

УДК 621.314.26

ШАВЬБОЛКІН О.О., РОСІНСЬКА Г.П.
Київський національний університет технологій та дизайну

БАГАТОРІВНЕВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ

Мета. Удосконалення багаторівневих перетворювачів з паралельним з'єднанням автономних інверторів напруги за виходом щодо покращення гармонійного складу вихідної напруги і зменшення зрівнювальних струмів у вихідних колах інверторів.

Методика. Використаний відомий метод гармонійного аналізу та комп'ютерне моделювання з застосуванням програмного пакету *Matlab*.

Результати. В ході роботи визначені середні значення напруги реактору на виході інвертору на інтервалі модуляції за різною кількістю паралельно з'єднаних інверторів. Отримані аналітичні вирази для визначення індуктивності вихідного реактору. Розроблені математичні моделі перетворювачів з паралельним з'єднанням за виходом дворівневих і трирівневих NPC інверторів. Показано, що збільшення кількості інверторів, що з'єднані паралельно, не суттєво сприяє зменшенню зрівнювальних струмів в їх вихідних колах.

Наукова новизна. Запропоновано метод визначення амплітуди зрівнювального струму при паралельному з'єднанні інверторів за виходом.

Практична значимість. Отримані аналітичні вирази є основою для інженерної методики визначення параметрів схеми багаторівневого перетворювача з паралельним з'єднанням автономних інверторів напруги. Розроблені моделі можуть бути використані при проектуванні схем перетворювачів і в навчальному процесі в курсі енергетичної електроніки.

Ключові слова: багаторівневий перетворювач, автономний інвертор напруги, дворівневий інвертор, трирівневий NPC інвертор, коефіцієнт гармонік, зрівнювальний струм.

Вступ. Сучасні дослідження щодо підвищення ефективності використання електричної енергії розглядають застосування паралельного з'єднання напівпровідникових перетворювачів для підвищення встановленої потужності системи. Використання багаторівневих перетворювачів дозволяє досягти найбільшої енергоефективності за рахунок підвищення якості перетворення електричної енергії, знизити масу, габарити і вартість фільтрів в колах змінного струму [1,2,4]. Тому удосконалення їх схемних рішень і принципів керування є актуальним науково-технічним завданням.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність питання підвищення ефективності використання електричної енергії, завданням досліджень є розробка рішень відносно багаторівневого перетворювача з паралельним з'єднанням автономних інверторів напруги з покращеним гармонійним складом вихідної напруги і зменшенням зрівнювальних струмів.

В роботах [1,2] розглядається паралельне з'єднання автономних інверторів напруги (АІН) за виходом як засіб багаторівневого формування вихідної напруги. Для обмеження зрівнювальних струмів, що обумовлені різницею миттєвих значень напруги інверторів їхні вихідні фази підключаються до виходу через реактори (рис.1,а). Якщо керування ключами у плечах усіх АІН здійснюється однаково, закон змінювання напруги АІН ідентичний і визначає загальну напругу на виході. Різниця миттєвих значень напруги інверторів, що обумовлена неідентичністю їх параметрів, незначна, отже індуктивність реакторів у вихідних колах теж незначна.

Для збільшення кількості рівнів вихідної напруги використовується відомий метод багаторівневої ШІМ із зсувом модулюючої напруги АІН за фазою [3,4]. Однак тут

з'являється певне протиріччя. Оскільки напруга АІН має імпульсний характер, зсув імпульсів за фазою призводить до збільшення зрівнювальних струмів і зростання втрат енергії у силових колах перетворювача. Отже виникає питання обмеження зрівнювальних струмів.

Можливо два варіанти побудови вхідних кіл АІН: з живленням від загального джерела постійного струму (ДПС) або з живленням від окремих ДПС. В [3] без достатнього обґрунтування пропонується паралельне з'єднання АІН із використанням спільного джерела постійного струму. Проте, це не завжди доречно і можливо при наявності декількох ДПС, які недоцільно з'єднувати. Недостатньо пророблені також питання щодо визначення амплітуди зрівнювального струму, індуктивності реакторів і частоти модуляції, обґрунтування кількості АІН залежно від їхньої схеми. Все це обумовлює необхідність подальших досліджень, що дозволить вирішити актуальне науково-технічне завдання покращення показників багаторівневих перетворювачів в енергетиці і електроприводі.

Результати дослідження. Почнемо розгляд з більш простого для аналізу варіанту схеми зі спільним ДПС за використанням дворівневих АІН. Відповідна структура силових кіл перетворювача з трьома АІН подана на рис.1,а. Спрощена схема однієї фази перетворювача при з'єднанні трьох дворівневих АІН подана на рис.1,б, на рис.1, в, г схеми заміщення. При цьому ЕРС, що визначаються напругою плеч АІН1÷АІН3 (u_i), з'єднані паралельно. Для дворівневих АІН напруга визначається відносно негативного виводу джерела, для трирівневих інверторів відносно середнього виводу джерела. Таким чином, напруга u_{AN} згідно за методом двох вузлів (опори кіл АІН однакові).

$$u_{AN} = \frac{\sum_{i=1}^m u_i}{m}, \quad (1)$$

де m – кількість АІН.

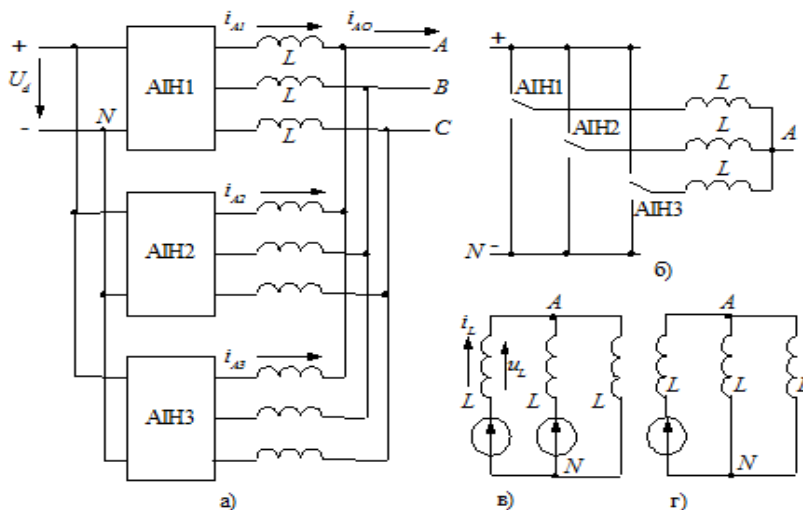


Рис.1 Паралельне вмикання інверторів напруги зі спільним ДПС: а) структурна схема; б) спрощена схема для однієї фази; в), г) схеми заміщення на інтервалі модуляції

Оскільки загальна вихідна напруга визначається сумою напруги всіх АІН для покращення гармонійного складу вихідної напруги (збільшення кількості рівнів вихідної напруги) можна використати той же метод, що і для каскадних перетворювачів з послідовним з'єднанням АІН. При цьому напруга АІН формується методом ШІМ із зсувом

моделюючої напруги за фазою на кут $\frac{2\pi}{m}$. Завдяки зсуву за фазою модуляційні складові напруги АІН $u_{\phi АІН}$ (із частотами $(m_f \pm j)$, $(2m_f \pm j)$, $(4m_f \pm j)$...), де $m_f = f_M/f$ – коефіцієнт модуляції за частотою, f_M – частота модуляції, f – частота вихідної напруги АІН) утворюють симетричну трифазну систему і у результуючій напрузі відсутні. У спектрі результуючої напруги залишаються лише складові, що утворюють нульову послідовність (кратні трьом – $(3m_f \pm j)$).

Зсув імпульсів напруги АІН за фазою призводить до появи зрівнювальних струмів між інверторами $i_{зр}$, що оминають коло навантаження. У спектрі зрівнювального струму присутні гармоніки, що обумовлені дією гармонік напруги АІН, які відсутні у результуючій напрузі. Їх значення не залежить від опору навантаження. Таким чином, визначення амплітуди цих струмів можна здійснити у режимі холостого ходу, коли навантаження відсутнє. Максимальна амплітуда пульсацій струму при використанні модулюючої напруги трикутної форми симетричної відносно нуля має місце при $\gamma=0,5$.

При з'єднанні двох дворівневих АІН зсув модулюючої напруги АІН1 і АІН2 ($u_{ТР1}$ і $u_{ТР2}$) становить π (рис.2, а). При цьому на інтервалі Δt вихід першого АІН підключено до позитивного виводу джерела, а вихід другого до негативного, відповідно $U_L = U_d / 2 (U_d - \text{напруга джерела})$. Це відповідає часу, коли перша гармоніка напруги плеча АІН (напруга завдання) близька до нуля (рис.2). Тривалість імпульсу напруги АІН (вихід підключено до позитивного виводу джерела) при цьому становить $\Delta t = T_M / 2 = 1 / (2f_M)$ (T_M та f_M – відповідно, період та частота модуляції). Прирошення струму у реакторі з індуктивністю L за час Δt за напругою на ньому U_L становить $\Delta I_{зр} = U_L / (2 \cdot f_M \cdot L)$. Амплітуда пульсацій відносно нуля, відповідно, вдвічі менша

$$I_{зр\text{m}} = U_L / (4 \cdot f_M \cdot L). \quad (2)$$

У разі з'єднання трьох АІН (рис.2,б) за рахунок зсуву імпульсів напруги АІН на $1/3 T_M$ на інтервалі Δt (для АІН1) виникають три стани (тривалість яких $\Delta t/3$), коли:

- виходи першого та другого АІН підключено до позитивного виводу джерела, а вихід третього до негативного (схема заміщення на рис.1,в);
- вихід першого АІН підключено до позитивного виводу джерела, а виходи третього та другого до негативного (схема заміщення на рис.1,г);
- виходи першого та третього АІН підключено до позитивного виводу джерела, а вихід другого до негативного (схема заміщення аналогічна рис.1,в).

Відповідні значення напруги на реакторі першого АІН становлять $U_d/3$, $2U_d/3$, $U_d/3$. Середнє значення напруги на реакторі на інтервалі Δt становить

$$U_L = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u_L dt = \frac{1}{\Delta t} U_d \left(\int_0^{\Delta t/3} \frac{1}{3} dt + \int_{\Delta t/3}^{2\Delta t/3} \frac{2}{3} u_L dt + \int_{2\Delta t/3}^{\Delta t} \frac{1}{3} u_L dt \right) = (4U_d) / 9. \quad (3)$$

У разі з'єднання чотирьох АІН модулюючі напруги пар АІН $u_{ТР1}$, $u_{ТР3}$ і $u_{ТР2}$, $u_{ТР4}$ взаємно інверсні і на інтервалі Δt маємо два стани:

- виходи першого та четвертого АІН підключено до позитивного виводу джерела, а виходи другого та третього до негативного;

- виходи першого та другого АІН підключено до позитивного виводу джерела, а вихід третього та четвертого до негативного.

Відповідні значення напруги на реакторі АІН1 в обох станах становлять $U_d/2$.

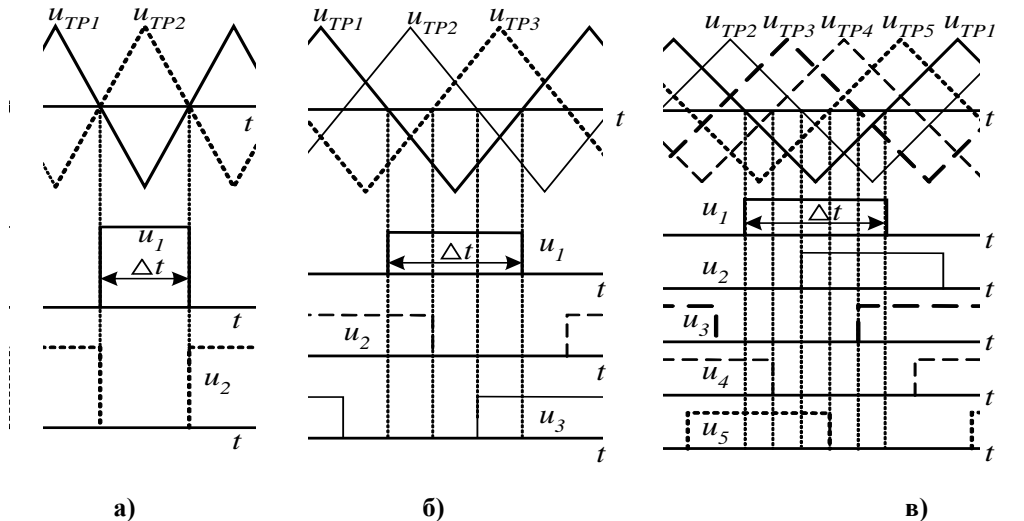


Рис.2. Визначення інтервалів роботи схеми: а) $m=2$; б) $m=3$; в) $m=5$

У разі з'єднання n ятьох АІН (рис.2,в) на інтервалі Δt маємо n станів. Відповідні значення напруги на реакторі першого АІН становлять $2U_d/5, 3U_d/5, 2U_d/5, 3U_d/5, 2U_d/5$. Середнє значення напруги на реакторі на інтервалі Δt становить $12U_d/25$.

Отже, при парній кількості АІН середнє значення напруги на реакторі становить $U_d/2$, при непарній кількості АІН її значення дещо зменшується. Більш менш суттєве зменшення маємо при $m = 7$, коли середнє значення напруги на реакторі на інтервалі Δt становить $18/49U_d$ або $0,367U_d$.

Таким чином, амплітуда пульсацій зрівнювального струму головним чином визначається частотою модуляції та індуктивністю реактора. Значення L обмежено падінням напруги ΔU для першої гармоніки струму АІН, що не перевищує $c = \Delta U / U_{\Phi(1)}$ ($U_{\Phi(1)} = KU_d$ – перша гармоніка вихідної фазної напруги, K – коефіцієнт перетворення АІН за напругою) для максимального значення струму I_{MAX} . Отже,

$$L = \frac{c \cdot K \cdot U_d}{\omega \cdot I_{MAX}}, \quad (4)$$

де ω – кутова частота першої гармоніки вихідної напруги АІН.

Значення частоти модуляції можна визначити за умови обмеження амплітуди пульсацій зрівнювального струму відносно амплітуди вихідного струму АІН ($I_{MAXm} = \sqrt{2}I_{MAX}$) $I_{3P}^* = I_{3Pm} / I_{MAXm}$. За $m = 3$ згідно (2), (3), (4) отримуємо

$$f_M = \frac{\omega}{9 \cdot c \cdot K \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3P}^*}. \quad (5)$$

Для дворівневого АІН з попередньою модуляцією третьою гармонікою або за векторної ШІМ $U_{L(1)} = 0,707U_d$, стосовно фазної напруги $K = 0,707 / \sqrt{3} = 0,408$.

Для $m = 2$ значення дещо вище і становить $f_M = \frac{\omega}{8 \cdot c \cdot K \cdot \sqrt{2} \cdot I_{3P}^*}$.

При з'єднанні трирівневих АІН для інтервалу Δt , що відповідає максимальній амплітуді пульсацій (при використанні модулюючої напруги трикутної форми, яка зміщена відносно нуля, значенню $\gamma = 0,5$ відповідає 1/2 амплітуди завдання) отримуємо такі самі стани схеми і значення напруги на реакторі. Проте значення K вдвічі більше, і при тій же вихідній напрузі значення f_M вдвічі менше. За тієї самої частоти модуляції можна зменшити амплітуду пульсацій струму або індуктивність реактора.

Живлення АІН від окремих ізольованих джерел постійного струму. Напруга, що формується фазами АІН утворює симетричну трифазну систему і може розглядатися відносно певної нейтральної точки (при симетричному навантаженні співпадає з його нейтраллю), тобто напруга фази навантаження визначається як сума фазної напруги окремих

АІН $u_{\Phi H} = \frac{\sum_{i=1}^m u_{\Phi i}}{m}$. При цьому в ній присутні основна гармоніка та модуляційні складові, кратність частоти яких $(3m_f \pm j)$. Інші модуляційні складові з частотами $(m_f \pm j)$, $(2m_f \pm j)$, $(4m_f \pm j)$, ... виділяються на реакторі. Таким чином, струм вихідного реактора $i_L = \frac{u_{\Phi i} - u_{\Phi H}}{X_L}$ поряд із

основною (першою) гармонікою містить відповідні модуляційні складові, що визначають зрівнювальний струм. Він не залежить від навантаження і визначається спектром напруги АІН. Амплітуда гармонік визначається коефіцієнтом модуляції за амплітудою μ . Так, згідно з рис.3,а, де приведено напругу фази дворівневого АІН і її спектр за $f_M=2000$ Гц, амплітуда 38-ї (m_f-2) гармоніки напруги становить $g = 32\%$ відносно основної гармоніки. Із зменшенням μ її амплітуда дещо збільшується, так за $\mu=0,5$ амплітуда 38-ї гармоніки становить 19%. Для іншого значення частоти модуляції картина аналогічна – змінюється порядок гармонік.

Відповідне значення амплітуди гармоніки зрівнювального струму становить

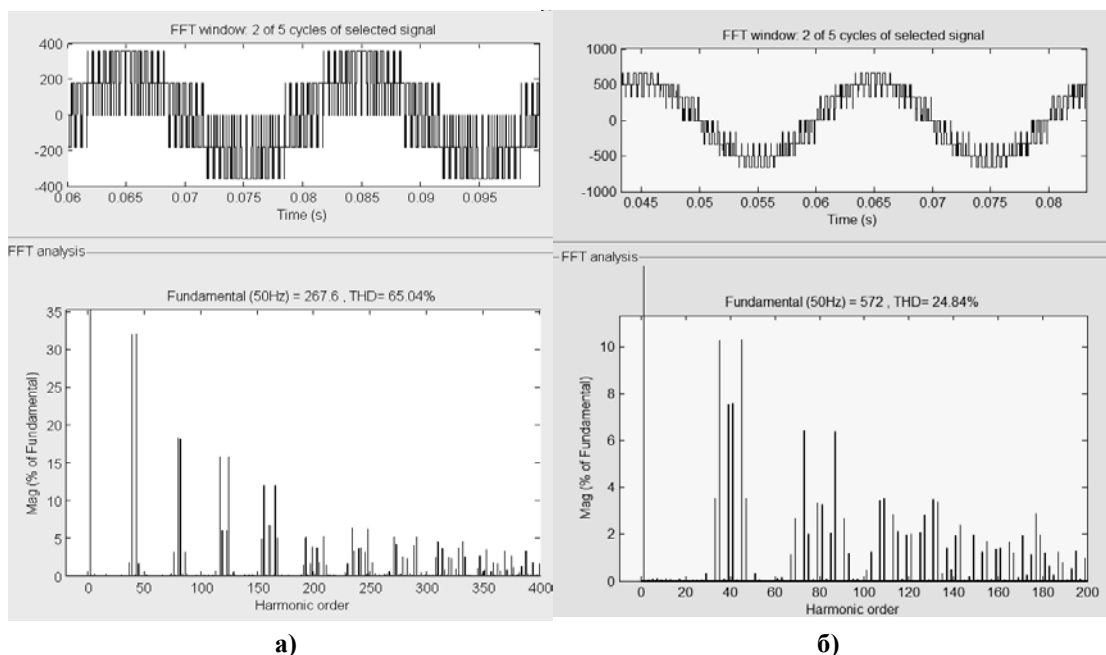


Рис.3. Спектри напруги: а) фази дворівневого АІН; б) фази трирівневого АІН

$$I_{m(k)} = \frac{g \cdot U_{m(1)}}{k \cdot \omega \cdot L}, \quad (6)$$

де k – порядок гармоніки.

Якщо визначити L згідно з (4), відносно до амплітуди струму основної гармоніки струму АІН (I_{mMAX}) $I_{m(k)}^* = \frac{g}{k \cdot c}$. Оскільки амплітуда 42-ї гармоніки напруги приблизно така ж (79-ю та 81-ю гармоніками, напруга яких 18 % за вдвічі більшою частотою – нехтуємо), можна прийняти значення відносної амплітуди зрівнювального струму

$$I_{зр}^* = 2 \frac{g}{k \cdot c}. \quad (7)$$

За тих же значень c і $I_{зр}^*$ порівняно із використанням спільного джерела потрібна частота модуляції майже в двічі менша.

Ще кращі показники мають місце у разі використання трирівневих АІН з окремими джерелами постійного струму. Спектр напруги фази трирівневого АІН за $f_M=2000$ Гц подано на рис.3.б. При цьому амплітуда 35-ї (45-ї) гармоніки становить 10,5 %, амплітуда 39-ї (49-ї) гармоніки становить 7,5 %, амплітуда 33-ї (47-ї) гармоніки становить 3,5 %. У першому наближенні (нехтуємо фазами гармонік) маємо значення $g = 0,215$ (результуюча амплітуда 35-ї, 39-ї, 33-ї гармонік) проти значення $g = 0,32$ для дворівневого АІН, що в 1,5 рази менше.

Оскільки для трирівневого АІН коефіцієнт перетворювання за напругою (K) в два рази більше, значення відносної амплітуди зрівнювального струму згідно з (7) зменшується в три рази.

Варто зазначити, що ефективне придушення зрівнювальних струмів досягається при достатньо високих частотах модуляції, коли доцільним є використання силових IGBT модулів за трирівневою топологією [5].

Моделювання здійснювалося в програмному пакеті Matlab. При цьому використовувались стандартні силові блоки АІН і модифіковані стосовно забезпечення зсуву за фазою модулюючої напруги генератори ШІМ.

На рис.4 подана осцилограма напруги фази АІН $u_{\phi АІН}$, фази навантаження $u_{\phi Н}$ і зрівняльного струму $i_{зр}$ при з'єднанні трьох дворівневих АІН із спільним ДПС за синусоїдальної ШІМ з коефіцієнтом модуляції за амплітудою $\mu=1$ і частотою модуляції $f_M = 2$ кГц (кратність до основної гармоніки 50 Гц $m_f = f_M/f = 40$). При цьому для $u_{\phi Н}$ THD=30 % (кількість рівнів 13), для окремого АІН $u_{\phi АІН}$ THD=65 % (кількість рівнів 5). Характер змінювання $i_{зр}$ повністю підтверджує вихідні положення при аналізі – максимальне значення $i_{зр}$ має місце коли фазна напруга переминає нульове значення ($\gamma=0,5$) і зменшується до нуля при максимальному значенні напруги ($\gamma=1$). Значення амплітуди зрівняльного струму співпадає з розрахунком.

При з'єднанні трьох трирівневих АІН (ТАІН) із спільним ДПС за синусоїдальної ШІМ з $\mu=1$ і частотою модуляції 2 кГц для $u_{\phi Н}$ THD=11,5 % (кількість рівнів 25), для $u_{\phi АІН}$ THD=24,8 % (кількість рівнів 9).

На рис.5 подана осцилограма напруги і струму фази навантаження $u_{\phi Н}$ і i_{ϕ} , струму фази ТАІН $i_{\phi АІН}$ і струму $i_{зр}$ при з'єднанні трьох трирівневих АІН із окремими ДПС при

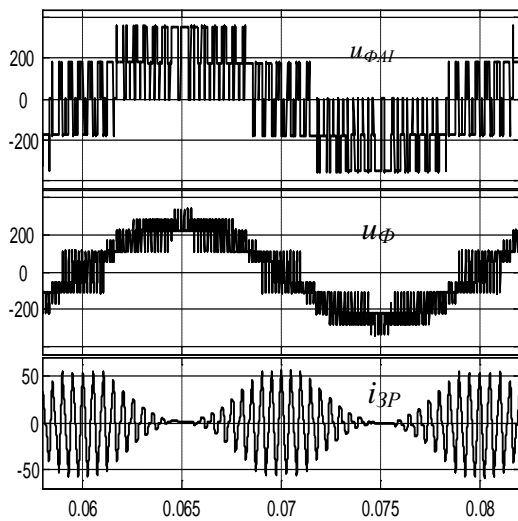


Рис.4 Осцилограми напруги окремого дворівневого АІН, результуючої напруги та зрівнювального струму у вихідній фазі АІН при спільному ДПС і $m=3$

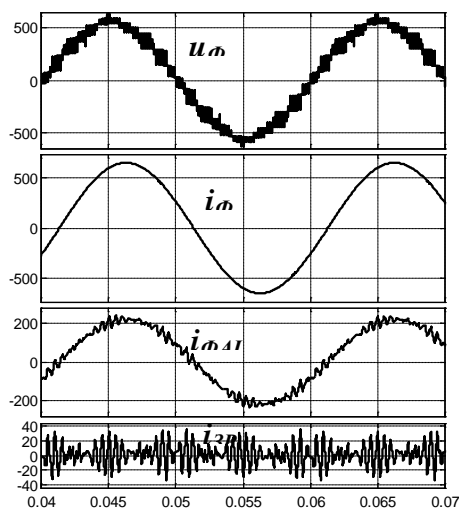


Рис.5. Осцилограми напруги і струму фази навантаження $u_{\phi N}$ і i_{ϕ} , струму фази ТАІН $i_{\phi A1N}$ і зрівняльного струму i_{3P} при окремих ДПС і $m=3$

синусоїдальній ШІМ з коефіцієнтом модуляції за амплітудою $\mu=1$ і частотою модуляції $f_M = 2$ кГц (кратність до основної гармоніки 50 Гц – $m_f = f_M/f = 40$).

При цьому для $u_{\phi N}$ THD=11.5 % (як і у схемі зі спільним ДПС). Характер i_{3P} змінився із зменшенням амплітуди у 1,6 разів відносно схеми із спільним ДПС. Його відносне значення становить 16 % при індуктивності 0,5 мГн, що відповідає $c=0,06$.

Висновки. В роботі виконано аналіз і порівняння схем зі спільним джерелом постійного струму і окремими джерелами, запропонований метод визначення амплітуди зрівнювальних струмів, здійснений "віртуальний" експеримент для перевірки запропонованих рішень. Виконані дослідження показують:

- що при паралельному з'єднанні АІН і однаковому гармонійному складі вихідної напруги кращі показники досягаються, якщо АІН отримують живлення від окремих ізолюваних джерел постійного струму. Це має місце, наприклад, при використанні багатофазних схем випрямлення, що забезпечує відповідний стандартам гармонійний склад струму, який споживається з мережі живлення змінного струму;
- що більш ефективним є використання трирівневих АІН, як для покращення якості вихідної напруги, так і для зменшення індуктивності реакторів.

Список використаних джерел

1. Брованов С.В. Улучшение энергетической эффективности систем генерирования электрической энергии на базе многоуровневых полупроводниковых преобразователей / С.В. Брованов, С.С. Турнаев, М.А. Дыбко // Научный вестник НГТУ. – 2011. – №2(43). – С. 125-134.
2. Дыбко М.А. Анализ электромагнитных процессов в модульном полупроводниковом преобразователе для статического компенсатора неактивной мощности // Доклады академии наук высшей школы РФ. – 2013. – №2. – С. 98-109.

3. Дыбко М.А. Многоуровневые полупроводниковые преобразователи с параллельным включением для активных фильтров и систем накопления энергии: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.А. Дыбко. – Томск, ТГУСУР, 2013. – 20с.

4. Шавьолкін О.О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посіб. / О. О. Шавьолкін. – Х. :ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403 с.

5. Плущке Н. Специализированные модули для трехуровневых инверторов/ Н. Плущке, Т. Грашкоф, А. Колпаков // ООО«Медиа КиТ», Силовая электроника. – 2010. – №2(25). – С. 44-47.

References

1. Brovanov S.V. Uluchshenie energeticheskoy effektivnosti sistem generirovaniya elektricheskoy energii na baze mnogourovnevnykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley / S.V. Brovanov, S.S. Turnaev, M.A. Dyibko // Nauchnyiy vestnik NGTU. – 2011. – #2(43). – S. 125-134.

2. Dyibko M.A. Analiz elektromagnitnykh protsessov v modulnom poluprovodnikovom preobrazovatele dlya staticheskogo kompensatora neaktivnoy moschnosti // Doklady akademii nauk vysshey shkoly RF. – 2013. – #2. – S. 98-109.

3. Dyibko M.A. Mnogourovnevyie poluprovodnikovyye preobrazovateli s parallelnym vklucheniem dlya aktivnykh filtrov i sistem nakopleniya energii: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tehnikeskikh nauk / M.A. Dyibko. – Tomsk, TGUSUR, 2013. – 20s.

4. Shavolkin O.O. Silovi napivprovidnikovii peretvoryuvachi energiYi : navch. posib. / O. O. Shavolkin. – H. :HNUMG im. O.M. Beketova, 2015. – 403 s.

5. Plushke N. Spetsializirovannyye moduli dlya trehurovnevnykh invertorov/ N. Plushke, T. Grashkof, A. Kolpakov // ООО«Media КиТ», Silovaya elektronika. – 2010. –#2(25). – S. 44-47.

Рекомендовано до публікації д.т.н., проф.Каплуном В.В.

МНОГОУРОВНЕВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ШАВЁЛКИН А.А., РОСИНСКАЯ Г.П.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Совершенствование многоуровневых преобразователей с параллельным соединением автономных инверторов напряжения путем улучшения гармонического состава выходного напряжения и уменьшения уравнивающих токов.

Методика. Использован известный метод гармонического анализа и компьютерное моделирование с применением программного пакета Matlab.

Результаты. Определены средние значения напряжения на выходном реакторе инвертора на интервале модуляции для различного количества параллельно соединенных инверторов. Получены аналитические выражения для определения индуктивности выходного реактора. Разработаны математические модели преобразователей с параллельным соединением по выходу двухуровневых и трехуровневых NPC инверторов. Показано, что увеличение количества инверторов, соединенных параллельно, не дает существенного уменьшения уравнивающих токов в их выходных цепях.

Научная новизна. Предложен метод определения амплитуды уравнительного тока при параллельном соединении инверторов по выходу.

Практическая значимость. Полученные аналитические выражения являются основой для инженерной методики определения параметров схемы многоуровневого преобразователя с параллельным соединением автономных инверторов напряжения. Разработанные модели могут быть использованы при проектировании схем преобразователей и в учебном процессе в курсе энергетической электроники.

Ключевые слова: *многоуровневый преобразователь, автономный инвертор напряжения, двухуровневый инвертор, трехуровневый NPC инвертор, коэффициент гармоник, уравнительный ток.*

MULTI-LEVEL CONVERTERS WITH PARALLEL CONNECTION OF VOLTAGE SOURCE INVERTERS

SHAVELKIN A.A., ROSINSKA H.P.

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Improvement of multilevel converters with parallel connection of voltage source inverters by improvement of harmonious structure of output voltage and decreasing circulating currents.

Methodology. Use known methods of harmonic analysis and computer simulation using the software package Matlab.

Findings. The mean values of the voltage on the output reactor of the inverter on a modulation interval for various numbers in parallel of the connected inverters are defined. The analytical expressions for determining the inductance of the output reactor are received. The mathematical models of converters with parallel connection of the outputs of the two-level and three-level NPC inverter are developed. It is shown that the increasing the number of the inverters connected in parallel doesn't give essential reduction circulating currents in their output circuits.

Originality. The method of determination of amplitude of circulating current at parallel connection of inverters on an output is offered.

Practical value. The received analytical expressions are a basis for an engineering technique of determination of parameters of the scheme of the multilevel converter with parallel connection of voltage source inverters. The developed models can be used at design of schemes of converters and in educational process it is aware of power electronics.

Keywords: *multilevel converter, voltage source inverter, two-level inverter, three-level NPC inverter, THD, a circulating current.*