

ОПТИМИЗИРАНЕ МОДЕЛ НА ИНВЕРТОР В SIMULINK

Васил Борисов Иванов,

vasil_bi@abv.bg

• Въведение в системи за управление на инверторите на напрежение

Напрежението в изхода на инверторите има строго определена форма, която зависи от алгоритъма на управление на силовите прибори в схемата. В зависимост от системата променливи напрежения захранващи товара в изхода, най-често се използват еднофазни и трифазни инвертори на напрежение. Формата на тока през товара при положение, че върху него се прилага напрежение със строго определена форма, зависи от характера и параметрите на товарната верига [3]. Структурната схема на система за управление на инвертор е показана на фиг.1.

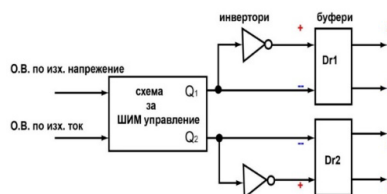


Фиг.1. Обща структурна схема на система за управление на силова част от инвертор.

При използване на метода на симетрична ШИМ на управление в блок „драйвери“ на фиг.1, се получават сигнали за регулиране на силовите прибори. Импулсите в полупериод са симетрични спрямо началото и края. При нерегулируемо управление на изходното напрежение, генератора на ШИМ изработва правоъгълни импулси за изходното напрежение при алгоритъм на управление 0,5, които са несиметрични в полупериод. Моделът на този вид схема може да се опрости чрез използване на интегрални схеми на таймери, задаващи само честотата на изходното напрежение и работещи с коефициент на запълване на изходните импулси 0,5.

Основните елементи от силовата верига на инверторите са полупроводникови прибори, управлявани по ключов метод. Това най-често са биполярни транзистори с изолиран гейт (IGBT), мощни полеви транзистори с индуциран канал (power MOSFET) или тиристори, изключвани от гейта (GTO-thyristors).

Блок схема на управление на еднофазен мостов регулируем инвертор на напрежение е показана на фиг.2.



Фиг.2. Структурна схема за управление с правоъгълни импулси на еднофазен мостов инвертор.

Използва се интегрална схема реализираща широчинно - импулсна модулация ШИМ. Схемата от фиг.2 притежава два изхода за генериране на управляващи сигнали в двата полупериода на изходното напрежение. Импулсите към двете рамена от еднофазен инвертор на напрежение за долните транзистори ($a^- b^-$) и тези за горните ($a^+ b^+$) са инверсни помежду си.

• Моделиране на инвертор на напрежение в „Simulink“

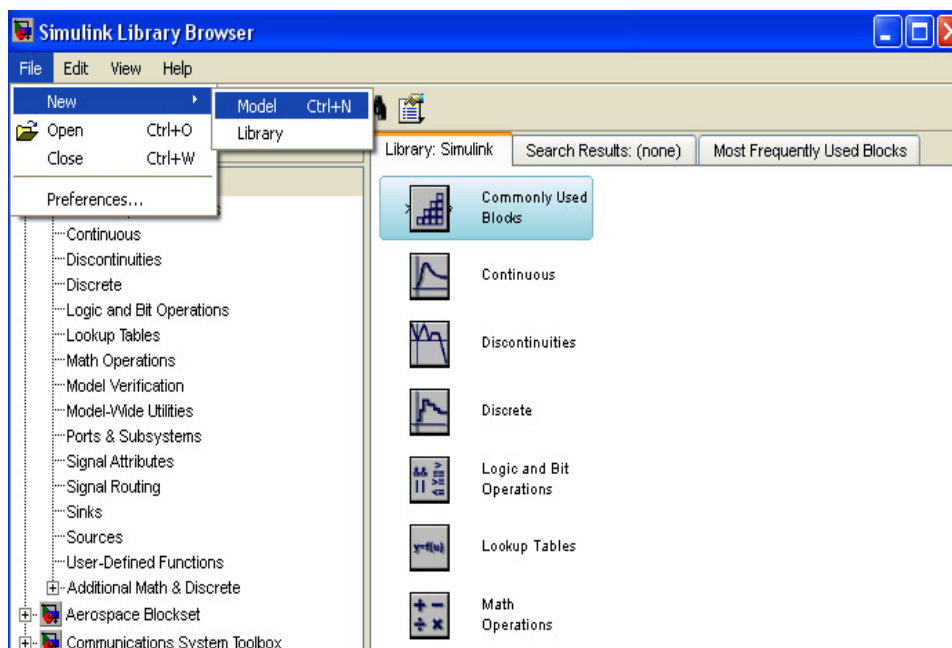
Известни са различни схеми на еднофазни инвертори на напрежение, както и различни алгоритми за фазово управление на силовите прибори и формиране кривата на изходното напрежение при тях. Най-широко приложение са намерили:

- еднофазни инвертори със синусоидална широчинно - импулсна модулация ШИМ на управление. При този вид инвертори хармоничният състав на тока и напрежението са подобрани за сметка на усложнено управление и по-висока цена.
- еднофазни инвертори с правоъгълна форма на изходното напрежение - модифицирана синусоида. Моделират се устройства с фазово регулиран ширина на управляващите импулси. Този метод на симулация ще се използва в настоящите системи.

▪ Методика за моделиране силови електрически системи чрез SIMULINK.

Програмният пакет *Simulink* е предназначен за моделиране на линейни и нелинейни динамични обекти [1]. За целите на настоящото изследване се използват библиотеките на *Simulink SimPowerSystems* и команди от *Matlab*.

Библиотеката *Simulink* е представена като „дървовидна“ структура и пиктограми на фиг.3.



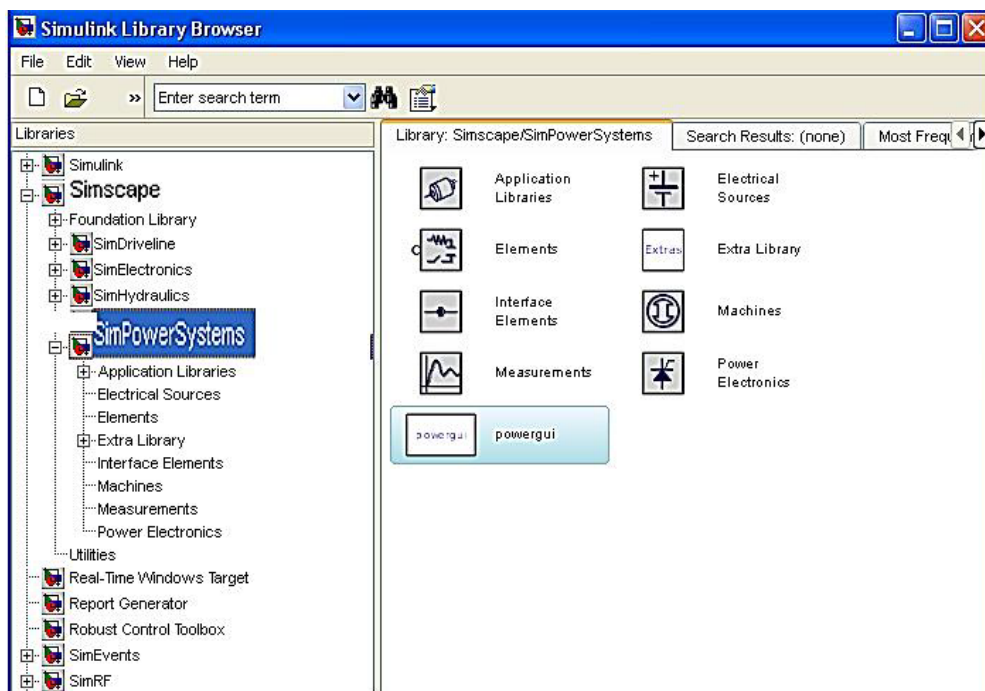
Фиг.3. Библиотека на раздел Simulink Library Browser

Заглавията на групите от блокове определят тяхната функционалност

▪ Алгоритъм за моделиране на функционални блокове и елементи.

SimPowerSystems (SPS) е предназначен за моделиране на силовите устройства.

Раздел Simscape с библиотека SimPowerSystems от фиг.4, притежава набор от функционални блокове, моделиращи активни и пасивни елементи, източници на енергия, електродвигатели, трансформатори, електропреносни линии, съоръжения и мрежи.

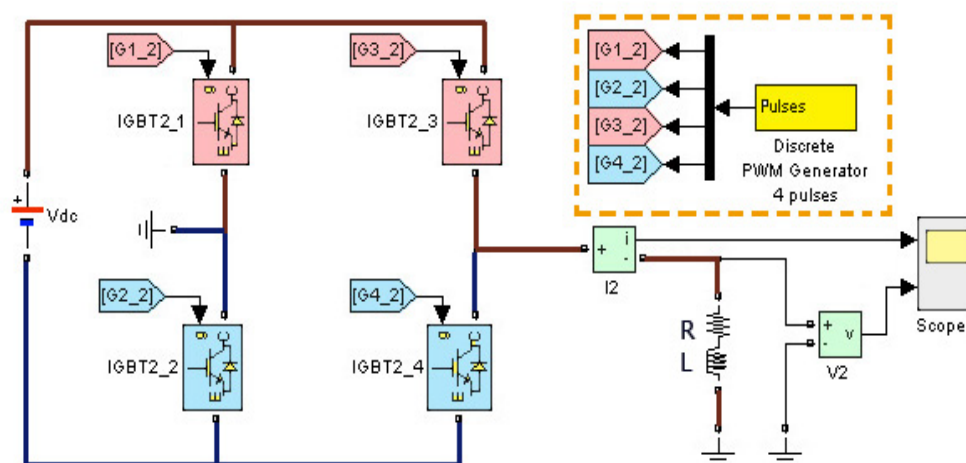


Фиг. 4. Библиотека на раздел Simscape/SimPowerSystems

Показаните блокове от библиотеката моделират параметри и характеристики на електрическите вериги.

Моделираният инвертор на напрежение показан на фиг.5 преобразува постоянното напрежение (DC) в променливо (AC). Силовата част на инвертора е изградена със симулационните блокове от SimPowerSystems IGBT2_1, IGBT2_1, IGBT2_1, IGBT2_1, V_{dc} , R, L, отразяващи само електрическите им параметри и характеристики. Системата за управление и наблюдение на силовата част от модела включва в архитектурата си Simulink функционалните блокове Scope, I2, V2, Pulse, G2_1, G2_2, G2_3, G2_4, отразяващи само алгоритъма на работа и математическите функции на моделиране.

Комплексната работа на Simulink и SimPowerSystems дава възможност да се построи модел на сложно електротехническо устройство, основан на метода на имитационно и функционално моделиране. Комбинацията между S и SPS – модели може не само да симулира работни режими на устройствата във времевата област, но и да изпълнява различни видове анализи (АЧХ).



Фиг.5. Модел инвертор на напрежение с модифицирана синусоида в изхода.

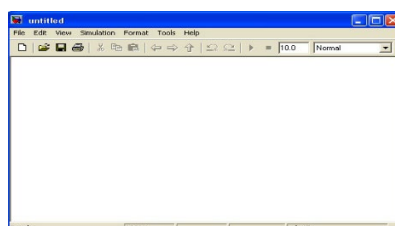
Комуникацията между SPS-моделите е свързвана със съвместимостта между входовете и изходите на елементите от моделите на различни библиотеки. При несъвместимост се използват блок – конвертори от библиотеката на Simulink Library Browser. Осъществяването на електрическите връзки между елементите и функционалните блокове е с изискване за спазване посоките на входящи и изходящи сигнали и поляритета на източниците.

При анализа на даден виртуален модел е целесъобразно да се използва математическият синтезатор на диференциални уравнение, заложен в библиотеката на SimPowerSystems. Изчислителният формат на уравненията е различен и се изпълнява според инструкциите: ode 15s, ode 23s, ode 23t, ode 23tb.

По подразбиране е зададено решаване на диференциалното уравнение при ode 45. Изборът на формата за решаване на диференциалното уравнение се осъществява по сравнение на ефективността след стартиране на модела. Отчита се скоростта на решаване и получената диаграма от процесите на симулация. Правилно зададено е уравнението, ако в резултат от симулацията няма прекъсвания и забавяне във времето при построяване на диаграмите.

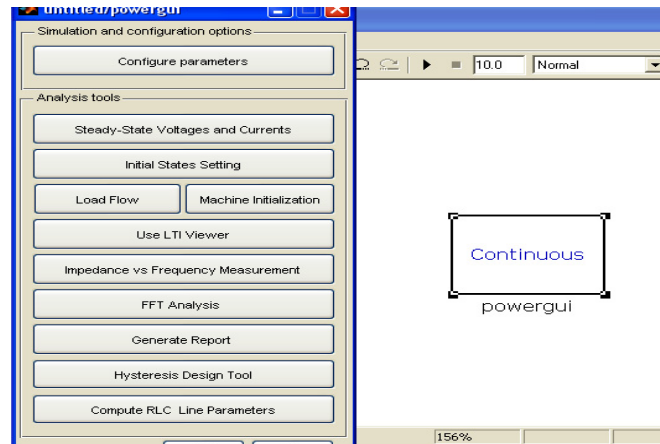
▪ Алгоритъм за създаване на модел в Matlab/Simulink

Първо се създава работно поле за нов модел (фиг.6.). След това се избират и поставят имитационни модели в работното поле и тяхната последваща редакция.



Фиг. 6. Работно поле за създаване на нов модел

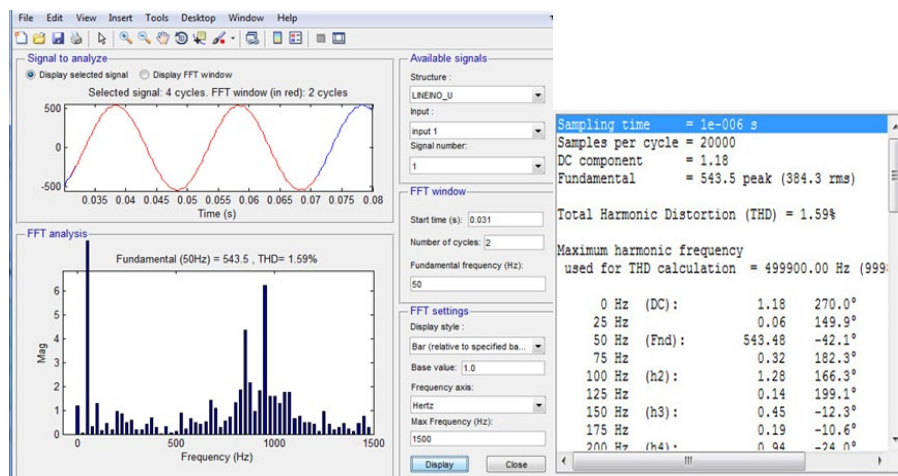
Анализът на моделите изисква да се зададат началните условия на режимите на моделиране, чрез използване на специализирания блок Powergui или функцията powerinit. Изобразената върху работното поле от фиг.7. пиктограма е на функционалния блок Powergui . В лявата част на полето е показан диалоговия прозорец с менюта за стартиране на видовите анализи.



Фиг.7. Пиктограма на функционален блок Powergui и диалогов прозорец с радиобутони с имена за избор на вид анализ

При изследване режимните характеристики на инверторите се използва специализирания блок Powergui за построяване на амплитудно честотна характеристика (АЧХ) (фиг.8). Диаграмата на АЧХ се генерира след кликане върху радио бутона от меню FFT Analysis. Математическото моделиране на АЧХ е с използване на бързото преобразуване на Фурие, което е заложено като функция в Matlab.

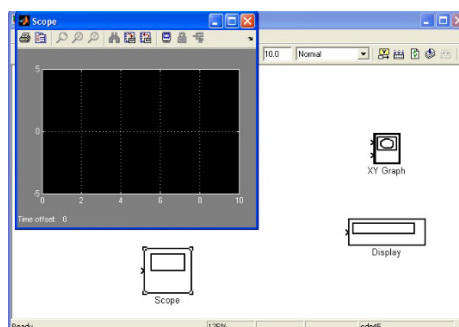
Изобразените графика и диаграма на фигурата визуализират формата на вълната и хармоничните съставлящи на тока и напрежението в честотната област.



Фиг.8. Диаграми с форма на вълната и данни за ефективните стойности на хармониците от спектъра на АЧХ

Табличните данни от фиг.8. дават информация за големината на коефициентите на хармоничните съставки THD_U , THD_I . Отчита се процентното съотношение на висшите хармоници спрямо основния хармоник.

- Диалоговият прозорец от фиг.9. съдържа пиктограми на измервателни прибори от библиотеката на Simulink в раздел Sinks (приемници на сигнали).

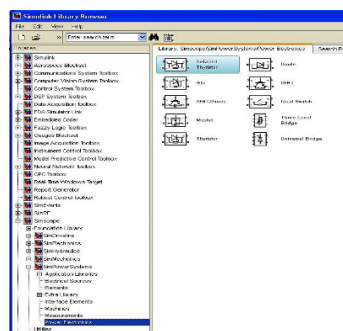


Фиг.9. Пиктограми на измервателни прибори Scope, XY Graph, Display цифров мултиметр и изображение на работен плот за осцилоскоп

Показаните имитационни измервателни прибори се използват за определяне ефективна стойност на големината и форма на вълната на тока и напрежението при работа на инвертора. Имитационният осцилоскоп Scope и плотер XY Graph представя графично резултатите от измерванията на параметрите във вид на диаграми. Отвореният екран на Scope от фиг.9. представя координатна система, характерна за реален осцилоскоп. По X – абциса се задава и отчита времето на симулация, а по Y – ордината е зададен изследваният електрически параметър. Моделираният цифров мултиметр Display може да бъде програмиран да отчита в числова форма: амплитудна, ефективна и комплексна стойности.

■ Методика за избор на електрически силови елементи и възли за моделите от фотоволтаичните системи

Отваря се диалогов прозорец на библиотеката със силови елементи Power Electronics от раздел SimPowerSystems.



Фиг. 10. Библиотека Power Electronics с модели на силовите прибори в раздел SimPowerSystems

Работният плот съдържа имитационни елементи на силови полупроводникови прибори, използвани в електрическите схеми на инверторите на напрежение.

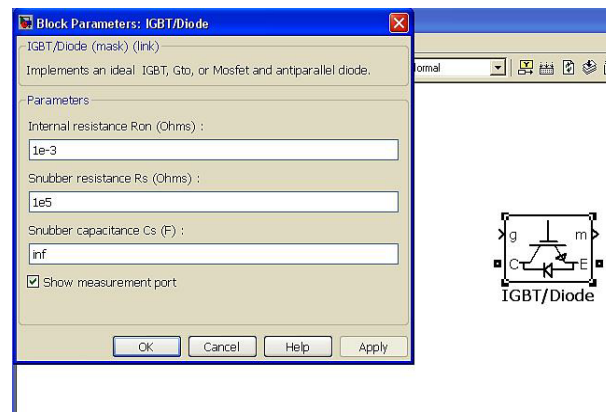
Избира се елемент, с показана пиктограма на работното поле в диалоговия прозорец от фиг. 10. Менюто визуализирано вляво на схемата е с параметри на силов полупроводников прибор IGBT:

R_{on} е вътрешното съпротивление на прехода в права посока;

R_S - вътрешното съпротивление на прехода в обратна посока;

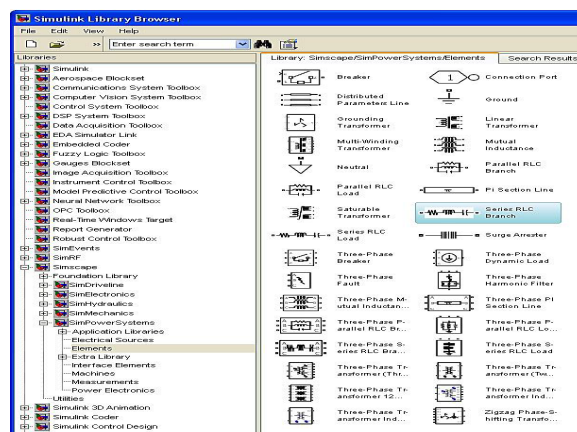
C_S - капацитетът на прехода.

Разгледаният модел на силов прибор се използва при изграждане архитектурата на силовата част на инверторите.



Фиг. 11. Отворен диалогов прозорец с параметри на IGBT транзистор и графично изобразяване.

Избират се пасивни елементи от библиотеката Elements.



Фиг. 12. Библиотека Elements от раздел SPS и графично изобразяване на електрически елементи и възли

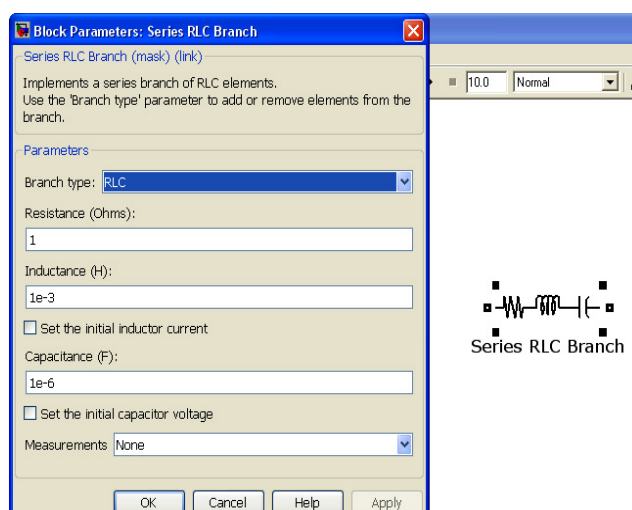
Всеки елемент от библиотеката има опции за задаване на параметри (фиг.12). Пиктограмата на елемента Series RLC Branch показва, че той е съставен от последователно свързани съпротивление R, бобина L и кондензатор C [4, 5]. Това са пасивни елементи изграждащи електрическите вериги. Отвореното меню е вляво на фигурата и е със зададени параметри на последователно свързани три елемента:

$R=1\Omega$ активно съпротивление;

$L=1e^{-3}H$ индуктивност;

$C=1e^{-6}F$ капацитет.

Опциите за настройка в менютата дават възможност за избор на последователността при различни комбинации на свързани елементи.



Фиг. 13. Изображение на пиктограма на електрически елемент RLC и меню с опции за параметрите

● Методика на изследване

Етапи на моделиране и измерване на инвертор на напрежение с фазово управление на изходното напрежение:

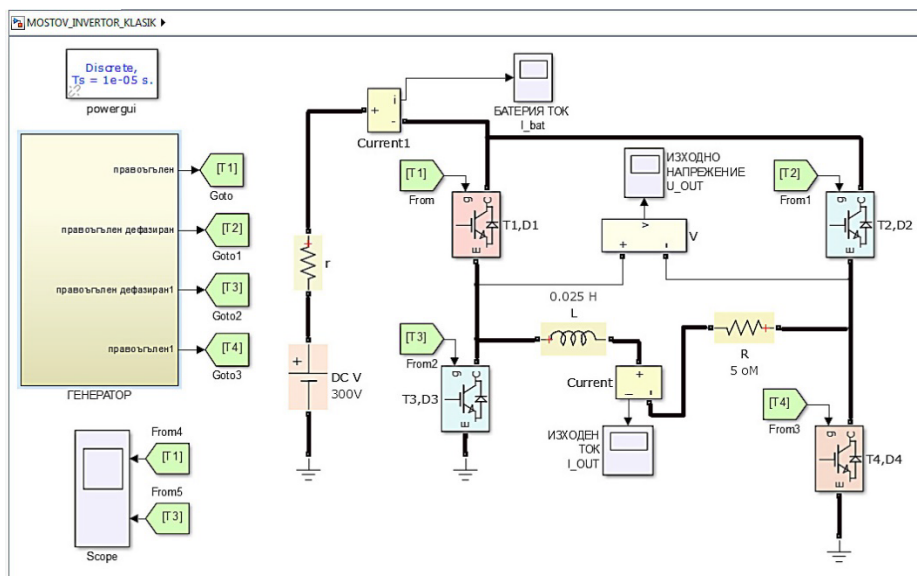
1. Задават се основните изходни параметри на инверторната система;
2. Измерват се кривите на токовете и напреженията в два режима с различни коефициенти на запълване;
3. Отчитат се големините на хармоници с поредни номера **h3**, **h5**, **h7**, както и техните начални фази чрез блок powergui;
4. Изчисляват се загубите от активна мощност по линията до товара, чрез сумиране на активните мощности от най-влиятелните хармоници;
5. Анализира се получената сумарна мощност от консумацията и се определя ефективността на инверторната система, като се сравняват двата режима на работа;

● Задаване на началните условия за стартиране на моделите с параметри:

$U_{dc}=300V$, $R_T=5\Omega$, $L=0,025H$, $f_1=50Hz$;

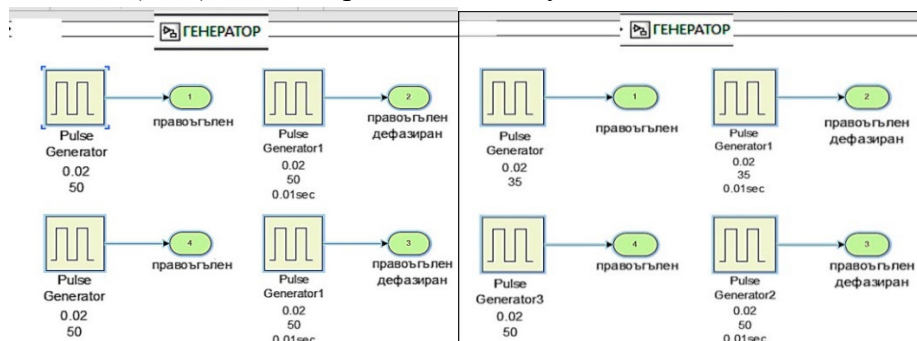
Първата стъпка от проекта е създаване на принципната схема на модела, показан. Системата от консуматор, управление и инвертор е моделирана на фиг.14 [1, 2, 6] в

програмна среда „Simulink“ с няколко блока: постояннотоков източник (U_{dc}), мостов еднофазен инвертор на напрежение (U_{ac} , f_1) и активно индуктивен товар ($R_T L$). Включени са и измервателни прибори – осцилоскопи.



Фиг.14. Принципна схема на модел – инверторна система

Силовите IGBT транзистори T1, T2, T3 и T4 с вградени паралелни диоди към прехода E-C се управляват от генератори на правоъгълни импулси показани на фиг.15. При T1 и T2 са зададени фиксирани фази определящи два коефициент на запълване 50% (35%), а за T3 и T4 50% (50%), за двата режима на симулация.

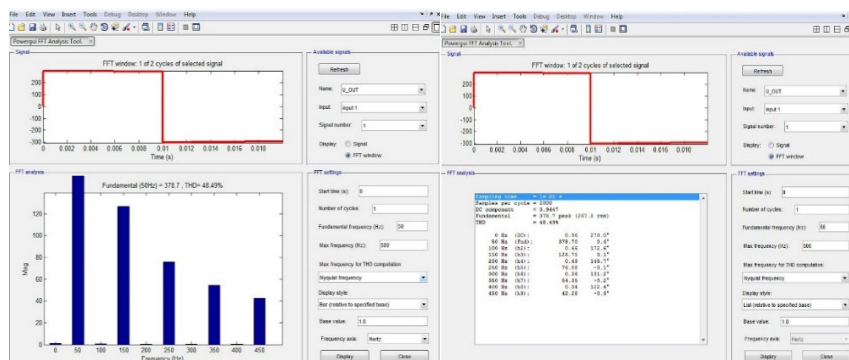


Фиг.15. Модели създадени в субсистемата от фиг.14 като генератори на правоъгълни импулси с фиксирани коефициенти на запълване;

Комплементарната двойка T1 и T2 са включени към положителния, а T3 и T4 към отрицателния извод на постоянен източник DC на напрежение (акумулаторни батерии или фотоволтаични модули). Транзисторите са с вградени диоди, свързани в обратна на проводимостта им посока, към захранващия източник. Изходните параметри от електрическата верига се измерват чрез модели на осцилоскоп за I_{OUT} , U_{OUT} .

- Резултати от стартиране на моделите и оценка на оптимизирането
- Стартиране при зададен коефициент на запълване 50%/50%

Диаграмите за големините на хармониците от изходното напрежение без регулиране фазата на импулсите (нерегулируем алгоритъм на управление) 50%/50% са показани на фиг.16.



Фиг.16. Честотен спектър и форма на изходното напрежение генерирани от блок powergui, при коефициент на запълване 50%/50%.

От амплитудно-честотната характеристика (АЧХ) се отчитат ефективните стойности и началните фази за хармониците на напрежението:

Първи основен хармоник $U_{h1} = 267,8V$ и $THD_U = 48,49\%$

Начална фаза на U_{h1} за първи хармоник $\psi_{U1} = 0,4^\circ$.

$U_0 = 0,96V$, $I_0 = 10,93A$;

$U_{h3} = 89,6V$, $\psi_{U3} = 0,1^\circ$,

$U_{h5} = 53,8V$, $\psi_{U5} = -0,1^\circ$,

$U_{h7} = 38,4V$, $\psi_{U7} = -0,2^\circ$,

От резултатите на фиг.17. за АЧХ се отчитат ефективните стойности и началните фази за хармониците на изходен ток, при така програмирация интервал на проводимост в полупериод:

Първи основен хармоник $I_{h1} = 29,9 A$ и $THD_I = 29,42\%$.

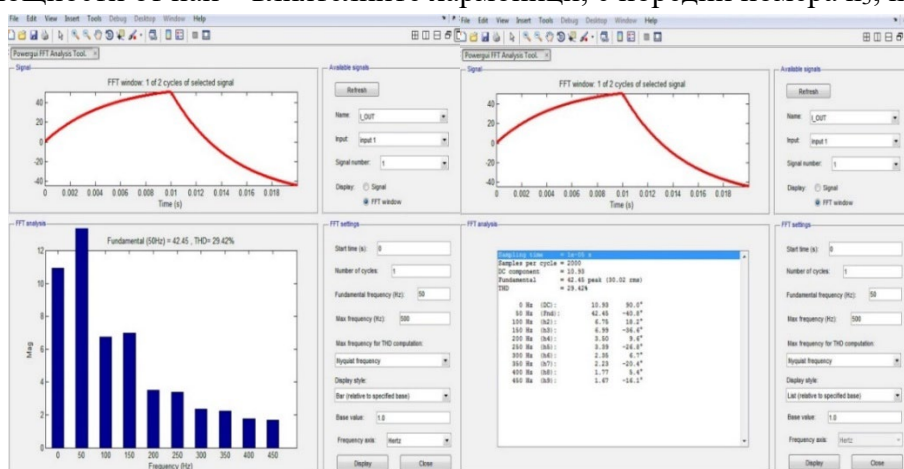
Начална фаза на I_{h1} за първи хармоник $\psi_{I1} = -40,9^\circ$.

$I_{h3} = 4,94A$, $\psi_{I3} = -36,6^\circ$;

$I_{h5} = 2,4A$, $\psi_{I5} = -26,8^\circ$;

$I_{h7} = 1,58A$, $\psi_{I7} = -20,4^\circ$.

Изчисляват се загубите на мощност по линията до товара, чрез сумиране на активните мощности от най – влиятелните хармоници, с поредни номера h_3, h_5, h_7 .



Фиг.17. Спектрален синтез и форма на изходния ток при 50%/50%.

Интегрираната активна мощност се изчислява чрез реда на Фурие, като се сумират отчетените хармоници от спектъра:

$$P_{out} = U_0 \cdot I_0 + \sum P_{h \cdot \cos \phi_h} \quad (1)$$

Фазовата разлика, отчитаща изместването между началните фази на напрежение и ток, се определя за първи хармоник чрез:

$$\phi_1 = \psi_{U1} - \psi_{I1} \quad (2)$$

Полезната активна мощност консумирана от товара е изчислена за големините на първите хармонични на тока и напрежението и показва ефективността на преобразуване, чрез мостовия инвертор на напрежение:

$$P_1 = U_{h1} \cdot I_{h1} \cos \phi_1 \quad (3)$$

След заместване със стойности за отчетените данни, се получава:

$$P_0 = 10,5 \text{ W},$$

$$P_1 = 8007 \cdot \cos(41,2^\circ) = 8007 \cdot 0,8 = 6406 \text{ W};$$

$$P_3 = 443 \cdot \cos(36,7^\circ) = 443 \cdot 0,84 = 372 \text{ W};$$

$$P_5 = 129 \cdot \cos(26,7^\circ) = 129 \cdot 0,9 = 116 \text{ W};$$

$$P_7 = 60,7 \cdot \cos(20,2^\circ) = 60,7 \cdot 0,95 = 57,6 \text{ W}.$$

Изчислената полезна активна мощност отдадена в товара е :

$$P_{\text{полезна}} = P_0 + P_1 = 6406 + 10,5 = 6416,5 \text{ W}.$$

Изчислената загуба на активна мощност по захранващата линия е:

$$P_{\text{загуби}} = P_3 + P_5 + P_7 = 372 + 116 + 57,6 = 548,6 \text{ W}.$$

Процентното изражение на загубите в инверторната система с несиметричен 50%/50% алгоритъм на управление е:

$$P_{\text{загуби}} \% = P_{\text{загуби}} / P_{\text{полезна}} \cdot 100 = 8,5\%.$$

▪ Стартиране на моделът с фазово управляван алгоритъм - 35%/50%.

Големините на хармониците от честотния спектър и формата на вълната на тока и напрежението са показани на фиг.18. и фиг.19. От фиг.18. се отчитат ефективните стойности и началните фази за хармониците на напрежението в проценти:

Първи основен хармоник $U_{h1} = 238,9\text{V}$ и $\text{THD}_U = 29,7\%$

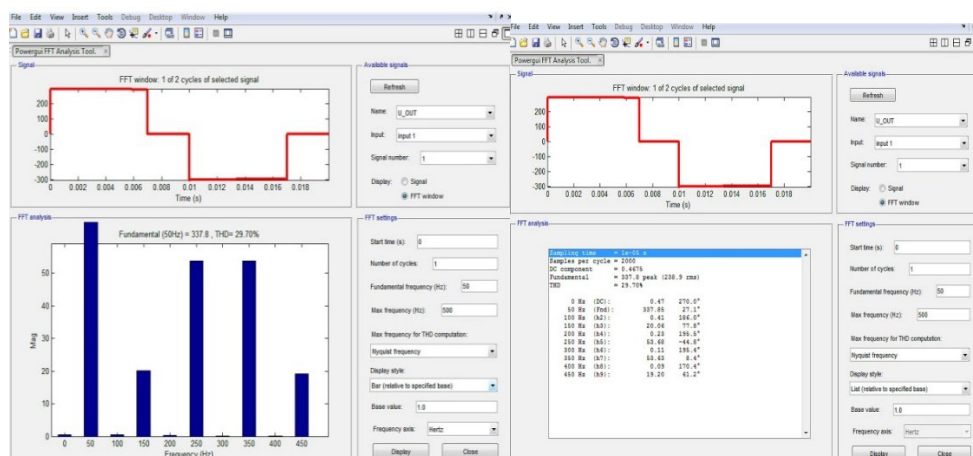
Начална фаза на U_{h1} за първи хармоник $\psi_{U1} = 27,1^\circ$,

$$U_0 = 0,47\text{V}, I_0 = 5,2\text{A};$$

$$U_{h3} = 14,2\text{V}, \psi_{U3} = 77,8^\circ, I_{h3} = 2,1 \text{ A}, \psi_{I3} = 8,9^\circ;$$

$$U_{h5} = 38\text{V}, \psi_{U5} = -44,8^\circ, I_{h5} = 0,7 \text{ A}, \psi_{I5} = -60,3^\circ;$$

$$U_{h7} = 38\text{V}, \psi_{U7} = 8,4^\circ, I_{h7} = 1 \text{ A}, \psi_{I7} = -35,4^\circ.$$

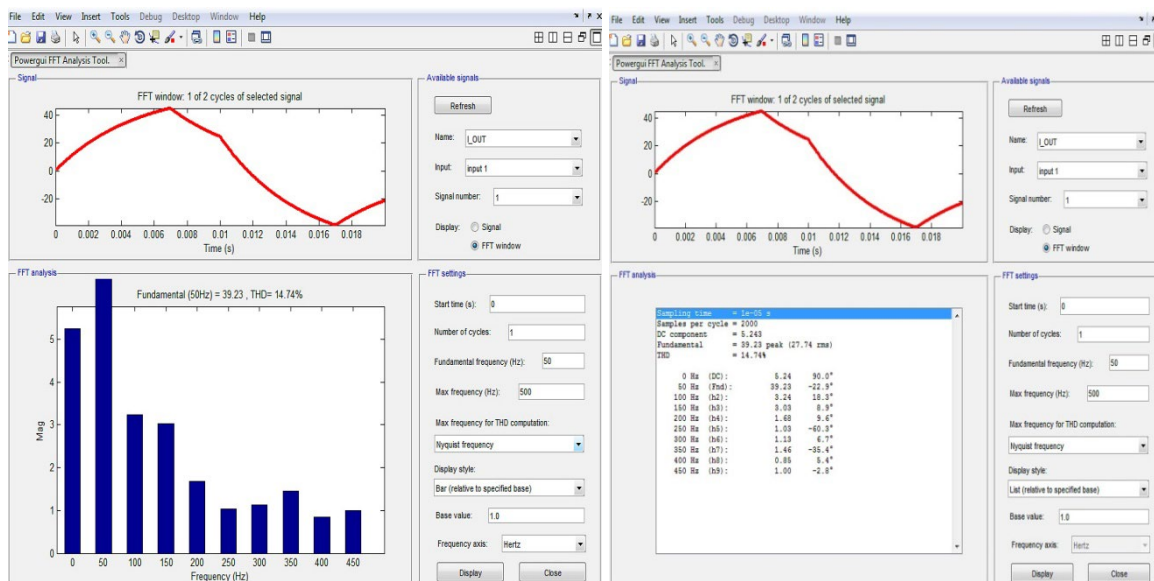


Фиг.18. Резултатни диаграми и таблични данни от честотния синтез на изходното напрежение при фазово управляван алгоритъм 35%/50%.

От фиг.19. се отчитат ефективните стойности и началните фази за хармониците на изходен ток, при така програмирания интервал на проводимост в полупериод:

Първи основен хармоник $I_{h1}=27,8\text{A}$ и $\text{THD}_I=14,74\%$.

Начална фаза на I_{h1} за първи хармоник $\psi_{I1}=-22,9^\circ$.



Фиг.19. Резултантни диаграми и таблични данни от спектъра на изходния ток при фазово управляван алгоритъм 35%/50%.

След заместване със стойности за отчетените данни се получава:

$$P_0 = 2,44 \text{ W};$$

$$P_1 = 7095 \cdot \cos(50^\circ) = 7095,0,71 = 5038 \text{ W};$$

$$P_3 = 29,8 \cdot \cos(69^\circ) = 29,8,0,47 = 14 \text{ W};$$

$$P_5 = 27 \cdot \cos(15,5^\circ) = 27,0,97 = 26,2 \text{ W};$$

$$P_7 = 38 \cdot \cos(43,8^\circ) = 38,0,77 = 29,4 \text{ W}.$$

Изчислената полезна активна мощност отдадена в товара е :

$$P_{\text{полезна}} = P_0 + P_1 = 5038 + 2,44 = 5040,4 \text{ W}.$$

Изчислената загубна активна мощност от влиятелните хармоници е:

$$P_{\text{загуби}} = P_3 + P_5 + P_7 = 14 + 26,2 + 29,4 = 69,6 \text{ W}.$$

Процентното изражение на загубите в инверторната система със симетричен 35%/50% алгоритъм на управление е:

$$P_{\text{загуби}} \% = P_{\text{загуби}} / P_{\text{полезна}} \cdot 100 = 1,38\%.$$

• Анализ от резултатите на симулациите.

▪ Сравнителният анализ между инвертора с фазово управляван алгоритъм 35%/50% и този с коефициент на запълване 50%/50% показва разлика в загубите на мощност. Намален е хармоничният състав при симулация на инвертора с фазово управляван алгоритъм 35%/50% като $P_{\text{загуби}} \% = 1,38\%$. При коефициент на запълване 50%/50% загубите от активна мощност са $P_{\text{загуби}} \% = 8,5\%$ са няколкократно по-големи. Това е важен показател, че оптимизирането на инверторите с фазово управление на изходните импулси е възможно с полупериод симетрично разположен във времето. Фазовото управление на импулсите се доближава по форма до синусоида, като по този начин се оптимизира и АЧХ, което беше доказана от симулациите.

▪ Моделът на инвертор с фазово управление може да се реализира на практика при избор на различни електрически товари. Влошеният хармоничен състав в спектъра на изходното напрежение не е подходящ за чувствителните консуматори [5,7]. За това при този вид товари се изпълнява схемата на модела с алгоритъм на фазово управление 35%/50%.

Използвана литература

- [1] Материали от дисертация за ОНС „Доктор“ на тема „Изследване влиянието на фотоволтаичните системи върху електрическите мрежи“, диплома № РУ-НС-2017-13, издадена на: 23.06.2017г., Васил Борисов Иванов, Русе, 2017г.
- [2] Ivanov V., „Modeling of three-phase inverter power supply system in Simulink“, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1032 (2020) 012054, doi:10.1088/1757-899X/1032/1/012054;
- [3] Анчев М. „Енергийна ефективност на силовите електронни устройства“, издателство „Авангард прима“, ISBN: 378-954-323-731-9, София, 2010.
- [4] Ivanov V., „Research of a parallel oscillating scheme in simulink“, annual of Assen Zlatarov University, Burgas 8010, Bulgaria, Vol. LI, Book 1, 2022, ISSN 2603-3968.;
- [5] Ivanov V., “Analysis of computer simulation in software environment of one phase bridge voltage inverter for a photovoltaic system”, Annual of Assen Zlatarov University, Burgas Bulgaria, Vol. XLVI, Book 1, 2017, стр.89 – 92, ISSN 1312-1359.;
- [6]] Ivanov V., “Modeling of single phase inverter system in simulink software”, Assen Zlatarov University, Annual, Vol. XLIX, Book 1, 2020, Burgas 8010, Bulgaria, ISSN 2603-3968. (Researchgate);
- [7] Ivanov V., “Modeling on resonance filter in SIMULINK” Annual University Scientific Conference 2022, ISSN 2367-7481, “Vasil Levski” NMU, Veliko Turnovo. (Researchgate);