

5. Представленный способ приемлем для замен большей части линейных и нелинейных участков сложной электрической схемы, свободные колебания в которых являются затухающими и могут быть выражены экспоненциальным законом в определенном промежутке времени.

1. Перхач В.С. *Математичні задачі електроенергетики*. – Львів: Вища школа, 1989. – 464 с.
2. Fernando A. Moreira, Jose R. Marti, Luis Linares. *Electromagnetic Transients Simulation with Different Time Steps – The Latency Approach. IPST 2003 in New Orleans, USA*.
3. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. *Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций: Учеб. Пособие*. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 136 с.
4. Сивокобыленко В.Ф. *Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: Учеб. Пособие*. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.
5. <http://www.eleks.lviv.ua>. Офіційний сайт компанії “EleksSoftware”.
6. <http://www.mpei.ru>. Официальный сайт “Московский энергетический институт (ТУ)”.
7. <http://www.elti.tpu.ru>. Официальный сайт кафедры “Электрические станции” Томского политехнического университета.
8. Сивокобыленко В.Ф., Харченко П.А. *Симуляция переходных процессов в электрических системах, содержащих синхронные машины переменного тока. Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Сер. Електротехніка і енергетика*. – Донецьк, 2007. – Вип. 7 (128). – С. 118–125.

УДК 621.314.63

О.М. Сівакова, Є.І. Федів

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕПМС

МОДЕЛЮВАННЯ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМУ ЗАЛЕЖНОГО ІНВЕРТОРА З ЗАКРИВАЮЧИМИ ТИРИСТОРАМИ

© Сівакова О.М., Федів Є.І., 2009

Запропоновано покращання коефіцієнта потужності однофазного залежного інвертора засобами фазового керування силових двоопераційних тиристорів. Показана можливість роботи інвертора в режимах генерації реактивної потужності зсуву в приймальну мережу змінного струму.

The improvement of monophasе grid-controlled inverter power-factor is offered by means of phase control of power two-operating thyristors. The operating possibility of inverter in the modes of generating fundamental reactive power in the receiving AC network is demonstrated.

Постановка проблеми. Для передачі енергії від джерела постійного струму в електромережу змінного струму в електропостачальних системах використовують силові залежні інвертори. Запас стійкості роботи інвертора забезпечують засобами фазового керування моментами часу відкривання вентилів, реалізація яких супроводжується споживанням реактивної потужності зсуву від джерела змінного струму, що знижує коефіцієнт потужності інвертора та погіршує техніко-економічні характеристики роботи електромереж.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Основним способом компенсації реактивної потужності, яку споживають силові перетворювальні пристрої, зокрема залежні інвертори, є встановлення додаткових компенсувальних чи фільтрокомпенсувальних статичних конденсаторів

[1, 2]. В [3, 4] запропоновано компенсувати реактивну потужність зсуву, яку споживають силові випрямлячі, засобами фазового регулювання двоопераційних тиристорів.

Задача досліджень. Метою роботи є дослідження ефективності застосування двоопераційних напівпровідникових вентилів для компенсації реактивної потужності зсуву, яку споживають силові залежні інвертори.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що для запобігання випадання залежного інвертора з режиму накладаються обмеження на величину кута випередження $\beta_{\text{мін}} \geq \gamma + \delta_{\text{мін}}$, де: γ – кут комутації вентилів; $\delta_{\text{мін}}$ – мінімальне значення кута запасу стійкості інвертора для відновлення керуючих властивостей вентилів. Чим більше значення кута β , тим надійніша комутація вентилів, але при цьому погіршуються енергетичні показники інвертора. Також відомо, що значення кута зсуву основної гармоніки змінного струму відносно напруги електромережі дорівнює $\phi_1 = \beta - \frac{\gamma}{2}$.

Отже, генеруючи активну потужність, інвертор споживає з мережі змінного струму реактивну потужність зсуву. Такою є специфіка побудови інверторів, керованих затримкою відкривання напівпровідникових вентилів відносно моментів часу природного вступу їх у роботу.

Пропонуємо зменшити значення кута ϕ_1 зміною способу фазового керування вентилями інвертора.

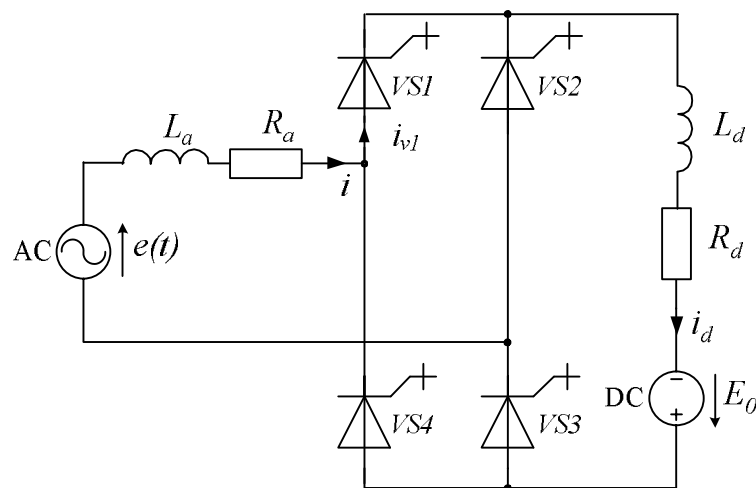


Рис. 1. Схема однофазного мостового залежного інвертора

Проаналізуємо електромагнітні процеси в однофазному мостовому залежному інверторі з закриваючими тиристорами, заступна схема якого наведена на рис.1. На першому етапі дослідження відповідно до принципу ідеалізації приймемо, що приймальна мережа AC – джерело заданої змінної напруги $e(t) = E_m \sin \vartheta$, а напівпровідникові вентиля VS1-VS4 – ідеальні, причому, закриваються вони керуючим імпульсом, а відкриваються додатною анодною напругою.

Згідно з вольтамперними характеристиками закриваючих тиристорів [5] для режиму неперервного струму інвертора комутацію вентилів можна вважати миттєвою ($\gamma = 0$), що дає можливість для реалізації поставленої задачі прийняти $L_a = 0$, тобто всю реактивність схеми зосередити у вітці постійного струму.

Розглянемо нормальний усталений режим роботи інвертора, керованого зміною моментів часу закриття напівпровідникових вентилів, електромагнітні процеси в якому проілюстровані часовими діаграмами струмів та напруг на рис. 2. Для доведення ефективності запропонованого

способу керування вентилями залежного інвертора прийемо, що інвертований струм ідеально згладжений. За аналогією з загальноприйнятим параметром – кут випередження інвертора (β), замінимо кут α_3 закривання вентилів параметром β_3 – кут відставання закривання вентилів інвертора. Як бачимо з рис. 2, вказані кути пов'язані співвідношенням $\alpha_3 = \pi + \beta_3$.

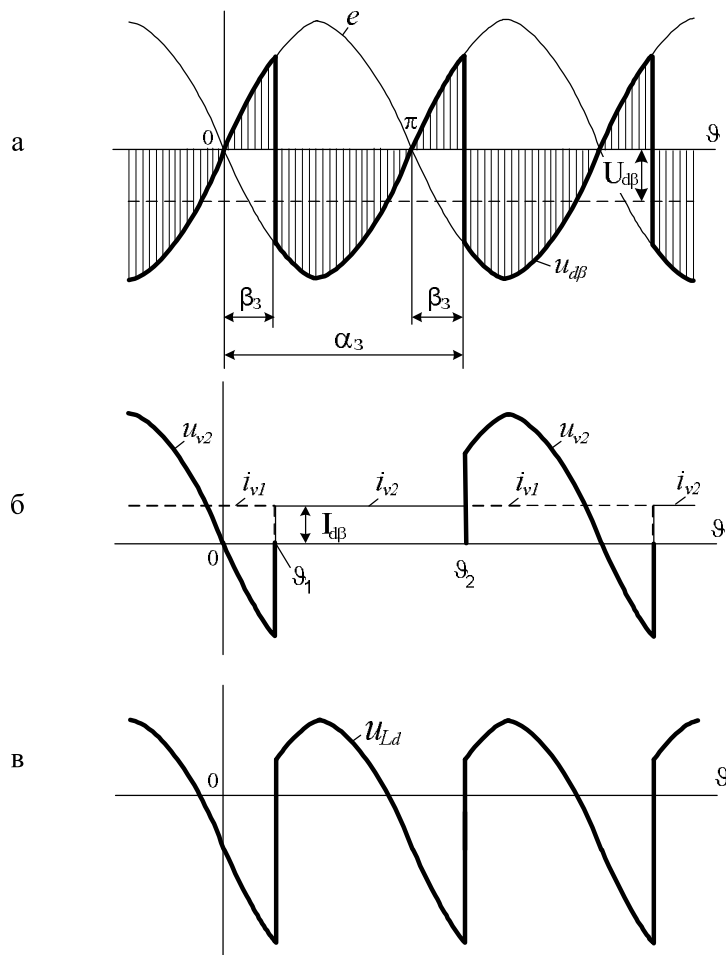


Рис. 2. Часові діаграми струмів та напруг інвертора в режимі генерації реактивної потужності: а – ЕРС; б – струми та зворотна напруга на вентилі; в – напруга на згладжувальному реакторі

Середнє значення проти-ЕРС інвертора згідно з рис. 2, а

$$U_{d\beta} = \frac{1}{\pi} \int_{\beta_3}^{\beta_3+\pi} E_m \sin \vartheta d\vartheta = -\frac{2E_m}{\pi} \cos \beta_3 = -U_{do} \cos \beta_3, \quad (1)$$

де U_{do} – середнє значення проти-ЕРС інвертора, яке відповідає значенню напруги на виході некерованого випрямляча.

Для залежних інверторів $U_{d\beta} < 0$, тому згідно з (1) діапазон можливих значень кута інвертування в загальному випадку становить $\beta_3 = -\frac{\pi}{2} \div \frac{\pi}{2}$. У вибраній системі відліку кутам $-\pi/2 < \beta_3 < 0$ ($\pi/2 < \alpha_3 < \pi$) відповідає режим споживання інвертором реактивної потужності зсуву.

За кутів інвертування $\beta_3 > 0$ проміжок провідного стану вентиля зміщується в область значень ЕРС приймальної мережі, в якій комутація традиційних закриваючих тиристорів

неможлива: анодна напруга на вентилі, що повинен закритися – додатна (момент часу ϑ_2 на рис. 2, б), а на вентилі, який з ним комутує і повинен відкритися, – від’ємна (момент часу ϑ_1).

Для вимкнення закриваючих тиристорів полярність анодної напруги не принципова. У зв’язку з цим, під час закривання тиристора керуючим імпульсом, ЕРС самоіндукції згладжувального дроселя анодна напруга на комутуючому з ним тиристорі цієї групи змінює знак, і він відкривається (рис. 2, б–в).

Інвертований струм незмінний в часі і визначається як

$$I_{d\beta} = \frac{E_0 + U_{d\beta}}{R},$$

де E_0 – ЕРС генератора постійної напруги; R – еквівалентний резистанс контуру протікання струму.

Змінний струм на виході інвертора за умови $i_d = \text{const}$ має прямокутну форму. Коефіцієнти ряду Фур’є для n -ї гармоніки струму

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_3}^{\beta_3 + \pi} I_{d\beta} \cos(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4I_{d\beta}}{\pi \cdot n} \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \cos\left[n\left(\beta_3 + \frac{\pi}{2}\right)\right],$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_3}^{\beta_3 + \pi} I_{d\beta} \sin(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4I_{d\beta}}{\pi \cdot n} \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \sin\left[n\left(\beta_3 + \frac{\pi}{2}\right)\right].$$

Вираз для амплітуди n -ї гармоніки струму набуває вигляду

$$I_{mn} = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} = \frac{4}{\pi \cdot n} I_{d\beta} \cdot \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

а для кута фазового зсуву між синусоїдальною ЕРС та n -ю гармонікою струму

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{A_n}{B_n}\right) = \frac{\pi}{2} - n\left(\beta_3 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3)$$

Підставивши в (2) і (3) $n = 1$, отримуємо вирази для амплітуди і фази основної гармоніки змінного струму приймальної системи:

$$I_{m1} = \frac{4}{\pi} I_{d\beta}, \quad \varphi_1 = -\beta_3.$$

Для порівняння різних способів фазового керування інвертором результати розрахунку параметрів режимів зручно подавати, застосовуючи як незалежну змінну кут інвертування β , який для відкриваючих вентилів означатиме загально прийнятий кут β_B випередження відкривання вентилів, а для закриваючих – уведений нами кут β_3 .

На рис. 3 наведені результати розрахунку кута зсуву основної гармоніки змінного струму інвертора відносно ЕРС приймальної мережі від кута інвертування. За традиційного керування моментами часу відкривання вентилів кут $\varphi_1 > 0$ та обмежений мінімальним значенням

$\varphi_{1\text{мін}} = \beta_{\text{мін}} - \frac{\gamma}{2} = \frac{\gamma}{2} + \delta_{\text{мін}}$. Керуючи моментами часу закривання вентилів в області кутів $\alpha_3 > \pi$ ($\beta_3 > 0$), отримуємо можливість роботи інвертора з кутами зсуву $\varphi_1 \leq 0$, тобто в режимі генерації реактивної потужності зсуву в приймальну мережу.

Особливості роботи інвертора за різних способів керування вентилями проілюстровані векторною діаграмою для основних гармонік струму і напруги (рис. 4). Активна потужність, яка визначається активною складовою струму \dot{I}_{1a} , тобто проекцією векторів струму \dot{I}_{1B} чи \dot{I}_{13} на вертикальну вісь, для інверторного режиму є від’ємною, що вказує на споживання активної потужності мережею змінного струму. До того ж реактивні складові першої гармоніки змінного

струму (\dot{I}_{1VB} , $\dot{I}_{1ГЗ}$), які є проєкціями відповідних векторів повного струму на горизонтальну вісь, для різних способів керування вентилями знаходяться у протифазі.

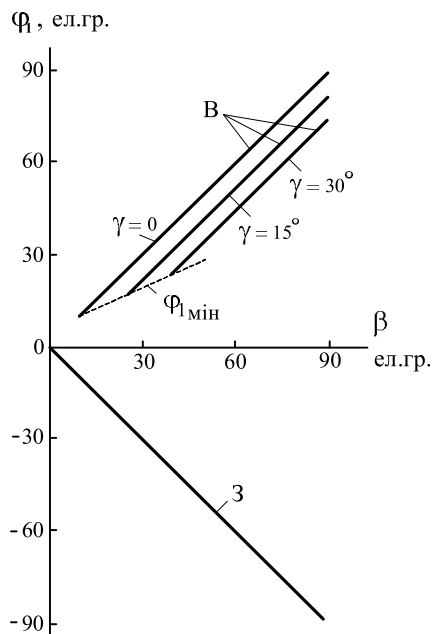


Рис. 3. Залежність кута зсуву основної гармоніки струму інвертора відносно ЕРС приймальної мережі:

B – керування відкриванням вентилів ($\delta_{\text{мін}} = 10^\circ$);

$З$ – керування закриванням вентилів

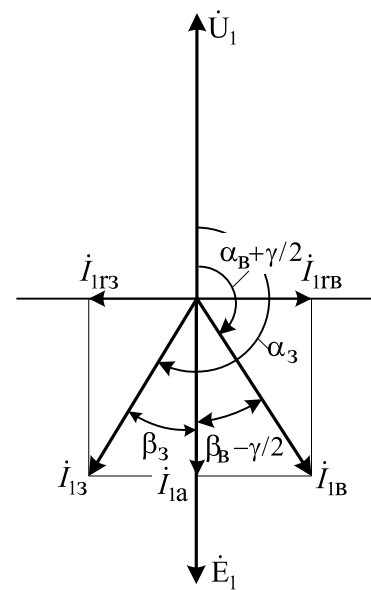


Рис. 4. Векторна діаграма основних гармонік струмів і напруг інвертора

Висновки. 1. Застосування закриваючих напівпровідникових вентилів розширює можливості фазового керування залежних інверторів.

2. Залежний інвертор, керований зміною моментів часу закривання вентилів, може генерувати в електромережу змінного струму не тільки активну потужність, але й реактивну потужність зсуву, що сприяє розв'язанню задачі забезпечення балансу потужності в електропостачальній системі.

1. Глентерник С.Р. Тиристорные преобразователи со статическими компенсирующими устройствами. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с. 2. Супрунович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с. 3. Федів Є.І., Сівакова О.М. Покращення коефіцієнта потужності силових випрямлячів в системах електропостачання // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – № 587: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 101–106. 4. Сівакова О.М., Федів Є.І. Моделювання режиму неперервного струму силового випрямляча з двоопераційними тиристорами // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – № 597: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 99–106. 5. Rashid M. H. Power electronics: circuits, devices, and applications. – New Jersey: Prentice Hall, 1993.