



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Електротехнически Факултет
Катедра Електроенергетика

Маг. инж. Цветомир Сашков Асенов

УПРАВЛЕНИЕ НА РЕЖИМИТЕ В МИКРО И НАНО МРЕЖИ

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 10.12.2024 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 08.04.2025 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-85 / 16.12.2024 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 задочен 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. Цветомир Асенов

Заглавие: Управление на режимите в микро и нано мрежи

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В днешно време развитието на Електроенергийната Система (ЕЕС) може да се разгледа като един непрестанен процес, пряко обвързан с комплексния характер на изменение на потреблението и на присъединяването на все повече възобновяеми енергийни източници в разпределителната мрежа. Повече от всякога, ЕЕС е изправена пред огромното предизвикателство да отговаря на изискванията за навременна и адекватна реакция към новия модел на развитие на разпределителната мрежа.

Нарастващото потребление на електроенергия, както и непрестанното присъединяване на мощности от разпределени източници на възобновяема енергия, изправят глобалната електроенергийна система пред необходимостта от разработването на нови стратегии и сценарии за подобряването на гъвкавостта и устойчивостта на енергийната система, както и пред необходимостта от запазване качеството на доставяната електроенергия и автоматично управление в зависимост от зададени режимни параметри.

От една страна стратегията за внедряването на все повече ВЕИ, води до безспорното намаляване на вредните емисии, което оказва благоприятно въздействие върху околната среда и качеството на живот, от друга страна нарастващото производство на енергия от източници с променлив характер (ВЕИ), води до нуждата от развитието на план за промяна поведението на електроенергийната система. Тази остра необходимост е главно породена поради факта, че съвременната енергийна система е оразмерена и проектирана до определен процент на децентрализираното производство, който вземайки предвид гореописаните стратегии, нараства всеки ден. Това решение създава предпоставки за влошаване качеството на енергия изразяващо се в:

- Отклонения в честотата на мрежата;
- Отклонения от нормите на напреженията;
- Неадекватна работа на релейните защиты;
- Нарушена устойчивост на мрежата и увеличаване на времето за възстановяване;

Променливият характер на производството от възобновяеми източници допълнително увеличава възможността за гореизброените неблагоприятни въздействия.

Значимото интегриране на възобновяеми енергийни източници в енергийния сектор през последното десетилетие, а също така и нарастващото развитие в областта на електрониката и микроконтролерите, доведе до формирането и внедряването на нов вид мрежи – интелигентните микро и нано мрежи, позволяващи работа както в островен режим, така и в паралел със системата. Тази новосъздадена структура на електроенергийната система, налага изследването и интегрирането на нови стратегии и устройства за управление на микро и нано мрежите при практически всички експлоатационни режими.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на настоящата работа е да се изследват съвременните подходи и методи за управление на режимите в електрическите микро и нано мрежи, посредством прилагане на различни методи за анализ.

След направения литературен обзор по темата, може да бъде обобщено, че за изпълнение на поставената цел по изследване на управлението на режимните параметри в микро и нано мрежи в настоящата работа следва да бъдат третираны следните задачи:

1. Анализ на микромрежи, посредством математическо моделиране;

2. Управление на параметрите на микро и наномрежи, посредством физическо моделиране;

3. Анализ на стратегии за управление на микро и наномрежи, чрез използване на изследвания с контролер във веригата;

4. Анализ на микро и наномрежи, посредством прилагане методи за изследване със силов хардуер във веригата.

5. Разработка и реализация на технически средства за интелигентно управление на режимните параметри в микро и наномрежи, почиващи на нови, икономически ефективни софтуерни и хардуерни решения с отворен код и изпитване в лабораторна среда и в живи лаборатории с близка до действителността среда.

Методология

При изследванията са приложени математични модели и софтуерни инструменти за анализ на процеси възникващи при микро и нано мрежи. Използвани са физически модели на устройства и системи, включително и силов хардуер, подходящи за пресъздаване на условия и събития, 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 контрол и управление на режимите при микро и нано мрежи с възобновяеми 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 185 страници, като включва увод, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 94 литературни източници, като 87 са на латиница и 2 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 124 фигури и 9 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.

Целта на настоящата работа е да изследва съвременните подходи и методи за управление на режимите в електрическите микро и нано мрежи, посредством прилагане на различни методи за анализ.

След направения литературен обзор по темата, може да бъде обобщено, че за изпълнение на поставената цел по изследване на управлението на режимните параметри в микро и нано мрежи в настоящата работа следва да бъдат третираны следните задачи:

- Анализ на микромрежи, посредством математическо моделиране;
- Управление на параметрите на микро и наномрежи, посредством физическо моделиране;
- Анализ на стратегии за управление на микро и наномрежи, чрез използване на изследвания с контролер във веригата;
- Анализ на микро и нано мрежи, посредством прилагането методи за изследване със силов хардуер във веригата.
- Разработка, реализация на технически средства за интелигентно управление на режимните параметри в микро и нано мрежи, почиващи на нови, икономически ефективни софтуерни и хардуерни решения с отворен код и изпитване в лабораторна среда и в живи лаборатории с близка до действителността среда.

ГЛАВА 2. Математическо моделиране

Развитието на изчислителната техника и навлизането на силовата електроника в управлението на микромрежите доведе до развитието на софтуери за симулации на микро мрежи, разполагащи с богати библиотечни компоненти описващи динамиката на компонентите съставлящи микромрежите.

Така развитата се софтуерна индустрия позволява изследването на по-комплексни мрежи и по-задълбоченото им изучаване на ниво софтуерна симулация, като рискът за изследователите по време на тестовите за попадане под напрежение или повреждане на скъпа апаратура е минимален.

В настоящата глава е разгледана разработката и изпитване на математически модел на микромрежа, съставен от хидрогенератор, куплиран с електрическа машина, работеща в режим на синхронен генератор, присъединен в паралел с трифазна система посредством преносни линии. Връзката между система и микромрежа, се осъществява посредством триполюсен прекъсвач.

С цел изпитване на функционалността на разгледания модел, е приложен тестови сценарий, при който микромрежата се извежда от нормално работно състояние чрез прекъсване на връзката и паралелната работа със системата, при което възниква островен режим на работа.

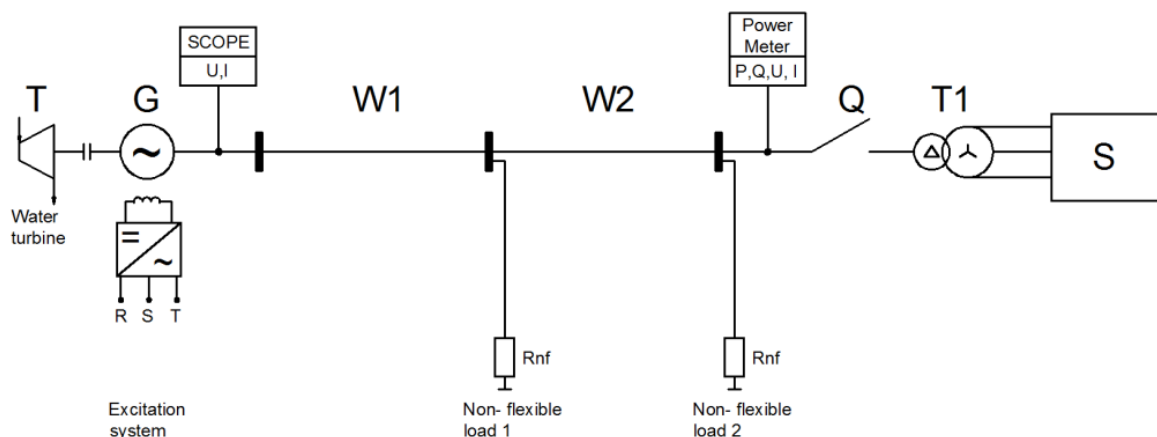
За да се валидира математическия модел на микромрежата, същата конфигурация на опитната постановка е реализиран физически в лаборатория УЕЕС и ППЕЕС на ТУ-София, след което резултатите от двата модела са сравнени и анализирани.

Математическият модел позволява да се изследват нови алгоритми за управление на микромрежи, както и реализирането на множество смущаващи въздействия и тестови сценарии.

Описание на изследваната микромрежа

С цел изучаването на нови стратегии за управление на микромрежите при настъпването на различни, смущаващи нормалната работа, въздействия в настоящата глава е предложено и описано разработване и валидиране на математически модел на микромрежа в среда Matlab Simulink.

За да се провери точността на математическият модел са проведени изпитания върху физически еквивалент на микромрежата в лабораторни условия, след което получените резултати са сравнени и анализирани. Конфигурацията на модела на микромрежа е представена на Фиг. 40.



Фиг. 40 Принципно схемата на модела на микромрежата

Моделът е съставен от водна турбина, генератор, електропроводни линии, присъединени товари, триполусен прекъсвач, повишаващ трансформатор и връзка със системата. Параметрите на отделните блокове са описани подробно в дисертационния труд.

С цел изследване на ефективността на модела на микромрежата, са реализирани и изпитани два режима на работа: „паралелна работа със системата“ и „работа на островен режим“.

При първия изследван режим, генераторът се развърта до синхронни обороти, след което се регулира възбуждането, до достигане на системното ниво на напрежение, след което се включва прекъсвача - Q. Като резултат, мрежата „увлича“ генератора, задавайки нивото на напрежението и честота, тъй като мощността на генератора е пренебрежимо малка спрямо тази на системата.

Вторият режим за изследване е отпадането на паралелната работа между микромрежата и системата, чрез изключване на прекъсвача - Q.

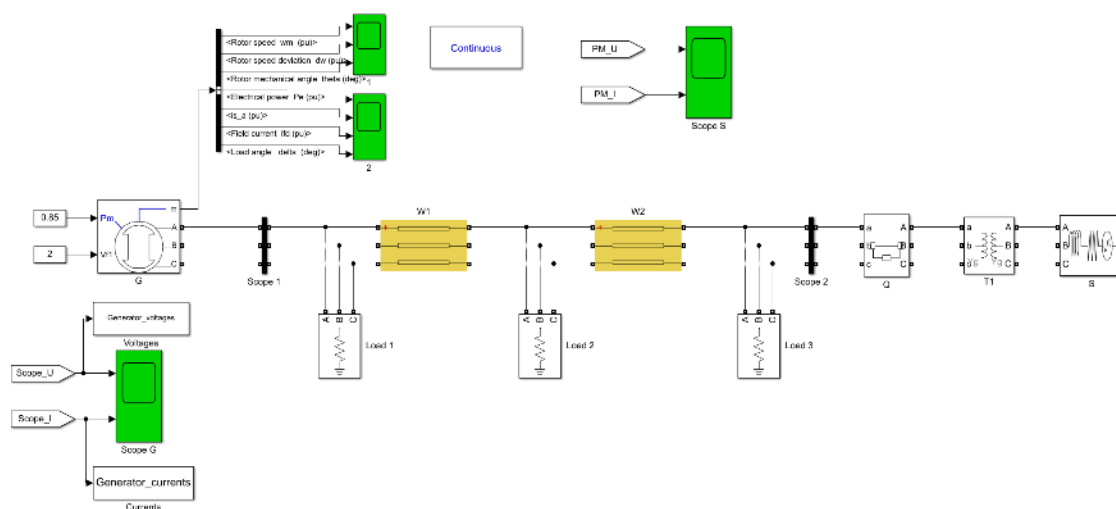
Математически модела на микромрежата

Математическият модел на микромрежата е разработен и тестван в Matlab Simulink. Богатата компонентна база на платформата позволява реализиране, конфигуриране и изследване на микромрежи, включващи различни източници, системи за управление, комуникация и други. Всеки компонент притежава атрибути за въвеждане на входни данни описващи протичащите процеси в него, което е от съществено значение за постигане на точни резултати.

При липса на конкретни входни данни за по-сложни модели, библиотеката предоставя възможност за използване на осреднени модели. Това улеснява тестването на стратегии за управление, въпреки че резултатите могат да се различават от реалните.

Моделът на синхронния генератор отразява процесите в машината на база параметри в относителни единици. В зависимост от знака на механичната мощност (положителен или отрицателен), този блок може да се използва, както в генераторен, така и в двигателен режим. Електрическата част на машината е описана чрез уравненията на Парк, които включват динамичните процеси в статора и успокоителните намотки.

Описанието на електрическата част на машината е базирано на уравненията на Парк, като динамичните процеси протичащи в статора и успокоителните намотки също са отразени при моделирането.



Фиг. 48 Реализация на физическия модел на микромрежата.

За моделирането на преносните линии, W1 и W2 е използван модел, който се основава на метода на Bergeron, като се пренебрегват загубите по линията, ($r=0$), а дължината на линията се разбива на малки секции съставени от индуктивности ΔL и паралелно свързани капацитети ΔC .

Прекъсвачът Q, е представен като трифазен програмируем силов прекъсвач. Този модел позволява да се програмират поредици на включване и изключване, а управляващия сигнал може да се подаде от външна верига или вътрешно, например след изтичане на определена времезадръжка. За разгледания случай е избран втория вариант на управление.

Тестови сценарии и резултати

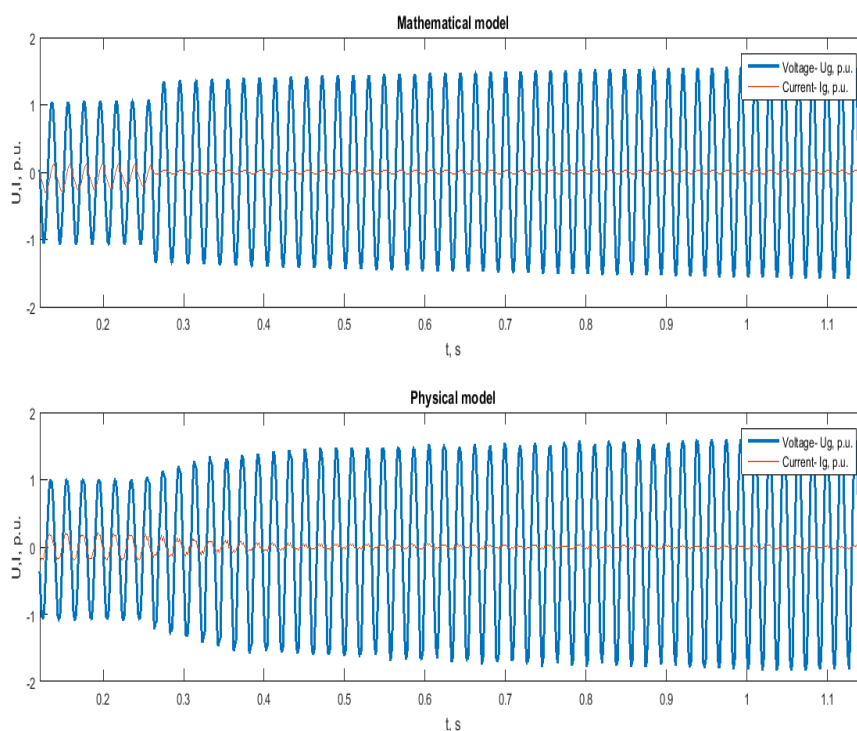
За да се провери и валидира математически модел е проведен тестови сценарий, при който микромрежата работи в паралел с ЕЕС и прекъсвачът Q е затворен. В установения работен режим товарите, присъединени към шината на генератора се захранват главно от генератора, а излишната мощност се отдава в мрежата S.

В момента ($t=0.27s$) от началото на симулацията, настъпва смущение, което предизвиква нарушаване на паралелната работа между микромрежата и системата и

преминаване към нов установен режим на работа на остров. Механичната мощност на турбината остава постоянна, в резултат на което балансът на мощностите се нарушава. Поради наличието на излишък на мощност, скоростта на въртене на ротора на генератора започва да се увеличава, което води и до увеличаване на напрежението и честотата.

На Фиг. 52 е направено сравнение на резултатите от математическия и физическия модел след реализирането на тестовия сценарий. Може да се приеме, че е налице добра степен на сходство между резултатите, получени посредством математическия и физическия модел. Забелязват се известни разлики дължащи се на допускането за неизменна механична мощност при математическия модел.

Друга особеност, която прави впечатление при нарушаването на паралелната работа, е времето за достигане на новата, по-висока, установена стойност. Тази разлика, най-вероятно се дължи на определянето на времеконстантите на машината, записани в математическия модел. При последния се забелязва рязък скок от едно установено положение, към второ, докато при физическия модел, преходът е плавен.



Фиг. 52 Сравнение на получените резултати от математическия и физическия модел на микромрежа

ГЛАВА 3. Физическо моделиране

Все по-бързото интегриране на силовата електроника, като мощни транзистори, релета, драйвери и контролни звена, а също и на слаботоковата електроника, комуникация, измерване, запис на данни, обратна връзка и прочие, определят микромрежата като една комплексна система, изградена от множество сложни за описване подсистеми.

С цел изследване на по-комплексни микромрежи, както и на взаимодействието им с други системи, получаването на близки до реалните резултати и избягване на необходимостта от описване на сложни математически модели е необходимо съставянето

на физически модел на микро мрежа, позволяващ реализацията на различни системни топологии, възможност за работа в различни работни режими, както и реализирането на разнообразни тестови сценарии.

За изследване на поведението на микромрежите, както и за разработване и изпитване на нови методи за контрол и управление, в лаборатория УЕЕС и ППЕЕС на ТУ София е реализиран физически, хибриден, мобилен модел на микромрежа, позволяващ пресъздаване и конфигурацията на различни топологии на микро, мини и нано мрежи, работещи в паралел със системата или на островен режим. От друга страна, изпитването на микромрежи и системи по метода на физическото моделиране дава ценна информация, не само за поведението на микромрежата, но също така би могло да се използва за валидиране и верификация на съществуващи или ново разработващи се математически модели в симулационна среда.

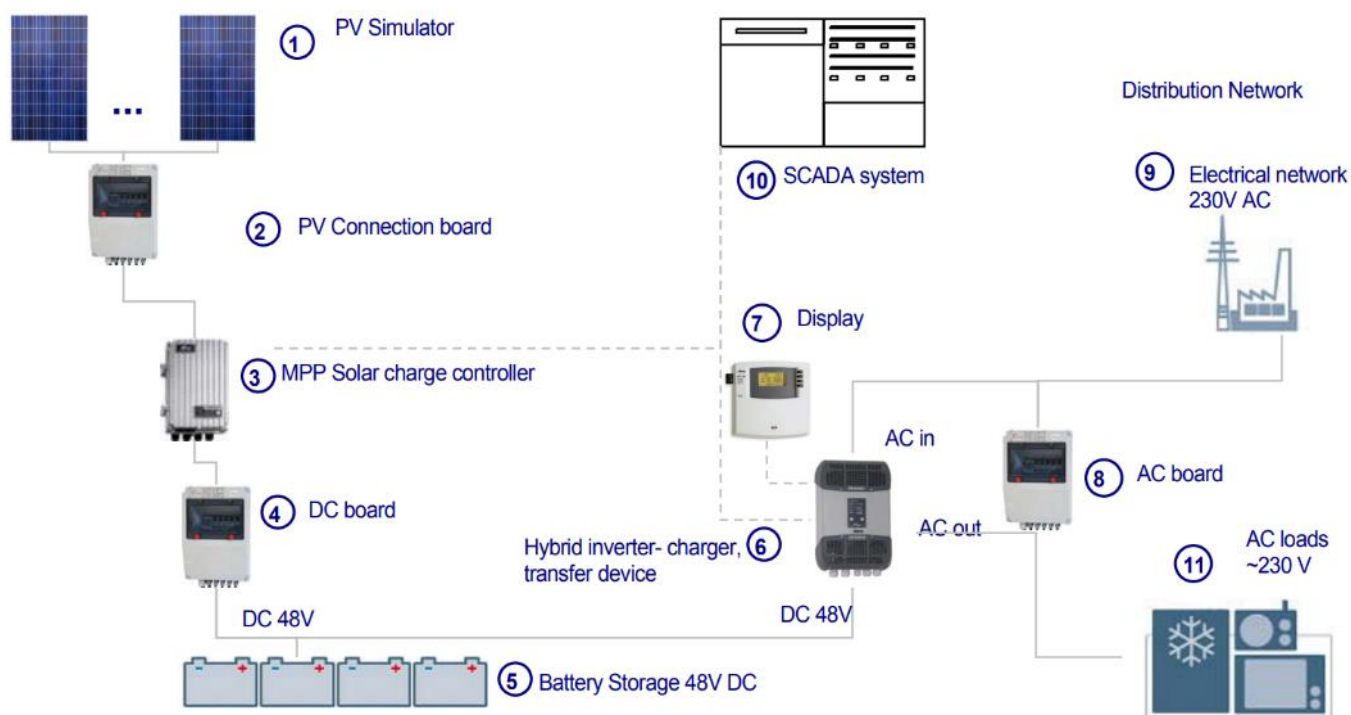
Съставяне, конфигурация и реализация на физически модел на микромрежа.

През последните години, в лаборатория УЕЕС и ППЕЕС на ТУ София, е разработен физически модел на система, състоящата се от хидрогенератор, физически модел на преносни линии, силов трансформатор с изведени краища на намотките, позволяващ да се изберат различни напрежения, отговарящи на всички нива на напрежения в електроенергийната система и управляеми товари.

С цел развитие на лабораторната инфраструктура и разширяване обхвата на изследване и разработване на нови стратегии за управление микро и нано мрежи, необходимо е да се създаде и да се развие физически модел, позволяващ сравнително лесно конфигуриране на микро и нано мрежи, включвайки изследвания със системи за съхранение на енергия, инверторно-свързани мрежи, SCADA система и други.

На Фиг. 53 е представен физически модел на микро, нано или мини мрежа. Моделът може да работи, както в паралел със системата, отдавайки мощност в нея или като товар, зареждайки батериите, присъединени към DC частта, така и в островен режим, захранвайки приоритетните товари, присъединени към AC изхода и/или DC.

Главните компоненти съставлящи физическият модел на микромрежата са: Физически модел на фотоволтаичен генератор; Заряден регулатор; Батерии за съхранение на енергия; Хибриден преобразувател; Информационна система; Електрически товари и др.



Фиг. 53 Топология на физически модел на микромрежа

Функционалност на модела

Физическият модел на микромрежата, Фиг. 53 представлява гъвкаво, конфигурируемо решение за изследването на множество различни схемни решения на микро, мини и нано мрежи, като позволява присъединяването на различни видове източници на енергия, куплирани в точката на присъединяване. Входът на хибридният преобразувател “ACIN”, позволява присъединяването на физическия модел към електроенергийната система, физически модели на различни генератори като микро ВЕЦ, физически модел на ветрогенератор, синхронни генератори и други.

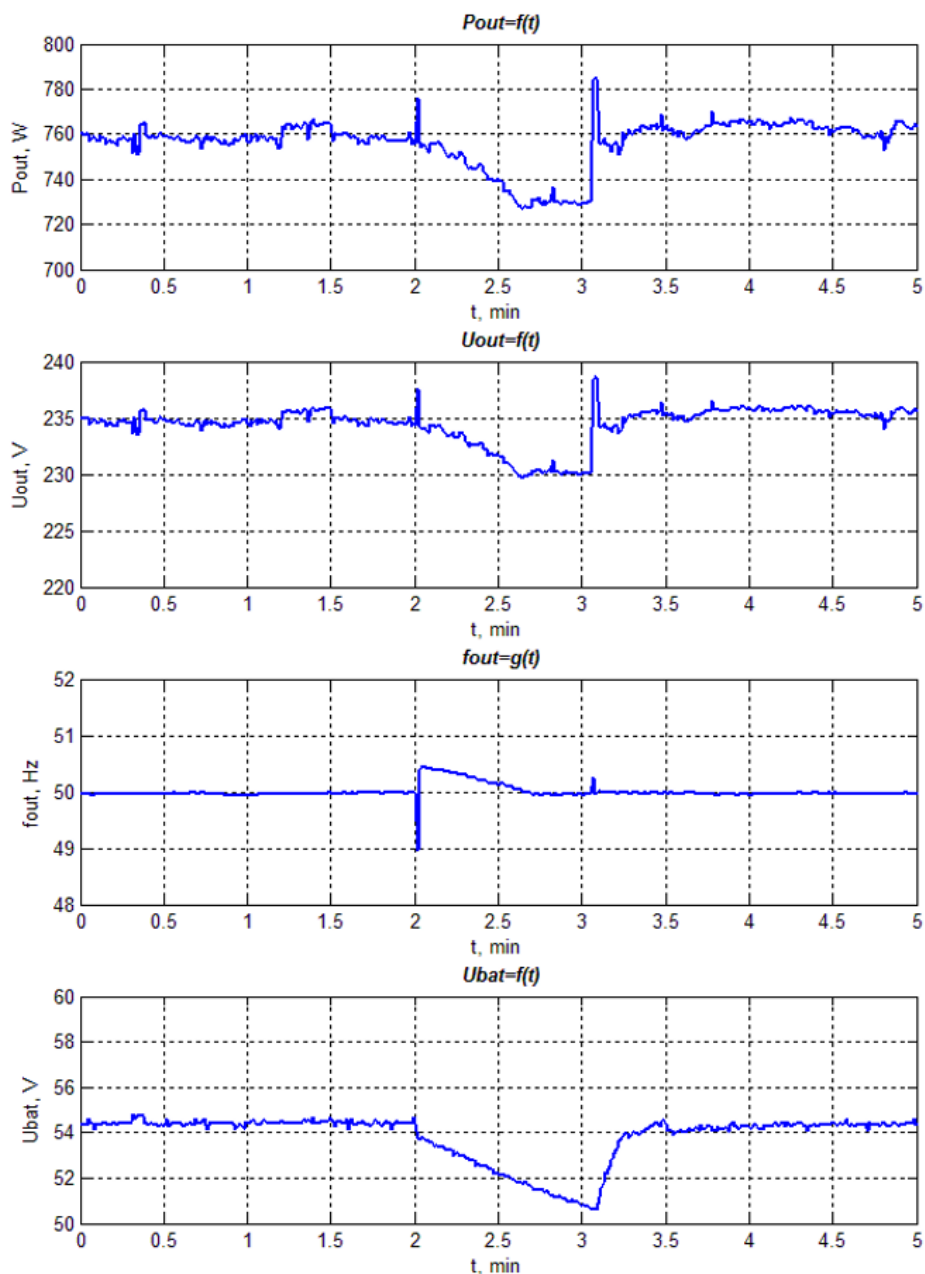
Физическият модел на микро мрежа позволява конфигурацията на следните режими на работа: островен режим (autonomous mode); паралелно свързан към мрежата (grid connected mode); частично свързан към мрежата (partially connected mode);

Моделът е реализиран на мобилна конструкция, позволяваща лесното му и гъвкаво преконфигуриране и адаптиране към други системи използвани в лабораторията. Мониторингът, обработката и запис на данни се извършва с помощта на компютър и Matlab базирана SCADA система. Текущите данни, даващи информация за състоянието на системата се изпращат по комуникационни канали от сензорите, като например сензор за напрежение, токов сензор, температурен сензор и други, присъединени към възлите на микромрежата. Обработката на данни, записът и представянето на резултати, MATLAB базираната SCADA система и факта, че хибридният инвертор е напълно управляем, позволяват реализацията и изследването на множество стратегии за управление, при различни режими. SCADA системата може да работи и позволява запис на резултати, както локално на компютъра, така и на уеб сървър.

Експериментални резултати от изследвани характерни режими

С цел изпитване на функционалността и свойствата на физическия модел, са проведени различни, характерни тестови сценарии, в лабораторни условия, а резултатите от тях са записани и анализирани.

На фиг. 58 са представени резултати от изпитването на модела на микромрежа при паралелна работа с ЕЕС и внезапно разпадане на връзката и последващото възстановяване.



Фиг. 58 Паралелна работа на микромрежата с ЕЕС, прекъсване и възстановяване

Гъвкавостта на изследваната конфигурация на микромрежа, дава възможност за реализация на различни работни режими, позволява изследването на процеси, възникващи в микромрежите и експериментиране с нови методи за постигане на оптимално и интелигентно управление, като например:

- Изследване на устойчивостта на ЕЕС;
 - Оценка на възможностите на микро, мини и нано-мрежите за подпомагане на ЕЕС при поддържането на режимите им;
 - Изпитване на хардуерни и/или софтуерни решения за контрол и управление на разпределителните мрежи;
 - Изпитване на интелигентни контролери за управление на товарите в микро мрежите;
- Реализирани са няколко типични сценарии, възникващи в реалните микромрежи, като резултатите са записани и анализирани.

Резултатите от изпитванията показват достатъчна точност и валидират функционалността и ефективността на представеното решение за лабораторен физически модел на микромрежа.

Лабораторният физически модел позволява бъдещо развитие чрез нови управляващи устройства, интегрирането на допълнителни системи и комуникация между тях, за изпитването на нови методи за контрол и управление на микромрежи и изследване на техните възможности за развитие.

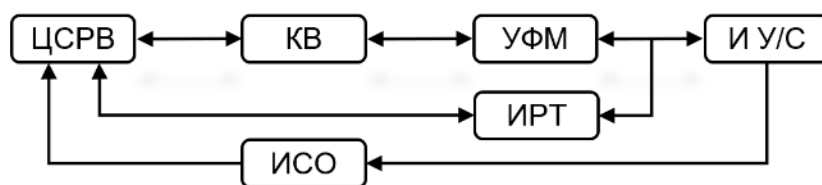
Глава IV Изследване посредством похвати със силов хардуер във веригата- РНЦ

В настоящата глава е реализиран и изпитан стенд за провеждането на изследвания със силов хардуер във веригата, даващ възможност да се оцени поведението на изследвания обект (DuT) да се изследва устойчивостта на система при реализиране на предходни, възникнали в миналото аварийни режими в електроенергийната система.

Често при дигиталното симулиране на взаимодействието между електроенергийната система и изследваното устройство, система или контролер, не се третира изменението на реалните процеси, възникващи в рамките на устройството, като вътрешното време за обработка и реакция на устройството, влияещи външни фактори като изменение на температурата на околната среда, работа в непосредствена близост до устройството, излъчващи електромагнитни смущения и др.

Именно поради тази причина РНЦ симулациите се явяват ефективно решение за провеждане на експерименти интегрирайки работата на реален хардуер със симулирана електроенергийна система.

Този подход дава едно достатъчно добро приближение до реалните процеси, които възникват в самото устройство и възможността да се изследва този ефект върху поведението на цялостната система в ранния етап на разработка, което от своя страна води до намаляването на риска, намаляването на разходи за нови прототипи, намаляване времето за разработка и др. Типичната организация на РНЦ симулациите е представена на Фиг. 64.



Фиг. 64 Стандартна блокова схема на РНЦ симулация

Съответните блокове, съставлящи принципната схема на постановката за изпитване по метода със силов хардуер във веригата са:

- 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 силово оборудване (ИСО)

Въпреки че изследването на система или устройство чрез РНІЛ симулации дава добро приближение до работа в реални условия, методът има недостатъци като някои от тях са висока цена на оборудването, повишено внимание при работа, необходимост от добри комуникационни настройки, риск от повреда на оборудване и др.

За да се осигури устойчива работа, безопасност, точност и надеждност на резултатите, трябва да се вземат под внимание следните фактори:

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

В литературните източници, едни от най-често реферираните симулатори в реално време са системите на OPAL_RT, RDTs Technologies, Typhoon HIL, National Instruments.

Производителите на такива системи, предлагат висок клас решения, окомплектовани с многоядрен изчислителен ресурс, даващ възможност за паралелно изпълнение на инструкции, изследване на множество сценарии за управление, висока производителност, съвместимост с различни системи и възможности за конфигурация на различни мрежи за целите на изследването и др. Стойността на дадена система е определена от наличността на изброените възможности, като въпреки това, дори и за по-ниско ниво на оборудване на системата, цената е трудно достъпна.

За постигането на целите на дисертацията е налице необходимостта от намирането на ефективно, достъпно, достатъчно точно и гъвкаво решение за реализирането на стенд за РНІЛ симулации, което да позволи да се изпита и оцени системата по отношение на възможността за симулиране на поведението на микрмрежа и цялостното ѝ взаимодействие с ЕЕС.

Описание на лабораторната инфраструктура

В лаборатория по УЕЕС и ППЕЕС на Технически Университет София е разработен и изпитан стенд за изпитване поведението на дадена система за управление или контролер (SuT/HuT), чрез подход със симулация със силов хардуер във веригата (РНІЛ). Физическият стенд е представен на Фиг. 65.

За разлика от традиционните трудно достъпни системи за НІЛ и РНІЛ симулации, реализираното решение почива изцяло на стандартни, мултифункционални компоненти. В настоящата работа, е приложен и изпитан стандартен формиращ мрежата инвертор играещ ролята на УМ. Възможността на инвертора за комуникация с външния свят, определя гъвкавостта на решението, като по този начин, стенда дава възможност за реализацията на различни аварийни и тестови смущения, настъпващи в системата.

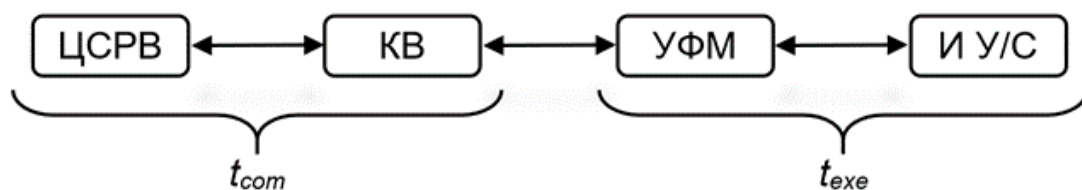


Фигура 65. Стандартна блокова схема на PHIL симулация

Посредством софтуерните решения STATUS Quasi Dynamic и STATUS Dynamic, използвани в настоящата работа за симулиране на микро мрежа, симулационното звено позволява бързо и надеждно решение използвайки опростени модели, намаляващи времето за изчисление, което от своя страна води до ускоряване на симулационния процес.

Това предимство позволява реализацията на повече тестови сценарии и по-задълбочено изследване на поведението на системата в сравнение с конвенционалните симулатори. По този начин, симулирайки различни аварийни режими, симулаторът дава възможност да се направят изследвания и получените резултати да се представят в цифров вид, след което да бъдат изпратени към усилвателя и преобразувани в аналогови величини.

За да се провери и оцени динамиката на стенда, е необходимо предварително да се определят времезакъсненията по отделните съставлящи компоненти - фиг. 68.



Фиг. 68 Видове времезакъснение по време на изследвания.

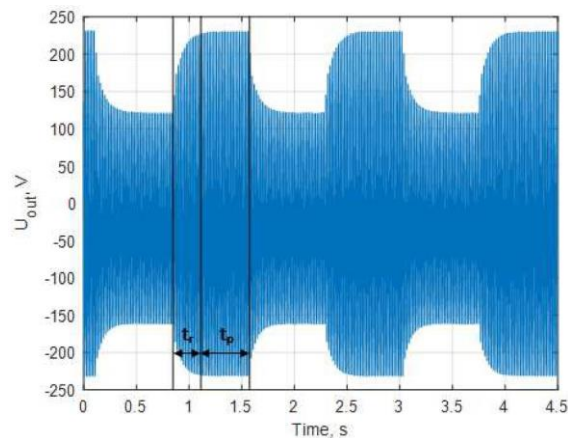
Цялостното времезакъснение на стенда за възпроизвеждането на дадена команда, е разделен главно на сумата от времето на два вътрешни процеса, а именно:

- t_{com} определя времето за комуникация между симулатора на смущения и силовия усилвател или колко бързо дадена команда за промяна на параметър се изпраща от симулатора до инвертора;
- $t_{execution}$ представлява собственото време от получаването на заявка за промяна на параметър до физически настъпилата промяна на параметъра от страна на инвертора.

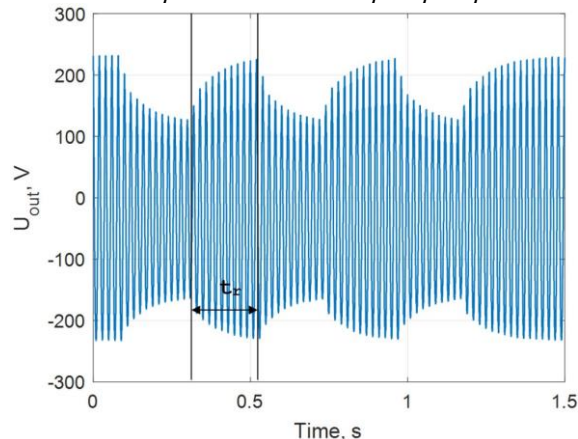
Изследвано е времето за реакция на инвертор в следната последователност: подава се заявка към инвертора, инверторът изпълнява заявката, изменя стойността на посочения изходен параметър. За тестова величина е избрано изходното напрежение U_{out} .

Изпълнени са следващите сценарии:

- Стъпково изменение на U_{out} с междинна пауза – тест #1
- Стъпково изменение на U_{out} без междинна пауза – тест #2
- Стъпково изменение на U_{out} без междинна пауза с намалена стъпка между минимална и максимална стойност – тест #3



Фиг. 69 Изходно напрежение на инвертора при изпитание #1



Фиг. 70 Изходно напрежение на инвертора при изпитание #2

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 не влияе на времето за реакция по определен повтарящ се начин. При всички разгледани случаи стойността на времето за реакция е под 0.25s.

На следващата таблица са представени резултатите от реакцията на инвертора при трите изследвани случая за време за реакция на инвертора,

	$t_{r \min} S$	$t_{r \max} S$	$t_{r \text{avr}} S$	$\sigma_{tr} S$
$U_{out} = [150 \ 230]; tp=0.5s$	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

Таблица 2. Данни от изследването на реакцията на инвертора при разгледаните сценарии.

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

За да се оцени отклонението на резултатите е изчислено стандартното отклонение σ , записано в последната колона на таблица 2 срещу всеки от случаите σ . където:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + \dots + x_n) \quad (7)$$

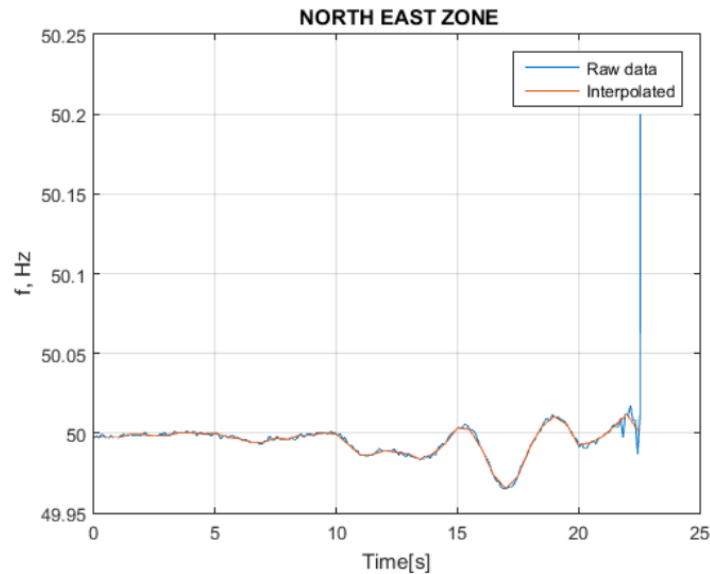
Методология за проверка на точността

За проверка на точността на стенда за провеждането на РНП симулации е използван метод за верификация, при който се сравнява запис на реално възникнал процес със същия възпроизведен в силови величини от стенда.

За постигането на тази цел са използвани записите от разпадането на обединената електроенергийна система на 4 ноември 2006 година, описан по-горе, и по-конкретно отклонението на честотата в района на Североизточна Европа.

Втората необходима стъпка в това изследване е да се приведе референтния сигнал в подходящ формат, за да може да бъде прочетен и възпроизведен от изчислителната машина.

Поради липсата на записи в цифров вид и разполагането на такива в графичен, са използвани съвременни софтуери за преобразуването на записа в цифров вид.



Фиг. 72 Обработка и сравнение на „суровите“ данни от изменението на честотата преди настъпването на аварията - 4 ноември 2006 г., Европа

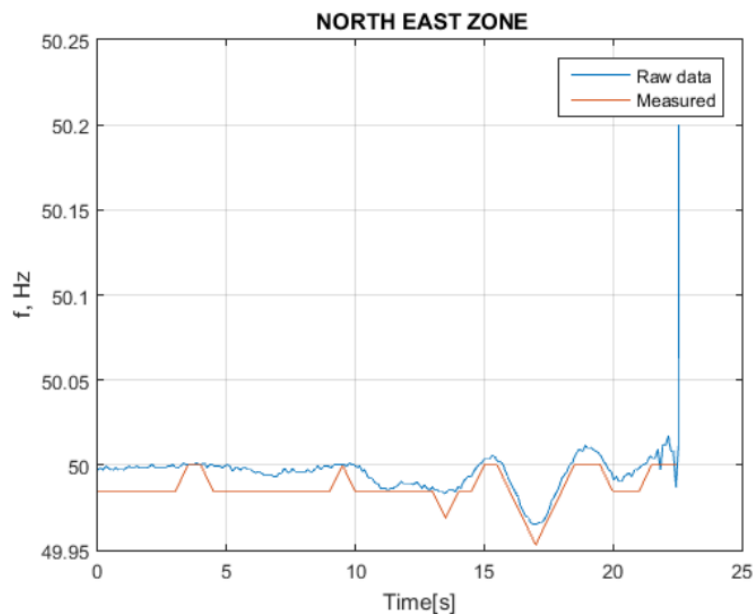
Сигналят, представен на Фиг. 72 в син цвят, представлява необработените данни на изменения на честотата, снети чрез векторизиране.

Сигналят, представен на Фиг. 72 в оранжев цвят, представлява обработените данни след прилагане на линейна интерполация.

Данните са дискретизирани с константна стъпка $t_{\text{step}} = 0.5, \text{ s}$. Както е отразено на Фиг.72, от начало на започване развитието на процеса до окончателното разкъсване на паралелната работа, линеаризираните данни припокриват основния референтен сигнал на честотата до голяма степен с пренебрежимо малки различия.

В момента на настъпване на разпадането на обединената европейска ЕЕС се наблюдава скок в честотата, което води до загуба на информация след прилагането на интерполация.

Друга важна особеност, която пряко влияе върху прецизността на тестовия стенд е ограничението на инвертора по минимална стъпка за ново задание на изменение на параметъра – честота на инвертора, Фиг. 73.



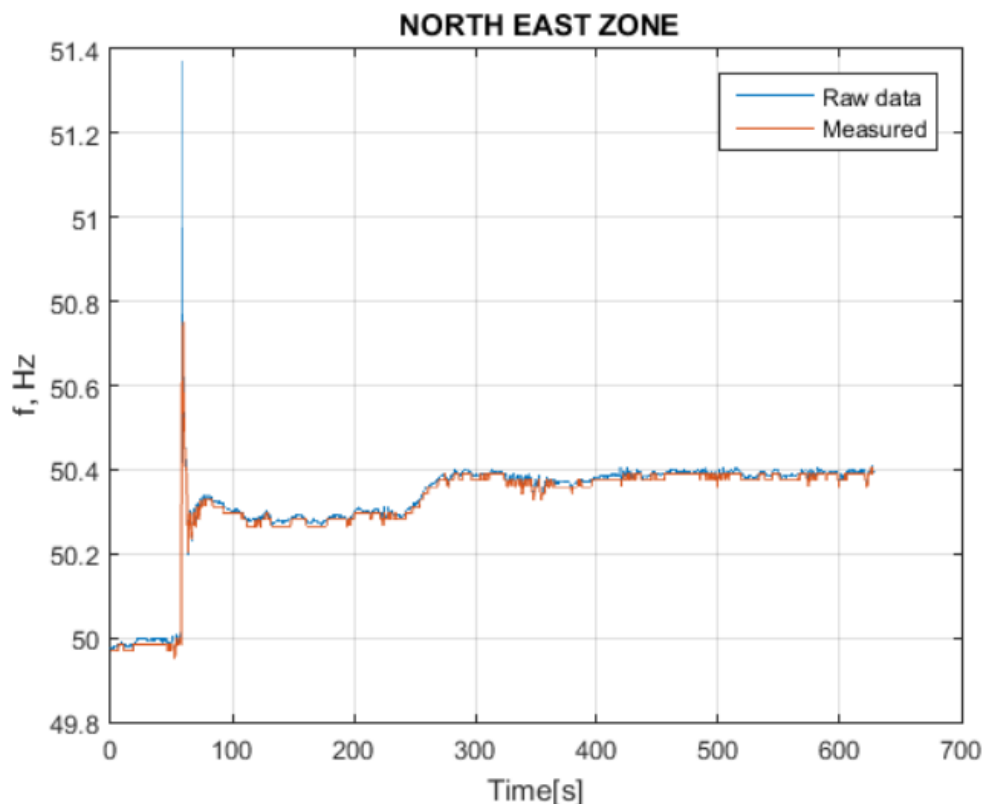
Фиг. 73 Сравнение на суровите данни и възпроизведените заявки за изменението на честотата преди настъпването на аварията - 4 ноември 2006 г., Европа

Реализираният тестови стенд представлява достъпно, ефективно и надеждно решение за изследване на процеси по метода на РНП симулациите.

Въпреки ограниченията в бързодействието на инвертора в ролята си на усилвател на мощност, физическият модел позволява изследването на редица бавни преходни процеси, възникващи в микро и нано мрежите, работещи в островен режим или в паралел с ЕЕС.

Резултатите от възпроизвеждането на реално събитие, възникнало в обединената електроенергийна система на Европа показват високо качество на възпроизводството, което дава възможност за задълбочени изследвания на стратегии за управление и минимизирането на щетите вследствие възникнали аварийни събития.

На фигура 75 са представени резултати от възпроизвеждане на изменението на честотата в североизточната част на Европа, вследствие възникването на системната авария през 2006 г. Отново налице е загубата на информация вследствие на линеаризацията, което води до по-ниска стойност на честотата в момента след разкъсването.



Фиг. 75 Обработка и сравнение на „суровите“ данни от изменението на честотата след разделянето на 3 области

Възпроизведените заявки за изменение на честотата на инвертора са представени на Фиг. 75.

Наблюдава се сравнително точно пресъздаване на действителния процес, показан в оранжев цвят, като известни отклонения от референтния сигнал (показан в синьо) се наблюдават в интервала между 50 и 100 секунди от развитието на процеса.

Причината за това отклонение също се дължи на минималната стъпка в изменението на честотата от страна на инвертора, която е по-голяма от тази на реалното събитие.

Реализираният изпитвателен стенд представлява достъпно, ефективно и надеждно решение за изследване на процеси чрез РНІЛ симулации. Въпреки ограниченията в бързодействието на инвертора в ролята си на усилвател на мощност, физическият модел позволява изследването на редица бавни преходни процеси, възникващи в микро и нано мрежите, работещи в островен режим или в паралел с електрическата мрежа.

Глава V Изпитване на разработен контролер и стратегия за управление на мощностите посредством похват със силов хардуер във веригата РНІЛ – Power Hardware in the Loop.

В настоящата глава са представени резултати от изследване на поведението на контролер за управление на мощностите в микро и нано мрежи, чрез изпитване на нов цифров контролер за управление на товарите в микро и нано мрежи, използвайки подход със силов хардуер във веригата при отворена верига.

С цел на изпитване реакцията и проверка на функционалността на микроконтролера, за водещ управляващ сигнал е използвана честотата на напрежението в

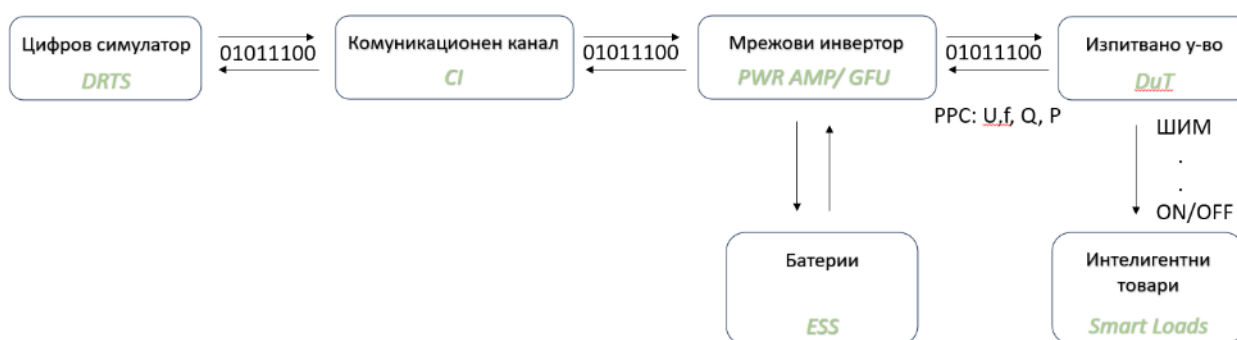
Северозападна Европа (Италия, Испания, Франция, Белгия, Португалия и др.) преди и след настъпването на аварията. Изпитването посредством метода с силов хардуер във веригата при топология с отворена верига, позволява изследването и управлението на микро мрежа, използвайки нова, софтуерно интегрирана логика за управление на микро и нано мрежи, почиваща на динамично ценообразуване на електроенергията в зависимост от състоянието на изследваната система.

Етапите на изследването са описани в настоящата глава в следната последователност:

- Описание на модела и постановката;
- Измерване и калибриране на устройството;
- Стратегия за изпитване на контролера чрез прилагане на схема за динамично ценообразуване;
- Резултати;
- Заключение

Описание на модела и тестовата постановка

Блок схема на реализираното изпитване на логиката и измерването на контролера за управление на микро и нано мрежи е представена на следващата фигура.



Фиг. 76 Блок схема на реализираното изпитване по метода контролер във веригата (CHIL)

Мрежовият симулатор е реализиран на базата на работна станция, притежаваща подходящ изчислителен ресурс за целите на изпитването.

По данни от официалния доклад на UCTE, предварително е обработен запис от аварията за западната зона (Western Zone), посредством специализирания софтуер Matlab. Целта на мрежовия симулатор е да обработи и последователно да изпълни сигнала през предварително определена времева стъпка, доближавайки се по този начин максимално близо до реалния сигнал, настъпил по времето на аварията. Посредством комуникационните канали на работната станция се осъществява връзка, за предаване на данни в реално време с хибридният двупосочен инвертор, действащ като преобразуващо сигналите звено (Studer Innotec XTM 4000-48).

Изпитваното устройство представлява новоразработен, цифров микроконтролер за управление на товари в микро и нано мрежи. Микроконтролера измерва непрекъснато изходната честота на инвертора и я използва като водещ управляващ сигнал, на базата на който е реализирана логиката за управление.

Калибриране на измерването на честота

Измерването на честотата на напрежението в точката на присъединяване и използването им като водещи управляващи сигнали за управление на мрежа, изисква надеждно и стабилно измерване и обработка на сигналите.

$$f = \frac{\text{crossings}/2}{\Delta T * T_{conv}} \quad (8)$$

Логиката за откриване на преминаването през нулата се основава на следене на нивото на дискретите във всеки един момент. Задават се граници около „нулата“, в случая около средната точка +2.5V, след което се следи за попадане на дискретната стойност на напрежението в тези дефинирани граници.

В случай на попадане на дискретната стойност на напрежението в тези граници се отчита за преминаване през нулата.

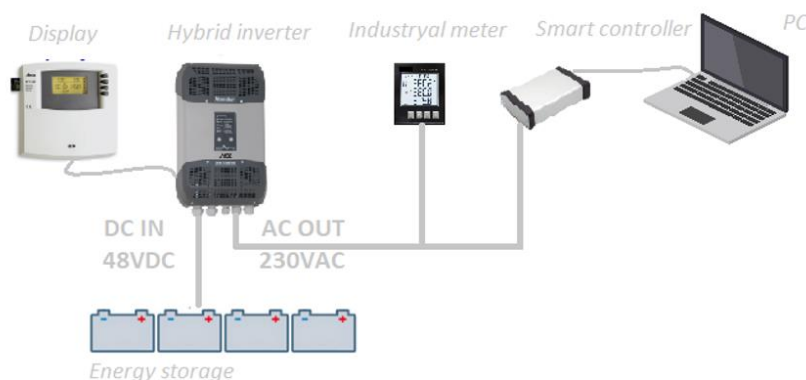
Необходимо е да се направят предварителни настройки и изследване за задаване на най-добри граници около нулата, наричан още праг на преминаване, тъй като в реалността тези граници се различават от теоретичните такива, което оказва съществено влияние върху крайния резултат.

Особености при измерването на честотата с предложеното решение и калибриране на контролера

За проверка на измервателните възможности на микроконтролерът са проведени изпитвания в лаборатория УЕЕС на Технически университет София, Фиг. 78.

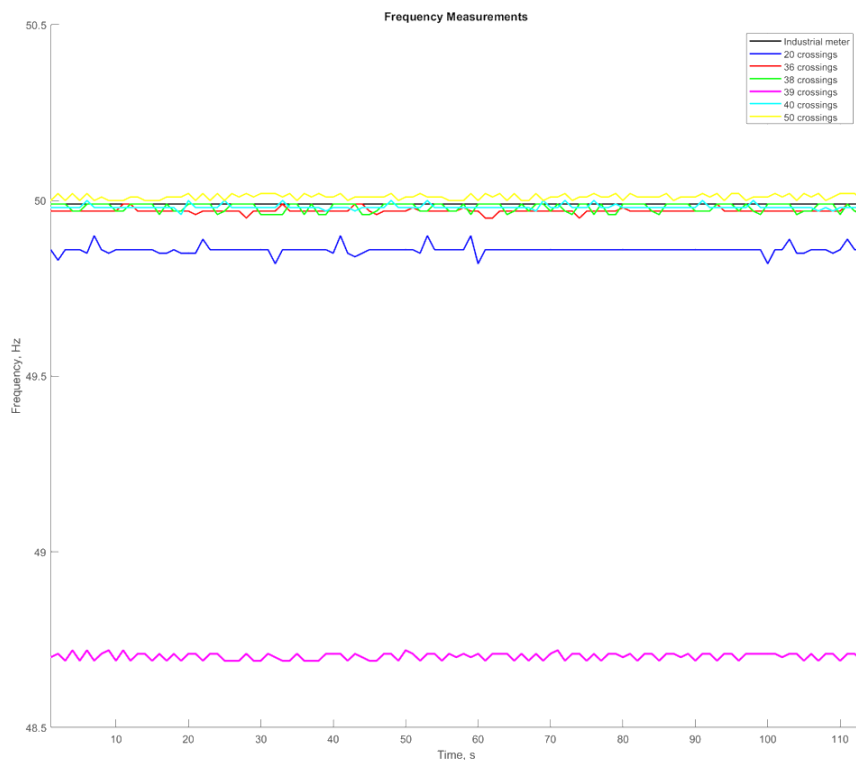
Микромрежата работи в островен режим, като мощността от батериите бива подавана към DC входа на инвертора. Посредством RCC-02 (Remote Control Centre), се конфигурира променливотоковия изход на инвертора със следните параметри: $U_{out} = 230V_{ac}$, $f = 50Hz$. Като база за сравнение на измервателните данни от микроконтролера, е използван висок клас измервател за индустриално приложение с клас на точност при измерване на честота 0,05%.

На Фиг. 79 са представени измервания направени при различен брой преминавания през нулата. Важно е да се отбележи, че зависимостта между устойчивостта на измерванията и броя преминавания през нулата не е линейна.



Фиг. 78 Измерване на честота

С други думи, изборът на 100 броя на преминаване през нулата не води до подобряване точността или устойчивостта спрямо резултата, получен при 20 броя преминаване през нулата. При същата конфигурация, само чрез промяна на някоя от функциите в кода, добавяне на принтиране на резултати или пък извеждане на подобни функции, води до необходимостта от намиране на нова балансна точка, между двата параметъра.



Фиг. 79 Измерване на честота при различен брой преминаване през нулата.

Избор на 20 броя на преминаване през нулата показва добра точност, но все още не толкова устойчиви резултати – таблица 5.

Приложение на нов метод за управление, базиран на динамично ценообразуване на електроенергията.

Брой на преминаванията през нулата Number of threshold crossings	Максимална грешка % Max error %
20	0,34
36	0,08
38	0,06
39	2,6
40	0,02
50	0,06

Таблица 5. Максимална грешка при измерване на честотата, за различни брой преминаване през „нулата“.

В настоящата точка е разгледана методология за управление на микро и нано мрежи, чрез използване на нов метод за динамично ценообразуване на електроенергията.

Като водещ управляващ сигнал за контролера, се използва честотата в точката на присъединяване между консуматори на електрическа енергия и източници на мощност.

Методологията се основава на изследване на връзката между моментното състояние на мрежата и динамичното ценообразуване. Въведената зависимост е представена на Фиг. 82 и уравнение 9, като стойностите на величините са представени в относителни единици. Цена от 1 о.е отговаря на честота 50Hz (1 о.е).

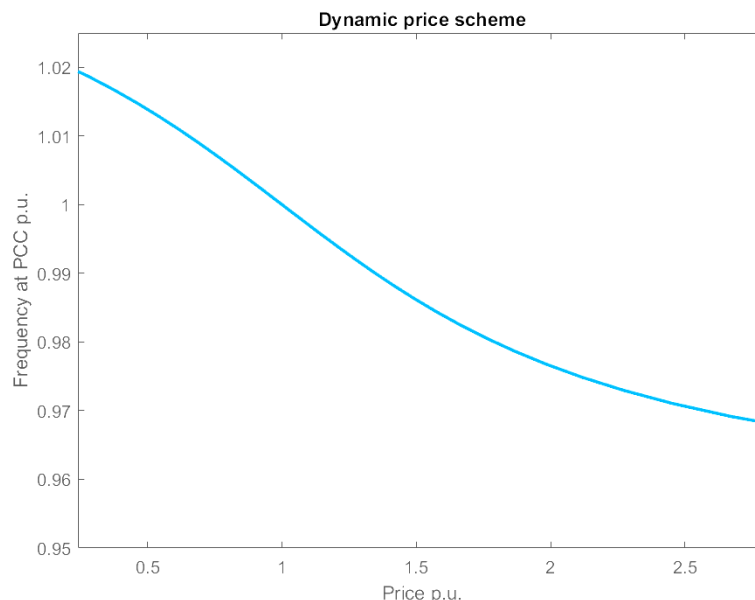
Методологията се основава на изследване на връзката между моментното състояние на мрежата и динамичното ценообразуване. Въведената зависимост е представена на Фиг. 82 и у-е 9, като стойностите на величините са представени в относителни единици.

$$C_{gl}(t) = 1 + \tan\left(\frac{(1-f(t))\left(\frac{\pi}{2}-k_1\right)}{k_2}\right), \quad (9)$$

където:

- C_{gl} - представлява моментната цена на ел. енергия;
- $(\pi/2-k_1)$ - определя стръмността на функцията;
- k_2 - определя чувствителността на системата при малки отклонения на честотата.

Посредством мулти агентно управление, всеки агент (контролер или друго интелигентно устройство) непрекъснато следи режимния параметър честота на напрежението, характеризиращ състоянието на системата в реално време и въз основа на това взема решение за включване или изключване на товар, в зависимост от неговия приоритет.



Фиг. 82 Връзка между честота и цена

Ефектът от приложения метод е постигане на баланс между консумация и производство, при справедлива цена за всяка от страните. Ниската честота в системата е признак за недостиг на мощност.

Увеличаването на цената в този случай, стимулира потребителите да изключат консуматорите си с по-нисък приоритет, а тяхното включване обратно, би станало при по-благоприятни условия на цената на електроенергията.

За реализирането на стратегията на управление се ползват товари, които според заложените приоритет, работят при различни нива на цената на електрическата енергия.

Таблица 6. Приоритет на управляемите товари

Приоритет	Тип консуматор	Прагова цена на вкл. (о.е.)	Прагова цена на изкл. (о.е.)
1	Отоплителна печка (0,4 Kw)	1,7	1,7
2	Нагревател (0,4 Kw)	1,4	1,4
3	Отоп. уред (0,7 Kw)	1,3	1,3
4	Вентилатор (0,05Kw)	1	1

Таблица 6. Товари за управление и заложен ценови праг спрямо приоритета в о.е.

Резултати

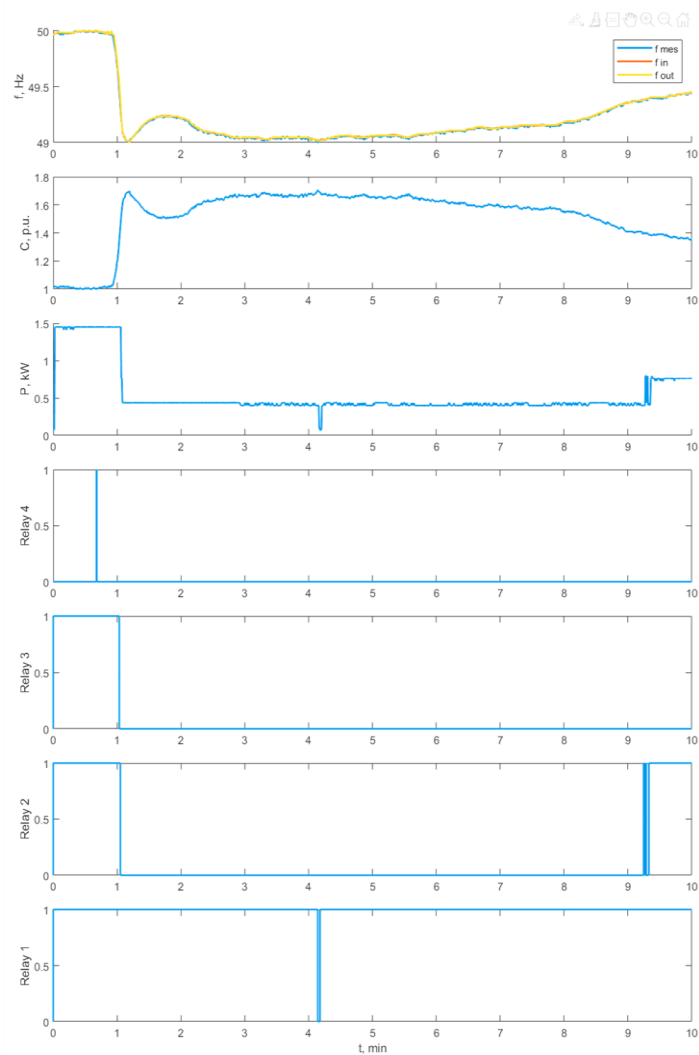
За изпитване на приложената логика за управление, и оценка функционалността на контролера е използван и възпроизведен, запис от реално събитие – системната авария от 04.11.2006г. в Европа в една от зоните с най- големи щети– Western Zone. Резултатите са представени на фиг. 83.

На първата част от графиката са наложени резултати от измерването на изходната честота на инвертора, заданието за промяна на честотата и измерването на микроконтролера.

След приложените средства за подобряване точността и устойчивостта в измерването на микроконтролера е постигната добра точност на резултатите, позволяваща въвеждането на стратегията за управление.

В началото на симулацията честотата на системата е 49,99 Hz, респективно цената е 1,01 о.е. В този случай, в приложената логика, цената е заложена да бъде 1 о.е., която благоприятства включването на товарите с приоритет от 1-3, но не и за най-нископриоритетния товар, тъй като моментната цена надхвърля 1.0 о.е. За включването на товара с приоритет 4 е необходимо цената да бъде по-ниска от 1 о.е., тоест, честота на системата да бъде над 50.00 Hz.

Резултатите показват висока ефективност на приложената логика за управление, както и ефективността на разработения микроконтролер за управление на микро и нано мрежи. По този начин, функционалният стенд за провеждане на тестове, както и микроконтролера предвид неговата гъвкавост позволяват изпитването на различни устройства при реализирането на широк набор от преходни процеси, възникващи в ЕЕС. Освен това, с цел изпитване и оценка на влиянието върху ЕЕС, вследствие на разработената методика за управление на микромрежи, стендът позволява провеждането на изпитвания по метода със силов хардуер във веригата вкл. и при топологии със затворена верига.



Фиг. 82 Резултат от изпитването на контролера и приложение на стратегия за управление чрез динамично ценообразуване

Технически средства за интелигентно управление на микро и нано мрежи

Малките хидравлични генератори (мини и микроец), са често предпочитани системи за осигуряване на електроенергия за собствени нужди, в областта на микро и наномрежи, изградени в места отдалечени от съществуващата ЕЕС, предвид сравнително лесното им изграждане и поддръжка и управление.

Въпреки че МВЕЦ са добре познати и многократно изследвани съоръжения, налице е необходимостта от намиране на надеждно и адекватно решение за автоматично първично регулиране на изходната им мощност.

В [27] е направена оценка на съществуващо решение за управление на мощността на МВЕЦ, на база на които резултати е предложена нова концепция за управление, базирана на аналогов контролер, управляващ мощността на "гъвкави" товари, с по-нисък приоритет за системата. Резултатите от изследването показват значително подобрене на ефективността на новия метод за управление на МВЕЦ (3 KW), както и значителното подобрене на хармоничния състав в изходното напрежение на генератора.

Концепция и реализация на цифров контролер за управление на микро и нано мрежи

Първичното регулиране при малки ВЕЦ има за цел да реагира мигновено на настъпилите внезапни изменения в натоварването на генератора, поддържайки изходното напрежение и честота в допустими граници [27-36].

Поради сложността в управлението на системата на направляващия апарат, голяма част от съвременните МВЕЦ, работят с постоянна мощност, а балансът на мощностите се осигурява от силовата електроника, управляваща баластен товар присъединен към шините на генератора.

В този случай, уравнението на баланса на активни мощности има следния вид:

$$P_g = P_L + P_{dL} \quad (10)$$

Концепцията за управление на мощността на микро ВЕЦ, заложена в новия цифров контролер, е базирана на приложената логика в аналоговия контролер използван в [27]. В рамките на тази концепция, управлението на мощността се разглежда за много възлова система, с разпределени товари. За всеки от възлите е предвидено звено или агент, управляващ мощността на гъвките товари в системата, с цел поддържането баланса на мощността в системата и нивата на режимните параметри в допустимите стойности.

За всеки от възлите е предвидено звено (agent), управляващ мощността на гъвките товари в системата, с цел поддържането баланса на мощността в системата и нивата на режимните параметри в допустимите стойности.

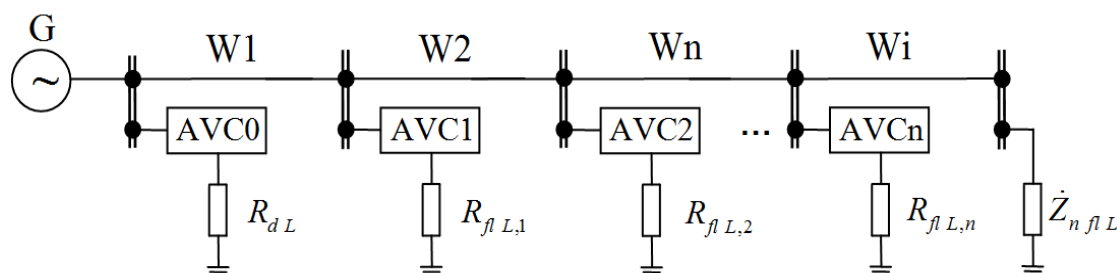
$$\sum_{i=1}^n P_{G,i} = \sum_{i=1}^f P_{fl L,i} + \sum_{i=1}^h P_{n fl L,i} + \sum_{i=1}^k P_{d L,i} + \Sigma \Delta P_{loss} \quad (11)$$

Уравнение 5 дава представлява баланса на мощностите за конкретната концепция, в която:

- $P_{G,i}$ представлява генерираната мощност от генератор i , $i = 1, \dots, n$;
- $P_{fl L,i}$ е активната мощност, консумирана от гъвките товари,
- $P_{n fl L,i}$ е активната мощност, консумирана от “твърдите“ негъвки товари;
- $P_{dump L,i}$ представлява мощността на баластните, гасителни товари;
- ΔP_{loss} представлява общите загуби на мощност в елементите на системата;

При така разгледания микс от товари, участващи в уравнението на баланса на мощности се обособяват две групи от товари- гъвки и негъвки. Гъвките товари са най-често резистивни товари, с нисък приоритет за системата, чиято консумирана мощност се използва за управление, с цел запазването на баланса на мощност.

На фигура 84 е представена еднолинейната схема на конфигурацията и концепцията за използването на мощността на гъвкавите товари в управлението. Към всеки възел от системата, е интегриран микроконтролер, управляващ мощността на всеки един от гъвкавите товари.



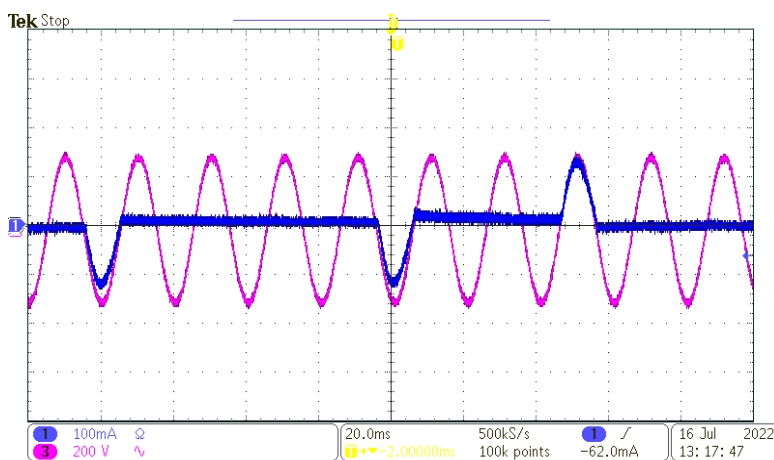
Фиг. 84 Концепция за управление на мощност в микромрежи

Изпитване функционалността на контролера и резултати

След като е проектиран и поръчан, новият цифров контролер за управление на мощности в микро и нано мрежи е тестван в лаборатория по УЕЕС и ППЕЕС на Технически Университет София.

Сценарият на проведените тестове е следния: първоначално, генераторът работи в установен режим и генерираната изходна мощност е равна на консумираната.

Започва се плавно увеличаване на възбуждането на генератора до достигане на статорно напрежение, равно на долната граница на регулирането заложена в програмния код. След което контролера реагира почти мигновено, задавайки коефициент на запълване на първия симисторен ключ, Фиг. 94.



Фиг. 94 Изходно напрежение и ток на товара

Излишната мощност от генератора бива разсейвана в гъвкавия товар с нисък приоритет.

На Фиг. 95, с розов цвят е представено напрежението на клемите на гъвкавия товар, а със син цвят е измерен тока през гъвкавия товар.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа са изследвани съвременните подходи и методи за управление на режимите в електрическите микро и нано мрежи.

Въз основа на направения литературен обзор по темата са открити актуални проблеми за решаване и са поставени за изпълнение набор задачи за анализ на микромрежи, посредством математическо моделиране, изследване на параметрите на

микро и наномрежи, посредством физическо моделиране, анализ на стратегии за управление на микро и наномрежи, чрез използване на изследвания със силов хардуер и контролер във веригата, както и разработване и реализация на технически средства за интелигентно управление на режимните параметри в микро и нано мрежи.

С изпълнение на посочените задачи, с оглед на получените резултати и направените анализи, може да се заключи, че целта на дисертационният труд е постигната.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Научно-приложни приноси

- Предложено е моделно изследване на методите и средствата за регулиране на напрежението и управление на режимните параметри в електрически микро и нано мрежи с възобновяеми ДЕИ.
- Предложен е подход и набор от реализации за изследване на методите за управление на режимните параметри в електрически микро и нано мрежи посредством техники със силов хардуер във веригата.
- Разработени и доразвити са подходи и са предложени набор от технически средства за интелигентно управление на режимите в микро и нано мрежи.

2. Инженерно - приложни

- Разработен е нов цифров контролер за интелигентно управление на режим-ните параметри посредством изменение на товара.
- Реализирана е опитна постановка за изследване на устойчивостта на система със силов хардуер във веригата в реално време. Системата е внедрена в лаб. УЕЕС и е изпитана чрез анализ, репродуциращ разпадането на европейската ЕЕС от 4.11.2006г.

3. Методологични и учебни приноси

- В рамките на работата е разработен физически модел за изследване и из-питвания на микро, мини и наномрежи.
- Разработена е лабораторна установка за изследвания на устойчивостта на ЕЕС посредством техники със силов хардуер във веригата.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- Rad Hristov Stanev, Lili Vasileva Dimova, Tsvetomir Sashkov Asenov, Gergana Ilieva Vacheva, Hristiyan Chavdarov Kanchev and Nikolay Lyuboslavov Hinov, A Physical Model for Micro-, Mini- and Nanogrid Research and Testing IX National conference with international participation ELECTRONICA 201818 – 19 May 2018, Sofia, Bulgaria;
- T. Asenov, "Improvement of a laboratory micro/nanogrid SCADA system," 2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2020;
- Stanev R., T. Simeonov, T. Asenov, Mathematical modelling of micro and nanogrids with distributed generation, Lighting 2017, 19 – 21 October, Varna, Bulgaria, National Lighting Conference for Young Scientists1.
- 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
- 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

Tsvetomir Sashkov Asenov, M.Sc

CONTROL OF MICRO AND NANO GRIDS STATES

ABSTRACT

Nowadays, the development of the Electric Power System (EES) can be considered as a continuous process, directly related to the complex nature of change in consumption and the connection of more and more renewable energy sources in the distribution network. More than ever, the EEC is faced with the enormous challenge of meeting the requirements of timely and adequate response to the new distribution network development model. The growing consumption of electricity, as well as the integration of distributed sources of renewable energy, confront the global electric energy system with the need to develop new strategies and scenarios for improving the flexibility and sustainability of the EES, as well as with the need to preserve the quality of the supplied electricity.

The variable nature of production from renewable energy sources further increases the potential for the aforementioned adverse impacts. The significant integration of renewable energy sources into the energy sector over the past decade, as well as the growing advancements in the fields of electronics and microcontrollers, has led to the development and implementation of a new type of networks—intelligent microgrids and nanogrids. These networks enable operation both in island mode and in parallel with the main system.

Thus, the newly established structure of the power system necessitates the research and integration of new strategies and devices for the management of microgrids and nanogrids across virtually all operational modes.

Within the scope of this dissertation, research has been conducted to identify suitable management approaches for the operational modes of autonomous and grid-connected microgrids and nanogrids, utilizing various methods and techniques.

The second chapter discusses the development of a mathematical model of a microgrid, consisting of a hydrogenerator coupled with an electric machine operating in synchronous generator mode, connected in parallel with a three-phase system via transmission lines. The model provides the ability for testing new approaches for controlling micro grid under different test scenarios. The biggest advantage of the digital simulations is that they can be used for initial verification for proofing the concept on a PC. Thus it can save time, minimize the risk for burning technical apparatuses and easily changing of the system topology. The reach component library gives the opportunity for wide smart grid configuration.

The third chapter of this work discusses micro and nanogrid research based on a physical model of a smart grid. In order to study more complex microgrids, as well as their interaction with other systems, obtain results that are as close as possible to real ones, and avoid the need to describe complex mathematical models, there is a need to compile a physical model of a microgrid, allowing the implementation of different system topologies, the possibility of operating in different operating modes, as well as the implementation of multiple test scenarios. Several typical scenarios occurring in real microgrids have been implemented, and the results have been recorded and analyzed. The test results demonstrate sufficient accuracy, validating the functionality and effectiveness of the proposed solution for a laboratory physical model of a microgrid. The laboratory physical model of the microgrid allows for future development by integrating new control devices, additional systems, and communication between them. This

enables testing of new methods for microgrid control and management, as well as exploring their potential for further development.

In the fourth chapter is described a a test bench has been developed and tested for conducting research with power hardware-in-the-loop (PHIL), enabling the evaluation of the behavior of the device under test (DuT). This setup allows the investigation of system stability when simulating past fault conditions and emergency modes in the power system.

The fifth chapter presents the results of a study on the behavior of a power management controller for microgrids and nanogrids. The study involves testing a new digital load management controller for microgrids and nanogrids, using a power hardware-in-the-loop (PHIL) approach in an open-loop topology.

Testing through the PHIL method in an open-loop configuration enables the investigation and control of a microgrid using a newly developed software-integrated logic for microgrid and nanogrid management. This logic is based on dynamic electricity pricing, depending on the state of the system under investigation.

The sixth chapter examines some of the technical tools that have been developed and tested to achieve the objectives of the dissertation.