УДК 621.314.6
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-1/38>

Сівакова О.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Федів Є.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

СИЛОВІ ВИПРЯМЛЯЧІ СТРУМУ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У статті проведено аналіз енергетичної ефективності застосування засобів внутрішньої компенсації реактивної потужності силових керованих випрямлячів струму, які відповідатимуть сучасним вимогам до систем електропостачання. Серед них – заміна елементної бази, яка дає змогу вдосконалити спосіб фазового керування випрямлячами, а також застосування шунтувального діода. Розглянуто два способи фазового керування вентилями: перший – керування запізненням відкривання тиристорів; другий – керування випередженням закривання тиристорів. Застосування повністю керованих тиристорів чи силових транзисторів уможливорює роботу в режимах із генерацією реактивної потужності в мережу живлення. Показано, що зменшення рівня споживання реактивної потужності у разі застосування шунтувального діода за першого способу керування не спричинене повертанням у мережу живлення реактивної потужності, запасеної в згладжувальному реакторі. Досліджено вплив шунтувального діода на електромагнітні процеси у випрямлячі за другого способу керування тиристорами. Показано, що причиною зменшення споживання випрямлячем із нульовим діодом реактивної потужності з мережі живлення в режимах із глибоким регулюванням є зменшення кута зсуву першої гармоніки струму на вході випрямляча щодо напруги джерела живлення. У першому способі керування нульовий діод пришвидшує закривання провідних тиристорів, а в другому способі – затримує відкривання тиристорів. В обох випадках це приводить до зближення за фазою синусоїдальної напруги джерела живлення та фундаментального складника струму живлення, що зменшує рівень обміну реактивною потужністю зсуву між випрямлячем і джерелом живлення.

Ключові слова: випрямляч, шунтувальний (нульовий) діод, повністю керований тиристор, реактивна потужність.

Постановка проблеми. Важливим структурним елементом в концепції інтелектуальних електричних мереж Smart Grid та Microgrid є активний споживач як дієвий складник вирішення завдання підвищення надійності та ефективності електропостачання. Серед ознак активного споживача виділяють можливість регулювання електроспоживанням, яку асоціюють, перш за все, із забезпечення балансу активної потужності в системі. Водночас актуальним є також завдання забезпечення балансів реактивної потужності оператором розподільної мережі з метою підтримання оптимальних рівнів напруг у вузлах мережі, підвищення запасу стійкості роботи вузлів навантаження тощо [1], яке вирішують, як правило, встановленням у вузлах навантаження джерел реактивної потужності. У цьому плані активна поведінка споживача обмежується встановленням засобів компенсації реактивної потужності (далі – КРП), а на можливостях регулювання рівня споживання реактивної потужності активним споживачем не акцентується.

Суттєвим фактором споживання реактивної потужності вузлами навантаження є наявність в їхньому складі вентильних перетворювачів. Для живлення електроприймачів постійного струму, як правило, використовують силові напівпровідникові випрямлячі струму, виконані на основі напівпровідникових діодів (некерованих) чи силових одноопераційних тиристорів. Силові випрямлячі струму споживають реактивну потужність із мережі змінного струму, що є внутрішньою особливістю перетворювачів струму, оскільки зумовлене переважно специфікою фазового принципу керування одноопераційними напівпровідниковими вентилями.

Найбільш поширеним способом покриття потреби в ресурсі реактивної потужності для таких перетворювачів є застосування конденсаторних батарей, як правило, в складі фільтрокомпенсувальних пристроїв. Такий спосіб компенсації реактивної потужності відносять до класу зовнішньої компенсації. Пристроями зовнішньої компенсації для швидкодіяного регулювання реактивної потужності є статичні тиристорні

компенсатори (далі – СТК) на основі тиристорно-реакторних груп, а останнім часом, СТАТКОМ – універсальні і нині найдосконаліші компенсатори на основі інверторів напруги [1], використання яких через значну вартість найбільш виправдано для потужних систем електропересилання чи відповідальних потужних вузлів навантаження.

Із впровадженням інтелектуальних технологій в електропостачання особливої актуальності набуває спосіб внутрішньої компенсації реактивної потужності електроприймачів, тобто зниження споживання реактивної потужності шляхом змін у самому випрямлячі. Щодо перетворювачів технологічних установок це означає, що властивістю перетворювача повинна бути можливість регулювання рівня споживання з мережі реактивної потужності, залежно від потреб оператора мережі, який забезпечує балансування перетоків потужності. У цьому випадку можна стверджувати, що такий електроприймач набуває ознак активного електроприймача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Є розмаїття схем перетворювачів струму, в яких робота з випередженням за фазою основної гармоніки струму забезпечується додатковими комутуючими конденсаторами. Проте такі перетворювачі зі штучною комутацією вентилів не знайшли широкого практичного застосування через їхню складність, низьку надійність і складну електромагнітну сумісність із мережею живлення. Прикладом технічно нескладного способу внутрішньої компенсації реактивної потужності перетворювачів струму є застосування нульових (шунтувальних) діодів у схемах випрямлячів [2]. Проте він ефективний лише для режимів глибокого регулювання випрямленої напруги і зменшує споживання реактивної потужності лише частково. Іншим відомим способом внутрішньої компенсації реактивної потужності силових напівпровідникових перетворювачів є використання повністю керованих вентилів як елементної бази та спеціального способу їх фазового регулювання. Ідея цього способу щодо випрямлячів струму вперше наведена в [3], а дослідження режимів роботи в [4–6]. У відомих роботах основна увага зосереджена на режимах генерування перетворювачами струму реактивної потужності шляхом відкриття двоопераційних тиристорів за природних моментів часу, а закривання – дочасно керуючим струмом. Недослідженою є ефективність поєднання нульових діодів із фазовим регулюванням двоопераційних тиристорів перетворювачів.

Постановка завдання. Метою статті є обґрун-

тування ефективності застосування двоопераційних тиристорів у силовій частині випрямлячів струму та доцільності модернізації силових випрямлячів струму на напівкерованих тиристорах для надання їм властивостей активного електроприймача за їхньою здатністю до внутрішньої компенсації реактивної потужності з можливістю режимів перекомпенсації, що відповідає сучасним тенденціям побудови інтелектуальних систем електропостачання.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Насамперед зазначимо, що згідно з [7] під реактивною потужністю випрямляча як нелінійного елемента, який живиться від джерела синусоїдальної напруги, розуміємо потужність за першою гармонікою $Q_{(1)} = U_{(1)} \cdot I_{(1)} \cdot \sin \varphi_{(1)}$, а споживання реактивної потужності ($Q_{(1)} > 0$) означає зсув у сторону запізнення першої гармоніки споживаного струму щодо напруги електромережі живлення. Основними причинами споживання реактивної потужності випрямлячами струму є специфічний фазовий спосіб керування вентилями та явище комутації вентилів, яке відображає вплив індуктивного опору мережі живлення (енергосистема та силовий трансформатор). Наприклад, для однофазних випрямлячів із напівкерованими тиристорами фаза першої гармоніки вхідного струму за припущення ідеального згладжування випрямленого струму та лінійного характеру процесу комутації визначається як $\phi_{(1)} \approx \alpha + \gamma/2$ [2], де $\alpha \geq 0$ – кут запізнення відкриття тиристорів щодо природного моменту часу їх відкриття (появи додатної анодної напруги); $\gamma \geq 0$ – кут комутації тиристорів, спричинений режимом їх самозакривання (закривання відбувається в момент зниження струму до нульового значення). З виразу для кута $\varphi_{(1)}$ бачимо, що споживання реактивної потужності випрямлячем має як режимну (значення кута керування α), так і параметричну (кут γ , значення якого залежить від опору мережі живлення та навантаження випрямляча) причини. У висновку констатуємо:

- 1) розглядувані випрямлячі можуть лише споживати реактивну потужність із мережі живлення;
- 2) визначальною причиною цього явища є спосіб керування режимами провідності (відкриття та закривання) напівпровідникових ключових елементів – одноопераційних тиристорів;
- 3) з метою внутрішньої компенсації реактивної потужності слід змінити спосіб керування випрямлячами, замінивши напівкеровані одноопераційні тиристиори та сучасні повністю керовані двоопераційні (наприклад, тиристиори

Рис. 1

типу GCT);

4) для отримання ефекту компенсації реактивної потужності за прийнятних режимних характеристик випрямляча пропонуємо керувати вентилями за принципом «антитиристора» [8], або, точніше, за принципом «одноопераційного керування навіпаки». Це коли тиристор відкривається керуючим імпульсом у природний момент часу (поява додатної анодної напруги), а закривається жорстко керуючим імпульсом дотерміново (ще до моменту часу проходження струму через нульове значення). Цей спосіб уможливило роботу випрямляча струму в режимі генерування реактивної потужності зсуву в мережу живлення. Проілюструємо викладене на прикладі найпростішої RL гілки з ключовим елементом VS (рис. 1, а). За умови $L=0$ та відкривання тиристора керуючим струмом у момент часу α_B із запізненням щодо природного моменту часу α_{OB} , а закривання у природний момент часу закривання $\alpha_3 = \alpha_{O3}$ (рис. 1, б) отримуємо режим зі споживанням реактивної потужності зсуву ($Q_{(1)} < 0$) через зміщення вправо першої гармоніки струму живлення.

Індуктивність у колі з вентилем, керованим на відкривання, вносить у коло вентилля ЕРС самоіндукції, що затягує провідний стан вентилля, збільшуючи значення кута природного закривання вентилля α_{O3} (рис. 1, в) і споживаної реактивної потужності зсуву (зростає $\phi_{(1)} > 0$). У дзеркально протилежному режимі керування вентилем, коли відкривати тиристор у природний момент часу його відкривання $\alpha_B = \alpha_{OB}$, а закривати керуючим струмом у момент часу α_3 (рис. 1, г), отримуємо режим генерування випрямлячем реактивної потужності зсуву через зміщення у сторону випередження першої гармоніки струму живлення (зростає кут $\phi_{(1)} < 0$). Особливістю режимів випрямлячів із повністю керованими вентилями є практично миттєва комутація тиристорів, яка зумовлена малим влас-

ним часом вимкнення закриваючих тиристорів. Сучасні закриваючі тиристори, основною сферою застосування яких є перетворювачі частоти, здатні успішно перемикаєти кола з частотою декілька kHz , а тривалість основної фази вимкнення менша мікросекунди. У зв'язку з цим кут комутації не є режимним параметром перетворювачів і можна приймати умову $\gamma=0$.

Для двотактних схем випрямлення, наприклад, однофазного мостового випрямляча, можна отримати додатковий зсув фази основної гармоніки струму i щодо напруги живлення. Закриваючи провідну пару вентилів раніше від природного моменту часу закривання завдяки енергії, запасеної у згладжувальному реакторі, створюються умови для відкривання іншої пари вентилів, кут відкривання яких буде рівним куту закривання попередньої пари вентилів ($\alpha_{OB} = \alpha_3$). Отриманий ефект тим вагоміший, чим більша індуктивність згладжувального реактора.

Рис. 2

На рис. 3 наведено часові діаграми струмів і напруг в однофазному мостовому випрямлячі (рис. 2), але без шунтувального діода, які ілюструють режим переривного струму, коли вентиль двічі вступає в роботу.

Рис. 3

Рис. 4

Перший раз – завдяки ЕРС згладжувальному реактору, а другий – під впливом напруги живлення. За достатнього значення індуктивності реактора отримуємо режим неперервного струму (рис. 4). За умови $L_d \rightarrow \infty$ значення кута $\varphi_{(1)} \rightarrow \pi - \alpha_3$. Діаграми на рис. 3 та 4 отримані моделюванням процесів у середовищі Simulink програмного комплексу Matlab.

Аналіз впливу шунтувального діода. В теорії випрямлячів можна натрапити на твердження, що застосування шунтувального діода приводить до часткового повернення до мережі живлення реактивної потужності, запасеної в згладжувальному реакторі, що підвищує коефіцієнт потужності випрямляча. Для проведення аналізу прийнемо, що однофазний мостовий випрямляч з ідеальними вентилями живиться від джерела синусоїдальної напруги безмежної потужності та розглянемо режими з ідеально згладженим випрямленим струмом за різних способів фазового керування вентилями. Для кожного з режимів наведемо якісні діаграми струмів і напруг, а також отримаємо аналітичні вирази для кута зсуву основної гармоніки струму на вході випрямляча щодо напруги джерела живлення.

Рис. 5

Рис. 6

Випрямляч з одноопераційними тиристорами без шунтувального діода.

$$A_{nm} = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_B}^{\alpha_B + \pi} i(\vartheta) \cos(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4}{\pi} \frac{I_d}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left[n\left(\alpha_B + \frac{\pi}{2}\right)\right],$$

$$B_{nm} = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_B}^{\alpha_B + \pi} i(\vartheta) \sin(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4}{\pi} \frac{I_d}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left[n\left(\alpha_B + \frac{\pi}{2}\right)\right]$$

$$\varphi_{(1)} = \arctg\left(\frac{B_1}{A_1}\right) = -\alpha_B.$$

Як бачимо з діаграм на рис. 5 та результатів розкладу в ряд Фур'є змінного струму, перша гармоніка струму відстає від напруги живлення на кут, рівний куту запізнення відкриття вентилів α_B . Висновок: випрямляч споживає реактивну потужність зсуву.

Випрямляч з одноопераційними тиристорами з шунтувальним діодом.

Згідно з рис. 6 та отриманими аналітичними виразами, застосування шунтувального діода зменшує вдвічі значення кута $\varphi_{(1)}$, але відбувається це тому, що відкриття діода VD приводить до одночасного дотермінового закриття провідного на той момент часу тиристора. Тобто струм з тиристора переводиться на діод, а в мережевому струмі на час провідного стану діода струм (на проміжку кута α_B) відсутній узагалі. Енергія, запасена в реакторі, завдяки діоду залишається в контурі навантаження і на цей проміжок часу зв'язок із мережею живлення припиняється.

$$A_{nm} = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_B}^{\pi} i(\vartheta) \cos(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4}{\pi} \frac{I_d}{n} \sin\left[\frac{n}{2}(\pi - \alpha_B)\right] \cos\left[\frac{n}{2}(\pi + \alpha_B)\right]$$

$$B_{nm} = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_B}^{\pi} i(\vartheta) \sin(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4}{\pi} \frac{I_d}{n} \sin\left[\frac{n}{2}(\pi - \alpha_B)\right] \sin\left[\frac{n}{2}(\pi + \alpha_B)\right]$$

$$\varphi_{(1)} = \arctg \left(\frac{B_1}{A_1} \right) = -\frac{\alpha_B}{2}.$$

Висновок: застосування шунтувального діода в конфігурації випрямляча призводить до зменшення споживання реактивної потужності зсуву.

Рис. 7

Рис. 8

Випрямляч з двоопераційними тиристорами без шунтувального діода.

Примусове закривання тиристорів у моменти часу, що відповідають куту α_3 (рис. 7), приводить до випередження першої гармоніки струму на кут $\varphi_{(1)} = \pi - \alpha_3$.

Висновок: випрямляч із закриваючими тиристорами, керований закриванням тиристорів, генерує реактивну потужність зсуву.

Випрямлячі з двоопераційними тиристорами з шунтувальним діодом.

У момент часу закривання тиристора появляється від'ємна випрямлена напруга, під дією якої відкривається шунтувальний діод, який приводить до природного моменту часу відкривання

тиристорів (рис. 8). Струм у гілці живлення відсутній, зв'язок із мережею переривається. Це призводить до затягування моменту часу вступу наступної пари тиристорів, що зменшує випереджувальне значення кута $\varphi_{(1)}$.

$$A_{nm} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\alpha_3} i(\vartheta) \cos(n\vartheta) d\vartheta = \frac{2}{\pi} \frac{I_d}{n} \sin(n\alpha_3),$$

$$B_{nm} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\alpha_3} i(\vartheta) \sin(n\vartheta) d\vartheta = \frac{2}{\pi} \frac{I_d}{n} [1 - \cos(n\alpha_3)],$$

$$\varphi_{(1)} = \arctg \left(\frac{B_1}{A_1} \right) = \frac{\pi - \alpha_3}{2}.$$

Висновок: застосування шунтувального діода в схемі випрямляча, керованого закриванням тиристорів, призводить до зменшення генерації реактивної потужності зсуву.

Загальний висновок: застосування шунтувального діода для обох способів фазового керування випрямлячем приводить до зближення за фазою першої гармоніки струму на вході щодо напруги живлення вдвічі.

Висновки. До ознак активного споживача в концепціях Smart Grid та Microgrid запропоновано додати здатність регулювати ступінь споживання реактивної потужності технологічними установками, які живляться від випрямлячів струму. Шляхом заміни застарілої напівкерованої елементної бази силових випрямлячів струму на сучасні повністю керовані напівпровідникові вентиля в сукупності із застосуванням шунтувальних діодів отримуємо можливість реалізації режимів із регулюванням реактивної потужності в широкому діапазоні. Реактивна потужність, яку споживають випрямлячі струму, за своєю природою є переважною потужністю зсуву. Саме з цієї причини отримуємо можливість регулювання реактивної потужності на вході випрямляча засобами і способами фазового регулювання провідним станом напівпровідникових вентилів. Застосування шунтувальних діодів дає змогу зменшити кут зсуву основної гармоніки струму щодо напруги живлення завдяки впливу на моменти часу комутації вентилів у мостових схемах випрямлення.

Список літератури:

1. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / за ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
2. Побєдаш К.К., Святненко В.А. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 244

- с. 3. Зиновьев Г.С. Основы преобразовательной техники. Ч. 2. Выпрямители с улучшенным коэффициентом мощности / НЭТИ. Новосибирск, 1971. 79 с.
4. Федів Є.І., Сівакова О.М. Покращення коефіцієнта потужності силових випрямлячів в системах електропостачання. *Електроенергетичні та електро-механічні системи. Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2007. № 587. С. 101–106.
5. Никонець Л.О., Сівакова О.М., Федів Є.І. Енергетичні характеристики трифазного випрямляча вузла навантаження в режимі видачі реактивної потужності. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. № 30. Дніпропетровськ : РВК НГУ, 2008. С. 210–216.
6. Федів Є.І., Сівакова О.М. Силові випрямлячі систем електропостачання з покращеним коефіцієнтом реактивної потужності. *Вісник Приазовського технічного університету* : зб. наук. пр. Вип. 18. Ч. 2. Маріуполь, 2008. С. 60–64.
7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std. 1459-2010.
8. Хворост М.В., Гончаров Ю.П., Панасенко М.В. та ін. Види комутації та енергетичні характеристики в електричних колах з ключовими елементами. *Електротехніка та електромеханіка*. 2005. № 4. С. 67–72.

Sivakova O.M., Fediv Ye.I. POWER RECTIFIERS FOR SMART GRID

The article analyzes energy efficiency of the use of reactive power internal compensation means for power controlled rectifiers, which will meet modern requirements for power supply systems. Among them, there is the replacement of the element base, which allows improving the method of rectifiers phase control, as well as the use of shunt diodes. Two methods of valves phase control have been analyzed: the first one is controlling the delay in opening the thyristors; the second one is controlling the advance in closing the thyristors. The use of gate off thyristors or power transistors allows operating in the modes with reactive power generation into the supply network. It has been shown that the decrease in the level of reactive power consumption when shunt diodes are used under the first control method is not caused by the return of the reactive power stored in the smoothing reactor to the power network. We have researched the effect of shunt diodes on electromagnetic processes in the rectifier under the second method of controlling thyristors. It has been shown that the reason for reducing the consumption of reactive power from the power supply in deep-regulated modes by a rectifier with a zero diode is the decrease in the shift angle of the first harmonic of the current at the input of the rectifier relative to the voltage of the power source. Under the first control method, the zero diode accelerates the leading thyristors closing, while under the second method it delays the thyristors opening. In both cases, this leads to the reduction in the phase difference of the sinusoidal voltage of the power source and the fundamental component of the power current, which reduces the level of shear reactive power exchange between the rectifier and the power source.

Key words: rectifier, shunt (zero) diode, fully controlled thyristor, reactive power.