

Оптимизиране на трифазна инверторна захранваща система (ТИЗС) в програмна среда „SIMULINK“, чрез режекторни резонансни филтри

Резюме: Публикацията представя синтез от модели на трифазен генератор (постояннотоков източник и трифазен инвертор на напрежение) и на трифазен консуматор (ТИЗС), присъединени към електрическата мрежа. Идеята за експеримента с инвертор на напрежение е масовото приложение на тези устройства поради високата им ефективност на преобразуване. Тези модели на съвременни устройства, обаче влошават хармоничния състав на включените в мрежата генератори, кабелни линии и консуматори.

Цели на моделирането:

Да се измери спектралния състав на изходните ток и напрежение на ТИЗС при три режима на симулация.

Да се подобри хармоничния състав на изходните параметри, чрез оптимизиране на ТИЗС в програмна среда SIMULINK, чрез добавяне на пасивни режекторни филтри в изходната верига.

Финансовите разходи в този случай са минимални в сравнение с практическото изграждане и експериментирание с подобни системи.

Функционалност на преобразуване на енергията от инвертора на захранващата система

- Специфичен компонент от конструкцията на ТИЗС е инвертора на напрежение (DC/AC). Основната му функция е преобразуване на постояннотоково напрежение в променливо с модифицирана или „чиста“ синусоида на изхода.

При проектирането на инвертор на напрежение **се акцентира върху стабилна честота и изходното напрежение със синусоидална форма**, което зависи от алгоритъма на управление на силовите прибори в инвертора. Формата на вълната на изходния ток I зависи от големината и вида на елементите, изграждащи консуматорите от електрическата верига (ЕВ).

- Предимства на импулсните преобразуватели (инвертори):

Силовата част на инверторите са полупроводникови прибори (IGBT, power MOSFET, GTO - thyristors), работещи в импулсен режим, осъществява по закона на широчинно импулсната модулация (ШИМ) т.е. прилага се режим на отсечка. По този начин се получава най-висок коефициент на полезно действие (к.п.д.). Тук загубите от мощност (топлинни) в силовите транзистори са малки, а ефективността е най-висока, като върху товара се отдава 90-95% от енергията на постоянния източника.

- Основен недостатък на импулсния режим е влошената електромагнитна съвместимост, което се отразява негативно върху работата на консуматорите и кабелните линии. При използването на нелинейни елементи преобразуващи постоянното напрежение в променливо на изхода се генерират хармонични съставки кратни на основния хармоник с висока амплитуда и малък пореден номер (обикновено нечетен).

- Качеството на изходното напрежение, т.е. приближаването на неговата форма до синусоидалната, е прието да се характеризира с коефициента на хармонични съставлящи THD в спектъра на тока и напрежението. Положителен ефект от подобряване на качеството се постига чрез оптимизиране работата на инверторите, като един от вариантите е в изходите им да се добавят резонансни режекторни филтри, разработено в настоящата публикация.

Етапи на изследване на ТИЗС в програмна среда „Simulink”

- Съставяне на архитектурата на ТИЗС в програмна среда „Simulink”.
- Стартиране на конструирания модел при три режима на натоварване в два варианта.

Първи вариант - синтез на спектралния състав на изходния ток (I) и напрежение (U) без добавени режекторни филтри в изходната ЕВ.

Втори вариант - изследване спектралния състав на изходния I и U с включени режекторни филтри, потискащи влиятелните висши хармоници.

- Сравнителен анализ на резултатите от честотния спектър (амплитудно - честотната характеристика АЧХ) при двата варианта на симулация, като резултатите от изменение на честотния спектър се наблюдават чрез блок анализатор „powergui“ в „Simulink”.

Методика на изследване на трите режима в двата варианта:

- Симулация на ТИЗС **без филтри** в изходната верига.

Етапите за синтез и изпълнение се базират на следните стъпки

1. Определяне големината на влиятелните хармоници в АЧХ
2. Избор на режекторни филтри и тяхната настройка по честота на среза за всеки хармоник, кратен на полезния първи хармоник ($h_1=50\text{Hz}$).
3. След определяне параметрите на всеки необходим филтър се стартира модела на симулацията с добавени филтри.

- Симулация на ТИЗС **с филтри** в изходната верига.

В изходната верига на инвертора се добавят модели на режекторни филтри и се измерва спектралния състав на АЧХ за изходния I и U.

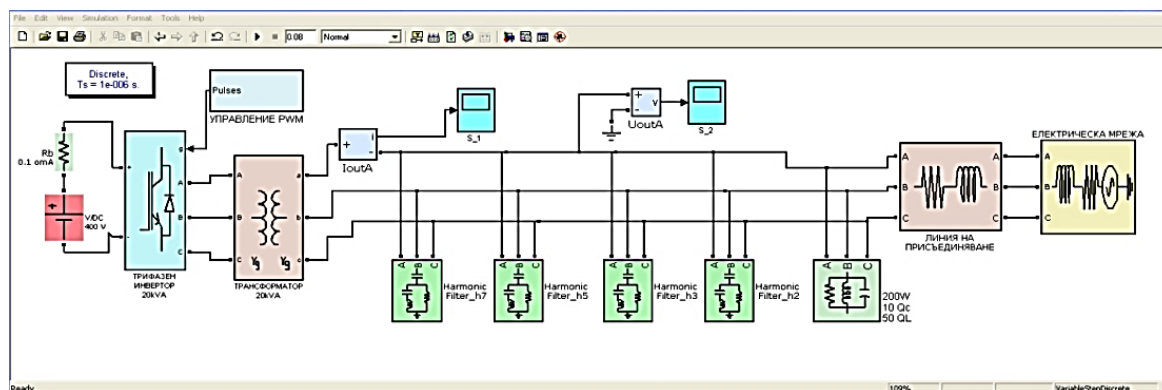
- Резултатите от отчетите на АЧХ се синтезират чрез спектрален анализатор от блок „powergui”. Той има опция за графично представяне на изходния ток и напрежение чрез осцилограми за формата на вълната и хистограми за АЧХ, като изчислява в табличен вид процентно съдържание на отделните отчети и сумарно спектралния състав THD_U и THD_I .

- След отчитане резултатите от двата варианта се прави сравнителен анализ на АЧХ и се определя степента на намален хармоничен състав при работа на ТИЗС **с добавените филтри в изходната верига**. По конструктивно изпълнение филтрите могат да бъдат пасивни или активни. В разработката се използват модели на пасивни честотни филтри работещи на резонансен принцип. Активните филтри използват допълнителни източници на ток и напрежение и цената им е многократно по-висока от тази за пасивните филтри.

- Анализирайки резултатите от отчетите на изходните показатели се доказва, че ТИЗС се съгласува със стандартите на електромагнитната съвместимост между източници, трифазни линии и консуматори, за да бъде присъединена към обществената електроразпределителна мрежа.

Главна схема на изследване на трифазната инверторна захранваща система

Архитектурата от фиг.1 синтезира режекторни филтри свързани към изходната верига на ТИЗС означени с номерата на поредния хармоник h_2, h_3, h_5, h_7 , кратни на основната честота f_1 . Моделът на блок трифазен инвертор преобразува постоянното напрежение симулирано от блок постоянно напрежение и резистор отчитащ вътрешното съпротивление на източника. Изходът на инвертора се свързва към консуматорите от захранващата мрежа през трифазен разделителен трансформатор свързан в звезда.



Фиг.1 Архитектура на модела ТИЗС с добавени режекторни филтри за h_2, h_3, h_5, h_7 .

Разделителният трансформатор от вторичната страна (фиг.1) е присъединен към обществената захранваща мрежа през линия за присъединяване и към трифазен консуматор. Графичните резултати от времеви анализ отчитат изходен ток I_{outA} и изходно напрежение U_{outA} за фаза А от ТИЗС.

- Цел на включените режекторни филтри от фиг.1.

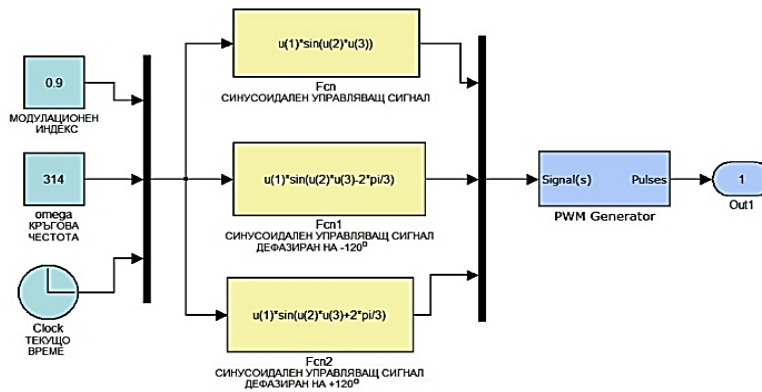
Оптимизирането на АЧХ се базира на избирателно настройване моделите на трептящите кръгове според вида на включените консуматори в електрическата мрежа, с цел намаляване влиянието на висши хармоници в изходната трифазна ЕВ на I и U . По този начин се създават по-добри условия за електромагнитната съвместимост (ЕМС) между източник, електропровод и консуматори.

- Измерване с виртуални прибори S_1, S_2 за показателите на фазовото U_L (потенциал между фаза и маса) и линеен I_L за фаза А
- Моделът на спектрален анализатор (блок „powergui“) синтезира отчети от хармоничните съставки в ред на Фурие (АЧХ за напрежението THD_U и тока THD_I), като представя графично и таблично синусоидалните функции на U и I ;

• Етапи от построяване архитектурата на ТИЗС.

Параметрите на функционалните блокове (фиг.1) се задават при заложена в модела проектна номинална изходна мощност 2000W за три режима на работа.

1. Реален източник на напрежение (R_b, V_{DC}) имитиращ постояннотоков генератор на напрежение (фотоволтаични модули, акумулаторна батерия, генератор за постоянен ток или елементи на Пелтие).
2. Блок „PWM Generator“ от фиг.2 зададен с алгоритъм на управление: широчинно – импулсна модулация (ШИМ).



Фиг.2. Синтез на трифазна синусоидална система модулирана чрез блок PWM Generator.

• Аналитичното синтезиране на системата уравнения за трите фази (A, B и C) зададени за синусоидални функции чрез блокчета F_{cn} от фиг.2 е:

$$U_A(t) = U_{Am} \sin(\omega \cdot t + \psi_U), V \quad i_A(t) = i_{Am} \sin(\omega \cdot t + \psi_I), A \quad (2)$$

$$U_B(t) = U_{Bm} \sin(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}), V \quad i_B(t) = i_{Bm} \sin(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}) \quad (3)$$

$$U_C(t) = U_{Cm} \sin(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}), V \quad i_C(t) = i_{Cm} \sin(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}) \quad (4)$$

където:

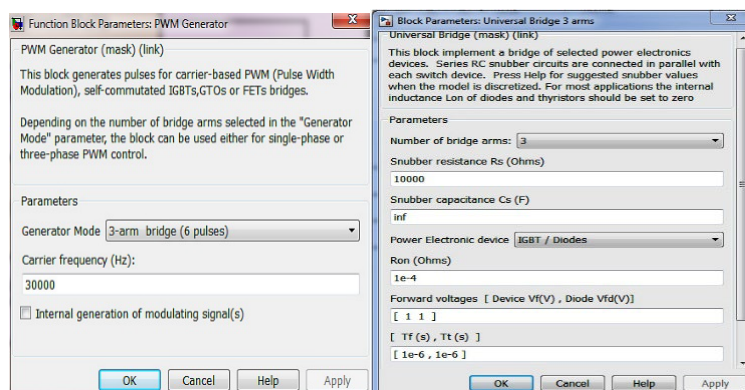
$$\omega = 314, s^{-1} \text{ е кръговата честота, при зададена линейна } f = 50, Hz \quad (5)$$

Графичното представяне на (1), (2) и (3) са синусоиди дефазирани на 120° реално моделиращи напрежението в електрическата мрежа за ниско напрежение, което е идеята на симулацията.

Важен показател за качество на съвместната работа между генератор и консуматор е дефазирането синусоидите на тока и напрежението. То се определя за една фаза като фазова разлика между началната фаза на напрежението ψ_U и началната фаза на тока ψ_I :

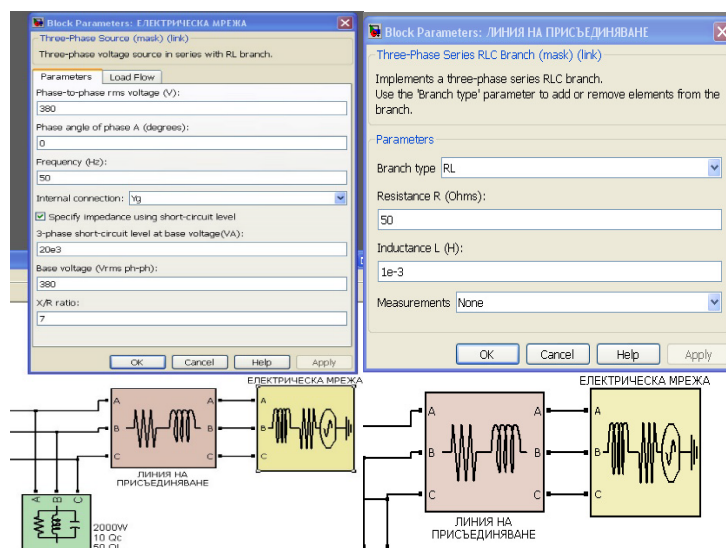
$$\varphi = \psi_U - \psi_I \quad (6)$$

3. В диалоговият прозорец от фиг.3 вляво се задава носещата честота 30kHz на „PWM Generator“ с алгоритъм на управление по закона на ШИМ (PWM). В дясно на фиг.3. е представен диалоговия прозорец за задаване на три двойки силови прибора.



Фиг.3. Диалогови прозорци - вляво е меню на „PWM Generator“; менюто вдясно за настройки параметрите на силовите прибори от блок Universal Bridge;

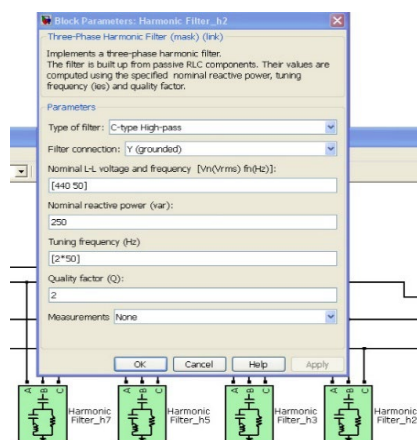
4. Диалоговите прозорци на фиг.4 се настройват да отчитат загубите на мощност по кабелната линия на ТИЗС при реално присъединяване към обществената електрическа мрежа. На схемата е добавен и комплексен симетричен товар с възможност за регулиране на мощностите.



Фиг.4. В диалоговият прозорец вляво са зададени параметри на генератора от електрическата мрежа. В менюто вдясно е зададена линията на присъединяване към ТИЗС с отчитане на импеданса на ЕВ.

Синтезираният модел на „линия на присъединяване“ със зададените параметри от фиг.4 симулира реални загуби в проводниците (импеданс с преобладаващ индуктивен характер). Параметрите на модела могат да се коригират, като при по-дълги проводници нарастват активното и индуктивното съпротивления (R, L).

5. Синтезирането на трифазен режекторен филтър срещу висши хармоници е представено на фиг.5 чрез диалоговия прозорец с настройка за $h_2=2*50=100$ Hz, при първи полезен хармоник на нашата трифазна електрическа мрежа с честота $h_1=50$ Hz. Задават се група на свързване по избор в случая звезда/триъгълник и качествения фактор $Q=2$ при резонанс.



Фиг.5. Диалогов прозорец с настройки по номера на втори хармоник h_2 , кратен на първия с качествен фактор на среза $Q=2$

• Режекторните филтри **h₂, h₃, h₅, h₇** работят на резонансен принцип, с честота на среза определена от собствената (резонансна) честота **f₀** чрез зависимостта:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

където,

L, C – индуктивност и капацитет на филтъра, които определят реактивните мощности Q_L– индуктивна и Q_C – капацитивна, зададени в опциите на филтъра от фиг.5.

• Качествен фактор на честотния филтър:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (8)$$

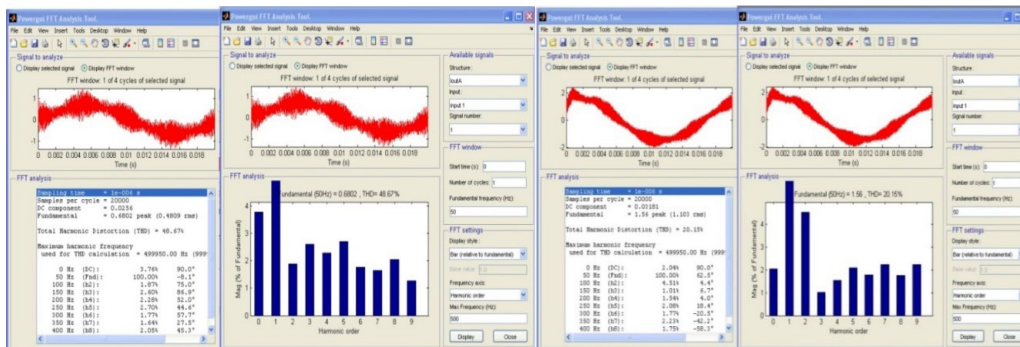
където, Δf е честотна лента на пропускане на филтъра

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (9)$$

6. Стартиране на трите работни режими при двата варианта за оптимизиране на ТИЗС

Режим на работа при **минимален** симетричен товар със зададен вид мощност: **P = 200W**, Q_C=10Var, Q_L=50Var

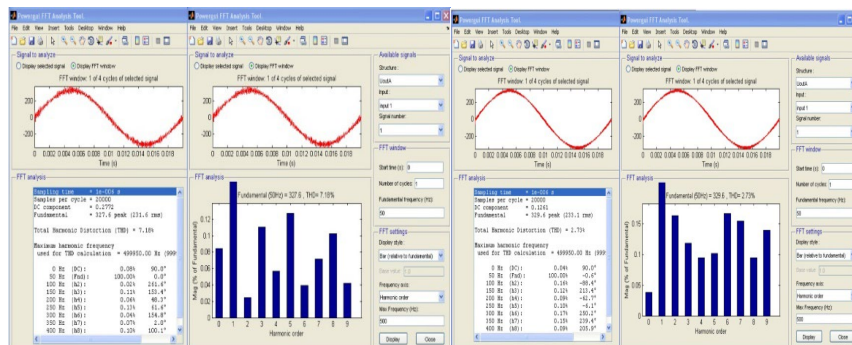
• Диаграми, хистограми и таблични данни за изходен ток от линията I_L на фаза A.



Фиг.6. Резултати за изходен I_L на фаза A, без режекторни филтри със зададена P=200W (вляво) и за I_L на фаза A, с добавени h₂, h₃, h₅, h₇ (вдясно)

Анализ: На фиг.6 отчетеният **THD_i=48,67% без филтри** е с висок процент при I_L=0,48A. Показаните резултати **с добавени филтри** имат подобрен хармоничен състав, като се оптимизира **THD_i=20,15%** и формата на вълната е близка до синусоида.

• Диаграми, хистограми и таблични данни за изходно напрежение U_L, измерено на фаза A.

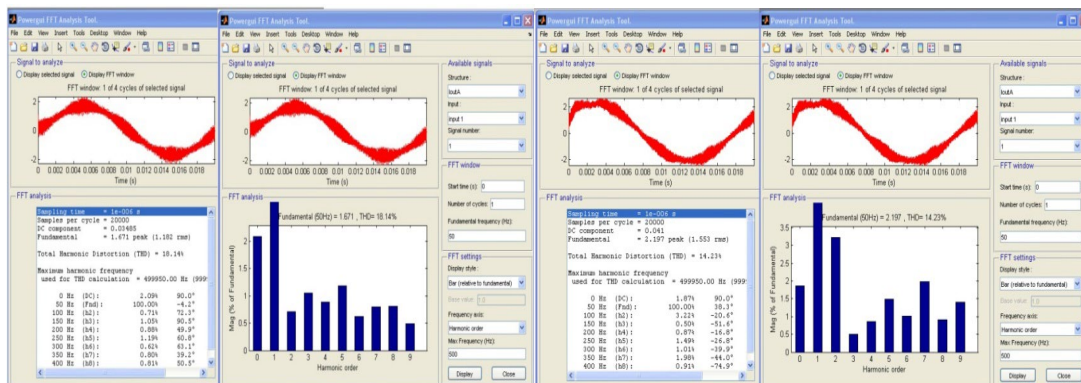


Фиг.7. Резултати за изходно U_L на фаза A(вляво), без режекторни филтри, при P=200W и резултати за U_L на фаза A (вдясно) с добавени режекторни филтри

Анализ: По диаграмата за U_L от фиг.7 (вляво) без филтърната група се измерва $THD_U=7,18\%$. По диаграмата за U_L (вдясно) с добавени филтри се отчита $THD_U = 2,73\% < 3\%$ отговарящо на стандарта за електромагнитна съвместимост при присъединяване към обществената мрежа за ниско напрежение.

Режим на режим на работа със симетричен товар при зададена **междинна** мощност: $P = 800W$, $Q_C = 10Var$, $Q_L = 50Var$

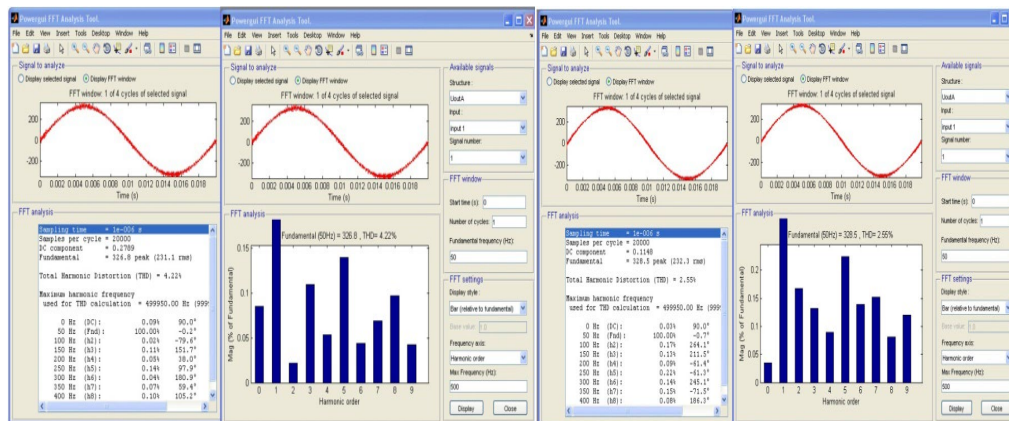
- Диаграми, хистограми и таблични данни за линеен изходен ток I_L , измерен на фаза А



Фиг.8. Резултати за изходен I_L на фаза А (вляво), без режекторни филтри и средна големина на мощност $P=800W$ и резултати за I_L на фаза А (вдясно), с добавена група режекторни филтри

Анализ: Хистограмите на фиг.8 (вляво) отчитат за $THD_I=18,14\%$, за изходния ток I_L без добавени филтри. При повишаване на активната мощност P се подобрява и качеството на I_L , като най-добри показатели се получават при номинален работен режим. На фиг.8 (вдясно) се наблюдава намален $THD_I=14,23\%$, поради включените филтри, потискащи влиятелните съставки на линейния изходен ток I_{h2} , I_{h3} , I_{h5} , I_{h7} .

- Диаграми, хистограми и таблични данни за линейно напрежение U_L измерено на фаза А.



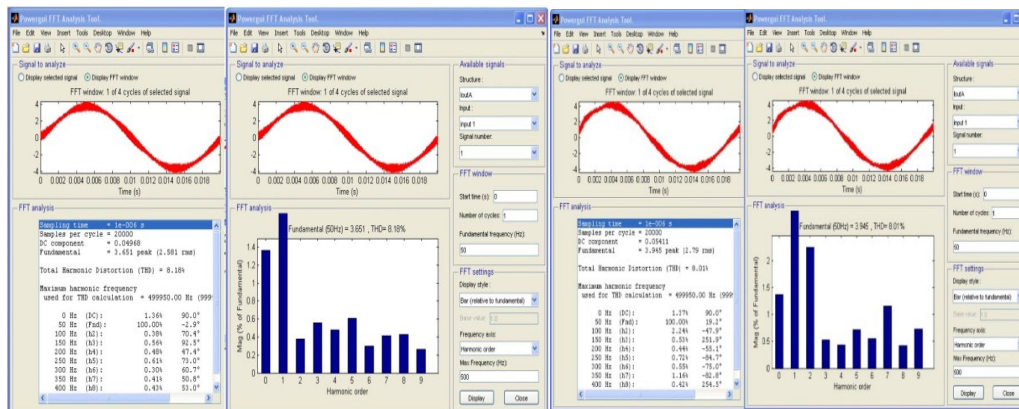
Фиг.9. Резултати за изходно U_L на фаза А (вляво), без режекторни филтри и $P=800W$ и за U_L на фаза А (вдясно), с режекторни филтри.

Анализ: Резултатите за U_L от фиг.9 (вляво) отчитат процентно съдържание $THD_U=4,22\% > 3\%$ показател за електромагнитна съвместимост, без режекторни филтри.

Резултатите за U_L от фиг.9 (вдясно), отразяват подобрения хармоничен състав до процентно ниво $THD_U=2,55\% < 3\%$ стандарт, след добавяне на режекторните филтри.

Режим на работа при **максимален** симетричен товар със зададени мощности заложените в проекта модел на ТИЗС: **P=2000W**, $Q_c=10Var$, $Q_L=50Var$

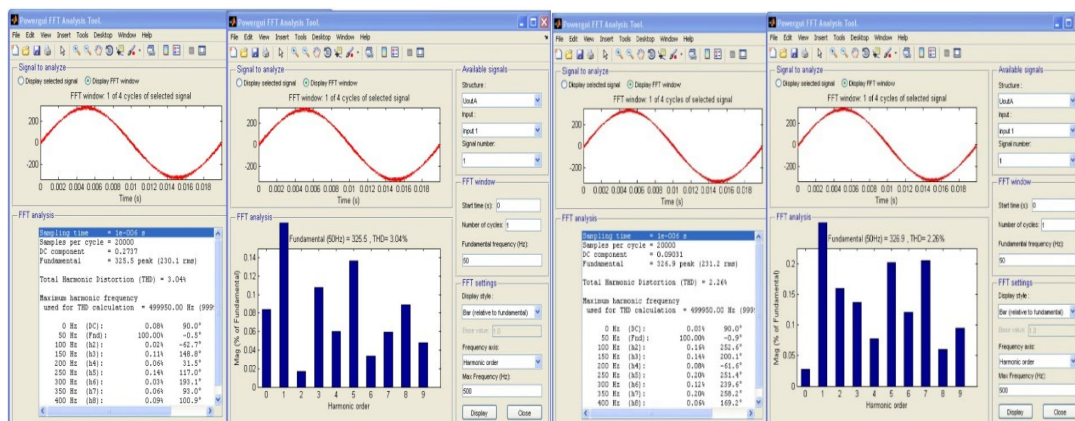
- Диаграми, хистограми и таблични данни за изходен ток I_L , измерен на фаза А



Фиг.10. Резултати за изходен I_L на фаза А (вляво), без режекторни филтри и $P=2000W$ и за I_L на фаза А (вдясно) с добавени режекторни филтри.

Анализ: Отчетените съставки в изходен I_L от фиг.10 (вляво) е $THD_I=8,18\%$ без филтри. Сумарното съдържание на хармоници на фиг.10 (вдясно) с добавени филтри, подобряват несъществено коефициента $THD_I=8\%$, защото работния режим навлиза в номинално натоварване. Това е показател за ефективно използване на инсталираната мощност, което води до висок к.п.д.

- Диаграми, хистограми и таблични данни за изходно напрежение U_L за фаза А.



Фиг.11. Резултати за изходно U_L на фаза А (вляво), без филтри с $P=2000W$ и за U_L на фаза А (вдясно) с филтри.

Анализ: Показателите на изходното U_L от фиг.11 (вляво) са много добри за формата на вълната и $THD_U=2,55\% < 3\%$ без филтрите h_2 , h_3 , h_5 , h_7 . Добавената група режекторни филтри за U_L , с отчетите на фиг.4(вдясно), отразява ефекта от тях върху $THD_U=2,25\%$.

• **Обобщение и анализ от резултатите за измерените качествени показатели на изходните параметри за ТИЗС.**

Таблица 1

Режими на натоварване на ТИЗС	I_L [A]	THD _I [%]	U_L [V]	THD _U [%]
минимална активна мощност	P=200W			
без филтри	0,48	48,67	231,6	7,18
с филтри за h_2, h_3, h_5, h_7	1,1	20,15	233,1	2,73
междинна активна мощност	P=800W			
без филтри	1,2	18,14	231	4,22
с филтри за h_2, h_3, h_5, h_7	1,5	14,2	232	2,55
повишена активна мощност	P=2000W			
без филтри	2,6	8,18	230	3,04
с филтри за h_2, h_3, h_5, h_7	2,7	8,01	231	2,26

Извод:

• Анализирайки данните от таблица 1 следва извода, че добавените група филтри, в точката на присъединяване, успешно оптимизират работата на ТИЗС, като потискат влиятелните хармоници с поредни номера 2, 3, 5 и 7 и намаляват общия коефициент на хармонични съставки THD.

• При по-малка мощност на товарите пасивните филтри работят по-ефективно, което се отчита от таблица 1.

• По синтезирания модел може да се създаде реална трифазна инверторна система присъединена към обществената мрежа и оптимизирана с добавени пасивни филтри.

• Режекторните филтри могат да бъдат ефективно използвани в работещи инверторни системи със зададените настройки за честотата f_p на всеки влиятелен хармоник:

h_2 - номинална реактивна мощност $Q_2=250\text{Var}$ за $f_{\text{режекторна}}=100\text{Hz}$,

h_3 - номинална реактивна мощност $Q_3=250\text{Var}$ за $f_{\text{режекторна}}=150\text{Hz}$,

h_5 - номинална реактивна мощност $Q_5=200\text{Var}$ за $f_{\text{режекторна}}=250\text{Hz}$,

h_7 - номинална реактивна мощност $Q_7=200\text{Var}$ за $f_{\text{режекторна}}=350\text{Hz}$,

автор:

гл. ас д-р Васил Борисов Иванов

Университет „Проф. д-р Асен Златаров“, 8000 Бургас

e-mail:

vasil_bi@abv.bg

vasil_bi@buxtevy.eu