

УДК 621.314

К.А. Липковский, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровский**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Повышение эффективности использования вольтодобавочных трансформаторов с секционированными обмотками в составе стабилизатора напряжения переменного тока

Трансформирующие элементы (ТЭ) с секционированием обмоток в системах преобразовательной техники принимают непосредственное участие в реализации основного функционального преобразования. Этот класс ТЭ имеет ряд особенностей, которые были учтены в разработанной авторами методологии их расчета и проектирования. В работе эта методология применена для расчета вольтодобавочных трансформаторов с секционированием обмоток, которые характеризуются многовариантностью исполнения в составе стабилизатора напряжения переменного тока. При этом получено существенное повышение эффективности использования таких трансформирующих элементов за счет варьирования плотности тока секций обмоток. Библ. 11, рис. 5, табл. 3.

Ключевые слова: трансформаторно-ключевая исполнительная структура, стабилизатор напряжения переменного тока, вольтодобавочный трансформатор, эффективность использования.

К.О. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 036890, Ukraine

Increasing the efficiency of using booster transformers with segmented winding composed of AC voltage stabilizer

Transforming elements (TE) with windings sectioning in converter equipment systems take a direct part in the implementation of the main functional transformation. This class of TE has a number of features that have been included in the methodology developed by the authors for their calculation and design. In this work the methodology used for calculating the booster transformers with sectioning windings, which are characterized by multi-variant approach in the execution part of the AC voltage stabilizer. With these a significant increase utilization efficiency of such transforming elements due to variations in the density of the current winding sections. References 11, figures 5, tables 3.

Key words: transformer-and-switches executive structure, AC voltage stabilizer, tap changing transformer, booster transformer, utilization efficiency

Надійшла 29.07.2016

Received 29.07.2016

УДК 621.314.:621.3.011

**СИЛОВІ СХЕМИ ГІБРИДНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ДЛЯ ТРИФАЗНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ТА ЗМІННИМИ
НАВАНТАЖЕННЯМИ**

Д.О. Малахатка, асп.

Институт электродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, 03057, м. Київ, Україна
e-mail: malakhatka@ied.org.ua

Розглянуто основні положення розробки силових схем гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів, які виконані на основі регульованих фільтросиметруючих пристроїв і «розподільних» D-СТАТКОМ або багатофункціональних компенсаторів реактивної потужності. Гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі призначено для компенсації навантажувальних струмів у нульовому проводі трифазної мережі, регулювання (стабілізації) напруги навантаження та фільтрації струмів вищих гармонік у мережі. Наведено силові схеми зазначених пристроїв та вирази для розрахунку режимних параметрів трансформаторно-ключового перетворювача у складі гібридного фільтрокомпенсуючого пристрою. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: якість електричної енергії, фільтрокомпенсуючий пристрій, регульований фільтросиметруючий пристрій, статичний синхронний компенсатор, електромагнітна сумісність.

Вступ. Проблема зниження негативного впливу на якість електричної енергії (ЯЕ), що виникає при підключенні до систем електропостачання середньої та низької напруг потужних напівпровідникових перетворювачів і пристроїв регульованого електроприводу та електротехнологічних установок, є актуальною. Це пов'язано з тим, що нелінійний та імпульсний характер процесів перетворення електроенергії силовими вентильними елементами є причиною погіршення ЯЕ [4, 5, 8]. Для її покращення застосовують різні напівпровідникові пристрої для компенсації неактивних складових повної потужності, а також пасивні та силові активні фільтри, але зазначені пристрої не вирішують завдання підвищення ЯЕ комплексно. Тому важливою науково-технічною задачею є розроблення гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв (ГФКП), що у цілому вирішують поставлене завдання.

Для практичної реалізації задачі розробки зазначених ГФКП необхідно провести аналіз їх функціональних можливостей та особливостей побудови силових схем ГФКП, що виконані на основі регульованих фільтросиметруючих пристроїв (РФСП), «розподільного» статичного синхронного компенсатора (*D*-СТАТКОМ) або багатофункціонального компенсатора реактивної потужності (БКРП). ГФКП призначений для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) відповідальних споживачів електроенергії, оптимізації режимів розподільних електричних мереж низької напруги (НН), зменшення втрат напруги і активної потужності та комплексного підвищення параметрів якості електроенергії [1, 3, 9].

Метою статті є дослідження і розробка схемотехнічних рішень силовій частини ГФКП для низьковольтних електричних мереж з нелінійними та змінними навантаженнями і оцінка його впливу на мережу живлення за допомогою проведення розрахунків режимних параметрів перетворювача при подальшому практичному застосуванні ГФКП у розподільних електричних мережах для комплексного покращення якості електроенергії та забезпечення ЕМС споживачів електроенергії.

Викладення основного матеріалу. На рис. 1 показано узагальнену (базову) схему ГФКП першого з двох їх типів, що складається з «розподільного» *D*-СТАТКОМ (тобто призначеного для роботи в розподільних мережах) та РФСП, який за допомогою трифазного комутатора ступенів регулювання (ТКСР) напруги, виконаного на транзисторних ключах змінного струму $K1...K12$ ($K1...K9$ – «мережеві» ключі, а $K10...K12$ – «шунтуючі» ключі), забезпечує трирівневе симетричне регулювання напруги навантаження («вольтовіднімання», «номінал» та «вольтододавання»). Тут введено такі основні позначення: ФВГ1...ФВГ3 – фільтри вищих гармонік; $P1...P3$ – послідовні мережеві реактори зв'язку; $C1, C2$ – накопичуючі конденсаторні батареї.

Вторинні обмотки *WII* вольтододадового автотрансформатора (ВАТ) у складі РФСП підключені до мережі та навантаження, причому з метою виключення протікання по них навантажувальних струмів нульової послідовності (НП) ці обмотки обов'язково мають бути «попередньо включені» до мережі за схемою на рис. 1. З'єднання первинних напівобмоток ВАТ за схемою «зустрічний зигзаг» забезпечує ефект одночасного зрівноважування системи напруг, покращення їх гармонічного складу за рахунок фільтрації непарних гармонік, кратних трьом, і параметричного демпфірування несиметричних коливань напруги [2, 6, 10]. Це обумовлено тим, що зазначене з'єднання первинної обмотки *WI* ВАТ створює великий опір (сотні Ом) струмам прямої та зворотної послідовностей і дуже малий опір струму НП, оскільки його величина визначається в основному омичним опором первинної обмотки ВАТ і при правильному конструктивному її виконанні досягає сотих часток Ом.

Додаткову компенсацію вищих гармонік струму в нейтралі мережі здійснює «розподільний» *D*-СТАТКОМ, який працює в режимі активного фільтра і додатково може плавно регулювати рівень напруг у відносно невеликому діапазоні. Це дає змогу знизити значення струму в нейтралі, який компенсується практично до нульового значення і тим самим забезпечується зрівноважування і регулювання системи напруг та поліпшення їх гармонічного складу, а також зниження додаткових втрат активної потужності в мережі. Ефективність застосування ГФКП в електричних мережах багато в чому залежить від оптимального вибору схеми, параметрів і способу управління швидкодіючим *D*-СТАТКОМ, який дає змогу за-

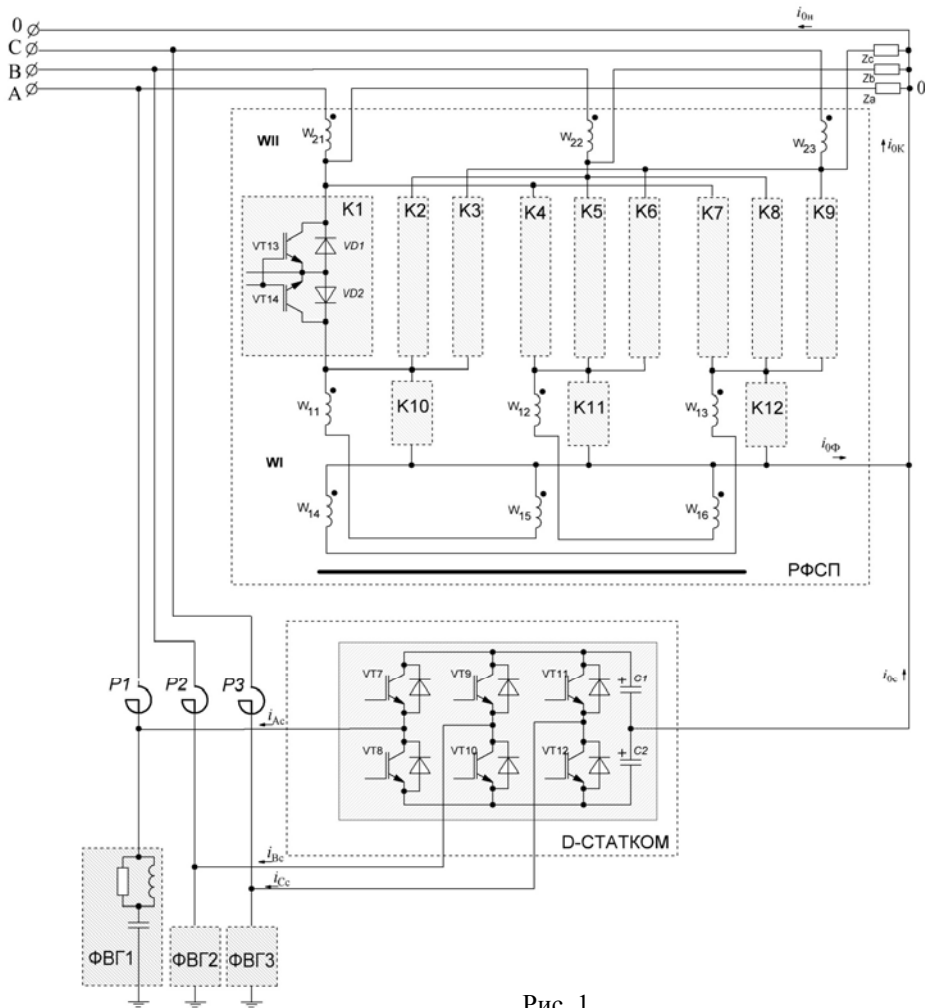


Рис. 1

безпечити роздільне управління активною і реактивною потужностями (РП). Шляхом зміни вихідної напруги *D*-СТАТКОМ спроможний управляти обміном РП між ним і мережею живлення, тобто коли напруга в точці його підключення залишається постійною, *D*-СТАТКОМ поводитья аналогічно статичному компенсатору РП. Проте в режимі обмеження потужності він стає джерелом струму – рівень РП не залежить від напруги на його шини, тобто коли рівень вихідної напруги *D*-СТАТКОМ більший за напругу системи, він генерує РП і, навпаки, коли він менший напруги мережі, *D*-СТАТКОМ поглинає РП. *D*-

СТАТКОМ призначені для роботи в розподільних мережах та виконуються на основі транзисторного або тиристорного перетворювача напруги (ПН), який може бути короткочасно переведений у випрямний або інверторний режим. ПН використовується як базовий модуль при створенні елементів ГФКП першого типу [4, 9].

РФСП у складі ГФКП працює в 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 тільки ключі *K3, K4, K8*). Напруга навантаження в кожній фазі є векторною сумою відповідної фазної напруги мережі й напруги вторинної обмотки ВДТ, яку включено в розсічку лінії цієї фази мережі. В результаті симетричне регулювання рівня напруги навантаження здійснюється шляхом циклічної зміни електричних зв'язків вторинної обмотки *WII* з основною *WI* при незмінному їхньому магнітному зв'язку за допомогою ключів *K1...K9*. Ключі ж *K10...K12* необхідні для забезпечення вільної циркуляції реактивної енергії ВАТ з метою виключення "дросельного" режиму його роботи і пов'язаним з ним ефектом "зворотної трансформації". Це досягається ввімкненням *K10...K12* після виключення відповідних трьох ключів *K1...K9* при перемиканні ступенів регулювання напруги навантаження, тобто в цей момент напівобмотки ВАТ *W11...W16* замикаються в момент їх комутації.

У режимі «вольтовіднімання» (мінімальний рівень симетричного регулювання) діючі значення напруг навантаження і вторинної обмотки ВАТ мають вид

$$U_{H \min} = \frac{U_{\phi} \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{n^2 + 3n + 3}}; \quad \Delta U_{\min} = \frac{U_{\phi} \cdot n}{\sqrt{n^2 + 3n + 3}}, \tag{1}$$

де $n = WII/WI$ – коефіцієнт трансформації ВАТ.

У режимі «номінал» (середній ступінь симетричного регулювання) діючі значення напруг навантаження і вторинної обмотки ВАТ такі :

$$U_{Hnom} = \frac{U_{\phi} \sqrt{3}}{\sqrt{n^2 + 3}}; \quad \Delta U_{nom} = \frac{U_{\phi} n}{\sqrt{n^2 + 3}}. \quad (2)$$

В режимі «вольтододавання» (максимальний ступінь симетричного регулювання) діючі значення напруг навантаження і вторинної обмотки ВАТ мають вид

$$U_{Hmax} = \frac{U_{\phi} \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{n^2 - 3n + 3}}; \quad \Delta U_{max} = \frac{U_{\phi} \cdot n}{\sqrt{n^2 - 3n + 3}}. \quad (3)$$

Вирази (1)...(3) дають змогу розрахувати значення коефіцієнтів трансформації ВАТ РФСП для виконання вимог стандартів з нормування показників якості напруги [2].

Схему ГФКП, який виконано на основі D-СТАТКОМ та РФСП, де трифазний комутатор ступенів регулювання (ТК1...ТК3) побудовано на базі запірних тиристорів, зображено на рис. 2, причому такий РФСП за всіма функціональними властивостями цілком аналогічний розглянутому (рис. 1). Час перемикання ступенів регулювання напруги в зазначених транс-

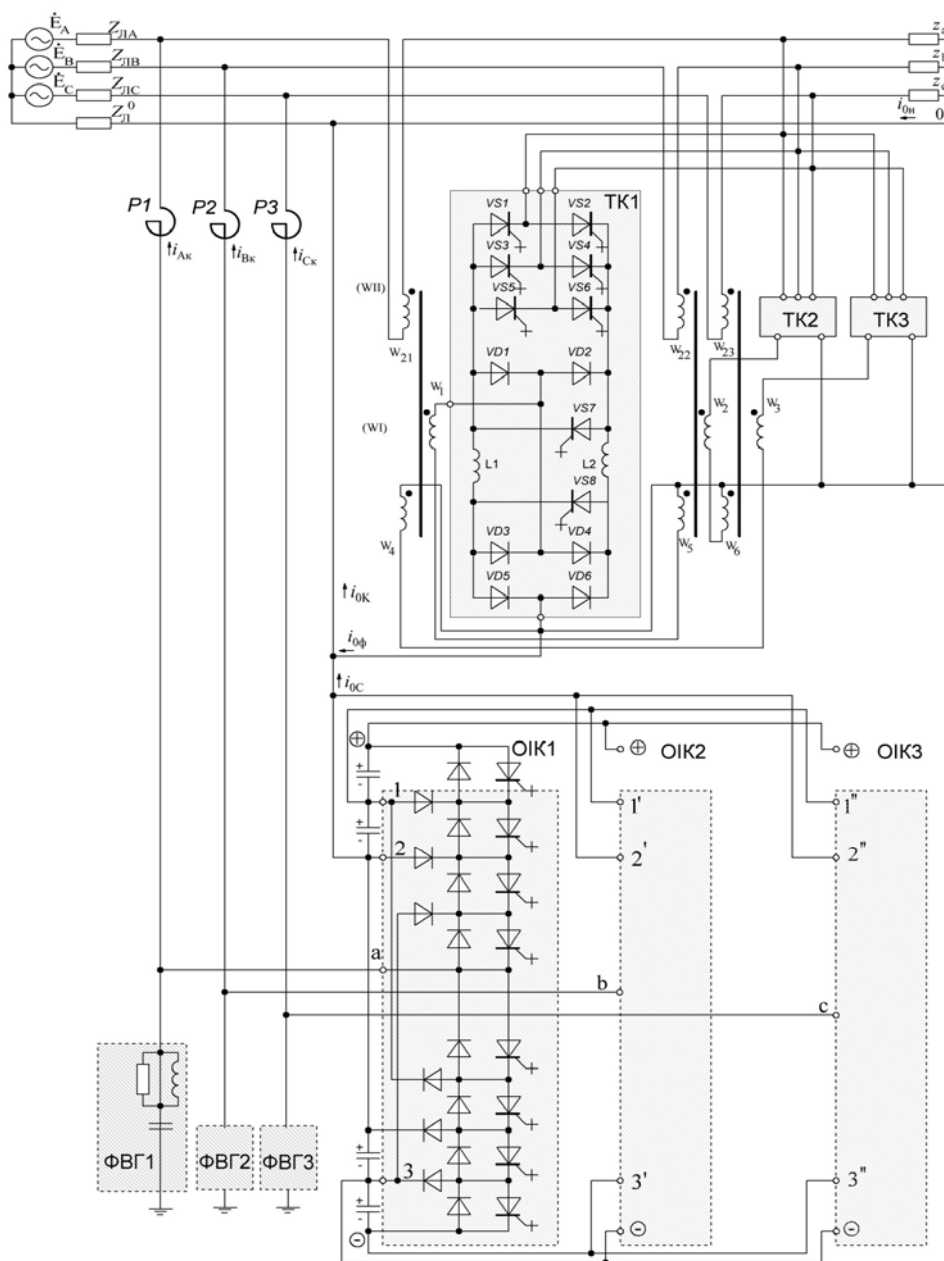


Рис. 2

форматорно-тиристорних перетворювачах значно менший (у десятки разів) одного періоду основної гармоніки струму мережі, тому вони при введенні ШІМ додатково можуть забезпечити швидкодіючу стабілізацію напруги навантаження.

Тут *D*-СТАТКОМ побудовано на основі трифазного п'ятирівневого інвертора напруги, що складається з трьох ідентичних блоків – однофазних інверторних комірок (ОІК1... ОІК3) і виконано на базі IGBT-модулів. У п'ятирівневих інверторах цього класу вихідна напруга на елементах силової схеми в чотири рази менша напруги джерела живлення, тобто такий інвертор з п'ятьма рівнями напруги можна виконати на напівпровідникових приладах, що мають клас за напругою в чотири рази менший, ніж напруга мережі. Це дає змогу обійтись без послідовного з'єднання їх ключових елементів та діодів. Частота перемикань в інверторі з п'ятьма рівнями напруги порівняно зі схемами інверторів, наприклад, з двома рівнями вихідної напруги в чотири рази більша, тому його вихідна напруга має значно менший склад вищих гармонік.

Особливістю зазначених схем РФСП у складі ГФКП є те, що в деяких неповнофазних режимах мережі та при увімкнених відповідних мережевих транзисторних або тиристорних ключах в одній з фаз пристрою значення напруги цієї фази на навантаженні знижуються лише менш ніж на 10...15 % від значення напруги мережі за рахунок особливостей магнітних зв'язків схеми з'єднання первинної обмотки ВАТ у «зустрічний зигзаг». Це забезпечує роботу трифазних навантажень при відсутності однієї з фаз мережі, а також надійність електропостачання споживачів у цілому [2, 4].

На рис. 3 зображено схему ГФКП, у якому «*D*-СТАТКОМ» виконано на базі потужних IGBT-транзисторів, а також РФСП, який складається з трифазного трансформатора жив-

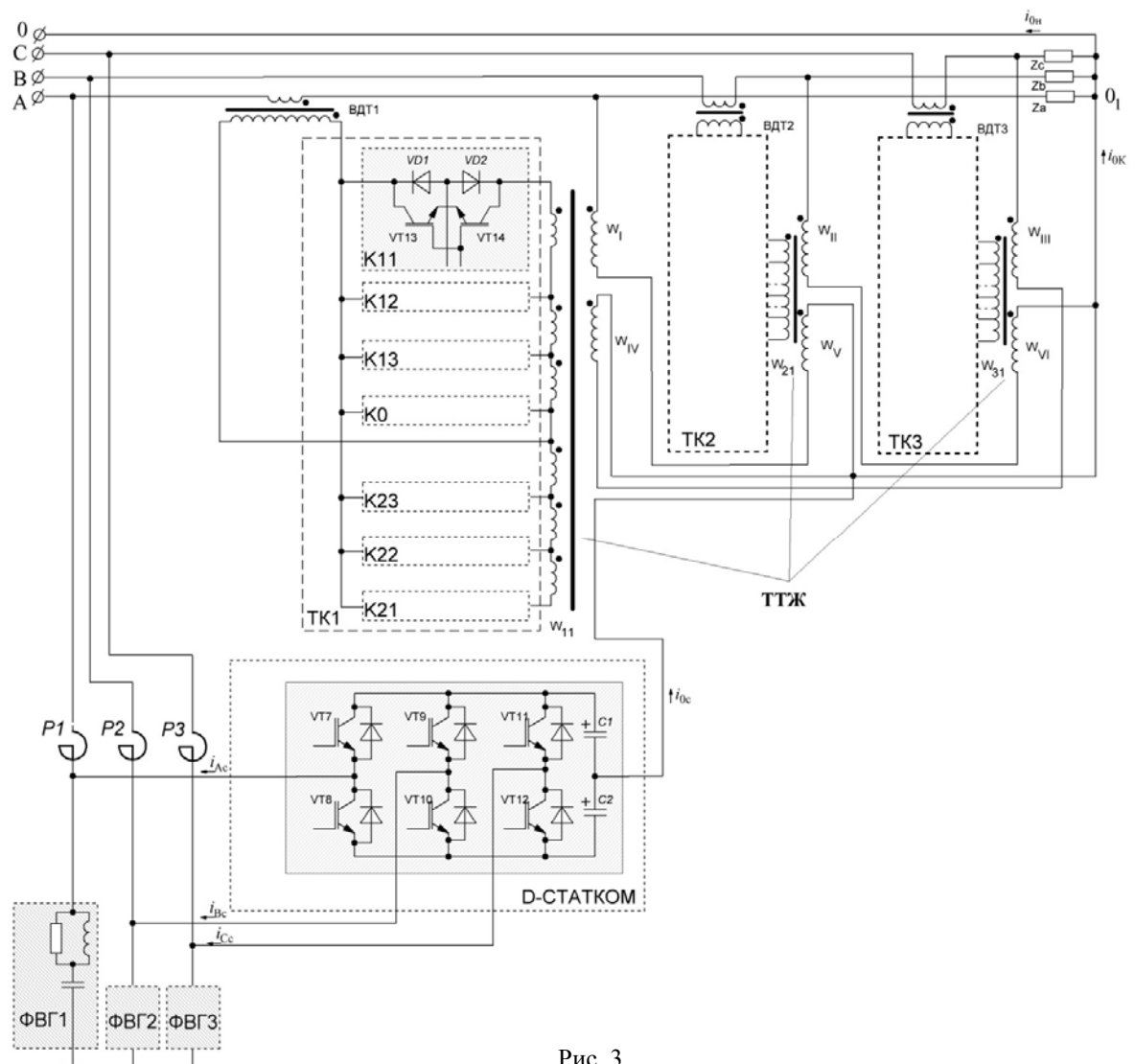


Рис. 3

лення (ТТЖ) і трьох однофазних вольтододаткових трансформаторів ВДТ1-ВДТ3, вторинна обмотка кожного з яких ввімкнена в розсічку лінії відповідної фази мережі. Первинна обмотка ТТЖ такого РФСП виконана за схемою «зустрічний зигзаг» без вольтододаткових обмоток і є фільтросиметруючим пристроєм, а кожна вторинна обмотка ТТЖ (секціонувана і реверсивна) і первинна обмотка кожного ВДТ призначені для пофазного регулювання напруги навантаження. Ця схема РФСП не вимагає реалізації циклічного підключення первинної обмотки РФСП, тому застосування даного ТТЖ для живлення первинних обмоток ВДТ1...ВДТ3 сприяє зниженню встановленої потужності РФСП і підвищенню ефективності використання його елементів для фільтрації гармонік і нерівноваженості системи напруг.

У показаній вище схемі мережеві ключі K11...K23 призначені для зміни рівня напруги на первинній обмотці ВДТ, причому K11...K13 здійснюють пряму передачу напруги, а ключі K21...K23 – реверсну передачу напруги на первинну обмотку кожного з ВДТ. Шунтуючий ключ K0 необхідний для замикання первинної обмотки ВДТ в моменти перемикання ступенів регулювання напруги. Крім того, ключ K0 переводить роботу ВДТ у режим трансформатора струму при відключених всіх мережевих ключах, тобто в цьому випадку забезпечується номінальний рівень напруги навантаження. Така схема симетричного регулювання напруги забезпечує сім ступенів регулювання, оскільки на ній наведено по три ключі для прямого і реверсивного режимів роботи. У загальному ж випадку кількість ключів може бути збільшена, в результаті чого підвищується кількість ступенів симетричного регулювання напруги.

На рис. 4 показана схема ГФКП другого типу, який складається з багатофункціонального компенсатора реактивної потужності та РФСП при введенні штучної комутації (ШК) тиристорів силової схеми. БКРП є частотно-регульованим джерелом реактивної потужності, який виконано на основі безпосереднього перетворювача частоти, і за рахунок швидкодіючого перемикання компенсуючого реактора (КР) та відповідного управління тиристорами забезпечує формування в ньому плавно-регульованого реактивного струму ємнісного або індуктивного характеру [4, 5]. У цьому випадку БКРП виконує основні функції розподільного «D-СТАТКОМ» за виключенням здійснення активної фільтрації гармонік.

На рис. 4 введено такі позначення: СТМ – силовий тиристорний міст; ТПЧФ – трансформаторний перетворювач числа фаз; КДМ – комутуючий діодний міст; РФСП – регулю-

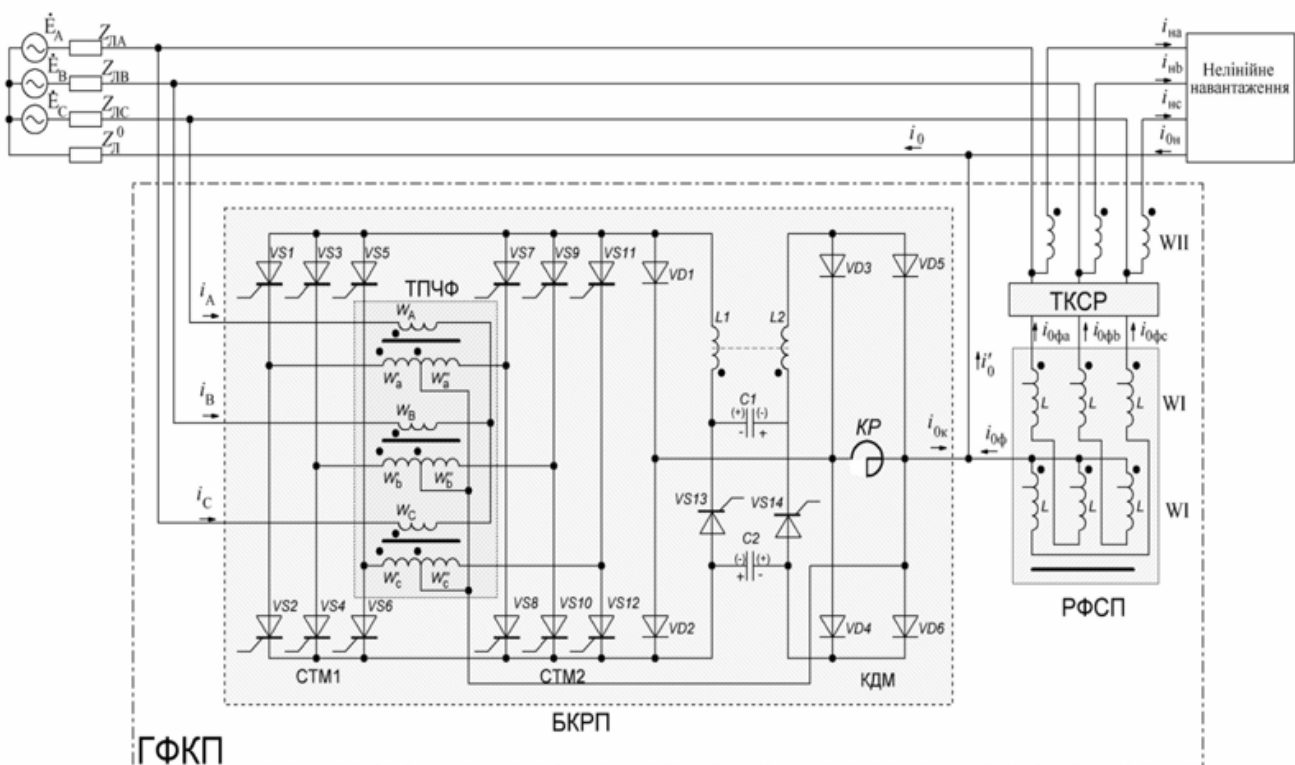


Рис. 4

ваний фільтросиметруючий пристрій; ТКСП – трифазний комутатор ступенів регулювання напруги; КР – компенсуючий реактор. СТМ1, СТМ2 складаються з трьох (за числом фаз) пар фазних тиристорів $VS1...VS12$ і служить для підключення навантаження КР до фаз мережі живлення через ТПЧФ за допомогою силового тиристора $VS13$ і роздільних діодів $VD1...VD2$. Вузол ШК, який складається з комутуючих дроселів $L1$ і $L2$ та конденсаторів $C1$ і $C2$, силового $VS13$ та комутуючого $VS14$ тиристорів і діодів $VD1...VD6$), забезпечує в необхідний момент часу процес швидкодіючого перемикавання КР з однієї фази мережі на її будь-яку іншу фазу, а КДМ за допомогою комутуючого тиристора $VS14$ – замикання загасаючого струму КР у момент перемикавання останнього для вимкнення перенапруг на елементах схеми БКРП. Час перемикавання ступенів регулювання цієї схеми РФСП становить менш ніж 150 мкс, що обумовлює істотне підвищення ефективності та надійності роботи споживачів електроенергії та самого РФСП. Вузол ШК характеризується високою комутаційною спроможністю і стійкістю у процесі перемикавання ступенів регулювання напруги, оскільки тут здійснюється жорстка паралельна комутація тиристора $VS13$ ($VS14$) імпульсним джерелом напруги [4, 5].

Підвищена швидкодія перемикавання КР у цьому випадку досягається за рахунок того, що всі тиристори відновлюють свою запірну (замикаючу) спроможність під дією зворотної напруги комутуючих конденсаторів $C1$, $C2$, але в різні інтервали часу, тобто тиристори $VS13$ ($VS14$) закриваються з моменту ввімкнення протитактичних їм тиристорів $VS14$ ($VS13$) до моменту переходу сумарної напруги $C1$ і $C2$ через нульове значення, а фазні тиристори СТМ1 і СТМ2 – з моменту переходу через нульове значення сумарної напруги конденсаторів, яка прикладена до силового тиристора $VS13$ в прямому напрямку до моменту його ввімкнення, тобто до кінця паузи в напрузі КР [4].

Для визначення енергетичних показників цього трансформаторно-ключового перетворювача БКРП (рис. 4) і оцінки його впливу на мережу живлення проведено розрахунки режимних параметрів перетворювача (для спрощення аналізу приймемо, що частота повторення сигналів керування фазними й силовими тиристорами дорівнює подвоєній частоті напруги мережі). Оскільки в цьому випадку має місце прямий порядок чергування фаз при по черговому (циклічному) підмиканні КР через ТПЧФ до мережі, миттєва напруга на КР визначається підсумовуванням добутків миттєвої напруги відповідної фази на свою ж комутаційну функцію, що характеризує алгоритм керування ключовими елементами перетворювача [4, 5]:

$$u_H(t) = U_m \sin \omega t \cdot \psi_A(t) + U_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \psi_B(t) + U_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \psi_C(t), \quad (4)$$

де комутаційні функції визначаються в такий спосіб:

$$\left. \begin{aligned} \psi_A(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \left(k \frac{\pi}{6} \right) \cos 2k\omega t, \\ \psi_B(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \left(k \frac{\pi}{6} \right) \cos \left[k \left(2\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right], \\ \psi_C(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \left(k \frac{\pi}{6} \right) \cos \left[k \left(2\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Тоді при підстановці в рівняння (4) виразів (5) і після заміни змінної $k=6q+1$ (де $q=-\infty...-2; -1; 0; 1; 2; \dots \infty$) маємо

$$u_H(t) = \frac{3U_m}{\pi} \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \frac{(-1)^{q+1}}{6q+1} \sin [(12q+1)\omega t]. \quad (6)$$

З аналізу виразу (6) випливає, що крива напруги навантаження складається з набору дванадцяти рівної тривалості відрізків синусоїд фазних напруг мережі за період $T=2\pi/\omega$ і має при $q=0$ явно виражену основну гармоніку [4].

Миттєвий струм $i_H(t)$ активно-індуктивного навантаження з урахуванням, що номер поточної гармоніки $\nu = 12q+1$, запишемо у вигляді

$$i_H(t) = \frac{3U_m}{\pi} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left(\frac{(-1)^{q+1}}{(6q+1)z_{Hv}} \cdot \sin[(12q+1)\omega t - \varphi_{Hv}] \right). \quad (7)$$

Для чисто індуктивного навантаження – КР маємо

$$i_L(t) = \frac{3U_m}{\pi\omega L_H} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left(\frac{(-1)^q}{(6q+1)(12q+1)} \cdot \cos[(12q+1)\omega t] \right). \quad (8)$$

Одним з важливих режимних параметрів будь-якого перетворювача електричної енергії є його вхідний струм, який характеризує вплив перетворювача на мережу живлення з боку забезпечення ЯЕ. У зв'язку з тим, що в цьому випадку ТПЧФ є стержневим трифазним трансформатором, то на відміну від безпосереднього підімкнення перетворювача до мережі живлення (або через ТПЧФ, що складається з групи трьох однофазних трансформаторів), вхідні струми в кожній його фазі мають кращий гармонічний склад, оскільки їх складові підсумовуються в первинній обмотці ТПЧФ.

Вхідні струми в кожній з фаз БКРП визначаються в такий спосіб:

$$[i_j(t) = i_H(t) \cdot \psi_j(t)]. \quad (9)$$

Тобто для фаз мережі $j = A, B$ і C значення миттєвого струму мають такий вигляд:

$$i_A(t) = \frac{3U_m}{\pi^2} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^{q+s+1}}{(6q+1)(6s+1)z_{Hv}} \cdot \left\{ \sin\{[12(q+s)+3]\omega t - \varphi_{Hv}\} \right\} + \sin\{[12(q-s)-1]\omega t - \varphi_{Hv}\}; \quad (10)$$

$$i_B(t) = \frac{3U_m}{\pi^2} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^{q+s+1}}{(6q+1)(6s+1)z_{Hv}} \cdot \left\{ \sin\left\{[12(q+s)+3]\omega t - \frac{2\pi}{3}\varphi_{Hv}\right\} \right\} + \sin\left\{[12(q-s)-1]\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_{Hv}\right\}; \quad (11)$$

$$i_C(t) = \frac{3U_m}{\pi^2} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^{q+s+1}}{(6q+1)(6s+1)z_{Hv}} \cdot \left\{ \sin\left\{[12(q+s)+3]\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_{Hv}\right\} \right\} + \sin\{[12(q-s)-1]\omega t - \varphi_{Hv}\}, \quad (12)$$

причому у цих виразах складові « $12(q+s)+3$ » та « $12(q-s)-1$ » визначають гармонічний склад вхідних струмів [4]. При рівності дискретних змінних q і s з (10)...(12) випливає, що основні гармоніки $i_{j1}(t)$ утворюють симетричну систему зі зсувом $2\pi/3$, тобто для струму $i_{A1}(t)$, наприклад, маємо

$$i_{A1}(t) = \frac{3U_m}{\pi^2} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \frac{1}{(6q+1)^2 z_{Hv}} \sin(\omega t + \varphi_{Hv}).$$

Звідки випливає, що для $q=0$ ($\varphi_{Hv} = \varphi_{H1}$) основна гармоніка вхідних струмів випереджає відповідну фазну напругу, тобто цей перетворювач генерує в мережу реактивну потужність при індуктивному навантаженні КР, що цілком відповідає загальній теорії частотно-регульованих джерел реактивної потужності [4, 5].

Виконано імітаційне моделювання режимів роботи «розподільного» D-СТАТКОМ і РФСП у складі ГФКП для різних типів і потужності навантаження трифазної чотирипровідної мережі з нелінійними та змінними навантаженнями. Це дало змогу провести критичний аналіз розроблених силових схем ГФКП при різних видах тривалих і короткочасних ненормальних, аварійних і післяаварійних режимів роботи такої ділянки низьковольтної мережі, зокрема, одно-, дво- та трифазних КЗ на затискачах навантаження (у місці встановлення ГФКП), а також обривах лінійних провідників перед місцем установки ГФКП та ін. Наприклад, напруга третьої гармоніки при увімкненні РФСП зменшується з 19,6 до 0,6 %, а струм

третьої гармоніки – з 38,9 до 1,1 %; напруга НП знижується у середньому в 25...30 разів, а струм у нульовому проводі – у 30...35 разів [1].

Висновки. 1. Розглянуто особливості схемотехнічних рішень силової частини ГФКП при реалізації двох типів їх побудови, а саме при використанні «розподільного» D-СТАТКОМ, який працює в режимі активного фільтра гармонік, і багатофункціонального компенсатора реактивної потужності та проведено порівняльний аналіз силових схем ГФКП. Показано, що основним вузлом ФГКП є регульований фільтросиметруючий пристрій на основі вольтододадового автотрансформатора, що виконаний за схемою «зустрічний зигзаг».

2. Одержані результати досліджень дають змогу визначити оптимальні значення параметрів силових елементів та системи керування РФСП для створення ефективних ГФКП з метою їх практичного застосування в розподільних електричних мережах з нульовим проводом для комплексного покращення якості електроенергії.

3. Застосування ГФКП у трифазних чотирипровідних системах дає змогу значно покращити показники якості напруги в мережі з нелінійними та несиметричними навантаженнями і забезпечити ЕМС споживачів за рахунок зниження значень сумарних коефіцієнтів гармонічних спотворень кривої струму та напруги у мережі, розмаху зміни напруги (коливань), а також коефіцієнта несиметрії напруг за нульової послідовності.

4. Гібридний фільтрокомпенсуючий пристрій є ефективним засобом для комплексного забезпечення ЕМС у вузлах живлення відповідальних споживачів, при цьому ГФКП дає змогу зрівноважити систему напруг, регулювати їх рівень та зменшити додаткові втрати енергії в мережі, здійснити енергоживлення навантажень при відсутності однієї з фаз мережі, а також зменшити спотворення форми кривої напруги навантаження і рівень кондуктивних електромагнітних завод.

1. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 48–52.
2. Новський В.О., Курило І.А., Грудська В.П., Малахатка Д.О. Багатофункціональний трансформаторно-ключовий перетворювач для комплексного підвищення якості електроенергії у трифазній системі зі змінним і нелінійним навантаженням // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 2 (88). – С. 27–33.
3. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Принципи побудови гібридних фільтросиметруючих пристроїв для низьковольтних електричних мереж з нелінійними та змінними навантаженнями // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – № 4. – С. 93–100.
4. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. – Київ, Інститут електродинаміки НАН України. – 2013. – 378 с.
5. Шидловський А.К., Федий В.С. Электрические цепи с вентиляльными коммутаторами. – Киев: ООО «Арпринт», 2010. – 270 с.
6. Jou H.-L. Uses of zig-zag Transformer applying in the three-phase tribution power system / H.-L. Jou, J.-C. Wu, K.-D. Wu, W.-J. Chiang, and Y.-H // IEEE Trans. Power Del. – 2005. – Vol. 2. – P. 1168–1173.
7. Jou H.-L. A thr wire power filter comprising a three-phase three-wire act zig-zag transformer / H.-L. Jou, K.-D. Wu, J.-C. Wu, and W.-J. Chiang. // IEEE Trans. Power Electron. – Jan. 2008. – Vol. 4. – P. 252–259.
8. Singh B.P. Reduced Rating VSC With a Zig-Zag Transformer for Current Compensation in a three-Phase Four-Wire Distribution System / Singh B.P., Jayaprakash, T.R. Somayajulu, D.P. Kothari // IEEE Transactions On Power Delivery. – 2009 (Jan). – Vol. 24, No. 1. – P. 249–258.
9. Sewan Choi Analysis and Control of a Single-Phase- Inverter- zigzag Transformer Hybrid neutral- current suppressor in Three-phase Four Wire Systems / Sewan Choi, Minsoo Jang // IEEE Trans. Ind. Elec. – August 2007. – Vol. 54, No. 4. – P. 2201–2208.
10. Qipeng Song Zero-Sequence Harmonics Current Minimization Using Zero-Blocking Reactor and Zig-Zag Transformer / Qipeng Song, Zhongdong Yin, Jinhui Xue // DRPT2008 6-9 April 2008 Nanjing China.

УДК 621.314.:621.3.011

Д.А. Малахатка

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

Силовые схемы гибридных фильтрокомпенсирующих преобразователей для трёхфазных систем с нелинейными и изменяющимися нагрузками

Рассмотрены основные положения разработки силовых схем гибридных фильтрокомпенсирующих преобразователей, которые выполнены на основе регулируемых фильтросимметрирующих устройств и «распределительных» D-СТАТКОМ или многофункциональных компенсаторов реактивной мощности. Гибридные фильтрокомпенсирующие преобразователи предназначены для компенсации нагрузочных токов в нулевом проводе трехфазной сети, регулирования (стабилизации) напряжения и фильтрации токов высших гармоник в сети. Приведены силовые схемы указанных устройств и выражения для расчета режимных параметров трансформаторно-ключевого преобразователя в составе гибридного фильтрокомпенсирующего устройства. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: качество электрической энергии, фильтрокомпенсирующее устройство, регулируемое фильтросимметрирующее устройство, статический синхронный компенсатор, электромагнитная совместимость.

D.O. Malakhatka

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Power schemes of hybrid filter-compensating converters which used in three-phase systems with nonlinear and nonsymmetrical loads

Basic principles of development of power schemes of hybrid filter-compensating converters which based on the regulated filter-compensating devices and distribution STATCOM or multifunction compensators of reactive-power are considered. Hybrid filter-compensating converters are intended for compensation of load currents in a zero-wire of three-phase network, adjusting (stabilizing) of voltage and filtration of currents of ultraharmonics in a electrical network. Power schemes of the indicated devices and expression for the calculation of regime parameters of transformer-switch converter which a hybrid filter-compensating device consist of. References 10, figures 4.

Key words: energy quality, filter-compensating device, regulating filter-symmetrical device, static synchronous compensator, electromagnetic capability.

Надійшла 10.11.2016

Received 10.11.2016