

УДК 621.314.27

ГНУЧКА СИСТЕМА ПЕРЕСИЛАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СТРУМУ З ПОВНІСТЮ КЕРОВАНИМИ ТИРИСТОРАМИ

Є.І. Федів*, О.М. Сівакова**

Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна
e-mail: yevhen.i.fediv@lpnu.ua

Запропоновано спосіб регулювання пересиланням змінного струму проміжною ланкою постійного струму, яка побудована на перетворювачах струму з повністю керованими напівпровідниковими вентилями. Досліджено нормальні режими роботи та показано можливість роботи вставки (електропередачі) постійного струму, виконаної відповідно до запропонованого способу, в режимах з генеруванням реактивної потужності в мережу змінного струму. Бібл. 4, рис. 3.

Ключові слова: гнучка система пересилання, перетворювач струму, вставка постійного струму.

Керовані (гнучкі) системи пересилання змінного струму FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) є важливою складовою частиною активно-адаптованих інтелектуальних електромереж, а також однією з ключових технологій Smart Grid – інтелектуальних електроенергетичних систем, в яких пасивні пристрої електричної мережі з пересилання і розподілу електроенергії перетворюються в активні елементи керування режимами роботи [1].

У концепції інтелектуальних електричних мереж пристрої FACTS позиціонують як системи пересилання енергії змінним струмом з використанням пристроїв силової електроніки та інших статичних регуляторів, які забезпечують контроль одного або більше параметрів системи передавання змінного струму для підвищення керованості й збільшення пропускної спроможності передавання. Сучасні пристрої FACTS мають можливість регулювати пересилання активної та реактивної потужностей в електричних системах і мережах, вирішуючи широкий клас завдань з підвищення надійності, стійкості роботи систем пересилання і розподілу електроенергії разом з забезпеченням належної якості електропостачання [2].

Для вирішення перелічених завдань в електричних мережах встановлюють статичні керовані компенсатори реактивної потужності, найдосконалішим серед яких є багатофункціональний статичний пристрій STATCOM (Static Synchronous Compensator), побудований на інверторі напруги з сучасними повністю керованими за методом широтно-імпульсної модуляції силовими напівпровідниковими вентилями, а також вставки та електропередачі постійного струму (ВЕПС) на основі пристроїв STATCOM [3]. Слід зазначити, що STATCOM є складним та дорогим пристроєм. Тому впроваджуються вони поступово, як правило, поряд з існуючими на цей час статичними тиристорними компенсаторами (СТК) та вставками (електропередачами) постійного струму (ВЕПС), виконаними за старими технологіями на одноопераційних силових тиристорах.

Досягнувши розквіту у другій половині минулого століття, зазначені ВЕПС працюють дотепер, не зазнавши принципових змін, за винятком елементної бази – на заміну ртутним вентилям прийшли напівпровідникові одноопераційні тиристири. Основним недоліком традиційних ВЕПС є те, що їх функціонування вимагає значного ресурсу реактивної потужності – від 50 до 100 % встановленої потужності ВЕПС, що є проблемним для систем і режимів з дефіцитом реактивної потужності. Споживання значного ресурсу реактивної потужності традиційними ВЕПС спричинено особливістю фазового регулювання їх перетворювачів. Випрямляч передавальної та інвертор приймальної електричних систем регулюються затримкою моментів часу вступу в роботу одноопераційних напівпровідникових

вентилів, що призводить до зсуву першої гармоніки струму в бік запізнення відносно напруги джерела живлення. Окрім цього, реактивна потужність витрачається для забезпечення комутації вентилів перетворювачів.

Задачею дослідження є розроблення рішень з модернізації традиційних ВЕСП, які дають змогу надати їм головних ознак належності до пристроїв класу FACTS – самозабезпечення реактивною потужністю та регулювання активної та реактивної потужностей обидвох знаків.

З цією метою авторами запропоновано спосіб регулювання пересиланням змінного струму проміжною ланкою постійного струму, який включає зміну кутів керування двоопераційними напівпровідниковими вентилями випрямляча, що живиться від передавальної електричної системи, та інвертора, що приєднаний до приймальної електричної системи, причому вентилі випрямляча та інвертора відкривають у природні моменти часу вступу в роботу, вентилі випрямляча закривають з випередженням відносно природного моменту часу їх закривання, а вентилі інвертора закривають з відставанням відносно природного моменту часу їх закривання [4]. У результаті отримуємо явище фазового зсуву основної гармоніки змінних струмів на вході перетворювачів у бік випередження відносно напруги джерел живлення, що означає не споживання, а видачу реактивної потужності перетворювачами в електромережу змінного струму. Тобто таке регулювання пересиланням змінного струму не тільки не супроводжується споживанням реактивної потужності, а, навпаки, характеризується можливістю її генерації для потреб передавальної та приймальної систем.

Для прикладу реалізації запропонованого способу регулювання на рис. 1 наведено принципову схему вставки постійного струму (ВПС), виконаної за класичними схемними рішеннями, але на повністю регульованих напівпровідникових вентилях. Для пояснення принципу досягнення очікуваного результату на рис. 2 наведено часові діаграми напруг і струмів у колах трифазного мостового випрямляча, керованого моментами часу закривання двоопераційних тиристорів, а на рис. 3 – часові діаграми напруг і струмів у колах трифазного мостового залежного інвертора, керованого моментами часу закривання двоопераційних тиристорів.

За достатнього значення індуктивності згладжувального реактора вентилі перетворювачів, виконаних за трифазною мостовою схемою, проводять **струм групами по 2 (режим 2-2), тобто перебувають у провідному стані рівні проміжки часу тривалістю 120 ел. градусів**.

Для передавання потужності від випрямляча до інвертора має виконуватись умова $E_b > E_i$, де E_b , E_i – середні значення ЕРС випрямляча та протиЕРС інвертора відповідно. Необхідні значення ЕРС випрямляча пропонується забезпечити закриванням керуючим імпульсом вентилів на момент часу, що відповідає куту α_3 , наприклад, для вентиля VS1, раніше природного моменту часу ϑ_{03} його закривання (рис. 2). У випадку закривання вентиля VS5 описаним чином, з випередженням відносно природного для нього моменту часу $\vartheta = 0$, відбувається зсув природного моменту часу вступу в роботу вентиля VS1 з моменту

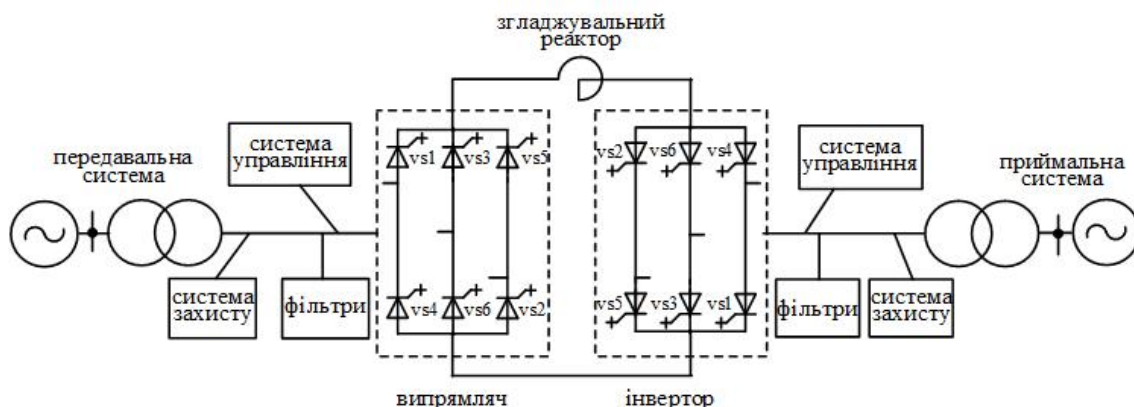


Рис. 1

часу $\vartheta = 0$ до моменту $\vartheta_{\text{ов}}$ у бік випередження і створюється можливість його відкриття за кута $\alpha_{\text{в}}$. У свою чергу з'являються додатна анодна напруга і можливість вступу в роботу наступного за чергою після VS1 вентиля VS3 тієї ж групи раніше, ніж це визначалось би трифазною напругою джерела живлення за затягування його провідного стану як у традиційному способі. В результаті отримуємо аналог штучної комутації вентилів із зсувом основної гармоніки змінного струму на вході випрямляча за фазою у бік випередження відносно ЕРС джерела живлення на кут $\varphi_{1,\text{в}} = \frac{2\pi}{3} - \alpha_3$.

Аналогічні процеси характерні й для режиму інвертування. Необхідні значення протиЕРС інвертора пропонується забезпечити закриванням керуючим імпульсом вентилів на момент часу, що відповідає куту $\beta_3 > 0$, відставання закривання, наприклад, для вентиля VS1, відносно природного моменту часу його закривання $\vartheta_{\text{оз}}$ (рис. 3) (у традиційних ВПС інвертор працює за кутів $\beta_3 < 0$, їх називають кутами випередження інвертора). Таке закривання вентиля призводить до зсуву природного моменту часу відкриття VS1 з моменту ϑ_0 до $\vartheta_{\text{ов}}$ і створює можливість його відкриття за кута $\alpha_{\text{в}} = \vartheta_{\text{ов}}$. У результаті отримуємо аналог штучної комутації вентилів із зсувом основної гармоніки змінного струму на виході інвертора за фазою в бік випередження відносно ЕРС приймальної системи на кут $\varphi_{1,\text{і}} = \pi - \beta_3$.

У запропонованому способі регулювання вентилі перетворювачів комутують практично миттєво (якщо нехтувати часом закривання вентилів керуючим струмом). Роботу випрямляча та інвертора об'єднує спільний постійний струм, умовою протікання якого за

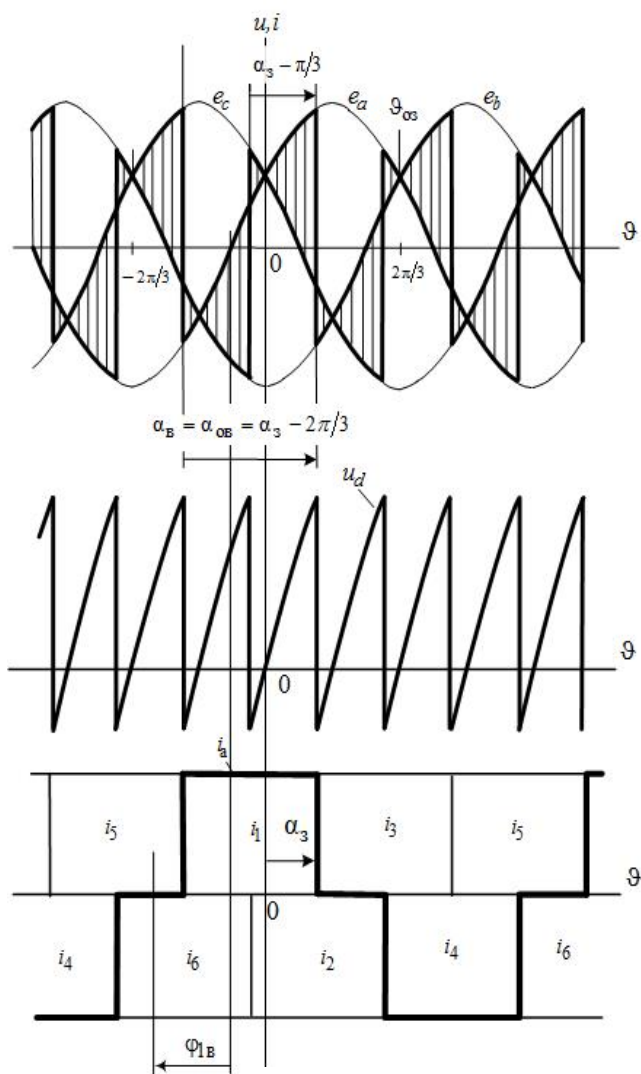


Рис. 2

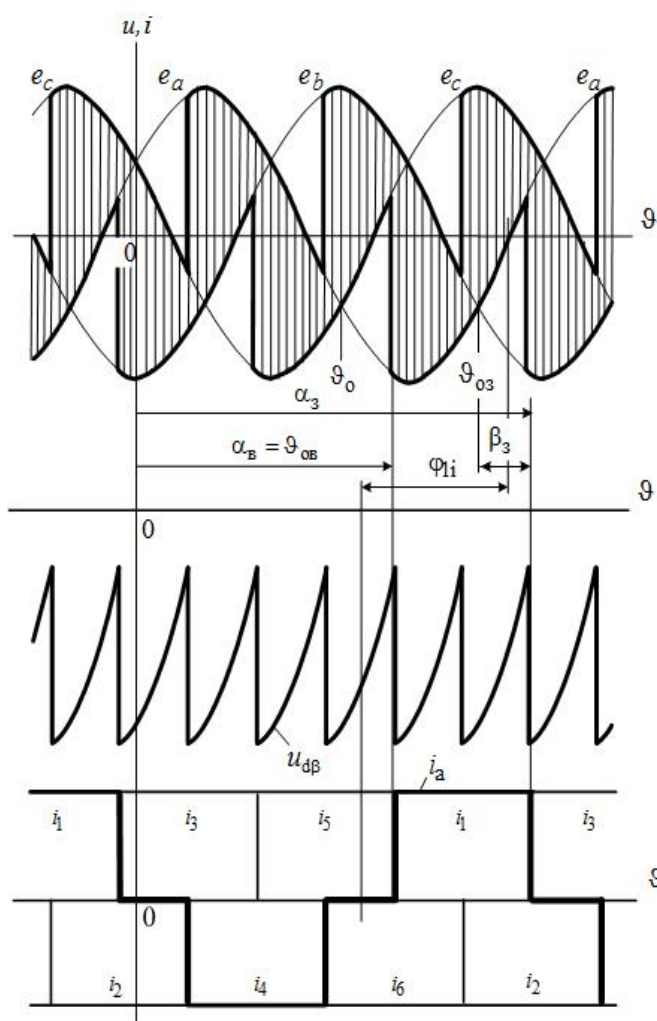


Рис. 3

припущення ідеального згладжування є вираз

$$I_d = \frac{E_B - E_i}{R_d} = \frac{E_{m,B} \sin\left(\alpha_3 - \frac{\pi}{6}\right) > E_{m,i} \cos(\beta_3)}{R_d} > 0,$$

де R_d – активний опір ланки постійного струму; $E_{m,B}$, $E_{m,i}$ – амплітудні значення ЕРС передавальної та приймальної електричних систем відповідно.

У такий спосіб можна регулювати потужність пересилання в режимах перетворювачів із фазовим зсувом основної гармоніки змінних струмів амплітудою $I_{1m,B} = I_{1m,i} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d$ в бік випередження відносно напруги передавальної та приймальної систем, тобто в режимах генерування реактивної потужності.

Проведене імітаційне моделювання режимів засобами візуального програмування в графічному середовищі Simulink підтвердило працездатність і ефективність роботи ВЕПС відповідно до поставленої задачі.

До особливостей улаштування та роботи ВЕПС, регульованої запропонованим способом, слід віднести:

- вступ у роботу вентилів перетворювачів за природних кутів керування (момент часу виникнення додатної анодної напруги), а вихід з роботи — за керуючим імпульсом;
- можливість задання на боці кожного з перетворювачів режиму роботи зі споживанням чи генерацією реактивної потужності;
- практичну відсутність втрат на комутацію вентилів;
- можливість реверсу активної потужності;
- можливість захисту ВПС шляхом блокування керуючих імпульсів, які відкривають вентиля;
- можливість практичної реалізації шляхом модернізації типової ланки перетворювачів, виконаних за простими схемами з мінімально необхідною кількістю силових елементів, які накопичують енергію, що сприяє підвищенню надійності роботи ВЕПС в цілому;
- можливість пофазного регулювання перетіканням струму за умови застосування однофазних схем перетворювачів, а також можливість побудови ВЕПС на базі дванадцятипульсних та більше схем силових перетворювачів для покращення електромагнітної сумісності роботи ВПС з електричними системами.

Висновки. 1. Запропоновано гнучку систему регулювання пересиланням змінного струму на основі перетворювачів з сучасною елементною базою, що дає змогу регулювати перетікання активної та реактивної потужностей обидвох знаків.

2. Проведено дослідження, які підтверджують ефективність запропонованих рішень.

3. Розглянутий спосіб регулювання може бути реалізований для модернізації ВЕПС з використанням існуючих конструкційних рішень шляхом заміни силової елементної бази, а також систем регулювання та захисту перетворювачів.

4. Запропоновані рішення дають можливість перевести існуючі ВЕПС до класу пристроїв FACTS та використовувати їх як технологічну базу для побудови інтелектуальних електромереж.

1. Stuart Borlase. Smart Grids: Infrastructure, Technology and Solutions. CRC Press. 2016. 607 p
2. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
3. Шидловський А. К., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Моделювання режимів роботи статичних синхронних компенсаторів реактивної потужності та фазоповоротних трансформаторних пристроїв для створення гнучких систем передачі змінного струму в ОЕС України. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 38. С. 18–29.
4. Федів Є.І., Сівакова О.М. Спосіб регулювання пересиланням змінного струму проміжною ланкою постійного струму. Патент UA № 123525.

Е.И. Федив, канд. техн. наук, **О.М. Сивакова**, канд. техн. наук

Национальный университет «Львовская политехника»,

ул. С. Бандеры 12, г. Львов, 79013, Украина

ГИБКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА С ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМЫМИ ТИРИСТОРАМИ

Предложен способ управления передачей переменного тока промежуточным звеном постоянного тока, которое построено на преобразователях тока с полностью управляемыми полупроводниковыми вентилями. Исследованы нормальные режимы работы и показана возможность работы вставки (электронпередачи) постоянного тока, исполненной в соответствии с предложенным способом, в режимах с генерацией реактивной мощности в сеть переменного тока. Библ. 4, рис. 3.

Ключевые слова: гибкая система передачи, преобразователь тока, вставка постоянного тока.

Y.I. Fediv, O.M. Sivakova

Lviv Polytechnic National University,

12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

FLEXIBLE ALTERNATING CURRENT TRANSMISSION SYSTEMS ON THE BASIS OF CURRENT CONVERTERS WITH TURN-OFF THYRISTORS

We have suggested a method for controlling the AC transmission by an intermediate DC link, which is based on current converters with turn-off semiconductor valves. We have investigated normal modes of operation and shown the possibility of DC link (power transmission) work performed according to the suggested method in the modes with reactive power generation into the AC system. References 4, figures 3.

Key words: flexible transmission system, current converter, DC link.

1. Stuart Borlase. Smart Grids: Infrastructure, Technology and Solutions. CRC Press. 2016. 607 p.
2. Intellectual electrically limited: elements and modes. Kyiv: In-t elektrodinamiki NAS of Ukraine, 2016. 400 p. (Ukr)
3. Shydlovskyi A.K., Zharkin A.F., Novskyi V.O., Malakhata D.O. Simulation modes of static synchronous compensators of reactive power and phase-shifting transformer devices for development of flexible ac transmission systems for Ukrainian power grid. *Pratsi Instytutu Electrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2014. No 38. P. 18–29. (Ukr)
4. Fediev E.I., Sivakova O.M. A method of regulation by sending an alternating current with an intermediate link of a direct current. Patent UA 123525. (Ukr)

Надійшла 16.10.2018

Received 16.10.2018