

**141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.314.26

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.15

© Гулаков С.В.¹, Бурлака В.В.², Поднебenna С.К.³, Кисляк В.Г.⁴,
Плахтій О.А.⁵, Нерубацький В.П.⁶**РОЗРОБКА ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ
З ПІДВИЩЕНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ**

Робота спрямована на створення енергоефективних джерел живлення, які б мали високий коефіцієнт потужності, низький коефіцієнт несинусоїдності споживаного струму, добрі масогабаритні параметри та низький рівень втрат потужності. Мета роботи – теоретичний опис підходів до розробки інверторного зварювального джерела живлення з підвищеною ефективністю та електромагнітною сумісністю з електричною мережею. В роботі проаналізовано переваги та недоліки існуючих джерел живлення для зварювання. Запропонована топологія зварювального джерела живлення з використанням резонансного перетворювача з Valley-Fill випрямлячем зі сторони мережі. Перевагами резонансних перетворювачів є невелика кількість силових ключів, а використання оригінального алгоритму керування дозволить підвищити енергоефективність та забезпечити невеликі втрати енергії. Серед резонансних перетворювачів було обрано топологію LLC перетворювача. В роботі проведений аналіз схеми заміщення по основній гармоніці, розрахований комплексний опір схеми заміщення та отримані вирази для струму і активної потужності. Проведено імітаційне моделювання засобами Matlab Simulink, в результаті якого доведено підвищення коефіцієнта потужності запропонованого джерела живлення та зменшення коефіцієнта несинусоїдності споживаного від мережі струму.

Ключові слова: джерело живлення, зварювання, резонансний перетворювач, коефіцієнт потужності, зварювальний інвертор, гармоніки.

S.V. Gulakov, V.V. Burlaka, S.K. Podnebenna, V.G. Kysliak, O.A. Plakhtii, V.P. Nerubatskyi. Development of welding power supply source with higher efficiency. The work is aimed at creating energy-efficient power supply sources with a high power factor, low harmonic distortion of the input current, affordable weight and size parameters and low power losses. The purpose of the work is a theoretical description of approaches to the development of inverter welding power supply sources with high efficiency and electromagnetic compatibility with the electric grid. The advantages and disadvantages of existing power supply sources for welding have been analyzed. The topology of a welding power supply

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-6165-3641, gulakov_s_v@pstu.edu

² д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-8507-4070, vladimirvburlaka@gmail.com

³ д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-0878-1492, podsvet@gmail.com

⁴ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, kysliak_volodymyr@ukr.net

⁵ канд.техн.наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-1535-8991, a.plakhtiy1989@gmail.com

⁶ канд.техн.наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-4309-601X, NVP9@i.ua

sources with the use of a resonant converter with a Valley-Fill rectifier at the mains side has been proposed. The advantages of resonant converters are a small number of power semiconductor switches, and the use of the original control algorithm will increase energy efficiency and provide low energy losses. Among the resonant converters, the LLC topology of the converter has been chosen. The work has considered fundamental harmonic analysis of the equivalent circuit, the complex resistance of the equivalent circuit has been calculated, and the expressions for current and active power have been obtained. Increasing the power factor of the power supply and reducing the current consumed from the electrical grid is accomplished through controlling the shape of the current consumed by modulating the active power of the inverter. The use of passive power factor correction (input rectifier made according to the Valley Fill topology) made it possible to reduce the THD of the input current. Simulation was carried out by means of Matlab Simulink; the simulation results confirm the increase of the power factor of the developed power supply and the decrease of the total harmonic distortion of the current drawn from the mains.

Keywords: *power supply, welding, resonant converter, power factor, welding inverter, harmonics.*

Постановка проблеми. При вирішенні задач ремонту, відновлення військової, сільсько-господарської, іншої техніки в польових умовах, особливо в умовах бойових дій, виникає необхідність проведення зварювальних, а також інших робіт, де є потреба в автономному джерелі електропостачання через неможливість використання стаціонарного джерела, або якщо його використання потребує великих часових або вартісних витрат. Аналіз існуючих зварювальних джерел живлення, які присутні на ринку, показав, що вони мають систему охолодження з використанням потужного вентилятора, що призводить до потрапляння всередину пилю, вологи та бруду і веде до погіршення теплового обміну, перегріву компонентів та/або замикань в схемі інвертора. Для забезпечення надійної роботи в польових умовах або в умовах діючого промислового виробництва джерела живлення повинні мати високий ступінь захисту від пилю та бруду. Тому створення енергоефективних автономних джерел живлення, які були б позбавлені означених проблем та забезпечували можливість проведення зварювальних робіт для військових та цивільних потреб, безперебійність електропостачання в польових умовах, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробкою ізольованих двонаправлених АС-DC перетворювачів з можливістю ефективного керування їх роботою у великому діапазоні режимів займаються багато дослідників, оскільки перетворювачі з такими властивостями мають перспективи використання у системах живлення електромобілів [1-5], в автономних системах електроживлення [6-8] та системах накопичення енергії [9, 10].

Всі без виключення існуючі схемні рішення і відповідні системи керування орієнтовані на виконання тільки однієї функції: узгодження джерела постійної напруги (акумуляторної батареї (АКБ) чи шини постійної напруги автономної системи електроживлення) з мережею змінної напруги і забезпечення керування споживаною активною та реактивною потужностями при низькому рівні вищих гармонік мережевого струму. Жоден з описаних в [1-10] перетворювачів не може працювати в автономному режимі без підключення до мережі. До того ж, деякі перспективні схемні рішення, наприклад, [1], що відрізняються невеликою кількістю силових компонентів, натомість мають дуже складні алгоритми керування, які вимагають попередніх розрахунків і оптимізації з використанням великої обчислювальної потужності. Такі системи можуть демонструвати нестабільну роботу у нестаціонарних режимах.

Перетворювач, описаний в [3], має перевагу в тому, що в ньому забезпечено «м'яке» (ZVS) переключення силових ключів. Але це спостерігається тільки в режимі споживання активної потужності від мережі. При зміні знаку активної потужності ZVS режим стає неможливим. А оскільки для мінімізації втрат в перетворювачі застосовані високовольтні MOSFET транзистори, режим «жорсткого» перемикавання призведе до аварійного виходу з ладу через великий час зворотного відновлення їх зворотних діодів (body diodes).

Перетворювачі [6-8] мають проміжну ланку пульсуючої напруги і, як наслідок, збільшену кількість напівпровідникових ключів у силовому колі. Перетворювачі [4, 5, 9, 10] хоча і виконані за іншою топологією, теж характеризуються великою кількістю силових ключів, ускладненою

конструкцією високочастотного трансформатора. Перетворювач [2] характеризується режимом роботи з «жорсткими» перемикальними силовими компонентами, а також необхідністю застосування схем обмеження напруги при вимкненні силових транзисторів первинного кола, що веде до ускладнення схеми і збільшення втрат енергії.

Серед комерційного обладнання, присутнього на ринку, є зварювальні інвертори MicorStick 160 Accu-ready (Lorch, Німеччина), AccuMax 150 (Castolin Eutectic Group, Швейцарія), AccuPocket 150/400 (Fronius, Австрія), Tactical Welder (UltraTech International, Inc., США), які дозволяють виконувати зварювання від акумуляторних батарей. Ці інвертори працюють зі спеціальним блоком літій-іонних акумуляторів і не можуть працювати від бортових батарей сільськогосподарської та військової техніки. Вони не можуть працювати в якості пуско-зарядних пристроїв і тим більше в якості перетворювача напруги АКБ транспортних засобів в змінну 220 В 50 Гц.

Мета статті – теоретичний опис підходів до розробки інверторного джерела живлення з підвищеною ефективністю та електромагнітною сумісністю з електричною мережею.

Виклад основного матеріалу. Основною ідеєю статті є створення інверторного джерела з підвищеною ефективністю та електромагнітною сумісністю з електричною мережею. Для цього пропонується використання топології резонансного імпульсного багатопортового двонаправленого перетворювача. Перевагами резонансних перетворювачів є невелика кількість силових ключів, а використання оригінального алгоритму керування дозволить підвищити енергоефективність та забезпечити невеликі втрати енергії.

Існує дві поширені топології резонансних перетворювачів: конфігурація LCC та конфігурація LLC. Перший (LCC) зазвичай використовується у високовольних джерелах живлення завдяки особливостям передавальної характеристики. Другий – перетворювач LLC – більш прийнятний в якості основи інверторного джерела живлення для зварювання з-за можливості використання спеціального трансформатора з підвищеним розсіюванням, що дає змогу зменшити кількість силових магнітних компонентів.

Основними застосуваннями резонансних перетворювачів є зарядні пристрої (у тому числі автомобільні), джерела живлення для світлодіодних ламп, джерела живлення для індукційного нагрівання [11-20]. Крім того, важливо, щоб перетворювач LLC міг підтримувати регулювання вихідної напруги навіть за умов невеликого навантаження [21].

На рис. 1 наведена запропонована схема джерела живлення для зварювання на базі LLC резонансного перетворювача. Джерело складається з випрямляча BR1, виконаного за схемою Valley Fill (елементи VD1 ... VD3, C1, C2, NTC1) [20, 21], навантаженого на напівмостовий інвертор SB1 [22]. Мережева напруга випрямляється діодним мостом BR1 і надходить на діодно-ємнісний каскад VD1...VD3, C1, C2, NTC1. Заряд конденсаторів C1 та C2 відбувається при їх послідовному з'єднанні через VD2 та NTC1. Термістор NTC1 служить для обмеження амплітуди імпульсу струму початкового заряду конденсаторів при включенні джерела в мережу.

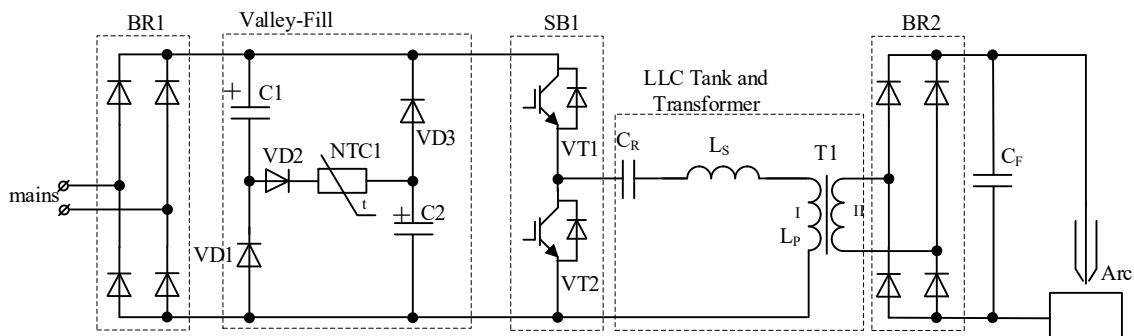


Рис. 1 – Схема запропонованого джерела живлення для зварювання на базі резонансного LLC перетворювача

Розряд конденсаторів C1 та C2 відбувається при їх паралельному з'єднанні через діоди VD1 та VD3. Напруга на C1 і C2 підтримується на рівні половини амплітуди напруги мережі. Отже,

при $|u_{мер}| > 0.5 \cdot U_m$ (U_m – амплітуда напруги мережі) діоди VD1 і VD3 закриті і навантаження (напівміст VT1VT2) живиться безпосередньо від мережі через міст BR1. Якщо $|u_{мер}| < 0.5 \cdot U_m$, навантаження живиться від конденсаторів C1 і C2 через VD1 і VD3.

Завдяки тому, що більшість часу навантаження живиться від мережі безпосередньо, з'являється можливість керування формою кривої споживаного струму за рахунок модуляції активної потужності інвертора. Це дозволить підвищити коефіцієнт потужності джерела і знизити споживаний від мережі струм за рахунок зниження неактивної потужності.

Випрямлена напруга надходить на напівмостовий інвертор SB1, виконаний на транзисторах VT1 та VT2. Він навантажений на резонансне LLC коло, що утворене конденсатором C_R , індуктивністю L_S та первинною обмоткою високочастотного силового трансформатора T1.

Напівміст SB1 працює з коефіцієнтом заповнення 50%, при цьому змінним параметром є частота.

Для аналізу процесів, які відбуваються у перетворювачі, скористаємося схемою заміщення, представленою на рис. 2.

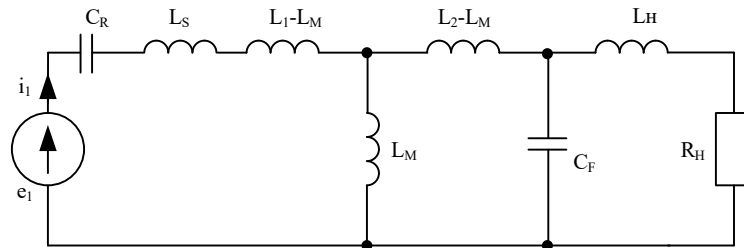


Рис. 2 – Схема заміщення високочастотної частини перетворювача

На рис. 2 прийняті позначення: L_1, L_2 – індуктивність первинної та вторинної обмоток T1, відповідно; L_M – взаємна індуктивність обмоток T1; C_R – резонансна ємність; L_S – резонансна індуктивність; L_H – індуктивність навантаження; R_H – еквівалентний активний опір навантаження (дуги); C_F – ємність фільтруючого конденсатора; e_1 – вихідна напруга напівмостового інвертора.

Зварювальну дугу з достатньою для практичних розрахунків за основною гармонікою точністю можна вважати активним опором, враховуючи, що дуговий проміжок не встигає деіонізуватися за час переходу струму через нуль. На рис. 2 дуга представлена еквівалентним опором R_H . Оскільки при ручному дуговому зварюванні напруга на дузі становить близько 30 В при струмі 100...200 А, R_H має порядок десятків часток Ома (0,15...0,3 Ом).

Позначимо операторний опір елементів праворуч за схемою від L_M (рис. 2) як $Z_H(s)$, де s – оператор перетворення Лапласа:

$$Z_H(s) = (L_2 - L_M)s + \frac{(L_H s + R_H) \cdot \frac{1}{C_R s}}{L_H s + R_H + \frac{1}{C_R s}} \quad (1)$$

Знайдемо опір, на який навантажено джерело e_1 :

$$Z_1(s) = (L_1 - L_M + L_S)s + \frac{1}{C_R s} + \frac{L_M s \cdot Z_H(s)}{L_M s + Z_H(s)} \quad (2)$$

Тоді вихідний струм напівмосту визначатиметься як:

$$I_1(s) = \frac{E_1(s)}{Z_1(s)} \quad (3)$$

Згідно до балансу активної потужності, можна записати, що вся активна потужність, яка розвивається джерелом ЕРС, виділятиметься в R_H . Але оскільки R_H це опір дуги, то ця потужність і буде корисною.

Для синусоїдного режиму з кутовою частотою ω можна записати:

$$P(\omega) = \text{Re} \left(E_1(j\omega) \cdot \tilde{I}_1(j\omega) \right), \quad (4)$$

де $\tilde{I}_1(j\omega)$ – спряжений комплекс струму I_1 .

Шляхом зміни частоти можна в широких межах регулювати потужність, що виділяється у навантаженні. На практиці нижня межа робочої частоти визначається за умовою насичення магнітопроводу силового високочастотного трансформатора, а верхня – обмежується кількома факторами: це втрати перемикання в силових ключах, швидкодія системи керування та втрати на перемагнічування осердя трансформатора.

Особливу увагу слід приділити електромагнітній сумісності розробленого джерела живлення. Використання пасивної корекції коефіцієнта потужності (випрямляча BR1, виконаного за схемою Valley Fill) дозволило зменшити коефіцієнт несинусоїдності вхідного струму.

Перевірка роботи розробленого джерела живлення проведена за допомогою імітаційного моделювання засобами Matlab Simulink. Модель запропонованого джерела живлення на базі резонансного LLC перетворювача наведена на рис. 3.

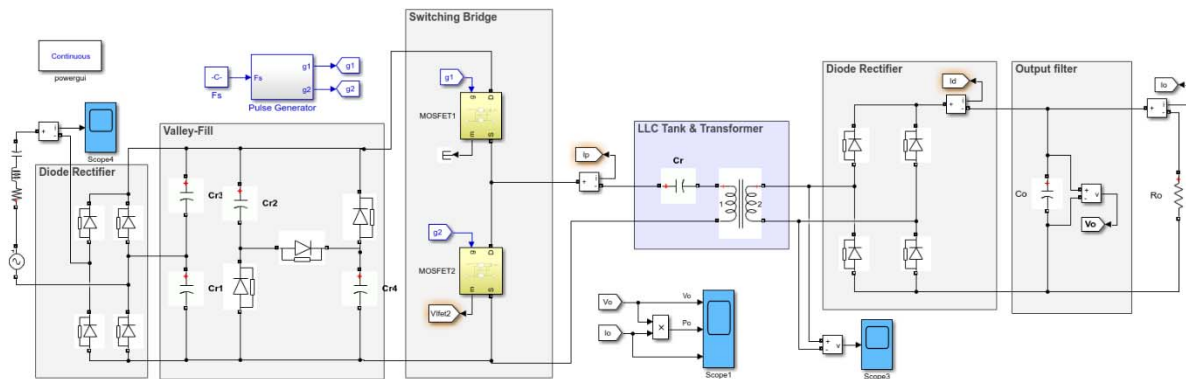


Рис. 3 – Імітаційна модель запропонованого джерела живлення у Matlab Simulink

В таблиці наведені параметри елементів схеми запропонованого джерела живлення на базі резонансного LLC перетворювача, що використані для імітаційного моделювання.

Таблиця

Параметри моделювання

	Параметр	Величина
Вихідна напруга	V_{out}, V	30
Опір навантаження	R_{load}, Ohm	0.15
Частота перемикання	f_{sw}, kHz	46.5
Ємність резонансного конденсатора	C_r, uF	0.47
Індуктивність (послідовна) резонансного кола	L_s, uH	27.3
Індуктивність (паралельна) резонансного кола	L_p, uH	296

Рис. 4 демонструє вихідні характеристики розробленого джерела живлення на базі резонансного LLC перетворювача. Коефіцієнт несинусоїдності споживаного струму за рахунок пасивної корекції коефіцієнта потужності за результатами моделювання зменшився майже в 3 рази у порівнянні з джерелом живлення без коректора коефіцієнта потужності.

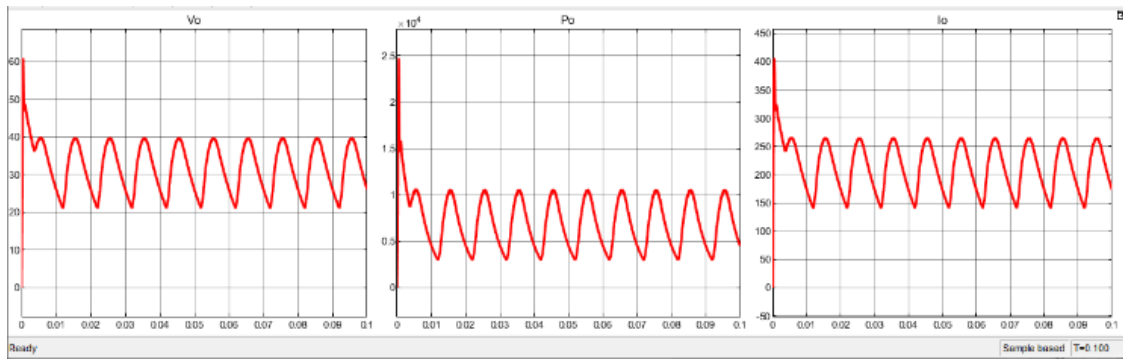


Рис. 4 – Результати моделювання – вихідні параметри

Використання схеми Valley-Fill у джерелі живлення зварювального апарату дозволяє збільшити його коефіцієнт потужності та знизити споживаний середньоквадратичний струм. Для регулювання струму дуги можливі як мінімум два способи: перший – це усунення робочої частоти вище послідовної резонансної частоти (f_2). Хоча цей метод очевидний і простий, він має суттєвий недолік – підвищені комутаційні втрати (через різке відключення силових транзисторів і збільшення частоти).

Висновки

Розробка високоефективних джерел живлення для зварювання є актуальною задачею. В роботі запропоновано використання резонансного перетворювача за топологією LLC, до переваг якого відноситься зменшення масогабаритних показників джерела. В роботі проведений аналіз схеми заміщення по основній гармоніці. Проведено імітаційне моделювання, в результаті якого доведено підвищення коефіцієнта потужності запропонованого джерела живлення та зменшення коефіцієнта несинусоїдності споживаного від мережі струму.

Перелік використаних джерел:

1. A bi-directional single-stage isolated AC-DC converter for EV charging and V2G / B. Koushki, A. Safaee, P. Jain, A. Bakhshai // IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). – 2015. – Pp. 36-44. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/EPEC.2015.7379924>.
2. Prasanna U.R. Novel Bidirectional Single-phase Single-Stage Isolated AC-DC Converter With PFC for Charging of Electric Vehicles / U.R. Prasanna, A.K. Singh, K. Rajashekara // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2017. – Vol. 3, no. 3. – Pp. 536-544. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2691327>.
3. Jauch F. Single-phase single-stage bidirectional isolated ZVS AC-DC converter with PFC / F. Jauch, J. Biela // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). – 2012. – Pp. LS5d.1-1-LS5d.1-8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397479>.
4. Bi-Directional Single-Stage Interleaved Totem-Pole AC-DC Converter with High Frequency Isolation for On-Board EV Charger / H. Belkamel, K. Hyungjin, K. Beywongwoo, Y. Shin, S. Choi // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – 2018. – Pp. 6721-6724. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8557933>.
5. A Bidirectional Soft-Switched DAB-Based Single-Stage Three-Phase AC-DC Converter for V2G Application / D. Das, N. Weise, K. Basu, R. Baranwal, N. Mohan // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2019. – Vol. 5, no. 1. – Pp. 186-199. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TTE.2018.2886455>.
6. Isolated single stage bidirectional AC-DC converter with power decoupling and reactive power control to interface battery with the single phase grid / D. Sal y Rosas, D. Frey, J. Schanen, J. Ferrieux // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2018. – Pp. 631-636. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341078>.
7. High-Efficiency Isolated Bidirectional AC-DC Converter for a DC Distribution System / H. Kim, M. Ryu, J. Baek, J. Jung // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28, no. 4. – Pp. 1642-1654. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2213347>.

8. Prashanthi Y. Bidirectional AC-DC Converter for a DC Distribution System / Y. Prashanthi, K. Suman // National Conference Proceeding NCESTFOSS. – 2017. – Pp. 119-129.
9. A Single-Stage Three-Phase Bidirectional AC/DC Converter With High-Frequency Isolation and PFC / B.R. de Almeida, J.W.M. de Araújo, P.P. Praça, D. de S. Oliveira // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 33, no. 10. – Pp. 8298-8307. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2775522>.
10. Deshpande P.P. A Matrix based Isolated Bidirectional AC-DC Converter with LCL type Input Filter for Energy Storage Application / P.P. Deshpande, A.K. Singh, S.K. Panda // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 - ECCE Asia). – 2018. – Pp. 4186-4192. – Mode of access: <https://doi.org/10.23919/IPEC.2018.8507367>.
11. A novel single-stage LLC resonant AC-DC converter with power factor correction feature / C. Chang, H. Chen, C. Cho, J. Chiu // 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011. – Pp. 2191-2196. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2011.5975954>.
12. Wang H. Design considerations for a level-2 on-board PEV charger based on interleaved boost PFC and LLC resonant converters / H. Wang, S. Dusmez, A. Khaligh // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – 2013. – Pp. 1-8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ITEC.2013.6574508>.
13. Fuhr T. Innovative Single Stage Isolated AC/DC Converter with Power Factor Correction / T. Fuhr, T. Kupka // 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). – 2019. – Pp. 1-4. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/EPE.2019.8778151>.
14. Lin W. A Single-stage PFC by Integrating quasi-Bridgeless Boost and LLC Converter / W. Lin, H. Chen, Y. Fang // IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). – 2018. – Pp. 1-5. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2018.8612422>.
15. Pandey R. A Power Factor Corrected Electric Vehicle Battery Charger Using Boost Converter / R. Pandey, B. Singh // 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE). – 2018. – Pp. 1-6. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/IICPE.2018.8709526>.
16. Phadungthin R. Application study on induction heating using half bridge LLC resonant inverter / R. Phadungthin, J. Haema // 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – 2017. – Pp. 1582-1585. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2017.8283090>.
17. A mathematical guideline for designing an AC-DC LLC converter with PFC / Y. Qiu, W. Liu, P. Fang, Y. Liu, P.C. Sen // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2018. – Pp. 2001-2008. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341292>.
18. Fan Sh. Analysis and design of LLC resonant converter for electron beam welding filament power supply / Sh. Fan, B. Cai, Z. Wang // International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 2013. – Pp. 2153-2155. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6713204>.
19. Singh B. Improved power quality buck-boost converter fed LLC resonant converter for induction heater / B. Singh, R. Pandey // IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS). – 2016. – Pp. 1-6. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ICPES.2016.7584248>.
20. Control Design and Performance Analysis of a Double-Switched LLC Resonant Rectifier for Unity Power Factor and Soft-Switching / G. Zhang, J. Zeng, S.Sh. Yu, W. Xiao, Bo Zhang, Si-Zhe Chen, Y. Zhang // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – Pp. 44511-44521. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978030>.
21. Resonant LLC Converter [Electronic resource]: [Website]. – Electronic data. – Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/resonant-llc-converter.html>.
22. Haque A. Valley-Fill Circuit for Power Quality Improvement / A. Haque // IJIRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology. – 2016. – Vol. 2, iss. 09. – Pp. 223-227.

References:

1. Koushki B., Safae A., Jain P., Bakhshai A. A bi-directional single-stage isolated AC-DC converter for EV charging and V2G. *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2015, pp. 36-44. doi:10.1109/EPEC.2015.7379924.

2. Prasanna U.R., Singh A.K., Rajashekara K. Novel Bidirectional Single-phase Single-Stage Isolated AC–DC Converter With PFC for Charging of Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 536-544. doi:10.1109/TTE.2017.2691327.
3. Jauch F., Biela J. Single-phase single-stage bidirectional isolated ZVS AC-DC converter with PFC. *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2012, pp. LS5d.1-1-LS5d.1-8. doi:10.1109/EPEPEMC.2012.6397479.
4. Belkamel H., Hyungjin K., Beywongwoo K., Shin Y., Choi S. Bi-Directional Single-Stage Interleaved Totem-Pole AC-DC Converter with High Frequency Isolation for On-Board EV Charger. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018, pp. 6721-6724. doi:10.1109/ECCE.2018.8557933.
5. Das D., Weise N., Basu K., Baranwal R., Mohan N. A Bidirectional Soft-Switched DAB-Based Single-Stage Three-Phase AC–DC Converter for V2G Application. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 186-199. doi:10.1109/TTE.2018.2886455.
6. Sal y Rosas D., Frey D., Schanen J., Ferrieux J. Isolated single stage bidirectional AC-DC converter with power decoupling and reactive power control to interface battery with the single phase grid. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2018, pp. 631-636. doi:10.1109/APEC.2018.8341078.
7. Kim H., Ryu M., Baek J., Jung J. High-Efficiency Isolated Bidirectional AC-DC Converter for a DC Distribution System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, no. 4, pp. 1642-1654. doi:10.1109/TPEL.2012.2213347.
8. Prashanthi Y., Suman K. Bidirectional AC-DC Converter for a DC Distribution System. *National Conference Proceeding NCESTFOSS*, 2017, pp. 119-129.
9. De Almeida B.R., De Araújo J.W.M., Praça P.P., De S. Oliveira D. A Single-Stage Three-Phase Bidirectional AC/DC Converter With High-Frequency Isolation and PFC. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 10, pp. 8298-8307. doi:10.1109/TPEL.2017.2775522.
10. Deshpande P.P., Singh A.K., Panda S.K. A Matrix based Isolated Bidirectional AC-DC Converter with LCL type Input Filter for Energy Storage Application / P.P. Deshpande. *International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 - ECCE Asia)*, 2018, pp. 4186-4192. doi:10.23919/IPEC.2018.8507367.
11. Chang C., Chen H., Cho C., Chiu J. A novel single-stage LLC resonant AC-DC converter with power factor correction feature. *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011, pp. 2191-2196. doi:10.1109/ICIEA.2011.5975954.
12. Wang H., Dusmez S., Khaligh A. Design considerations for a level-2 on-board PEV charger based on interleaved boost PFC and LLC resonant converters. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2013, pp. 1-8. doi:10.1109/ITEC.2013.6574508.
13. Fuhr T., Kupka T. Innovative Single Stage Isolated AC/DC Converter with Power Factor Correction. *20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2019, pp. 1-4. doi:10.1109/EPE.2019.8778151.
14. Lin W., Chen H., Fang Y. A Single-stage PFC by Integrating quasi-Bridgeless Boost and LLC Converter. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2018, pp. 1-5. doi:10.1109/INTLEC.2018.8612422.
15. Pandey R., Singh B. A Power Factor Corrected Electric Vehicle Battery Charger Using Boost Converter. *8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 2018, pp. 1-6. doi:10.1109/IICPE.2018.8709526.
16. Phadungthin R., Haema J. Application study on induction heating using half bridge LLC resonant inverter. *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2017, pp. 1582-1585. doi:10.1109/ICIEA.2017.8283090.
17. Qiu Y., Liu W., Fang P., Liu Y., Sen P.C. A mathematical guideline for designing an AC-DC LLC converter with PFC. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2018, pp. 2001-2008. doi:10.1109/APEC.2018.8341292.
18. Fan Sh., Cai B., Wang Z. Analysis and design of LLC resonant converter for electron beam welding filament power supply. *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2013, pp. 2153-2155. doi:10.1109/ICEMS.2013.6713204.

19. Singh B., Pandey R. Improved power quality buck-boost converter fed LLC resonant converter for induction heater. *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2016, pp. 1-6. doi:10.1109/ICPES.2016.7584248.
20. Zhang G., Zeng J., Yu S.Sh., Xiao W., Zhang Bo, Chen Si-Zhe, Zhang Y. Control Design and Performance Analysis of a Double-Switched LLC Resonant Rectifier for Unity Power Factor and Soft-Switching. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 44511-44521. doi:10.1109/ACCESS.2020.2978030.
21. Resonant LLC Converter Available at: www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/resonant-llc-converter.html (accessed 15 May 2021).
22. Haque A. Valley-Fill Circuit for Power Quality Improvement. *IJRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2016, vol. 2, iss. 09, pp. 223-227.

Рецензент: О.В. Лаврова
д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 01.10.2021

УДК 621.316.716.2

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.16

© Беззуб М.А.¹, Бялобржеський О.В.², Тодоров О.В.³, Рева І.В.⁴

ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПОСЛІДОВНОГО СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА ЗА УМОВИ РІЗНИХ ПОКАЗНИКІВ ВІДХИЛЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

У роботі проведено дослідження функціонування послідовного силового активного фільтра за умови дії відхилень певних показників якості електричної енергії в мережевій напрузі. Для виявлення спотворення напруги використано підхід, заснований на процедурі перетворення Парка, реалізовано модель відповідної підсистеми. Формування імпульсів керування транзисторами послідовного силового активного фільтра виконано зі застосуванням методу релейного регулювання. Для дослідження ефективності запропонованого порядку компенсації з урахуванням функціонування силової частини послідовного силового активного фільтра синтезовано модель. Система забезпечує стабілізацію напруги при перевищенні, зниженні та коливаннях напруги відносно заданого рівня. За умови реалізації процесу симетрування відзначено істотне погіршення властивостей запропонованого рішення у разі наявності складових нульової послідовності. У процесі дослідження несинусоїдальності встановлено, що фільтрація короткочасних імпульсів напруги не виконується, оскільки спектр таких імпульсів дуже широкий.

Ключові слова: послідовний силовий активний фільтр, якість електроенергії, компенсація, релейне регулювання, перетворення Парка.

M.A. Bezzub, O.V. Bialobrzheskyi, I.V. Reva, O.V. Todorov. Series active power filter functioning study under conditions of different indicators of power quality deviation. The purpose of the work is to develop a series active power filter control system to ensure

¹ аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-5595-4464, bezzubmax@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID 0000-0003-1669-4580, seemal@kdu.edu.ua

³ аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID 0000-0001-5703-6790, olehtodorov@gmail.com

⁴ аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID 0000-0002-0005-6499, cgdzainer@gmail.com