



Технически Университет – София

Факултет по електронна техника и технологии

Катедра „Силова Електроника”

маг. инж. Николай Василев Неховски

**Електронни преобразуватели с приложение във
възобновяеми източници на енергия**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за придобиване на образователна и
научна степен

„ДОКТОР”

по професионално направление

5.2 Електротехника, електроника и автоматика

[Научна специалност: „Електронни преобразуватели”]

Научен ръководител: доц. д-р инж. Владимир Владимиров Димитров

СОФИЯ, 2025

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Силова електроника“ към Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 24.03.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 14.07.2025 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед №ОЖ-5.2-33 / 24.03.2025 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

Научно жури:

1. доц. д-р инж. Християн Чавдаров Кънчев – председател
2. доц. д-р инж. Димитър Дамянов Арnaudов – научен секретар
3. проф. д-р инж. Николай Димитров Маджаров
4. доц. д-р инж. Христо Тодоров Ибришимов
5. проф. д-р инж. Никола Вичев Колев, дссн

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Николай Димитров Маджаров
2. доц. д-р инж. Димитър Дамянов Арnaudов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София, блок №1, кабинет №1355.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Силова електроника“ на Факултет по електронна техника и технологии. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Николай Василев Неховски

Заглавие: Електронни преобразуватели с приложение във възобновяеми източници на енергия

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

Въведение

Предстоящото пълно премахване на субсидиите за изкопаеми горива в ЕС през източници на енергия поставя все по-голям натиск върху производството и от зелени източници [1], [2]. Променливият характер на тези източници като слънце и вятър поставя допълнителни изисквания не само към системата преобразувател източник [3], но и към балансирането на електропреносната система.

Основните изисквания към електронния преобразувател изграждащ такава система могат да бъдат обобщени в няколко основни точки:

- Търсенето на максимална ефективност при преобразуването на електрическата енергия
- Консумирането на максималната възможна от възобновяемия източник

Към тях трябва да бъдат отбелязани и допълнителните изисквания свързани с оптималното съхраняване на излишната енергия в моменти на свръхпроизводство.

Такъв тип системи, които включват освен електронен преобразувател за управление на преобразуването на електрическата енергия от възобновяемия източник към електрическата мрежа, но и допълнителен енергиен източник за нейното съхранение или отдаване се нарича хибриден силов преобразувател. Адаптиране на съществуващи решения за такъв тип преобразуватели и техните методи за управление за конкретното приложение са основен фокус на дисертационния труд.

В дисертацията са разгледани конкретно фотоволтаични панели като източник на енергия и възможностите за нейното преобразуване към електрическата мрежа посредством електронни преобразуватели. Тези електронни преобразуватели трябва да преобразуват постоянното напрежение от фотоволтаичния панел в променливо, което да позволява отдаване на електрическа енергия в променливотоковата мрежа. Стандартно тези преобразуватели са разгледани в почти всеки учебник по Силова електроника [4], [5], [6], [7], като тук е обърнато внимание на анализ, моделирането и проектирането на такъв тип преобразуватели, които изпълняват ролята на хибриден преобразувател.

Цели и Задачи

От направения литературен преглед могат да бъдат обобщени основните предизвикателства пред енергийната система при увеличаване на дела на възобновяемите източници на енергия. Както вече беше отбелязано, възможно решение на предизвикателството за баланс на енергийна система основана на източници с непостоянен характер е добавянето на вторичен енергиен източник и съответстващия електронен преобразувател.

Изследването на възможните архитектури, методите за управление и реализация на такъв тип преобразуватели е в основата на целта на дисертацията. Тя може да бъде обобщена с едно изречение по следния начин: Изследване на методи за подобряване на енергийните показатели на електронни преобразуватели работещи във фотоволтаични системи, имащи допълнителен енергиен източник.

Тези системи по-нататък ще бъдат наричани хибридни фотоволтаични системи, а електронните преобразуватели, използвани в тях – хибридни инвертори.

За постигане на поставената цел са набелязани няколко задачи, чието изпълнение ще подпомогне нейното изпълнение:

- Обзор на съществуващи решения в индустрията на такъв тип системи и техните режими на работа
- Обобщаване на показатели за оценка и сравнение на преобразуватели за хибридни фотоволтаични системи.
- Синтез на електронен преобразувател на енергия за хибридна фотоволтаична система, работещ с намалени комутационни загуби.
- Математически анализ на предложения преобразувател за извеждане зависимости и изисквания към неговото управление.
- Съставяне на симулационни модели на електронен преобразувател и неговата система за управление за хибриден инвертор и извършване на изследвания в различни режими на работа.
- Експериментално изследване сравняващо предложената система и комерсиално предлагани решения.

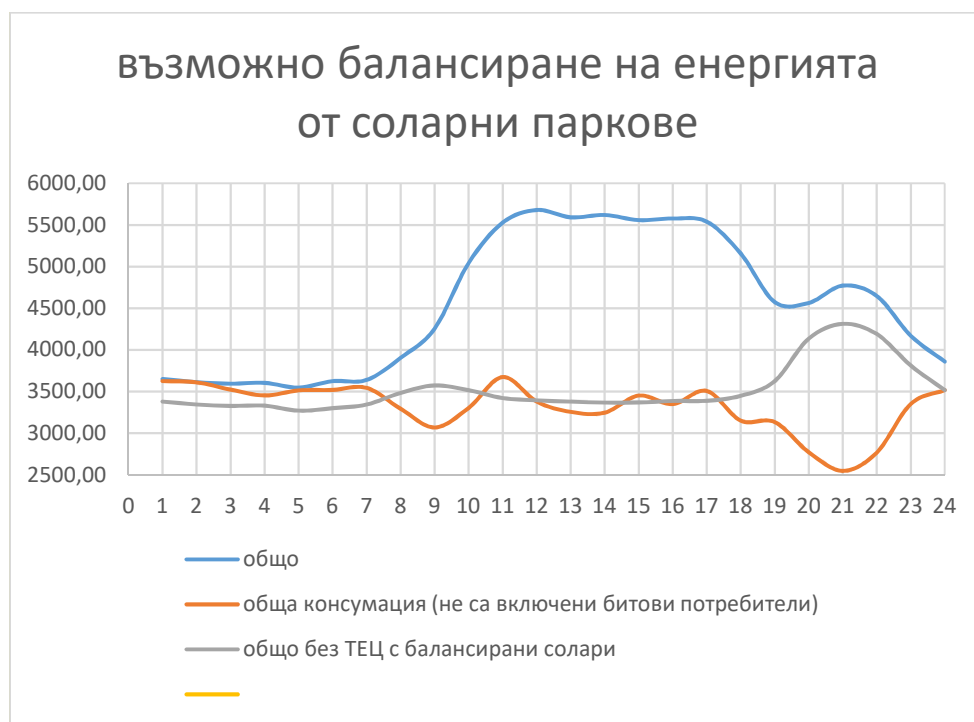
Изпълнението на поставените по-горе цели е в основата на съдържанието на предложения дисертационен труд.

Глава 1 Подобряване на енергийните показатели на електронни преобразуватели за хибридни фотоволтаични системи

1.1 Дефиниция на проблема

Както беше коментирано в литературния обзор всички мерки за съхранението и пестенето на възобновяемата енергия от фотоволтаичните панели е необходимо, най-вече през тъмната част на денонощието. Тогава енергията е ограничена и е необходимо нейното съхранение в акумулаторна батерия, които са с ограничен капацитет. Основна цел при консумиране на този вид енергия е тя да бъде съхранявана и използвана максимално ефективно.

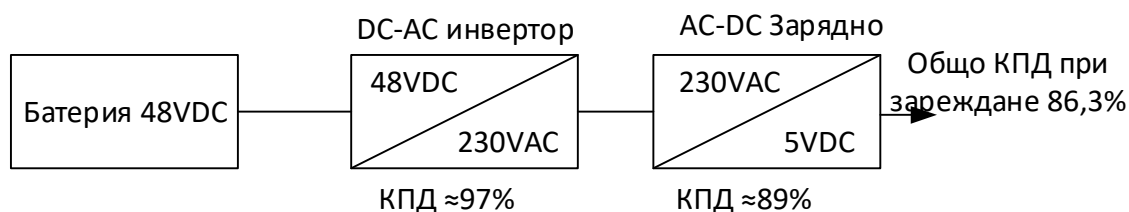
Разумно съхранение на енергията генерирана от фотоволтаичните панели през деня и нейното използване за балансиране на консумацията е дадено на база представените графики за консумация и производство Фигура 1. Пример за балансирано фотоволтаичното производство, без енергия от Тополоелектрическите централи (ТЕЦ) се наблюдава на графиката (в сив цвят), като е сумирана цялата енергия от фотоволтаичните паркове, за този ден тя е 16853,96MWh, след което е разделена на 24h и полученото число се добавя към всеки час, тоест разпръсква се енергията в цялото денонощие. Като заключение от графиката може да се каже, че при добър баланс на фотоволтаичната енергия, може да се изключат, най-замърсяващите енергоизточници от енергийната система, а именно ТЕЦ.



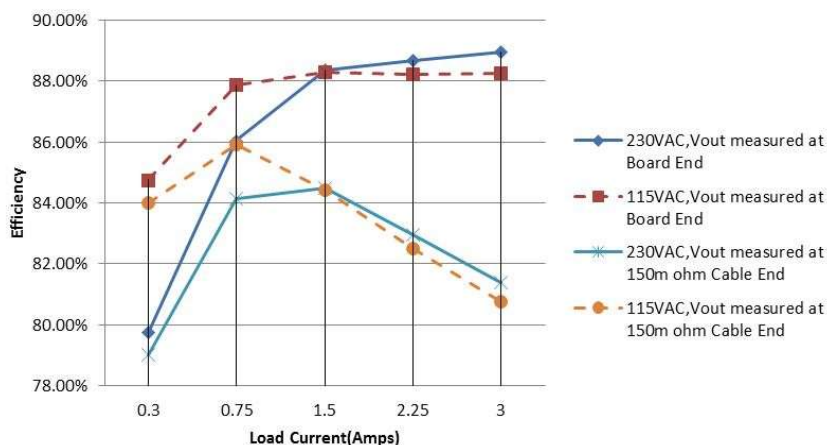
Фигура 1 Графика на примерно балансиране на енергията

Разумното преобразуване на енергията е второто основно изискване към електронния преобразувател. Стандартно при използването на енергията се налага двойно преобразуване от батерията до крайното и потребление. Първоначално постоянното напрежение на батерията е необходимо да бъде преобразувано в променливо за електрическата мрежа. След което почти всички електронни уреди (зарядни за мобилни телефони, лаптопи, компютри, телевизори и лед лампи за осветление) в едно домакинство използват преобразуватели, които преобразуват променливотоковата енергия от мрежата в постоянна. Като при повечето от изброените уреди, напрежението освен че се изправя, се намалява, обикновено от 230VAC най-често на 5, 12, 19V.

Блоковата схема на стандартната архитектура е представена на Фигура 2. На нея при приемане на стандартни ефективности на двата преобразувателя от 97% за инвертора и 89% за зарядното се получава обща ефективност от 86.3% от общото преобразуване.



Фигура 2 Блокова схема на двойно преобразуване при използване на енергия за зареждане на мобилен телефон

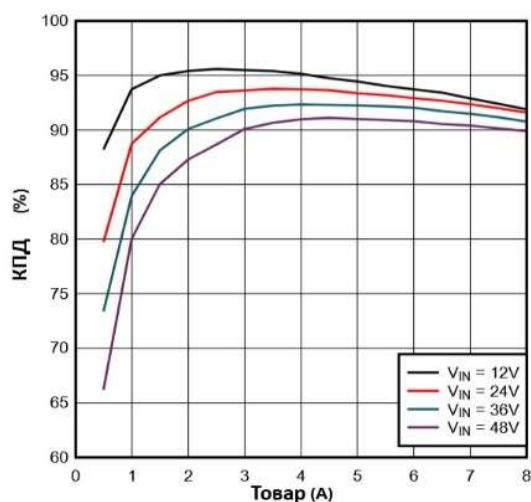


Фигура 3 КПД на стандартно зарядно за мобилен телефон

Трябва да бъде отбелязано, че горното изчисление е приблизително, тъй като ефективността и на двете звена е зависимо от натоварването им, като стандартна графика за захранване е представено на Фигура 3. Както може да се види от графиката при 230Vrms ефективността е висока при натоварване над 50% от номиналното. Аналогична графика може да бъде представена и за фотоволтаичния инвертор и неговата ефективност е аналогична в зависимост от натоварването му.

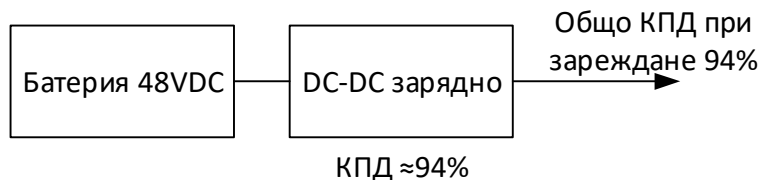
При използването на галванично разделена батерия, използвана в соларната система, съществува възможност да бъде направена, нисковолтова електрическа инсталация на постоянно напрежение в домакинството. Такъв тип системи са известни в литературата, но ако тя се направи на ниско напрежение (например 48Vdc), то такъв тип електроинсталация би бил, по-безопасен, в следствие на ниското напрежение. Нисковолтова шина на постоянно напрежение за домакинство може драстично да намали загубите от двукратно преобразуване на соларната енергия. При тази система, преобразуването от батерия към електроуреди (работещи с преобразувател), ще бъде само веднъж от прав ток към прав ток, което само по себе си е по-ефективно от преобразуването от променлив към прав ток.

На Фигура 4 се наблюдава ефективност на dc-dc преобразувател от 48V на 5V, 12V, 19, като се наблюдава висока ефективност, около 94%.



Фигура 4 КПД на DC-DC преобразувател от 48V на 5V, 12V и др.

На Фигура 5 се наблюдава пример за зарядно за мобилен телефон или лаптоп, свързано към нисковолтова електрическа шина на постоянно напрежение. При тази схема преобразуването на напрежение се извършва само един път, като не се преминава през променливо напрежение.



Фигура 5 Примерна блокова схема на използване правокова шина

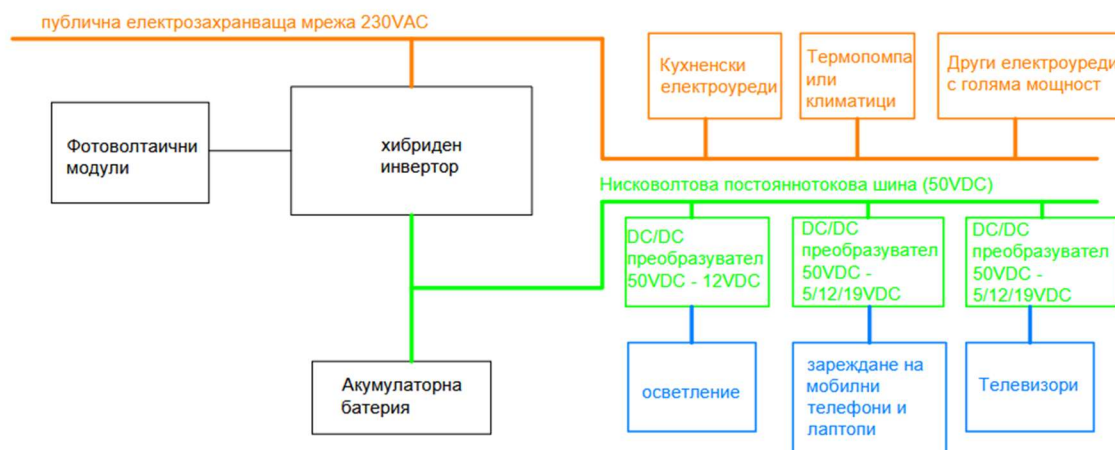
Може да се види, че чрез този метод се спестяват 7,7% от енергията. Избраният метод може да бъде приложен за много електроуреди в домакинството. За да може да бъде използвана шината на постоянно напрежение, акумулаторната батерия трябва да

бъде галванично изолирана от стандартната електрическа мрежа. В противен случай авария на преобразувателя зареждащ батерията или този свързващ я към постояннотоковата шина може да застраши безопасността на използващите я.

При сравняването на ефективностите се пренебрегват загубите от реактивна енергия, връщана от хибридният инвертор към електрическата мрежа. В главата практически изследвания, може да се види, че при работа на инвертор на малка мощност (около и под 100W) инвертора работи с много нисък фактор на мощност, поради което реактивната енергия превишава активната. Поради тази причина се оказва, че той разрежда батерията, но енергията не отива към консуматора, инвертора е напълно неефективен. В този случай добавянето на шина на постоянно напрежение за малки консуматори, прави преобразуването на енергията по ефективно с над 90%. Проблемът с обменянето на реактивна енергия с електропреносната мрежа, съществува и при използването на хибриден инвертор в светлата част на денонощието, при използване на енергия от фотоволтаични панели.

1.1 Предложени топологии на хибриден инвертор

Предложени са 2 топологии за създаване на хибридна соларна система, с акумулаторна батерия. Проектираните системи са за две различни ситуации, едната система е подходяща за случаите в които вече има инсталиран соларен стрингов инвертор (именуван на Фигура 7 като съществуващ инвертор). Добавянето на предложените преобразуватели дава възможност за преобразуване на системата в хибридна. Втората система е изцяло отделен хибриден инвертор. И двете системи дават възможност за добавяне на постояннотокова нисконапреженава шина за относително малки консуматори, в домакинството.



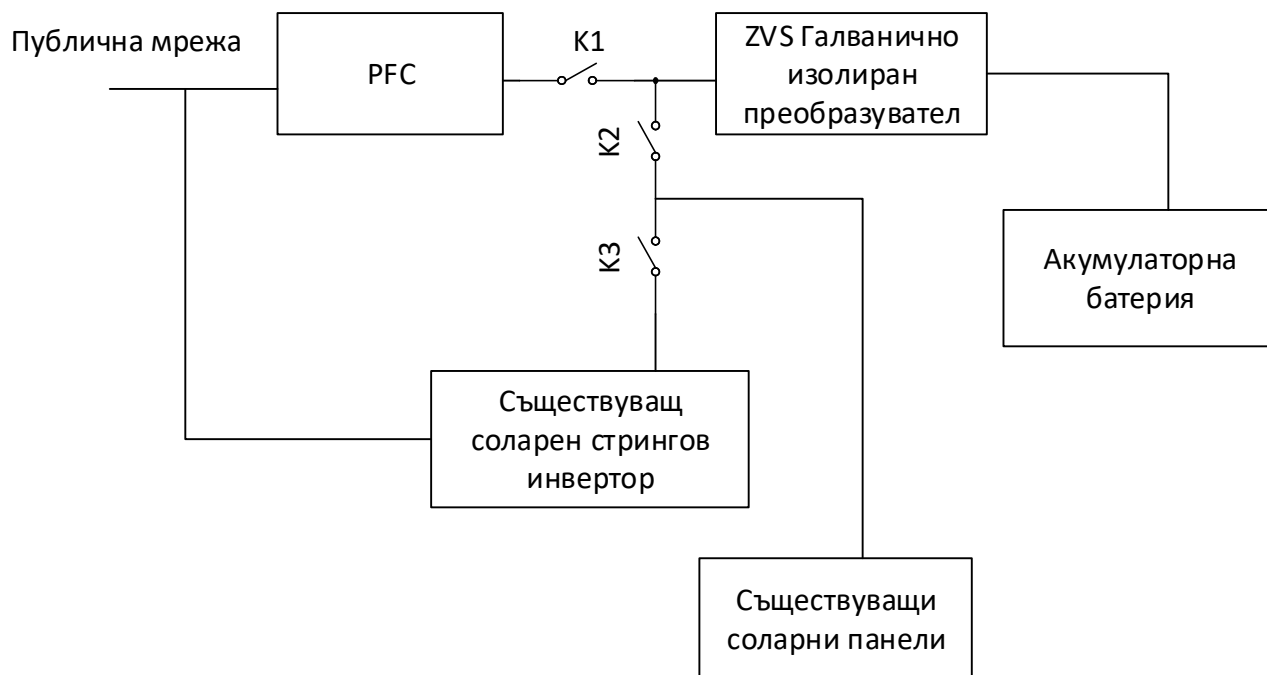
Фигура 6 Предложена топология с нисковолтова постояннотокова шина

1.1.1 Топология при допълване на съществуваща конвенционална фотоволтаична система

Блокова схема на система, създадена при наличие на соларен стрингов инвертор. На Фигура 7 е представена блоковата схема за такъв вид система. Предлага се решение за зареждане на батерията от публичната мрежа, и разреждане на батерията през съществуващ фотоволтаичен стрингов инвертор. Блоковете от схемата са разгледани и изследвани.

Основни принципи на работа:

- Зареждане на акумулаторната батерия от публичната мрежа – енергията протича през блока за повишаване на фактора на мощност (PFC) и галванично изолирания двупосочен преобразувател K1 е затворен. Като през този период K2 е отворен и стринговия инвертор е изцяло изолиран от допълнителните модули и батерията. Предполага се че това ще е в случаи, когато няма слънце греене, K3 е без значение в какво състояние е.
- Зареждане на акумулаторната батерия от соларните панели – енергията протича от соларните панели, през затворения K2 и галванично изолирания преобразувател. K1 и K3 са отворени.
- Разреждане на акумулаторната батерия към публичната мрежа – енергията протича от акумулаторната батерия, през галванично изолирания преобразувател, през K2 и K3 и съществуващия стрингов инвертор. Управлението на преобразувателя, позволява изходното напрежение и ток, да се държат като изход на соларен панел. Соларните панели обикновено имат обратни диоди, затова могат да бъдат успоредно свързани на напрежението, генерирано от ZVS преобразувателя, в случай на липса на такива диоди, те могат да се добавят или да си добави галваничен ключ.
- Отдаване на соларна енергия към мрежата – в този случай е затворен K3 и отворен K2.



Фигура 7 Блокова схема на предложена хибридна система, при наличие на стрингов инвертор

1.1.2 Топология при изграждане на нова фотоволтаична система.

В дисертацията е предложена схема на хибриден фотоволтаичен инвертор, който да комбинира в себе си възможност за изход с променливо и постоянно напрежение. Блоквата му схема е представена на Фигура 8.



Фигура 8 Предложена топология на хибридна система

Той има в себе си следните основни функционалности:

- Режим на заряд на акумулаторната батерия от фотоволтаик – в този режим работи блока „Галванично изолиран двупосочен dc/dc преобразувател с

резонансни преходи“, в посока фотоволтаични панели/правотокова шина към батерия.

- Режим на разряд на батерията от постояннотоков товар – в този режим не работи нито един преобразувател от системата, с цел намаляване на загубите от преобразуване.
- Режим на връщане на енергия в променливотоковата мрежа от фотоволтаик – в този режим работи преобразувателя „Инвертор за връщане в мрежата“, като получава енергия от високоволтовата постояннотокова шина и я преобразува в променливотокова, за да бъде отдадена в електроенергийната мрежа.
- Режим на връщане на енергия в променливотоковата мрежа от батерия - в този режим работят преобразувателите „гальванично изолиран двупосочен dc/dc преобразувател“, в посока от батерия към правотокова шина. След него „инвертора за връщане в мрежата“, преобразува енергията от високоволтовата постояннотокова шина и я отдава към електроенергийната мрежа.
- Режим на зареждане на акумулаторната батерия от мрежата. – в този режим работят преобразувателите „изправител с допълнителна схема за корекция на фактора на мощност“, в посока от електроенергийната мрежа към високоволтовата постояннотоковата шина на преобразувателя. От постояннотоковата шина енергията бива преобразувана чрез преобразувателя „Двупосочен dc/dc преобразувател“ към по-ниското напрежение на батерията.

Изводи

В главата са разгледани основните предизвикателства към електронните преобразуватели при съхранението и преобразуването на енергия от фотоволтаични източници на енергия. Беше отбелязано, в основата на решението на тези предизвикателства е оптимизация на ефективността при преобразуване на енергията от преобразувателя. В главата е предложена и анализирана схема на преобразувател от постоянно в постоянно напрежение с намалени комутационни загуби, който да залегне в основата на система на хибриден фотоволтаичен инвертор.

Представена е блокова схема на предложена схема на хибриден инвертор на напрежение, който може да подобри ефективността при преобразуването на енергията от фотоволтаичен източник на енергия. Системата предлага възможности за съхранение на енергията в акумулаторна батерия и нейното използване от товар, свързан към постояннотокова шина или отдаване към променливотокова мрежа. В главата е разгледан математически анализ на основните блокове от схемата, като е подробно анализиран двупосочен преобразувател от постоянно в постоянно напрежение с намалени комутационни загуби. На база математически анализ е изведена предавателната функция, както и зависимостта на необходимото минимално мъртво време на схемата за осигуряване на превключване при нулево напрежение в зависимост от натоварването на схемата.

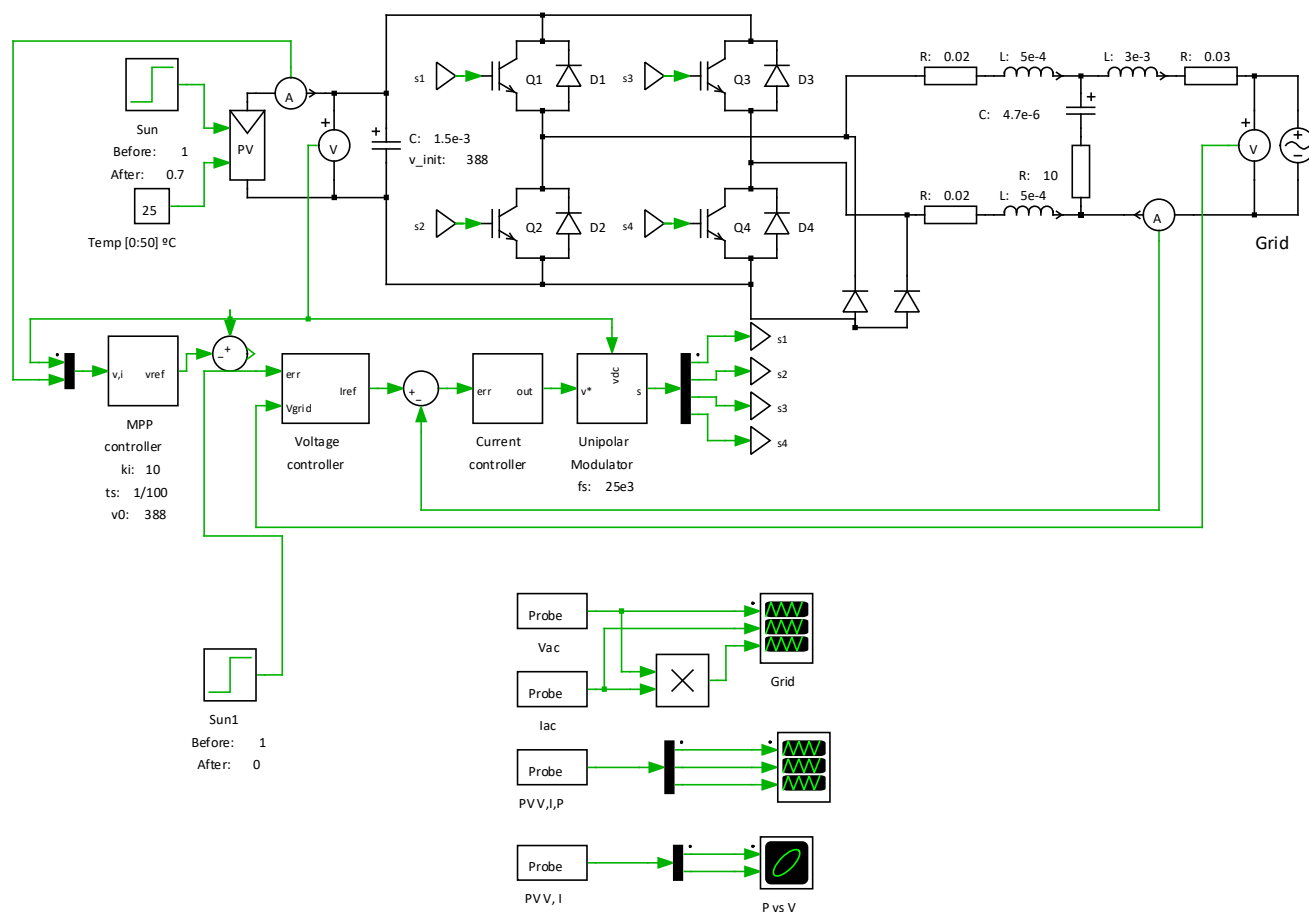
Глава 2 Електронни преобразуватели за хибридни инвертори

2.1 Преобразувател от постоянно в променливо и от променливо в постоянно

При избора на силова схема за повишаване на фактора на мощност и инвертор, съществуват няколко основни изисквания:

- Висок коефициент на полезно действие.
- Висок фактор на мощност.
- Възможност за обратимост на силовата схема, за да може работеща като инвертор за връщане към електроенергийната мрежата.

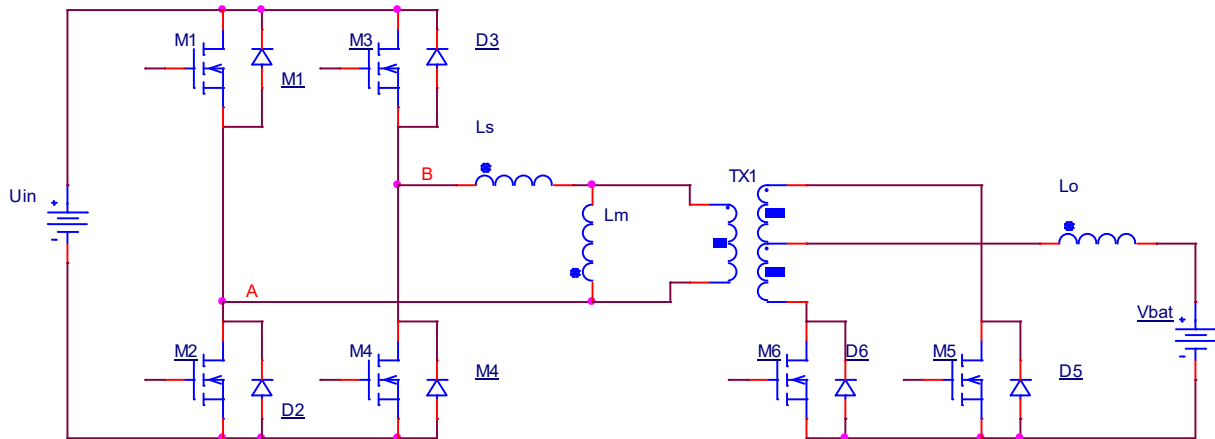
В литературата съществуват няколко схеми за високоефективно преобразуване от мрежата към постоянното напрежение. Те най-общо се базират на несиметрични схеми на диодни изправители, при които част от диодите са заменени с напълно управляеми прибори. Използваната схема е показана на Фигура 9.



Фигура 9 Симулирана схема на инвертор за отдаване към електроенергийната мрежа.

2.2 Анализ на изолиран преобразувател на постоянно напрежение.

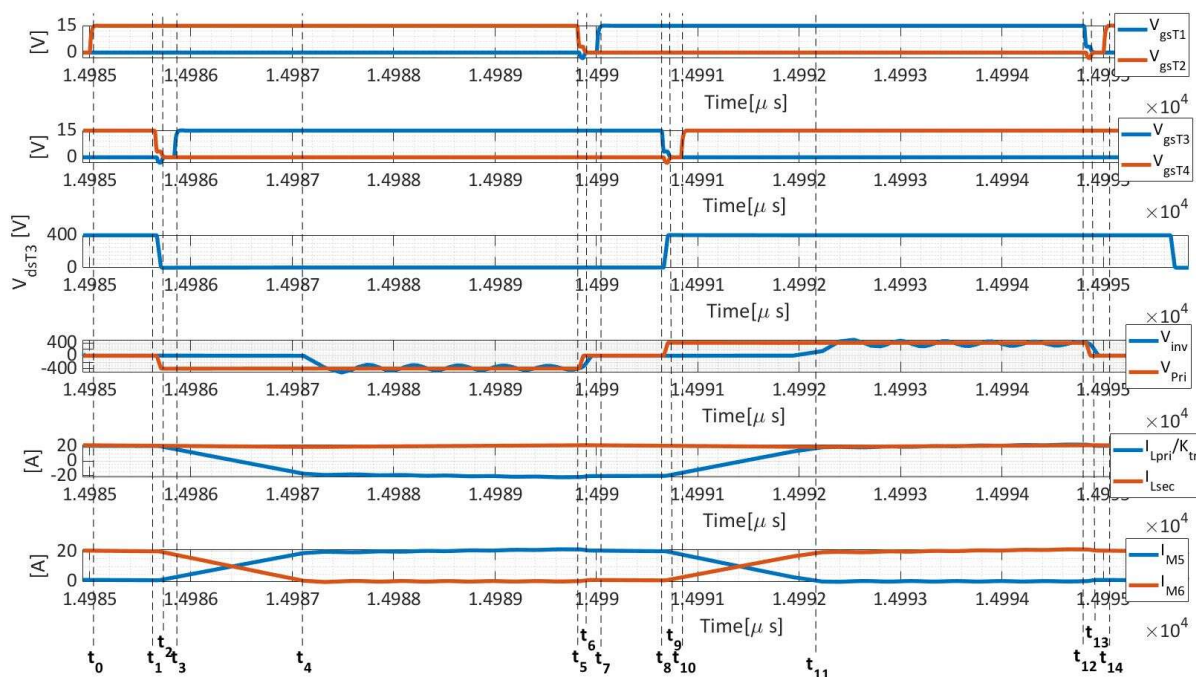
На база на еквивалентна схема на преобразувателя представена на Фигура 10, е извършен математически анализ на преобразувателя. Времедиаграмите на преобразувателя са представени на Фигура 11.



Фигура 10 Анализирана схема

Допускания:

- Транзисторите се моделират с константно съпротивление в отпушено състояние и с техния капацитет (който се приема за константен) при запушено състояние
- Изходния ток се приема за константен, т.е изходната верига се приема за генератор на ток
- Трансформатора се моделира със своята индуктивност на разсейване L_s и на намагнитване L_m . Предавателното съотношение $Kp = \frac{N_p}{N_{s1}}$
- С цел опростяване на анализа, изходния синхронен токоизправител е с 2 транзистора и среден извод на трансформатора.



Фигура 11 Времедиаграми на анализираната схема

Изведено е минималното мъртво време, за работа при превключване при нулево напрежение.

$$t_1 = \sqrt{2L_s C_o} \sin^{-1} \left(\frac{U_{in}}{K_p I_o \sqrt{\frac{L_s}{2C_o}}} \right) \quad (2-1)$$

За ефективния коефициент на запълване, който дава връзка между входно и изходното напрежение може да се запише:

$$D_{ef} = D - \frac{4K_p I_o L_s}{V_{in} T_s} \quad (2-2)$$

От математическия анализ направен в дисертацията става ясно, че преобразувателя работи при високи ефективности след определен процент на натоварване. В случаите на малко натоварване, dc-dc преобразувателя, както и преобразувателя от постоянно в променливо напрежение, работят неефективно. Решението на този проблем, както и на проблема с работа при лош фактор на мощност при малко натоварване на инвертора е чрез добавянето на нисконапреженова постояннотокова шина.

Изводи

В главата са разгледани основните предизвикателства към електронните преобразуватели при съхранението и преобразуването на енергия от фотоволтаични източници на енергия. Беше отбелязано, в основата на решението на тези предизвикателства е оптимизация на ефективността при преобразуване на енергията от преобразувателя. В главата беше предложена и анализирана схема на преобразувател от постоянно в постоянно напрежение с намалени комутационни загуби, който да залегне в основата на система на хибриден фотоволтаичен инвертор.

Представена е блокова схема на предложена схема на хибриден инвертор на напрежение, който може да подобри ефективността при преобразуването на енергията от фотоволтаичен източник на енергия. Системата предлага възможности за съхранение на енергията в акумулаторна батерия и нейното използване от товар, свързан към постояннотокова шина или отдаване към променливотокова мрежа. В главата е разгледан математически анализ на основните блокове от схемата, като е подробно анализиран двупосочен преобразувател от постоянно в постоянно напрежение с намалени комутационни загуби. На база проведения математически анализ е изведена предавателната функция, както и зависимостта на необходимото минимално мъртво време на схемата за осигуряване на превключване при нулево напрежение в зависимост от натоварването на схемата.

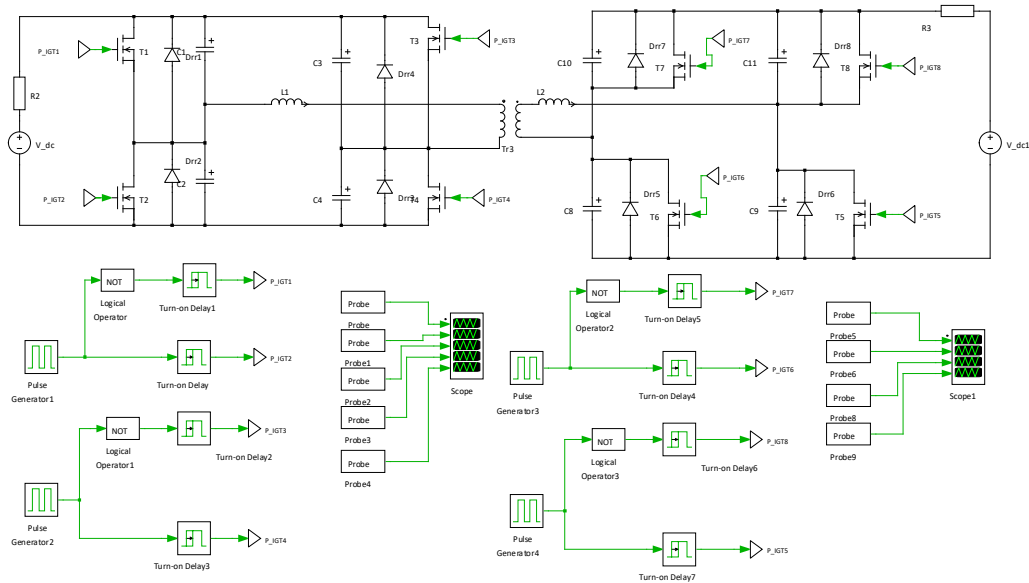
Разгледаната топология с добавяне на нисконапреженова постояннотокова шина, значително повишава ефективността, както и фактора на мощност, при работа на малки мощности.

Глава 3 Верифициране на разработената система

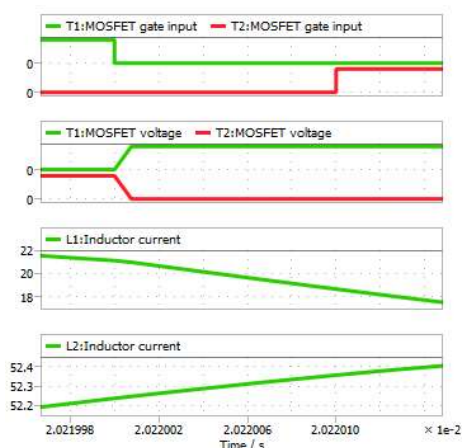
Целта на верифицирането е да се докаже, че е направена система с по-висока ефективност от комерсиалните хибридни системи с галванично изолиране. В главата са изследвани и направени симулации на преобразувателите от глава 2.

3.1 Верификация на преобразувател от постоянно в постоянно напрежение

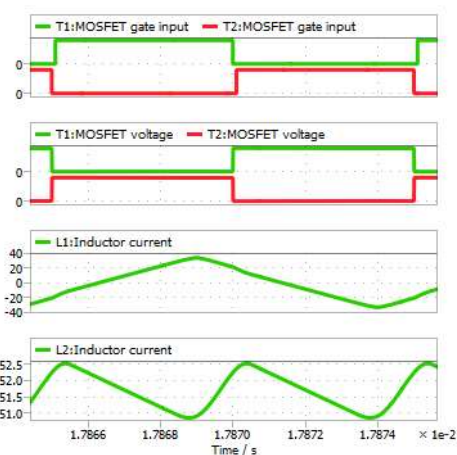
Изследваната схема е показана на Фигура 12. Изследвана е в режим на понижаване и повишаване на входното си напрежението към батерията. Времедиаграмите при понижаване на напрежението са представени на Фигура 12.



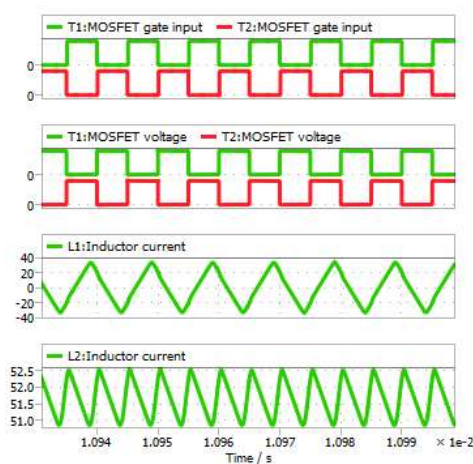
Фигура 12 Симулирана схема на двупосочния преобразувател от постоянно в постоянно напрежение



Фигура 13 Времедиаграми на работа в режим правотокова шина към батерия

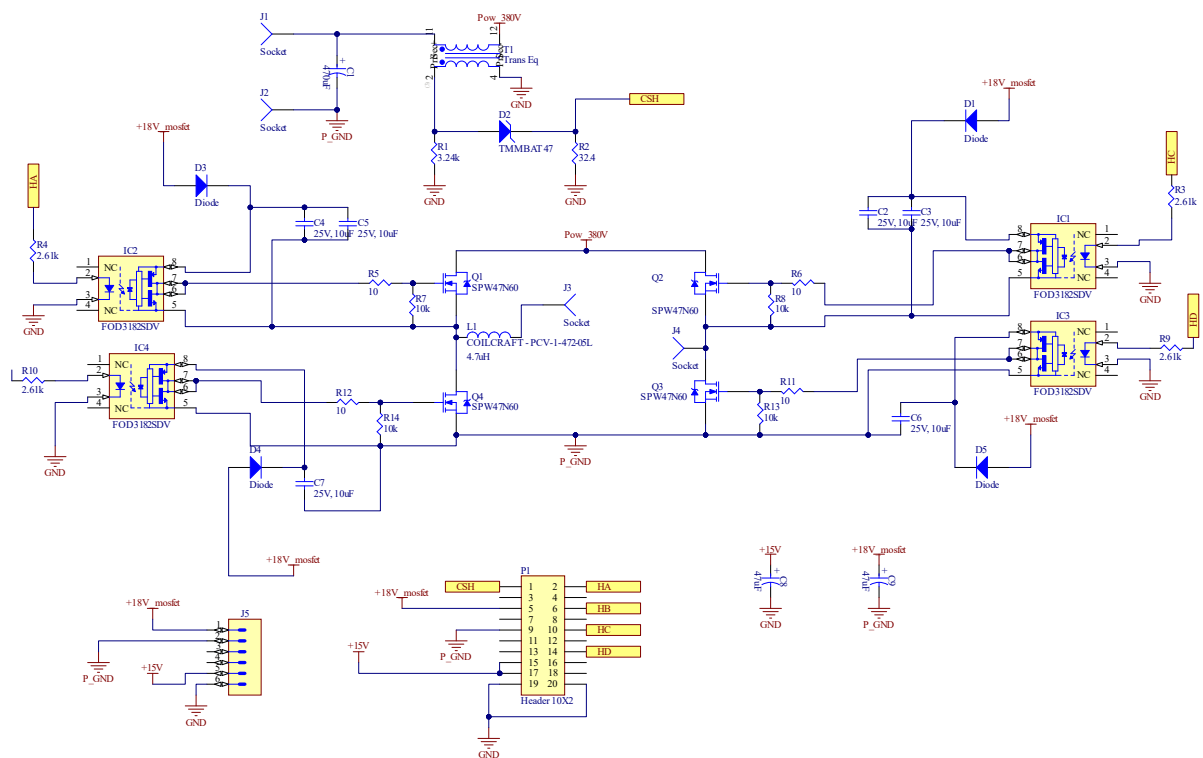


Фигура 14 Времедиаграми на работа в режим правотокова шина към батерия



Фигура 15 Времедиаграми на работа в режим правотокова шина към батерия

Проектирана е силова схема на преобразувателя от постоянно в постоянно напрежение и е изработено устройство. С изработеното устройство са направени практически изследвания. Проектираната силова схема е представена на Фигура 16 и е изследвана в глава 4 от дисертацията.



На Фигура 16Error! Reference source not found. е представена силовата схема на двупосочният преобразувател от постоянно в постоянно напрежение с резонансни преходи. Направен е физически макет на устройството и са изследвани времедиаграмите и ефективностите на преобразувателя.

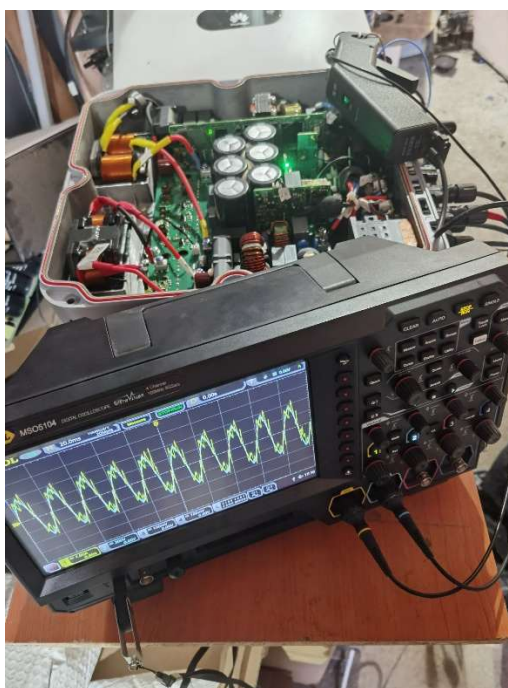


Фигура 17 Опитна постановка на изследване на изправител с подобрен фактор на мощност

На Фигура 17 е представена експерименталната постановка за изследване на ефективността на схема изправител с подобрен фактор на мощност.

3.2 Изследване на съществуващи хибридни системи;

Направени са изследвания на ефективността на комерсиални хибридни инвертори с галванично изолиране на батерията. Освен снемане на ефективността на инвертора е анализиран и хармоничния състав на изходното му напрежение .

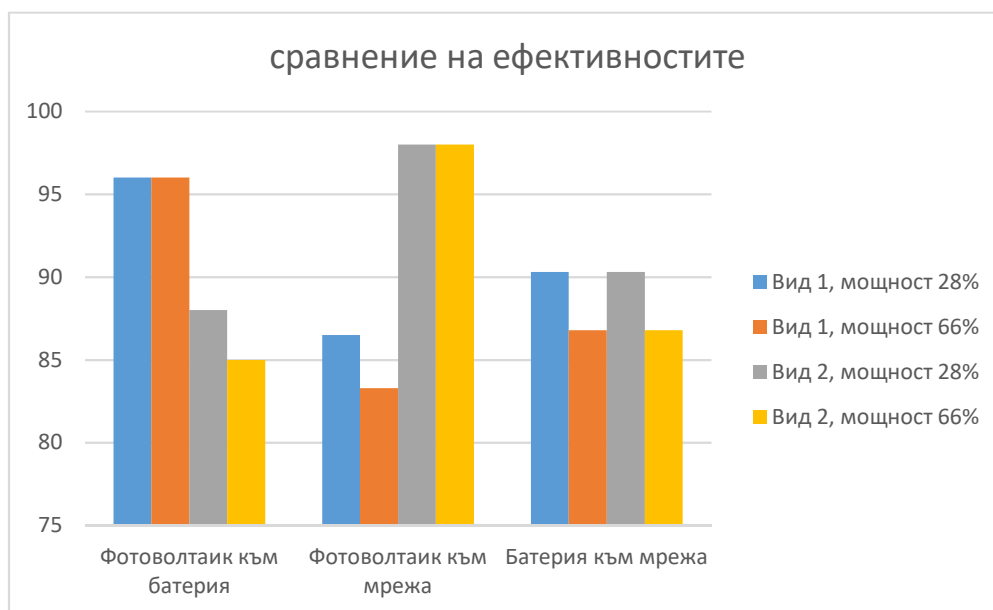


Фигура 18 Опитна постановка на практическо изследване на комерсиален инвертор

На Фигура 18 е представена експерименталната постановка за изследване на комерсиален фотоволтаичен инвертор. Изследвана е неговата ефективност при различни режими на работа. Изследван е и хармоничният му състав при различни мощности. Извършени са изследвания на няколко различни комерсиални системи, като данните са обобщени в Таблица 1.

Вид на системата	Посока на преобразуване	Мощност [W] (% от номиналната)	Ефективност [%]
Вид 1	Фотоволтаик към батерия	840 (28)	96
	Фотоволтаик към мрежа	840 (28)	86.5
	Батерия към мрежа	840 (28)	90.3
	Фотоволтаик към батерия	2000 (66)	96
	Фотоволтаик към мрежа	2000 (66)	83.3
	Батерия към мрежа	2000 (66)	86.8
Вид 2	Фотоволтаик към батерия	840 (28)	88
	Фотоволтаик към мрежа	840 (28)	98
	Батерия към мрежа	840 (28)	90.3
	Фотоволтаик към батерия	2000 (66)	85
	Фотоволтаик към мрежа	2000 (66)	98
	Батерия към мрежа	2000 (66)	86.8

Таблица 1 Сравнение на ефективностите на съществуващи системи



Фигура 19 Графично сравнение на ефективностите на съществуващи системи

На Фигура 19 са представени резултати от изследване на ефективността, на две различни комерсиални хибридни системи с галванично изолиране на батерията. Изследването е направено за да се оцени ефективността при различни натоварвания и да се подобри, с предложения хибриден преобразувател.

3.3 Сравнение между предложената система и съществуващи такива

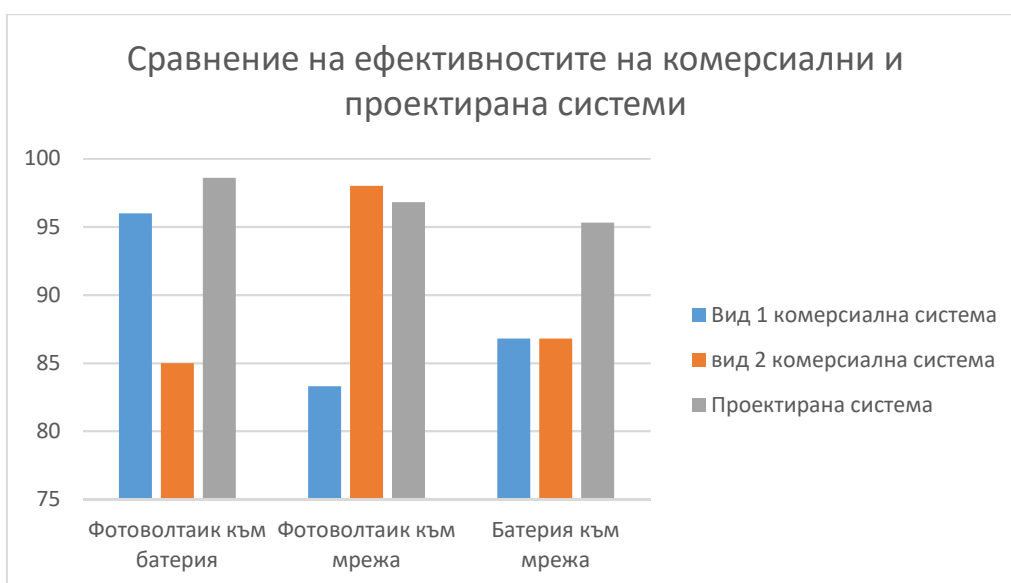
На база извършените изследвания могат да бъдат обобщени данните за ефективността на преобразуването, при използване на предложената или два вида комерсиални системи, от различни производители. Двете комерсиални системи са изградени от инвертори с галванично изолиране на батерията. Сравнението на измерените ефективности е представено в Таблица 2. Графично сравнението е представено на Фигура 20.

Вид на системата	Посока на преобразуване	Мощност [W] (% от номиналната)	Ефективност на комерсиална система [%]	Ефективност на проектирана система [%]
Вид 1 на комерсиална система	Фотоволтаик към батерия	2000 (66)	96	98,6
	Фотоволтаик към мрежа	2000 (66)	83.3	96,8
	Батерия към мрежа	2000 (66)	86.8	95,3

Таблица 2 сравнение на ефективностите на комерсиална система вид 2 и предложената система

Вид на системата	Посока на преобразуване	Мощност [W] (% от номиналната)	Ефективност на комерсиална система [%]	Ефективност на проектирана система [%]
Вид 2 на комерсиална система	Фотоволтаик към батерия	2000 (66)	85	98,6
	Фотоволтаик към мрежа	2000 (66)	98	96,8
	Батерия към мрежа	2000 (66)	86.8	95,3

Таблица 3 Сравнение на ефективностите на комерсиална система вид 2 и предложената система



Фигура 20 Графично сравнение на ефективностите

Както може да се види от таблицата и графиката, предложената система предлага много по-добра ефективност при преобразуване от батерия към мрежа. Този режим на работа е ключов при балансиране на електропреносната система, както и при използване в домашни условия.

Предложената система предлага и по-добра ефективност при зареждане на батерията от фотоволтаик, което позволява по-добро оползотворяване на съществуващата енергия.

Изводи

В главата е представено симулационно и експериментално верифициране на предложената в Глава 2 система на хибриден инвертор. За целта в главата са разработени симулационни модели на блоковете изграждащи предложената система, които включват както силовата схема, така и системата за управление. Разработените модели са използвани за демонстриране на режимите на работа на предложения преобразувател във различни възможни режими на работа, които да послужат за база за сравнение със експериментално разработените блокове.

Втората стъпка към верификацията на предложената система е нейното сравнение с комерсиално съществуващи подобни системи от различни производители. В главата са разгледани две подобни системи и са снети ефективностите от преобразуването на енергия при тях в различни режими на работа. Снетите ефективности са сравнени с получените такива при сходни натоварвания на предложената система и на база получените резултати може да бъде направени следните основни заключения:

- Предложената система предлага по-добра ефективност при преобразуване на енергия от батерия към мрежа.

Подобряването на тази ефективност е ключово при задълбочаващото се предизвикателство за балансиране на производството и консумацията на електрическа енергия при електрическа мрежа преобладаваща от възобновяеми източници на енергия.

- Предложената система е по-ефективна при преобразуване на енергия от фотоволтаик към батерия

В основата на полученото подобрене е анализираният в глава 2 преобразувател от постоянно в постоянно напрежение с намалени комутационни загуби.

Глава 4 Заключение

В дисертацията са разгледани основните предизвикателства, които възникват вследствие на увеличаване на дела електрическа енергия получавана от възобновяеми енергийни източници и по-конкретно фотоволтаични панели. Непостоянния характер на източника на енергия води до променливо производство на електрическа енергия от този тип енергийни източници и последващите проблеми с балансирането на потреблението и генерацията. В този контекст възможно решение на тези нови предизвикателства е добавяне на допълнителни енергийни източници и съпътстващите ги електронни преобразуватели. Именно архитектурата, режимите на работа и динамиката на такъв тип хибридни фотоволтаични инвертори са в основата на представената дисертация.

4.1 Приноси

Според автора приносите в разработения дисертационен труд могат да се класифицират по следния начин.

Научни приноси

- Математически анализ на процесите на превключване на електронен преобразувател от постоянно в постоянно напрежение с цел оптимално управление, намаляващо комутационните загуби.
 - Изведени математически зависимости за продължителността на мъртвото време от системата във функция на изходния капацитет на силовите транзистори изграждащи електронния преобразувател
 - Извеждане на математическа зависимост за предавателната функция на разглеждания преобразувател и зависимостта му от продължителността на мъртвото време

Научно-приложни

- Предложената система на хибриден фотоволтаичен преобразувател.
 - Съставен модел на преобразувател от постоянно в постоянно напрежение с намалени комутационни загуби и неговата система за управление
 - Съставен модел на преобразувател от двупосочен постоянно в променливо напрежение.
 - Представено симулационно изследване при работа в режим на отдаване на електрическа енергия в променливотоковата мрежа, както и при работа в режим на изправител с подобрен фактор на мощност.
 - Съставен модел на система за управление на предложената система контролираща енергийните потоци в системата. Предложен пропорционално-резонансен регулатор за контролиране на енергията отдавана в електрическата мрежа, както и система за следене при отпадане на електропреносната мрежа – островен режим на работа

Приложни

- Подобряване на ефективността и фактора на мощност при малка консумация от хибридна система, чрез добавянето на нисковолтова постояннотокова шина.
- Симулационно изследване на предложената система от преобразуватели в различни режими на работа
- Експериментално изследване за ефективността и качеството на електрическата енергия от комерсиални фотоволтаични инвертори
 - Изследване на фактора на мощност на различни комерсиални фотоволтаични инвертори при малки натоварвания.
- Експериментално сравнение на ефективността при преобразуване на енергия между разработената система и комерсиални решения
 - Дефиниране на режими на работа на преобразувателя и сравнение на коефициента на полезно действие при всеки режим на работа

Статии към дисертацията

Статии

- [1] N. Nehovski, "High-power isolated hybrid solar inverter," *2024 33rd International Scientific Conference Electronics, ET 2024 - Proceedings*, 2024, doi: 10.1109/ET63133.2024.10721550.

Основната цел на тази статия е да предложи високоефективен хибриден инвертор с галванично изолиране между батерията и мрежата. Предложена е схема на такъв преобразувател, която първо се анализира, след което се представят както симулации за различните режими на работа така и експериментална проверка на неговата ефективност.

- [2] N. Nehovski and V. Dimitrov, "Analysis of ZVS Converter for Energy Storage in PV Systems," *2024 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2024 - Proceedings*, 2024, doi: 10.1109/SIELA61056.2024.10637885.

Статията предлага преобразувател, който може да се използва за модернизиране на съществуващи фотоволтаични (PV) системи с възможност за съхранение на енергия. Предложена е схема на инвертор на напрежение с фазово управление и резонансни за преобразуване на енергия между PV системата и акумулаторна батерия. Предложено е такава топология на преобразувател за мощности, характерни за домашни системи – до 10 kWp инсталирани фотоволтаични панели. Предложената схема е анализирана чрез симулация и експериментална проверка на постижимата ефективност при различни входни напрежения.

- [3] N. Nehovski and V. Dimitrov, "Hybrid Solar Inverters evaluation," *2023 32nd International Scientific Conference Electronics, ET 2023 - Proceedings*, 2023, doi: 10.1109/ET59121.2023.10279451.

В статията са представени силовите топологии, използвани в наличните на пазара хибридни инвертори, заедно с измерени стойности на ефективността им по време на работа. Въз основа на тези данни е предложена нова силова топология, която увеличава ефективността в определени сценарии. Експериментална проверка на топологията по време на зареждане на батерията е представена, за да се демонстрират нейните предимства.

Договори

Изследванията представени в дисертацията са подпомогнати от договор в помощ на докторант, финансиран от НИС на ТУ- София с номер 232ПД0003-03 в периода 2023-2024 година.

Power converters for renewable energy sources

by
Nikolay Vasilev Nehovski

Submitted to the Faculty of Electrical Engineering and Technology
on March 31, 2025, in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy

The rapid growth of the percentage energy generated from renewable sources leads to a growing need of energy storage for balancing. Introducing this storage on a local level for every solar inverter leads to a number of advantages. This hybrid solar inverter has the benefit of relatively small storage requirements and can be an object of optimization in terms of energy consumption of the household. Using power converters for optimal control and implementation of such solar inverters is the primary goal of this dissertation.

Chapter 1 starts with problem definition of the increasing need of adding local energy storage for every solar inverter. Based on this it provides an overview of the topologies that can be used to design a hybrid inverter. In order for this overview to be full the chapter presents the different standards for islanding, safety and harmonic content for solar inverters and presents a classification of the types of power converters.

Chapter 2 expands on the problem definition given in Chapter 1 and suggests two topologies for implementing a hybrid solar inverter. The first system is for retrofitting existing solar inverters with energy storage, while the second is for a new hybrid inverter. For both cases a phase-shifted dc/dc converter with resonant transitions is proposed for coupling the battery to the dc bus. This converter is thoroughly analyzed for obtaining mathematical relations for the required dead time from the control system to obtain zero voltage switching of the power transistors. Analytical results for the transfer function of the converter are also given. A 48V dc bus is proposed for the second topology in order to improve losses obtained from poor power factor at low loads of a typical ac/dc power converter.

Chapter 3 provides experimental and simulation results for verification of the topologies presented in Chapter 2. Simulation models for each converter are developed and the results obtained are compared to measurements made from a demonstrator board developed by the author. In order to compare the proposed system to commercially available ones, experimental data from such systems are presented.

Appendix A provides detailed explanation and design of the used demonstrator board of a hybrid solar inverter.