

УДК 621.314

## РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ ДЛЯ ОДНОФАЗНОГО АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ

Шавьолкін О. О., Немикіна Ю. В.

Київський національний університет технологій та дизайну

*Розглянуто принципи керування однофазним мостовим інвертором напруги в режимі джерела струму. Для однополярного формування напруги запропоновано рішення з трирівневим релейним регулятором струму при зниженні кількості і обмеженні частоти перемикань транзисторів. Виконано моделювання роботи інвертора з системою керування.*

**Ключові слова:** *інвертор напруги в режимі джерела струму, релейний регулятор струму, трирівневий релейний регулятор, однополярна модуляція, моделювання*

Останнім часом в Україні широке розповсюдження знаходять системи електроживлення малої потужності з поновлювальними джерелами енергії (ПДЕ), що використовуються для локальних об'єктів: житлових і офісних будівель, малих підприємств та інше. Введення «зелених» тарифів стимулює до використання комбінованих систем електроживлення (КСЕ) [1], що працюють паралельно з централізованою мережею (ЦМ). За цього надлишок енергії, що генерується ПДЕ генерується в ЦМ. Таким чином, впровадження КСЕ сприяє підвищенню енергетичної безпеки держави.

### **Постановка завдання**

На відміну від автономних систем виникає питання забезпечення сумісності КСЕ з ЦМ. І тут слід враховувати характер сучасного навантаження локальних об'єктів, що споживає реактивну потужність і генерує в мережу вищі гармоніки. Вирішення цього питання можливо з використанням мережевого автономного інвертора напруги (МАІН), який суміщає функцію перетворення енергії з функцією фільтро-компенсуючого пристрою (ФКП) [2, 3], що пов'язано з використанням МАІН в режимі джерела струму. В КСЕ малої потужності, що підключені до однофазної ЦМ зазвичай використовується однофазний мостовий інвертор. За цього інвертор працює паралельно з ЦМ – на джерело синусоїдальної напруги. У разі відключення ЦМ – автономний режим, коли навантаження МАІН активно-індуктивне. Проте питання реалізації режиму джерела струму в цій схемі вивчено недостатньо.

**Результати досліджень**

Структура силових кіл АІН у разі використання в КСЕ наведена на рис.1 і містить зовнішнє джерело синусоїдальної напруги  $u_1$ ,  $R_\phi C_\phi$  – високочастотний фільтр для придушення вищих гармонік напруги, навантаження  $Z_H$  (у тому числі нелінійне), реактор  $L$ , який обмежує швидкість струму, що формується АІН, АІН на чотирьох IGBT, ВІ – датчик струму АІН.

У разі паралельної роботи АІН з джерелом (К1 – замкнений) конденсатор фільтру С1 вимкнута, адже напруга навантаження є синусоїдальною. У автономному режимі (К1 – вимкнута) паралельно навантаженню вмикається С1 (К2 – замкнута). Отже на навантаженні завжди напруга синусоїдальна. Вихідна напруга АІН може приймати три значення  $+U$ ,  $0$ ,  $-U$ . Якщо використовуються два значення  $+U$ ,  $-U$  – маємо біполярну модуляцію, якщо три – однополярну [4].

Розглянемо формування синусоїдального струму у замкненій за струмом системі відповідно миттєвому значенню завдання  $i_{3AD}$  і фактичному значенню струму  $i$  на виході АІН (сигнал зворотного зв'язку за струмом) згідно похибки  $\Delta i = i_{3AD} - i$ . Можливі наступні варіанти реалізації.

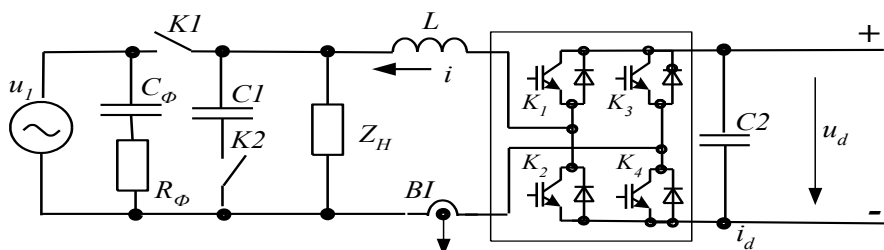


Рис. 1. Структура силових кіл АІН

1. Варіант керування, коли полярність вихідної напруги визначається знаком похибки, наприклад, за допомогою компаратора. Якщо  $\Delta i > 0$ , тобто задане значення перевищує фактичне - вмикаються ключі АІН, які забезпечують позитивну полярність вихідної напруги, що призводить до зростання струму. Похибка зменшується до нуля і змінює полярність. За умови  $\Delta i < 0$  - вмикаються ключі АІН, що забезпечують негативну полярність вихідної напруги (або нульове її значення). Отже значення вихідного струму коливається відносно заданого значення практично з нульовою похибкою. Безпосереднє перемикання ключів згідно полярності похибки струму призведе до занадто високої частоти перемикання ключів, що у більшості використань

неможливо.

2. Формування струму з похибкою за умови, що середнє за період перемикань ключів АІН значення похибки близьке до нуля.

2.1. З обмеженням  $\Delta i$  заданим відхиленням  $\delta > 0$  відносно значення  $i_{3AD}$  і використанням релейного (гістерезисного) регулятора струму (PPC). Це дозволяє обмежити частоту перемикань ключів АІН, проте на періоді вихідного струму частота перемикань є змінною. За цього струм навантаження коливається в межах  $(i_{3AD}-\delta) < i < (i_{3AD}+\delta)$ . У разі біполярної модуляції зростання – убування струму здійснюється змінюванням полярності напруги навантаження при перемиканні відповідних ключів.

Певні особливості в мостовій схемі АІН має застосування PPC за використанням однополярного формування напруги навантаження, коли напруга навантаження може приймати три значення  $+U$ ,  $0$ ,  $-U$ . Варто зазначити, що за синусоїдальної форми струму значення  $\frac{di}{dt}$  змінюється від нуля до максимального значення. Очевидно, що за використанням PPC швидкість змінювання струму у колі з індуктивністю визначається прикладеною напругою і повинна перевищувати  $\frac{di_{3AD}}{dt}$  (струм навантаження коливається в межах  $(i_{3AD}-\delta) < i < (i_{3AD}+\delta)$ ). Однак, за значного перевищення  $|\frac{di}{dt}| > |\frac{di_{3AD}}{dt}|$  струм за спрацьовуванням PPC швидко зростає і убуває, що збільшує кількість перемикань ключів АІН, які забезпечують відповідні значення вихідної напруги  $+U$  та  $-U$ .

Кількість перемикань ключів можна суттєво зменшити якщо  $\frac{di}{dt}$  та  $\frac{di_{3AD}}{dt}$  близькі за значенням. Розглянемо формування позитивної напівхвилі струму. Так, під час зростання  $i_{3AD}$  ( $\frac{di_{3AD}}{dt} > 0$ ) змінення струму  $i$  від рівня  $(i_{3AD}-\delta)$  до  $(i_{3AD}+\delta)$  досягається за вихідної напруги АІН  $U_H=U$ , що забезпечує  $\frac{di}{dt} > \frac{di_{3AD}}{dt}$ . Якщо для подальшого зменшення  $i$  встановити  $U_H=0$  (коло навантаження закорочено) швидкість убування струму зменшується (відносно випадку, коли  $U_H=-U$ ) – тривалість інтервалу часу

досягнення значення  $(i_{3AD}-\delta)$  збільшується. На ділянці з  $\frac{di_{3AD}}{dt} < 0$  на інтервалі змінювання струму  $(i_{3AD}-\delta) < i < (i_{3AD}+\delta)$  можна використати наступні варіанти:  $U_H=U$ ,  $(\frac{di}{dt} > 0)$  або  $U_H=0$ ,  $(\frac{di}{dt} < 0)$ , якщо  $|\frac{di_{3AD}}{dt}| \geq |\frac{di}{dt}|$  - струм навантаження зменшується повільніше ніж завдання. На наступному інтервалі зменшення  $i$  до рівня  $(i_{3AD}-\delta)$  теж можливі два варіанта:  $U_H=0$   $(\frac{di}{dt} < 0)$ , якщо  $|\frac{di}{dt}| \geq |\frac{di_{3AD}}{dt}|$  або  $U_H=-U$   $|\frac{di}{dt}| > |\frac{di_{3AD}}{dt}|$ .

Отже, якщо змінювати стани схеми залежно від значення  $\frac{di_{3AD}}{dt}$  можна значно зменшити кількість перемикачів ключів АІН тобто перейти до однополярного формування напруги навантаження. Розглянемо один із можливих варіантів реалізації з використанням трирівневого РРС, який має додатковий релейний елемент (РЕ) з рівнем спрацьовування  $\delta_I=(1.2\div 1.5)\delta$ . Так, для позитивної напівхвилі струму спрацьовуванню РРС за рівнями  $(i_{3AD}\pm\delta)$  відповідають значення напруги навантаження  $U_H=U$  і  $U_H=0$ . На певній ділянці формування струму виникає ситуація, коли після досягнення  $i \geq (i_{3AD}+\delta)$  і перемикач у стан  $U_H=0$  швидкість змінювання струму навантаження не забезпечує спадання струму  $i$ . Тобто струм продовжує зростати. За досягненням значення  $i \geq (i_{3AD}+\delta_I)$  спрацьовує РЕ, який перемикає стан схеми  $U_H=-U$  для гарантованого зменшення струму. У подальшому використовуються стани  $U_H=0$  і  $U_H=-U$ . Аналогічна робота РРС для негативної напівхвилі, коли використовуються стани  $U_H=-U$  і  $U_H=0$ , за спрацьовуванням РЕ  $U_H=0$  і  $U_H=-U$ .

Отже на виході РРС маємо сигнал  $U_g$ , що відповідає трьом рівням 1, 0, -1. Відповідно змінюється і алгоритм керування ключами АІН. За цього сигнали керування ключами приймають значення: якщо  $U_g \geq 0$   $g_1=1$ , якщо  $0 \geq U_g$   $g_3=1$ ,  $g_2 = \bar{g}_1$ ,  $g_4 = \bar{g}_3$ .

2.2. Формування струму за умови постійної частоти модуляції. Розглянемо варіант, коли визначення інтервалів часу вмикання ключів АІН здійснюється шляхом порівняння за рівнем сигналу похибки  $\Delta i$  з модулюючою напругою трикутної форми  $U_{TP}$  з частотою  $f_M$ , яка симетрична відносно нуля (рис. 2).

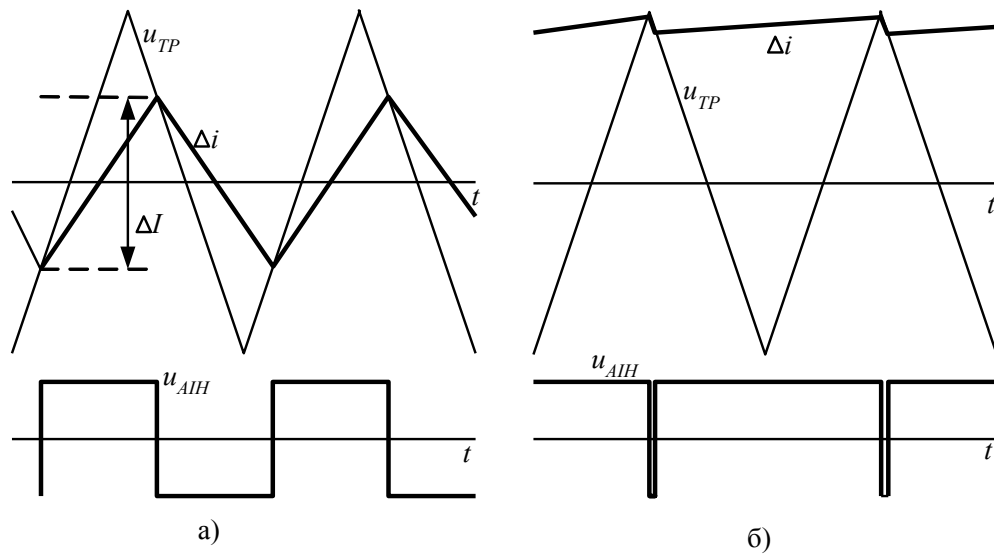


Рис. 2. Формування струму за умови постійної частоти модуляції:  
а) для  $U_H=0$ , б) для  $U_H=U_m$

Це здійснюється компаратором К, вихідна напруга якого приймає значення 1, якщо  $\Delta i > U_{TP}$  і дорівнює 0 (або -1), якщо  $\Delta i < U_{TP}$ . За цих умов час вмикання ключів у відповідних станах є пропорційним амплітуді коливань похибки струму. Отже для коректної роботи схеми слід узгоджувати частоту модуляції  $f_M$  зі швидкістю змінювання вихідного струму  $di/dt$ . У ідеальному випадку частота коливань струму дорівнює  $f_M$  і частоті перемикачів ключів. Значення частоти  $f_M$  обирається з урахуванням двох факторів: втрати енергії на перемикачів ключів, що зростають із збільшенням частоти, і індуктивності реактора  $L$ . Із збільшенням частоти індуктивність зменшується.

Індуктивність реактора визначає швидкість змінювання струму. Напруга на індуктивності для інтервалу, коли вихідна напруга дорівнює  $+U$  і струм зростає (похибка  $\Delta i$  зменшується до нуля, а потім стає позитивною)  $U_L = U - U_H = L \frac{di}{dt}$ , де  $U_H$  – напруга навантаження (мережі). Для інтервалу, коли вихідна напруга дорівнює  $-U$  і струм убиває (похибка  $\Delta i$  зменшується до нуля, а потім стає негативною)  $U_L = -U - U_H = L \frac{di}{dt}$ . На рис. 2,а показано випадок, коли швидкість змінювання струму є максимальною і середнє значення похибки дорівнює нулю. Розглянемо момент часу, коли швидкість змінювання струму є максимальною і  $U_H$  наближається до 0. Оскільки частота модуляції достатньо велика, можна вважати, що на інтервалі модуляції напруга навантаження і завдання струму незмінні. Отже струм змінюється за лінійним законом і

від похідної струму можна перейти к прирощенню  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ . Тоді час зростання струму:

$$\Delta t_{зр} = \frac{\Delta I \cdot L}{U}, \quad (1)$$

де  $\Delta I$  – розмах коливань  $\Delta i(t)$ .

Звідси, час зростання струму дорівнює часу убавання:

$$\Delta t_{уб} = \frac{-\Delta I \cdot L}{-U}. \quad (2)$$

Загальний час (період коливань струму) дорівнює періоду модуляції:

$$t = \frac{1}{f_M} = 2\Delta I \cdot L \frac{1}{U}, \quad (3)$$

де  $f_M$  – частота модуляції, звідки значення індуктивності :

$$L = \frac{U}{2 \cdot \Delta I \cdot f_M}. \quad (4)$$

Для забезпечення можливості керування струмом, коли напруга навантаження максимальна необхідно виконання умови  $U \geq 1.1U_m$ , тоді:

$$L = \frac{1.1U_m}{\Delta I \cdot f_M \cdot 2}, \quad (5)$$

де  $U_m$  – напруга модуляції.

Отже, індуктивність визначається частотою модуляції і  $\Delta I$ , значення  $\Delta I$  в свою чергу, не перевищує подвоєне значення амплітуди модулюючої напруги  $U_{TRM}$ , значення якої можна збільшувати.

З іншого боку є обмеження щодо значення індуктивності за падінням напруги на ній, що звичайно не перевищує 5% за максимального значення струму  $I_{MAX}$   
 $\Delta U_L = I_{MAX} \omega L \leq 0.05U_1$ . Отже

$$L \leq \frac{0.05U_1}{\omega I_{MAX}}, \quad (2)$$

де  $\omega$  – кутова частота,  $I_{MAX}$  – максимальний струм.

Розглянуто випадок, коли  $U_H$  наближається до 0 і швидкість зростання та убавання струму є однаковими. За цих умов середнє значення похибки близьке до нуля (є близьким до нуля і середнє значення напруги АІН – рис. 2,а). В інших випадках, коли  $U_H > 0$  швидкості зростання та убавання струму є різними. Максимальна різниця буде для  $U_H = U_m$ . Це призводить к зміщенню кривої  $\Delta i(t)$  відносно нуля до рівня  $U_{TRM}$  (рис. 2,б), за цього середнє значення напруги АІН близьке до  $U$ . Таким чином, струм на виході АІН відпрацьовується з похибкою, яка дорівнює  $U_{TRM}$ .

Похибку можна звести практично до нуля коригуванням закону змінювання модулюючої напруги з урахуванням закон у змінювання завдання струму  $U_{TP}^1 = U_{TP} + ki_{3AD}$  ( $k$  – коефіцієнт).

Моделювання здійснювалось з використанням програмного пакету MATLAB. Розроблено дві моделі АІН з однаковими параметрами силових кіл і системами керування, що реалізують алгоритм з фіксованою частотою модуляції і з використанням тривіневого РРС. Тому,  $U=220$  В,  $U_{TPm}=2$  В,  $f_M=16$  кГц,  $I_{3ADm}=25$  А, індуктивність реактору згідно (1) становить  $L=0.00536$  Гн, що перевищує значення згідно (2). Це перевищення обумовлено з метою обмеження значення  $f_M$ . Осцилограми струму  $i_l$ , вихідної напруги АІН  $U_{AИH1}$ , похибки  $\Delta i(t)$  за фіксованою частотою модуляції наведені на рис.3. Наявність похибки обумовила відхилення значення амплітуди першої гармоніки струму  $I_{(1)m}=23.46$  А. Тож коефіцієнт гармонік струму THD=2.32%.

Осцилограми роботи схеми з тривіневним РРС ( $i$ ,  $U_{AИH}$ ) також наведені на рис. 3 за тих же умов і  $\delta=1$  А ( $\delta_I=1.5$  А). Частота і кількість перемикань ключів АІН суттєво зменшилися за практично однакових THD струму (близько 2.5%).

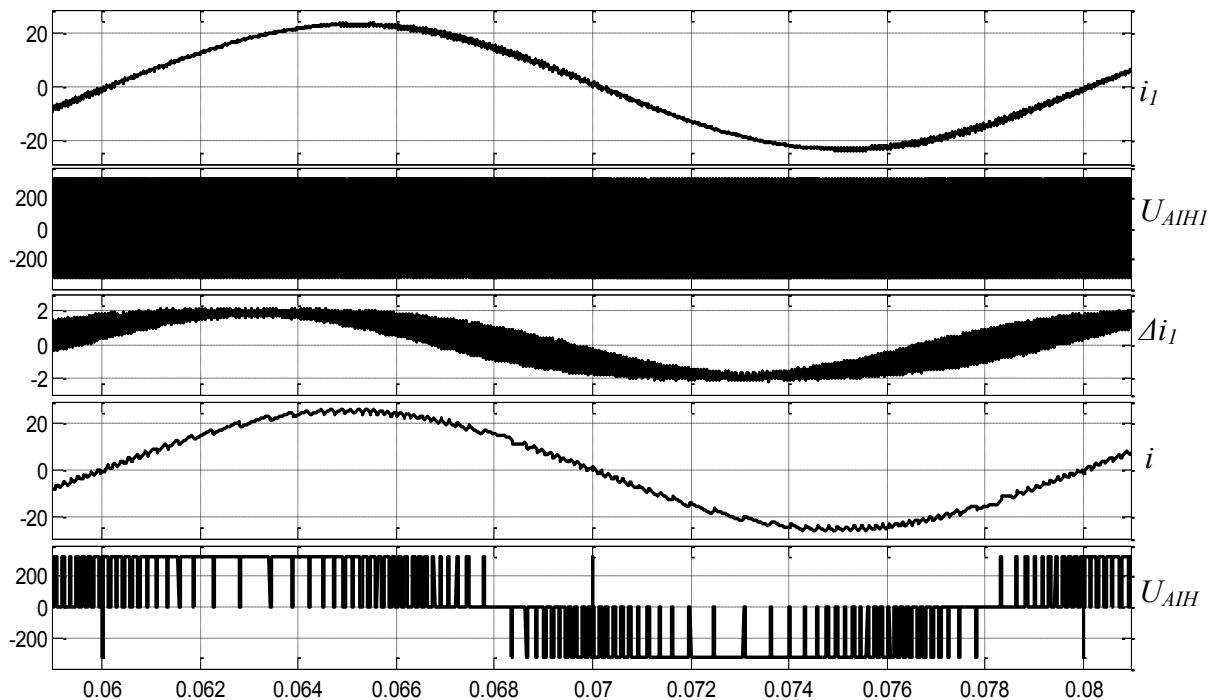


Рис. 3. Осцилограми струму і напруги однофазного мостового АІН з постійною частотою комутації ( $i_l$ ,  $U_{AИH1}$ ,  $\Delta i_l$ ) і тривіневним РРС ( $i$ ,  $U_{AИH}$ )

**Висновки**

Для використання однофазного мостового автономного інвертора напруги з формуванням вихідного струму є доречним використання трирівневого PFC з однополярним формуванням вихідної напруги, що дозволяє зменшити втрати енергії на перемикання ключів схеми з обмеженням частоти перемикань. Напрямою подальших робіт є дослідження запропонованих рішень для схеми АІН з суміщенням функції силового активного фільтра і передавання активної потужності.

**Список використаних джерел**

1. Каплун В. В. Комбіновані системи електроживлення з поновлюваними джерелами енергії [Текст] / В. В. Каплун, В. В. Козирський, А. В. Петренко – К. : ЦТІ «Аграр Медіа Груп», 2011. – 330 с.: іл.134.
2. Каплун В. В. Удосконалення перетворювального агрегату комбінованої системи електроживлення з поновлювальними джерелами енергії / В. В. Каплун, О. О. Шавьолкін // «Електротехнічні та комп'ютерні системи» № 22 (98), Наука і техніка, 2016. – С.165-169.
3. Sung-Hun Ko. A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control / Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar // IEEE Transactions, 2006. – pp.5203-5208.
4. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник [Текст] / О. О. Шавьолкін; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 403 с.

**References**

1. Kaplun V. V. Kombinovani systemy elektrozhyvlennia z ponovliuvanymy dzherelamy enerhii [Tekst] / V. V. Kaplun, V. V. Kozyrskiy, A. V. Petrenko – K. : TsTI «Ahrar Media Hrup», 2011. – 330 s.: il.134.
2. Kaplun V. V. Udoskonalennia peretvoriuvalnoho ahrehatu kombinovanoi systemy elektrozhyvlennia z ponovliuvalnymy dzherelamy enerhii / V. V. Kaplun, O. O. Shavolkin // «Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy» № 22 (98), Nauka i tekhnika, 2016. – S.165-169.



3. Sung-Hun Ko. A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control / Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, C.V. Nayar // IEEE Transactions, 2006. – pp.5203-5208.
4. Shavolkin O. O. Sylovi napivprovidnykovi peretvoriuvachi enerhii: navch. posibnyk [Tekst] / O. O. Shavolkin; Kharkiv. nats. un-t. misk. hosp-va im. O. M. Beketova. – Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2015. – 403 s.

***Реализация режима источника тока для однофазного автономного инвертора напряжения***

***Шавёлкин А. А., Немыкина Ю. В.***

*Киевский национальный университет технологий и дизайна*

*Рассмотрены принципы управления однофазным мостовым инвертором напряжения в режиме источника тока. Для однополярного формирования напряжения предложено решение с трехуровневым релейным регулятором тока при снижении количества и ограничении частоты переключений транзисторов. Выполнено моделирование работы инвертора с системой управления.*

***Ключевые слова:*** инвертор напряжения в режиме источника тока, релейный регулятор тока, трехуровневый релейный регулятор, однополярное модуляция, моделирование

***Implementation of the power supply mode for single-phase autonomous inverter voltage***

***Shavelkin A. A., Nemykina Ju. V.***

*Kiev National University of Technology & Design*

*We consider the principles of management-phase bridge voltage source inverter in current mode. For the formation of a unipolar voltage provides a solution to the three-level switching current regulator with a decrease in the amount and the limitation of the frequency of the switching transistors. The modeling of the inverter with the control system.*

***Keywords:*** voltage inverter in current source mode, current control relay, three-level relay control, unipolar modulation simulation