

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІБРИДНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ

А.Ф. Жаркін*, чл.-кор. НАН України, В.О. Новський**, докт.техн.наук, Д.О. Малахатка
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: novsky@ied.org.ua

Розглянуто основні аспекти застосування розроблених гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів (ГФКП), які виконано на основі регульованого фільтросиметруючого пристрою (РФСП) та «розподільного» статичного синхронного компенсатора реактивної потужності (D-СТАТКОМ,) для комплексного покращення якості електроенергії та забезпечення електромагнітної сумісності в локальних системах електропостачання. ГФКП призначені для компенсації навантажувальних струмів у нульовому проводі трифазної мережі низької напруги, симетричного регулювання (стабілізації) рівня напруги навантаження та фільтрації струмів вищих гармонік на затискачах відповідальних електроприймачів локальної мережі. Бібл. 3, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, локальна система електропостачання, якість напруги, гібридний фільтрокомпенсуючий перетворювач, відповідальний споживач електроенергії.

Актуальність. На сьогодні актуальною є проблема забезпечення якості електроенергії (ЯЕ) та електромагнітної сумісності (ЕМС) у низьковольтних електричних мережах з несиметричними, нелінійними та різкозмінними у часі навантаженнями. Очевидно, що для вирішення цієї проблеми необхідно або підвищувати ЯЕ в усій низьковольтній електричній мережі шляхом проведення відомих організаційно-технічних заходів, або створювати для споживачів, які вимагають підвищення показників ЯЕ, локальні ділянки мережі [1, 3]. У цьому випадку перспективними для створення локальних систем електропостачання (ЛСЕП) з відокремленим від основної мережі контуром для протікання струмів нульової послідовності основної та вищих частот можуть бути трифазні мережі з штучною нульовою точкою (ШНТ), яка утворюється завдяки застосуванню РФСП у складі гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів. Це дасть змогу поліпшити ЯЕ на затискачах відповідальних споживачів і навантажень (ВН) та підвищити надійність їхнього електропостачання при виконанні вимог відповідних стандартів з ЕМС і ПУЕ з електробезпеки [1].

Метою роботи є розроблення імітаційних моделей ЛСЕП при увімкненому і вимкненому ГФКП та аналіз режимів роботи ЛСЕП шляхом імітаційного моделювання для оцінювання ефективності практичного застосування ГФКП у трифазних три- та чотирипровідних системах для комплексного поліпшення ЯЕ і забезпечення ЕМС відповідальних споживачів у ЛСЕП.

Викладення основного матеріалу.

На рис. 1 показано основну трифазну три- або чотирипровідну систему, до якої підключено локальну електричну мережу (ЛМ), що побудована на основі ГФКП для живлення відповідальних навантажень (ВН-11...ВН-1m), нульові точки «зірок» яких підключено до ШНТ «N₁», що приєднано відповідно до загальної точки з'єднання накопичувальних конденсаторів C1-C2 «розподільного» D-СТАТКОМ.

Тут вольтодобатковий автотрансформатор (ВАТ) регульованого фільтросиметруючого перетворювача виконаний за схемою, коли шість напівобмоток його первинної обмотки *W1* з'єднані за схе-

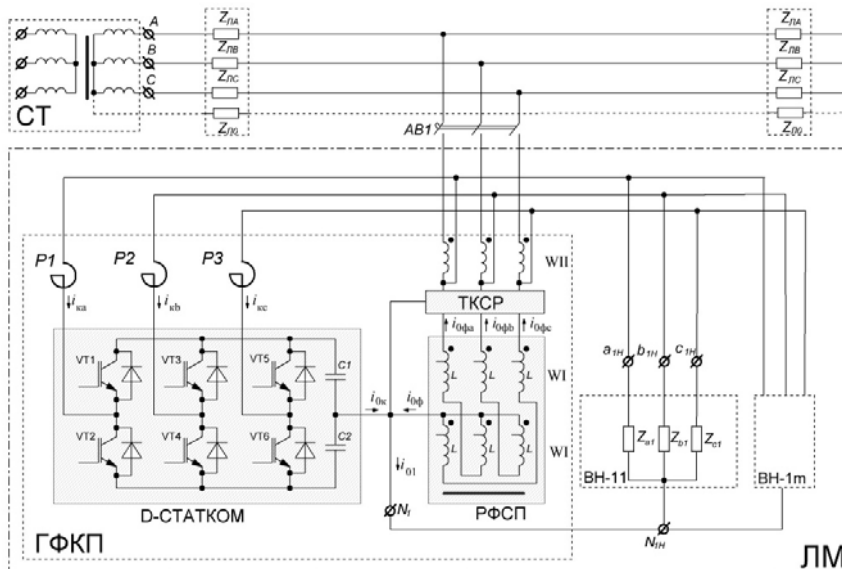


Рис. 1

мою «зустрічний зигзаг». ВАТ представляє собою фільтр струмів нульової послідовності (ФСНП), за допомогою якого створюється ШНТ «N₁» локальної мережі. ФСНП розвантажує низьковольтну мережу від струмів нульової послідовності основної та вищих частот, а за допомогою вторинних обмоток ШП ВАТ здійснює «симетричне» триступеневе регулювання рівня напруги на затискачах відповідального навантаження за допомогою трифазного комутатора ступенів регулювання (ТКСР), який виконано на основі IGBT-транзисторів [1]. Додаткову компенсацію вищих гармонік струму в нейтралі мережі здійснює «розподільний» D-СТАТКОМ, який працює в режимі активного фільтра і додатково плавно регулює рівень напруги у відносно невеликому діапазоні. Ефективність застосування такого ГФКП в електричних мережах з ЛСЕП багато у чому залежить від оптимального вибору схеми, параметрів і способу управління РФСП, а також D-СТАТКОМ, який дає змогу забезпечити роздільне управління активною та реактивною потужностями. Шляхом зміни вихідної напруги D-СТАТКОМ здатний управляти обміном реактивної потужності між ним та мережею живлення, оскільки він за суттю є електронним еквівалентом синхронного компенсатора.

На рис. 2 представлено імітаційну модель (з відповідними позначеннями) локальної чотирипровідної мережі при підключенні розробленого ГФКП.

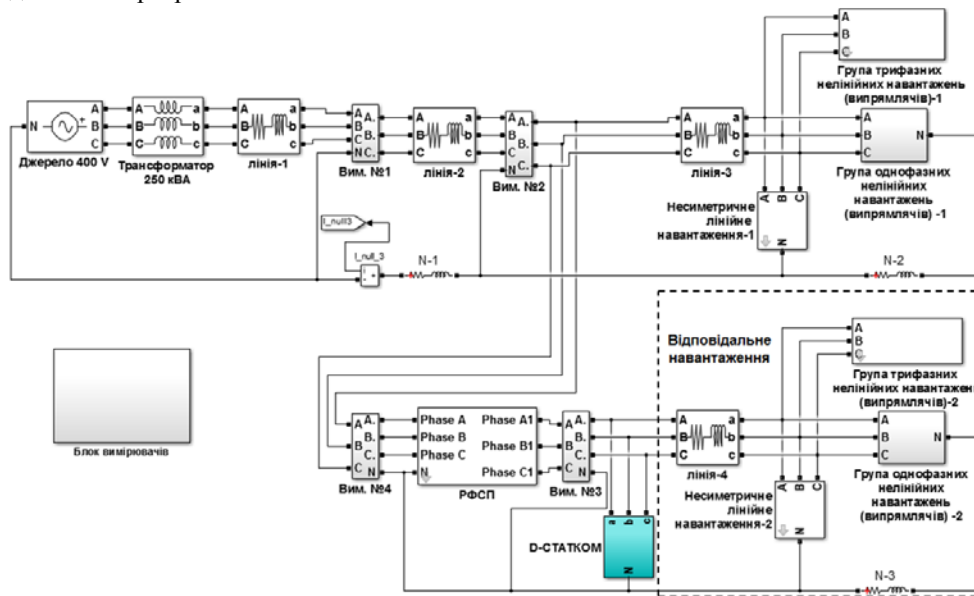


Рис. 2

Проведено імітаційне моделювання режимів роботи ГФКП у ЛСЕП [2], наприклад, при таких параметрах моделі: силовий трансформатор (СТ) потужністю 250 кВА; потужність лінійного RL -навантаження мережі по фазах: $P^A=21$ кВт і $Q_A=11$ кВАр, $P^B=36$ кВт і $Q_B=18$ кВАр, $P^C=12$ кВт і $Q_C=6$ кВАр; сумарна активна потужність навантаження групи однофазних випрямлячів $P_{1В\text{ сум}}=37,5$ кВт; сумарна активна потужність навантаження групи трифазних випрямлячів $P_{3В\text{ сум}}=48,0$ кВт. Параметри відповідального навантаження наступні: $P_{AВН}=21$ кВт і $Q_{AВН}=11$ кВАр, $P_{ВВН}=36$ кВт і $Q_{ВВН}=18$ кВАр, $P_{СВН}=12$ кВт і $Q_{СВН}=6$ кВАр, $P_{1В\text{ сум,ВН}}=22,5$ кВт, $P_{3В\text{ сум,ВН}}=12,0$ кВт. Реальні значення опорів лінії від СТ до ТЗП (точки загального приєднання – місця підключення ГФКП і навантажень до лінії) $R_L=0,124$ Ом, $L_L=19,0 \cdot 10^{-6}$ Гн; повний опір нульового проводу мережі: $R_0=0,025$ Ом; $L_0=7,63 \cdot 10^{-6}$ Гн. У цьому випадку частка нелінійного навантаження у мережі $\alpha_1=1,11$, а у відповідальному навантаженні $\alpha_2=0,45$.

Результати моделювання показали високу ефективність підключення зазначеного ГФКП до мережі. Це слідує з порівняння даних, які наведено в таблиці щодо гармонічного складу фазних напруг, а також сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень (СКГС) у локальній мережі («Вим. №4») при відключеному та включеному ГФКП (при увімкненому ГФКП покращується ЯЕ також і в основній мережі).

Без ГФКП		№	3	5	7	9	11	13	15	СКГС
З ГФКП										
Фаза А	%		16.3	7.2	2.0	2.6	1.4	0.6	1.1	19,7
			3.7	2.8	1.9	0.2	1.1	0.7	0.3	5,2
Фаза В	%		16.6	7.4	1.8	2.7	1.5	0.8	1.2	19,8
			3.5	2.7	2	0.26	1.1	0.7	0.2	5,3
Фаза С	%		15.7	7.9	2.2	2.6	1.6	1.2	1.1	19,6
			3.2	2.6	1.9	0.46	0.9	0.6	0.1	5,1

Розроблена імітаційна модель дає змогу також дослідити вплив ГФКП на приведення рівня напруг у локальній мережі до нормованих стандартами значень у трьох його режимах симетричного регулювання напруги навантаження, а саме: «номінал», «вольтододавання» та «вольтовіднімання».

Відомо, що згідно з вимогами ДСТУ EN 50160:2014 рівень діючих значень напруг має бути в межах діапазону від 198 В (нижня межа) до 242 В (верхня межа). Слід відзначити, що несиметрія навантаження по фазах основної та локальної мереж впливає на значення напруги ΔU_j ($j = A, B, C$) вторинних обмоток *III* ВАТ. При цьому за рахунок симетруючих властивостей первинної обмотки *III* ВАТ несиметрія напруг у ЛСЕП параметричним чином практично усувається, але в різних фазах додаткові напруги $\pm \Delta U_j$ *III* ВАТ у зазначених режимах відрізняються один від одного. Це ілюструється часовими діаграмами зміни діючих значень напруг у кожній фазі імітаційної моделі, яка описує роботу локальної мережі при підключенні ГФКП у трьох зазначених режимах симетричного регулювання напруги відповідальних навантажень ЛСЕП, що показано на рис. 3.

Тут горизонтальними пунктирними лініями показано відповідно номінальний рівень напруги (220 В), на рис. 3, б, в – межі верхнього та нижнього допустимого рівнів напруг, а вертикальними пунктирними лініями – час вимірювання діючих значень напруги ($t_{\text{вим}}$ складає 10/12 періодів згідно з ДСТУ IEC 61000-4-30:2010 щодо вимірювань показників якості напруги для усунення впливу перехідних процесів при перемиканні ключів).

На рис. 3, а показано графіки зміни напруг при підключенні ГФКП у режимі «номінал», коли рівень будь-якої фазної напруги навантаження знаходиться у допустимому діапазоні 198–242 В. На рис. 3, б наведено відповідні графіки зміни напруг при підключенні ГФКП у режимі «вольтододавання», коли рівень будь-якої фазної напруги мережі знаходиться нижче значення 198 В.

На рис. 3, в показано графіки зміни напруг у ЛСЕП при підключенні ГФКП у режимі «вольтовіднімання», коли рівень напруги, наприклад, у фазі *C* мережі знаходиться вище значення 242 В, що потребує «зниження» рівня цієї напруги до нормованих значень.

Для більшої наочності моделювання проводилося за наступним алгоритмом: у режимі реального часу в початковий момент від 0,2 до 1,2 с відповідальне навантаження підключено до трифазної чотирипровідної мережі без ГФКП (рис. 2), а на проміжку часу після 1,2 с – до локальної мережі з ГФКП.

З розгляду наведених графіків (рис. 3) слідує, що за рахунок підключення, наприклад, лінійного несиметричного навантаження на проміжку часу від 0,2 до 1,2 с рівень діючих значень напруги в кожній фазі суттєво відрізняється. В момент часу 1,2 с відповідальне навантаження підключається до ЛСЕП. З цього моменту різниця між рівнями фазних напруг зменшується до значень, які знаходяться в межах $\pm 10\%$ від $U_{\text{ном}}$.

З розгляду наведених графіків (рис. 3) слідує, що за рахунок підключення, наприклад, лінійного несиметричного навантаження на проміжку часу від 0,2 до 1,2 с рівень діючих значень напруги в кожній фазі суттєво відрізняється. В момент часу 1,2 с відповідальне навантаження підключається до ЛСЕП. З цього моменту різниця між рівнями фазних напруг зменшується до значень, які знаходяться в межах $\pm 10\%$ від $U_{\text{ном}}$.

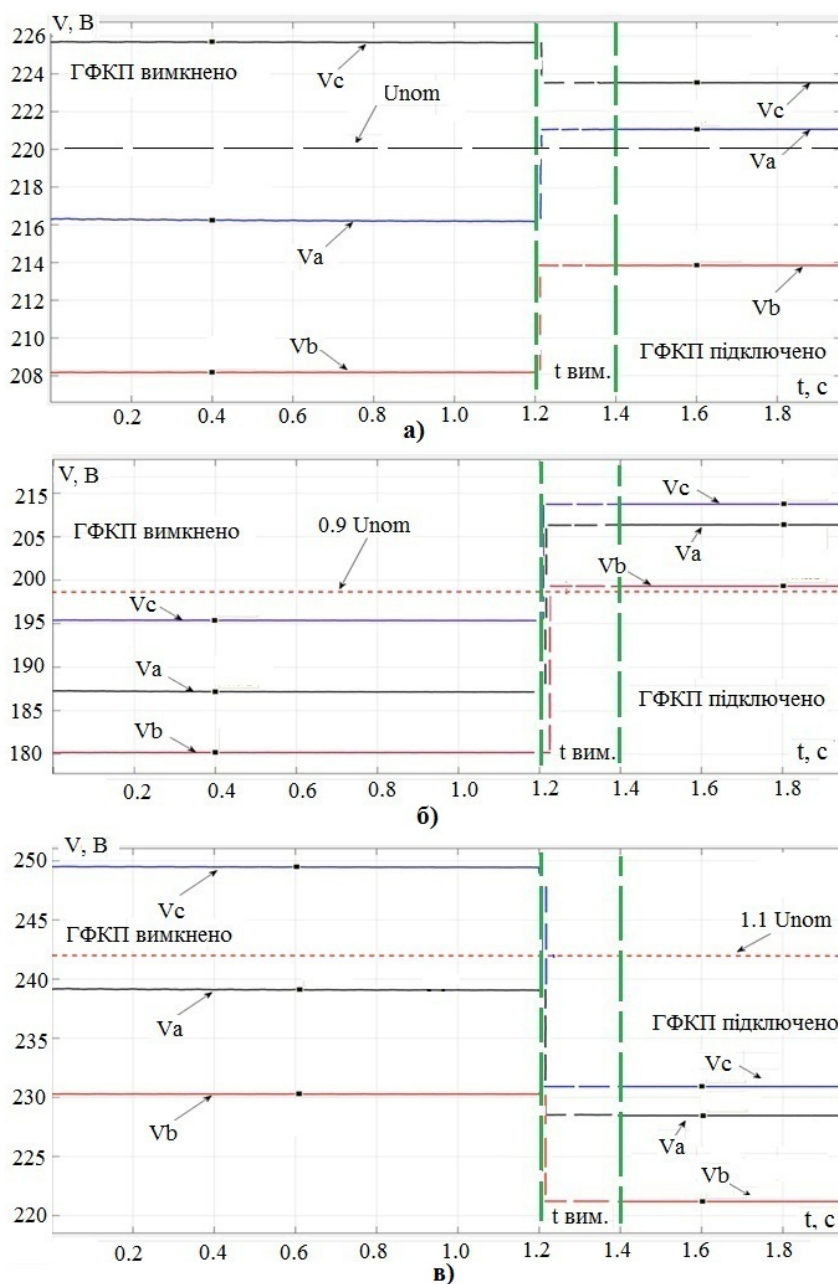


Рис. 3

Висновки.

1. Досліджено режими роботи ГФКП, який призначено для створення локальних систем електропостачання з відокремленим від основної мережі контуром для протікання струмів нульової послідовності шляхом використання штучної нульової точки. Розроблено імітаційну модель локальної чотирипровідної мережі при підключенні зазначеного ГФКП, яка дозволяє ефективно проводити модельне дослідження режимів його роботи з урахуванням параметрів нелінійних і несиметричних навантажень основної та локальної мереж.

2. Показано, що внаслідок роботи ГФКП при частках нелінійного навантаження, наприклад, в основній мережі $\alpha_1 = 1,11$ і в ЛМ з відповідальним навантаженням $\alpha_2=0,45$ при його підключенні до локальної мережі, яку побудовано на базі такого ГФКП, значення СКГС за напругою, наприклад, у фазі *B*, зменшується з 19,8 до 5,3 %, що суттєво нижче за встановлену в ДСТУ EN 50160:2014 норму, яка складає 8 %, та, зокрема, значення 3-ї гармоніки знижується більш ніж у 4 рази – з 16,6 до 3,5 %, а значення 5-ї гармоніки – з 7,4 до 2,7 %.

3. Отримані результати свідчать про ефективність використання ГФКП для комплексного покращення якості електроенергії та забезпечення електромагнітної сумісності в локальних мережах з відповідальними споживачами при виконанні вимог, що визначено чинними в Україні стандартами ГОСТ 13109-97 і ДСТУ EN 50160:2014.

1. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.06>

2. Кирик В. В., Халіков В.А. Комп'ютерні технології моделювання та дослідження електротехнічних систем. Київ: ІЕД НАН України, 2009. 213 с.

3. Четошнікова Л.М., Смоленцев Н.И., Четошніков С.А., Дегтярев Д.В. Система управління енергією в локальній електричеській мережі низького напруги. *Ползуновский вестник*: ФГБОУ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. 2015. № 1. С. 103-107.

УДК 621.314:621.3.011

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

А.Ф. Жаркин, чл.-корр. НАН України, **В.А. Новский**, докт.техн.наук, **Д.А. Малахатка**

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: novsky@ied.org.ua

Рассмотрены основные аспекты применения разработанных гибридных фильтрокомпенсирующих преобразователей (ГФКП), которые выполнены на основе регулируемого фильтросимметрирующего устройства (РФСУ) и «распределительного» статического синхронного компенсатора реактивной мощности (D-СТАТКОМ), для комплексного улучшения качества электроэнергии и обеспечения электромагнитной совместимости в локальных системах электроснабжения. ГФКП предназначены для компенсации токов нагрузки в нулевом проводе трех- или четырехпроводной сети низкого напряжения, симметричного регулирования (стабилизации) уровня напряжения нагрузки и фильтрации токов высших гармоник на зажимах ответственных потребителей в локальной сети. Библ. 3, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, локальная система электроснабжения, качество напряжения, гибридный фильтрокомпенсирующий преобразователь, ответственный потребитель электроэнергии.

THE MODELING OF THE OPERATING MODES OF HYBRID FILTER COMPENSATING CONVERTERS TO ENSURE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN THREE-PHASE SYSTEMS

A.F. Zharkin, V.O. Novskiy, D.O. Malakhatka

Institute of electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: novsky@ied.org.ua

In the article are considered the main aspects of the use of the developed hybrid filter compensating converters (GFCC), which are based on a regulated filtering device and a "distributive" static synchronous reactive power compensator for complex improvement of the electric power quality and provision of electromagnetic compatibility in local power supply systems. GFCC are designed to compensate the load currents in the neutral conductor of a three-phase low-voltage network, symmetrical regulation (stabilization) voltage of the load and filtering the currents of higher harmonics at the terminals of responsible consumer in the local network. References 3, figures 3, table 1.

Key words: electromagnetic compatibility, local power supply system, voltage quality, hybrid filter compensating converter, responsible electric consumer.

1. Zharkin A.F., Novskiy V.O., Malakhatka D.O. Complex improvement of power quality and ensure electrical safety in local power supply systems when using hybrid filter compensating converters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 1. Pp. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.06> (Ukr)

2. Kyryk V.V., Khalikov V.A. Computer technologies of modeling and research of electrotechnical systems. Kyiv: IED NAN Ukrainy, 2009. 213 p. (Ukr)

3. Chetoshnykova L.M., Smolentsev N.Y., Chetoshnykov S.A., Dehtyarev D.V. Energy management system in local low voltage electrical network. *Polzunovskii vestnik*: FGBOU Altaiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. I.I. Polzunova. 2015. No 1. Pp. 103-107. (Rus)

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 19.03.2018