

УДК 621.341.572

ДО ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІНВЕРТОРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПІДВИЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПОТУЖНОСТІ

САВЕНКО О.С.

канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації систем електропостачання та електроприводу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна, e-mail: savenko.olja@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8108-2575;

Мета роботи. Розробка зварювального інвертора з корекцією коефіцієнта потужності, з невеликою собівартістю і низькими втратами енергії.

Методи дослідження. Запропоновано використати принцип прямого перетворення і розробити "гібридну" схему, що містить основний канал з безпосереднім перетворенням і допоміжний, який має перетворювач з проміжною ланкою постійного струму з невеликим запасом енергії. Оскільки навантаженням для зварювального джерела живлення є зварювальна дуга, миттєві коливання її потужності протягом періоду напруги мережі практично не впливають на процес зварювання через термічну постійну розплавленого металу зварювальної ванни. Ефективне використання особливостей навантаження джерел – зварювальної дуги – дозволяє оптимізувати силову частину, знизити запас енергії в реактивних елементах схеми і поліпшити економічні і масогабаритні параметри джерел.

Отримані результати. Проведений аналіз підходів до побудови інверторних зварювальних джерел з підвищеним коефіцієнтом потужності. Запропоновано нову топологію прямоходового інверторного зварювального джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності. На відміну від "класичних" схем з подвійним перетворенням енергії в розробленій схемі передбачена можливість живлення навантаження як безпосередньо від мережі, так і від накопичувача енергії, що є в джерелі. Наведений алгоритм розрахунку частоти перемикання силових ключів джерела, обчислення виконується в реальному часі за умови стабілізації амплітуди поточкозчеплення первинної обмотки трансформатора. Розглянута можливість використання інверторних джерел, виконаних за представленою топологією і працюючих з описаним алгоритмом керування, у трифазній мережі живлення. Для підтвердження адекватності розроблених положень створений експериментальний зразок джерела живлення. Отримані осцилограми напруги мережі та споживаного струму джерела при потужності в навантаженні близько 1 кВт та осцилограми в режимі обмеження вихідного струму. Проведені експерименти показали, що джерело має коефіцієнт потужності більше 0,94 у широкому діапазоні потужностей.

Наукова новизна. Розроблене джерело не містить додаткових силових компонентів індуктивного типу, має знижену ємність накопичувального конденсатора у ланці постійного струму та спрощену схему обмеження зарядного струму конденсатора. Напруга холостого ходу джерела має підвищене значення, що не залежить від напруги мережі, це дозволяє забезпечити легкий підпал дуги при ручному дуговому зварюванні.

Практична цінність. За рахунок підвищеного коефіцієнта потужності середньоквадратичний струм, що споживається від мережі, на 30 – 45 % нижче, ніж у "класичних" інверторних джерелах без коректора коефіцієнта потужності. Це дозволяє забезпечити роботу більшої кількості таких джерел при тому ж струмовому навантаженні мережі та/або забезпечити стабільну роботу в умовах "слабкої" мережі.

Ключові слова: коефіцієнт потужності; зварювання; зварювальний інвертор; джерело живлення; підпал дуги; стабілізація горіння дуги; напруга холостого ходу.

І. ВСТУП

На сьогоднішній день тенденція розвитку зварювальних джерел живлення полягає, в основному, у збільшенні ступеня взаємодії між зварювальною електричною дугою, розплавленим електродним металом та зварювальною ванною, сукупність яких є об'єктом управління, та джерелом живлення. Ця тенденція спрямована на підвищення якості формування зварного з'єднання. При цьому до джерел живлення для ручного дугового зварювання пред'являються додаткові вимоги, пов'язані з необхідністю забезпечення легкого збудження дуги та стабільності її горіння.

Ще однією важливою вимогою є усунення можливого "залипання" електрода на виріб під час запа-

лювання дуги. В даний час також розвиваються способи керування перенесенням електродного металу за рахунок джерела живлення (наприклад, технології STT, STT2, реалізовані у професійних інверторах зварювальних фірми LincolnElectric).

При цьому практично не торкаються питання впливу зварювальних джерел живлення на електричну мережу, якості електроенергії на якість зварювання (характерної для джерел бюджетної цінової категорії), у т. ч. через їх джерела взаємного впливу. У зв'язку з цим в умовах запровадження стандартів електромагнітної сумісності (ЕМС) технічних засобів, стабільного підвищення цін на енергоносії, актуальним стає завдання забезпечення ЕМС зварювального обладнання з мережею, підвищення його енергоефективно-

сті та техніко-економічних показників.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Одним із шляхів підвищення енергоефективності та покращення масогабаритних показників зварювальних джерел та систем індукційного нагріву є використання принципу перетворення енергії на високій частоті [1]-[4]. Такі (тобто інверторні) джерела характеризуються зниженою масою та габаритами (до 70 %, згідно [5]-[6]), мають менші втрати електроенергії, підвищену швидкість та широкий діапазон регулювання вихідних параметрів. З іншого боку, інверторні джерела характеризуються зниженим коефіцієнтом потужності та є джерелами перешкод на частотах вищих гармонік [7]-[9]. Відповідно до наведених у роботі [10]-[14] даних, електрозварювальне обладнання становить близько 65% потенційних джерел електромагнітних перешкод [5]. За даними [15], під час роботи зварювальних інверторів можлива поява в мережі резонансів на частотах вищих гармонік, при цьому амплітуда перенапруг може досягати 800 В. Таким чином, зварювальні джерела некоректно відносити до енергозберігаючого обладнання [7], [15].

Значні спотворення форми кривої споживаного струму у більшості поширених джерел пояснюються будовою перетворювача змінної мережі напруги в постійну. Найчастіше цей перетворювач є діодний міст зі згладжуючим конденсатором великої ємності (кілька тисяч мікрофарад) на виході.

Таким чином, переважна більшість наявних на ринку зварювальних інверторів не мають корекції коефіцієнта потужності і не задовольняють вимог стандартів EMC технічних засобів (ДСТУ ІЕС 60974-10:2007, ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004, ДСТУ EN 61:2014) у всьому можливому діапазоні режимів роботи.

Безумовно, випускаються зварювальні інвертори професійного класу, що мають у своєму складі активний коректор коефіцієнта потужності (ККП), що задовольняють сучасним стандартам електромагнітної сумісності та мають у своєму складі апаратні засоби підпалу та стабілізації дуги. Але їх поширення стримується високою вартістю, що у кілька разів перевищує вартість широко поширених джерел без ККП [7].

III. МЕТА РОБОТИ

Розробка інверторних джерел з підвищеним коефіцієнтом потужності, що наближаються за характеристиками до професійних, але мають значно меншу собівартість.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розроблено схемне рішення однофазного зварювального інверторного джерела із прямим перетворенням [7, 16]. На відміну від "класичних" схем з подвійним перетворенням енергії у розробленій схемі передбачена можливість живлення навантаження (дуги) як безпосередньо від мережі, так і від наявного джерела накопичувача енергії. Накопичувач має невеликий запас енергії і призначений тільки для стабілізації горіння дуги, а також для полегшення процесу її початкового підпалу.

Структурна схема розробленого джерела наведена на рисунку 1. Інвертор може працювати як від шин накопичувача енергії, так і від шини випрямленої, але не згладженої напруги мережі. Саме ця особливість дозволяє керувати формою струму, що споживається з мережі, за рахунок швидкодіючого управління потужністю інвертора.

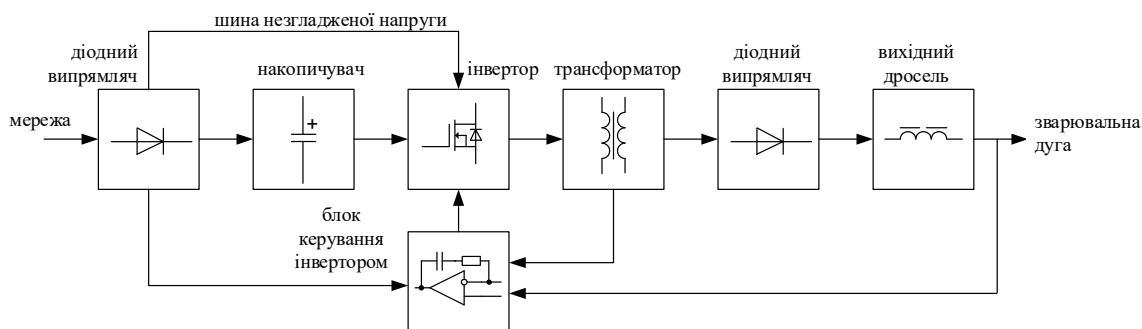


Рисунок 1. Структурна схема розробленого зварювального інверторного джерела

При зазначеній побудові джерела потужність його навантаження змінюватиметься з подвоєною частотою мережі. Більше того, двічі протягом періоду мережі вихідна потужність джерела наближається до нуля, що призводить до згасання дуги та деіонізації дугового проміжку. Для виключення такого розвитку подій і служить накопичувач енергії у джерелі: при переході напруги мережі через нуль підтримка горін-

ня дуги здійснюється за рахунок переведення інвертора на живлення від накопичувача та зниження його потужності до рівня "чергової" дуги. Невелика потужність "чергової" дуги дозволяє значно знизити запас енергії в накопичувачі, покращивши тим самим техніко-економічні параметри джерела. Пульсації вихідної потужності з подвоєною частотою мережі не становлять проблему для якості зварного шва, оскільки зварювальна ванна має теплову інерційність і виступає в

ролі згладжуючого фільтру нижніх частот.

Принципову електричну схему силової частини джерела наведено на рисунку 2. Джерело складається з вхідного випрямляча на діодному мосту BR1, ємнісного накопичувача C3, модифікованого прямоходового перетворювача на елементах VT1 – VT3, VD1, VD3, VD4, навантаженого на високочастотний силовий трансформатор T1, до вторинної обмотки якого

підключений вихідний дросель L1. Коло VD2, NTC1 служить обмеження зарядного струму C3 при включенні джерела в мережу. Для пропонованої топології джерела ємність C3 відносно невелика (сотні мкФ), що дозволило виконати схему початкового заряду на термісторі. Проникнення високочастотних перешкод у мережу під час роботи джерела знижують блокувальні конденсатори C1 і C2.

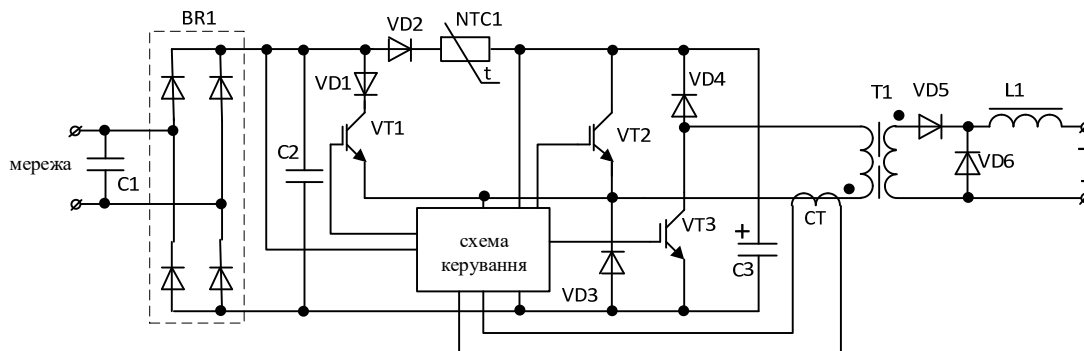


Рисунок 2. Принципова електрична схема силової частини розробленого джерела

Модифікований прямоходовий перетворювач побудований таким чином, що на первинну обмотку T1 можна подати як незгладжену напругу мережі (за рахунок включення VT1 і VT3), так і напругу з ємнісного накопичувача C3 (при відкритті VT2 і VT3). При цьому на зворотному ході силового трансформатора (розмагнічуванні) скидання енергії магнітного поля йде в конденсатор C3 (струм при цьому протікає через діоди VD3 і VD4). У вторинному колі процеси протікають так само, як і в "класичному" прямоходовому перетворювачі. При відкритті пари VT1-VT2 або пари VT2-VT3 (прямий хід) діод VD5 у вторинному колі відкривається і йде процес передачі енергії в навантаження з "накачуванням" вихідного згладжуючого дроселя L1. Струм первинної обмотки T1 при цьому дорівнює приведену вихідному струму (тобто струму навантаження).

На зворотному ході полярність напруги на вторинній обмотці T1 змінюється на протилежну, відкривається діод VD6 і навантаження живлення здійснюється за рахунок енергії, запасеної в L1.

За рахунок можливості живлення навантаження безпосередньо від мережі (незгладженою напругою) з'являється можливість управління формою струму, що споживається від мережі. Це використано для зниження рівня вищих гармонік у споживаному струмі розробленого джерела та підвищення його коефіцієнта потужності.

Оскільки навантаження джерела (зварювальна дуга) відрізняється нестабільністю параметрів, управління локальним середнім (тобто середнім за період перемикання ключів) струмом, що споживається, виконано шляхом обчислення заряду, що пройшов через первинну обмотку силового трансформатора на пря-

мому ходу. Сигнал, пропорційний цьому заряду, формується шляхом інтегрування вторинного струму трансформатора CT (рис. 2), включеного в коло первинної обмотки силового трансформатора T1 джерела, що розглядається. Така побудова системи керування дозволяє практично повністю виключити вплив пульсацій вихідного струму джерела на якість формування вхідного струму, що споживається від мережі [7].

Так як енергія магнітного поля T1 на зворотному ході скидається в накопичувач C3, це дозволяє стабілізувати напругу на конденсаторі на рівні, що дещо перевищує амплітуду напруги мережі. Це дає можливість стабілізувати напругу холостого ходу джерела та полегшити підпал дуги навіть за зниженої напруги мережі.

Для експериментального підтвердження викладених положень створено дослідне джерело з вихідним струмом до 160 А. Конденсатори C1 – 6,8 мкФ×630 В, C2 – 0,1 мкФ×400 В, C3 – 330 мкФ×450 В. Діодний міст BR1 типу GBJ5010, діоди VD1, VD3, VD4 – 30ETH06, VD2 – FR307, VD5, VD6 – 150EBU02. Транзистори VT1, VT3 – FGH40N60SFD, VT2 – IRG4PC50W, термістор NTC1 – MF72-3D15. Трансформатор T1 виконаний на осерді ETD59/31/22 з немагнітним зазором 1,4 мм, має коефіцієнт трансформації 28/9, індуктивність первинної обмотки 320 мкГн. Дросель L1 має індуктивність 30 мкГн при струмі 100 А. Живлення ланцюгів управління здійснюється від малопотужного зворотньоходового перетворювача, що живиться від конденсатора C3 та виконаного на мікросхемі TNY255P. Формування сигналів керування затворами IGBT здійснюється однокристальним мікроконтролером STM32F030F4P6, який працює зі спеціалізованими

драйверами FOD3184.

Система управління джерелом забезпечує стабілізацію напруги на конденсаторі C3, формування вхідного (мережевого) струму джерела пропорційно миттєвій напрузі мережі, формування заданої зовнішньої ВАХ джерела і захист силових ключів від аварійних надструмів. Стабілізація напруги на C3 здійснюється за рахунок керування прямим ходом джерела. Енергія, що запасена у полі T1, на зворотному ході завжди скидається в C3, збільшуючи напругу на ньому. Але прямий хід джерела можливий як від C3 (при відкритті VT2, VT3), так і від випрямленої напруги мережі (при відкритті VT1, VT3). У першому випадку C3 розряджається на первинну обмотку T1, у другому – не бере участі у роботі. Регулюючи тривалість прямого ходу від C3, можливе керування запасом енергії в ньому та стабілізація напруги.

Формування вхідного струму джерела та забезпечення його пропорційності напрузі мережі здійснено за рахунок управління зарядом, що пройшов на прямому ході через первинну обмотку T1 при відкритті VT1 та VT3. Величина цього заряду встановлюється пропорційно добутку періоду перемикання ключів, миттєвої вхідної напруги та коефіцієнта, пропорційного вихідній потужності джерела (провідність, що імітується). Як було сказано вище, такий підхід також дозволяє усунути вплив пульсацій струму навантаження на якість керування струмом мережі.

Задана зовнішня ВАХ джерела формується за рахунок керування його вихідною потужністю. При цьому імітована провідність не змінюється протягом періоду мережі, інакше неминучі спотворення форми споживаного струму. Зміна потужності джерела відбувається у моменти переходу напруги через нуль. Більш того, для зниження впливу коливань напруги мережі на вихідну ВАХ джерела, зазначений коефіцієнт (імітована провідність) розраховується з корекцією по дієвій напрузі мережі, що була виміряна.

Для максимального використання магнітопроводу силового трансформатора частота перемикання силових ключів джерела не фіксована і обчислюється в реальному часі за умови стабілізації амплітуди потоку зчеплення первинної обмотки трансформатора. Змінна частота дозволяє знизити динамічні втрати потужності в силових ключах, збільшити максимальну потужність джерела через послаблення впливу індуктивності розсіювання силового трансформатора, а також знизити спектральну щільність електромагнітних перешкод, що генеруються, завдяки розподілу їх енергії по більшому діапазону частот. В експериментальному джерелі частота перемикання силових ключів змінюється у діапазоні 15 – 63 кГц.

У керуючій програмі мікроконтролера реалізовано наступний алгоритм (наведені нижче обчислення виконуються для кожного періоду перемикання):

– вимірюються напруги на конденсаторах C1 (u_{C1}) та C3 (u_{C3});

– обчислюється максимальний час намагнічування відповідно до виразу:

$$t_M = \frac{\Psi_M}{u_{C3}},$$

де Ψ_M – максимальне потокозчеплення первинної обмотки, Вб (у дослідному джерелі воно становить $3,1 \cdot 10^{-3}$ Вб);

– обчислюється тривалість прямого ходу від конденсатора C3:

$$t_1 = t_M \frac{u_{C3} - u_{C3min}}{u_{C3max} - u_{C3min}},$$

де u_{C3max} та u_{C3min} – встановлені максимальна та мінімальна напруга на конденсаторі C3 (у джерелі $u_{C3max} = 380$ В, $u_{C3min} = 320$ В). Розраховане значення t_1 обмежується діапазоном $[0; t_M]$. Це дозволяє підтримувати напругу на конденсаторі C3 під час роботи джерела в діапазоні 320 - 380 за допомогою управління "скиданням" енергії з C3 шляхом синхронного відкриття ключів VT2 і VT3;

– обчислюється максимальна тривалість t_2 прямого ходу від конденсатора C1:

$$t_2 = \frac{\Psi_M - u_{C3} \cdot t_1}{u_{C1}} + t_1,$$

результат обмежується діапазоном $[0; t_{2max}]$, де t_{2max} – встановлений максимальний час прямого ходу (у джерелі $t_{2max} = 67$ мкс);

– обчислюється тривалість періоду перемикання:

$$T = t_2 + t_M;$$

– обчислюється опорний заряд:

$$q^* = u_{C1} \cdot G \cdot T,$$

де G – імітована провідність, См. Її зміною здійснюється керування вихідною потужністю джерела.

Після виконання зазначених обчислень програмуються регістри апаратного таймера мікроконтролера і починається робочий цикл.

Спочатку на час t_1 включаються ключі VT2, VT3. Потім VT2 закривається, відкривається VT1 і дозволяється робота інтегратора первинного струму силового трансформатора. Закриття ключів (початок зворотного ходу) відбувається або після часу t_2 (характерно при малому навантаженні або режимі холостого ходу), або по досягненню інтегралом первинного струму значення опорного заряду q^* (характерно при роботі під навантаженням). Саме наявність зворотного зв'язку по інтегралу струму первинної обмотки T1 за час відкритого стану ключів VT1, VT3 забезпечує пропорційність споживаного від мережі струму миттєвій напрузі. Інтегрування проводиться в аналоговому вигляді, шляхом підключення попереднього розрядженого конденсатора до вторинної обмотки трансформатора струму, первинна обмотка якого включена послідовно з первинною обмоткою силового трансформатора T1. Сигнал закінчення прямого

ходу формується компаратором, що порівнює напругу на зазначеному конденсаторі з напругою уставки, що пропорційна опорному заряду q^* . При цьому максимальна тривалість прямого ходу розраховується в реальному часі за умови недопущення насичення Т1.

Діаграма напруги на первинній обмотці трансформатора під час роботи джерела має вигляд, що наведений на рис. 3.

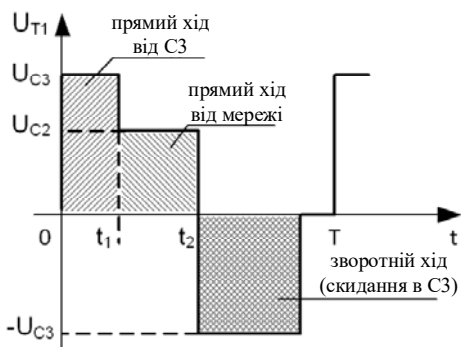


Рисунок 3. Діаграма напруги на первинній обмотці трансформатора під час роботи джерела

У схемі також передбачено швидкодіючий аварійний захист силових ключів з фіксованою уставкою по струму. Вона забезпечує обмеження струму при малій вихідній напрузі, в т.ч. при короткому замиканні виходу джерела.

Статична вихідна ВАХ описаного джерела в робочій частині є гіперболічною (з постійною потужністю). Це призводить до стабілізації теплової потужності дуги, природним образом реалізується форсаж дуги (підвищення струму при зниженні напруги, функція "ArcForce"). Напруга підпалу дуги виготовленого джерела становить 110 - 120 В і не залежить від напруги мережі живлення.

Випробування джерела показали, що він має коефіцієнт потужності понад 0,94 у широкому діапазоні потужностей. Завдяки цьому середньоквадратичний струм, що споживається від мережі, на 30 – 45 % нижче, ніж у "класичних" інверторних джерел без коректора коефіцієнта потужності. Так, на рис. 4 наведені осцилограми напруги мережі та споживаного струму джерела при потужності в навантаженні близько 1 кВт, а на рис. 5 – осцилограми у режимі обмеження вихідного струму. Навіть у цьому випадку коефіцієнт потужності джерела залишається не нижче 0,9.

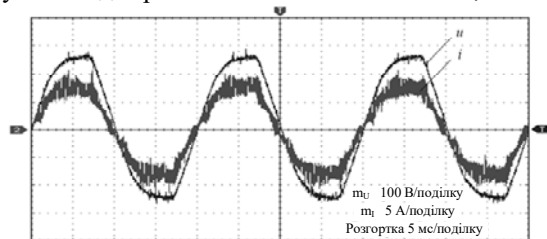


Рисунок 4. Осцилограми напруги мережі та споживаного струму джерела

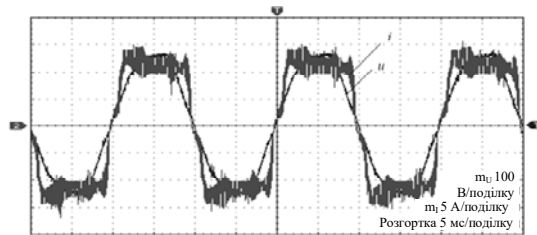


Рисунок 5. Осцилограми напруги мережі та споживаного струму джерела в режимі обмеження вихідного струму

У джерелі реалізовано функцію "антизалипання", тобто зменшення вихідного струму при малій напрузі на виході (тобто при замиканні зварювального електрода на виріб). При цьому вимірювання вихідної напруги здійснено опосередковано, шляхом програмної оцінки тривалості прямого ходу, напруги мережі та напруги на конденсаторі C3. Такий підхід виключає необхідність введення додаткових компонентів у схему джерела. Також можливе програмне зменшення напруги холостого ходу джерела під час простою, що дозволить підвищити безпеку зварювальних робіт.

Зварювальні інверторні джерела, виконані за представленою топологією і працюючі з описаним алгоритмом керування, допускають паралельну роботу. У зв'язку з цим інтерес представляє паралельне з'єднання виходів трьох джерел, підключених до трьох фаз живильної мережі. У цьому випадку пульсації миттєвих вихідних потужностей джерел взаємно компенсуються і загальна потужність системи стає постійною величиною. Більше того, можлива робота системи з трьох джерел, з'єднаних у "зірку" без нульового дроту з автоматичним симетруванням напруги на входах джерел. Це дає можливість роботи з трипровідним підключенням до промислової мережі 0,4 кВ. Крім цього, паралельне з'єднання джерел може використовуватися для підвищення надійності живлення зварювального процесу (звісно, за наявності запасу за потужністю).

V. ВИСНОВКИ

1. Розроблено зварювальне інверторне джерело з підвищеним коефіцієнтом потужності, яке відрізняється: зниженою ємністю конденсатора ланцюга постійного струму та спрощеною схемою обмеження його зарядного струму; підвищеною та стабілізованою напругою холостого ходу; відсутністю додаткових силових індуктивних компонентів, притаманних ККП. Представлене схемне рішення дозволяє створювати зварювальні інверторні джерела, що наближаються за характеристиками до професійних, але мають значно меншу вартість та масогабаритні характеристики.

2. Застосування пропонованого інверторного джерела живлення для зварювання дозволяє зменшити втрати електроенергії в розподільній мережі за рахунок зниження дієвого значення споживаного стру-

му, і підвищити якість напруги мережі за рахунок зниження коефіцієнта гармонік. Завдяки меншому споживаному струму джерел з підвищеним коефіцієнтом потужності можлива одночасна робота більшого їх числа при тій же потужності мережі, що дає можливість підвищити продуктивність зварювальних робіт, особливо в монтажних умовах при значному видаленні зварювального посту від джерела енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Development of converter for high frequency welding machines using active snubber / J.-Y. Shin, J.-M. Lee, S.-W. Choi, J.-Y. Lee // The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics. – 2016. – № 21. – Pp. 351-355. DOI: 10.6113/TKPE.2016.21.4.351.
- [2] Electronic welder with high-frequency resonant inverter / L. Malesani, P. Mattavelli, L. Rossetto [et al.] // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting. – 1993. – Vol. 2. – Pp. 1073-1080.
- [3] Digital Control of High-Frequency Switched-Mode Power Converters / L. Corradini, D. Maksimovič, P. Mattavelli, R. Zane. – Wiley-IEEE Press. – 1st edition, 2015. – 368 p.
- [4] Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect / V.V. Kukhar, A.G. Prisyazhnyi, E.Yu. Balalayeva, O.S. Anishchenko // Modern Electrical and Energy System MEES'2017 (15-17 November 2017; Kremenchuk). – Kremenchuk, 2017. – Pp. 404-407. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248945.
- [5] Galvery W.L. Welding essentials: questions&answers / W.L. Galvery, F.M. Marlow. – Industrial Press, 2006. – 469 p.
- [6] Davies A.C. The Science and Practice of Welding / A.C. Davies. Vol. 1. – Cambridge University Press, 1993. – 350 p. DOI: 10.1017/CBO9780511470974.
- [7] Development of single-phase high-power factor inverter welding sources / V.V. Burlaka, E.V. Lavrova, S.K. Podnebennaya, I.V. Zakharova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, № 1 (88). – Pp. 18-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106957.
- [8] Baggingi A. Handbook of Power Quality / A. Baggingi. – John Wiley & Sons, Ltd., 2008. – 642 p. DOI: 10.1002/9780470754245.
- [9] Towards a better understanding of harmonics and power electronics – new measurement results and analysis methods for modern large-scale inverters / S. Rogalla, F. Ackermann, N. Bihler [et al.] // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15) La Coruña (Spain). – 2015. – No. 13. – Pp. 483-488. DOI: 10.24084/repqj13.368.
- [10] Zhao Y. Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications / Y. Zhao, W. Yan, J. Sun. – Springer Verlag, Singapore, 2022. – 232 p.
- [11] Electromagnetic compatibility of power supplies for arc welding / K. Skrzyniecki, P. Cegielski, A. Kolasa, A. Krajewski // Welding International. – 2011. – Vol. 27. – Pp. 1-6. DOI: 10.1080/09507116.2011.606149.
- [12] Electromagnetic compatibility of resistance welding machines - Part 1: Initial situation and measuring methodology / H. Mecke, R. Doeblin, T. Winkler [et al.]. – 2002 – Vol. 54. – Pp. 152-156.
- [13] Podnebennaya S.K. On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains / S.K. Podnebennaya, V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // The Paton Welding Journal. – 2016. – № 12. – Pp. 50-54. DOI: 10.15407/tpwj2016.12.09
- [14] Safronov P.S. Improvement of electromagnetic compatibility of power sources for resistance welding systems / P.S. Safronov, Yu.V. Bondarenko, O.F. Bondarenko // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – Vol. 5. – Pp. 89-91.
- [15] Rymar S. Effect of Single-Phase Power Sources of Welding Arc on Electric Mains / S. Rymar, A. Zher-nosekov, V. Sydorets // The Paton Welding Journal. – 2011. – Vol. 12. – Pp. 7-12.
- [16] Burlaka V.V. Forward inverter source with increased power factor / V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.K. Podnebennaya // The Paton Welding Journal. – 2017. – №3. – Pp. 49-51. DOI: 10.15407/tpwj2017.03.08.

Стаття надійшла до редакції 10.01.2024

TO THE QUESTION OF CONSTRUCTION OF WELDING INVERTER SOURCES WITH A HIGH POWER FACTOR

SAVENKO O.S.

Ph.D, Associate professor of the automation of power supply and electric drive systems department of the SHEE "Priazovskiy state technical university", Dnipro, Ukraine, e-mail: savenko.olja@gmail.com. ORCID: 0000-0002-8108-2575;

Purpose. Design a power-factor-corrected, energy- and cost-efficient switchmode power supply for welding.

Methodology. It is proposed to use the principle of direct conversion and to develop the "hybrid" power circuit consisting of a main power path using direct conversion and an auxiliary power path having a converter with an intermediate DC link with relatively low stored energy. Since a load to the welding power supply is the welding arc, its instantaneous power fluctuations during the mains voltage period essentially do not influence the welding process due to

the thermal constant of the weld pool molten metal. Effective use of this features of the welding arc allows to optimize the power processing, reduce the amount of energy stored in the reactive elements of the circuit and improve the economical, mass and dimensional parameters of the supplies.

Findings. A new power factor corrected switchmode power supply topology is proposed utilizing beforementioned principles of power processing. The algorithm for calculating the switching frequency of supply power switches is given. To confirm the adequacy of the developed provisions, an experimental sample of the power supply was created. Oscillograms of mains voltage and source current consumption and oscillograms in output current limitation mode are obtained. The results of experiments showed that the supply has a power factor > 0.94 in a wide range of powers.

Originality. A distinctive feature of the supply is the absence of additional inductive components in the power path, a lower capacitance of the DC-link bulk capacitor and a simplified scheme for limiting its inrush current during initial charging. The supply has an increased open circuit voltage, independent of the mains voltage, which allows for easy arc ignition during manual arc welding.

Practical value. Due to the increased power factor, the current drawn from the mains is 30 % to 45 % lower than that of widespread inverter supplies without a power factor corrector. These features allow to simultaneously use more power supply units with the same mains current load, and/or to provide stable welding in conditions of a "weak" mains.

Keywords: power factor; welding; welding inverter; power supply; arc ignition; arc burning stabilization; open circuit voltage.

REFERENCES

- [1] Shin, J.-Y., Lee, J.-M., Choi, S.-W., & Lee, J.-Y. (2016). Development of converter for high frequency welding machines using active snubber. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, 21, 351–355. <https://doi.org/10.6113/TKPE.2016.21.4.351>.
- [2] Malesani, L., Mattavelli, P., Rossetto, L., Tenti, P., Marin, W., & Pollmann, A. (1993). Electronic welder with high-frequency resonant inverter. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, 2, 1073–1080.
- [3] Corradini, L., Maksimovič, D., Mattavelli, P., & Zane, R. (2015). *Digital Control of High-Frequency Switched-Mode Power Converters*. Wiley-IEEE Press.
- [4] Kukhar, V. V., Prysiazhnyi, A. G., Balalayeva, E. Yu., & Anishchenko, O. S. (2017). Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect. *Proceedings of Modern Electrical and Energy System MEES'2017*, 404–407. <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.
- [5] Galvery, W. L., & Marlow, F.M. (2006). *Welding essentials: questions&answers*. Industrial Press.
- [6] Davies, A. C. (1993). *The Science and Practice of Welding*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511470974>.
- [7] Burlaka, V. V., Lavrova, E. V., Podnebennaya, S. K., & Zakharova, I. V. (2017). Development of single-phase high-power factor inverter welding sources. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1), 18–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.106957>.
- [8] Baghini, A. (2008). *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470754245>.
- [9] Rogalla, S., Ackermann, F., Bihler, N., Dötter, G., Singer, R., & Wolf, E. (2015). Towards a better understanding of harmonics and power electronics – new measurement results and analysis methods for modern large-scale inverters. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'15) La Coruña (Spain)*, 13, 483–488. <https://doi.org/10.24084/repqj13.368>.
- [10] Zhao, Y., Yan, W., & Sun, J. (2022). *Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications*. Springer Verlag.
- [11] Skrzyniecki, K., Cegielski, P., Kolasa, A., & Krajewski, A. (2011). Electromagnetic compatibility of power supplies for arc welding. *Welding International*, 27, 1–6. <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.606149>.
- [12] Mecke, H., Doeblin, R., Winkler, T., Winkler, R., & Gärtner, U. (2002). Electromagnetic compatibility of resistance welding machines - Part 1: Initial situation and measuring methodology, 54, 152–156.
- [13] Podnebennaya, S.K., Burlaka, V.V., & Gulakov, S.V. (2016). On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains. *The Paton Welding Journal*, 12, 50–54. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.12.09>
- [14] Safronov, P.S., Bondarenko, Yu.V., & Bondarenko, O.F. (2014). Improvement of electromagnetic compatibility of power sources for resistance welding systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 5, 89–91.
- [15] Rymar, S., Zhernosekov, A., & Sydorets, V. (2011). Effect of Single-Phase Power Sources of Welding Arc on Electric Mains. *The Paton Welding Journal*, 12, 7–12.
- [16] Burlaka, V.V., Gulakov, S.V., & Podnebennaya, S.K. (2017). Forward inverter source with increased power factor. *The Paton Welding Journal*, 3, 49–51. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.08>.