

МОДЕЛНО БАЗИРАНО ПРОЕКТИРАНЕ НА ПАРАЛЕЛНО РАБОТЕЩИ ИНВЕРТОРИ НА ТОК

MODEL-BASED DESIGN OF A PARALLEL OPERATING CURRENT SOURCE INVERTER

Dimitar Arnaudov¹

¹Technical University of Sofia, Bulgaria
dda@tu-sofia.bg,

Abstract

In the paper is presented a study of a current source inverters with voltage limiting on the switching capacitor working in parallel. Inverters are used as converters to charge energy storage elements (superconductors or rechargeable batteries). We have explored the possibility of designing a single unit and using the capabilities of model-based design to explore the properties of the multi-stage converter. A LTSpice converter model is presented and the work of a single unit and the joint work of several units are compared.

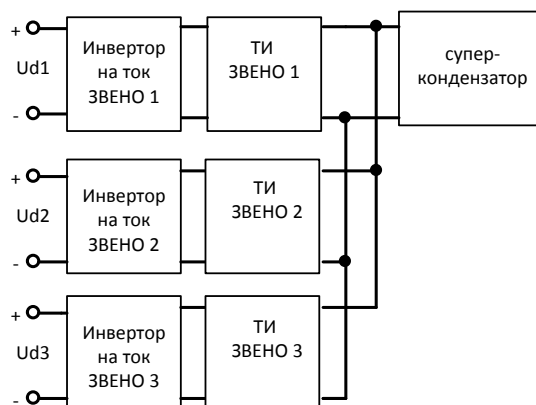
Keywords: current source inverter, parallel operating, design.

ВЪВЕДЕНИЕ

Елементите за съхранение на енергия се използват все повече в бита и индустрията. Два типа от най-разпространените елементи за съхранение на енергия са суперкондензаторите и акумулаторните батерии. За зареждането им се използват различни електронни преобразуватели на енергия. Това са DC-DC преобразуватели с различни изходни характеристики [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. За повишаване на изходните токове се използва работа в паралел на няколко преобразувателя [8, 9].

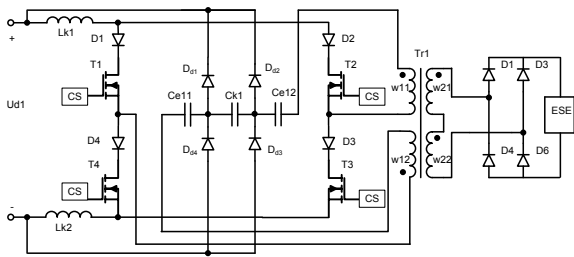
В работата е разгледан инвертор на ток с ограничение на напрежението върху комутация кондензатор [5], използван като преобразувател за зареждане на ЕСЕ.

Блоквата схема на преобразувателя е показана на фиг.1. В изхода на инверторите са свързани мостови токоизправители. По този начин се получава многозвено преобразувател с възможност за увеличаване на изходната мощност. Преобразувателите работят върху общ товар. Схемата на едно звено заедно с изходния токоизправител е показана на фиг. 2.



Фиг. 1. Блокова схема на многозвения преобразувател

За силови ключове в схемата са използвани транзистори с последователно свързани диоди. В схемата са ограничавана напрежението върху кондензатора C_{k1} , който е част от резонансния кондензатор съставен от C_{e11} , C_{k1} и C_{e12} . Чрез промяната на съотношението на C_e/C_k се променя нивото на ограничение на тока консумиран от захранващия източник, а следователно и на тока на зареждане на елемента за съхранение на енергия.



Фиг. 2. Принципна схема на едно звено на преобразувателя

Входния дросел е разделен на две части Lk1 и Lk2. Кондензаторът е разделен на три части, като върху Ck1 напрежението се ограничава до Ud. Останалите две части са с еднакви стойности на капацитетите Ce11=Ce12. Трансформаторът е реализиран с две първични намотки (w11 и w12) и две вторични (w21 и w22).

ОСНОВНИ УРАВНЕНИЯ

Анализът на показаната на фиг.2 схема е представен в [5]. Изведените и представени изрази в [5] могат да се използват като основа при проектирането на едно звено на преобразувателя. Ако елементът за съхранение на енергия е суперкондензатор и зареждането започне от напрежение нула, за проектирането на преобразувателя може да се приложи методиката дадена в [5]. Ако елементът за съхранение на енергия е суперкондензатор, зареден до определена стойност на или ако е акумулаторна батерия е нужно да се отчете и това напрежение. Ако се приеме, че коефициент на трансформация на трансформатора Tr1 1:1:1:1, е необходимо е да се замести $L=2Lk1$, $Ck=Ck1$, $Ce11=Ce12$, $Ce=Ce11/2$, R е сумата на активните съпротивления във веригата, $\omega=2\pi f$ (f-честотата на управление на преобразувателя). Един от основните моменти при проектирането е изборът на ъгъла θd , след който се включват ограничителните диоди. Изразът за $\left(\frac{\theta d}{\pi}\right)$ е изведен в [5].

$$\left(\frac{\theta d}{\pi}\right)^2 = \frac{1}{k_i \left(\left(\frac{\delta}{\omega_{01}} \right)^2 \cdot \omega_{otno}^2 + 1 \right) \sqrt{a^2 + \left(1 - a \frac{\delta}{\omega_{01}} \right)^2} \int_0^{\frac{\delta}{\omega_{01}}} e^{-\frac{\delta}{\omega_{01}} \sin \frac{\pi}{\lambda_1} (9 - \psi)} d9}$$

където,

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}, \quad \omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{LC_e} - \delta^2}, \quad \delta = \frac{R}{2L},$$

$$\lambda_2 = \frac{\pi \omega}{\omega_{02}} = \pi v_2.$$

$$k_i = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\delta}{\omega_{01}} \left(\left(\frac{\delta}{\omega_{01}} - a - a \left(\frac{\delta}{\omega_{01}} \right)^2 \right) \sin \frac{\pi}{v_1} + \cos \frac{\pi}{v_1} \right)}}$$

$$\psi = \frac{\lambda_1}{\pi} \psi', \quad \psi' = \arctg \frac{a}{1 - a \frac{\delta}{\omega}}$$

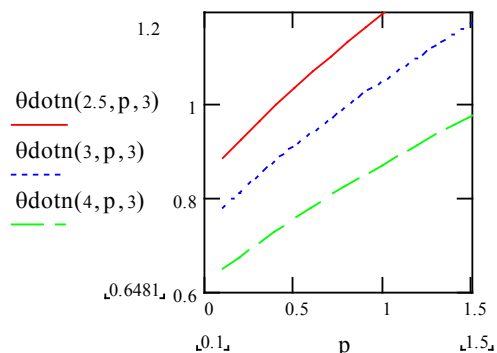
$$a = \frac{\sin \frac{\pi}{v_1}}{\frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{k_1}{k_1 - 1} \right) \sin \frac{\pi}{v_1} - \cos \frac{\pi}{v_1} + \left(\frac{k_1}{k_1 - 1} \right)^{\frac{1}{v_1}}}, \quad p = \frac{C_k}{C_e}$$

Зависимостта $\theta dotn = \left(\frac{\theta d}{\pi} \right)$ във функция на

коефициентът на разколебаване k1 и честотният коефициент v1 е построена на

фиг. 3. Зависимостта $\omega_{otno} = \frac{\omega_{01}}{\omega_{02}}$ във функция на коефициентът на разколебаване k1 и коефициента p1 е:

$$\omega_{otno}(k_1, p) = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1 + \left(\frac{\ln \left(\frac{k_1}{k_1 - 1} \right)}{\pi} \right)^2}{\left(1 + \frac{1}{p} \right)} - \left(\frac{\ln \left(\frac{k_1}{k_1 - 1} \right)}{\pi} \right)^2 \right]}}$$

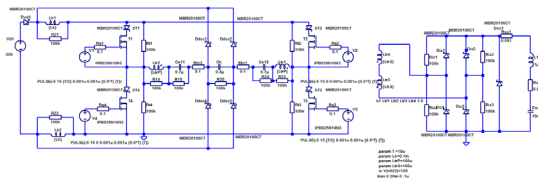


Фиг. 3. Ъгъл на провеждане в относителни единици.

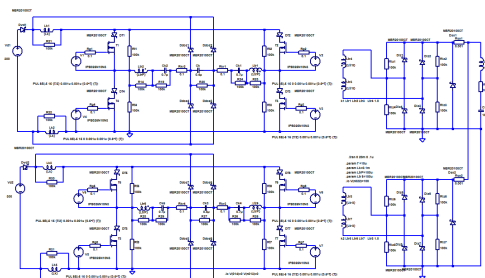
На фиг. 2 е показана схема на преобразувател за зареждане на елементи за съхранение на енергия. За изследването и моделно

базираното проектиране на преобразувателя са създадени симулационни модели на едно звено и паралелно работещи две звена със софтуер LTSpice (фиг. 4 и фиг. 5). В моделите към силовата верига са добавени и допълнителни елементи в паралел на активните и пасивни компоненти с цел ускоряване на изчислителния процес.

На фиг. 5 е показан модел на два инвертора работещи върху общ товар.



Фиг. 4. Симулационен модел на едно звено



Фиг. 5. Симулационен модел на паралелно работещи звена

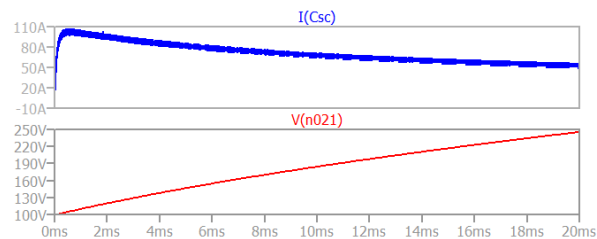
СИМУЛАЦИОННИ РЕЗУЛТАТИ

Проведени са симулационни изследвания за двата преобразувателя в процесът на зареждане на елемент за съхранение на енергията - суперкондензатор. Капацитетът на кондензатора в модела е със значително намалена стойност за постигане на по-малки симулационни времена, при които да се покаже поведението на преобразувателя в процеса на зареждане. Моделът на фиг. 5 е съставен от две идентични звена като преобразувателя от фиг. 4.

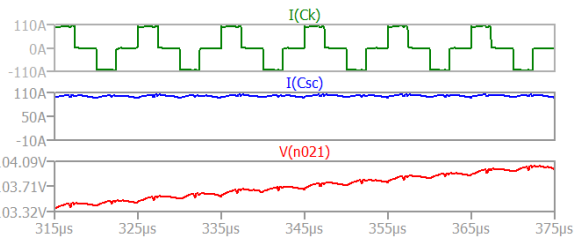
На фиг. 6 и фиг. 7 са показани времедиagramите от симулацията на работата на едно звено, където: $I(Csc)$ – ток през елемента за съхранение на енергия – суперкондензатора, $V(n021)$ – напрежение върху суперкондензатора Csc и $I(Ck)$ – ток през конден-

затора Ck . Началната стойност на напрежението върху Csc е 100V.

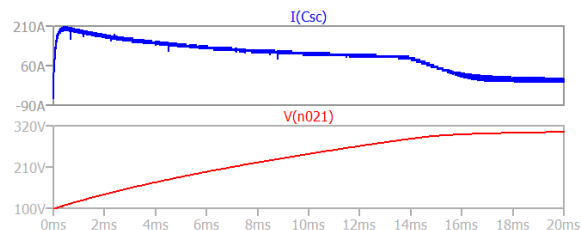
На фиг. 8 и фиг. 9 са показани идентични резултати, но при съвместна работа на две звена. Показани са: $I(Csc)$ – ток през елемента за съхранение на енергия – суперкондензатора, $V(n021)$ – напрежение върху кондензатора Csc и $I(Ck)$ – ток през кондензатора Ck .



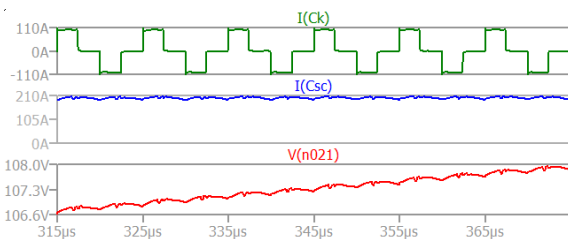
Фиг. 6. Резултати от работата на едно звено



Фиг. 7. Резултати от работата на едно звено



Фиг. 8. Резултати от паралелно работещи звена

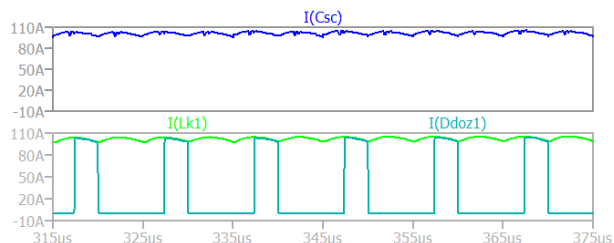


Фиг. 9. Резултати от паралелно работещи звена

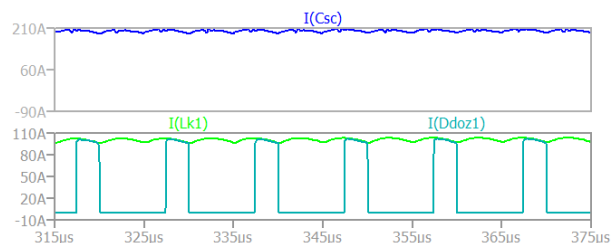
От показаните по-горе резултати, се вижда, че разликата в режимите на работа на едно звено и на едно звено от паралелно свързани такива в системата е промяната на противо-електродвижещото напрежение на

зареждания елемент за съхранение на енергия (ЕСЕ).

На фиг.10 и фиг.11 са показани време-диаграмите от симулацията на работата на едно звено (фиг.10) и при съвместна работа (фиг. 11), където: $I(Lk1)$ – ток през дросела Lk , $I(Ddoz1)$ – ток през ограничителния диод $Dd1$.



Фиг. 10. Резултати от работата на едно звено



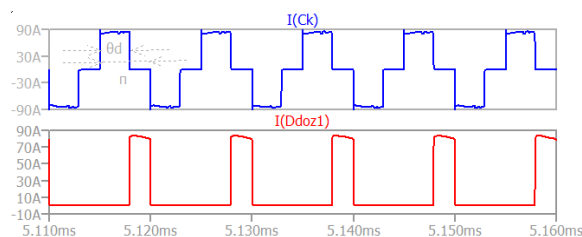
Фиг. 11. Резултати от паралелно работещи звена

И при тези резултати се вижда, че няма разлика в работата на едно звено работейки самостоятелно и работейки в паралел върху общ товар.

ПОДХОД ЗА МОДЕЛНО-БАЗИРАНО ПРОЕКТИРАНЕ

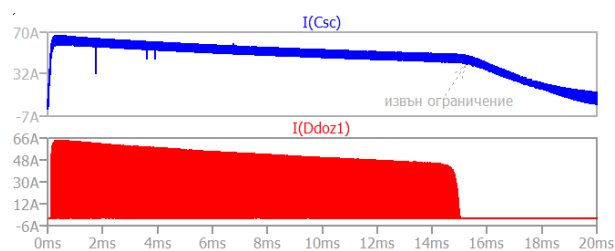
При работата на предложената схема за зареждане на суперкондензатори, тъй като напрежението върху зареждания елемент се променя, се променя и режимът на работа на преобразувателя. При проектирането на преобразувателя, може да се използва предложената в [5], методика за проектиране на инвертор на ток с ограничение на напрежението върху комутация кондензатор. Една от особеностите в режима на работа, е че при определена стойност на напрежението върху суперкондензатора, ограничителните диоди нямат условие за отпушване и не провеждат и инвертора се държи като класически инвертор на ток. Тъй като е трудно да се определят аналитично всички токове

и напрежения в схемата за целия процес на зареждане, може да се използва моделно-базирано проектиране. При първоначалното проектиране на схемата се задава максималната мощност консумирана от преобразувателя в режим с ограничение, дълбочината на ограничение (ъгълът след който се включват ограничителните диоди θ_d) и честотата на работа на преобразувателя. Средната стойност на консумирания от зареждащия източник ток I_d е: $I_d = 4 \cdot f \cdot C_k \cdot U_d$ [5]. На фиг. 12 са обозначени ъгълът θ_d и полупериода π .



Фиг. 12. Токове през кондензатора Ck и ограничителния диод $Dd1$

След проведеното първоначално оразмеряване на елементите и използване на създадения симулационен модел на преобразувателя се провеждат симулационни изследвания, за да се проследи промяната на токовете и напреженията за елементите в целия процес на зареждане и се коригират стойностите на елементите с цел постигане на режим удовлетворяващ допустими стойности на токовете и напреженията.



Фиг. 13. Резултати от изследване на едно звено

На фиг.13 са представени резултати от симулацията на работата на едно звено за тока през зареждания суперкондензатор $I(Csc)$ и тока през ограничителния диод при друга начална стойност на напрежението върху кондензатора. В диаграмите се вижда момента, след който ограничителните диоди нямат условия за отпушване и не-работят. В този

режим „извън ограничение“, инверторът работи като класически инвертор на ток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата са представени разработени симулационни модели на инвертори на ток с ограничение на напрежението върху комутиращите кондензатори. Моделите позволяват изследването на съвместната работа на двата преобразувателя върху общ товар. При работата на преобразувателите за зареждане на елементи за съхранение на енергия няма установен режим, тъй като се променя напрежението върху ЕСЕ, а следователно и режимът на работа на преобразувателите. На базата на аналитични изрази са проектирани преобразувателите за начална стойност на напрежението върху зареждания елемент равна на нула. При проведените изследвания с моделите се установява, че при паралелно свързване на преобразувателите, токът на зареждане на суперкондензатора е сумата от токовете на двете звена и е два пъти по-голям спрямо същия товар захранен с едно звено. Това се дължи на факта, че товара се захранва с източници на ток.

От съотношението на кондензаторите C_k и C_e , зависи нивото на ограничение.

Недостатък на предложения схематичен вариант е нуждата от съгласуващ трансформатор с две първични намотки (сложна конструкция), но за сметка на това се постига галванично разделяне на товара за всяко едно от звената.

Друг недостатък на схемата е нуждата от последователно свързани диоди с приборите за поемане на обратните напрежения.

Чрез промяна на честотата на управление и захранващото напрежение U_d , може да се регулира тока на зареждане на суперкондензатора.

Сравнението на стойностите получени от аналитичните изрази и тези от модела, потвърждават възможността проектирането да се извършва за конкретен режим на работа, а избора на активните и пасивни елементи да се извърши след симулационно изследване с помощта на разработените модели.

Благодарности

Докладът е разработен с подкрепата на проект "Моделно базирано проектиране на

силови електронни устройства с гарантирани параметри", ДН07/6/15.12.2016, ФНИ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kroics K., V. Brazis, "Supercapacitor based storage system for efficiency improvement of lead-acid powered light electric vehicle" – IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 25-28 Sept. 2016, Varna, Bulgaria, pp. 1216- 1221.
- [2] T. Jalakas and J. Zakis, "Experimental verification of light electric vehicle charger multiport topology," 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), 2015, pp. 415–418.
- [3] Zhenjie Li; Chunbo Zhu; Jinhai Jiang; Kai Song; Guo Wei, "A 3-kW Wireless Power Transfer System for Sightseeing Car Supercapacitor Charge", IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, Volume: 32, Issue: 5 pp. 3301 - 3316.
- [4] Arnaudov D., N. Hinov, I. Nedyalkov "Resonant converter for charging a supercapacitor stack ", IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC) 2016, Festival and Congress Centre Varna, Varna, Bulgaria, 25 - 28 September, 2016 978-1-5090-1797-3/16/\$31.00 ©2016 IEEE, pp. 192 -197
- [5] Arnaudov D., Semiconductor converters of electrical energy with a voltage limit on the switching elements, PhD thesis, Technical university of Sofia, 2003 (in Bulgarian).
- [6] Madzharov, N., Autonomous inverters with energy dosing for ultrasonic application, Proceedings of ICEST 2013, vol. 2, pp.647-651.
- [7] Madzharov, N., High-frequency power source with constant output power, Journal of Engineering Science and Technology Review, 2016, pp.157-162.
- [8] Sun, L., Y. Chen, X. Xia, L. Peng, Y. Kang, Design and optimization of parallel DC-DC system based on current-driven phase shift full bridge converter, 29th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014, ISSN: 1048-2334, pp. 2048-2053.
- [9] Sanjay Tolani, Parthasarathi Sensarma, An Instantaneous Average Current Sharing Scheme for Parallel UPS Modules, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, Volume: 64, Issue: 12, pp. 9210 – 9220.