

**МОДЕЛНО-БАЗИРАНА ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛЕН  
РЕЗОНАНСЕН ИНВЕРТОР С ОБРАТНИ ДИОДИ****Николай Хинов<sup>1</sup>, Богдан Гилев<sup>2</sup>, Стоян Попов<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Технически университет - София<sup>2</sup>Технически университет - София<sup>3</sup>Технически университет - София**MODEL-BASED OPTIMIZATION OF SERIAL RESONANCE INVERTER  
WITH REVERSE DIODES****Nikolay Hinov<sup>1</sup>, Bogdan Gilev<sup>2</sup>, Stoyan Popov<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Technical University of Sofia<sup>2</sup>Technical University of Sofia<sup>3</sup>Technical University of Sofia**Abstract**

The paper considers a model-based optimization of a series resonant inverter with reverse diodes. The optimization is performed in terms of achieving a certain nature and duration of the transition process. Two cases of reference curves are considered: with respect to the voltage of the resonant capacitor and with respect to the resonant current. As a result of the optimization, values of the circuit elements have been obtained, which guarantee the output indicators and the determined duration and nature of the transient start-up process. The obtained results are useful from the point of view of control synthesis and for the design and training in power electronics. In this regard, this approach, combined with classical design methods allows for the integration of modern mathematical methods for modeling and calculations in power electronics.

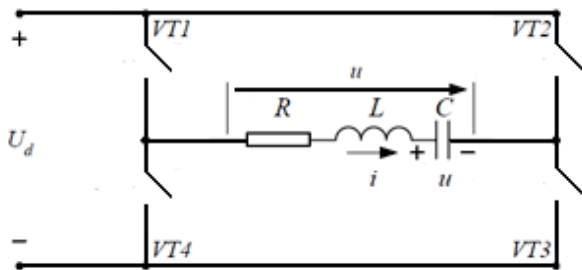
**Keywords:** serial RLC converter, wrap separation, model-based design**ВЪВЕДЕНИЕ**

По своята същност, развитие и приложенията силовата електроника е интердисциплинарна, като концентрира най-разнообразни области не само на техниката, но и на икономиката, физиката и математиката. В резултат на нейното развитие към настоящия момент се наблюдава голямо разнообразие както на топологии на силовите схеми, така и на работни режими. В този аспект едни от разпространените като употреба, устройство и поддръжка и същевременно най-добре изучени са последователните RLC инвертори [1-3]. От своя страна при определени съотношения на схемните им елементи те могат да работят в резонансни или аperiодични режими [4-6]. В настоя-

щата работа е представен подход за оптимизация на последователен резонансен инвертор чрез използването на т. нар. обвивка на напрежението. Като целта на направената оптимизация е да бъде ограничен по стойност отгоре и като времева продължителност преходният процес. За решаването на поставената задача е създаден модел в Simulink. Реализацията на самата оптимизация е извършена с помощта на авторски програми, написани и изпълнени в средата на Matlab. от друга страна в изследванията на някои автори интегрирането на гореизложените оптимизационни процедури се дефинира като прилагане на техники на изкуствения интелект в силовата електроника [7, 8]

## ИЗЛОЖЕНИЕ

От принципа на действие и анализа на електромагнитните процеси в схемата е известно че, разглеждания инвертор е по-части линейна система. Обикновено неговото моделиране се извършва с помощта на система от диференциални уравнения, които описват променливите на състоянието във веригата [4, 5]. От друга страна при съставянето на моделите се пренебрегват загубите в градивните елементи, а също захранващите източници се приемат за идеални. В ръкописа изследванията са направени на базата на мостовата схема на последователен мостов инвертор с обратни диоди, която е показана на фигура 1.



Фигура 1. Общ модел на последователен RLC инвертор

Силовата част на инвертора се състои от: Полупроводникови ключове с двупосочна проводимост  $VT1 \div VT4$ , резонансен кондензатор  $C$ , активно съпротивление на товара  $R$  и резонансна индуктивност  $L$  върху товара. Стойностите на схемните параметрите при конкретното изследване са дадени в Таблица 1.

Таблица 1

$U_d = 100 \text{ V}$ – входно напрежение
$R = 1 \ \Omega$ – съпротивление
$L = 10 \ \mu\text{H}$ - индуктивност
$C = 10 \ \mu\text{F}$ – капацитивност
$f = 1/T = 80000 \text{ Hz}$ – честота на превключване.

По своя начин на работа конверторът е система с променяща се структура, като превключването между двете състояния се извършва от системата за управление. За синтеза на общия модел се използва методът на превключващата функция [9]. Поради своите предимства и нагледна физическа интерпретация този метод намира голямо

приложение за изследване на електрически преобразуватели, използващи компютърни методи. При изследваната схема в рамките на един период структурата се променя два пъти. Промяната се състои в промяна на знака на  $U_d$ . Този процес на превключване между различните структури се моделира чрез умножаване на  $U_d$  с функцията *control*.

Уравненията за моделиране на динамиката на инвертора са:

$$\begin{aligned} C \frac{du_C}{dt} &= i \\ L \frac{di}{dt} + u_C + Ri &= U_d \text{control}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

за

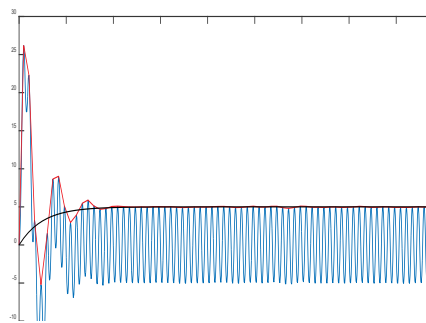
$$\text{control}(t) = \begin{cases} -1, & \text{for odd half period} \\ 1, & \text{for even half period} \end{cases}$$

където  $u_C$  е напрежението върху резонансния кондензатор, а  $i_L$  – инверторния ток. Обикновено методиките за проектиране на силови електронни устройства и системи са базирани на анализа в установен режим на работа след завършването на преходните процеси. По този начин така определените стойности на резонансната индуктивност и кондензатор, не са свързани с протичането определени по характер и продължителност преходни процеси. От друга страна техните стойности оказват значително влияние върху пусковите процеси и динамиката на схемата, което е от съществено значение и за синтеза на управление.

Определянето и решаването на оптимизационни задачи е основен инструмент за проектиране на силови електронни схеми и устройства. Различни примери за решаване на оптимизационни задачи въз основа на разработени собствени програми, както и чрез използването на математически софтуер са разгледани в литературата, характерно е за всеки да задава определена целева функция (максимална ефективност, минимални загуби) и ограничения (гранични стойности на елементите на веригата), а при решаването на по-сложни задачи се използва инструментариумът за многокритериална оптимизация [10-14].

Авторите са избрали използването на оптимизация, базирана на модел, тъй като чрез нея могат да бъдат внедрени както стандартни (еднокритериални), така и по-сложни оптимизационни процедури, чрез използване на специално създадена програма MATLAB. По този начин се дефинира метод за проектиране на силови електронни устройства и системи, който не отрича, а надгражда и развива класическите методи, основани на анализ само в стационарни състояния при работа. Така на практика се постига интегрирането на съвременните информационни и комуникационни технологии в научните изследвания и обучението по силова електроника, което ускорява и подобрява процеса на прототипиране и внедряване в производството.

В този конкретен случай ще въздействаме върху формата на напрежението върху резонансния кондензатор  $u_C$ , като отново оптимизираме стойността на кондензатора  $C$ . Този проблем за оптимизация не може да бъде решен с помощта на вградена процедура в MATLAB, тъй като напрежението  $u_C$  е променливо (AC) и не е възможно да се зададат ограничения за неговата големина. За да се реши този проблем, трябва да се направи подходящо преобразуване на стойността  $u_C$ , като се запази работния режим на инвертора, чрез поддържане на постоянна резонансна честота на последователната резонансна верига - условието  $LC = const$ . В конкретния случай това се прави след свързване на всички максимуми в положителната полуwave на напрежението върху резонансния кондензатор, като по този начин се образува крива, показана на фигура 2 в червен цвят. Тази крива представлява положителната "обвивка" на напрежението  $u_C$ . На посочената фигура са използвани следните обозначения: синьо - действителната форма на напрежението  $u_C$ ; червено - обвивката на  $u_C$ ; черно - зададената еталонна обвивка.



Фигура 2 Обвивка, еталон и стойност на напрежението  $u_C$

Резултатите, представени на фигура 2, са получени в следствие на използваните първоначални стойности на схемните елементи, дадени в Таблица 1.

Определянето и решаването на оптимизационни проблеми е основен инструмент за проектиране на силови електронни схеми и устройства с гарантирани показатели. Различни примери за това са показани в [11-14]. В процеса на оптимизация ще се опитаме да напаснем формата на „обвивката“ на напрежението  $u_C$ , към избраната референтна траектория на фиг. 2 (черно). За тази цел функционала за оптимизация придобива вида:

$$I(C) = \int_0^{t_{end}} (\text{wrap}(u_C) - u_{C,ref})^2 dt \rightarrow \min_C \quad (2)$$

където  $t_{end} = 1e - 3$

Избираме уравнение на еталонната обвивка е:

$$i_{ref} = 5(1 - e^{-t/T_{stat}}) \text{ и } T_{stat} = 5 \cdot 10^{-5} \quad (3)$$

Оптимизацията на функционала (2) се извършва при ограничения тип равенства (1) и неравенства  $C_{min} \leq C \leq C_{max}$ , т.е.

$$\begin{aligned} C_{min} - C &\leq 0 \\ C - C_{max} &\leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Ограничение е зададено  $C_{min} = 0.5C$  и  $C_{max} = 5C$  (съгласно първоначалната стойност от Табл.1).

От друга страна при задаване на ограниченията се изпълнява условието за поддържане на избрания при проектиране работен режим:  $LC = const$ .

Получената в резултат на решаването на оптимизационната задача стойност за  $C$ , зависи от избора на големината на  $t_{end}$ . Това е така, защото сумарната грешка се получава от натрупването на грешките по време на преходния процес и по време на установения режим. При малка стойност на  $t_{end}$  ще доминира грешката получена по време на преходния процес, а при голяма - ще преобладава грешката в установен режим. В

крайна сметка успешното решаване на оптимизационната задача зависи от осъществяването на добър баланс при избора на  $t_{end}$ .

Този проблем за оптимизация се решава в средата MATLAB, но за тази цел се съставя авторска програма (m-файл).

Моделът на преобразувателя, реализиран с диференциалните уравнения (1), участва в програмата, като самата оптимизация се извършва с командата `fminbnd` [15].

```
v=fminbnd(@FunOptim,5e-6,5e-5,options);
```

В тази програма диференциалните уравнения са вградени във функцията `FunOptim` и се решават по метода `ode45`. Точките, представляващи обвивката на  $u_C$ , се отделят от решението на  $u_C$  с помощта на специално разработен код. Интеграл (2) се заменя със сумата от квадрати на разликите между точките на обвивката `wgap(u_C)` и еталонната обвивка  $u_{C,ref}$ .

Резултатът от изпълнението на програмата е показано на фигура 3.

```
Func-count   x           f(x)      Procedure
      1  2.21885e-005   388.289   initial

Optimization terminated:
the current x satisfies the termination criteria using OPTIONS.TolX of 1.000000e-004

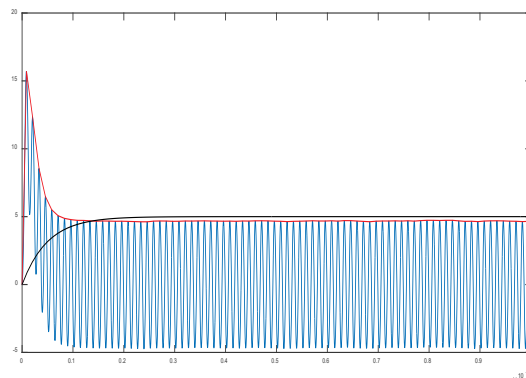
C =
2.2188e-005
|
L =
4.5068e-006
```

**Фигура 3** Краен резултат от изпълнението на програмата

След изпълнението на програмата се получава следният резултат за стойностите на резонансните елементи:  $C = 2.2188e-05$ , а индуктивността се пресмята от условието  $LC = const$ , т.е.  $L = 4.5068e-06$ . Следващата стъпка, за решаване на поставената задача е да се провери дали получените стойности за индуктивността и капацитета са оптимални и удовлетворяват ли поставените в оптимизационната задача условия.

С така намерените оптимални стойности за  $L$  и  $C$  са симулирани графичните резултати показани на фигура 4. От фигурата се

виждат няколко съществени неща. Първо успешно е намалена пиковата стойност на напрежението на резонансния кондензатор по време на преходният процес. Намалена също така и самата продължителност на преходният процес. В установеният процес разликата между обвивката на  $u_C$  и еталонната крива е минимизирана. Това показва, че използваният математически способ за оптимизация довежда до търсените удовлетворителни крайни резултати.



**Фигура 4** Графика на резултатите, при използване на оптималните стойности на  $L$  и  $C$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на представените изследвания и реализираната на базата на модела оптимизация на конкретно силово електронно устройство са направени следните изводи:

1. Използването на средствата за математическо моделиране и разработване на специализирани модели позволява решаване на проблемите на оптимизацията при проектирането на силови електронни устройства и системи, като по този начин се осигурява оптималната работа на самите устройства, вече в процеса на проектиране;
2. Използването на базирана на модели оптимизация решава различни задачи за оптимизация на етапа на проектиране, което е важно за комерсиализацията и прототипирането на силови електронни устройства и системи с различни приложения.

Представеното изследване не отрича а развива съществуващите методики за проектиране, като получените на тяхна база стойности на схемните елементи са отправна точка за тяхното оптимално определяне при задаването на различни ограничения и целеви функции. Разбира се оптимизацията

не може да реши напълно задачата за недопускане на пренапрежения и свръхтокове по време на преходните процеси, но се явява един добър инструмент за постигане на максимума на възможностите на силовата схема, като по този начин се улеснява значително и синтеза и настройката на контролера.

## REFERENCE

- [1] Robert W. Maksimovic, Dragan Erickson, Fundamentals of Power Electronics, Publisher: SPRINGER NATURE, Year: 2020, ISBN: 9783030438791,3030438791
- [2] Issa Batarseh, Ahmad Harb, Power Electronics: Circuit Analysis and Design, Springer, Year: 2018, ISBN: 978-3-319-68365-2,978-3-319-68366-9
- [3] Andrzej M. Trzynadlowski, Introduction to modern power electronics, ohn Wiley & Sons, Year: 2016, ISBN: 978-1-119-00321-2,1119003210
- [4] Ned Mohan, Undeland, Tore M.; Robbins, William P., „Power Electronics - Converters, Applications, and Design (3rd Edition)”, © 2003 John Wiley & Sons.
- [5] B. L. Dokić, B. Blanuša, “Power Electronics Converters and Regulators” - Third Edition, © Springer International Publishing, Switzerland 2015, ISBN 978-3-319-09401-4.
- [6] G. Zinoviev, Fundamentals of Power Electronics - part II, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, 2004, (in Russian).
- [7] X. Li, X. Zhang, F. Lin and F. Blaabjerg, "Artificial-Intelligence-Based Design (AI-D) for Circuit Parameters of Power Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: 10.1109/TIE.2021.3088377.
- [8] S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, "An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 4, pp. 4633-4658, April 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3024914
- [9] E. Popov, “Computer Aided Design of Power Electronic Devices - Solved Examples”, Publishing Technical University of Sofia, pp. 24-32, 2014. (in Bulgarian).
- [10] Branch, M.A., T.F. Coleman, and Y. Li, “A Subspace, Interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems,” SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 21, Number 1, pp 1-23, 1999.
- [11] Byrd, R.H., R.B. Schnabel, and G.A. Shultz, “Approximate Solution of the Trust Region Problem by Minimization over Two-Dimensional Subspaces,” Mathematical Programming, Vol. 40, pp 247-263, 1988.
- [12] Coleman, T.F. and Y. Li, “On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds,” Mathematical Programming, Vol. 67, Number 2, pp 189-224, 1994.
- [13] Coleman, T.F. and Y. Li, “An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds,” SIAM Journal on Optimization, Vol. 6, pp 418-445, 1996.
- [14] Coleman, T.F. and Y. Li, “A Reflective Newton Method for Minimizing a Quadratic Function Subject to Bounds on some of the Variables,” SIAM Journal on Optimization, Vol. 6, Number 4, pp 1040-1058, 1996
- [15] MathWorks, MATLAB Optimization Toolbox™Users Guige, R2021a.