

## ПОКРАЩАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ТА ЗАПАСУ СТІЙКОСТІ ТРИФАЗНОГО ЗАЛЕЖНОГО ІНВЕРТОРА

© Федів Є.І., Сівакова О.М., 2009

Запропоновано спосіб підвищення стійкості роботи трифазного залежного інвертора шляхом переведення його на елементну базу з розширеними можливостями керування станом силових напівпровідникових вентилів. Отримані енергетичні характеристики, які показують можливість покращання коефіцієнта потужності залежного інвертора, керованого моментами часу закривання двоопераційних тиристорів.

The method of increasing the firmness of three-phase grid-controlled inverter work is introduced by its transition on an element base with extended possibilities of regulation the state of power semiconductor valves. Power descriptions where received which show the possible of improvement of the grid-controlled inverter power-factor regulated by the moments of closing time of two-operating thyristors.

**Постановка проблеми.** Основною проблемою, яка впливає на надійність роботи залежних інверторів, є можливість випадання інвертора з режиму. Зрив процесу інвертування – це аварійний режим, який супроводжується протіканням значних струмів. Він виникає, якщо з певних причин не забезпечити надійного закривання напівпровідникових вентилів інвертора на ту частину періоду перебігу електромагнітних процесів, коли ЕРС джерел постійного і змінного струмів однонапрямлені. Відомі способи забезпечення достатнього запасу стійкості режиму інвертування характеризуються тим, що вимушено приводять до зниження коефіцієнта потужності залежного інвертора. Особливо актуальною є зазначена проблема для надійної та ефективної роботи потужних міжсистемних зв'язків й електропостачання великих вузлів навантаження, де застосовують трифазні схеми залежного інвертування.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Для забезпечення стійкості режиму залежного інвертування застосовують системи автоматичного регулювання режимів, які змінюють значення моментів часу відкривання тиристорів (кутів керування) так, щоб зі зміною струму навантаження незмінним залишався кут запасу інвертора ( $\delta = \text{const}$ ) [1,2]. До того ж регулювати кути керування потрібно так, щоб забезпечити максимальне значення коефіцієнта потужності [2], що знижує запас стійкості режиму інвертування.

З метою підвищення коефіцієнта потужності залежних інверторів застосовують додаткові статичні компенсуючі пристрої [3]. У [4–6] пропонується компенсувати реактивну потужність, яку споживають з електромережі трифазні випрямлячі, засобами фазового керування силових двоопераційних напівпровідникових вентилів.

**Задача досліджень.** Дослідити ефективність побудови трифазного залежного інвертора системи електропостачання на базі двоопераційних тиристорів для покращання коефіцієнта потужності та запасу стійкості режиму інвертування.

**Виклад основного матеріалу.** Залежний інвертор випадає з режиму, якщо значення кута випередження  $\beta < \gamma + \delta_{\text{мін}}$ , де  $\gamma$  – кут комутації,  $\delta_{\text{мін}}$  – мінімальний кут відновлення закриваючих

властивостей вентилів [1]. Порушення стійкості режиму інвертування електроенергії в основному відбуваються через: мале значення кута  $\beta$ , велике значення кута  $\gamma$  внаслідок надмірного зростання струму з певних причин, сповільнення процесів відновлення керуючих властивостей вентилів чи відмови системи імпульсно-фазового керування інвертором.

Залежні інвертори, по-іншому, ще називають комутованими електромережею, підкреслюючи прив'язку інтервалів провідності вентилів до величини і знака ЕРС приймальної мережі змінного струму. З одного боку, кут інвертування повинен бути таким, щоб забезпечити різні знаки середнього значення проти-ЕРС інвертора та ЕРС джерела постійного струму, а з іншого, потрібно забезпечувати умови для збереження керуючих властивостей вентилів. Тобто, в інверторному режимі вентиля повинні проводити на інтервалі від'ємних значень напруги приймальної мережі і разом з тим, керовані затримкою вступу в роботу вентиля інвертора, повинні відкриватися ще за додатних значень анодної напруги, а закриватися – з запасом за від'ємних значень. У результаті, в залежному інверторі, як і у випрямлячі, фазовий зсув першої гармоніки змінного струму має відстаючий характер [1]

$$\varphi_1 = \beta - \frac{\gamma}{2} = \frac{\gamma}{2} + \delta \quad (1)$$

Таким чином зі збільшенням кута  $\beta$  зростає запас стійкості інвертора, але погіршуються його енергетичні показники.

Підвищити запас стійкості режиму без погіршення енергетичних показників можна, якщо комутацію напівпровідникових вентилів в інверторі зробити менш залежною від мережі змінного струму. Одним з можливих шляхів послаблення такої залежності полягає у повнішому використанні можливостей фазового управління перетворювачами, побудованими на повністю керованих напівпровідникових вентилях.

Розглянемо електромагнітні процеси в трифазному мостовому залежному інверторі з двохопераційними тиристорами, заступна схема якого наведена на рис.1. Припустимо, що приймальна мережа є джерелом заданої змінної напруги:  $e_a(t) = E_m \sin(\omega t + \pi/6)$ ,  $e_b(t) = E_m \sin(\omega t - \pi/2)$ ,  $e_c(t) = E_m \sin(\omega t + 5\pi/6)$ ,  $L_s = 0$ ,  $R_s = 0$ , а напівпровідникові вентиля – ідеальні.

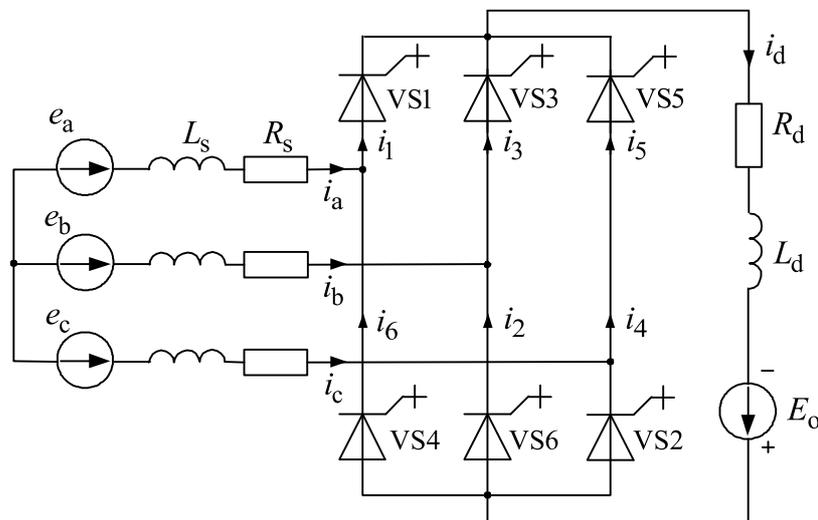


Рис. 1. Заступна схема трифазного мостового залежного інвертора

Розглянемо нормальний усталений режим неперервного струму інвертора, напівпровідникові вентиля якого закриваються керуючим імпульсом, а відкриваються додатною анодною напругою. За такого способу керування вентилями інвертора розв'язують одразу дві задачі. Перша, і основна –

знімається залежність успішності закривання вентиля від значення кута  $\delta$ . А оскільки тривалість комутації закриваючих вентилів мінімальна і можна вважати, що  $\gamma = 0$ , то згідно з (1) розв'язується друга задача – виникає можливість роботи безфазового зсуву основної гармоніки змінного струму ( $\varphi_1 = 0$ ), тобто з максимальним коефіцієнтом потужності.

За припущення  $L_s = 0$  і нехтування втратами в елементах схеми інвертований струм на інтервалі провідності вентилів можна визначити з рівняння

$$E_o + e(t) = \omega L_d \frac{di_d}{d\vartheta}.$$

Для спрощення прийемо, що інвертований струм є ідеально згладжений. Електромагнітні процеси в нормальному режимі залежного інвертора під час роботи з кутом  $\varphi_1 < 0$  проілюстровані часовими діаграмами струмів та напруг на рис. 2. За аналогією з кутом випередження відкриття вентилів  $\beta$ , який є доповненням кута відкриття вентилів  $\alpha$  до значення  $\pi$  для інвертора на відкриваючих тиристорах [1], уведемо кут відставання закривання вентилів інвертора  $\beta_3$ , як доповнення кута  $\vartheta_{o3} = \frac{5\pi}{3}$  природного закривання вентиля до значення  $\alpha_3$  у досліджуваному способі керування інвертором (рис. 2).

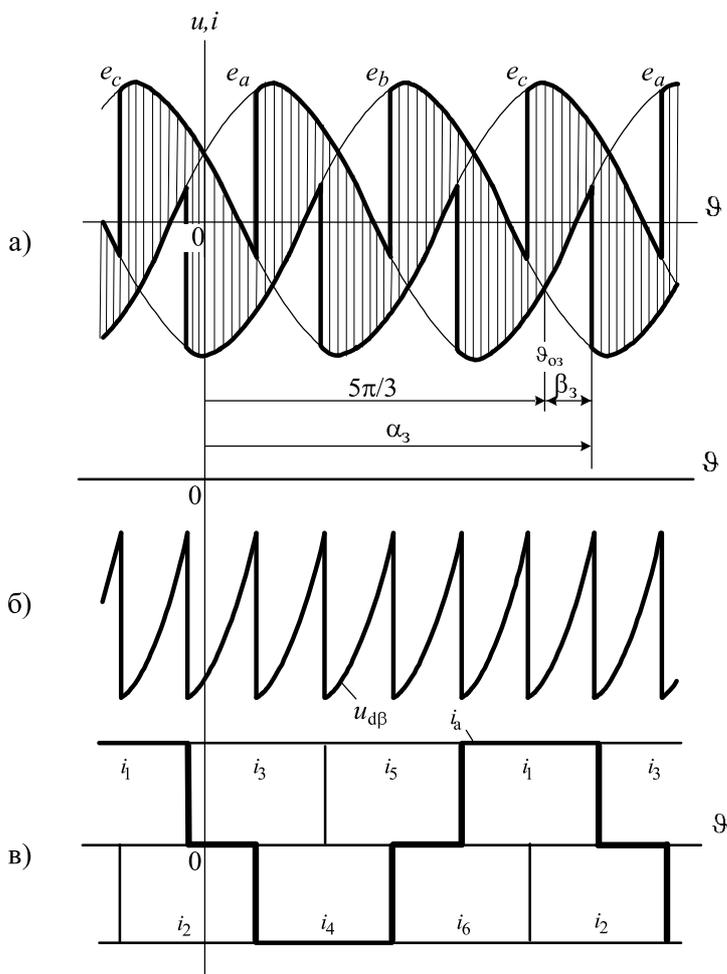


Рис. 2. Часові діаграми струмів та напруг залежного трифазного інвертора в режимі видачі реактивної потужності зсуву:  
 а – ЕРС мережі; б – проти-ЕРС інвертора; в – струми вентилів

Відповідно до вибраної системи відліку (рис. 2), враховуючи співвідношення між кутами керування  $\alpha_3 = \pi + \beta_3$ , середнє значення проти-ЕРС інвертора

$$U_{d\beta} = \frac{3}{\pi} \int_{\beta_3}^{\beta_3 + \frac{\pi}{3}} [e_a(\vartheta) - e_c(\vartheta)] d\vartheta = \frac{3\sqrt{3}E_m}{\pi} \sin\left(\alpha_3 - \frac{\pi}{6}\right) = -U_{do} \cos(\beta_3), \quad (2)$$

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

В інвертованому струмі за умови  $i_d = \text{const}$  присутня тільки нульова гармоніка

$$I_{d\beta} = \frac{E_o - U_{do} \cos(\beta_3)}{R},$$

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

Розкладемо в ряд Фур'є струм джерела змінної напруги. Коефіцієнти розкладу для  $n$ -ї гармоніки струму

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_3 + \frac{\pi}{3}}^{\beta_3 + \frac{4\pi}{3}} I_{d\beta} \cos(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I_{d\beta}}{n} \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right) \cos\left[n\left(\beta_3 - \frac{2\pi}{3}\right)\right],$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_3 + \frac{\pi}{3}}^{\beta_3 + \frac{4\pi}{3}} I_{d\beta} \sin(n\vartheta) d\vartheta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I_{d\beta}}{n} \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right) \sin\left[n\left(\beta_3 - \frac{2\pi}{3}\right)\right],$$

з використанням яких вирази для амплітуди і фази  $n$ -ї гармоніки отримуємо у вигляді

$$I_{mn} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I_{d\beta}}{n} \cdot \sin\left(n \frac{\pi}{3}\right), \quad (3)$$

$$\cdot \varphi_n = n(\pi - \beta_3) \quad (4)$$

Підставивши в (3), (4)  $n=1$ , отримуємо вирази для амплітуди і фази основної гармоніки змінного струму інвертора:

$$I_{1m} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{d\beta}, \quad \varphi_1 = \pi - \beta_3.$$

В загальному випадку в режимі неперервного струму за умови  $i_d = \text{const}$  кут  $\beta_3$  може приймати значення в діапазоні  $\beta_3 = -\frac{\pi}{2} \div \frac{\pi}{2}$ . Якщо закрити вентилі за кутів  $\beta_3 = 0$ , то основна гармоніка струму буде у протифазі з ЕРС джерела. За кутів  $\beta_3 > 0$  інвертор працює з випередженням за фазою основної гармоніки вихідного струму (рис. 2).

Для ілюстрації результатів розрахунку параметрів режиму трифазного залежного інвертора в якості незалежної змінної приймемо кут інвертування, як доповнення кута  $\beta = |\beta_3|$ .

Енергетичну ефективність силових перетворювальних пристроїв прийнято оцінювати коефіцієнтом потужності

$$\chi = \frac{P}{S} = v \cdot \cos \varphi_1. \quad (5)$$

Потрібно зазначити, що коефіцієнт потужності  $\chi$ , як класичний інтегральний енергетичний показник, для залежних інверторів не відображає дійсних напрямів потоків як активної

(інвертованої) потужності, так і реактивної потужності зсуву. За кутів інвертування  $\frac{\pi}{2} > \beta > 0$  та  $0 > \beta > -\frac{\pi}{2}$  значення коефіцієнта зсуву  $\cos \phi_1 > 0$ . Оскільки коефіцієнт спотворення  $\nu > 0$ , то згідно з (5) значення коефіцієнта потужності  $\chi > 0$ . Але в режимах інвертування активна потужність генерується в мережу змінного струму ( $P < 0$ ). Це означає, що по суті коефіцієнт потужності відображає відношення  $\chi = \frac{|P|}{S}$ .

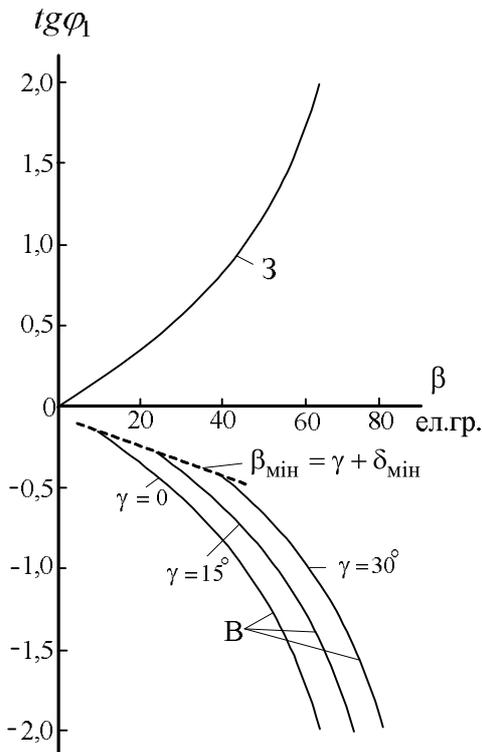


Рис. 3. Залежність коефіцієнта реактивної потужності зсуву від кута керування інвертором:  
 3 – керування закриванням вентилів;  
 В – керування відкриванням вентилів ( $\delta_{\text{мін}} = 10^\circ$ )

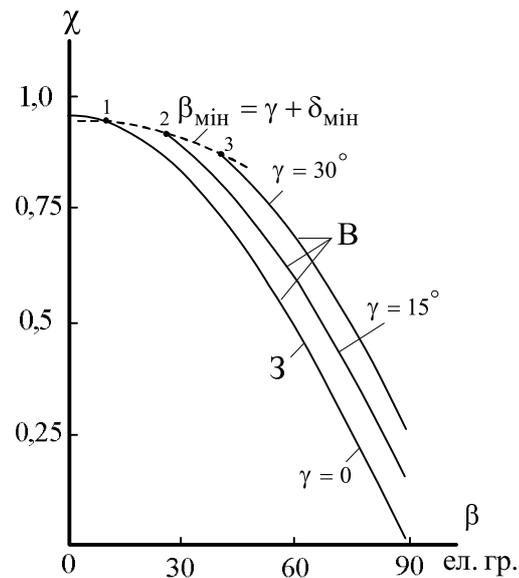


Рис. 4. Залежність коефіцієнта потужності від кута керування інвертором:  
 3 – керування закриванням вентилів;  
 В – керування відкриванням вентилів ( $\delta_{\text{мін}} = 10^\circ$ )

Враховуючи вказану обставину, а також те, що знак реактивної потужності зсуву не закладений в саме поняття коефіцієнта  $\chi$ , пропонуємо за аналогією з мережами змінного синусоїдального струму для характеристики залежних інверторів додатково увести коефіцієнт реактивної потужності зсуву  $\text{tg} \phi_1 = Q_1/P_1$ . Знак коефіцієнта  $\text{tg} \phi_1$  інформує про знак реактивної потужності зсуву відносно напрямку корисної потужності. Як бачимо з рис. 3, за умови керування моментами часу закривання вентилів інвертора і значень кутів  $\beta_3 > 0$  значення коефіцієнта  $\text{tg} \phi_1 > 0$ , тобто для мережі змінного струму інвертор може бути генератором не тільки активної потужності, але й реактивної потужності зсуву. До того ж за традиційного способу керування інвертором напрямки потоків активної потужності та реактивної потужності зсуву є протилежними. Враховуючи, що для інвертора з відкриваючими тиристорами  $\beta_{\text{мін}} = \gamma + \delta_{\text{мін}}$  [1], його робота без споживання з електромережі змінного струму реактивної потужності зсуву неможлива і для такого інвертора завжди  $\text{tg} \phi_1 < 0$  (рис. 3).

На рис. 4 наведена залежність коефіцієнта потужності інвертора від кута інвертування для різних способів фазового керування вентилями, розрахована за припущення, що значення коефіцієнта спотворення  $v$  мало залежать від кута комутації вентилів і для обох способів керування трифазним мостовим інвертором прийнято значення  $v = \frac{3}{\pi}$  [1]. Як бачимо, за рівних значень кутів інвертування  $\beta$  і кута комутації вентилів  $\gamma = 0$ , значення коефіцієнта потужності для інвертора, керованого способом закривання вентилів керуючим імпульсом, збігаються зі значеннями коефіцієнта потужності для традиційного способу керування вентилями аж до межі стійкості – значень кута випередження  $\beta_{\min}$  (т. 1 на рис. 5). Інвертор, керований запропонованим способом може стійко працювати за значень кута  $\beta = 0$ , тобто за максимального значення коефіцієнта потужності.

Дослідження перехідних процесів під час закривання тиристорів інвертора керуючими імпульсами потребує врахування деяких додаткових факторів і є окремою задачею. Однак зазначимо, що загальні підходи і наближені оцінки пікових напруг на вентилях за умови  $L_s \neq 0$ , автори виклали в [6] для силових випрямлячів з закриваючими тиристорами, коректні і для досліджуваного способу керування залежними інверторами.

**Висновки.** 1. Керування залежним інвертором шляхом закривання тиристорів керуючими імпульсами підвищує запас стійкості інвертора, оскільки знімає частину причин зриву режиму інвертування.

2. Для реалізації запропонованого способу керування залежним інвертором не обов'язково використовувати двоопераційні або повністю керовані вентиля. Достатньо й доцільніше з міркувань можливості спрощення системи імпульсно-фазового керування інвертором застосовувати одноопераційні, але керовані на закриття напівпровідникові вентиля 3. Залежний інвертор з закриваючими напівпровідниковими вентилями може працювати з коефіцієнтом потужності, характерним для режимів роботи некерованого випрямляча.

1. Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с. 2. Электрические системы и сети / Н.В. Буслова и др.; Под ред. Г.И. Денисенко. – К.: Вища школа, 1986. – 584 с. 3. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. – 248 с. 4. Федів Є.І., Сівакова О.М. Силові випрямлячі систем електропостачання з покращеним коефіцієнтом потужності // Вісн. Приазовськ. тех. ун-ту: Зб. наук. пр. – Вип. 18, ч. 2. – Маріуполь, 2008. – С. 60–64. 5. Никонець Л.О., Сівакова О.М., Федів Є.І. Енергетичні характеристики трифазного випрямляча вузла навантаження в режимі видачі реактивної потужності // Зб. наук. праць Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2008. – № 30. – С. 210–216. 6. Сівакова О.М., Федів Є.І. Особливості фазового керування силовими випрямлячами електропостачальних систем // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2008. – № 615: Електроенергетичні та електромеханічні системи.