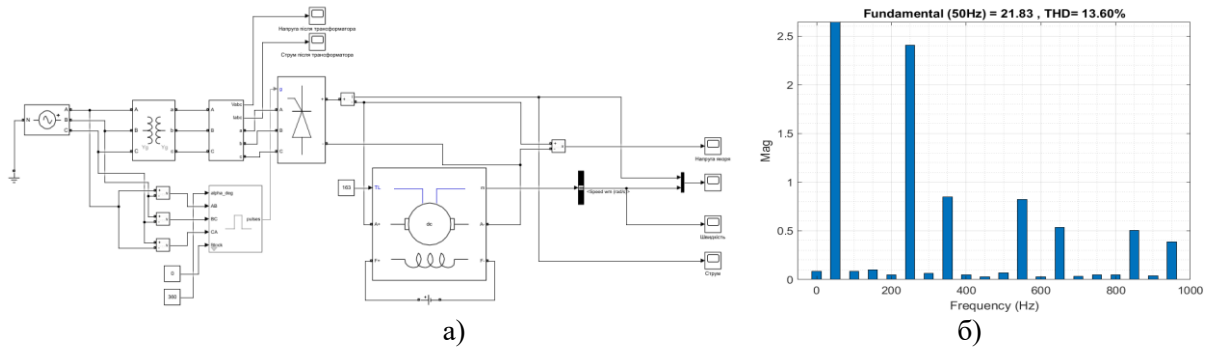


Рис. 1 – Модель системи «ПІ–ДПС» в середовищі MatLab Simulink (а) та результати швидкого розкладу Фур’є струму вищої сторони трансформатора (б)

Результати моделювання, наведені на рис. 2 та рис. 3, свідчать про те, що ПІ спотворює синусоїдальні сигнали напруги (рис. 2) та струму (рис. 3). При цьому спотворення збільшуються зі зміною кута управління ПІ від $\pi/6$ до $\pi/2$, призводячи до збільшення THD на стороні вищої напруги трансформатора до рівня 13,6% (рис. 1, б).

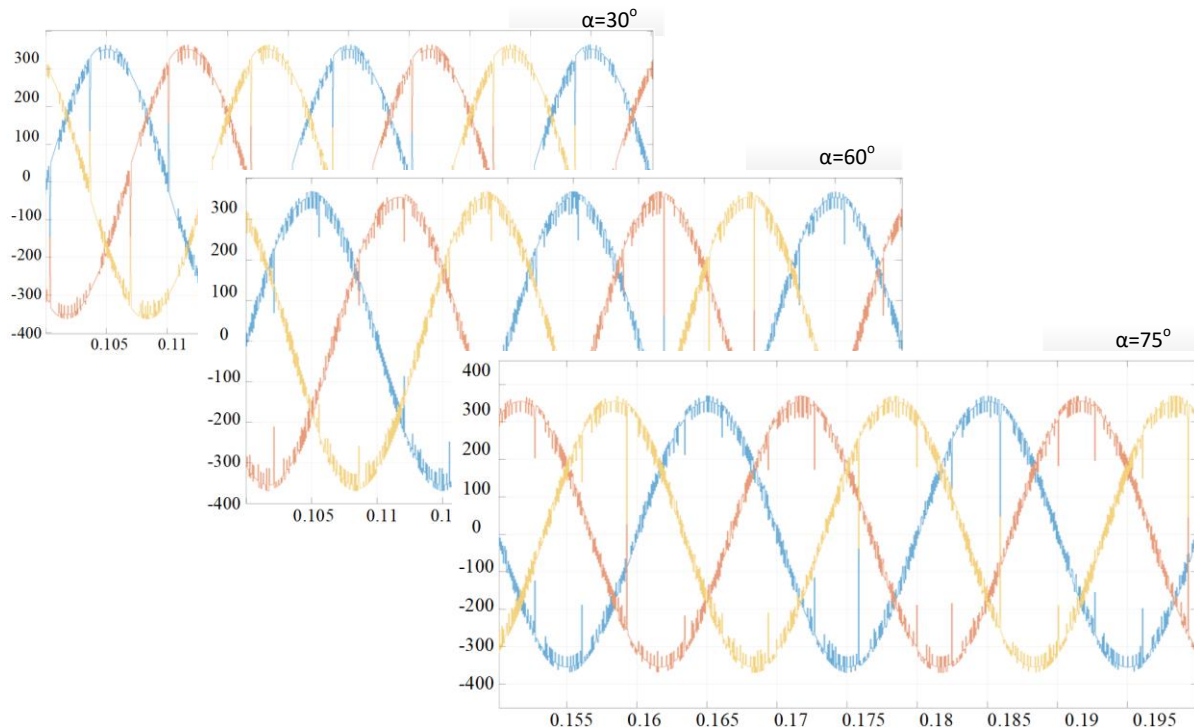


Рис. 2 – Сигнал напруги на перетворювачі

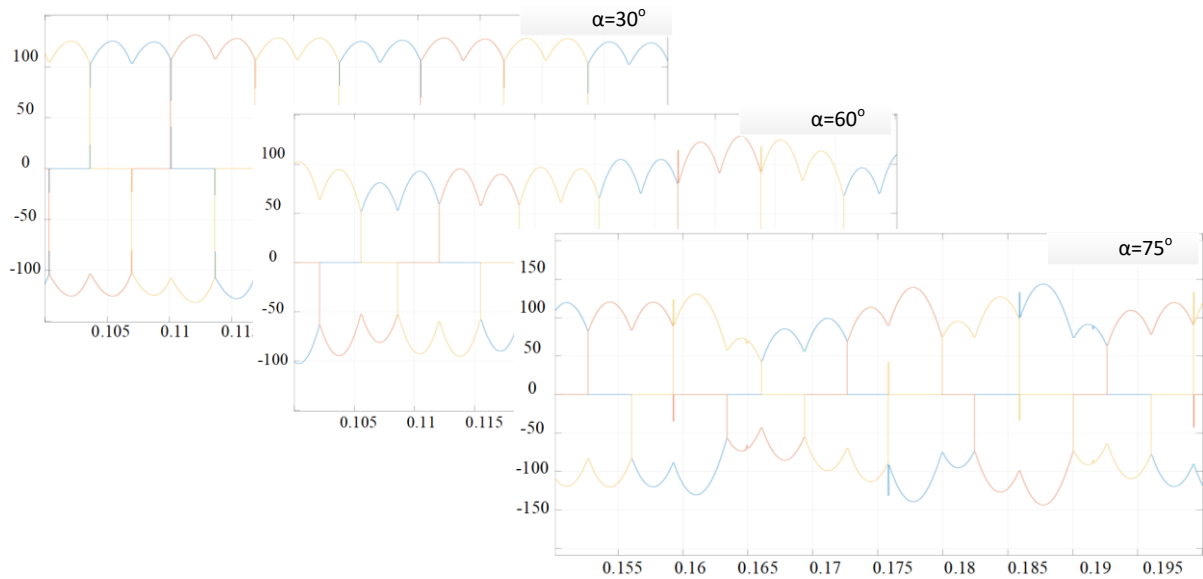


Рис. 3 – Сигнал струму на перетворювачі

В роботі було досліджено ПФ, імітаційна модель якого наведена на рис. 4, а. Фільтр представляє собою 6 блоків (Single tuned Filter), кожен з яких налаштований на компенсацію 5, 7, 11, 13, 17 та 19 гармонік, підключених безпосередньо між мережею живлення та нелінійним навантаженням. Потужність, яку повинен компенсувати кожен з фільтрів розраховується як $Q_n = I_n U_n$, тобто використовуючи значення струмів I_n та наруг U_n n-ої гармоніки. В ході виконання роботи фільтр налаштовувався окремо для кожної з ситуацій. В результаті моделювання вдалось з'ясувати, що ПФ обраної структури дозволяє підвищити ККД до 95-98% та знизити THD₁ до рівня 6,99% (рис. 4, б). При цьому струм фільтра при різних режимах роботи ПП має різну форму, що показано на рис. 5.

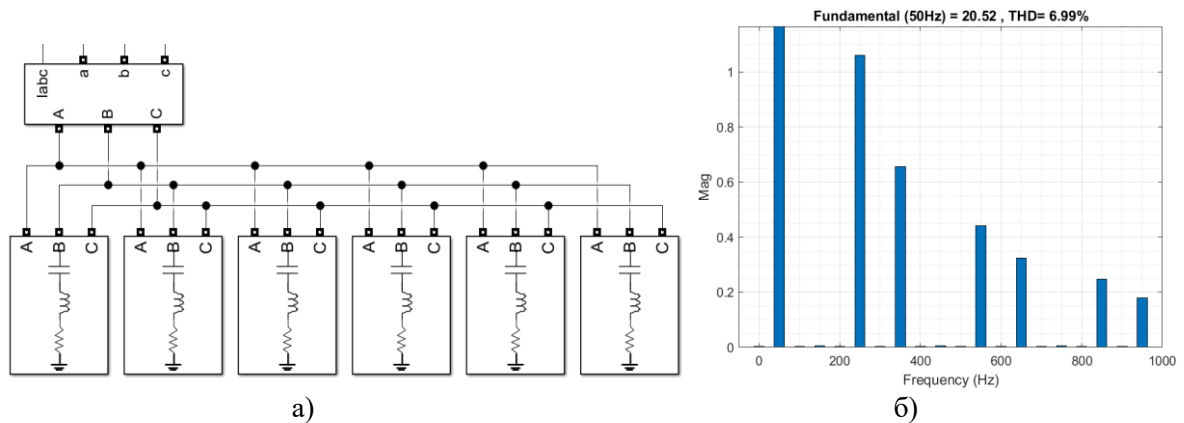


Рис. 4 – Модель ПФ в середовищі Matlab Simulink (а) та результати швидкого розкладу Фур'є струму верхньої сторони трансформатора (б)

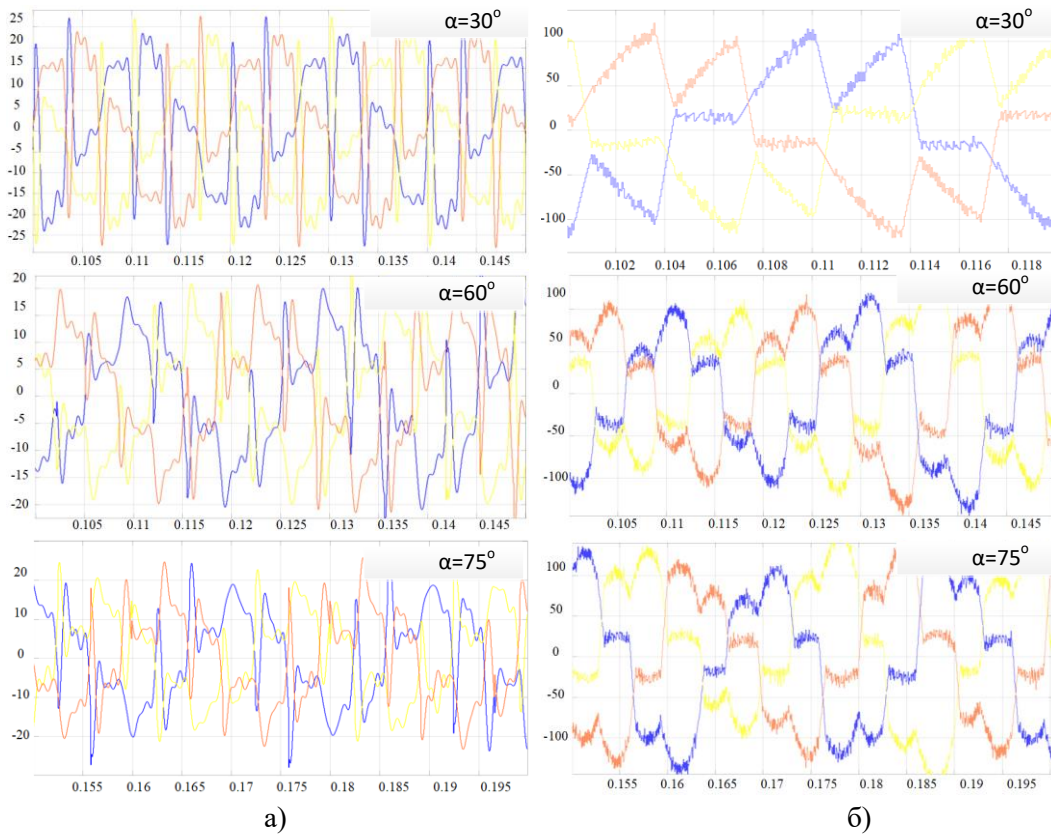


Рис. 5 – Форми кривих струмів ПФ (а) та АФ (б) при різних режимах роботи ІП та компенсації вищих гармонійних складових

Для вивчення процесів, що відбуваються в електромеханічній системі з АФ, в якості останнього було обрано схему фільтра с функцією компенсації вищих гармонік, детально описану в [11]. Схему управління АФ на основі методу d-q теорії миттєвої потужності представлено на рис. 6.

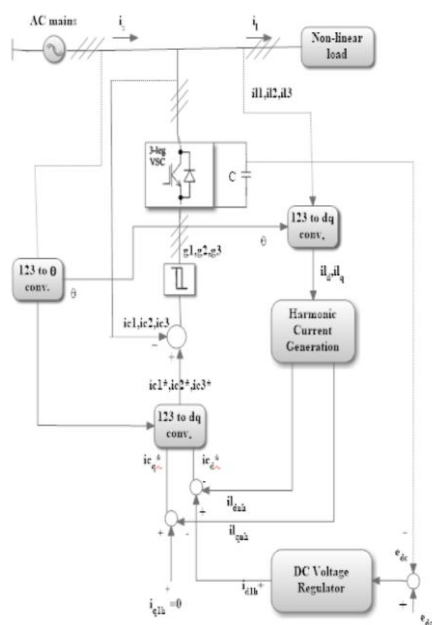


Рис. 6 – Схема керування АФ

В даній схемі для подачі компенсаційного струму в лінію використовується трифазний інвертор напруги на основі IGBT Source Inverter. Завдяки цьому конструкція фільтра є простою, надійною, їй властива достатня динаміка, незважаючи на деякі недоліки. Використовуваний контролер струму складається з трьох незалежних дворівневих гістерезисних компараторів, що працюють на базі IGBT модулів. Це забезпечує компенсацію гармонік струму, що інжектується схемою керування. Остання складається з генератора гармонійного струму та регулятора постійної напруги. Розрахунок складових активного фільтра здійснюється за методиками, наведеними в [10, 12].

Для проведення досліджень створена імітаційна моделі АФ (рис. 7, а). Модель АФ розроблена для ефективного управління струмом у системі в умовах нелінійного навантаження. При виникненні нерівномірного споживання струму через нелінійність навантаження, блок обчислення струму компенсації визначає середнє значення струму навантаження порівняно з фазною напругою. Подальше перетворення струму у систему координат «dq0» в блоці Current calculation дозволяє визначити активну і коливальну складові струму, необхідні для ефективного вилучення гармонік та управління реактивною потужністю. На вхід Current calculation подається струм навантаження, напруга низької сторони трансформатора та струм з ПІ-регулятора, який є результатом віднімання компонентів осі d вищого порядку. Вибір початкового положення вісі d здійснюється так, щоб активна складова струму була визначена цією віссю. Додавання фіксованої частини вісі q допомагає компенсувати реактивну потужність, а компонент нульової послідовності допомагає балансувати навантаження. Таким чином, модель АФ виявляється потужним інструментом для оптимізації роботи системи та зменшення гармонічних спотворень при роботі з нелінійними навантаженнями.

Отже, для компенсації створюється струм, який обчислюється у системі координат «dq0», після цього відбувається перетворення в трифазну систему координат «abc». Цей струм служить еталонним компенсаційним струмом і вводиться в трифазний інвертор, який генерує значення компенсаційного струму на основі зворотного зв'язку. Компенсаційний струм вводиться в мережу через трифазний інвертор. Струм відповідної фази подається через дросель. Згідно з законом Кірхгофа, струми складаються так, що симетричний синусоїдальний струм споживається від джерела незалежно від струму навантаження.

Не зважаючи на суттєві переваги, недолік наведеної схеми полягає в тому, що при більшій асиметрії та нелінійності навантаження втрати потужності на фільтрацію струму пропорційно зростають.

З рис. 7,б видно, що АФ, який є інвертором з калькулятором струмів компенсації на основі d-q теорії, впорався з задачею компенсації, зменшивши THD₁ до рівня 3,93%, що відповідає стандартам, подавши струми компенсації, зображені на рис. 5,б у протилежній фазі до струмів, що компенсуються.

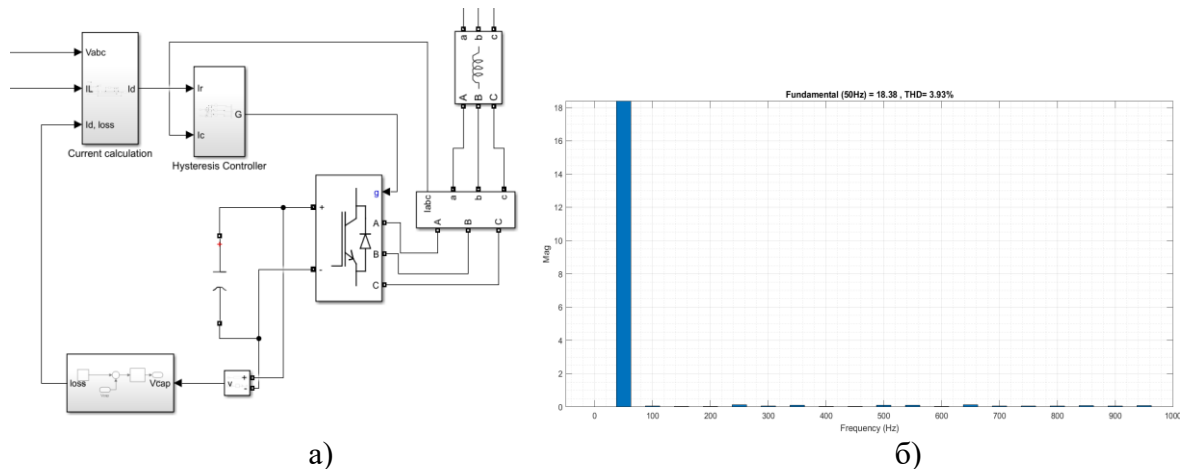


Рис. 7 – Модель активного фільтра в середовищі Matlab Simulink (а) та результати швидкого розкладу Фур'є струму верхньої сторони трансформатора (б)

Додатково важливо відзначити, що АФ здатний підтримати ККД системи на рівні 99%, споживаючи невелику кількість енергії на компенсацію. При цьому фільтр сам адаптувався до різних ситуацій, а саме змінення кута управління тиристорами.

За результатами моделювання можна зробити висновок про те, що АФ впорався з компенсацією гармонік струму і реактивної потужності набагато краще, ніж ПФ, але при цьому спостерігалось збільшення споживання активної потужності.

Висновки

Для глибокого аналізу впливу нелінійного навантаження на електричну мережу було обрано систему «імпульсний перетворювач – двигун постійного струму». Проведені дослідження шляхом імітаційного моделювання дозволили отримати наступні результати:

– ПФ спотворює напругу та струм. Спотворення збільшуються зі зміною кута управління ПФ від $\pi/6$ до $\pi/2$, призводячи до збільшення THD_I на стороні вищої напруги трансформатора до рівня 13,6%, що перевищує допустимі стандартами якості електричної енергії значення;

– ПФ, що складається з 6 блоків та налаштований на компенсацію 5, 7, 11, 13, 17 та 19 гармонік, дозволяє підвищити ККД до 95-98% та знизити THD_I до рівня 6,99%. Але даний показник вище дозволеного стандартом;

– АФ, який є інвертором з калькулятором струмів компенсації на основі d-q теорії, дозволяє зменшити THD_I до рівня 3,93%, що відповідає стандартам;

– АФ впорався з завданням компенсації краще, ніж ПФ. Але АФ є більш складним пристроєм, ніж пасивні каскади, а при збільшенні складності мережі зменшується надійність.

Перелік використаних джерел:

1. Effects of harmonics on equipment / Wagner V. E. et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1993. Vol. 8. Iss. 2. Pp. 672-680. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.216874>.
2. Дослідження впливу вищих гармонік струму в мережі живлення на роботу асинхронних двигунів з використанням приладів діагностики / Деменчук Е. В., Шайда В. П., Шилкова Л. В., Юр'єва О. Ю. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2021. № 2. С. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.05>.
3. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Wiley-IEEE Press, 2007. 379 p.
4. Stéphane Azebaze Mboving C., Hanzelka Z. Investigation on the performance efficiency of the shunt hybrid active power filter. *Power quality and harmonics management in modern power systems*. IntechOpen, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002734>.
5. Czornik J., Haltof M. Wpływ filtrów harmoniczných na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia. *Przegląd elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96. Iss. 3. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.03.11>.
6. Azebaze M. C. S. Investigation on the work efficiency of the LC passive harmonic filter chosen topologies. *Electronics*. 2021. Vol. 10. Iss. 896. Pp. 1-35. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10080896>.
7. Varetsky Y. Switching on power harmonic filters. *Energy engineering and control systems*. 2018. Vol. 4. No. 2. Pp. 51-58. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2018.02.051>.
8. Yadav V. K., Mehta G. Power quality improvement with harmonic reduction using P-Q theory-based shunt active power filter. *Smart energy and advancement in power technologies*. 2022. Pp. 1-16. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4975-3_1.
9. Swain S. D., Ray P. K., Mohanty K. B. Improvement of power quality using a robust hybrid series active power filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32. Iss. 5. Pp. 3490-3498. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2586525>.
10. Power quality improvement in 3-phase power system with shunt active filter using synchronous detection method / Dadhich A., Sharma J., Kumawat S., Tandon A. *International Journal of Electrical, Electronics and Computers*. 2021. Vol. 6. Iss. 3. Pp. 92-95. DOI: <https://dx.doi.org/10.22161/eec.63.12>.
11. Das N., Mude S. Power quality improvement of three phase system using shunt active power filter. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and*

Control Engineering. 2017. Vol. 5. Iss. 3. Pp. 23-26. DOI: <https://doi.org/10.17148/IJIREEICE.2017.5305>.

12. El-Habrouk M., Darwish M. K., Mehta P. Active power filters: A review. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*. 2000. Vol. 147. Iss. 5. Pp. 403-413, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20000522>.

References:

1. V.E. Wagner et al., «Effects of harmonics on equipment», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, iss. 2, pp. 672-680, 1993. doi: **10.1109/61.216874**.
2. E.V. Demenchuk, V.P. Shaida, L.V. Shylkova, and O.Iu. Yurieva, «Doslidzhennia vplyvu vyshchikh harmonik strumu v merezhi zhyvlennia na robotu asynkhronnykh dvyhuniv z vykorystanniam pryladiv diahnostryky» [«Investigation of the influence of higher current harmonics in the power supply network on the operation of asynchronous motors using diagnostic devices»], *Технічна діагностика та неруйнівний контроль – Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, № 2, pp. 38-45, 2021. doi: **10.37434/tdnk2021.02.05**. (Ukr.)
3. H. Akagi, E. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Wiley-IEEE Press Publ, 2007.
4. C. Stéphane Azebaze Mboving, and Z. Hanzelka, «Investigation on the performance efficiency of the shunt hybrid active power filter», *Power quality and harmonics management in modern power systems*, 2023. doi: **10.5772/intechopen.1002734**.
5. J. Czornik, and M. Haltof, «Wpływ filtrów harmoniczych na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia» [«The impact of harmonic filters on improving electrical energy parameters at the connection point»], *Przegląd elektrotechniczny*, vol. 96, iss. 3, pp. 1-5, 2020. doi: **10.15199/48.2020.03.11**. (Pol.)
6. M.C.S. Azebaze, «Investigation on the work efficiency of the LC passive harmonic filter chosen topologies», *Electronics*, vol. 10, iss. 896, pp. 1-35, 2021. doi: **10.3390/electronics10080896**.
7. Y. Varetsky, «Switching on power harmonic filters», *Energy engineering and control systems*, vol. 4, no. 2, pp. 51-58, 2018. doi: **10.23939/jeecs2018.02.051**.
8. V.K. Yadav, and G. Mehta, «Power quality improvement with harmonic reduction using P-Q theory-based shunt active power filter», *Smart energy and advancement in power technologies*, pp.1-16, 2022. doi: **10.1007/978-981-19-4975-3_1**.
9. S.D. Swain, P.K. Ray, K.B. Mohanty, «Improvement of power quality using a robust hybrid series active power filter», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, iss. 5, pp. 3490-3498, 2017. doi: **10.1109/tpel.2016.2586525**.
10. A. Dadhich, J. Sharma, S. Kumawat, and A. Tandon, «Power quality improvement in 3-phase power system with shunt active filter using synchronous detection method», *International Journal of Electrical, Electronics and Computers*, vol. 6, iss. 3, pp. 92-95, 2021. doi: **10.22161/eec.63.12**.
11. N. Das, and S. Mude, «Power quality improvement of three phase system using shunt active power filter», *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 5, iss. 3, pp. 23-26, 2017. doi: **10.17148/ijireeice.2017.5305**.
12. M. El-Habrouk, M.K. Darwish, and P. Mehta, «Active power filters: A review», *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 147, iss. 5, pp. 403-413, 2000. doi: **10.1049/ip-epa:20000522**.

Стаття надійшла 12.03.2024

Стаття прийнята 08.04.2024