

КОМПЛЕКСНЕ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ В ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ГІБРИДНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

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 використання розроблених гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів (ГФКП), які виконані на основі регульованого фільтросиметруючого пристрою (РФСП), «розподільчого» статичного синхронного компенсатора реактивної потужності (D-СТАТКОМ) або багатфункціонального компенсатора реактивної потужності (БКРП), для комплексного покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки 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 у мережі. Бібл. 14, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: локальна система електропостачання, якість напруги, електробезпека, гібридний фільтрокомпенсуючий перетворювач, транзисторний ключ змінного струму.

Вступ. Локальні системи електропостачання (ЛСЕП) забезпечують споживання електроенергії групи електроприймачів (ЕП) за допомогою електричних мереж низької напруги (НН) без зміни рівня напруги джерела електроенергії, від якого прокладаються фідери до житлових будинків і дрібних підприємств у межах населеного пункту, наприклад, до віддалених котеджних селищ, ремонтних і сільськогосподарських об'єктів та ін., у т.ч. при використанні відновлюваних джерел енергії. Основною особливістю ЛСЕП є співмірність потужності джерел і споживачів електроенергії, наявність значно більш коротких кабельних ліній і тому великий взаємозв'язок всіх елементів електричної мережі, причому ефективність роботи ЛСЕП визначається використанням обладнання та режимами його роботи [6, 7]. У зв'язку з великою насиченістю електричних мереж НН сучасними одно- і трифазними ЕП досить великої потужності, які мають несинусоїдальну форму споживаного струму, набувають актуальності задачі покращення якості електроенергії (ЯЕ) і забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) споживачів та виконання вимог електробезпеки у зазначених мережах, зокрема ЛСЕП [2, 4]. Це пов'язано з тим, що більшість низьковольтних розподільних мереж, що зараз перебувають в експлуатації в Україні, побудовані з використанням системи захисного заземлення типу «TN-C». Така мережа зазвичай складається з силового трансформатора (СТ), трифазних провідників і об'єднаного PEN-провідника, що поєднує у собі функції нейтрального (N) і захисного (PE) провідників.

Відповідно до вимог стандартів МЕК питання забезпечення ЕМС і електробезпеки споживачів у низьковольтних мережах можуть бути вирішені завдяки використанню систем заземлення «TN-S» і «TN-C-S», а також за рахунок проведення ряду заходів щодо вирівнювання потенціалу PEN-провідника впродовж всієї його довжини [8]. Зазначені системи заземлення відрізняються режимами роботи N- і PE-провідників, оскільки в системі «TN-S» поділ на N- і PE-провідники проводиться протягом усієї довжини мережі НН, а в системі «TN-C-S» такий поділ здійснюється тільки в певній її частині. У цьому випадку поділ загального PEN-провідника на N- і PE-провідники проводиться звичайно у місці приєднання відгалуження до основної магістралі (наприклад, на ввіді у будинок, відгалуженні на об'єкт, що використовує трифазну напругу та ін.). При цьому металеві корпуси одно- і трифазних ЕП заземлюються за допомогою PE-провідника безпосередньо і/або через «триполюсні» розетки, укомплектовані додатковим заземлюючим контактом для забезпечення електробезпеки стосовно можливого ураження людей електричним струмом.

Метою роботи є розроблення та дослідження гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів, виконаних на основі регульованого фільтросиметруючого пристрою і призначених для комплекс-

© Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О., 2018

ORCID ID: *<http://www.orcid.org/0000-0001-5996-0901> ; **<http://www.orcid.org/0000-0003-3857-7027>

ного покращення якості електроенергії, зменшення втрат напруги і активної потужності та забезпечення електробезпеки в ЛСЕП у низьковольтних мережах з нелінійними та несиметричними навантаженнями.

Основні матеріали досліджень. У трифазних чотирипровідних мережах струми з частотами непарних гармонік, кратних трьом, є струмами нульової послідовності (НП), які підсумовуються в *PEN*-провіднику мережі, в результаті чого значення струму в нейтральному проводі може значно перевищувати величини фазних струмів, що спричиняє збільшення додаткових втрат електроенергії та значне перегрівання *PEN*-провідника. Крім того, зазначені струми призводять до спотворень форми кривих напруг, обумовлюючи підвищення рівнів кондуктивних електромагнітних завад і, тим самим, сприяють порушенню умов забезпечення ЕМС відповідальних навантажень (ВН) у мережі. В нормальних режимах роботи системи заземлення «*TN-C-S*» струми по *PE*-провіднику не протікають, тобто при цьому небезпечні потенціали на металевих корпусах електроустановки відсутні, а при виникненні різного роду витоків необхідний рівень електробезпеки забезпечують пристрої захисного відключення. Однак у аварійних режимах, пов'язаних з порушенням конфігурації мережі, наприклад, у випадку обриву *PEN*-провідника на магістральній лінії або відгалуженні, чи КЗ між фазним і нульовим провідниками система «*TN-C-S*» втрачає свою працездатність і стає навіть небезпечною для життя людей. Особливо гостро це виявляється у протяжних і розгалужених розподільних мережах напругою 0,4 кВ, наприклад, при обриві *PEN*-провідника і КЗ на корпус. У таких мережах на всіх металевих корпусах ЕП, приєднаних до *PE*-провідника за допомогою триполюсних розеток, з'являється смертельно небезпечний потенціал фази. Наявність у цьому місці повторного заземлення, що має відносно більшу величину опору (згідно з ПУЕ не більше 10 Ом), дає змогу зменшити цей потенціал, але не усуває його повністю [4, 8].

Створення ЛСЕП з високою якістю напруги (ЯН) при забезпеченні електробезпеки може бути здійснене шляхом:

- застосування індивідуального трифазного трансформатора для підключення відгалужень;
- використання регульованих і нерегульованих фільтрів струму нульової послідовності (ФСНП) при реалізації притаманних ним фільтруючих властивостей стосовно струмів НП;
- створення на основі зазначених ФСНП локальних ділянок мережі зі штучною нейтральною точкою (ШНТ);
- створення виконаних на основі гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів ЛСЕП з ШНТ.

На рис. 1 показано принципову схему перетворювача трифазної системи напруг без нейтральної точки в трифазну систему напруг з ШНТ, який є схемою ФСНП-1 типу «подвійного зустрічного зигзагу» (різновидністю «звичайного» ФСНП, виконаного на основі шести напівобмоток, увімкнених за схемою «зустрічний зигзаг»), причому металевий корпус ВН через захисний *PE*-провідник з'єднано з *PEN*-провідником мережі. Тут на основі триобмоткового (W_I) вольтододаткового автотрансформатора (ВАТ) ФСНП-1 при його доповненні «вольтододатковими» обмотками W_{II} і трифазним комутатором ступенів регулювання (ТКСР) виконано регульований фільтросиметруючий пристрій для зрівноважування системи напруг, фільтрації гармонік струмів НП і забезпечення трирівневого симетричного регулювання напруги навантаження. ТКСР складається з транзисторних ключів змінного струму $K1-K12$, з яких $K1-K9$ – «мережеві» ключі, а $K10-K12$ – «шунтуючі» ключі, причому останні необхідні для забезпечення вільної циркуляції реактивної енергії ВАТ з метою виключення "дросельного" режиму його роботи і пов'язаного з ним ефекту «зворотної трансформації» при перемиканні ступенів регулювання напруги.

РФСП працює у трьох режимах: «Вольтододавання» — цикл «*BCA*» (увімкнені тільки ключі $K2, K6, K7$); «Вольтовіднімання» — цикл «*ABC*» (увімкнені тільки ключі $K1, K5, K9$) і цикл «Номінал» — «*CAB*» (увімкнені ключі $K3, K4, K8$). Напруга навантаження в кожній фазі представляє собою векторну суму відповідної фазної напруги мережі й напруги вторинної обмотки ВАТ, яку включено в розсітку лінії цієї фази мережі. Симетричне регулювання рівня напруги здійснюється шляхом циклічної зміни електричних зв'язків вторинної обмотки W_{II} з основною W_I при незмінному їхньому магнітному зв'язку. В результаті застосування цієї схеми РФСП є можливість створення в межах існуючих електричних мереж локальних ділянок трифазних електричних мереж з ШНТ для безперебійного електроживлення ВН, які потребують високої якості напруг, зокрема, в аварійних режимах, наприклад, обумовлених «обривами» провідників фаз мережі. Тут однофазні електроприймачі ВН (Z_a, Z_b, Z_c), що з'єднано за схемою «зірка», підключено до вторинних обмоток ВАТ, причому її нульова точка підключена до першої ШНТ « 0_2 » ФСНП-1, а його друга ШНТ « $0'_2$ » — до нейтрального провідника розподільної мережі.

У цій електричній мережі фактично існують дві різні трифазні електричні системи, які відрізняються тільки способом підключення нейтральних точок груп навантажень до фаз A, B, C джерела (шини низької напруги СТ). У загальному випадку ЕП першої системи мають різні опори ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$) і нерівномірно розподілені між фазами мережі. Це призводить до виникнення в системі струму НП, який, протікаючи по елементах системи, викликає зміщення нейтральної точки O_1 , що обумовлює небаланс системи фазних напруг і зниження їхньої якості. Для живлення ВН, електроприймачі яких чутливі до порушень ЯН, використовується друга трифазна електрична система, що включає трифазну електричну систему напруг без нейтральної точки джерела трифазних напруг і ФСНП-1 для створення ШНТ « O_2 », а також відповідальне навантаження.

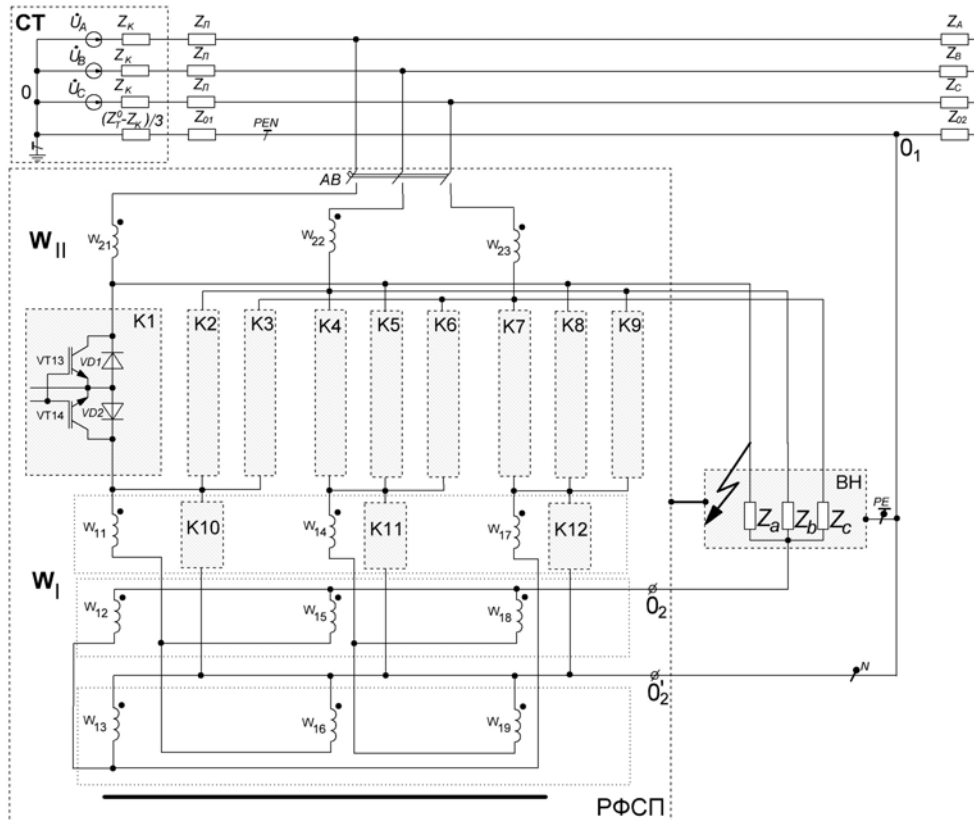


Рис. 1

Нейтральна точка O_2 цієї трифазної ЛСЕП знаходиться практично в геометричному центрі трикутника міжфазних напруг джерела, причому її нестабільність завдяки дуже незначному опору нульової послідовності ФСНП-1 визначається стабільністю трикутника міжфазних напруг. ЯН у цьому випадку залишається незмінно високою в усіх режимах завдяки вказаним властивостям ФСНП через малі значення (соті частки Ом) його опору НП. Важливою особливістю ФСНП, виконаного на загальному тристрижневому магнітопроводі завдяки підключенню його обмоток за схемою «зустрічний зигзаг», є можливість практично нормальної роботи ФСНП протягом до півгодини у т.зв. «двофазному» режимі, тобто при «зникненні» однієї фазної напруги мережі, наприклад, при однофазному КЗ у випадку виникнення аварійного стану в «основній» мережі. Навантаження забезпечується трьома фазними напругами, що значно підвищує надійність електропостачання ВН [4].

Основною ланкою ГФКП, які мають добрі перспективи для застосування в низьковольтних ЛСЕП з точки зору практичної реалізації переваг концепції розвитку інтелектуальних електричних мереж НН, є саме РФСП. Такі ГФКП призначені для забезпечення ЕМС, оптимізації режимів ЛСЕП у розподільних електричних мережах НН, зменшення втрат напруги і активної потужності, підвищення ЯН та ін. Розроблено ГФКП двох модифікацій, що виконані на основі РФСП і «розподільчого» статичного синхронного компенсатора реактивної потужності (D -СТАТКОМ) типу ГФКП-1 (перша модифікація), а також на основі багатофункціональних компенсаторів реактивної потужності (БКРП) двох видів ГФКП-2 і ГФКП-3 (друга модифікація) [3, 10].

На рис. 2 показано трифазну, наприклад, трипровідну (чотирипровідну) систему, до якої підключе-

циркуляцію реактивної енергії в моменти комутації КР шляхом його замикання (шунтування) для запобігання перенапруг на силових елементах БПЧ.

Зазначений на рис. 4 БКРП споживає або генерує РП у залежності від алгоритму управління транзисторами мостів СТМ1 та СТМ2. Плавне регулювання реактивної потужності забезпечується шляхом регулювання частоти струму в КР, причому режим споживання РП відповідає зворотному порядку чергування фаз прикладеної до КР напруги, а режим генерування РП забезпечується при прямому порядку чергування фаз. У результаті циклічного високочастотного підключення КР до електричної мережі за допомогою БПЧ реалізується швидкодіюча компенсація РП [5].

Проведено імітаційне моделювання режимів роботи ГФКП-1 при наступних параметрах моделі: потужність СТ – 250 кВА; потужність лінійного RL -навантаження мережі по фазах $S_A=40,0$ кВА, $S_B=65,0$ кВА і $S_C=20,0$ кВА (тобто сумарна потужність $S_{л сум}$ лінійного навантаження трьох фаз складає 125 кВА); сумарна активна потужність $P_{1В сум}$ навантаження групи однофазних випрямлячів складає 45,0 кВт; сумарна активна потужність $P_{3В сум}$ навантаження групи трифазних випрямлячів складає 72,0 кВт; реальні значення опорів лінії від СТ до ТЗП (точки загального приєднання – місця підключення ГФКП і навантажень до лінії) $R_{л} = 0,124$ Ом, $L_{л} = 19,0 \cdot 10^{-6}$ Гн; повний опір нульового проводу мережі: $R_0 = 0,025$ Ом; $L_0 = 7,63 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Результати модельного дослідження, наприклад, для режиму «вольтододавання» наведено в таблиці (СКГС – сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень згідно з ДСТУ EN 50160:2014 р. [1]).

Параметр	Значення	
	ГФКП вимкнено	ГФКП підключено
Діючі значення фазних напруг мережі у ТЗП, (В)	$U_A=210, U_B=201, U_C=203$	$U_A=213, U_B=211, U_C=215$
Діючі значення струмів фаз мережі в ТЗП, (А)	$I_A=353, I_B=365, I_C=333$	$I_A=327, I_B=346, I_C=325$
Діюче значення струму в нульовому проводі (А)	35,2	1,3
СКГС напруги, наприклад, фази В у ТЗП мережі (%)	19,3	6,2
СКГС струму, наприклад, фази В у ТЗП мережі, (%)	19,2	10,4
Коефіцієнт несиметрії напруг K_{U0} (%) за нульовою послідовністю (згідно з ГОСТ 13109-97).	2,5	0,15



Рис. 5

На рис. 5 представлено результати гармонічного аналізу напруги (рівні окремих гармонік і СКГС), наприклад, у фазі В мережі при відключеному та підключеному ГФКП до ТЗП мережі з нелінійними навантаженнями (випрямлячами).

На рис. 6 показано графіки залежності СКГС і K_{U0} від зміни значень сумарних потужностей зазначених навантажень (рис. 6, а – від $P_{3В сум}$; рис. 6, б – від $S_{л сум}$) при відключеному та підключеному ГФКП-1 до ТЗП мережі.

З розгляду приведених результатів модельного дослідження можна зазначити, що застосування запропонованих ГФКП дозволить значно покращити показники якості електроенергії в мережі з нелінійними та несиметричними навантаженнями і забезпечити ЕМС її споживачів за рахунок зниження рівнів окремих гармонік і значень СКГС за струмом та напругою, а також її несиметрії в ЛСЕП. Отримані результати дозволяють визначити оптимальні значення параметрів силових елементів та системи керування ГФКП для їхнього подальшого практичного застосування в розподільних електричних мережах низької напруги.

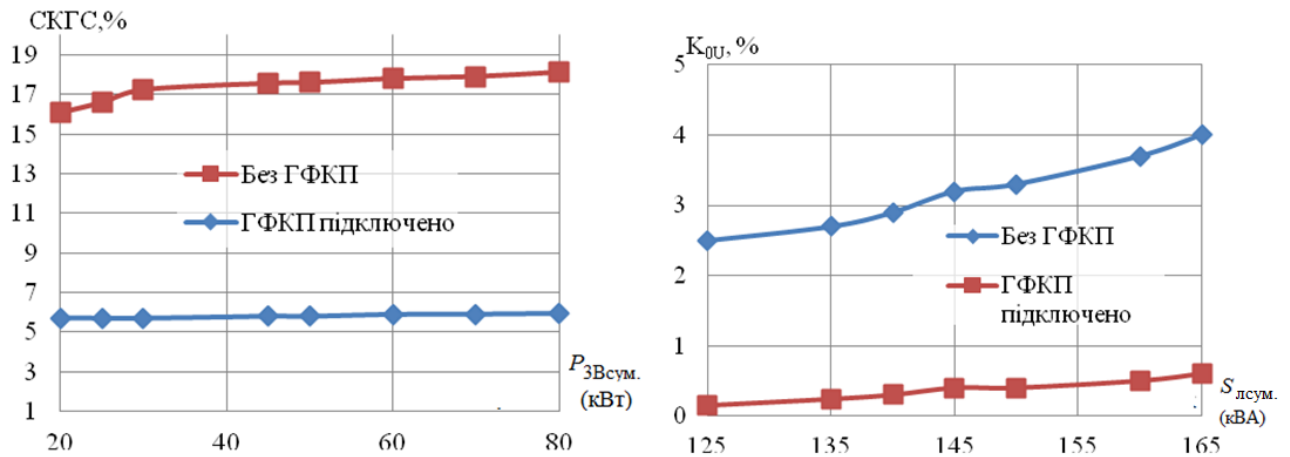


Рис. 6, а, б

Висновки.

1. Розглянуті трифазні мережі з штучною нейтраллю можуть бути ефективно використані для створення локальних систем електропостачання з відокремленим від основної мережі контуром для протікання струмів нульової послідовності, що дозволяє значно поліпшити якість електричної енергії у споживачів і надійність їхнього електропостачання при виконанні вимог відповідних стандартів з ЕМС.

2. Застосування ГФКП у трифазних чотирипровідних системах з нелінійними та несиметричними навантаженнями дозволяє значно покращити показники якості напруги в мережі та забезпечити ЕМС споживачів за рахунок зниження значень сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень і рівня окремих гармонік у кривих струму та напруги у мережі, відхилень напруги, коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю, а також здійснити параметричне демпфування несиметричних коливань напруги в мережі та знизити додаткові втрати активної потужності в мережі, а саме:

- зменшення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень напруги з 19,3 до 6,2%;
- зменшення несиметрії напруги за нульовою послідовністю внаслідок компенсації струму в нульовому проводі мережі приблизно в 25–30 разів за вказаних параметрів мережі;
- забезпечення нормованого рівня напруги в мережі в межах $\pm 10\%$ від її номінального значення за рахунок його регулювання РФСР у складі ГФКП.

3. Запропоновані ГФКП є ефективним засобом для комплексного покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при різних видах тривалих і короткочасних ненормальних і аварійних режимів роботи ЛСЕП у місці встановлення ГФКП у низьковольтних мережах, а також для забезпечення електробезпеки в електроустановках об'єктів ЛСЕП, причому його працездатність зберігається також у режимах роботи, пов'язаних із порушенням цілісності конфігурації локальної ділянки мережі.

4. Отримані результати досліджень дозволяють провести оцінювання впливу роботи ГФКП на режимні параметри мережі та визначити оптимальні значення параметрів силових елементів і системи керування ГФКП з метою їхнього практичного застосування в розподільних електричних мережах для приведення значень параметрів ЕМС і якості електроенергії до норм, визначених діючими стандартами ДСТУ EN 50160:2014 і ГОСТ 13109-97.

1. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Київ; Мінекономрозвитку України. 2014. 27 с.

2. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 48–52.

3. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Аналіз і моделювання режимів роботи гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів, що призначені для забезпечення електромагнітної сумісності в трифазних чотирипровідних системах. *Вісник НТУ «ХП» Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика та Силова електроніка і енергоефективність*. 2017. № 27. С. 201–205.

4. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. Київ: ІЕД НАН України. 2013. 378 с.

5. Шидловський А.К., Федий В.С. Электрические цепи с вентильными коммутаторами. Київ: ІЕД НАН

України, друкарня ТОВ «Артпринт», 2010. 270 с.

6. Четошникова Л.М., Смоленцев Н.И., Четошиков С.А., Дегтярев Д.В. Система управления энергией в локальной электрической сети низкого напряжения. Ползуновский вестник. 2015. № 1. С. 103-107.

7. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Капличний Н.М., Новський В.О., Козлов О.В., Малахатка Д.О. Трифазна електрична мережа. Патент на корисну модель № 117704, Україна. Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

8. Правила устройства электроустановок. X.: Форт, 2015. 808 с.

9. Benysek G. Improvement in the Quality of Delivery of Electrical Energy using Power Electronics Systems. London: Springer, 2007. 191 p.

10. Kulkarni O., Mishra M. Power quality improvement using Zig-Zag transformer and DSTATCOM in three phase power distribution system. India Conference (INDICON), Annual IEEE. Mumbai, India, 2013. Pp. 1-6.

11. Jayaprakash P., Singh B., Kothari D. Reduction in rating of voltage source converter of DSTATCOM using a Zig-Zag transformer. Industrial Electronics (ISIE), Hangzhou, China: IEEE, 2012. Pp. 1066-1071.

12. Song Q., Yin Z., Xue J. Zero-sequence harmonics current minimization using zero-blocking reactor and Zig-Zag transformer. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: IEEE, 2008. Pp. 1758-1764.

13. Strzelecki R., Mysak P., Woiciechowski D. 18-pulse diode rectifier with active Power filter. Праці ІЕД НАН України. Спеціальний випуск. 2013. Pp. 118-128.

14. Kumar S.R., Surendhar S., Negi A., Raja P. Zig-Zag Transformer performance analysis on harmonic reduction in distribution load. India Conference Electrical, Control and Computer Engineering (INECCCE). 2011. Pp. 107-112.

УДК 621.314

КОМПЛЕКСНОЕ УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А.Ф. Жаркин, чл.-корр. НАН Украины, **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), «распределительного» статического синхронного компенсатора реактивной мощности (D-СТАТКОМ) или многофункционального компенсатора реактивной мощности (МКРМ) для комплексного улучшения качества электроэнергии и обеспечения электробезопасности в локальных системах электроснабжения. ГФКП предназначены для компенсации нагрузочных токов в нулевом проводе трехфазной сети низкого напряжения, симметричного регулирования (стабилизации) уровня напряжения нагрузки и фильтрации токов высших гармоник в сети. Библ. 14, рис. 6, табл. 1.

Ключевые слова: локальная система электроснабжения, качество напряжения, электробезопасность, гибридный фильтрокомпенсирующий преобразователь, транзисторный ключ переменного тока.

COMPLEX IMPROVEMENT OF POWER QUALITY AND ENSURE ELECTRICAL SAFETY IN LOCAL POWER SUPPLY SYSTEMS WHEN USING HYBRID FILTER COMPENSATING CONVERTERS

A.F. Zharkin, V.O. Novskiy, D.O. Malakhatka
Institute of electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,
e-mail: novsky@ied.org.ua

The main aspects of the application for the complex improvement of the electrical power quality and the ensure electrical safety in the local power supply systems of the developed hybrid filter compensating converters (GFCC), which are based on a regulated filtering device, "distributive" static synchronous reactive power compensator or a multifunctional reactive power compensator are considered. 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 in the network. References 14, figures 6, table 1.

Key words: local power supply system, voltage quality, electrical safety, hybrid filter compensating converter, transistor AC switch.

1. DSTU EN 50160:2014 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. Kyiv: Minekonomrozhvytku Ukrainy. 2014. 27 p. (Ukr)
2. Zharkin A.F., Novskiy V.O., Malakhatka D.O. Hybrid filter-compensating converters for three-phase systems with nonlinear and variable loads. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 48–52. (Ukr)
3. Zharkin A.F., Novskiy V.O., Malakhatka D.O. Analysis and modeling of the operation modes of hybrid filtering-compensating converters designed to provide electromagnetic compatibility in three-phase four-wire systems. *Visnyk NTU «KhPI» Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia i praktyka ta Sylova elektronika i enerhoeffektyvnist*. 2017. No 27. Pp. 201–205. (Ukr)
4. Shydlovskiy A.K., Novskiy V.O., Zharkin A.F. Stabilization of electrical energy parameters in three-phase systems by semiconductor correction devices. Kyiv: IED NAN Ukrainy, 2013. 378 p. (Ukr)
5. Shidlovskii A.K., Fediy V.S. Electrical circuits with semiconductor switches. Kyiv: IED NAN Ukrainy, 2010. 270 p. (Rus)
6. Chetoshnikova L.M., Smolencev N.I., Chetoshnikov S.A., Degtyarev D.V. The energy management system in the local electrical network of low voltage. *Polzunovskii vestnik*. 2015. No 1. Pp. 103–107. (Rus)
7. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Kaplychniy N.M., Novskiy V.O., Kozlov O.V., Malakhatka D.O. Three-phase electrical network. Patent na korysnu model No 117704 Ukraina. Opubl. 10.07.2017, Biul. No 13. (Ukr)
8. Rules for the arrangement of electrical installations. Kharkov: Fort, 2015. 808 p. (Rus)
9. Benysek G. Improvement in the Quality of Delivery of Electrical Energy using Power Electronics Systems. – London: Springer, 2007. 191 p.
10. Kulkarni O., Mishra M. Power quality improvement using Zig-Zag transformer and DSTATCOM in three phase power distribution system. India Conference (INDICON), *Annual IEEE*. Mumbai, India, 2013. Pp. 1–6.
11. Jayaprakash P., Singh B., Kothari D. Reduction in rating of voltage source converter of DSTATCOM using a Zig-Zag transformer. *Industrial Electronics (ISIE)*, 2012. Hangzhou, China: IEEE, 2012. Pp. 1066–1071.
12. Song Q., Yin Z., Xue J. Zero-sequence harmonics current minimization using zero-blocking reactor and Zig-Zag transformer. Third International Conference on *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. Nanjing, China: IEEE, 2008. Pp. 1758–1764.
13. Strzelecki R., Mysak P., Woiciechowski D. 18-pulse diode rectifier with active Power filter. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. Spetsialnyi vyppusk*. 2013. Pp. 118–128.
14. Kumar S.R., Surendhar S., Negi A., Raja P. Zig-Zag Transformer performance analysis on harmonic reduction in distribution load. India Conference *Electrical, Control and Computer Engineering (INECCE)*. 2011. Pp. 107–112.

Надійшла 07.09.2017
Остаточний варіант 06.11.2017