



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Електротехнически Факултет
Катедра Електроенергетика

Маг. инж. Костадин Богословов Виглов

**УПРАВЛЕНИЕ НА СЪВРЕМЕННИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ
СИСТЕМИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника и
автоматика“

Научна специалност: „Електрически мрежи и системи“

Научен ръководител: доц. д-р инж. Рад Станев

СОФИЯ, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електроенергетика“ към Електротехнически факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 28.05.2024 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 10.10.2024 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-51 / 24.06.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Ангел Белчев Цолов – председател
2. доц. д-р инж. Даниел Димитров Добрилов – научен секретар
3. доц. д-р инж. Йончо Любенов Каменов – ТУ - Варна
4. доц. д-р инж. Юлиан Емилов Рангелов – ТУ - Варна
5. доц. д-р инж. Николай Деянов Николаев – ТУ - Варна

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Ангел Белчев Цолов
2. доц. д-р инж. Йончо Любенов Каменов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет на ТУ-София, блок №12, кабинет № 12427.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Електроенергетика“ на Електротехнически факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Костадин Виглов

Заглавие: Управление на съвременни електроенергийни системи

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

1. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Интензивното навлизане на децентрализирани енергийни източници (ДЕИ) в съвременните електроенергийни системи (ЕЕС) дава възможност за формиране на микро, мини и наномрежи, които предоставят широк кръг нови възможности и същевременно поставят предизвикателства пред осъществяването на равновесие между производство и потребление и поддържане на устойчива работа на ЕЕС, с нужното качество на електрическата енергия, независимо от динамично-изменящите се нужди на ползвателите ѝ.

Развитието на интелигентни мрежи предлага допълнителни решения, които подпомагат управлението на ЕЕС и поддържането на устойчивостта ѝ. Като „интелигентни“ могат да се представят мрежи, които дават възможност за:

- автоматично управление в зависимост от зададени режимни параметри;
- внедряване на стратегии за управление, водещи до подобряване качеството на електрическата енергия;
- намаляване влиянието на потребители и производители със стохастичен енергиен профил;
- резервиране и предотвратяване на претоварване;
- гъвкаво управление на товара (Demand Side Management - DSM).

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на работата е да изследва управлението на съвременни ЕЕС в контекста на методите за регулиране на напрежението в мрежи с ДЕИ, анализа посредством техники със силов хардуер във веригата, както и решенията за интелигентно управление на товари. Формирани са няколко перспективни задачи за изследване, които засягат предизвикателствата, свързани с управлението на съвременни ЕЕС:

1. Регулиране на напреженията;
2. Анализ на управлението и устойчивостта на ЕЕС чрез експерименти със силов хардуер във веригата;
3. Интелигентно управление на товара;
4. Постояннотокови и хибридни (AC/DC) мрежи НН;
5. Поведение на инверторно свързани генератори с акумулатори при КС;

Методология

При изследванията са приложени математични модели и софтуерни инструменти за анализ на процеси. Използвани са физически модели на устройства и системи, включително и силов хардуер, подходящи за пресъздаване на условия и събитията, обекти на анализ, както и за изпитване на физически устройства и стратегии за управление на товари.

Практическа приложимост

Получените резултати биха били полезни при разработване на методи и стратегии за регулиране на напрежението в мрежи с ДЕИ. Представените стратегии и устройства

допринасят към общото подобряване на управлението на ЕЕС и качеството на електрическа енергия в интелигентни мрежи.

Апробация

Основните резултати от проведените изследвания са проверени чрез сравнителни софтуерни аналитични и хардуерни експериментални мероприятия.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в пет публикации, от които четири са в съавторство и една е самостоятелна. Всички публикации са представени на международни конференции и са видими в IEEE и SCOPUS.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 162 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 126 литературни източници, като 100 са на латиница и 25 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 201 фигури и 66 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Литературен обзор

След запознаване с литературата по темата са регистрирани широк кръг нови задачи, които биха могли да бъдат изследвани и отчасти решени. Направен е опит за систематизиране на основните задачи, представляващи интерес и класифицирането им в следните основни, перспективни за изследването, групи:

- Регулиране на напреженията в разпределителни мрежи с разпределено производство;
- Интелигентно управление на режимните параметри чрез изменение на гъвкави товари;
- Постояннотокови и хибридни (променливотокови и постояннотокови) мрежи НН;
- Инверторно свързани генератори с акумулатори - устойчивост при преходни процеси след големи смущения;
- Изследвания със силов хардуер във веригата в контекста на устойчивостта на бавните преходни процеси, обусловени от големи системни аварии.

ГЛАВА 2. Аналитичен подход с математично моделиране за изследване на регулиране на напреженията в разпределителни мрежи с разпределено производство

Реализирано е моделно изследване на режимите в електроразпределителните мрежи с ДЕН, както и методите, средствата и похватите за регулиране на напрежението. За валидиране на ползваните модели е направено сравнително изследване с помощта на програмите STATUS, NEPLAN и DMS.

Методология и подходи за изследване на установени и квазустановени режими в трифазни разпределителни мрежи с разпределено производство

Предвид характера на изследването и характера на протичащите процеси, при реализацията е целесъобразно да бъдат използвани статичен и квазидинамичен подходи. Характерно за статичният анализ е разглеждане на електрическите величини в определен момент или период от времето, чиито стойности се приемат за установени и неизменни във времето. При квазидинамичния подход се разглеждат поредица от статични, последователни във времето установени режими. Това дава възможност да се проследи изменението на електрическите величини във времето при бавни преходни процеси като се отчете действието на устройствата, регулиращи напрежението, активната и реактивна мощност, както и да се оценят загубите на активна и реактивна мощност в различните елементи на мрежата.

Установените режими в ЕЕС се обуславят от неизменни във времето стойности на режимните параметри при допускането, че отклоненията в тях са пренебрежими [1],[4]. За осъществяване на настоящото изследване е целесъобразно да бъде използван методът на възловите напрежения във формата на баланс на мощностите с решаване на нелинейните уравнения по методът на Нютон-Рафсон [30],[32],[35].

Системата уравнения на потокоразпределението е съставена от възловите уравнения във формата на баланс на мощностите. Избрано е да бъде ползвано представяне в полярна форма. Причината за това е по-добрата сходимост, която този запис показва [2].

$$P_i = \sum_{m \neq i} U_i U_m (G_{im} \cos \delta_{im} + B_{im} \sin \delta_{im}) \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{m \neq i} U_i U_m (G_{im} \sin \delta_{im} - B_{im} \cos \delta_{im}) \quad (2)$$

Важен фактор в поставената задача представлява намирането на загубите на активна и реактивна мощност в мрежата при различните анализирани режими, на които системата е подложена. Численото намиране на загубите на мощност в елементите на ЕЕС по аналитичен път е осъществено като след намиране на решение за модулите и фазите на комплексните напрежения са определени потоците на мощност и загубите на мощност по клоновете.

Избор на показатели за оценка на състоянието при регулиране на напрежението и режимите в електроразпределителните мрежи с ДЕН

За постигане на целите и задачите на изследването е направено проучване на информативните показатели за оценка на състоянието при регулиране на напрежението и режимите в електроразпределителните мрежи с разпределени производствени мощности. В резултат са избрани следните показатели, които да бъдат използвани при оценка на състоянието:

- Профил на напрежението при избрани характерни режими;
- Профил на напрежението за избрани характерни периоди от време;
- Загуба/ повишаване на напрежението в елементите на електроразпределителната мрежа- в именувани и относителни единици или проценти;
- Загуби на мощност в елементите на електроразпределителната мрежа- в именувани и относителни единици или проценти;
- Загуби на енергия в елементите на електроразпределителната мрежа- в именувани и относителни единици или проценти;
- Като допълнителен показател за оценка на състоянието е предложено ползване на количеството недоставена активна енергия от производителите, в следствие на регулиране на напрежението.

Изследването на загубите на мощност и енергия в елементите на електроразпределителната мрежа, породени от активните и реактивните потоци на мощност и енергия се основава на сравнение на резултатите за различните варианти на регулиране, както и с и без регулиране на напрежението.

Освен посочените показатели съществуват и са възможни множество други. От съображения за краткост и простота, в настоящата работа ще бъдат представени само тези, които са открити като най- важни.

Избор на софтуер за целите на изследването

Проучени са различни видове софтуерни решения за анализ на установени и квазиустановени режими в разпределителни мрежи с разпределено производство. Това са Neplan, DiGSilent, DMS, MATLAB Simulink и STATUS.

Предвид характера на настоящото изследване и отчетените възможности и специфики на посочените софтуерни решения е целесъобразно поставената цел и задачи на изследването да бъдат осъществени чрез програмата STATUS, като допълнително следва да бъдат разработени модули, които отчитат специфичните нужди на изследването.

Методологична и софтуерна реализация на инструментите и средствата за анализ

За осъществяване на анализа са избрани набор от съществуващи математични модели на елементите от ЕЕС. Част от моделите са вече разработени в програмата STATUS. За случаите, в които не се разполага с разработени съществуващи модели, на алгоритмично ниво са създадени математични модели, описващи поведението на силовите елементи, регулаторите им и законите за управление, които се ползват при управление на режимните

параметри. Разработени са нови софтуерни обектно-ориентирани модули към програмата STATUS, изпълняващи специфичните необходими функционалности.

Избор на представителни трифазни симетрични тестови системи и възможни конфигурации, чрез които да бъде осъществено изследването

Съвместно с електроразпределително предприятие (ЕРП) в Р България е направен анализ на съществуващи разпределителни мрежи СрН и НН и са избрани представителни мрежи с потребление и разпределено производство с 832 възела 832 клона, от които 187 възела за мрежа СрН, 645 възела за мрежа НН, 186 клона в мрежа СрН, 646 клона в мрежа НН, инсталирана трансформаторна мощност 19523 kVA, инсталирана генераторна мощност от ДЕИ 3251 kWp.

Избрани са две мрежи ниско напрежение, захранвани от ТП1 и ТП2. Моделно са реализирани три конфигурации на всяка от мрежите:

- Конфигурация, съответстваща на действителното състояние на мрежата към момента на изследването. При тази конфигурация вследствие на навлизането на ДЕИ, е направена пълна рехабилитация на мрежата вкл. за някои от генераторите и чрез отделни директни кабелни връзки на ДЕИ към трафопост.
- Конфигурация преди направената реконструкция. Тази конфигурация отразява състоянието на мрежата преди направената реконструкция вследствие навлизането на ДЕИ.
- Конфигурация с възможна частична рехабилитация. Тази мрежа е синтезирана като варианта на мрежата преди рехабилитацията е редактиран, така че да отрази конфигурация, при която е направената реконструкция със запазване на топологията (графа на свързаност) на мрежата и са увеличени сеченията на участъците, по които преминава енергията на ДЕИ.

Мрежата СрН е свързана с описаните по-горе мрежи НН, захранени от ТП1 и ТП2. Използвана е нормалната схема на работа на мрежа СрН, при която ВС се захранва от съответния извод.

Обработка на данните за избраните тестови системи

Създадена е специализирана софтуерна реализация за автоматично въвеждане на модела на мрежата по предоставена база данни от ГИС (софтуер за извличане и обработка/подготовка на данни) в програмата за анализ на електроенергийни системи STATUS. При реализацията е синтезиран алгоритъм за определяне на свързаността между възлите, който е приложен в отделни обектно-ориентирани модули за мрежа ниско напрежение и мрежа средно напрежение. Реализиран е софтуерен модул в STATUS за изобразяване на мрежите по географски (координатно) ориентиран принцип, а също и чрез карта на графа на свързаност на схемата. Осъществена е валидация и са отстранени неточности в процеса на обработката на данните и информацията от ГИС системата на ЕРП за тестовите системи. Поради установена неконсистентност на суровите данни при автоматично въвеждане са приложени следните мерки за обработка на данните:

- ръчно коригиране на граф на свързаност и състояние на разединители;
- обединяване на възли;
- елиминиране на линии с малка дължина;
- намаляване на точността на изчисление (зададено е 0,001V)

В резултат е постигната сходимост на итерационния процес и решение.

Валидация на избраното софтуерно решение

Преди провеждане на същинските режимни изчисления е необходимо ползваните математични модели и подходи да бъдат валидирани, като се оцени точността. За целта математичните модели са софтуерно реализирани за избрани характерни режими на мрежите в средата на STATUS, NEPLAN и DMS, след което е направена валидация на моделите и получените резултати.

Първоначално е направена валидация на модела на пасивната част на мрежа СрН в STATUS и NEPLAN, при която е получено съпадение на резултатите с максимална грешка (0,0585%), което е в рамките на зададената точност на NEPLAN.

Допълнително е реализирана валидация на пасивната част на мрежа СрН в STATUS, NEPLAN и DMS. Резултатът от валидацията е:

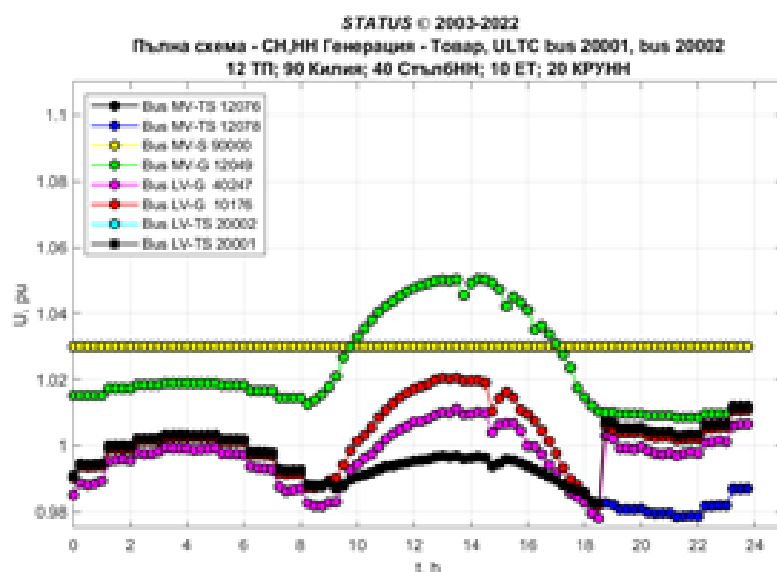
- STATUS - DMS пълно съпадение с максимална грешка в рамките на зададената точност (0,050%);
- STATUS - NEPLAN (0,00035%).

Подробни изчисления на характерен режим на мрежа НН и мрежа СрН при пълна схема

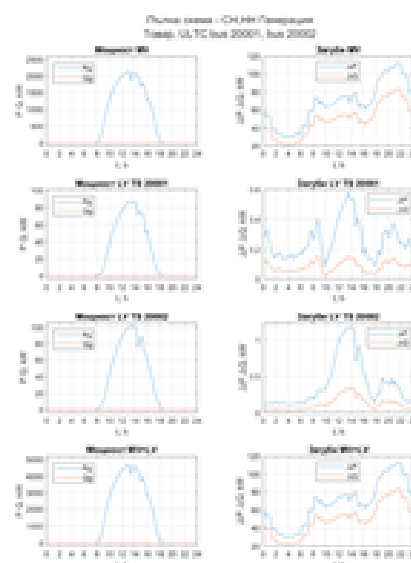
Поради големия брой на възлите в разглежданите мрежи СрН и НН (общо 832 възела и 832 клона), графичното представяне и анализиране на резултатите би било трудно. За осъществяване на целта и задачите на изследването е целесъобразно да бъде направено опростяване, което да насочи към съществените фактори и параметри.

Първоначално са направени подробни изчисления на режима на мрежа НН и мрежа СрН при пълна схема. След това е направен анализ, кои са най-съществените режимни параметри и възли, които да бъдат представени, как да бъде опростена схемата и кои значими параметри да бъдат включени и кои могат да бъдат представени в опростен вид.

Накратко ще бъдат представени аналитични резултати от направено квазидинамично изследване, проведено с отчитане на действието на МТАРН при пълна схема на мрежата. Представени са няколко сценария, в които е приложен квазидинамичен анализ за типичен период от 24 часа при дискретизация по време 15 мин. Съществен е въпросът с единното време. В изследването е прието, че ползвано решението от системата на ЕРП предоставя достатъчна за нуждите на изследването точност. За яснота на графичното представяне са показани само резултатите за избрани характерни възли.



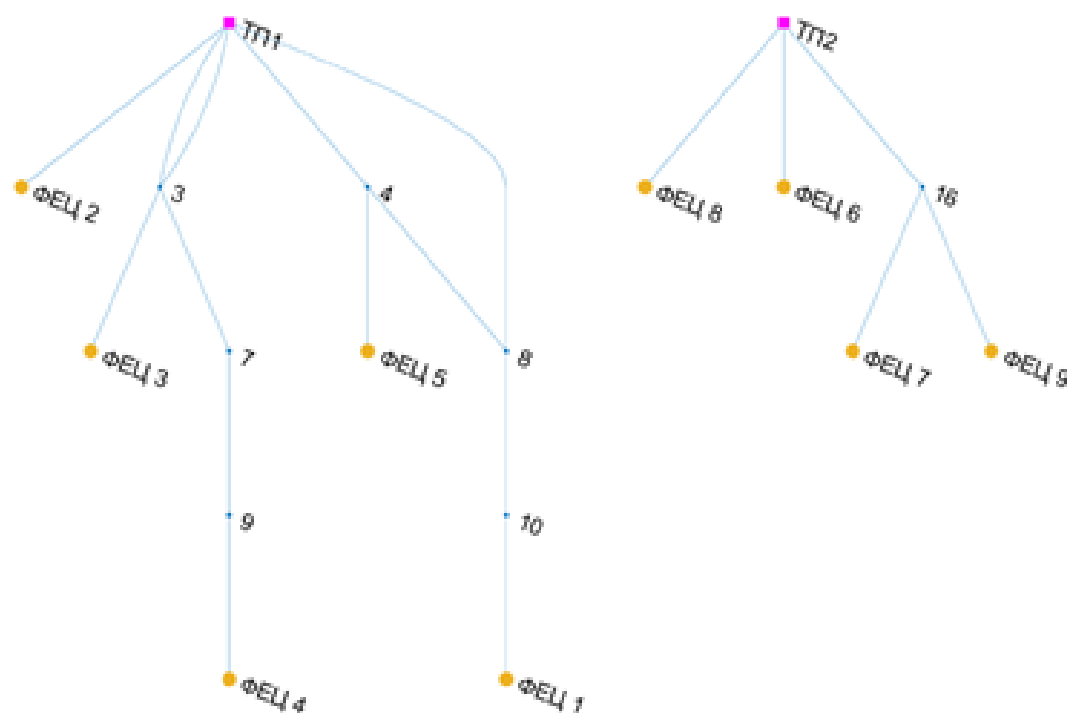
Фиг. 1 Профил на напреженията



Фиг. 2 Мощностни потоци и загуби

Опростяване на схемата и избор на конфигурация с опростена схема

Пълните схеми на разглежданата мрежа произхождат от подробните данни в ГИС системата. Те се характеризират с голям брой възли, голям брой клонове, относително малка дължина на участъците и съответно малки единични съпротивления на клоновете. Освен посоченото по-горе, това може да доведе до увеличени изчислителни времена, както и до затруднения при постигане на сходимост при някои статични и/или квазидинамични режими. Поради тази причина за част от изследванията е използвана опростената еквивалентна схема от Фиг. 29, която представя разглежданата мрежа (действителното актуално състояние).



Фиг. 3 Опростен граф на свързаност на мрежа НН

Резултати от изследването на методите, средствата и факторите при регулиране на напрежението

При изследване на регулирането на напрежението е направено моделно изследване върху разпределителна мрежа средно и ниско напрежение. Ползвана е мрежа ниско напрежение с опростен граф на свързаност от Фиг. 29.

За оценка на въздействието на ДЕИ са ползвани измерените мощностни потоци от електромерите на производителите за типичен представителен ден, които са увеличени за достигане на номиналната мощност, която е и оразмерителна при оценка на режимните параметри. Изчисленията са направени без отчитане на мощността на потребителите (товара), което съответства на постигане на максимално тежък сценарий. Получените резултати следва да бъдат интерпретирани само за сравнение между свойствата и характеристиките на отделните методи за регулиране на напрежението.

Разгледаните сценарии представят изменението на напрежението. Следва да се отбележи, че в разгледанията не са отразени всички ограничителни условия, които обезпечават осъществимост на изследваните режими. Например не са изчислени и взети предвид ограничения от претоварване по ток, устойчивост по напрежение, устойчивост по ъгъл на изместване, действие на противоаварийна автоматика както и други възможни ограничения. Това трябва да се има предвид, особено в случаите с увеличена генерирана мощност с 2,6 и 4 пъти.

Първоначално се разглежда базов случай, при който фотоволтаичните генератори отдават активната си мощност, без да се прилага метод за регулиране на напрежението. Изчисленията са проведени за конфигурация на мрежата, която отразява нейното действително състояние след проведената рехабилитация.

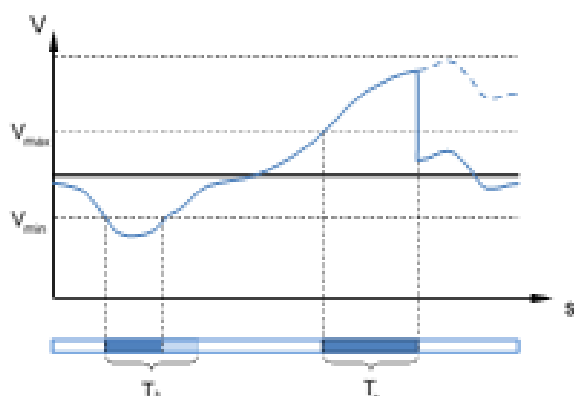
Първо е разгледан сценарий с действителните максимално достигнати мощности. За да се установи максималната мощност, която може да бъде присъединена към мрежата е изчислен и представен втори сценарий, в който мощността е увеличена до достигане на приетата максимално допустима стойност на напрежението, равна на $1,1 U_n$. Допълнително с цел сравнение с други стратегии за управление е разгледан сценарий 3, в който мощността е увеличена с 2,6 пъти.

Следва поредица от изчисления при различни методи на регулиране на напрежението.

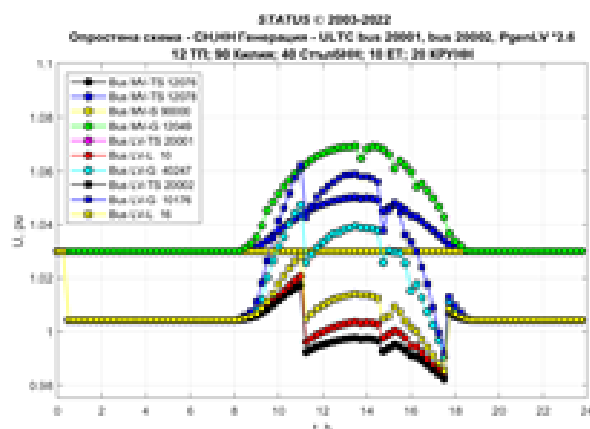
Регулиране на напрежението чрез мрежови трансформатори с автоматично регулиране на напрежението под товар – МТАРН

Регулирането се осъществява като се следи стойността на напрежението, както е показано на фигура Фиг. 34.

При излизане на напрежението извън диапазона на зоната на нечувствителност, ограничена между U_{min} и U_{max} започва отброяване на време. Ако регулируемата величина (напрежението) се върне в диапазона преди изтичане на зададеното времезакъснение, не се изпълнява превключване. Ако регулируемата величина не се върне в диапазона преди изтичане на зададеното времезакъснение, се изпълнява превключване на стъпалния регулатор.



Фиг. 4 Регулиране на напрежението МТАРН



Фиг. 5 Профил на напрежението

Разгледани са набор от сценарии, представящи действието на регулаторите при различни стратегии за управление:

- Регулиране на напрежението на страна НН на МТАРН;
- Регулиране на напрежението с МТАРН при компенсиране на загубата на напрежението по линията НН;
- Регулиране на напрежението с МТАРН при следене на напрежението в отдалечен възел.

Приложението на стъпални регулатори с регулиране под товар позволява разширяване на обхвата на регулиране на напрежението. В класическите пасивни мрежи целият ресурс от допустима загуба на напрежение е за потребителите. При въвеждането на производствена мощност и работа на мрежата като активна, ако трансформаторът е без регулиране под товар, ресурсът от допустима загуба на напрежение следва да се разпредели между потребителите и производителите, така че да няма недопустими

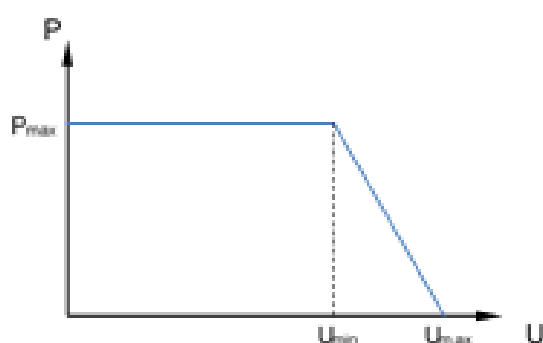
отклонения на напрежението, както в обедните часове с максимално производство, така и часовете на вечерния максимум на потреблението.

Основната полза от въвеждането на стъпален регулатор с регулирана под товар е, че в идеалният случай и при добро разпределение, регулаторът може да осигури максимална присъединена мощност на производителите равна на тази на потребителите.

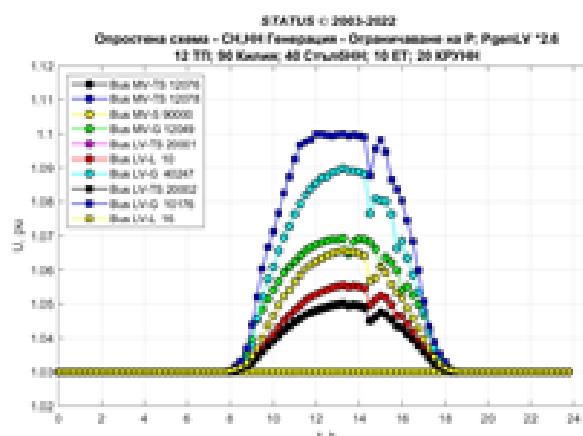
При подхода за регулиране на напрежението в отдалечен възел от мрежа НН са разгледани два сценария: регулиране във възли, разположени в междинна точка на линията; регулиране във възли разположени в крайна точка на линията, в която е присъединен генератор. В зависимост от гъстотата и характера на разпределението на товара може да се предпочете един или друг сценарий за регулиране на напрежението от разгледаните методи до момента.

Регулиране на напрежението чрез изменение на активната мощност P

Регулаторите на инверторите в генераторните възли са настроени да започнат ограничаване на активната мощност в случай, че напрежението в точката на присъединяване достигне определена стойност (в случая $1,1U_{ном}$). За да се прояви действието на регулаторите са разгледани няколко сценария, при които произведената мощност е увеличена.



Фиг. 6 Регулиране на напрежението чрез изменение на P



Фиг. 7 Профил на напрежението

Подхода за регулиране на напрежението чрез ограничаване на отдаваната активна мощност осигурява качествено регулиране на напрежението и по същество е задължителен за нормалното функциониране на мрежата.

В следствие на ограничението на активната мощност на производителите за определени периоди от време същите не могат да достигнат максималната си мощност и съответно не отдават максималната теоретично възможна енергия на първичния източник. Въпреки този недостатък следва да се отбележи, че изследваните данни показват, че часовата продължителност на максималната произведена мощност е сравнително малка. Ограничението на максималната мощност за изолирани краткотрайни периоди от време не винаги води до значителни загуби на енергия. По преценка на производителя това може да бъде приемливо компромисно решение, вземащо предвид ограниченията в наличните ресурси на мрежата.

Приложението на методът не позволява безконтролно присъединяване на производители към мрежата и не отменя необходимостта от провеждането на задълбочен анализ за възможните максимални присъединени мощности и свързаните с тях произведени активни енергии.

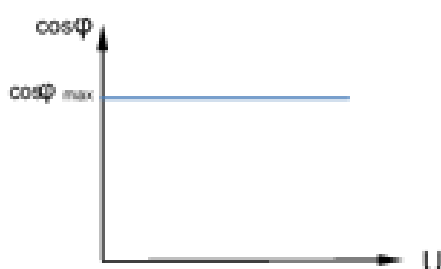
Независимо какви други методи за регулиране са приложени, този метод остава най-важен и следва задължително да бъде активиран. В случай, че по друг начин напрежението във възела на присъединяване не може да бъде постигнато, този е най-

надеждният метод, по който нормалното функциониране на мрежата ще може да бъде гарантирано.

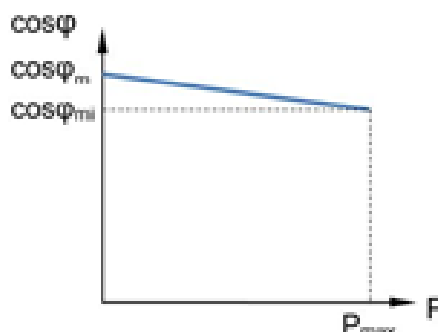
Регулиране на напрежението чрез изменение на реактивната мощност Q

Разгледани са стратегии за регулиране на напрежението чрез регулиране на реактивната мощност по различни подходи като поддържане на определен фактор на мощността или изменението му в зависимост от активната мощност или в зависимост от напрежението.

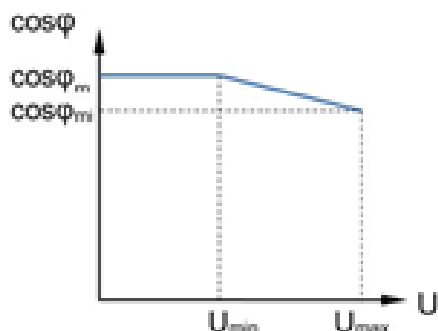
- При неизменен фактор на мощността ($\cos\varphi = \text{const}$) (Фиг. 40);
- При фактор на мощността, зависим по зададен закон от отдаваната активна мощност P ($\cos\varphi = f(P)$) (Фиг. 43);
- При фактор на мощността, зависим от напрежението ($\cos\varphi = f(U)$) (Фиг. 46);
- Регулиране на реактивната мощност в зависимост от напрежението ($Q = f(U)$) (Фиг. 49).



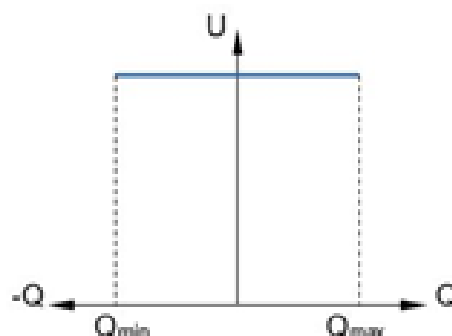
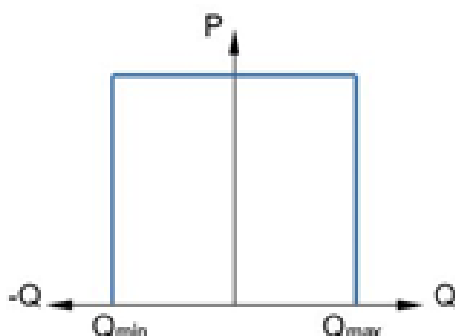
Фиг. 8 Регулиране на напрежението чрез изменение Q при $\cos\varphi = \text{const}$



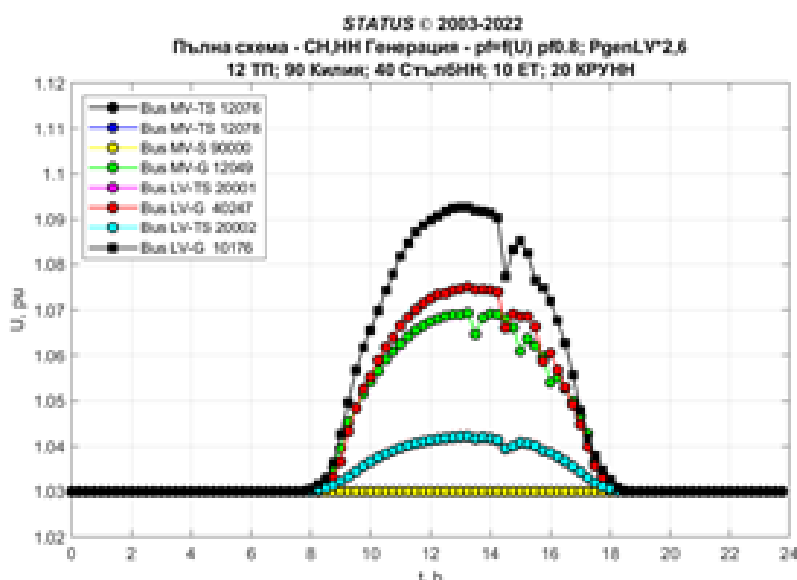
Фиг. 9 Регулиране на напрежението чрез изменение Q при $\cos\varphi = f(P)$



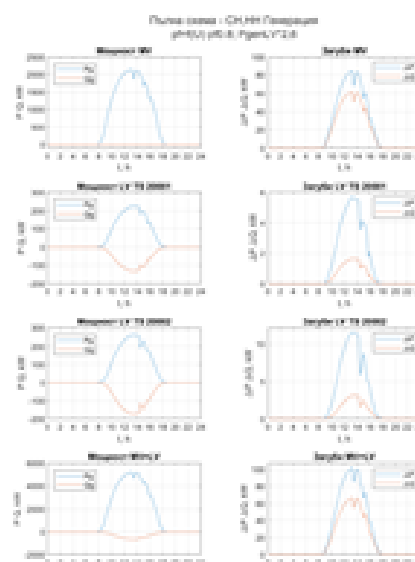
Фиг. 10 Регулиране на напрежението чрез изменение Q при $\cos\varphi = f(U)$



Фиг. 11 Регулиране на реактивната мощност в зависимост от напрежението ($Q = f(U)$)



Фиг. 12 Профил на напрежението



Фиг. 13 Мощностни потоци и загуби

Тези методи на регулиране следва да се прилагат само при ясна обосновка и прозрачна финансова схема, чрез която да бъдат овъзмездени разходите по покриването на породените от производителя допълнителните загуби в мрежата на ЕРП.

Обобщение на разгледаните подходи за регулиране на напрежението и анализ на резултатите

За удобство на анализа, е дадена извадка на резултати от най-характерните сценарии представени в табличен вид (Таблица 13).

Таблица 1 Извадка на характерни сценарии

| Сценарий | U_{min} , о.е. | Възел U_{min} | U_{max} , о.е. | Възел U_{max} | ΔU , % | Еген, kWh | ΔE , kWh | ΔE , % |
|-------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------|--------------|---------------------|-------------------|
| Без регулиране PgenLV*1 | 1,030 | 3 | 1,065 | 40247 | 3,468 | 1092,41 | 9,03 | 0,83 |
| Без регулиране PgenLV*2.25 | 1,030 | 16 | 1,099 | 10176 | 6,940 | 2457,93 | 43,98 | 1,79 |
| Без регулиране PgenLV*2.6 | 1,030 | 16 | 1,109 | 10176 | 7,876 | 2840,27 | 58,11 | 2,05 |
| MTAPH, PgenLV*2.6 | 0,982 | 20001 | 1,062 | 10176 | 7,982 | 2840,27 | 63,73 | 2,24 |
| MTAPH, PgenLV*4 | 0,982 | 20001 | 1,096 | 10176 | 11,386 | 4369,65 | 144,86 | 3,32 |
| Ограничение на P PgenLV*2.6 | 1,03 | 16 | 1,100 | 10176 | 6,998 | 2818,72 | 56,12 | 1,99 |
| Ограничение на P PgenLV*3 | 1,03 | 16 | 1,100 | 10176 | 6,998 | 3213,76 | 70,34 | 2,19 |
| Ограничение на P PgenLV*4 | 1,03 | 16 | 1,100 | 10176 | 6,998 | 4076,68 | 103,18 | 2,53 |
| PF 0.8, PgenLV*2.6 | 1,030 | 16 | 1,092 | 10176 | 6,155 | 2840,27 | 93,15 | 3,28 |
| PF 0.9, PgenLV*2.6 | 1,030 | 16 | 1,098 | 10176 | 6,798 | 2840,27 | 72,91 | 2,57 |
| PF=f(Pgen), PF=0.8 PgenLV*2.6 | 1,030 | 16 | 1,095 | 10176 | 6,518 | 2840,27 | 71,03 | 2,50 |
| PF=f(Pgen), PF=0.9 PgenLV*2.6 | 1,030 | 16 | 1,100 | 10176 | 6,997 | 2840,27 | 61,84 | 2,18 |
| PF=f(U), PF=0.8 PgenLV*2.6 | 1,030 | 16 | 1,093 | 10176 | 6,267 | 2840,27 | 77,73 | 2,74 |
| PF=f(U), PF=0.9 PgenLV*2.6 | 1,030 | 16 | 1,099 | 10176 | 6,865 | 2840,27 | 64,45 | 2,27 |
| RPC 1, PgenLV*2.6 | 1,030 | 9 | 1,101 | 10176 | 7,093 | 2840,27 | 75,38 | 2,65 |

В изходния случай, рехабилитираната мрежа осигурява нормални експлоатационни условия за ползвателите ѝ. За разгледания случай мрежата позволява увеличение на мощността на разпределените производители до 2,25 пъти спрямо максимално достигнатата при спазване на изискването напрежението да не превишава 1,1Un.

Мрежовите трансформатори с автоматично регулиране на напрежението чрез стъпален регулатор с превключване под товар дават ефективно решение за регулиране на напрежението при наличие на активни мрежи, в които едновременно има производство и потребление. За разгледания случай МТАРН позволяват увеличение на мощността на разпределените производители до 4 пъти спрямо максимално достигнатата при спазване на изискването напрежението да не превишава $1,1U_n$, т.е. около 1,78 пъти повече спрямо разгледания вариант без регулиране на напрежението. Посоченото възможно увеличение на мощността на производителите е свързано с увеличаване на загубите на мощност и енергия в проценти. Недостатък на решението е, че изисква значима инвестиция, има по-високи разходи за ремонт и поддръжка и по-ниска надеждност.

Регулирането на напрежението чрез ограничение на активната мощност на производителите е ефективно и надеждно решение. За разгледания случай то позволява увеличение на мощността на разпределените производители. При увеличение на мощността до 4 пъти спрямо максимално достигнатата и спазване на изискването напрежението да не превишава $1,1U_n$, т.е. около 1,78 пъти повече мощност спрямо разгледания вариант без регулиране на напрежението, за конкретния разгледан случай в следствие на регулирането чрез ограничаване на мощността производителите биха загубили около 6,7% от теоретично възможната произведена от тях енергия.

Следва да се обърне внимание, че:

- посоченият процент на недоставената енергия третира само разгледания период и случай. Той не е представителен за технико-икономически анализи.
- различните производители ще имат различни пропуснати ползи в зависимост от електрическата им отдалеченост спрямо трансформаторния пост.

Регулирането на напрежението чрез изменение на реактивната мощност на производителите има своите предимства. За разгледания случай то позволява увеличение на мощността на разпределените производители в определени граници. При увеличение на мощността до 2,6 пъти спрямо максимално достигнатата и спазване на изискването напрежението да не превишава $1,1U_n$, т.е. около 1,156 пъти повече мощност спрямо разгледания вариант без регулиране на напрежението, за конкретния разгледан случай в следствие на регулирането ЕРП би увеличило загубите си с 1,297 пъти. Приложението на това решение може да бъде основано след задълбочен технико-икономически анализ, който отчита ползите от по-високата инсталирана мощност и произведена енергия от производителите, допълнителните загуби на мощност за ЕРП и санкциите, които производителят следва да заплати за нисък фактор на мощността.

Изследване на тестов сценарий с комбинирано използване на МТАРН и регулиране на реактивната мощност Q

Допълнително са разглеждани методи за комбинирано регулиране на напрежението:

- Комбинирано използване на МТАРН и регулиране на реактивната мощност Q при постоянен фактор на мощността ($\cos\varphi = \text{const}$);
- Комбинирано използване на МТАРН и регулиране на реактивната мощност Q при фактор на мощността, зависим от активната мощност $\cos\varphi = f(P_g)$;
- Комбинирано използване на МТАРН и регулиране на реактивната мощност Q при фактор на мощността, зависим от активната мощност $\cos\varphi = f(U)$;
- Комбинирано използване на МТАРН и регулиране на реактивната мощност Q.

Изследване на способностите на различните разгледани технически средства да предоставят допълнителни възможности за присъединяване на мощности

Технически средства, свързани с регулиране на напрежението

Изследването на способностите на различните разгледани технически средства да предоставят допълнителни възможности за присъединяване на мощности е направено като са разгледани варианти и сценарии с увеличаване на присъединената максимално достигната мощност.

Технически средства, свързани с промяна на конфигурацията на мрежата

Представява интерес начина на развитие на бъдещите и настоящи мрежи с разпределено производство в контекста на задачата за регулиране на напреженията. За целта са изследвани три характерни конфигурации на мрежата при равни условия:

- Конфигурация преди направената реконструкция - отразява състоянието на мрежата преди реконструкцията, направена от ЕРП поради навлизането на ДЕИ;
- Конфигурация, съответстваща на действителното състояние на мрежата към момента на изследването - направена е пълна рехабилитация на мрежата вкл. за някои от генераторите и чрез отделни директни кабелни връзки на ДЕИ към трафопост;
- Конфигурация с възможна частична рехабилитация - направена е реконструкция със запазване на топологията (графа на свързаност) на мрежата и са увеличени сеченията на участъците, по които преминава енергията на ДЕИ.

За разлика от изследването, третиращо подходите за регулиране на напрежението, тук е необходимо отчитане на влиянието на всички ползватели на мрежата - както производители, така и потребители. Поради тази причина са разгледани и сценарии с отчитане на товарите (потребителите) в мрежата.

Всички разгледани случаи се отнасят за производствен профил с мощност, равна на максимално достигнатата.

Таблица 18 Таблични резултати

| Сценарий | U_{min} , о.е. | Възел U_{min} | U_{max} , о.е. | Възел U_{max} | ΔU , % | $E_{тов}$, kWh | $E_{ген}$, kWh | ΔE , kWh | ΔE , % |
|---|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| Преди реконструкция, без товар | 1,030 | 40069 | 1,145 | 10176 | 11,515 | - | 1092,41 | 42,92 | 3,93 |
| Преди реконструкция, с товар | 0,911 | 10050 | 1,099 | 10176 | 18,782 | 1667,81 | 1092,41 | 56,87 | 2,06 |
| Частична рехабилитация, без товар | 1,030 | 40196 | 1,092 | 10079 | 6,248 | - | 1092,41 | 20,66 | 1,89 |
| Частична рехабилитация, с товар | 0,940 | 10050 | 1,046 | 10176 | 10,571 | 1667,81 | 1092,41 | 29,98 | 1,09 |
| След реконструкция, без товар | 1,030 | 40105 | 1,065 | 10176 | 3,537 | - | 1092,41 | 8,87 | 0,81 |
| След реконструкция, с товар | 0,948 | 10181 | 1,020 | 10176 | 7,230 | 1667,81 | 1092,41 | 16,24 | 0,59 |

Видно е, че при конфигурация преди реконструкция мрежата не разполага с необходимата преносна способност, което води до недопустимо високо напрежение във възлите.

Провеждането на частична рехабилитация с усилване на магистралните участъци на мрежата позволява достигане на приемливи напрежения при сравнително ниски

инвестиции. Това решение има най-висока специфична икономическа ефективност поради намалените специфични загуби, както за производителите, така и за потребителите.

Решението с реконструкция с директни връзки от производителите към ТП създава отделни паралелни мрежи, които обслужват само производителите и съответно понижава загубите само за тях. Решението е удобно за прилагане от административна гледна точка, но е свързано с по-ниска специфична енергийна ефективност и по-големи разходи за експлоатация и поддръжка на възникналите паралелни допълнителни мрежи НН.

Представените резултати показват, че анализите за конкретните случаи следва да се провеждат с отчитане на товарите профили. Следва да се отбележи необходимостта от съставяне на характерни товарни профили, които да са адекватни на съответните мрежи, населени места, типове потребители и случаи.

В заключение на разглежданите методи за регулиране на напрежението са направени изводи и препоръки за подобряване и бъдещо развитие на изследването.

ГЛАВА 3. Аналитично-експериментален подход със силов хардуер във веригата за изследване управлението на режимните параметри в ЕЕС

Изследвания със силов хардуер във веригата

Съвременните методи със силов хардуер (СХ) включват взаимодействие между реална и виртуална среда, обединяват предимствата на симулацията и реалното изпитване чрез едновременното използване на цифров симулатор в реално време (ЦСРВ) и физически устройства. Това позволява изпитването на софтуерни и хардуерни компоненти в близка до реалната среда.

В общия случай конфигурацията със СХ е съставена от три основни части - ЦСРВ, изпитван силов хардуер (ИХ) и усилвател на мощност (УМ) [105][106][107]. ЦСРВ е електронно устройство, което възпроизвежда математически модел като го изчислява в реално време. По този начин виртуално симулира електроенергийната система или нейни подсистеми и компоненти. Изчислената изходна стойност се изпраща към УМ на определен интервал от време и УМ преобразува полученият сигнал в силова величина. ИХ изменя състоянието си под въздействието на тази силова величина, изменението се възприема от измервателните вериги на УМ и ЦСРВ, добавя се в математичния модел и по този начин се създава обратна връзка при изчисляването на следващата стойност [113].

В някои съвременни разработки със силов хардуер, за да се разграничи свързването на еднокомпонентно устройство и многокомпонентна силова конфигурация, като микро, мини и наномрежа, се въвежда понятието силова система (СС). В тази връзка понятието СС може да се приеме като връзка между виртуално симулираната система, контролния хардуер (КХ) и физическия ИХ [107][111].

За да се осигури устойчива работа, безопасност, точност и надежден резултат трябва да се вземат под внимание следните фактори:

- Време за реакция;
- Прецизно двупосочно взаимодействие;
- Подходящо обработване на грешки.

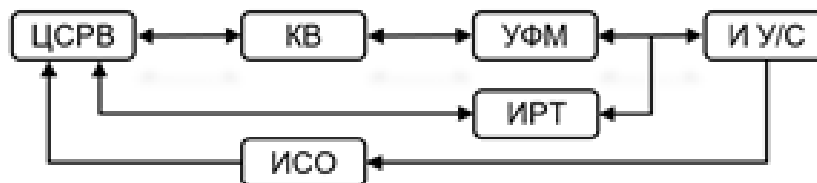
Обикновено включеният хардуер е физическо устройство, свързано двупосочно с компютърна симулация в реално време. В случая със СХ във веригата се използва УМ, който преобразува симулационния сигнал с ниска мощност във величина подходяща да въздейства на ИХ. Най-често се използват линейни или работещи в ключов режим УМ.

В този експеримент, като УМ е използвана конфигурация от инвертори с възможност да формират мрежа.

Блоквата схема представена на Фиг. 60 показва включените елементи и принципа на работа.

Схемата включва:

- Цифров симулатор в реално време (ЦСРВ);
- Комуникационна връзка (КВ);
- Устройство, формиращо мрежа (УФМ), използвано като УМ;
- Изпитвано устройство или система (И У/С).
- Интелигентен регулиращ товар (ИРТ)
- Допълнително измервателно и силово оборудване (ИСО)



Фиг. 14 Блоквата схема на опитната постановка

Като ЦСРВ е използвана стандартна компютърна архитектура. За симулиране на СС са използвани програмите STATUS Quasi Dynamic и STATUS Dynamic, които позволяват в реално време да се определят параметрите на СС [107][109]. ИВ е използвана, за да позволи двупосочно предаване на данни в реално време между ЦСРВ и УФМ. Използвано е стандартно УФМ, което служи като УМ за експериментите със СХ, като възпроизвежда напрежение с нужната амплитуда и честота. Специализиран IGBT базиран ИРТ осигурява двупосочното протичане на активна мощност за И У/С. Използвани са допълнителни измервателни и силови устройства, за да подпомогнат провеждането на експеримента.

Оценка на работата

При изследванията със силов хардуер във веригата точността и устойчивата работа са от съществено значение. Начина на свързване на различните елементи оказва пряко влияние върху това. Забавянето в комуникацията предизвикано от различни смущения трябва да се вземе под внимание като фактор влияещ на точността [111].

Проведени са различни експерименти за оценка на точността и устойчивостта. За целта са избрани реални сценарии пресъздадени от ЦСРВ.

Разгледано е физическото взаимодействие на УФМ и изпитвания хардуер. Направена е оценка на времето за реакция и точност на резултатите от поредица експерименти.

Времето за реакция може да се представи, като сума от времето необходимо за осъществяване процеса на комуникация и времето за изпълнение на зададената операцията.

$$t_r = t_{com} + t_{exe} \quad (3)$$

Където t_r е времето за реакция, t_{com} е времето за комуникация и t_{exe} е времето за изпълнение на операцията.

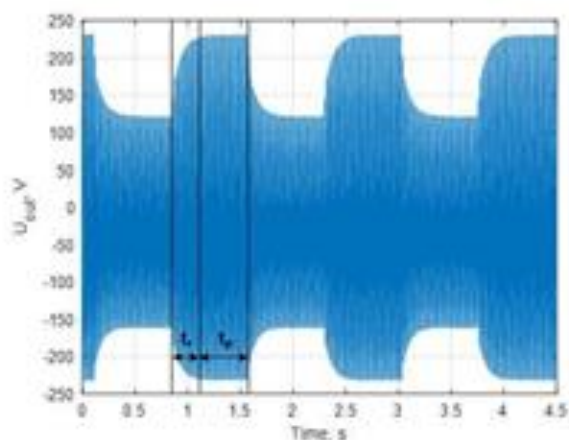
Изследвано е времето за реакция на инвертор в следната последователност: подава се заявка към инвертора, инверторът изпълнява заявката, изменя стойността на посочения изходен параметър. За тестова величина е избрано изходното напрежение U_{out} . Изпълнени са следващите сценарии:

- Стъпково изменение на U_{out} с междинна пауза
- Стъпково изменение на U_{out} без междинна пауза
- Стъпково изменение на U_{out} без междинна пауза с намалена стъпка между минимална и максимална стойност

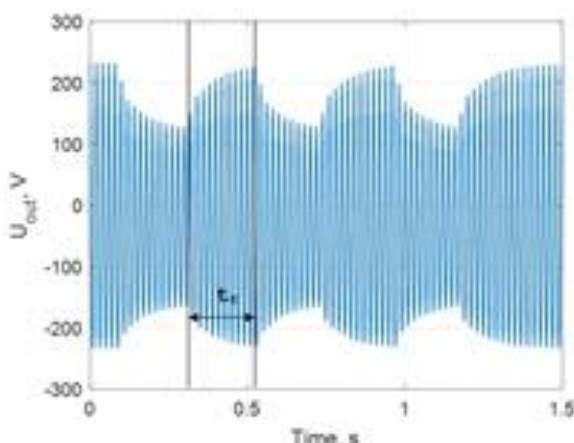
Резултатите показват относително постоянна стойност на времето за реакция t_r на системата работеща със СХ в лабораторна среда. Стойността на изменение на напрежението, изглежда че не влияе на времето за реакция по определен повтарящ се начин. При всички разгледани случаи стойността на времето за реакция е под 0.25s.



Фиг. 15 Общ изглед на опитната постановка



Фиг. 16 Форма на изходното инверторно напрежение U_{out} по време на стъпково изменение с междинна пауза



Фиг. 17 Форма на изходното инверторно напрежение U_{out} по време на стъпково изменение без междинна пауза

Таблица 20 Статистически резултати за времето за реакция за разгледаните случаи

| | $t_{r\ min}, s$ | $t_{r\ max}, s$ | $t_{r\ avr}, s$ | σ_{tr}, s |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| $U_{out} = [150\ 230]; tp=0.5s$ | 0.215 | 0.247 | 0.229 | 0.013 |
| $U_{out} = [150\ 230]; tp=0s$ | 0.213 | 0.226 | 0.218 | 0.005 |
| $U_{out} = [200\ 230]; tp=0s$ | 0.203 | 0.222 | 0.213 | 0.007 |

Където $t_{r\ min}$ е минимална стойност на времето за реакция, $t_{r\ max}$ е максимална стойност на времето за реакция, $t_{r\ avr}$ е средна стойност на времето за реакция, σ_{tr} е грешката при определяне на времето за реакция.

Оценка на точността

За определяне на точността при възпроизвеждане на определен сигнал е използван запис на данни от разпадането на европейската ЕЕС от 4.11.2006 г.

Използваните данни от [115] запис на честотата от Wide Area Measurement Systems (WAMS) преди и след разпадането на връзката между зоните в европейската ЕЕС (от

22:09:30ч до 22:20:00ч). Данните са обработени за постигане на постоянен времеви интервал от 0.5s и са репродуцирани от УМ. Използвана е линейна интерполация за получаване стойностите на честотата за всеки времеви дискрет.

В следствие на обработката с линейна интерполация на честотата за постигане на постоянна стъпка на изменение на времето е възможно да възникне значителна загуба на точност. Това е очевидно в случай на бързо изменение на сигнала за кратък период от време, където стойността на сигнала в дадена точка може да бъде „изгладен“ и загубен, както е случая на изменение на честотата непосредствено след разпадането на ЕЕС.

Друга възможна причина, която негативно би повлияла на точността е наличието на ограничен брой възможни дискретни стойности на честотата.

Реализираната опитна постановка със силов хардуер във веригата в лаборатория УЕЕС на ТУ-София е функционална и позволява по разходно-ефективен начин да бъдат осъществявани редица изследвания на устойчивостта на ЕЕС при бавни преходни процеси.

Решението позволява физическо изпитване на устройства (на компонентно ниво) и системи (на ниво микро и нано мрежи и системи) в условията на безопасна и близка до действителността лабораторна среда, пресъздаваща бавни преходни процеси, свързани със загубата на устойчивост на ЕЕС. Тъй като е съставено от стандартни многофункционални компоненти, които са налични в лабораторията, решението е особено икономично и природосъобразно.

Въпреки, че е ограничено до пресъздаването на синусоидални явления със стойности на модула и честотата на напрежението, зададени от симулатора в реално време, разработеното решение дава възможност за анализ на широк кръг изследователски задачи от областта на устойчивостта с приемливо качество на пресъздаваните процеси при продължителност на времевата стъпка на интервалите над 0,3s. В случай на необходимост архитектурата на постановката позволява разширение до мощност над 72kW, както и допълнително повишаване на качеството на репродуцирания преходен процес чрез използване на специализирани техники на дискретизация. Допълнително, решението е с отворен код, което улеснява преизползването и адаптацията му за други задачи в бъдеще.

Интелигентно управление на режимните параметри чрез изменение на товара

Предложено е и е реализирано интелигентно управление на режимните параметри чрез изменение на товара, което е изпитано, както в лабораторна среда, така и в обект от живата лаборатория на лаб. УЕЕС на ТУ - София. Решението предлага нов цифров контролер за регулиране на напрежението чрез гасителен товар за автономен, водещ по напрежение и честота хидрогенератор. Устройството е предназначено да замени съществуващ аналогов контролер, като подобри и разшири наличните възможности.

При съществуващият аналогов контролер включването на регулирания товар се извършва при нулево напрежение, което не поражда значими хармонични смущения. В хода на многогодишната му експлоатация в реални условия той доказва своята бързина, точност и висока надеждност.

Въпреки предимствата си, аналоговият контролер не позволява отдалечено управление и цифрова промяна на настройките. Такава възможност се оказва полезна при някои изпитвания със силов хардуер във веригата в реална среда. Освен това настройката на отдалните степени на регулирания товар се извършва по-лесно и гъвкаво при използване на цифров контролер.

Съвместно с докторанти и сътрудници на лаб. УЕЕС е проектиран и реализиран нов цифров силов контролер, подходящ за регулиране на напрежението и честотата на ВЕЦ. Разработката е с отворен код, и е общодостъпна. Новото решение ползва основните принципи на съществуващият аналогов контролер, като допълнително функционалността му е разширена. Това предлага увеличена гъвкавост, като е предоставена възможност за

лесна промяна на настройки и алгоритми за регулиране. Допълнително има възможност за обмен на данни със SCADA и други интелигентни устройства за управление в микро и наномрежи.

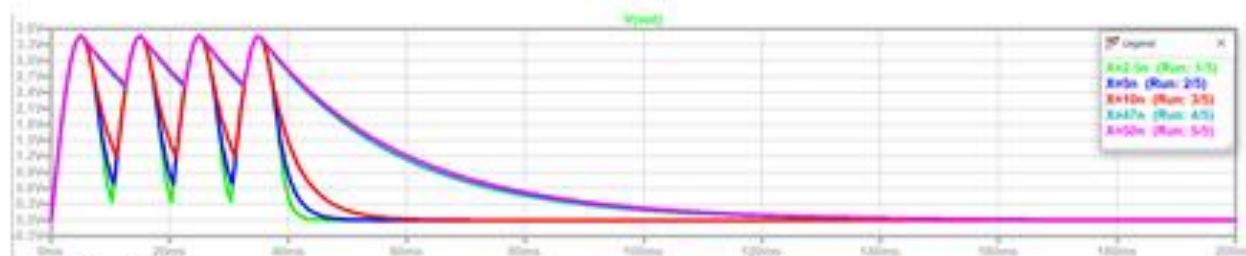
Някои съществени предимства на новият контролер в сравнение с аналоговия му предшественик са:

- Намаляване на броя и размерите на компонентите, което води до опростяване на схемата, по-ниска цена и повишаване на надеждността.
- Лесно софтуерно прилагане на различни стратегии за управление – микроконтролерът позволява да се приложат и изпитат различни сценарии за управление, без да са нужни съществени хардуерни изменения.
- Устройство с отворен код – контролерът позволява лесно да бъде програмиран, за да се постигне добро и подходящо управление.

Основна цел при разработката е да се постигне просто устройство, което да осигури надеждна работа на контролера. Една от предизвикателните задачи е подходящото оразмеряване на елементите на напреженовия сензор, които ще определят бързодействието и характеристиките на цялата регулираща система.

За целите на разработката е подготвен симулационен модел за подпомагане процеса на проектиране. Подготвена е и опитна постановка, максимално доближаваща се до реалните условия на експлоатация, като е използван физически модел на хидрогенератор с турбина Пелтон [56], стенд симулиращ електропровод, както и подходящ товар с цел изпитване и валидиране на разработения цифров контролер.

При проведените изпитвания контролерът работи устойчиво и бързо, осигурява линейно и адекватно регулиране. Успява да погаси излишната енергия до достигане на последната степен на регулиращия товар. Благодарение на контролера за включване на силовият електронен ключ при преминаване на напрежението през нулева стойност няма значими хармонични смущения при превключване.



Фиг. 18 Изправено входно напрежение, при различна стойност на изглаждащия кондензатор



Фиг. 19 Изпитване на разработения нов цифров контролер

Новият цифров контролер за регулиране на напрежението чрез гасителен товар, основан на софтуер със отворен код и стандартни общодостъпни компоненти е успешно проектиран, изпълнен и изпитан. Стратегията за управление и изпълнението на устройството осигуряват адекватно бързодействие и добра точност. В сравнение със съществуващия аналогов контролер, новият цифров вариант предлага някои предимства:

- Опростяване на хардуерното изпълнение, реализирано чрез стандартни, преобладаващо заводски произведени блокове;
- Намалена цена на устройството;
- Лесна промяна на стратегията за управление чрез препрограмиране на контролера;
- Лесно въвеждане в експлоатация.

Благодарение на горните предимства, контролерът може да намери приложение и в други променливотокови разработки, изискващи управление въз основата на стойността на напрежението. Също така с минимална промяна устройството може да бъде пригодно за работа в постояннотокови микро, мини и наномрежи.

Управление на мощностите посредством пазарна схема за динамично ценообразуване при постояннотокови мрежи НН

Като най-подходящ и лесен за прилагане метод при управлението на товари и балансиране на мощностите в DC мрежи може да се разглежда Разпределено Автономно Управление (PAU). При този подход за ценообразуване не е нужна постоянна и надеждна комуникационна връзка [89]. При използване на PAU с референтна величина – напрежение в точката на присъединяване, потребителят има възможност да следи величините на мрежата и съобразно състоянието им и приетата стратегия потребителят свободно може да зададе нужното поведение съобразно своите нужди, възможности, приоритети и интереси.

Използването на тази стратегия за управление изисква съвместна работа на производители, потребители и системни оператори. Нужна е финансова схема, която да е „справедлива“ за всички участници в мрежата. Всеки елемент (внедрен в устройство като система за енергиен мениджмънт, интелигентен електромер, контролер за интелигентно управление на товара или интелигентно зарядно устройство и др.) следи напрежението в съответната точка на присъединяване и изчислява цената в реално време.

Пазара на електроенергия е система, позволяваща размяната на електрически стоки и услуги, която контролира отношенията между различните участници използвайки две компоненти – „цена на електроенергия“ и „цена на мрежовата услуга“. Цената на електроенергията се формира след споразумение между производители, потребители и проконсуматори. Цена на мрежовата услуга овъзмездява мрежовия (системния) оператор за неговите услуги и се заплаща от всички ползватели на мрежата.

Цена на електроенергията

Цената на електроенергията за определен период, състоящ се от n интервала означени с i ще бъде:

$$C_e = \sum_{i=1}^n C_{e,i} = \sum_{i=1}^n Price_i \cdot P_i \cdot \Delta t_i \quad (4)$$

Където:

$C_{e,i}$ – цената на електроенергията за интервал i ;

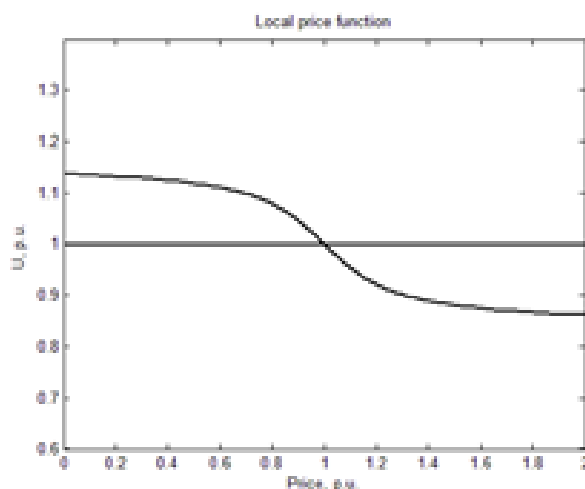
$Price_i$ – единична цена за интервал i ;

P_i – активна мощност;

Δt – времетраене на интервала i .

Единичната цена е различна във всеки възел i на системата за всеки различен период от време. Цената зависи от напрежението в точката на присъединяване.

Динамичната цена насърчава потребителите да съобразяват потреблението си спрямо енергийния баланс на микромрежата и на енергийната система едновременно. На Фиг. 83 е представена характерна нелинейна цена, зависеща от напрежението [104].



Фиг. 20 Динамична цена определена от напрежението Error! Reference source not found..

Когато цената е висока, това стимулира производителите да увеличат производството. Когато цената е ниска се стимулират потребителите съобразно да увеличат потреблението. По този начин производители и потребители са насърчавани да действат съобразно моментните нуждите на системата и да поддържат баланса на мощностите. По-голямата част от потребителите ще предпочетат да консумират енергия, когато функцията на цената се намира в своята линейна част близо до контролната величина (в този случай, напрежението).

Цена на мрежовата услуга

Цената на мрежовата услуга се изчислява както следва:

$$C_{NS} = Price_c - \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta U_i|}{|\Delta P_i|} k_i P_i \Delta t_i \quad (5)$$

където:

$Price_c$ е основната цена

$\frac{|\Delta U_i|}{|\Delta P_i|} k_i P_i$ - определя преносната способност на мрежата, т.е. способността за

пренасяне на постоянна мощност и качеството на услугата от системния оператор.

Експеримент със силов хардуер във веригата

Проведен е експеримент със силов хардуер във веригата (PHiL) с помощта на програмируем симулатор на DC мрежа в лаборатория УЕЕС при ТУ София. Използван е специализиран компютър за изчисляване на параметрите в реално време, който подава симулираните стойности на режимните параметри към мрежовия симулатор. Изходното напрежение е филтрирано чрез изглаждащ кондензатор. Софтуерната реализация е разработена индивидуално за провеждане на PHiL експеримента съвместно с екип на лаб. УЕЕС.

Проведен е PHiL експеримент с отворена верига за типичен период, обхващащ 24 часа. Използвани са данни от съществуваща мрежа с присъединени фотоволтаични генератори. Данните представят изменението на напрежението за разглеждания период.

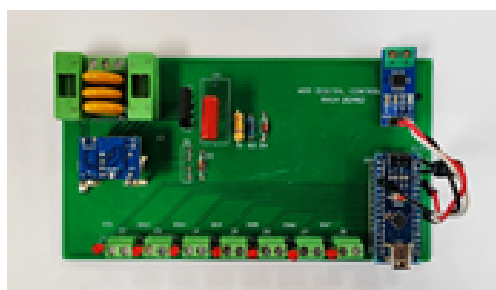
Използваната стратегия за управление е линейна ценова функция с минимални и максимални ценови граници. Цената на електроенергията зависи от напрежението в точката на присъединяване и е представена в относителни единици. В случай на големи стойности на производството от фотоволтаичните генератори, напрежението по естествен начин се повишава. Това води до понижаване на цената, което стимулира увеличаване на потреблението. Ако потреблението нарастне, това ще възстанови баланса на мощностите и автоматично ще доведе до понижаване на напрежението. По аналогичен начин ще се развие процеса в обратната посока. При намаляне на производството напрежението ще се понижи, което ще повиши цената на електроенергията. Това ще даде стимул да се намали потреблението. Намаленото потребление от своя страна ще балансира мощностите.

Представената стратегия за динамично ценообразуване успешно изпълнява задачата по балансиране на мощностите, както и останалите поставени цели.

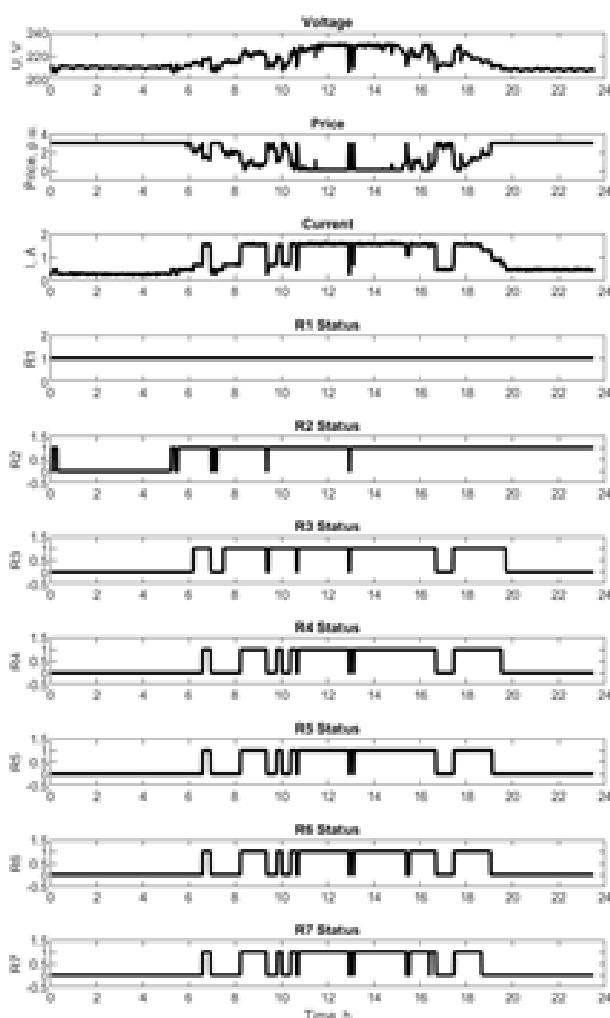
Реализираният контролер с отворен код може успешно да изпълнява задачите си в реални условия, като прилага схемата за динамично ценообразуване. Той е с проста схема, ниска цена и може лесно да се програмира, позволявайки удобна промяна на стратегията за управление.



Фиг. 21 Мрежови симулатор – вътрешно разположение



Фиг. 22 Модифициран контролер Sitalkes SLC 7 SW DC



Фиг. 23 Резултати от изпитването със силов хардуер във веригата при изследване на стратегия за динамично ценообразуване в постояннотокова мрежа ниско напрежение

Прилагането на предложения метод за динамично ценообразуване позволява разумно и природосъобразно използване на електрическата енергия, като дава възможност за по-лесно и справедливо постигане на равновесие между производство, потребление и акумулиране на мощност и енергия.

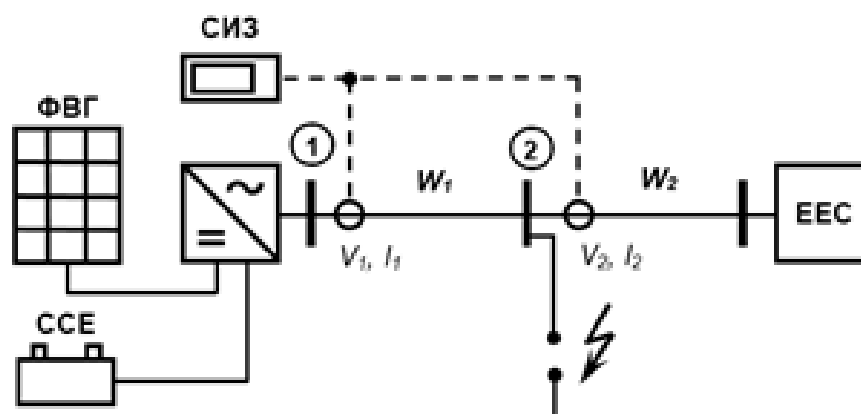
ГЛАВА 4. Експериментален подход с физически модели за изследване на инверторно свързани генератори с акумулатори

В рамките на настоящата работа е разработена и представена опитна постановка за изпитване и анализ на микро и нано-мрежи с инверторно свързан генератор със система за съхранение на енергия (ССЕ), изградена в лабораторията по УЕЕС на ТУ София по Изследователски проект в помощ на докторант на тема „Лабораторен стенд за изследване на микро и нано мрежи с инверторно свързани генератори с акумулатор“. Предложеното решение е полезно за изследване и демонстрации на явления, свързани с устойчивостта на ЕЕС. Извършени са експерименти за изследване на поведението на инвертор при възникване на късо съединение при различни характерни моменти на възникване на късото съединение, като е взето под внимание влиянието на ССЕ. Разгледани са преходните процеси след смущението, като са отбелязани предимствата и възникналите предизвикателства и недостатъци на предложената постановка.

Усилията са насочени към изследване на поведението на фотоволтаичен генератор (ФВГ) в условията на късо съединение, като е обърнато специално внимание на момента на възникване на късото съединение.

Опитната постановка се състои от система за измерване и запис (СИЗ), еднофазен инвертор (И), ФВГ и ССЕ. На променливотоковата страна инверторът е свързан с ЕЕС чрез физически модел на електропровод (W), способен да пресъздаде нужните електрически величини. ФВГ отдава мощност към инвертора И. Инверторът, от своя страна, преобразува електрическата енергия и я подава към ССЕ. Излишната енергия се отдава към ЕЕС (Фиг. 96).

В контролирана среда са извършени серия от къси съединения към земя, възникващи по естествен път в различни моменти от време. Измерват се токът и напрежението в точката на присъединяване на инвертора, отбелязана като възел 1 и в точката на възникване на късото съединение от страната на ЕЕС, отбелязана като възел 2.



Фиг. 24 Схема на опитната постановка

При изследването са избрани и разгледани четири характерни случая за начален момент на възникване (в случая експериментално предизвикване) на късо съединение:

- При преминаване на напрежението през нулева стойност;
- При амплитудна стойност на напрежението;
- При възходящ фронт на изменение на напрежението в точка между нулевата и амплитудната стойност;

- При низходящ фронт на изменение на напрежението в точка между амплитудна и нулева стойност.

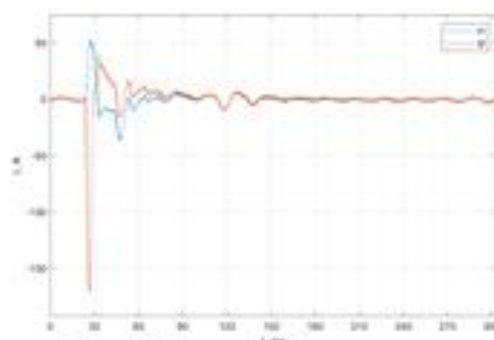
Въз основа на регистрираните преходни процеси са оценени стойностите на следните, характеризиращи преходния процес индикатори:

- Максимална стойност на тока, с който инверторът допринася за захранване на КС;
- Максимална стойност на мощността, която инверторът отдава за захранване на КС;
- Енергия отдадена от инверторът за захранване на КС;
- Енергия отдадена от системата за захранване на КС;
- Време за затихване на преходния процес;
- Време за възстановяване на напрежението в стойност близка до номиналната.

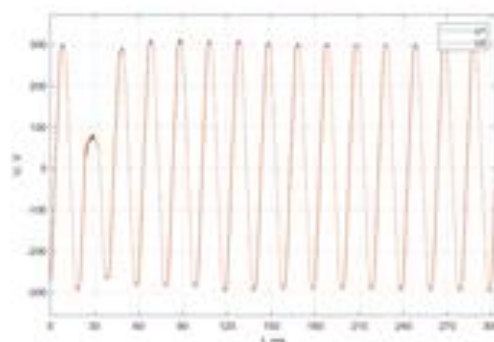
Както в установения режим преди късото съединение, така и в режима след смущението се наблюдават значими стойности на хармоничните съставлящи от висок ред при отдаваната мощност, обусловени от характеристиките на изходните филтри и използваната широкоинно импулсна модулация при превключването на инвертора.



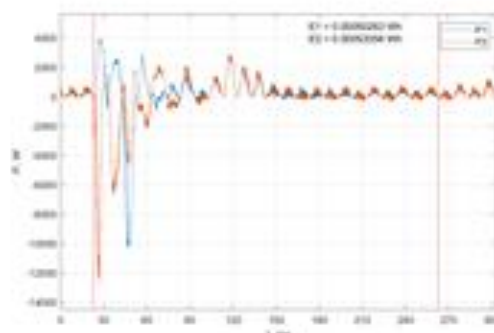
Фиг. 25 Общ изглед на опитната постановка



Фиг. 26 Ток при КС в нулата



Фиг. 27 Напрежение при КС в нулата



Фиг. 28 Мощност при КС в нулата

За оценка на работата на инвертор при въздействието на ССЕ е планиран експеримент с горепосочения закупен по проекта в помощ на докторанта инвертор. За осъществяване на експеримента е нужно съдействие от производителя чрез предоставяне на нужните пароли за активиране на определени функционалности. Поради липса на отговор от страна на производителя за повече от пет седмици експериментът е проведен с друг инвертор с подобни характеристики (4000W, 230V).

Инверторът работи едновременно и като управляващо устройство в ССЕ, т.к. изпълнява функцията на заряден регулатор и същевременно с това контролира енергията отдавана към ЕЕС.

Проведени са три експеримента:

- Първична настройка с отдаван ток към ЕЕС 0.19А
- Отдаван ток към ЕЕС $I_1=1,0\text{A}$
- Отдаван ток към ЕЕС $I_1=1,59\text{A}$

⊕ Таблица 22 Обобщени резултати

| | I_1, A | P_1, W | E_1, mWh | E_2, mWh | T_i, ms | T_u, ms |
|---|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| КС при преминаване на напрежението през нулата | 52.43 | 10360 | 0.50283 | 0.53356 | 250 | 160 |
| КС при достигане на амплитудна стойност на напрежението | 105.1 | 11430 | 0.27925 | 0.47661 | 200 | 110 |
| КС при възходящ фронт | 54.71 | 10640 | 0.27762 | 0.46909 | 220 | 150 |
| КС при низходящ фронт | 60.29 | 10690 | 0.23973 | 0.48533 | 180 | 130 |
| Неустойчив преходен процес | 54.81 | 5047 | 0.1422 | 0.52772 | - | - |
| Отдаван ток към ЕЕС 0.19А | 38.76 | 2636 | 0.064483 | 0.052843 | 90 | 90 |
| Отдаван ток към ЕЕС $I_1=1,0\text{A}$ | 36.48 | 2481 | 0.12646 | 0.12139 | 60 | 80 |
| Отдаван ток към ЕЕС $I_1=1,59\text{A}$ | 34.2 | 4213 | 0.13865 | 0.12876 | 55 | 40 |

От получените резултати е видно, че максимална стойност на тока, с който инверторът допринася за захранване на КС, както и максимална стойност на мощността, която инверторът отдава за захранване на КС се проявява в случай на КС при достигане на амплитудна стойност на напрежението.

Липсата на техническо съдействие от страна на производителя на закупения инвертор предизвиква значителни затруднения при изготвяне на постановката. Въпреки това, предложеното решение би било полезно, т.к. разширява възможностите за образователни и научни изследвания в областта на УЕЕС и преходни процеси. Също така, установката позволява изследването на автоматизирането и управлението на процеси в микро и наноурежи. Извършените експерименти дават възможност за оценка на поведението на инвертора при възникване на КС и позволява изследване влиянието на момента на възникване на КС върху УЕЕС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С изпълнение на поставените задачи, целта на настоящата дисертация е изпълнена.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Научно-приложни приноси

- 1.1. Предложено е моделно изследване на методите и средствата за регулиране на напрежението и режимите в електроразпределителните мрежи с възобновяеми ДЕИ, посредством набор от показатели за оценка на състоянието.
- 1.2. Анализирани са различни възможни схеми за развитие на електроразпределителни мрежи в контекста на увеличеният дял разпределено производство от ВЕИ като са оценени предимствата и недостатъците при всяка от тях.
- 1.3. Разработена е нова архитектура, софтуерна и хардуерна реализация на опитна постановка за изпитване и изследване на устройства и системи в контекста на устойчивостта и управлението на електрически мрежи и системи посредством техники със силов хардуер във веригата.

2. Приложни

- 2.1. Разработени са нови модули на програмата STATUS, които позволяват осъществяване на целта и задачите на изследването по отношение на методите и средствата за регулиране на напрежението и режимите в електроразпределителните мрежи с възобновяеми ДЕИ.
- 2.2. Разработен е нов цифров контролер за интелигентно управление на режимните параметри посредством изменение на товара.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Viglov, K., Power System Stability Analysis and Testing of Micro and Nano Grids with Converter Interfaced Generation with Storage, 2023 15th Electrical Engineering Faculty Conference, Bulef 2023, 2023
2. R. Stanev, Efthymiou V, Lopes J. P., Asenov T., Charalambous C., Fernandes F., Viglov K., Bracho J., A New Controller for Dump Load Active Power Management of Hydraulic Generator Unit, Proceedings of 2022 2nd International, Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area, (SyNERGY MED 2022) IEEE Catalog Number: CFP22T26-POD, ISBN (Print): 978-1-6654-6108-5, ISBN (Online): 978-1-6654-6107-8, Curran Associates, Inc, Red Hook, NY 12571 USA, www.proceedings.com
3. Stanev, R., Siderov, D., Viglov, K., ... Khadem, S., Charalambous, C., New Control Paradigm and Dynamic Pricing Scheme for Low Voltage Direct Current Networks, 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference, Bulef 2022, 2022
4. Stanev, R., Viglov, K., Dzhumaliyski, P., Stoychev, N., ...Nikolov, N., Polihronov, N. Voltage Control Strategies for Distribution Networks with Distributed Energy Resources, 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference, Bulef 2022, 2022
5. Stanev, R., Viglov, K., Nakov, K., Asenov, T., A Real Time Power Hardware in the Loop Test Bed for Power System Stability Studies, 2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference, Bulef 2020, 2020, 9326020



TECHNICAL UNIVERSITY of SOFIA
Faculty of Electrical Engineering
Department of Electrical Power Engineering

Kostadin Bogoslovov Viglov, M.Sc

MANAGEMENT OF CONTEMPORARY POWER SYSTEMS

ABSTRACT

In recent years, the massive growth of Distributed Energy Resources (DER) with renewable energy, Energy Storage Systems (ESS) and charging stations for Electric Vehicles (EV) enabled new smarter and more efficient concepts for operation such as micro, mini and nanogrids operating in grid connected, autonomous or partially connected mode. This energy transition set new requirements of managing and development of smart grids.

A research on the Voltage Control Strategies for Distribution networks with DER is made. Taking into account the network topology and the load and generation profiles some typical states are calculated using the STATUS power system analysis software. Furthermore, a quasi-dynamic analysis and a test case with distributed photovoltaic generators (PVG) in a distribution network is performed in order to demonstrate the interaction of different converter interfaced DER and other network-controlled elements such as under load tap changers.

A real time power hardware-in-the-loop (PHIL) test bed for power system (PS) stability studies is developed and implemented in the Power System Stability Laboratory (PSSL) of TU-Sofia. Application of grid forming inverter serving as power amplifier is presented and evaluated in terms of response time and fidelity. The solution uses standard and cost effective multifunctional components and allows testing of devices and systems over wide range of conditions in a safe and realistic physical laboratory environment.

A new dump load controller for active power management of hydraulic generator unit using the power system parameters at the generator's terminals is considered. An existing system with an analog controller is evaluated and a new digital open source Hydraulic power plant (HPP) power controller with extended functionality is proposed, designed and realized. A simulation of the voltage measurement sensor in LTspice is performed in order to determine the appropriate hardware parameters. Comparison between the features of the existing analog controller and the new digital controller is performed. The new solution proposed offers simplified hardware, high reliability, easiness and flexibility of controller settings.

A new concept, control paradigm and Dynamic Pricing Scheme for LVDC Networks is presented. The concept and market schemes rely on a leading signal based on the network parameters at the point of common coupling (PCC), which makes it simple, safe, easy to implement and reliable. The main methodological and economic concepts are presented, after which a PHIL laboratory demonstration experiment with flexible load control is performed and presented.

An experimental test set-up for analysis and testing of micro and nanogrids with converter interfaced generation with storage is realized in the PSSL at TU - Sofia within the project in support of PhD student. The solution proposed appears to be useful for research and demonstration of wide range of power system stability-related phenomena. Some valuable experimental tests concerning inverter behaviour during short circuit occurrence are considered with an emphasis on different points of short-circuit occurrence and the effect of an energy storage system. Experiments demonstrating post disturbance unstable transient process are noted and discussed. A short discussion on some of the challenges and drawbacks of the solution is provided.