

РЕЖИМИ ВСТАВКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОВНІСТЮ КЕРОВАНИМИ ТИРИСТОРАМИ

Є. І. ФЕДІВ*, О. М. СІВАКОВА

кафедра електроенергетики і систем управління, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА
*e-mail: yevhen.i.fediv@lpnu.ua

АНОТАЦІЯ. Проведено аналіз недоліків регулювання потоків потужності в електричних мережах та системах за допомогою проміжних ланок постійного струму, які базуються на перетворювачах струму з природною комутацією тиристорів. Показана можливість роботи перетворювачів в режимах з генерацією реактивної потужності зсуву в мережу змінного струму. Режим штучної комутації вентилів, за якого перетворювачі працюють з випереджувальним струмом, досягається закриванням тиристорів раніше природного моменту часу їх закривання. Проведено аналіз електромагнітних процесів в усталеному режимі роботи силового статичного перетворювача струму, виконаного за трифазною мостовою схемою з повністю керованими тиристорами в режимах випрямляча та залежного інвертора, які можуть бути використані для побудови проміжної ланки постійного струму, як компоненти гнучких систем пересилання змінного струму з можливостями чотириквadrантного регулювання міжсистемного обміну потужності. Наведено аналітичні вирази, які можуть бути використані для обчислення основних енергетичних характеристик вставки постійного струму в режимах керованої комутації тиристорів.

Ключові слова: вставка постійного струму, перетворювач струму, випрямляч, інвертор, реактивна потужність, двоопераційний тиристор

REGIMES OF DC LINK WITH GATE TURN-OFF THYRISTORS

Y. FEDIV, O. SIVAKOVA

Department of electricity and control systems, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT. The analysis has been carried out on the disadvantages of regulating power flows in electric networks and systems using intermediate DC links, which are based on traditional current sourced converters with natural switching thyristors. It has been noted that due to modern advances in the field of power electronics, power static current sourced converters can operate in the modes with leading current, i.e. not consuming, but generating reactive shear power. The possibilities of phase regulation of the converter by the thyristors have been shown, in which the power converter can operate in the modes with the generation of reactive shear power into an alternating current network. The mode of the artificial switching of the valves, in which the converters operate with the leading current, is achieved by opening the thyristors without time delay, and by closing them before the natural moment of their closing. We have carried out the analysis of electromagnetic processes in a static power current sourced converter with fully controlled thyristors according to a three-phase bridge circuit in the rectifier and dependent inverter modes, which can be used to build an intermediate DC link as components of flexible AC transmission systems with the capabilities of four-quadrant control of inter-system power exchange. We have created the conditions under which a three-phase bridge rectifier and a grid-controlled inverter with closing thyristors as a part of a direct current insert will not consume reactive power from the AC network, which is not provided for by the classical theory of their operation. The analytical expressions have been provided that can be used to obtain the basic energy characteristics of a DC insert made on the basis of current sourced converters, which not only does not need an additional resource of reactive power for its functioning, but can itself generate reactive power in an alternating current network. We have obtained analytical expressions for electromagnetic parameters, which can be the basis for further research and design of a prototype DC insert with new properties.

Keywords: DC link, current sourced converter, rectifier, inverter, reactive power, gate turn-off thyristor

Вступ

В сучасній концепції інтелектуальних мереж вставки постійного струму (ВПС) є важливими елементами гнучких систем пересилання змінного струму, основними задачами яких є регулювання потоків енергії в електричних системах і мережах, забезпечення надійного, якісного та енергоефективного електропостачання [1,2]. ВПС є оптимальним технічним рішенням для реалізації несинхронних міжсистемних

зв'язків, об'єднання в систему окремих її частин чи приєднання джерел електроенергії [3-5]. Застосування ВПС підвищує стійкість паралельної роботи енергосистем та зменшує рівні струмів коротких замикань, що зменшує кількість можливих аварій чи позаштатних ситуацій. ВПС спрощує задачу забезпечення балансів потужності та підвищує якість електроенергії.

Побудова ВПС для широкого діапазону потужностей та кола задач, разом із забезпеченням їх адекватних техніко-економічних показників, є актуальною

задачею на даному етапі розвитку електроенергетики особливо, у зв'язку з переходом на нові принципи побудови систем електрозабезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Базовими елементами ВПС є силові статичні перетворювачі (ССП) змінного струму у постійний і навпаки з використанням агрегатів «випрямляч–інвертор». В якості ССП для ВПС до 90-х років минулого сторіччя застосовували перетворювачі струму, для побудови яких використовували силові одноопераційні тиристри, керовані на відкривання. Основними недоліками таких ВПС є необхідність для їх функціонування значних обсягів реактивної потужності та спотворення форм струмів і напруг, на подолання яких необхідні додаткові ресурси. Тому, в даний час на заміну їм прийшли ВПС, в яких ССП – це перетворювачі напруги, побудовані на повністю керованих (двоопераційних – керованих на відкривання та закривання) силових тиристорах чи транзисторах [6]. ВПС на базі сучасних технічних рішень дозволяють регулювання потоків як активної, так і реактивної потужності, забезпечуючи при цьому практично синусоїдальні форми струмів та напруг. Прикладами таких розробок є технологія HVDC Light фірми ABB [7], де інвертор напруги керується за принципом широтно-імпульсної модуляції, а також пристрій HVDC PLUS фірми Siemens [8], виконаний на багаторівневому інверторі.

Основними недоліками таких ВПС є їх значна вартість та складність конструкцій, а також деяка складність захисту від коротких замикань чи забезпечення оперативного реверсу потужності. В [9,10] запропоновано в якості ССП для ВПС використати традиційні перетворювачі струму, замінивши звичайні одноопераційні тиристри на двоопераційні, з можливістю керувати моментами часу їх закривання і відкривання. Стверджується про можливість повного регулювання перетіканням активної та реактивної по-

тужності з обидвох сторін ВПС. Є посилання на віртуальну модель, що підтверджує працездатність запропонованих рішень, але сама модель не наводиться.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження характерних нормальних експлуатаційних режимів ВПС, виконаної на основі трифазних мостових перетворювачів струму з повністю керованими тиристорами, та отримання умов, за яких досягається можливість чотириквadrантного регулювання перетіканням потужності між двома електричними системами.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо ВПС, яка зв'язує дві системи змінного струму C1 та C2 (рис. 1).

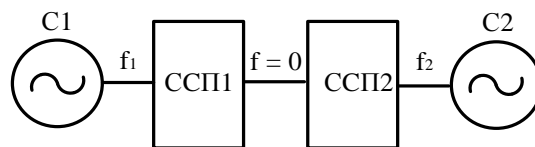


Рис. 1 – Структурна схема вставки постійного струму

Прийmemo, що ССП, це реверсивні силові трифазні перетворювачі струму, які виконані за двотактною (мостовою) схемою (рис. 2)

Чотириквadrантне регулювання ВПС означає, можливість пересилання потужності $S = \pm P \pm jQ$. Відомо, що перехід з режиму випрямляча у режим інвертора відбувається за зміни знаку випрямленої напруги. Деяко інша ситуація зі знаком реактивної потужності.

Знак реактивної потужності в колах змінного струму ССП залежить від способу фазового керування його вентилями. В цьому аспекті заслуговують уваги два способи керування тиристорами ССП [11]:

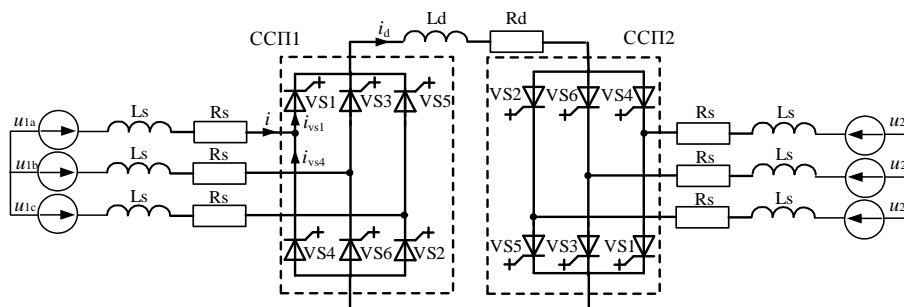


Рис. 2 – Еквівалентна схема вставки постійного струму

1. Спосіб 1 – режим тиристора: відкривається керуючим імпульсом із запізненням відносно моменту часу появи додатної анодної напруги, а закривається в природний момент часу (проходження струму через нульове значення). Це традиційний спосіб для перетворювачів струму. Його використання супрово-

джується споживанням з мережі змінного струму реактивної потужності зсуву.

2. Спосіб 2 – режим "антиристора" [11, с. 70]: відкривається керуючим імпульсом в природний момент часу (поява додатної анодної напруги), а закривається керуючим імпульсом дотерміново (ще до мо-

менту часу проходження струму через нульове значення). Цей спосіб розширює коло можливих режимів роботи перетворювачів струму, в тому числі уможливорює їх роботу в режимі генерування реактивної потужності в мережу живлення.

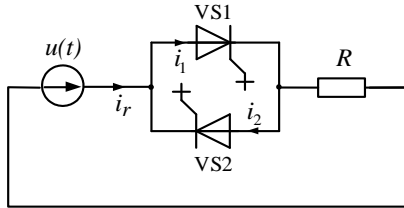


Рис. 3 – Схема тиристорного регулятора струму

Проілюструємо зазначені способи на прикладі схеми тиристорного регулятора, зображеної на рис. 3.

За керування тиристорами способом 1, із затримкою відкриття тиристорів на кут α_v , отримуємо запізнення першої гармоніки $i_{(1)}$ струму живлення i відносно напруги на кут $\varphi_{(1)}$ (рис. 4, а), що означає споживання реактивної потужності зсуву з мережі.

У випадку керування тиристорами способом 2, за рахунок дочасного закривання тиристорів перша гармоніка струму живлення випереджує напругу, що означає генерування реактивної потужності зсуву схемою у мережу живлення (рис. 4, б).

Застосовуючи наведені способи керування стосовно ССП1 та ССП2 ВПС (рис. 2), виконаних на двоопераційних тиристорах, отримуємо можливість регулювання знаку реактивної потужності зі сторони мережі змінного струму.

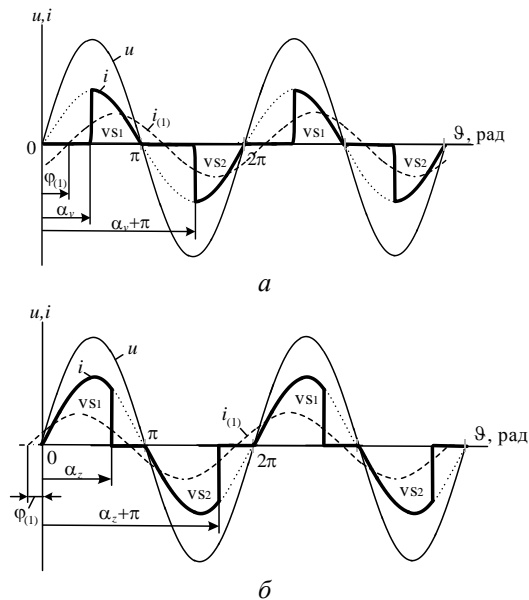


Рис. 4 – Часові діаграми напруг і струмів регулятора струму в режимах керування тиристорами: а – запізнення відкриття; б – випередження закривання

Режими роботи ВПС за традиційного способу керування СПП (спосіб 1) достатньо вивчені, тому

зупинимось на режимах перетворювачів ВПС, керованих способом 2.

Режим випрямляча ВПС. На рис. 5 наведено часові діаграми, які пояснюють можливість роботи трифазного мостового випрямляча в режимі генерації реактивної потужності зсуву [12].

Закриваючи керуючим струмом тиристор VS1 в момент часу, що відповідає куту α_z , тобто раніше, ніж би він закрився природньо, як одноопераційний, створюють умови для дочасного відкривання наступного з даної групи тиристора (VS3).

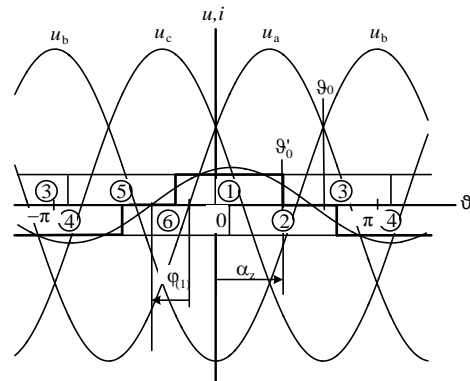


Рис. 5 – Часові діаграми струмів і напруг випрямляча ВПС в режимі генерації реактивної потужності

Тобто, закривання тиристора VS1 приводить до зсуву в сторону випередження природного кута вступу тиристора VS3 від моменту часу ϑ_0 (за відкритого стану VS1) до моменту часу ϑ'_0 , що приводить до

фазового зміщення основної гармоніки $i_{(1)}$ струму живлення i випрямляча відносно напруги живлення на кут $\varphi_{(1)} < 0$ (рис. 5). Отриманий ефект можна охарактеризувати, як явище безконденсаторної штучної комутації вентилів.

Наведемо математичні вирази для числового виміру описаних процесів в режимі неперервного струму за ідеального згладжування випрямленого струму ($i_d = const$) та нехтування опором джерела живлення. Коефіцієнти розладу в ряд Фур'є струму зі сторони живлення (передавальної системи ВПС):

$$A_{(n)} = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_z - \frac{2\pi}{3}}^{\alpha_z + \frac{\pi}{3}} I_d \cos(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4I_d}{n \cdot \pi} \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right) \cos\left[n\left(\alpha_z - \frac{\pi}{3}\right)\right],$$

$$B_{(n)} = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_z - \frac{2\pi}{3}}^{\alpha_z + \frac{\pi}{3}} I_d \sin(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4I_d}{n \cdot \pi} \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right) \sin\left[n\left(\alpha_z - \frac{\pi}{3}\right)\right],$$

де I_d – середнє значення ланки постійного струму. Звідки, амплітуда і фаза n -ї гармоніки струму:

$$I_{m(n)} = \frac{4I_d}{n \cdot \pi} \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right), \quad \varphi_{(n)} = n \cdot \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha_z\right).$$

Відповідно, для першої гармоніки

$$I_{m(1)} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d, \quad \varphi_{(1)} = \frac{2\pi}{3} - \alpha_z.$$

Подібна ефективність спостерігається для випадку роботи трифазного мостового перетворювача в режимі залежного інвертора.

Режим інвертора ВПС. Закривання тиристора керуючим струмом в момент часу, що відповідає куту α_z , після природнього моменту закривання ϑ_{0z} , як одноопераційного (рис. 6), створює можливість для одночасного відкриття керуючим струмом наступного тиристора цієї ж групи. В результаті отримаємо зсув основної гармоніки $i_{(1)}$ змінного струму на виході інвертора вправо відносно від'ємної півхвилі напруги приймальної системи на кут $\varphi_{(1)}$, що означає режим роботи з генерацією інвертором як активної, так і реактивної потужності зсуву.

Для отримання виразів з метою обчислення основних енергетичних характеристик описаного режиму роботи інвертора ВПС уведемо за аналогією з кутом β (кут випередження відкриття тиристорів з класичної теорії силових перетворювачів), поняття кут $\beta_z = \alpha_z - \frac{5\pi}{3}$, як кут відставання закривання тиристорів. У випадку $\beta_z > 0$ інвертор працює в режимі генерації, а за кута $\beta_z < 0$ – в режимі споживання реактивної потужності зсуву в мережу змінного струму.

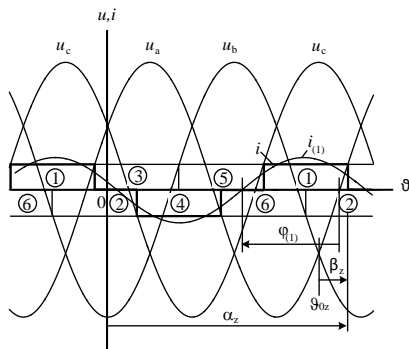


Рис. 6 – Часові діаграми струмів і напруг інвертора ВПС в режимі генерації реактивної потужності

Коефіцієнти розладу в ряд Фур'є струму зі сторони живлення (передавальної системи ВПС):

$$A_{(n)} = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_z + \frac{\pi}{3}}^{\beta_z + \frac{4\pi}{3}} I_d \cos(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4I_d}{n \cdot \pi} \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right) \cos\left[n\left(\beta_z - \frac{2\pi}{3}\right)\right],$$

$$B_{(n)} = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_z + \frac{\pi}{3}}^{\beta_z + \frac{4\pi}{3}} I_d \sin(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4I_d}{n \cdot \pi} \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right) \sin\left[n\left(\beta_z - \frac{2\pi}{3}\right)\right].$$

Звідки, амплітуда і фаза n -ї гармоніки струму:

$$I_{m(n)} = \frac{4I_d}{n \cdot \pi} \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right), \quad \varphi_{(n)} = n \cdot (\pi - \beta_z).$$

Відповідно, амплітуда та фаза першої гармоніки струму:

$$I_{m(1)} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d, \quad \varphi_{(1)} = \pi - \beta_z.$$

Загальними особливостями електромагнітних процесів розглянутих вище режимів випрямляча та інвертора, керованих способом 2, є:

1) практично миттєва комутація тиристорів, яка продиктована малим власним часом вимкнення закриваючих тиристорів, тому кут комутації не є характеристикою режимів перетворювачів;

2) вентилі перетворювачів працюють в режимі провідності групами по 2 (режим 2-2) тривалістю $2\pi/3$ рад. кожний, тобто для отримання основних енергетичних характеристик перетворювачів розглядають період повторюваності електромагнітних процесів, який містить лише міжкомутаційний інтервал з одночасною провідністю двох вентилів;

Спільний режим перетворювачів ВПС. Режими випрямляча та інвертора ВПС об'єднані ланкою постійного струму, середнє значення струму в якій можна записати, як:

$$I_d = \frac{U_{d\alpha} - U_{d\beta}}{R_d}, \quad (1)$$

де середнє значення випрямленої напруги випрямляча

$$U_{d\alpha} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha_z - \frac{\pi}{3}}^{\alpha_z} [u_a(\vartheta) - u_c(\vartheta)] d\vartheta = E_{d\beta} \sin\left(\alpha_z - \frac{\pi}{6}\right), \quad (2)$$

$E_{d\beta} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{m,\beta}$ – ЕРС випрямляча, $U_{m,\beta}$ – амплітудне значення фазної напруги живлення випрямляча,

$$U_{d\beta} = \frac{3}{\pi} \int_{\beta_z}^{\beta_z + \frac{\pi}{3}} [u_a(\vartheta) - u_c(\vartheta)] d\vartheta = -E_{d,i} \cos(\beta_z) \quad (3)$$

середнє значення випрямленої напруги інвертора,

$E_{d,i} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{m,i}$ – проти ЕРС інвертора, $U_{m,i}$ – амплітудне значення фазної напруги інвертора.

Рівняння (1)-(3) описують режим ВПС, керованої закривання тиристорів перетворювачів. ВПС працює у режимах з випередженням основної гармоніки змінного струму перетворювачів за наступних обмежень:

$$\frac{\pi}{6} < \alpha_z < \frac{2\pi}{3}, \quad (4)$$

$$0 < \beta_z < \frac{\pi}{2}, \quad (5)$$

та виконання загальної умови

$$U_{d\alpha} > U_{d\beta}. \quad (6)$$

До наведених вище вимог (4)-(6), які включають у тому числі умови стійкості процесу інвертування, слід додати рівняння для значень кутів відкривання двоопераційних тиристорів

$$\alpha_v = \alpha_z - \frac{2\pi}{3},$$

які, як зазначено раніше, будуть відповідати природним моментам часу їх відкривання.

Висновки

1. Завдяки сучасним досягненням в галузі енергетичної електроніки, силові статичні перетворювачі струму можуть працювати в режимах з випереджувальним струмом, тобто не споживаючи, а генеруючи реактивну потужність зсуву.

2. Сформульовані умови, за яких трифазний мостовий випрямляч та залежний інвертор із закритими тиристорами у складі вставки постійного струму не споживатимуть з мережі змінного струму реактивну потужність, що не передбачено класичною теорією їх роботи.

3. Отримані аналітичні вирази для електромагнітних параметрів, які можуть бути базою для подальших досліджень та проектування прототипу ВПС з новими властивостями.

Список літератури

1. **Стогній, Б. С.**, Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / *Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк* // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44-50.
2. **Borlase, S.** Smart Grids: Infrastructure, Technology and Solutions / CRC Press. 2016. – 607 p.
3. **Claus, M.** Solutions for smart and super grids with HVDC and FACTS / *M. Claus, D. Retzmand, D. Sorangr, K. Uecker* // 17th Conference of the Electric Power Supply Industry, 27–31 October, Macao, 2008.
4. **Paserba, J. J.** How FACTS controllers-benefit AC transmission systems. 2003 IEEE PES Transmission, 2003, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. doi : 10.1109/TDC.2003.1335066.
5. **Sood, V. K.** HVDC and FACTS controllers: Applications of static converters in power systems. Kluwer Academic Publishers. 2004. 322 p.
6. **Acha, E.** VSC-FACRS-HVDC Analysis, Modelling and Simulation in Power Grids / *E. Acha, P. R-S. Avilla-Jaen, L. V. Castro* [at al.]. –2019, John Wiley & Sons LTD. – 389 p. URL : www.wiley.com/go/acha.vsc.facts.
7. HVDC Light. It's time to connect. URL: <https://library.e.abb.com/public>.
8. HVDCPlus. URL : <https://new.siemens.com/global/en/high-voltage-direct-current-transmission-solutions/hvdc-plus.html>.

9. **Федів, Є. І., О. М. Сівакова.** Спосіб регулювання пересиланням змінного струму проміжною ланкою постійного струму : пат. 123525 Україна, МПК H02M 5/45 (2006.01); заявник Нац. ун-т «Львівська політехніка». – № у 201710255; заявл. 23.10.2017, опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4. 4 с.
10. **Федів, Є. І.** Гнучка система пересилання змінного струму на основі перетворювачів струму з повністю керованими тиристорами. / *Є. І. Федів, О. М. Сівакова* // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Київ, 2019. Вип. 52. С. 28-32. – <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.028>.
11. **Хворост, М. В.** Види комутації та енергетичні характеристики в електричних колах з ключовими елементами / *М. В. Хворост, Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко* [та ін.] // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 4. – С. 67-72.
12. **Никоненко, Л. О.** Енергетичні характеристики трифазного випрямляча вузла навантаження в режимі видачі реактивної потужності / *Л. О. Никоненко, О. М. Сівакова, Є. І. Федів* // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – № 30 – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2008. – С. 210-216.

References (transliterated)

1. **Stohnii, B. S., Kyrylenko, O. V., Denysiuk, S. P.** Intelektualni elektrychni merezhi elektroenerhetychnykh system ta yikhnie tekhnolohichne zabezpechennia. [Intelligent electric networks of electric power systems and their technological support]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical Electrodynamics]*. 2010, 6, pp. 44-50.
2. **Borlase, S.** Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions / CRC Press. – 2016. – 607 p.
3. **Claus, M., Retzmand, D., Sorangr, D., Uecker, K.** Solutions for smart and super grids with HVDC and FACTS. *17th Conference of the Electric Power Supply Industry*, 27 - 31 October, Macao, 2008.
4. **Paserba, J. J.** How FACTS controllers-benefit AC transmission systems. 2003, *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. DOI : 10.1109/TDC.2003.1335066.
5. **Vijay K. Sood.** HVDC and FACTS controllers: Applications of static converters in power systems. *Kluwer Academic Publishers*. 2004. 322 p.
6. **Acha, E, Avilla-Jaen, P. R-S., Castro, L. V., Kazemtabrizi, B.** VSC-FACRS-HVDC Analysis, Modelling and Simulation in Power Grids. – 2019, *John Wiley & Sons LTD*. – 389 p. URL: www.wiley.com/go/acha.vsc.facts.
7. HVDC Plus. URL: <https://new.siemens.com/global/en/products/high-voltage-direct-current-transmission-solutions/hvdc-plus.html>.
8. HVDC Light. It's time to connect. URL: <https://library.e.abb.com/public>.
9. **Fediv, Y. I., Sivakova, O. M.** Sposib rehuliuвання peresylanniam zminnoho strumu promizhnoiu lankoiu postiyynoho strumu [Method for controlling the AC transmission by an intermediate DC link]. Patent 123525 UA6 (2018).
10. **Fediv, Y. I., Sivakova, O. M.** Hnuchka systema peresylannia zminnoho strumu na osnovi peretvoriuvachiv strumu z povnistiu kerovanymy tyristoramy. [Flexible alternating current transmission systems based on current converters with turn-off thyristors]. *Pratsi Instytutu ektrodynamiky NAN Ukrainy [Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine]*. Kyiv, 2019, 52, pp. 28-32.

11. **Khvorost, M. V., Honcharov, Y. P., Panasenko, M. V., Zamaruiev, V. V., Chumak, V. A., Panasenko, N. M., Khvorost, V. Y., Nikulin, V. S.** Vidy komutatsii ta enerhetychni kharakterystyky v elektrychnykh kolakh z kliuchovymy elementamy [Commutation types and energy characteristics in electrical circuits with valve elements]. *Elektrotehnika I elektromekhanika [Electrical Engineering and Electromechanics]*, 2005, 4, pp. 67-72.
12. **Nykonets, L. O., Sivakova, O. M., Fediv, Y. I.** Enerhetychni kharakterystyky tryfaznogo vupriamliacha vuzla navantazhennia v rezhymy vydachi reaktyvnoi potuzhnosti. [Energy characteristics of three-phase rectifier of load node in the mode with the generation of the reactive power]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytnetu [Collection of research papers of National Mining University]*. Dnipropetrovsk: 2008, 30, pp. 210-216

Відомості про авторів (About authors)

Федів Євген Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електроенергетики і систем управління; м. Львів, Україна; ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0974-1342>; e-mail : yevhen.i.fediv@lpnu.ua.

Yevhen Fediv – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Department of electricity and control systems, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0974-1342>; e-mail: yevhen.i.fediv@lpnu.ua.

Сівакова Ольга Михайлівна – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електроенергетики і систем управління; м. Львів, Україна; ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-4665-0784>; e-mail : olha.m.sivakova@lpnu.ua.

Olha Sivakova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Department of Electricity and control systems, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-4665-0784>; e-mail: olha.m.sivakova@lpnu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Федів, Є. І. Режимы вставки постоянного тока с полностью управляемыми тиристорами / **Є. І. Федів, О. М. Сівакова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: "Електричні машини та електро механічне перетворення енергії.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 183-188. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.27.

Please cite this article as:

Fediv, Y., Sivakova, O. Regimes of DC link with gate turn-off thyristors. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 20 (1345), 183-188, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.27.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Федив, Е. И. Режимы вставки постоянного тока с полностью управляемыми тиристорами / **Е. И. Федив, О. М. Сівакова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Электрические машины и электро механическое преобразование энергии.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 183-188. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.27.

АННОТАЦИЯ. Проведен анализ недостатков регулирования перетоков мощности в электрических сетях и системах с помощью промежуточных звеньев постоянного тока, которые базируются на традиционных преобразователях тока с естественной коммутацией тиристорov. Отмечено, что благодаря современным достижениям в области энергетической электроники, силовые статические преобразователи тока могут работать в режимах с опережающим током, т.е. не потребляя, а генерируя реактивную мощность сдвига. Показана возможность фазового регулирования тиристорами преобразователя, при котором силовой преобразователь может работать в режимах с генерацией реактивной мощности сдвига в сеть переменного тока. Режим искусственной коммутации вентилей, при котором преобразователи работают с опережающим током, достигается открыванием тиристорov без задержки времени, а закрыванием раньше естественного момента времени их закрывания. Проведен анализ электромагнитных процессов в силовом статическом преобразователе тока с полностью управляемыми тиристорами, выполненном по трехфазной мостовой схеме в режимах выпрямителя и зависимого инвертора, которые могут быть использованы для построения промежуточного звена постоянного тока, как компоненты гибких систем передачи переменного тока с возможностями четырехквadrантного регулирования межсистемного обмена мощностью. Сформулированы условия, при которых трехфазный мостовой выпрямитель и зависимый инвертор с закрывающими тиристорами в составе вставки постоянного тока не будут потреблять из сети переменного тока реактивную мощность, что не предусмотрено классической теорией их работы. Приведены аналитические выражения, которые могут быть использованы для получения основных энергетических характеристик вставки постоянного тока, выполненной на основе преобразователей тока, которая не только не нуждается в дополнительном ресурсе реактивной мощности для своего функционирования, но и сама может генерировать реактивную мощность в сети переменного тока. Получены аналитические выражения для электромагнитных параметров, которые могут быть базой для дальнейших исследований и проектирования прототипа вставки постоянного тока с новыми свойствами.

Ключевые слова: вставка постоянного тока, преобразователь тока, выпрямитель, инвертор, реактивная мощность, двухоперационный тиристор

Надійшла (received) 12.07.2019