

ОБОБЩЕН МОДЕЛ НА ПАРАЛЕЛЕН РЕЗОНАНСЕН ИНВЕРТОР

GENERALIZED MODEL OF PARALLEL RESONANCE INVERTER

Nikolay Hinov

Technical University of Sofia, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Power Electronics department, 8 blvd. "St. Kliment Ohridsky", Sofia, Bulgaria

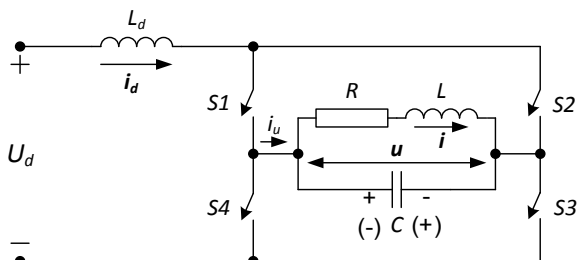
Abstract

The work presents a generalized mathematical model of a parallel resonant inverter without inverse diodes. It is designed for the two main operating modes - continuous continuous current (current inverter) and discontinuous continuous current (resonant inverter). The model is based on switching functions, which represent the operation of the power circuit in the two half-periods of the inverter operation. The model is implemented in the visual programming environment Matlab / Simulink. Verification of the model is made with computer simulations and real electrical devices - induction heating systems. The design of the converters was done using the original design methodologies created by the author. They are based on a unified approach to analyzing resonant inverters with technological application.

Keywords: resonant inverters; current fed inverters; modeling; analysis; model-based design.

ВЪВЕДЕНИЕ

Резонансните преобразуватели на електрическа енергия намират широко приложение в индустрията, комуникациите, енергетиката, транспорта и бита. Новите индустриални технологии и развитието на елементната база, изграждаща електроните преобразуватели правят актуални въпросите свързани с техния анализ, моделиране и проектиране [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Обект на настоящата работа е създаването и провеждането на изследвания с обобщен модел на мостов паралелен инвертор, показан на фиг. 1.



Фиг. 1. Паралелен тиристорен инвертор с активно-индуктивен товар

Схемата е съставена от входен дросел L_d , полупроводникови ключове с едностранна проводимост $S1 \div S4$ (обикновено тиристори при приложения за реализации

на електротехнологии), товарен кондензатор C , активно товарно съпротивление R и реактивно L (индуктивно) съпротивление на товара.

За синтезирането на обобщения модел се използва метода с превключващи функции [7, 8]. Този метод намира широко приложение за изследване на преобразуватели на електрическа енергия с използването компютърна техника и технологии. Основното негово предимство, е че при него процесите протичащи в силовата схема се описват от една и съща единна система диференциални уравнения за целия интервал на изследване. От друга страна недостатък на метода е, че процесът на формиране на системата диференциални уравнения не може да се формализира за всички схеми, т.е. не е гарантирано свойството универсалност.

МОДЕЛИРАНЕ

На схемата от фиг.1 са отбелязани възприетите положителни посоки на променливите на състоянието: напрежението на паралелния кондензатор $C - u$, тока през входната индуктивност $L_d - i_d$ и тока на товарната индуктивност $L - i$. $C \omega = 2\pi f$ се означава ъгловата честота на управление на

полупроводниковите ключове. В установено състояние схемата може да работи в един от следните режими:

1. Режим на непрекъснат ток (режим на инвертор на ток). Той се получава при големи стойности на индуктивността на входния дросел L_d [9, 10, 11, 12]. Характерно за него, е че входният ток е непрекъснат и изходното напрежение се формира от последователно превключване на отделните двойки прибори от моста.

2. Режим на прекъснат ток до граничен (режим на резонансен инвертор). Такъв режим се получава при малки стойности на индуктивността на входния дросел, като входният ток е прекъснат. По време на паузата, когато $i_d = 0$, товарният кръг R, L, C се отделя от входната верига и в него протичат самостоятелни процеси [13, 14].

При изследването се приема, че всички градивни елементи в схемата са идеални. В повечето практически случай това е близко до реалността.

Като се използват законите на Кирхов за баланса на токовете и напреженията в силовата верига се получава следната система диференциални уравнения, в която участват променливите на състоянието:

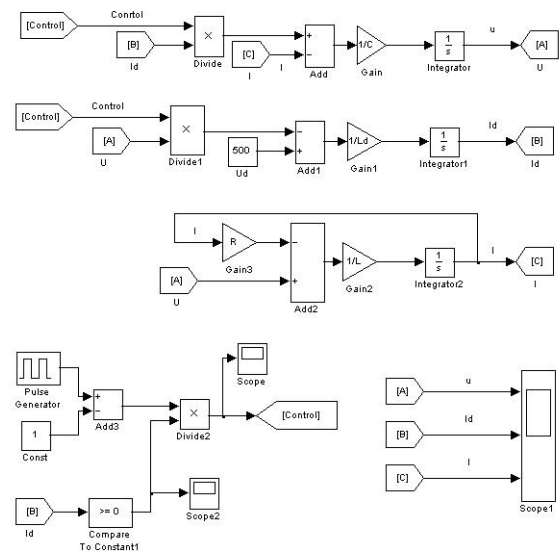
$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = 0.u + \frac{F(\omega t)}{C}.i_d - \frac{1}{C}.i + 0.U_d \\ \frac{di_d}{dt} = -\frac{F(\omega t)}{L_d}.u + 0.i_d + 0.i + \frac{1}{L_d}.U_d \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}.u + 0.i_d - \frac{R}{L}.i + 0.U_d \end{cases} \quad (1)$$

където $F(\omega t)$ е превключваща функция, която отразява промяната в силовата схема при провеждането на всяка от двойките полупроводникови ключове.

Ако инверторът работи в режим на прекъснат ток, за разлика от разглеждания до сега случай всички ключови прибори по време на паузата са запушени и следователно $i_d = 0$. При това в изходния (товарния) кръг R, L, C , който е останал изолиран от останалата част на схемата има запасена енергия от предишния интервал, когато е

консумирана енергия от постояннотоквията захранващ източник. Вследствие на това в товарния кръг се развиват свободни затихващи процеси. Възможни се три режима на развитие на процесите в кръга в зависимост от неговите параметри – колебателен, апериодичен и критично – апериодичен [7, 8]. Независимо от това те се описват със същата система диференциални уравнения (1), като в нея е отпаднал входният ток и захранващото напрежение.

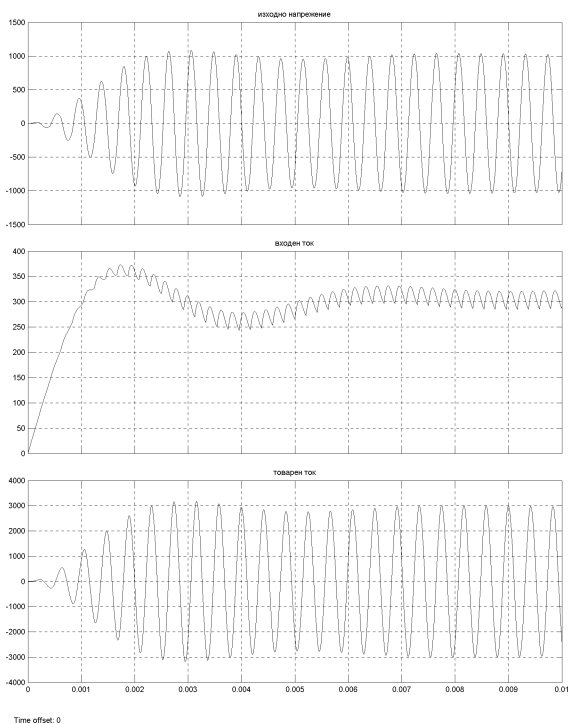
Има много начини за решаване на тази система. В работата е избрана средата Matlab/Simulink, която използва средствата на визуалното програмиране и е подходяща за използване от инженери. Реализацията на модела е показана на фиг. 2.



Фиг. 2. Обобщен модел на паралелен инвертор активно-индуктивен товар

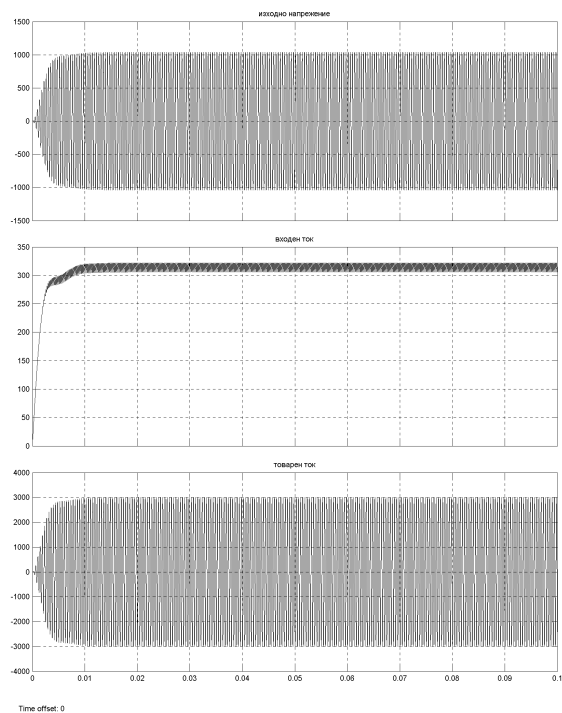
Моделът е верифициран с помощта на компютърни симулации и реални уредби за индукционно нагриване. Получени са резултати със доста добра точност – разлика под 5%, която се дължи основно на допускането за идеалност на всички схемни елементи.

С представения модел са проведени числени експерименти, които целят определяне на стойност на входния дросел, при която има най-кратък преходен процес на пуск без пренапрежения и свръхтокове. За първоначалното проектиране е използвана оригинална авторска методика [9].



Фиг. 3. Резултати от моделирането на паралелен инвертор на ток със стойност на $L_d=1.367\text{mH}$

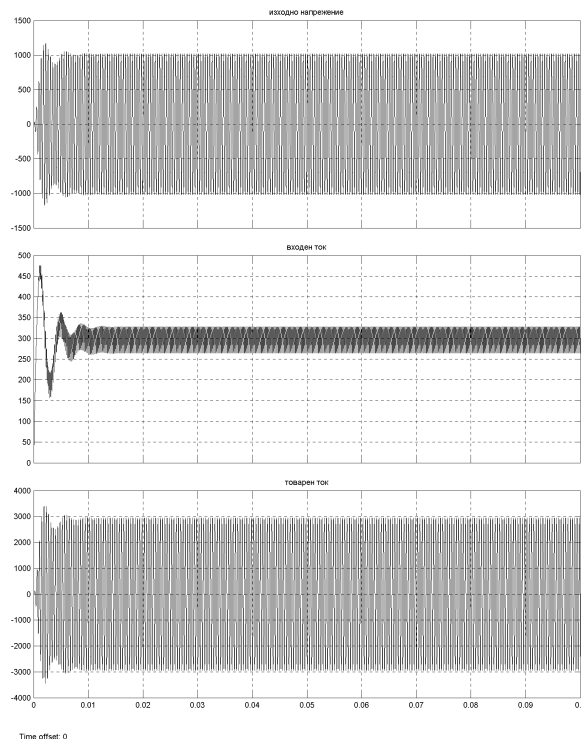
Проектиран е паралелен инвертор на ток със следните параметри: изходна мощност 160kW; изходно напрежение 750V; фактор на мощността на товара $\cos \varphi=0.1$; работна честота 2.4kHz.



Фиг. 4. Резултати от моделирането на паралелен инвертор на ток със стойност на $L_d=3\text{mH}$

В резултат на проектирането са получени следните стойности на схемите елементи: входна индуктивност $L_d=1.367\text{mH}$; параметри на товара: $R=0.0352\Omega$, $L=23.1969\mu\text{H}$, товарен кондензатор $C=204.8029\mu\text{F}$. С тях са получени резултати, показани на фиг.3. От изследването на преходния процес се установява, че той има колебателен характер и се преминава в установен режим за 100ms.

На фиг.4 са показани резултати със приблизително двойно по-голяма стойност на входната индуктивност $L_d=3\text{mH}$, като не се променени останалите схемни елементи. Вижда се, че преходния процес е апериодичен без свърхтокове и пренапрежения стойност, като преминаването в установен режим става за около 10ms.

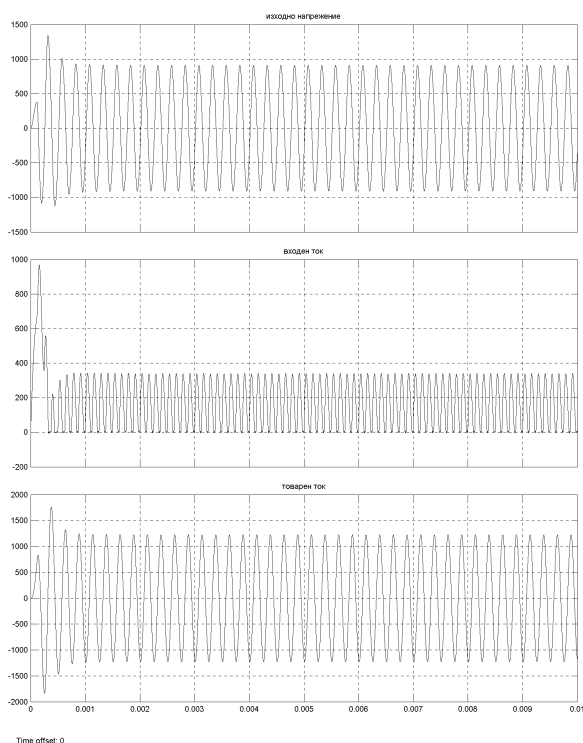


Фиг. 5. Резултати от моделирането на паралелен инвертор на ток със стойност на $L_d=0.75\text{mH}$

Извършен е числен експеримент с модела и при приблизително двойно по-малка стойност на входната индуктивност в сравнение с проектираната - $L_d=0.75\text{mH}$. Резултатите са показани на фиг. 5. От тях се установява, че преходния процес е отново колебателен с по-голяма амплитуда от този при фиг.3, но пък е по-къс като продължителност.

Модела е верифициран на базата на компютърни симулации и чрез сравнение с работещи устройства за реализиране на индустриални технологии.

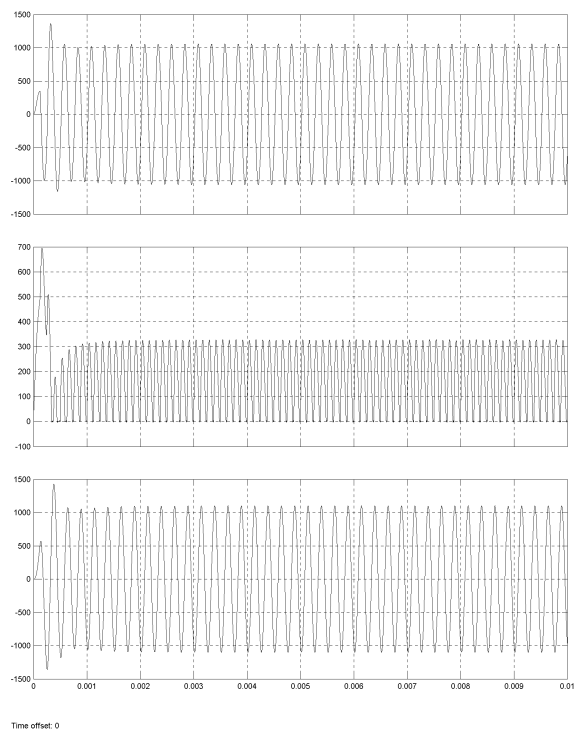
Проведени са експерименти и в режим на работа като резонансен инвертор. С помощта на методика за инженерно проектиране е проектиран паралелен резонансен инвертор със следните параметри: изходна мощност 100kW; изходно напрежение 700V; фактор на мощността на товара $\cos \varphi=0.15$; работна честота 4kHz.



Фиг. 6. Резултати от моделирането на паралелен резонансен инвертор със стойност на коефициента $k=1.13$

В резултат на проектирането са получени следните стойности на схемите елементи: входна индуктивност $L_d=52.8735\mu\text{H}$; параметри на товара: $R=0.1102\Omega$, $L=28.9136\mu\text{H}$, товарен кондензатор $C=63.1915\mu\text{F}$. С тях са получени резултати, показани на фиг.6. От изследването на преходния процес се установява, че той е съпроводен с първоначална работа в режим на непрекъснат ток, като се характеризира с близо трикратно увеличение на входния ток в сравнение с установен режим. Това показва, че проектирането не е удачно, въпреки, че в установен режим се постигат параме-

трите на заданието. Това налага да търсим друга стойност на коефициента на разколебаване k , с която да се повтори проектирането, като целта е да се ограничат колкото е възможно върхтоковете при пуск. Вследствие на редица експерименти е установена стойност на k , за която се изпълнява това ограничение по максималната стойност на входния ток. Крайните резултати от този итерационен процес са показани на фиг. 7.



Фиг. 7. Резултати от моделирането на паралелен резонансен инвертор с оптимална стойност на коефициента $k=1.31$

По този начин само с числени експерименти се получава оптимизация при зададен определена целева функция и ограничения – например максимални стойности на токове или напрежения на отделни елементи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е представен обобщен модел на паралелни инвертор с електротехнологично приложение. Той е реализиран в съвременна програмна среда за визуално програмиране, като неговата формализация позволява реализацията в произволна среда за математичен софтуер, включително и такива, които са безплатни.

С модела са проведени числени експерименти, целящи оптимизиране на преходния процес на пуск в двата изследвани режима. Вследствие на това са определени подходящи стойности на входната индуктивност.

Предложената процедура е важен елемент от нов подход за проектиране на електронни преобразуватели на електрична енергия наречен моделно базирано проектиране. Неговата същност е създаване на специализирани математични модели на базови схеми, каквато е паралелния инвертор, чрез експерименти с които се намират оптималните стойности на схемните елементи при зададена целева функция и ограничения.

Използвания метод е много подходящ и от методична гледна точка, в това число и за обучение по силова електроника.

БЛАГОДАРНОСТИ

Извършеното изследване се реализира в рамките на проекта "Моделно базирано проектиране на силови електронни устройства с гарантирани показатели", договор ДН 07/06 / 15.12.2016 г., с Фонд научни изследвания.

REFERENCE

- [1] Ned Mohan, Undeland, Tore M.; Robbins, William P., „Power Electronics - Converters, Applications, and Design (3rd Edition)”, © 2003 John Wiley & Sons.
- [2] Berkovich E. I., G. V. Ivenskyi and other; High-frequency thyristor converters for electrical devices, Energoatomizdat, Leningrad 1983. (in Russian)
- [3] G. Zinoviev, Fundamentals of Power Electronics - part II, Novosibirsk State

University, Novosibirsk, Russia, 2004, (in Russian).

- [4] M. H. Rashid, “Power Electronics handbook: devices, circuits, and applications”, Academic Press, 2007.
- [5] R. W. Erickson, D. Maksimovic, “Fundamentals of Power Electronics”, Second Edition, Kluwer Academic Publishers Group, 2001.
- [6] B. L. Dokić, B. Blanuša, “Power Electronics Converters and Regulators” - Third Edition, © Springer International Publishing, Switzerland 2015, ISBN 978-3-319-09401-4.
- [7] E. Popov. “Analysis, Modeling and Design of Converter Units (Computer – Aided Design of Power Electronic Circuits)”, Technical University Printing House, Sofia, 2005 (in Bulgarian).
- [8] E. Popov, “Computer Aided Design of Power Electronic Devices - Solved Examples”, Publishing Technical University of Sofia, pp. 24-32, 2014. (in Bulgarian).
- [9] N. L. Hinov, “Power converters of electrical energy with industrial application”, Ph.D. Thesis, Technical University, Sofia, 1998, (In Bulg.)
- [10] Brichant F., L’ondistor, Dunod, Paris, 1997. (in French)
- [11] Bobcheva M., N. Gradinarov and other; Power Electronics; Technical University Press, Sofia 2001. (in Bulgarian)
- [12] Gradinarov N.P.; Analysis and development of autonomous resonant inverters with electrical application, Ph.D. Dissertation, Technical University of Sofia, 2002. (in Bulgarian).
- [13] A.L. Shenkman, B. Axelrod, V. Chudnovsky, A new simplified model of the dynamics of the current-fed parallel resonant inverter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 47, Issue: 2, Apr 2000, pp. 282 – 286.
- [14] V. Chudnovsky, B. Axelrod, and A. Shenkman, “An approximate analysis of a starting process of a current source parallel inverter with high-Q induction heating load,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 12, pp. 294–301, May 1997.