



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ ВАРНА
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА“

НИКОЛАЙ ДЕЯНОВ НИКОЛАЕВ

**МОДЕЛИРАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ГЕНЕРАТОРИ
ИЗПОЛЗВАЩИ ВЪЗОБНОВЯЕМИ ЕНЕРГИЙНИ
ИЗТОЧНИЦИ ВЪРХУ РЕЖИМИТЕ НА
ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНАТА СИСТЕМА**

АВТОРЕФЕРАТ

**НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА
СТЕПЕН „ДОКТОР“**

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ:

ПРОФ. Д.Т.Н. ИНЖ. МАТ. КРУМ КОСТОВ ГЕРАСИМОВ, ТУ-ВАРНА

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1.
2.

ВАРНА, 2014 Г.

Дисертационния труд е обсъден на 09.04.2014 г. в катедра „Електроенергетика“ и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Електроенергетика“ от 10.2013 г.

Автор: Николай Деянов Николаев, n.nikolaev@tu-varna.bg

Заглавие: Моделиране на влиянието на генератори, използващи възобновяеми енергийни източници, върху режимите на електроенергийната система



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ ВАРНА
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА“

НИКОЛАЙ ДЕЯНОВ НИКОЛАЕВ

МОДЕЛИРАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ГЕНЕРАТОРИ
ИЗПОЛЗВАЩИ ВЪЗОБНОВЯЕМИ ЕНЕРГИЙНИ
ИЗТОЧНИЦИ ВЪРХУ РЕЖИМИТЕ НА
ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНАТА СИСТЕМА

АВТОРЕФЕРАТ

НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА
СТЕПЕН „ДОКТОР“

ВАРНА, 2014 Г.

Дисертационният труд съдържа 145 страници, включително 224 фигури, 23 таблици, и 4 приложения (58 страници), и е оформен в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 202 заглавия, от които 37 на кирилица и 165 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от часа в на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №...../..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересующите се във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

Характеристика на дисертационния труд

Актуалност на проблема

Актуалността на решаваните задачи в дисертацията се обосновава със съвременните тенденции на развитието на електроенергийната система (ЕЕС). ЕЕС на България от 2004 г. работи в синхрон с обединената ЕЕС на Европа. Енергийната стратегия „Energy 2020“ на Европейския съюз предвижда участие на възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) в енергийния микс да достигне 20 %. Прогресивното нарастване на дела на електропроизводството от ВЕИ влияе върху сигурната работа на ЕЕС, във връзка с непредвидимия и случаен характер на енергията от вятър и слънце. Генераторите, използващи ВЕИ, непрекъснато изменят своята мощност и пораждаят смущаващи въздействия върху работата на цялата обединена система на Европа. Познаването на поведението и управлението на ЕЕС при тези условия е актуален проблем, който изисква специализирано моделиране и изследване на установените и преходните режими на ЕЕС.

Проблем

Липсват адекватни модели на ЕЕС, подходящи за анализ на влиянието на генераторите използващи ВЕИ върху несиметричните установени и преходни режими, породени от еднократни и сложни повреди. Наличните компютърни програми имат съществени недостатъци поради това, че използват модели само на правата последователност и позволяват да се симулират единствено симетрични режими на ЕЕС. Известните от специализираната литературата алгоритми за оценка на влиянието на неопределеностите върху симетричните установени режими обикновено изискват вероятностни характеристики, които не са налични в информационната база за ЕЕС на България.

Цел и задачи на изследването

Целта на дисертационния труд е да се разработят адекватни математични описания на процесите в ЕЕС, включваща и генератори използващи ВЕИ, и на тази основа да се създадат ефективни алгоритми за изчисляване на установени и преходни режими при различни аварийни ситуации. Чрез тях да се анализира влиянието на централите използващи ВЕИ върху режимите на съвременните ЕЕС.

За постигането на тази цел се поставят за решаване следните задачи:

1. Да се формират математични описания на ЕЕС, съдържаща и генератори използващи ВЕИ. Математичните описания на ЕЕС да отговарят на изисквания, които осигуряват пълното на анализите.
2. Да се разработят компютърни модели за изследване на преходни и установени режими на ЕЕС. Компютърните модели да се базират на разработените математични описания на ЕЕС.
3. Да се валидират разработените компютърни модели, чрез сравнение с други програмни продукти, за примерна схема на ЕЕС.
4. Да се изследва въздействието на генератори използващи ВЕИ върху режимите на ЕЕС, включващо:
 - влияние на случайното изменение на мощността на генераторите използващи ВЕИ върху установените режими на ЕЕС;
 - влияние върху преходни процеси в ЕЕС с локално проявление;
 - влияние върху преходни процеси в ЕЕС с глобално проявление.

Обект и предмет на изследването

Обект на изследване са съвременните ЕЕС с нарастващ дял на електропроизводство от ВЕИ. Предмет на изследването е влиянието на генераторите използващи ВЕИ върху: установените режими; токовете на къси и земни съединения; конвенционалните релейни защиты; устойчивостта на ЕЕС при малки смущения; регулирането на честотата на ЕЕС.

Методи, използвани при изследването

- метод на моделиране на елементите на мрежата с трифазни координати;
- метод на възловите напрежения за записване на баланса на мощностите и баланса на токовете за изчисляване на установените и преходните режими;
- метод на Нютон за решаване на нелинейните системи уравнения;
- метод на трапеца за числово интегриране на системата диференциални и алгебрични уравнения;
- метод на матричната експонента за решаване на хомогенната система диференциални уравнения в програмата за изчисляване на къси и земни съединения;
- логика базирана на размитите множества за изчисляване на вероятностно потокоразпределение;
- метод на Монте Карло за изчисляване на вероятностно потокоразпределение;
- метод за изчисляване на чувствителността на собствените стойности на матрицата на състоянието на математичното описание на ЕЕС;
- структурен подход при формиране на общото математично описание на ЕЕС;
- подход с обектно-ориентирано програмиране за създаване на компютърните програми.

Място на изследване

Изследванията са провеждани чрез компютърни симулации в Технически университет – Варна.

Научна новост на изследването

Научната новост се състои в създаването на нови алгоритми и подходи за анализиране на влиянието на генераторите използващи ВЕИ върху режимите на ЕЕС.

Практическа ценност на изследването

Практическата ценност на изследването се състои в прилагането на създадените алгоритми и подходи в компютърни програми, с които могат да се решават проблеми, свързани с присъединяването на генераторите използващи ВЕИ към ЕЕС. Разработените алгоритми и програми са директно приложими в практиката.

Апробация на изследването

Разработените математични модели на ЕЕС с участието на генератори използващи ВЕИ са използвани при:

- Създаването на агрегиран модел на фотоволтаична електрическа централа (ФВЕЦ) „Казанлък – Ясеново, Голямо Дряново“ за целите на изчисляване на режимите на късо съединение;
- Решаване на проблемите на вятърна електрическа централа (ВяЕЦ) „Каварна 1“, свързани с настройките на релейните защиты.

Създадените алгоритми за вероятностно потокоразпределение са използвани за оценка на влиянието на генераторите използващи ВЕИ върху нивата на напреженията и натоварването на мрежата за високо напрежение на североизточна България.

Части от дисертацията са докладвани на следните форуми:

- Годишник на ТУ–Варна, 2011 г.;
- Трети международен научен конгрес, 50 години ТУ-Варна, 04-06 окт. 2012, Варна, България;

- 12th International conference on Environment and Electrical Engineering, Wroclaw, Poland, 5-8 May 2013; конференция реферирана в SCOPUS и IEEE Xplore
- Списание Енергетика, НЕК ЕАД, 2013;
- International Conference ICEST 2013, Ochrid, Macedonia, 26-29 June 2013;
- Три научни семинара на ЕФ, ТУ-Варна. 2012, 2013 и 2014 година.

Публикации по дисертационния труд

Публикациите, свързани с дисертационния труд са 9 броя, 2 от които самостоятелни.

Съдържание на дисертационния труд

ГЛАВА 1. Режими на работа на съвременните електроенергийни системи. Проблеми при изследването им

1.1. Литературен обзор

1.1.1. Структура на съвременните електроенергийни системи

1.1.1.1. Вятърна енергетика

1.1.1.2. Слънчева енергетика

1.1.1.3. Енергия от биомаса

1.1.1.4. Ядрена енергетика

1.1.1.5. Улавяне и складиране на въглеродни емисии

1.1.1.6. Електроенергийна мрежа

1.1.2. Математични описания на съставните елементи на ЕЕС и алгоритми за анализ на нейните режими

1.1.2.1. Математични описания на съставните елементи на ЕЕС

1.1.2.2. Изчисляване на установени режими на ЕЕС

1.1.2.3. Изчисляване на преходни процеси на ЕЕС

1.1.2.4. Анализ на устойчивостта на ЕЕС при малки смущения

1.1.2.5. Модели за изследване на регулирането на честотата на ЕЕС

1.1.3. Компютърни програми за изчисляване на режимите на ЕЕС

1.2. Изводи

На базата на литературния обзор са направени 16 извода.

1.3. Цел и задачи на дисертацията

На основата на направените изводи и цитираната литература са конкретизирани целта и задачите на дисертацията.

ГЛАВА 2. Формиране на математично описание на ЕЕС съдържаща и генератори използващи ВЕИ

2.1. Математично описание на елементите на електрическата мрежа

2.1.1. Електропроводи

Най-често при анализите на ЕЕС се използват П-образните заместващи схеми на електропроводи. Тъй като за целите на дисертацията елементите на мрежата се приемат да бъдат със схемна симетрия се

съставят три заместващи схеми, по една за всяка от симетричните съставящи – права, обратна и нулева последователности. Полученото описание се преобразува от симетрични във фазни координати и се привежда в относителни единици, при общи за мрежата базисни условия.

2.1.2. Трансформатори

За съставянето на математичното описание на силовите трансформатори аналогично се изхожда от Т-образните заместващи схеми на права, обратна и нулева последователност, които впоследствие се преобразуват във фазни координати. Отчетено е фазовото завъртане от групата на свързване на намотките, както и възможните режими на звездните центрове.

2.1.3. Товари

Приема се използването на математично описание на комплексен товар, представен чрез постоянни проводимости, с което се избягват проблеми при изчисляване на електромеханични преходни процеси.

Освен описание на симетричен възлов товар е използван и такъв, свързан по схема „триъгълник“, позволяващ задаването на несиметрични стойности за импедансите.

2.1.4. Токоограничаващи реактори

2.1.5. Шунтови проводимости

2.2. Математично описание на синхронните агрегати в конвенционални електрически централи

2.2.1. Синхронни генератори

Използваният при изследванията модел съответства на синхронна машина, с възбудителна намотка по ос d и с по един еквивалентен успокоителен контур по осите d и q . С диференциални уравнения се описват механичното движение на ротора на агрегата и електромагнитните преходни процеси в роторните контури. Статорните контури се описват с уравненията на установения режим. Връзката между токовете и напреженията на изводите на генератора се дава с уравнения записани в трифазни координати.

2.2.2. Турбина и турбинно регулиране

2.2.2.1. Водни турбини

При изследванията в дисертацията е използван стандартен линеаризиран модел на водна турбина със статизъм, имащ постоянна и динамична компонента.

2.2.2.2. Парни турбини

За математичен модел на парна турбина и регулатор също е използван стандартен модел от литературата.

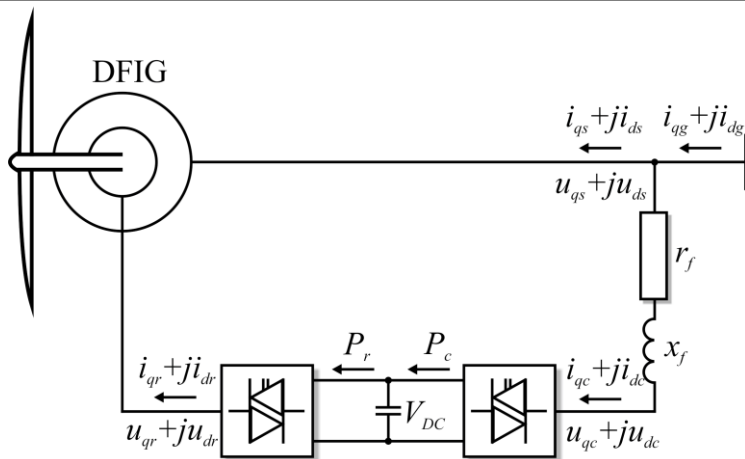
2.2.3. Система за автоматично регулиране на възбуждането

2.3. Математично описание на генератори в централи използващи ВЕИ

2.3.1. Ветрогенератори

2.3.1.1. Двойносвързани ветрогенератори

Една от най-масовите концепции за изграждане на ветрогенератор (ВГ) използва вятърна турбина с променлив ъгъл на атака на лопатките и двойно-свързан асинхронен генератор (ДСАГ). Структурната схема на модела е показана на Фигура 2.20.



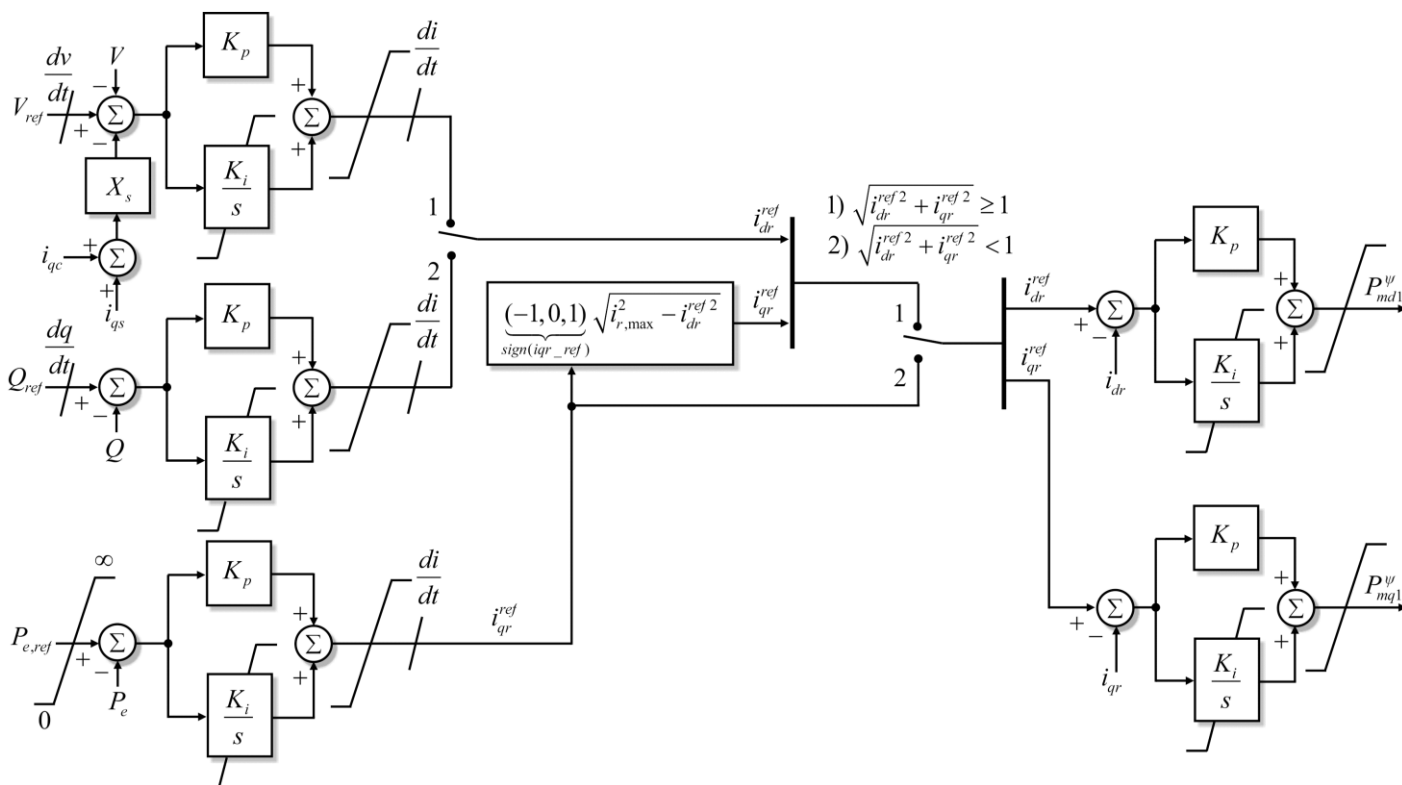
Фигура 2.20. Структурна схема на ДСАГ

a) Модел на асинхронен генератор с двойно свързване

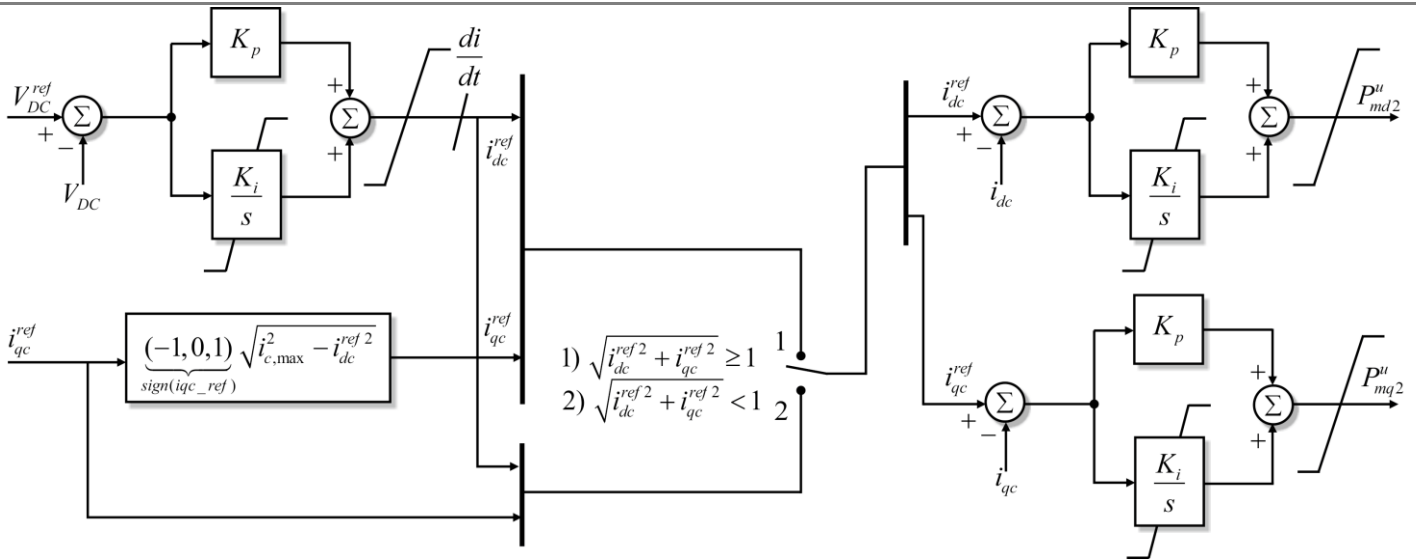
Моделът на асинхронен генератор най-често се описва с комплексните стойности на токовете и напреженията, в относителни единици. Описанието е представено в dq координатна система, ориентирана спрямо реалната (ос q) и имагинерна (ос d) оси на мрежата. Поради това, че реализирания модел е за компютърна програма, в която не се отчитат електромагнитните преходни процеси в мрежата, статорните уравнения на генератора са опростени и записани в алгебричен вид. В роторните контури електромагнитните преходни процеси се описват с диференциални уравнения.

b) Конвертори и тяхното управление

Управлението на конверторите е векторно и се осъществява в две различни координатни системи. Едната координатна система dq^r е ориентирана спрямо взаимното потокосцепване и с нея работи роторния конвертор. Мрежовия конвертор работи в другата координатна система dq^u , ориентирана по статорното напрежение.



Фигура 2.24. Структурна схема на управлението на роторния конвертор



Фигура 2.26. Структурна схема на управлението на мрежовия конвертор

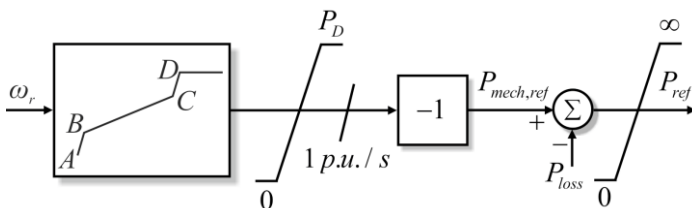
На Фигура 2.24 е представена блок-схемата на регулатора на роторния конвертор. Тъй като координатната система на регулатора е ориентирана спрямо взаимното потокосцепване (перпендикулярно на е.д.н.), каналът за управление на активната мощност управлява реактивната компонента на тока, а каналът по активна мощност съответно активния ток.

На Фигура 2.26 е показана структурата на управление на мрежовия конвертор. Тя е аналогична на регулатора на роторния конвертор, но работи с величини в координатната система, фиксирана към статорното напрежение. Каналът на активния ток управлява напрежението на постояннотоковата част, като се стреми да поддържа предварително зададената му големина V_{DC}^{ref} . Другият канал на регулатора управлява реактивния ток на мрежовия контролер, т.е. определя каква реактивна мощност ще се обменя през роторния контур.

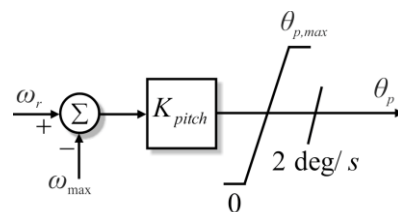
с) Уравнение на механичното движение, аеродинамичен модел и управление на турбината

Електромеханичните преходни процеси на ВГ най-често се описват с едномасов модел на ротора.

За осигуряване на оптимална работа на генератора той трябва да работи следвайки оптимална зависимост между механичната мощност и скоростта на ротора. За простота, често тази крива е апроксимирана чрез серия от линеаризирани участъци. Структурната схема за управление на активната мощност е показана на Фигура 2.28. Изходът от този регулатор формира заданието по активна мощност на контролера от Фигура 2.24.



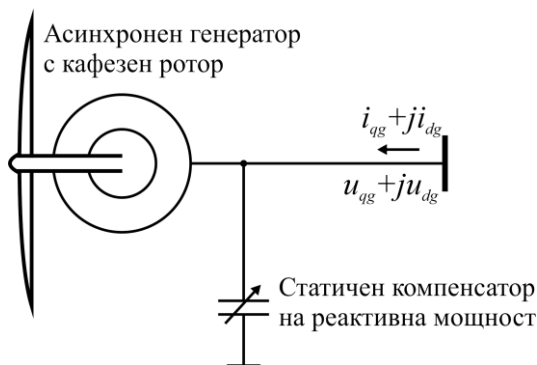
Фигура 2.28. Управление на активната мощност



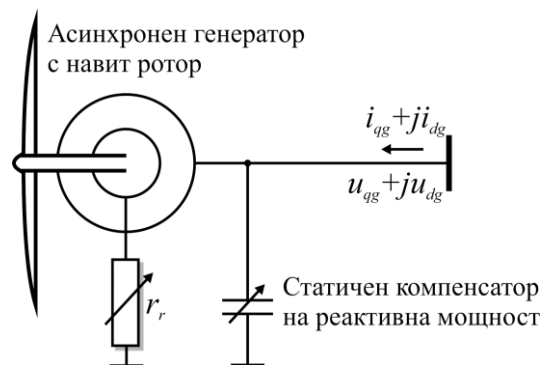
Фигура 2.29. Регулатор на ъгъла на лопатките на турбината

При скорост на ротора по-голяма от максималната заработва управлението на лопатките на турбината и ъгъла на атака се увеличава. С това се постига ограничаване на механичната мощност, съответно и на скоростта на ротора, чрез понижаване на коефициента на ефективност на турбината. В конкретния случай закона на регулиране е пропорционален, а блоковата схема на регулатора е показана на Фигура 2.29.

2.3.1.2. Директно свързани ветрогенератори с асинхронни машини



Фигура 2.30. Структурна схема на директно свързан ветрогенератор с кафезен ротор

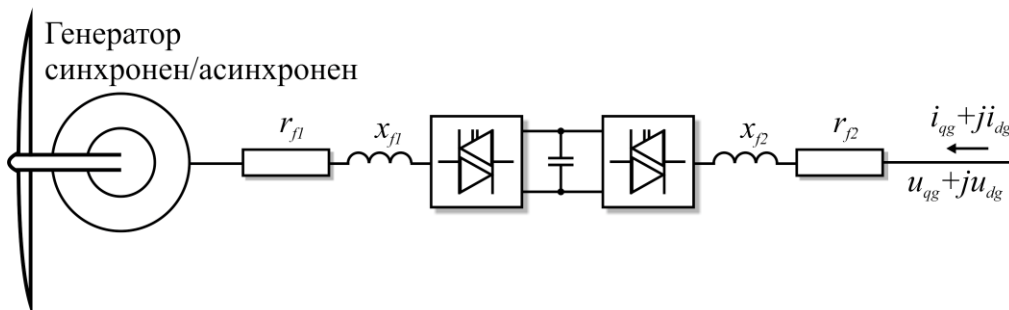


Фигура 2.31. Структурна схема на директно свързан ветрогенератор с навит ротор

При директно свързаните към мрежата ветрогенератори в качеството на генератор се използва асинхронна машина с кафезен (вж. Фигура 2.30) или с навит ротор (вж. Фигура 2.31). Статорът на генератора е свързан към мрежата посредством повишаващ трансформатор. Директно свързаните ветрогенератори също се изграждат със система за регулиране на ъгъла на атака на лопатките. Това означава, че аеродинамичният и механичният модели, представени в раздел 2.3.1.1.с могат да се използват и за този вид ветрогенератори.

2.3.1.3. Ветрогенератори свързани изцяло през конвертор

Ветрогенераторите, които са изцяло свързани през конвертори, заедно с двойно свързаните, са сред най-широко използваните, особено за офшорни вятърни паркове. Тяхната структурна схема е показана на Фигура 2.33. В качеството си на генератор се използват асинхронни машини, синхронни машини с възбудителна намотка, а най-масово използвани в последните години са синхронни генератори с постоянни магнити (СГПМ).



Фигура 2.33. Структурна схема на ветрогенератор изцяло свързан през конвертор

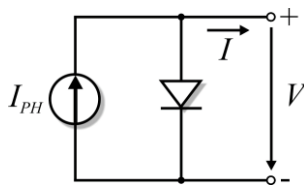
Турбините на този вид генератори, по подобие на двойно свързаните и директно свързаните ветрогенератори, е с променлив ъгъл на атака на лопатките (вж. раздел 2.3.1.1.с), с което се осигурява и оптималната му работа при различни скорости на вятъра.

За разлика от двойно свързаните ветрогенератори, при този тип ветрогенератори цялата мощност се изнася през конверторите. Регулаторите им имат подобна структура като на ДСАГ. Конвертора от генераторната страна управлява активната мощност на статора и поддържа зададена реактивна мощност на статора. Конверторът от страната на мрежата също има два канала, с които регулира напрежението на постояннотоковата част и напрежението на шините на генератора, според конкретното задание.

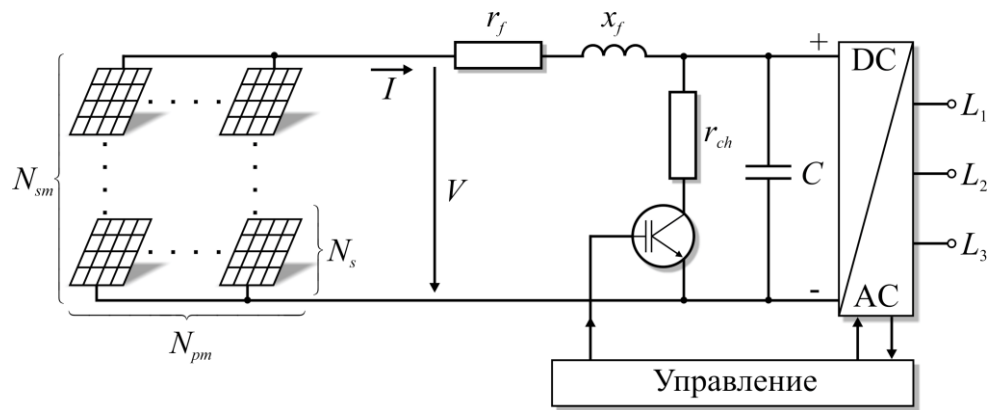
2.3.2. Фотоволтаични централи

а) Модел на система от свързани фотоволтаични модули

На Фигура 2.37 е показана опростената заместваща схема на фотоволтаична клетка, при която не се отчитат шунтовото и последователното съпротивление в схемата.



Фигура 2.37. Опростена заместваща схема на ФВ клетка



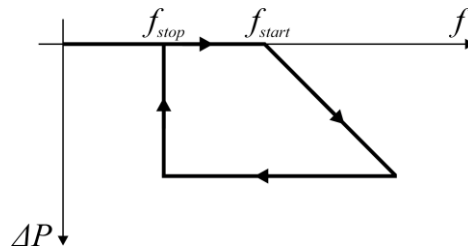
Фигура 2.39. Свързване на ФВ модули към инвертор

ФВ клетки се свързват паралелно (за повишаване на тока) и последователно (за повишаване на напрежението) във ФВ модули (панели). От своя страна ФВ модули също се свързват в последователни и паралелни конфигурации (вж. Фигура 2.39). С това се постига подходящи за инверторите изходна мощност и напрежение. На базата на заместващата схема на Фигура 2.37 и на структурната схема от Фигура 2.39 в дисертацията е представено обобщено математично описание за конфигурации на свързване на ФВ модули.

b) *Модел на инвертора*

Инвертора на ФВЕЦ има двуканални регулатори подобни на тези на ветрогенераторите свързани изцяло през конвертор. Единия от каналите управлява напрежението на променливотоковите изводи (или реактивната мощност), а другия на постояннотоковите изводи в съответствие със задание, получено от система за следене на максималната мощност на ФВ модули.

При някои инвертори има реализирана функция за честотна зависимост на изходната мощност на инвертора. В нарастването на дела на генераторите използващи ВЕИ в енергийния микс на ЕЕС, тази функционалност може да има значителен принос при управлението на честотата при смущения. Примерна хистерезисна крива е представена на Фигура 2.41.



Фигура 2.41. Зависимост на изходната мощност от честотата на инвертор за ФВЕЦ

2.3.3. Опростени модели на ветрогенератори и фотоволтаични централи

Тези опростени генераторни модели представят в детайли единствено регулаторите за управление на конверторите и на турбината, тъй като основно те определят преходните процеси.

2.3.3.1. Двойносвързани ветрогенератори

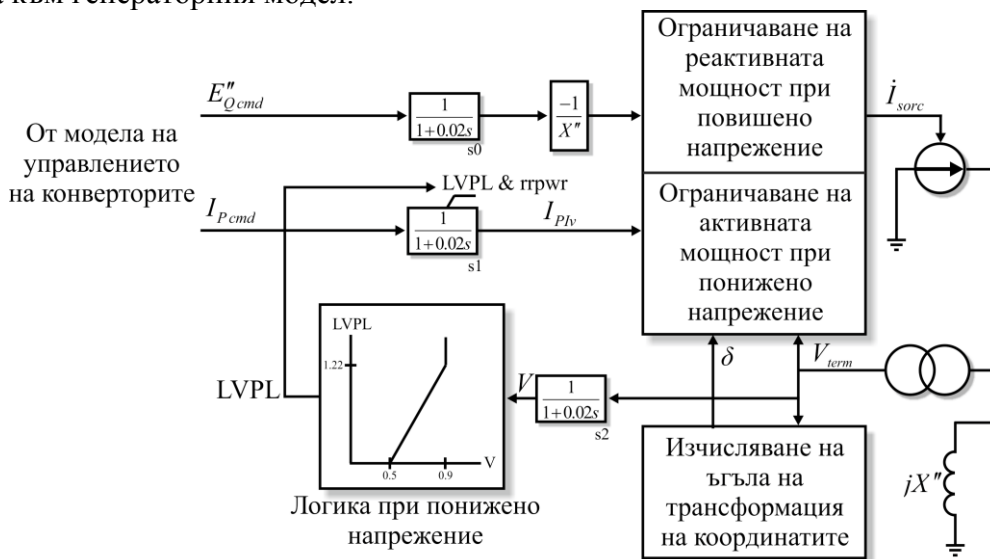
Моделът на ДСАГ се състои от няколко подмодела, представени в следващите точки.

a) *Модели на генераторната и конверторната части*

Представеният на Фигура 2.43 модел е еквивалентно представяне на генераторната и конверторна част на ветрогенератора. За разлика от конвенционалните модели на генератори, при този модел динамиката на потокосцепванията е напълно пренебрегната, за да се отрази мигновената реакция на управлението на конвертора. В резултат се получава модел, който чрез алгебрична връзка управлява и изчислява задавания ток, под въздействието на командите подавани от регулаторите.

b) *Модел на управление на конверторите*

Генераторният модел получава своите задания от модела на управление на конверторите. Регулаторът на реактивната мощност дава възможност за управление с фиксиран фактор на мощността, с фиксирана реактивна мощност или за регулиране на напрежението в даден възел на мрежата. Заданието по активна мощност получено от модела за управление на турбината се преобразува в сигнал по активен ток, който се подава към генераторния модел.



Фигура 2.43. Опростен генераторен/конверторен модел

c) *Модел на турбината и нейното управление*

Този модел включва в себе си аеродинамичния модел на турбината, модела на механичното движение на ротора, модел за управление на активната мощност и ъгъла на атака на лопатките. Освен това са реализирани и две функции: (i) за отдаване на част от кинетичната енергия на ротора при понижавания на честотата и (ii) за регулиране на ъгъла на атака на лопатките при големи отклонения в честотата, в съответствие с характеристика честота-мощност.

2.3.3.2. Ветрогенератори свързани изцяло през конвертор

Моделът, който обобщава генераторната и конверторната части, е подобен на този от Фигура 2.43, с тази разлика, че липсва еквивалентния реактанс на генератора X'' .

Моделът на управление на конверторите на ветрогенераторите свързани изцяло през конвертор е подобен на този на ДСАГ, с тази разлика, че има добавен модел на спирачен резистор, включен в ротора, както и динамично определяне на токовете ограничители на изхода на регулатора.

2.3.3.3. Фотоволтаични централи

Фотоволтаичните централи от гледна точка на електронната преобразователна техника са много сходни с ветрогенераторите свързани изцяло през конвертор. Затова и структурата от отделните стандартни модели, от които се изгражда модела на ФВЕЦ централи е идентична, с тази разлика, че липсва модел за турбина и нейното управление.

2.4. Обединяване на описанието на елементите на ЕЕС в общо описание

При съставяне на математичното описание е възприет структурен подход. За неговото реализиране, най-удобно е да се съставят математичните описания на елементите на ЕЕС чрез възловите уравнения, след което да бъдат обединени в общо описание.

2.5. Изводи

Резултатите от разработката на тази глава са обобщени в 9 изводи. За отбелязване е, че съставените математични модели на мрежата са с ниво на подробности, подходящо за изследвания на електромеханични преходни процеси с отчитане на комплексните стойности на токовете и напреженията. Освен това,

представените модели на ветрогенератори и фотоволтаични инсталации са подходящи и за агрегирано представяне на цели ВяЕЦ и ФВЕЦ.

ГЛАВА 3. Разработване на компютърни модели за изследване на установени и преходни режими на ЕЕС

3.1. Модел за изчисляване на установени режими на ЕЕС с включени генератори използващи ВЕИ

3.1.1. Формиране на система уравнения за решение на задачата на потокоразпределението

За решаване на задачи за потокоразпределение в ЕЕС, в която има PV възли се оказва по-удачно прилагането на баланс на мощностите вместо баланс на токовете, защото за тези възли не може директно да се изчисли задаващ ток. От друга страна, с баланс на мощностите се формират нелинейни уравнения, които изискват по-сложна изчислителна процедура.

За по-лесно разбиране на изложените по-долу математични съотношения се разглежда уравнението за инжектираната във възлите мощност за тривъзлова мрежа:

$$(3.1) \quad \dot{\mathbf{S}}_{grid} = \mathbf{P} + j\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} V_1 e^{j\theta_1} & 0 & 0 \\ 0 & V_2 e^{j\theta_2} & 0 \\ 0 & 0 & V_3 e^{j\theta_3} \end{bmatrix} \cdot \text{conj} \left(\begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \dot{Y}_{13} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \dot{Y}_{23} \\ \dot{Y}_{31} & \dot{Y}_{32} & \dot{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 e^{j\theta_1} \\ V_2 e^{j\theta_2} \\ V_3 e^{j\theta_3} \end{bmatrix} \right) = \dot{\mathbf{V}}_{diag} \cdot \hat{\mathbf{Y}} \cdot \hat{\mathbf{V}}$$

С \dot{Y} са означени собствените и взаимни проводимости на възлите. Както се вижда задаващите възлови мощности са представими чрез произведение на две квадратни матрици и един вектор. При това тази структура е валидна за произволен брой възли и конфигурация на мрежата.

Мощностите, които се обменят от генераторите и товарите се подреждат във вектор-стълб:

$$(3.2) \quad \dot{\mathbf{S}}_{inj} = \begin{bmatrix} P_1 + jQ_1 \\ P_2 + jQ_2 \\ P_3 + jQ_3 \end{bmatrix}.$$

Следователно системата уравнения за решаване на установения режим може да се запише в следната форма, при която баланса на активната мощност и баланса на реактивната мощност се записват като отделни уравнения:

$$(3.3) \quad \begin{cases} 0 = \text{Re}\{\dot{\mathbf{S}}_{grid}\} - \text{Re}\{\dot{\mathbf{S}}_{inj}\} \\ 0 = \text{Im}\{\dot{\mathbf{S}}_{grid}\} - \text{Im}\{\dot{\mathbf{S}}_{inj}\} \end{cases}.$$

За тривъзлова схема се получава система от шест уравнения когато се отчитат само параметрите на правата последователност, а ако описанието е в трифазни координати броя на уравненията се получава шест пъти по-голям от броя на възлите.

3.1.2. Метод на Нютон за решение на системата уравнения за установения режим. Състав на Якобианата

Както вече беше пояснено, задачата за потокоразпределението, формулирана с баланс на мощностите, се състои в решаването на алгебрична система от нелинейни уравнения. Тази задача, за целите на дисертацията, се решава с помощта на итерационния метод на Нютон.

Уравненията на установения режим могат да бъдат записани в следния обобщен вид:

$$(3.4) \quad \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{y})$$

В рамките на една итерационна стъпка i решението на системата в най-общ вид може да се запише по следния начин:

$$(3.5) \quad \begin{cases} \Delta \mathbf{y}^{(i)} = -[\mathbf{G}_y^{(i)}]^{-1} \cdot \mathbf{g}(\mathbf{y}^{(i)}) \\ \mathbf{y}^{(i+1)} = \mathbf{y}^{(i)} + \Delta \mathbf{y}^{(i)} \end{cases}$$

В горните уравнения с \mathbf{y} са означени алгебричните променливи (големините на напреженията V и техните ъгли θ), с $\mathbf{g}(\mathbf{y})$ - уравненията формиращи баланса на мощностите, с \mathbf{G}_y - якобияната на системата уравнения, с $\Delta \mathbf{y}$ - изменението на променливите за i -тата итерация. Итерационния цикъл продължава докато изменението на променливите стане по-малко от предварително зададен праг на точност или небаланса в алгебричните уравнения стане по-малък от предварително зададена стойност.

3.1.3. Изчисляване на начални условия за стартиране на метода на Нютон

За да се постигне сходимост на алгоритъма за изчисляване на потокоразпределение, методът на Нютон изисква началните условия да бъдат в интервала на привличане към решението. За мрежи с относително малък брой възли така наречения „плосък“ старт, при който амплитудите на напреженията се задават 1 о.е., а ъглите са 0 rad, е достатъчно добро начално приближение, с което се постига сходимост към решението. По-особена е ситуацията, при която мрежата е представена с фазни координати и се отчита фазовото завъртане, породено от групите на свързване на силовите трансформатори. В тези случаи „плоският“ старт обикновено се оказва неподходящ, т.е. няма сходимост към решението. В разработената програма *Power System Research* този проблем е решен като мрежата се разглежда на „празен“ ход, т.е. всички генератори и товари във възлите са изключени. Така задачата се свежда до линейна система алгебрични уравнения и може лесно да бъде решена.

3.2. Модел за изследване на електромеханични преходни процеси в ЕЕС включващи генератори използващи ВЕИ

3.2.1. Намиране на начални условия на динамичните модели валидни за установения режим

3.2.1.1. Изчисляване на началните условия за СА

Общоприетата практика при изчисляване на началните условия на моделите на конвенционалните синхронни агрегати е от известните напрежение и ток на шините да се върви в посока навътре към заместващата му схема. След това се изчисляват момента на турбината, електрическата мощност, възбудителното напрежение и т.н., и се преминава към инициализиране на САРС и САРВ.

3.2.1.2. Изчисляване на началните условия за двойносвързан ветрогенератор

Класическият подход е неприложим при двойносвързаните ветрогенератори, поради наличие на два контура, чрез които се обменя мощност (вж. Фигура 2.20). Затова с директни методи не може да се намери еднозначно и точно решение на проблема, без да се правят опростяващи допускания. Точното изчисляване на променливите на модела за установения режим е важно, за да не се получават колебания или числови проблеми при стартиране на динамичните симулации, дори когато не е внесено външно смущение.

В дисертацията се предлага двустъпков подход за инициализация на описанието на двойносвързаните ветрогенератори, чиито основни предимства са: (i) отчитат се загубите в генератора и конверторите, (ii) потребителят може да задава произволна реактивна мощност, която да се инжектира от мрежовия конвертор, (iii) подхода е приложим за модели на асинхронен генератор от 3^{ти} и 5^{ти} ред, (iv) оптималната характеристика мощност-скорост е моделирана в детайли, като са отчетени ограниченията на скоростта на ротора.

а) Стъпка 1 – инициализация на модела на генератора

На базата на модела, описан в раздел 2.3.1.1 се съставя система от нелинейни уравнения със следните неизвестни:

$$(3.18) \quad [P_{mech}, u_{dr}, u_{qr}, i_{dr}, i_{qr}, u_{dc}, u_{qc}, i_{dc}, i_{qc}, i_{ds}, i_{qs}, \omega_r].$$

Очевидно, така съставената система от уравнения не може да бъде директно решена чрез заместване. За тази цел се прилага метода на Нютон, с който може да се постигне много висока точност на решението. Предложени са зависимости за намиране на начални приближения за стартиране на метода.

b) Стъпка 2 – инициализация на модела на турбината

Изходна база за инициализиране на модела на турбината е изчислената в предходната стъпка механична мощност на ротора P_{mech} . Векторът с търсените величини, които са обект на инициализацията е:

$$(3.21) \quad \mathbf{y} = [v_w \ c_p \ \lambda \ \lambda_i]^T$$

Прието е, като известна величина да се задава ъгълът на лопатките θ_p , а скоростта на вятъра да бъде търсена променлива.

3.2.2. Изчисляване на електромеханичните преходни процеси

За да се осъществят симулации във времевата област е необходимо да се избере метод за интегриране на системата диференциални уравнения. Поради доказаните си устойчивост и точност на алгоритъма, метода на трапеца често е предпочитан. Тъй като е необходимо в рамките на една интеграционна стъпка да се намери решението на системата в края на интервала, методът на трапеца е съчетан с този на Нютон. При това се получава съвместено решение на системата алгебрични и диференциални уравнения, с които се описват електромеханичните преходни процеси в изследваната ЕЕС:

$$(3.22) \quad \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{cases}$$

За разлика от алгоритъма за изчисляване на потокоразпределението, където беше приложен баланс на мощностите, при алгоритъма за симулация във времевата област е избран подход с баланс на токовете, който поради това, че е структуриран с линейни уравнения осигурява по-бърза сходимост на итерационния процес.

3.2.3. Имитиране на къси и земни съединения

Всички видове режими на късо съединение са имитирани, като към собствената проводимост на изследвания възел в матрицата на проводимостите на мрежата се добавя матрицата на повредата $\dot{\mathbf{Y}}_{fault}$, която е с размери 3×3 .

Динамичното симулиране на големи смущения води след себе си трудности от изчислителен характер. Възникването и премахването на късо съединение е съпроводено с голямо скокообразно изменение на големините и ъглите на напреженията. Това на свой ред често води до проблеми със сходимостта на цикъла на Нютон. В разработената програма *PSR* проблемът е решен, като се коригират началните приближения за големините на напреженията и техните ъгли в момента на възникване на смущението, при допускането, че е.д.н. и инжектираните токове не се изменят със скок.

3.3. Модел за изчисляване на електромагнитни преходни процеси, чрез използване на моментните стойности на режимните параметри, при къси и земни съединения в мрежи с генератори използващи ВЕИ

В този раздел е представена разработена компютърна програма, за изчисляване на всички видове къси и земни съединения, с моментните стойности на токовете и напреженията. Програмата е реализирана като модул към разработения за целите на дисертацията софтуер *Power System Research*.

3.3.1. Математично описание на източници на напрежение

Моделиран е реалния източник на напрежение. В заместващата му схема се отчитат активното съпротивление и индуктивността на източника, както и различните начини за третиране на звездния център – изолиран, директно заземен, заземен през активно съпротивление или индуктивност. Математичното описание на източника на напрежение е записано с диференциални уравнения и дава възможност за представяне на източника с различни начини за третиране на звездния център.

Така съставеното математично описание има предимството, че се получава хомогенна система от диференциални уравнения, която не е наложително да бъде решавана с числови методи за интегриране.

3.3.2. Математично описание на електропровод

Математичното описание на единичен електропровод е записано с диференциални уравнения за баланса на напреженията. Отчитат се собствените и взаимните индуктивности. Токовете протичащи в капацитетите на електропроводите са отчетени в уравнения за баланс на токовете.

3.3.3. Математично описание на трансформатор

Реализирани за математични описания на двунамотъчни трансформатори по схеми „звезда“/ „звезда“ и „триъгълник“/ „звезда“, с възможност за дефиниране на различни режими на звездните центрове.

3.3.4. Баланс на токовете във възлите

За да се допълни системата диференциални уравнения, освен баланс на напреженията е необходимо да се запише и баланса на токовете във възлите, чрез който да се отчетат капацитивните токове във възлите. Предварително се намират сумарните възлови капацитети на права и нулева последователност. След това, чрез трансформация $\alpha\beta\theta$ се изчисляват капацитетите във фазни координати.

3.3.5. Имитиране на къси и земни съединения

Всякакви видове къси и земни съединения могат да се имитират аналогично на алгоритъма от раздел 3.2.3.

3.3.6. Формиране на обща система диференциални уравнения и метод за нейното решение

3.3.6.1. Формиране на система уравнения

Както вече беше уточнено, с до тук описаните математични модели на елементите на мрежата и източниците на напрежение се формира хомогенна система от диференциални уравнения, които в обща форма могат да бъдат записани в следния вид:

$$(3.57) \quad \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X},$$

където \mathbf{X} е вектора с търсените променливи, а $\dot{\mathbf{X}}$ съответните им производни. Матрицата на състоянието на линейната система \mathbf{A} , се състои от коефициенти, които не се променят в хода на изчисленията във времевата област.

3.3.6.2. Решение на формираната система уравнения

Хомогенна система от линейни диференциални уравнения, от вида (3.57), е удобно да се реши с метода на матричната експонента:

$$(3.59) \quad \mathbf{X} = e^{\mathbf{A}t} \cdot \mathbf{X}_0$$

Където \mathbf{X}_0 са началните условия, при които започват изчисленията в момента $t = 0$. Метода на матричната експонента има редица предимства пред числовите методи за интегриране:

- не се изисква изчисляване на якобианата на всяка стъпка;
- директно решение може да се намери за произволен момент от време, без да е необходимо изчисляването на предходните стойности;
- по-висока точност, тъй като не се натрупва грешка от интегриране.

Основен недостатък на метода на матричната експонента е, че се изисква значително процесорно време, когато \mathbf{A} има голяма размерност. Поради тази причина числовите методи за интегриране, като например правилото на трапеца, намират приложение при решаване на такива математични описания.

При имплементиране на математичния модел в *PSR* са реализирани както метода на матричната експонента, така и числово интегриране с метода на трапеца. Освен това е тестван и трети начин за ре-

шение на математичното описание. Използвани са наличната в *Control System Toolbox*[®] функция за дискретизиране на непрекъснат модел в пространство на състоянията $c2d$, както и командата за решение на дискретни системи, инвариантни по отношение на времето *litr*. Този подход при тестовете се оказва много по-бърз от останалите два и същевременно не притежава числовите проблеми на метода на трапеца.

3.3.6.3. Изчисляване на началните условия

Преди да се започне с изчисленията е необходимо да се намерят началните условия X_0 , с които да се стартира метода на матричната експонента. Изведени са уравнения за определяне на началните условия, без предварително да се изчислява установен режим на мрежата.

3.4. Възможности на разработената програма Power System Research

Както вече беше споменато, за целите на изследванията в настоящата дисертация е създадена компютърната програма *Power System Research (PSR)*. Като платформа за създаване на *PSR* е избран *MATLAB*[®], тъй като е език за програмиране от високо ниво, който е ориентиран основно към решаване на инженерни и изследователски задачи. Програмата *PSR* обединява в себе си по-голямата част от моделите и алгоритмите, описани в дисертацията.

3.4.1. Преглед на основния диалог и функции на програмата

Основните възможности на програмата *PSR* са:

1. Модул за изчисляване на класическо потокоразпределение в трифазни координати (описан в раздел 3.1).
2. Модул за изчисляване на вероятно потокоразпределение. Има две опции – потокоразпределение базирано на теорията за размитите множества или потокоразпределение базирано на метода на Монте Карло (вж. раздел 4.1).
3. Модул за изчисляване на електромеханични преходни процеси в ЕЕС (описан в раздел 3.2).
4. Модул за изчисляване на къси и земни съединения в моментни стойности (описан в раздел 3.3).

Смущения от типа на къси и земни съединения, както и комутация с прекъсвачи се дефинират във файла с входните данни. Дефинират се кои от фазите участват в смущението. Това позволява имитирането на всякакви видове симетрични и несиметрични повреди, както и трифазно или пофазно изключване на електропроводи и трансформатори. Предвидено е всякакви други видове смущения да се създават под формата на програмен код, в отделни файлове. При изчисляването на електромеханични преходни процеси с възможно да се изчислят процесите до определен момент от време, да се зареди смущение и след това симулацията да се продължи колкото е необходимо. Тези възможности правят програмата много гъвкава за имитиране на сложни процеси в ЕЕС.

3.4.2. Формат на входните данни

Входните данни за изследваната система се задават в матричен вид във **.m* файлове (вж. Фигура 3.14). Освен собствените **.m* файлове е разработено приложение за прочитане и конвертиране на данни от програмата *PTI* на *Siemens*, както и *PSLF* на *General Electric*. Това са софтуерни продукти, които се използват от отдел „Режими“ към *ЕСО ЕАД*.

3.4.3. Приложение на обектно-ориентирано програмиране

Обектно-ориентираното програмиране (ООП) е парадигма, с чиято помощ разработването и поддържането на големи софтуерни проекти се улеснява. Заради своите предимства програмата *PSR* е създадена с ООП.

3.5. Валидиране на разработения програмен комплекс

За валидиране на създадените алгоритми и модели е направено сравнение между програмата *PSR* и *Simulink*[®]. Изчисленията доказват коректното реализиране на алгоритмите, а освен това и показват предимствата на създадената програма спрямо *Simulink*[®] при изчисляване на къси и земни съединения.

3.5.1. Валидиране на алгоритмите за изчисляване на установени режими и електромеханични преходни процеси в трифазни координати

3.5.2. Валидиране на алгоритъма за изчисляване на къси и земни съединения с моментните стойности на токовете и напреженията

3.5.3. Тест на метода за инициализация на модела на двойно свързан ветрогенератор

Създаденият алгоритъм за инициализация на модела на двойно свързан ветрогенератор е сравнен чрез числов пример с три други метода известни от специализираната литература. Получените резултати доказват преимуществата на разработения алгоритъм.

3.6. Модели за изследване на влиянието на генератори използващи ВЕИ върху регулирането на честотата в ЕЕС

В съответствие с принципа за разделяне на движенията на бързи и бавни, може да се разгледа опростен модел на ЕЕС, в който да се отчита само инертната маса на генераторите и демпфирането от товарите:

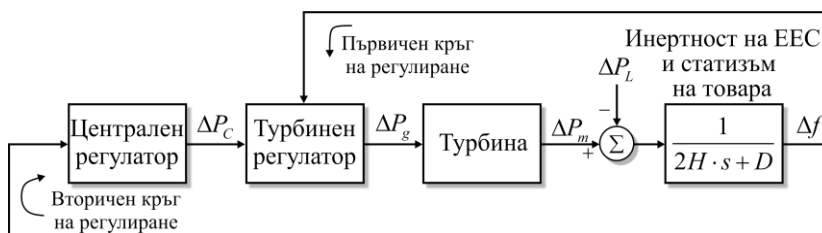
$$(3.65) \quad \Delta P_m - \Delta P_L = \frac{1}{2Hs + D}.$$

Този линеен модел отчита единствено реакцията на ЕЕС при смущения в товара, като всички бързи процеси не се отчитат. Основното му предимство пред подробните модели е, че изиска минимално изчислително време и е с напълно задоволителна точност за изследвания, свързани с турбинното регулиране на конвенционалните СА, както и на генераторите използващи ВЕИ.

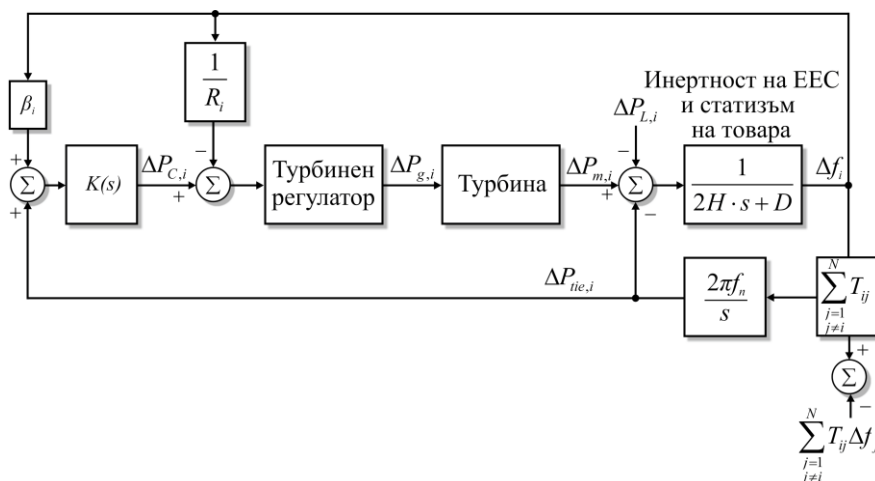
На базата на модела от (3.65) в следващите раздели се разглеждат структурни модели, подходящи за изследване на влиянието на генераторите използващи ВЕИ върху процеса на регулиране на честотата, при смущения в товара на ЕЕС.

3.6.1. Модел за изследване на честотата на самостоятелни ЕЕС

На Фигура 3.30 е показана структурната схема на модел на ЕЕС за изследване на процесите, свързани с регулирането на честотата и активната мощност. Моделът на въртящата се инерционна маса на ЕЕС, както и демпфирането на товара е (3.65).



Фигура 3.30. Структура на модел на самостоятелна ЕЕС за изследване на регулирането на честотата



Фигура 3.32. Структура на модел на ЕЕС, обединена с други ЕЕС

3.6.2. Модел за изследване на честотата на обединени ЕЕС

Структурната схема на модел на ЕЕС, обединена с други ЕЕС е показана на Фигура 3.32. Обменът на активна мощност между две ЕЕС $P_{tie,i}$ се определя с ъгловата характеристика, като за простота се отчита само реактанса на връзката. С $K(s)$ на фигурата е обозначен централния регулатор.

3.7. Изводи

Резултатите от разработката на тази глава са обобщени в 18 изводи.

ГЛАВА 4. Изследване на влиянието на генератори използващи ВЕИ върху режимите на ЕЕС

4.1. Влияние върху установените режими на ЕЕС

В настоящия раздел са разработени два алгоритъма за изчисляване на потокоразпределението, с отчитане на случайния характер на мощностите на генераторите използващи ВЕИ и на товарите.

4.1.1. Вероятностно потокоразпределение с размити множества

При вероятностното потокоразпределение с размити множества мощностите във възлите се задават с така наречените функции на участие, познати от теорията на размитата логика. В програмата *PSR* са използвани трапецовидни функции на участие за задаване мощностите на генераторите и товарите, при което се дефинират четири стойности за всяка задаваща мощност $X=(x_1, x_2, x_3, x_4)$, съответно при вероятност $\mu=(0, 1, 1, 0)$. След като се формират отделните случаи, за различни стойности на μ се изчислява отделно потокоразпределение с помощта на метода на Нютон. Алгоритъмът дава възможност за оценка на нивата на напреженията в изследваната мрежа, оценка на натоварването на линиите и трансформаторите, както и за загубите на мощност в мрежата.

4.1.2. Вероятностно потокоразпределение с метода на Монте Карло

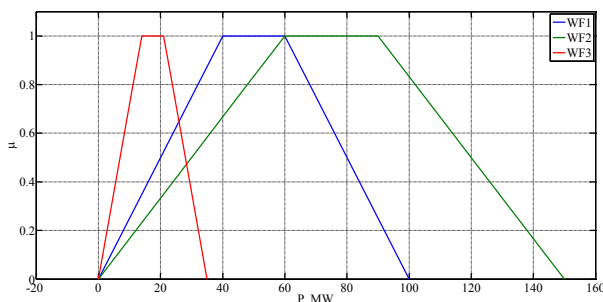
За да бъде адекватен разработения алгоритъм е съобразен с реалната ситуация на управление (диспечирание) на ЕЕС. Алгоритъмът, който се предлага е базиран на генерирането на случайни стойности за задаващите възлови мощности. Като резултат се получават N на брой случая, които се решават с итерационния метод на Нютон. Целта е за всеки отделен случай да се определи дали има претоварен електропровод или трансформатор. Предложеният алгоритъм е реализиран в 4 стъпки, в които се обработват входните данни, подготвят се и се решават случайните режими.

4.1.3. Приложение на алгоритмите за вероятностно потокоразпределение

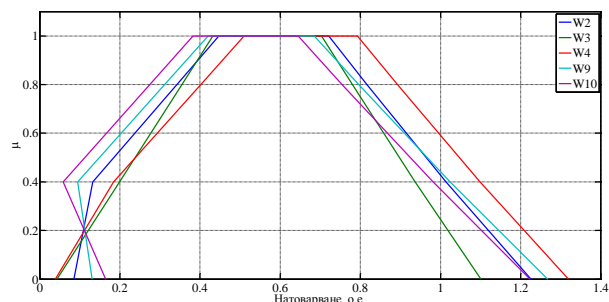
4.1.3.1. Изследване на мрежа за високо напрежение

Тестовата схема за изчисляване на потокоразпределение с размити множества представлява фрагмент от мрежата 110 и 220 kV на Североизточна България, където са налице няколко мощни вятърни електрически централи, с обща инсталирана мощност около 285 MW и няколко конвенционални синхронни генератори с обща мощност около 1700 MW.

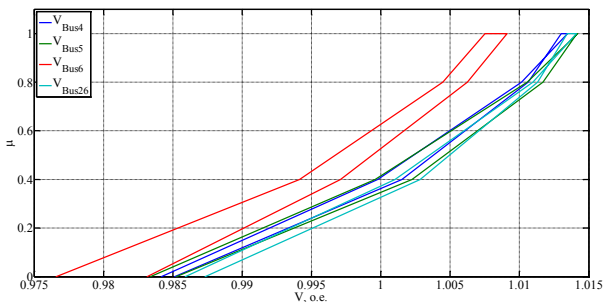
На Фигура 4.3 са показани функциите на участие на активната мощност на ВГ. Зададено е тя да се изменя от нула до номиналната си стойност.



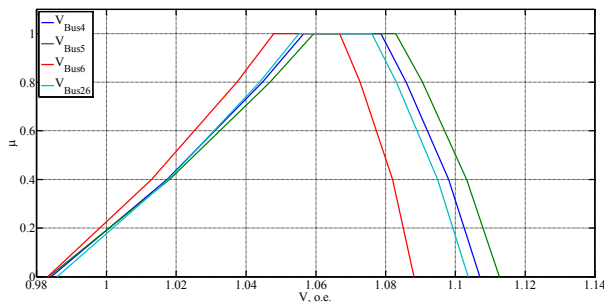
Фигура 4.3. Функция на участие на активна мощност на вятърните електрически централи



Фигура 4.5. Натоварване на претоварените линии



Фигура 4.6. Напрежение на възли 4, 5, 6 и 26 при работа на ветрогенераторите с фактор на мощността 1.0



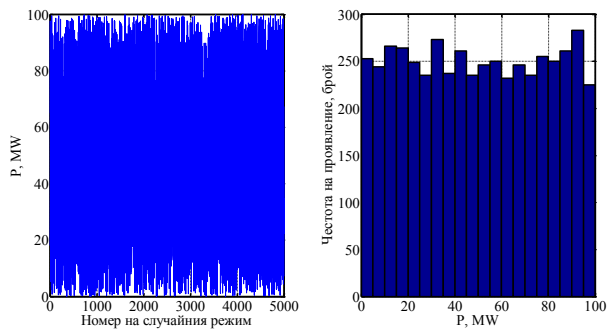
Фигура 4.7. Напрежение на възли 4, 5, 6 и 26 при работа на ветрогенераторите с фактор на мощността +0.95 (инд.)

На Фигура 4.5 е показан резултата, който се получава за нивото на натоварване на линиите, които са претоварени в някои изчислени режими. Може да се отбележи, че формата на получения графичен резултат наподобява трапецовидните функции на участие на товарите и генераторите. От самата фигура пък се определя и с каква вероятност линиите ще бъдат претоварвани: линия W2 с вероятност <0.42, линия W3 с вероятност <0.25 и т.н.

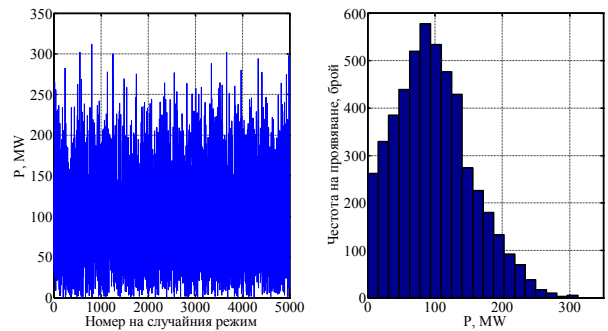
Възлите с номера от 4, 5, 6 и 26 от тестовата схема са обект на внимание, тъй като те са в частта от формирания пръстен на 110 kV, към който са присъединени и вятърните електрически централи. Електропроводите, свързващи тези възли, както се вижда и от Фигура 4.5, са с вероятност за претоварване, т.е. те се явяват слаби звена на мрежата. Поради недостатъчното им сечение и съответно големия им импеданс, освен проблеми с тяхното претоварване, се наблюдават и режими на повишено напрежение. На Фигура 4.6 са показани изчислените напрежения в тези възли за режим, при който ветрогенераторите работят с фактор на мощността единица (не обменят реактивна мощност). Резултатите за същите възли, но в режим, при който ветрогенераторите работят с индуктивен фактор на мощността 0.95 са показани на Фигура 4.7. Налице е значителна разлика в наблюдаваните големина на напреженията. Режим на работа, при който ВГ генерират реактивна мощност се оказва много неблагоприятен, защото напреженията в района се повишават и дори надхвърлят допустимото отклонение от 10 %.

Алгоритъмът за вероятностно потокоразпределение, с използване на метода на Монте Карло, също е тестван с примерната ЕЕС. За целта автоматично се генерират 5000 случайни варианти за потокоразпределение, базирани на същите входни данни, както при потокоразпределението с размити множества, т.е. мощностите във възлите се изменят в същите граници. Единствено границите на изменение на мощността на конвенционалните централи е променена на $P_{conv} = P_{nom} \cdot \{0.0 \div 0.5\}$, за да може алгоритъмът да ограничи до нула изходната им мощност, когато генерацията от ВЕИ покрива изцяло товара на ЕЕС, т.е. да се постигне максимална реалистичност на случайните режими.

На Фигура 4.10 е показана генерираната активна мощност на един от ветропарковете. Както се вижда и от хистограмата, стойностите на мощността са равномерно разпределени в целия работен диапазон на турбините. На Фигура 4.11 е показана аналогична графика за активната мощност на конвенционалната централа G4. Тази графика изяснява и същността на алгоритъма при подготовката на входните данни за генерирането на случайните ситуации. Както се вижда от фигурата, въпреки, че е зададен диапазон на изменение от 0 до 370 MW, мощността достига най-много до 310 MW, защото генерацията се ограничава за да се балансира с товара.



Фигура 4.10. Изходна активна мощност на WF1

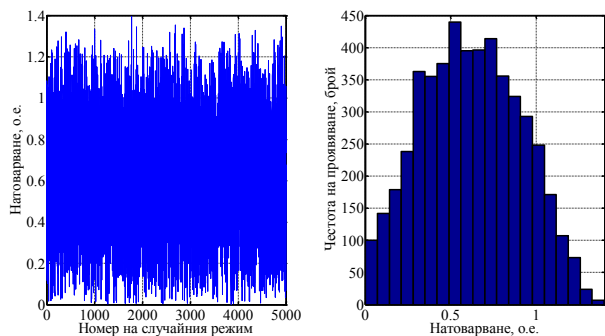


Фигура 4.11. Изходна активна мощност на G4

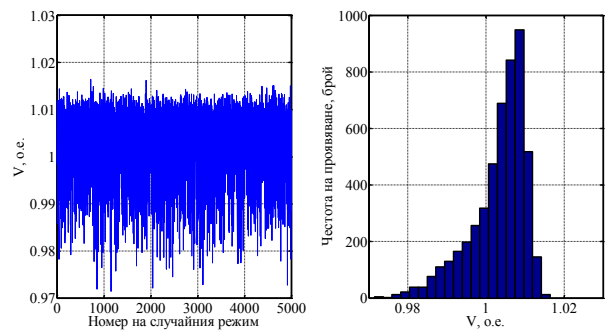
На Фигура 4.12 е показано нивото на натоварване на линия W9. Основната разлика в резултатите между двата алгоритъма е, че този използващ метода на Монте Карло не посочва електропровод W3 като претоварен.

Резултатите за големината на напрежението на възел 5 са показани на Фигура 4.13 и Фигура 4.14. Изчисленията потвърждават, че режим на работа на ветрогенераторите, при който се генерира реактивна мощност, е неблагоприятен и води до повишени нива на напреженията в изследвана ЕЕС.

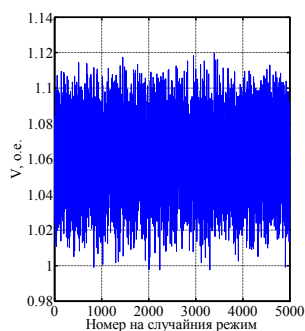
Необходимо е също така да се отбележи, че двойно свързаните ветрогенератори, ветрогенераторите свързани изцяло през конвертор, както и инверторите на ФВЕЦ могат да обменят реактивна мощност, дори когато скоростта на вятъра е по-ниска от минималната работна или през нощта, когато слънчевата радиация е нула. Това се осъществява от функциите за работа при нулева активна мощност (zero-power operation) и позволява значителна гъвкавост при регулиране на нивата на напреженията. Например, по време на вечерния минимум, когато обикновено напреженията са високи, инверторите биха могли да черпят реактивна мощност и да поддържат нормални нивата на напреженията.



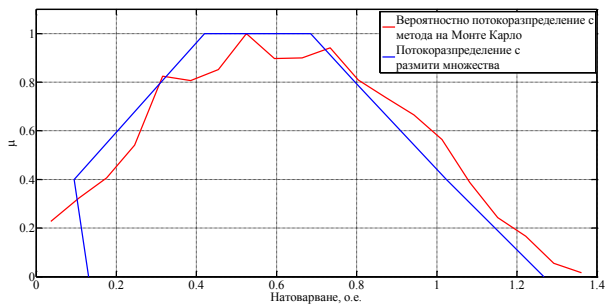
Фигура 4.12. Натоварване на W9



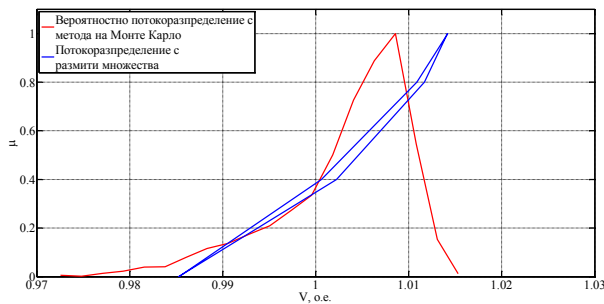
Фигура 4.13. Напрежение на възел 5 при работа на ветрогенераторите с фактор на мощността 1



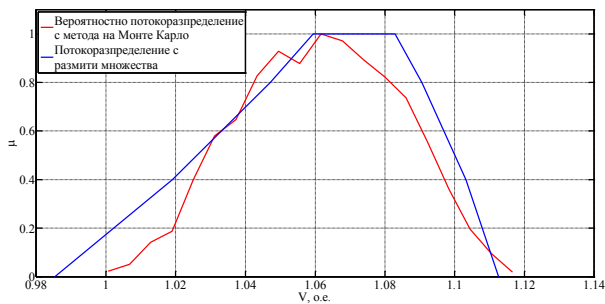
Фигура 4.14. Напрежение на възел 5 при работа на ветрогенераторите с фактор на мощността 0.95÷1 (инд.)



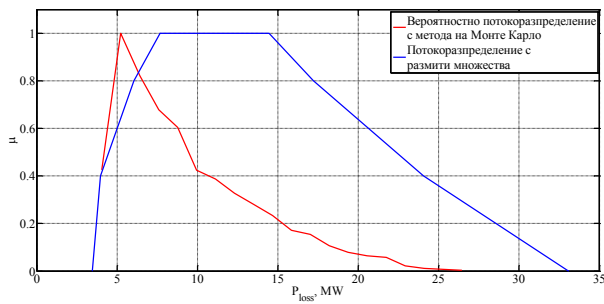
Фигура 4.16. Сравнение на вероятностите за натоварването на W9



Фигура 4.17. Сравнение на вероятностите за напрежението на възел 5 при работа на ветрогенераторите с фактор на мощността 1



Фигура 4.18. Сравнение на вероятностите за напрежението на възел 5 при работа на ветрогенераторите с фактор на мощността 0.95÷1 (инд.)



Фигура 4.19. Сравнение на вероятностите за загубите на активната мощност в ЕЕС

Интерес представлява да се направи директно сравнение между потокоразпределението с размити множества и това, с използване на метода на Монте Карло. За тази цел се извежда обвивната крива на хистограмите, получени с метода на Монте Карло. След това тя следва да бъде нормализирана, спрямо най-често проявяващата се стойност, която се приема да бъде с вероятност $\mu = 1$. На Фигура 4.16, Фигура 4.17, Фигура 4.18 и Фигура 4.19 е показано директно сравнение на резултатите за натоварването на линия W9, напрежението на възел 5 и загубите на активна мощност в мрежата. С изключение на резултата за загубите на мощност, при всички останали случаи се забелязват много близки резултати.

4.1.3.2. Изследване на мрежа за средно напрежение

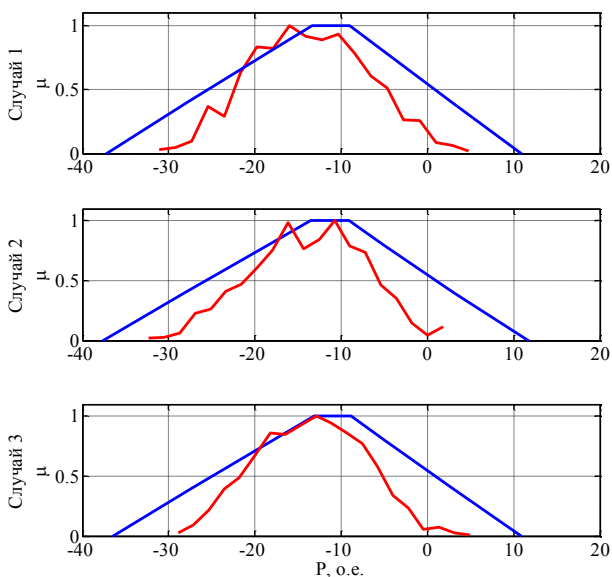
Алгоритмите за изчисляване на вероятностно потокоразпределение са тествани с мрежа за средно напрежение на реална подстанция 110/20 kV, намираща се в североизточна България. Моделирани са всички изводи на подстанцията, при което се получават 311 възела. Анализът по-долу е фокусиран само върху конкретен извод. Характерно за мрежите средно напрежение е, че имат радиална структура. Към разглеждания извод има свързани шест ветропарка, а общата дължина на магистралата на извода е около 40 km, изпълнена с проводник AC-95 mm².

Направени са изчисления със 1000 случайно генерирани установени режими за следните три случая:

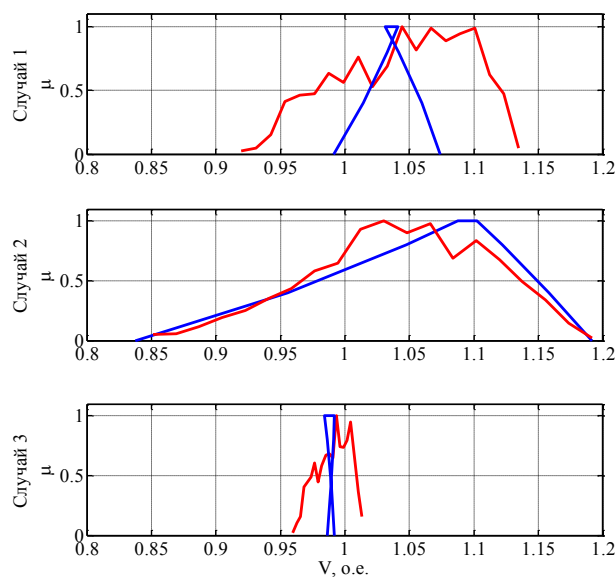
- *Случай 1* – всички генераторни възли се задават с известни активна и реактивна мощност при фактор на мощността единица;
- *Случай 2* – всички генераторни възли се задават с известни активна и реактивна мощност при фактор на мощността ± 0.95 ;
- *Случай 3* – всички генераторни възли се задават с известни активна мощност и големина на напрежението.

На Фигура 4.21 са показани резултатите от изчисленията с вероятностното потокоразпределение с метода на Монте Карло и потокоразпределението с размити множества, за активната мощност, която се обменя от базисно-балансиращия възел. Графиката включва резултатите и за трите случая. Както се вижда, в различните случаи се получават идентични резултати, защото разликата е основно в баланса на

реактивната мощност. Освен това се забелязва добро съвпадение на резултатите получени с двата вероятностни алгоритъма.

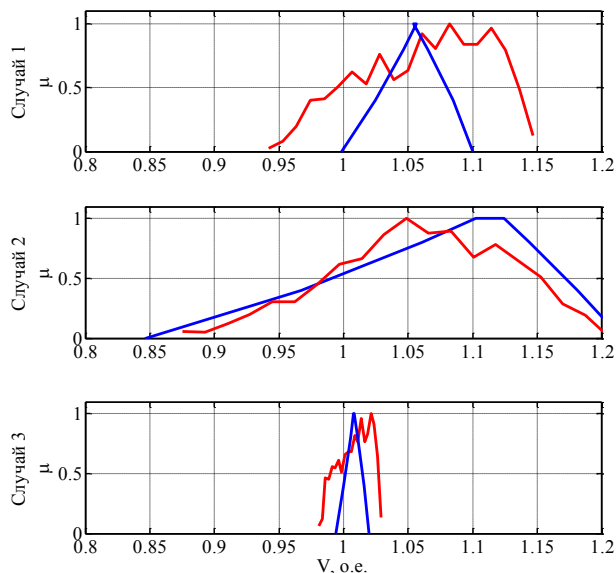


Фигура 4.21. Сравнение на вероятностите на активната мощност на базисно-балансиращия възел изчислени чрез: метода на Монте Карло – червено; чрез размити множества – синьо

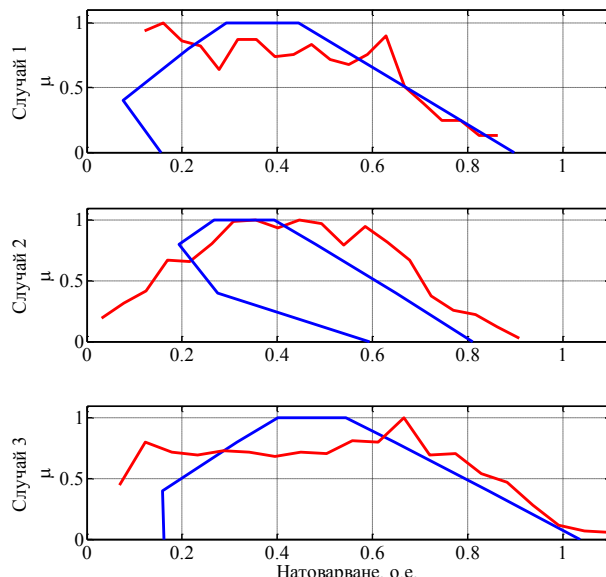


Фигура 4.23. Сравнение на вероятностите за напрежението на възел 92 изчислени чрез: метода на Монте Карло – червено; чрез размити множества - синьо

Сравнение за напрежението на възли 92 и 118 е показано на Фигура 4.23 и Фигура 4.24. Поради големите активни съпротивления на електропроводните линии, напреженията във възлите са големи за случаите 1 и 2, при които ветрогенераторите се задават като PQ възли. Когато ветрогенераторите управляват напрежението в точката на присъединяване, напреженията се поддържат в нормални граници. Въпреки голямата дължина на магистралата, напрежението в крайния възел е много близко до номиналното, благодарение на ветрогенераторите. Т.е. оказва се, че ветрогенераторите могат да имат положително влияние върху нивата на напрежението в разпределителните мрежи. Резултатите, получени с двата алгоритъма не се различават съществено.



Фигура 4.24. Сравнение на вероятностите за напрежението на възел 118 изчислени чрез: метода на Монте Карло – червено; чрез размити множества – синьо



Фигура 4.25. Сравнение на вероятностите за натоварването на W70 изчислени чрез: метода на Монте Карло – червено; чрез размити множества - синьо

На Фигура 4.25 е показано натоварването на W70 (участъкът между възли 69 и 294). Резултатите сочат, че най-критичен режим от гледна точка на претоварване на линията е този, при който ветрогене-

раторите работят като *PV* възли, защото тогава те консумират реактивна мощност, за да поддържат нормално ниво на напрежението. Поради това се увеличават реактивните потоци по магистралните проводници, от което следва и протичането на по-голям ток в нейното начало.

4.2. Влияние върху преходните режими на ЕЕС

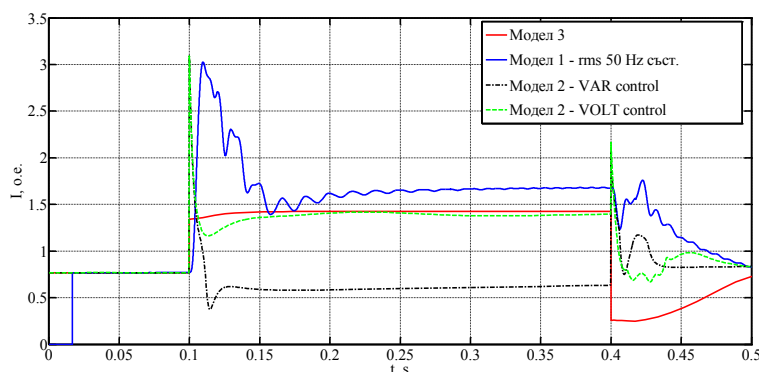
4.2.1. Локално влияние

Локалното влияние на генераторите използващи ВЕИ върху преходните процеси, основно се изразява в оценка на нивата на късите и земни съединения. Симулационните изследвания са проведени с разработените за целите на дисертацията компютърни модели, както и с помощта на *Simulink*[®].

4.2.1.1. Влияние върху нивата на късите съединения

В следващите подточки са изследвани и коментирани режимните параметри на генераторите използващи ВЕИ. Разгледани са всички математични описания, представени в глава 2. За пълнота на анализите е направено сравнение между различни по детайлност модели.

a) Двойно свързани ветрогенератори

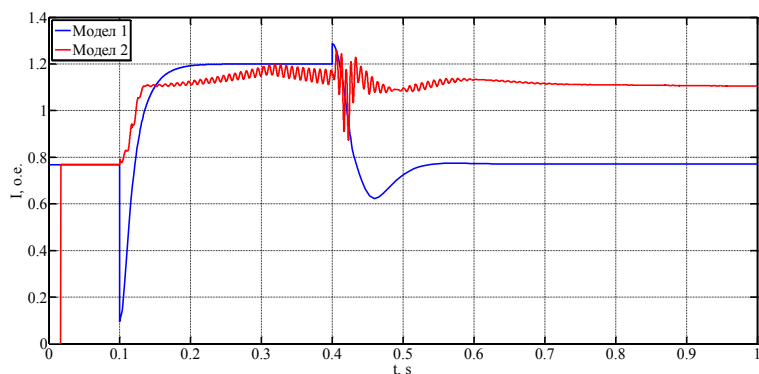


Фигура 4.27. Ефективна стойности на тока на ДСАГ ветрогенератор при трифазно късо съединение

На Фигура 4.27 са показани резултати за ефективната стойност на тока в изводите на ДСАГ за една от фазите, изчислени чрез три вида модели. За да може да се прави директно сравнение с другите модели, токът от *модел 1* е представен чрез ефективна стойност само на периодичния ток, вместо с моментната стойност на фазния ток. Както се вижда от фигурата изчисленията чрез *модел 1* и *2*, показват идентични резултати за тока на късо съединение (3 о.е.), в момента на възникване на смущението. *Модел 3* има различно поведение в първоначалния момент на възникване на смущението.

b) Ветрогенератори свързани изцяло през конвертор

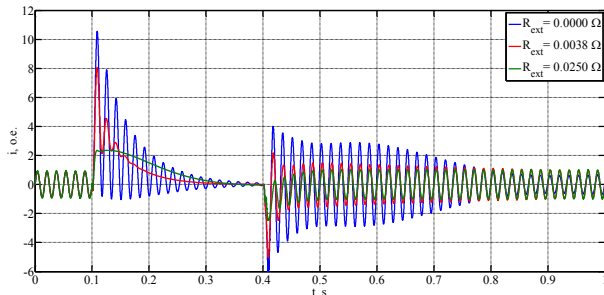
При изследването се разглеждат подробен и опростен модел. На Фигура 4.32 е показан тока на трифазно късо съединение на ветрогенератора, изчислен с двата модела. С изключение на първоначалния момент на възникване на повредата, опростеният *модел 1* дава резултат близък до този получен с *модел 2*. Както се вижда от Фигура 4.32 свободен преходен процес не протича.



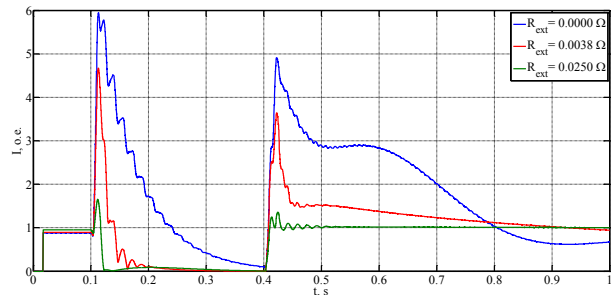
Фигура 4.32. Ефективна стойност на тока на ветрогенератор вързан изцяло през конвертор при трифазно късо съединение

c) Директно свързани ветрогенератори с асинхронни машини

Направени са изчисления при трифазно късо съединение на директно свързан ветрогенератор, при три различни стойности на външното съпротивление, включено към ротора: $R_{ext} = 0 \Omega$ (ротор съединен накъсо), $R_{ext} = 0.0038 \Omega$ (съответстващо на около 2 % хлъзгане по данни на производителя) и $R_{ext} = 0.0250 \Omega$ (при хлъзгане около 10 %). На Фигура 4.37 е показан тока на една от фазите на генератора, за трите разглеждани случая. На Фигура 4.38 са показани съответстващите им ефективни стойности на основния хармоник. От представените резултати е видно, че с увеличаване на стойността на R_{ext} се намалява свръхпребродния ток, а токът на късо съединение затихва практически до нула в рамките на няколко периода.



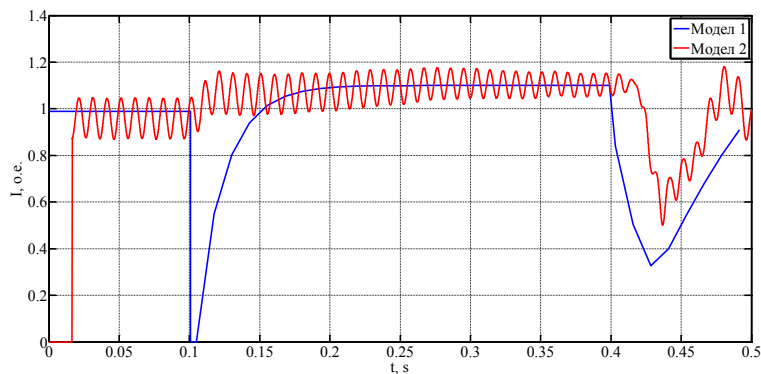
Фигура 4.37. Моментна стойност на тока на ветрогенератор с директно свързана асинхронна машина при различни стойности на външното съпротивление включено към ротора



Фигура 4.38. Ефективна стойност на основния хармоник на тока на ветрогенератор с директно свързана асинхронна машина при различни стойности на външното съпротивление включено към ротора

d) Фотоволтаични генератори

Направеното изследване за режим на трифазно късо съединение на фотоволтаични генератори. Използвани са реални данни за фотоволтаична централа с пикова мощност от 50 MW (ФВЕЦ „Казанлък – Ясеново, Голямо Дряново“), състояща се от 40 инверторни станции, всяка с номинална мощност от 1260 kVA. При извършване на изчисленията модела на централата е агрегиран, т.е. сведен до един инвертор и един повишаващ трансформатор, както и обобщен модел на фотоволтаичните панели. Резултатите са получени на база на подробен и опростен модел.



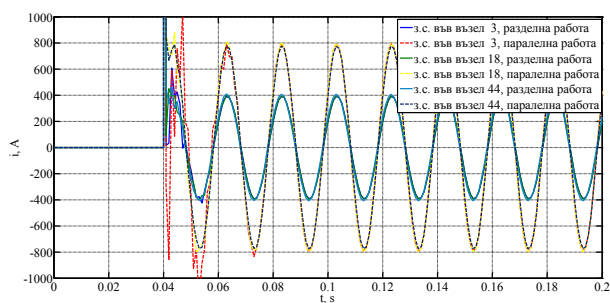
Фигура 4.42. Ефективна стойност на тока на фотоволтаичен генератор при трифазно късо съединение

4.2.1.2. Влияние върху нивата на земните съединения

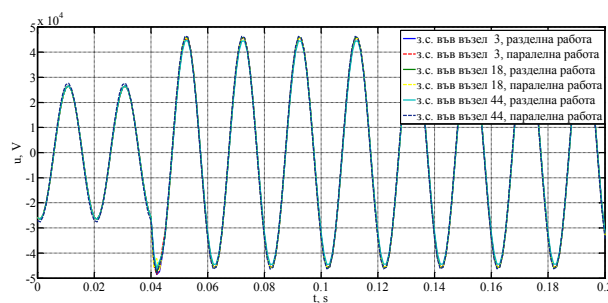
Разработеният модул за изчисляване на земни съединения към програмата *Power System Research*, е използван за изследване на нивата на еднофазни повреди в разпределителната мрежа на вятърен парк с обща инсталирана мощност 156 MW. Изчислени са случаи на еднофазна повреда във възли 3, 18 и 44, както за разделна работа на секциите на шинната система, така и за паралелна работа (включена секционна верига).

На Фигура 4.47 е показан токът в мястото на повредата, за всички разглеждани случаи на земно съединение. Както се забелязва от графиката при паралелна работа на силовите трансформатори в подстанцията тока на земно съединение има около два пъти по-голяма стойност. Напрежението на една от здравите фази на шинната система, за всички разглеждани случаи на еднофазна повреда, е показано на Фигура 4.48. Както се вижда от графиката, електрическата отдалеченост на земното съединение почти не влияе на установената стойност на пренапрежението. Аналогична графика, но за повредената фаза е показана на Фигура 4.49. На Фигура 4.50 е представен графичния резултат за напрежението на електрически

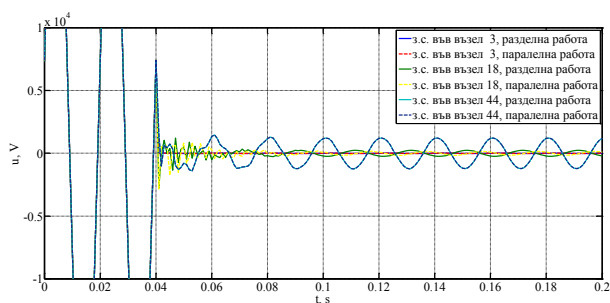
най-близкия ветрогенератор. Поради схемата на свързване на намотките на повишаващия трансформатор „звезда/триъгълник“ работа на ветрогенераторите не се смущава при еднофазни повреди в разпределителната мрежа.



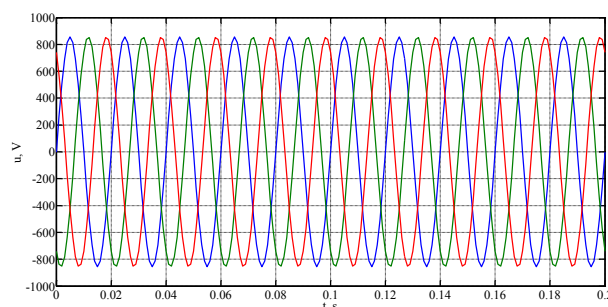
Фигура 4.47. Ток в мястото на еднофазната повреда за всички разглеждани случаи



Фигура 4.48. Напрежение на една от здравите фази на шинната система 33 kV в подстанцията за всички разглеждани случаи



Фигура 4.49. Напрежение на повредената фаза, измерена на шинната система 33 kV в подстанцията за всички разглеждани случаи



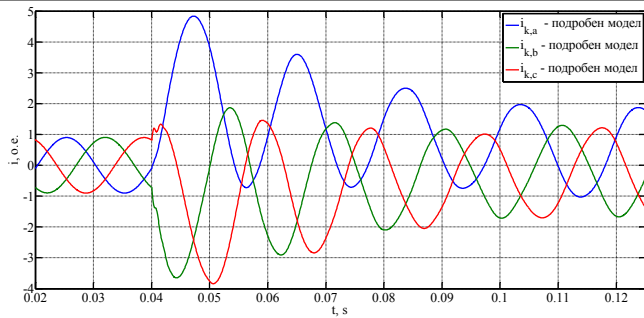
Фигура 4.50. Напрежение на възел 61 при еднофазна повреда във възел 3

4.2.1.3. Проблеми с релейните защиты в мрежи с генератори използващи ВЕИ

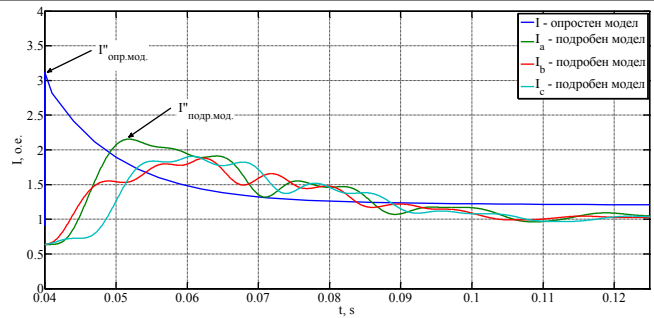
За онагледяване на теоретичните основи за изчисляване на ефективната стойност на тока на късо съединение и алгоритмите на цифровите релейни защиты е разгледан прост пример. Представени са резултати от трифазно късо съединение. Разгледани са модел отчитащ само периодичната съставяща на режимните параметри (опростен модел), и модел с моментните стойности на токовете и напреженията (подробен модел). Показаните резултати са за ДСАГ ветрогенератор.

На Фигура 4.54 са показани моментните стойности на токовете на ветроагрегата, изчислени по пълния модел при метално трифазно к.с., възникнало в 0.04 секунда. Тези моментни стойности са използвани за изчисляване на ефективните стойности на тока, показани на Фигура 4.55. Показани са резултатите от изчисленията на ефективните стойности на периодичните токове по опростения и подробния модели. В действителност ефективните стойности на периодичните токове от детайлния модел, изчислени чрез цифровия алгоритъм на релейните защиты, съществено се отличават през първия полупериод след възникване на късото съединение от ефективната стойност, изчислена по опростената методика. При това, поради бързото затихване на периодичната съставяща, ефективните стойности на трите фази се различават. Полученият чрез опростения модел свръхпреходен ток $I''_{opr.mod.}$ е с 43% по-висок от полученият чрез подробния модел $I''_{подр.мод.}$.

Резултатите показват, че не следва да се прилага класическия подход при изчисляване на токовете за нуждите на релейната защита, за вериги захранвани от ветропаркове, както това се прилага за вериги захранвани от синхронни генератори. Ефективност при установяване на къси съединения би имала единствено защита по напрежение или по импеданс.



Фигура 4.54. Моментни стойности на токовете от ветрогенератора при трифазно к.с. във възел 3, изчислени чрез подробния модел



Фигура 4.55. Ефективна стойност на периодичния ток от опростения модел и ефективни стойности на периодичния ток, за трите фази от подробния модел

4.2.2. Глобално влияние

4.2.2.1. Влияние върху устойчивостта на електромеханичното движение на ЕЕС при малки смущения

Анализът на собствените стойности на матрицата на състоянието на линеаризираното описание на ЕЕС, заедно с изчисляването на тяхната чувствителност към определени режимни параметри, в реално време, дава възможност за вземане на адекватни операторски решения, с цел осигуряване на добро демпфиране на електромеханичните колебания на СА. Изчислените чувствителности на собствените стойности дават оценка за това, промяната на кой параметър ще има най-голямо въздействие върху движението на критичните собствени стойности спрямо имагинерната ос.

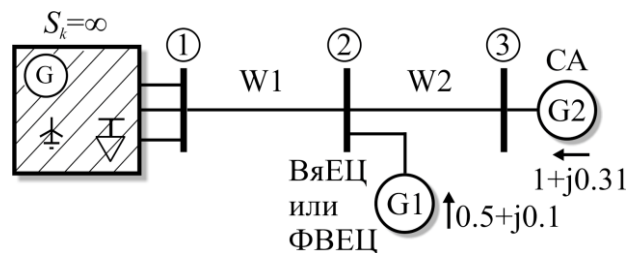
a) Математични модели на ЕЕС

ЕЕС може да бъде моделирана с различни уравнения за различните времеви рамки. Т.е. уравненията, с които се описват електромеханичните преходни процеси (динамичен модел) са различни от тези, с които се описват оперативните действия (статичен модел).

b) Формула за чувствителност на собствените стойности

Изведена е формула за изчисляване на чувствителността на собствените стойности от различни параметри на ЕЕС, като например мощността на генераторите използващи ВЕИ.

c) Изчислителни резултати



Фигура 4.59. Тривъзлова тестова схема

Тестови изчисления за определяне на чувствителността на собствените стойности на матрицата на състоянието са проведени за проста тривъзлова ЕЕС, показана на Фигура 4.59. За параметри p на системите уравнения са приети активната P_G и реактивната Q_G мощност на генераторите.

В Таблица 4.2 са представени резултатите за собствените стойности, а в Таблица 4.3 техните чувствителности.

Таблица 4.2. Собствените стойности

| λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| $-35.6398 + j30.3327$ | $-35.6398 - j30.3327$ | $-1.8277 + j9.0367$ | $-1.8277 - j9.0367$ | -0.8290 |

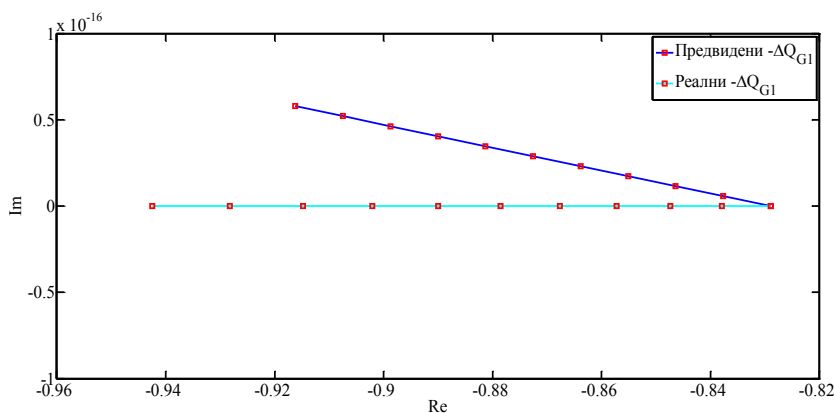
Таблица 4.3. Чувствителност на собствените стойности

| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|----------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| P_{G1} | $3.9355 - j1.5579$ | $3.9355 + j1.5579$ | $0.5254 - j1.2086$ | $0.5254 + j1.2086$ | $-0.2237 + j0.0000$ |
| Q_{G1} | $-33.1559 - j8.8090$ | $-33.1559 + j8.8090$ | $-0.6251 + j4.1800$ | $-0.6251 - j4.1800$ | $0.8725 - j0.0000$ |
| P_{G2} | $70.5782 + j10.7203$ | $70.5782 - j10.7203$ | $0.4793 - j5.2706$ | $0.4793 + j5.2706$ | $-1.1653 + j0.0000$ |
| Q_{G2} | $-35.1573 + j11.9818$ | $-35.1573 - j11.9818$ | $0.4772 + j3.7472$ | $0.4772 - j3.7472$ | $-0.7204 - j0.0000$ |

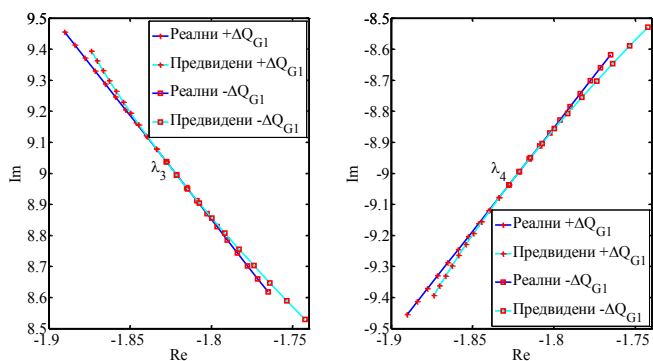
Както се вижда от Таблица 4.2 коренът λ_5 е най-близо до имагинерната ос и поражда най-слабо демпфираното движение. Налице са две колебателни движения. Собствените стойности λ_1 и λ_2 определят бързо затихващо колебание с честота около 4.8 Hz, а собствените стойности λ_3 и λ_4 определят колебание с честота около 1.4 Hz и относително слабо демпфиране. Резултатите за чувствителността на λ_5 показват, че тази собствена стойност може да бъде отдалечена от имагинерната ос чрез увеличаване на активната мощност на СА или чрез понижаване на реактивната мощност на генератора използващ ВЕИ. На Фигура 4.60 е показано сравнение на предвидените с помощта на чувствителността и реално изчислените стойности на λ_5 при понижаване на Q_{G1} от 0.1 до 0 о.е. Вижда се, че има добро съвпадение на резултатите при изменение на мощността със 100 %.

Движението на собствените стойности λ_3 и λ_4 , при вариация на Q_{G1} е показано на Фигура 4.63. На Фигура 4.64 е направено сравнение на предвидените и реално изчислените стойности на λ_3 и λ_4 при изменение на Q_{G2} с ± 0.1 о.е. ($\pm 30\%$). Очевидно е, че зависимостта на тези корени от конкретния параметър е значително нелинейна. Поради тази причина по-точни предвиждания могат да бъдат давани в по-тесни диапазони на изменение на режимния параметър (до около $\pm 10\%$).

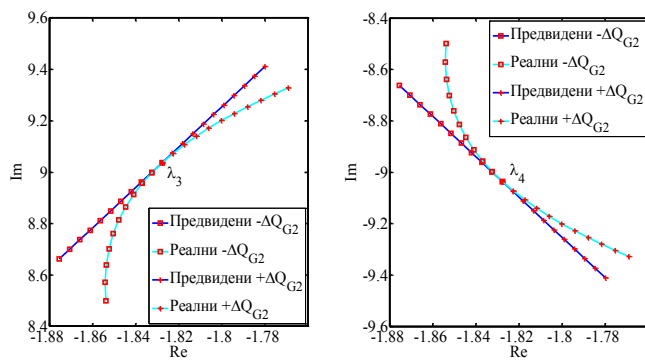
Представените резултати показват, че собствените стойности имат значителна чувствителност към промяната на реактивната мощност, която често дори надхвърля тази към активната. Този факт значително би улеснил оперативните действия, при осигуряване на устойчивата работа на ЕЕС, тъй като не се налагат допълнителни ограничения при осъществяване на търговията с активна енергия на свободния пазар.



Фигура 4.60. Сравнение на предвидените и реално изчислените стойности на λ_5 при по-нижаване на Q_{G1} от 0.1 до 0 о.е.



Фигура 4.63. Сравнение на предвидените и реално изчислените стойности на λ_3 и λ_4 при изменение на Q_{G1} с ± 0.1 о.е.



Фигура 4.64. Сравнение на предвидените и реално изчислените стойности на λ_3 и λ_4 при изменение на Q_{G2} с ± 0.1 о.е.

4.2.2.2. Влияние върху регулирането на честотата на ЕЕС

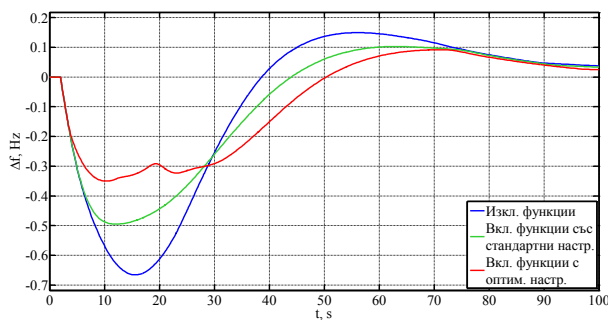
На база на представените в раздел 3.6 модели за изследване на системите за управление на честотата и активната мощност са разработени структурни схеми, с чиято помощ може да бъде отчетено влиянието на генератори използващи ВЕИ върху възстановяването на честотата при смущения в ЕЕС. Изследването цели и разработването на методика за оптимална настройка на параметрите на турбинния регулатор на ветрогенераторите, с което да се постигне максимален ефект от наличните функции за регулиране на активната мощност. Оптимизирането на настроените параметри се предлага да се осъществи с помощта на *Simulink Design Optimization toolbox*[®].

а) Изолирана ЕЕС

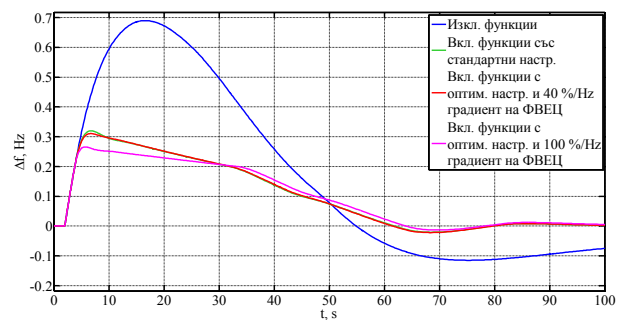
Разработена е структурна схема за изследване на изолирана ЕЕС с участие на ВЯЕЦ и ФВЕЦ. Освен генераторите използващи ВЕИ, в структурата са включени и моделите на конвенционалните електрически централи. За опростяване на изследването се допуска, че всички парни турбини са представени с един модел, вместо с модел за всеки отделен агрегат. Същото се отнася и за водните турбини. Освен това в структура са заложили по две групи водни и парни турбини – такива, които участват в регулирането на честотата и активната мощност (свързани към системния регулатор), и такива които не участват. Генераторите използващи ВЕИ нямат връзка със системния регулатор.

На Фигура 4.66 е показано изменението на честотата на изолираната ЕЕС при дефицит на генерираща мощност 2 %. Графиката показва резултатите получени за три случая на конфигурация на функциите за управление на ветрогенераторите. Наличието на функции за честотна реакция на вятърните турбини, може да окаже съществено влияние при отработването на смущение в честотата. Вижда се, че с разработената методика може да се постигне голямо подобрене спрямо стандартно препоръчаните настройки. Без наличие на функции за реакция при смущения в честотата тя пропада с 0.66 Hz, докато с оптимизирани настройки понижението е с едва 0.35 Hz.

Направено е и изследване при излишък на генерираща мощност от 2 %, т.е. случай на повишаване на честотата (вж. Фигура 4.67). В такава ситуация ФВЕЦ също реагират на смущението, редуцирайки своята изходна мощност по зададен градиент (вж. Фигура 2.41). По-забележимо подобрене се забелязва при увеличаване на градиента (наклона на характеристиката) на редукция на мощността на ФВЕЦ. Във всички разгледани случаи с включени функции за честотна реакция се наблюдава двойно по-малко отклонение на честотата – около 0.3 Hz вместо 0.69 Hz.



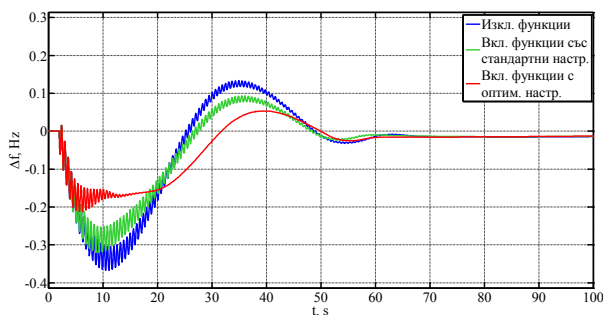
Фигура 4.66. Изменение на честота на изолирана ЕЕС при дефицит на генерираща мощност



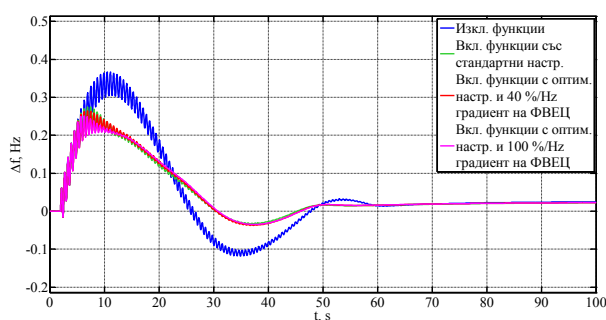
Фигура 4.67. Изменение на честота на изолирана ЕЕС при излишък на генерираща мощност

б) Обединени ЕЕС

Разработен е структурен модел за изследване на влиянието на генераторите използващи ВЕИ, върху регулирането на честотата при смущения в обединени ЕЕС. Модела включва ЕЕС на България и тези на съседните държави. На Фигура 4.69 и на Фигура 4.70 е показано изменението на честотата на ЕЕС на България, съответно при дефицит и излишък на генерираща мощност 0.1 о.е. (при базисните условия на българската ЕЕС). Разгледаните случаи са аналогични на тези в предходната подточка. Отново се забелязва значително подобряване на реакцията на ЕЕС при смущения в честотата, като изменението й около половината от това при изключени допълнителни функции на ВЯЕЦ и ФВЕЦ (и особено при оптимизирани параметри).



Фигура 4.69. Изменение на честота на Българската система при дефицит на генерираща мощност в нея



Фигура 4.70. Изменение на честота на Българската система при излишък на генерираща мощност в нея

4.3. Изводи

Резултатите от разработката на тази глава са обобщени в 10 изводи.

Основни изводи и приложения за практиката

Основните резултати с приносен характер от дисертационния труд са:

1. Обоснована е необходимостта от създаване на математични модели за изследване на влиянието на генераторите използващи ВЕИ върху режимите на ЕЕС.
 - Приетата от ЕС политика за понижаване на вредните емисии, стимулира изграждането на централи използващи вятър, слънце, биомаса и др. за производство на електроенергия. В този смисъл генераторния състав се изменя и проблемът с моделирането на влиянието на новите генериращи източници върху режимите на ЕЕС става актуален.
 - Налице са проблеми в практиката при присъединяването на централи използващи ВЕИ, свързани основно с претоварване на мрежата, регулиране на активната мощност, честотата, реактивната мощност и напреженията, устойчивостта ѝ при големи и малки смущения.
 - Технологиите на електропроизводството от ВЕИ включва съвременни електрони преобразуватели, които съществено влияят върху токовете на къси и земни съединения.
2. Създаден е математичен модел на ЕЕС включващ генератори използващи ВЕИ за изчисляване на установени режими. Отличителните характеристики на създадения модел са:
 - Математичното описание на ЕЕС е в трифазни координати, като е обоснована необходимостта за това.
 - Използван е итерационния метод на Нютон за решение на потокоразпределението, с който се постига висока точност на решението, както за затворени, така и за радиални мрежи.
 - Разработен е алгоритъм за намиране на началните приближения за ъглите и големините на напреженията, с който се постига сходимост към решението, като се отчитат и групите на свързване на силовите трансформатори.
 - Използван е структурен подход при съставяне на математичното описание на ЕЕС, който позволява лесното му допълване.
3. Създаден е математичен модел на ЕЕС за изчисляване на електромеханични преходни процеси, включващ генератори използващи ВЕИ, отличаващ се с:
 - Структура на математичното описание на ЕЕС, в трифазни координати, с комплексните стойности на токовете и напреженията.
 - Разработеният алгоритъм за интегриране на системата алгебрични и диференциални уравнения използва метода на трапеца и метода на Нютон. Алгоритъмът се характеризира с висока точност и числова устойчивост.
 - Моделирането с трифазни координати позволява изчисляването на всички видове надлъжни и напречни повреди на електропроводни линии и трансформатори.

- Разработен е алгоритъм за връзка между изходния установен режим и аварийния режим в момента на възникване на смущението. Решава се линейна задача, като се отчитат магнитната инертност в генераторите. Получават се начални приближения за решаване на нелинейната задача в стадия на преходния режим.
 - Решен е проблема с изчисляването на променливите на състоянието на математичния модел на двойно-свързан ветрогенератори, като е създаден двустъпков подход за инициализация на моделите на генератора и турбината. Спрямо известните от литературата, разработеният подход предоставя пълно съответствие между механичната и електрическата мощност, и дава възможност за точна инициализация при наличие на обмен на реактивна мощност през мрежовия конвертор.
4. Създаден е математичен модел на ЕЕС за изчисляване на електромагнитни преходни процеси в съединителните мрежи на централите използващи ВЕИ. Достоинствата на модела са:
- Универсална структура на диференциалните уравнения, описващи електромагнитните преходни процеси в ЕЕС, позволяваща последващо допълване на базата с модели.
 - Диференциалните уравнения са записани с моментните стойности на токовете и напреженията.
 - Формирана система от линейни диференциални уравнения е хомогенна и може да бъде решена с метода на матричната експонента или чрез дискретизиране на описанието, при висока точност на решението.
 - Разработеният алгоритъм за намиране на началните условия е бърз и не изисква изчисляване на потокоразпределението.
 - Интегрирането с използване на дискретен модел позволява анализирането на големи мрежи.
 - Могат да бъдат изчислявани всички видове къси и земни съединения;
 - Числовото решение на системата уравнения, за разлика от Simulink®, не показва некоректни резултати при мрежи с изолирана неутрала;
5. Приложен е алгоритъм за вероятно потокоразпределение с размити множества за оценка на влиянието на генераторите използващи ВЕИ и са установени предимствата и недостатъците му.
6. Създаден е алгоритъм за вероятно потокоразпределение с използване на метода на Монте Карло, за изследване на влиянието на генераторите използващи ВЕИ. Алгоритъмът има предимства пред този с размити множества и други известни алгоритми, заключаващи се в:
- Отчита неопределеността на товарите и генерацията от ВЕИ, като предоставя подробна картина на вероятностите за претоварване на преносни елементи и за нивата на напреженията във възлите.
 - Съблюдава се спазването на баланса между потребление и производство, благодарение на което се разглеждат единствено реалистични случаи.
 - Изисква се минимално количество входни данни за провеждане на изчисленията – единствено граници на изменение на мощността на генераторите и товарите.
 - Не се изисква решаването на оптимизационни задачи, което прави алгоритъма лесен за реализиране в програми с отворен код.
 - Вероятността за коректна оценка на вероятностите се влияе от броя изчислени случаи, но не и от размера на изследваната ЕЕС.
7. Създадена е компютърната програма *Power System Research*, която реализира разработените математични модели в дисертацията, за изчисляване на детерминирани и вероятностни установени режими, електромеханични и електромагнитни преходни процеси. Тази програма се отличава от известните конвенционални програми с това, че позволява да се правят подробни анализи на симетрични и несиметрични установени режими, и преходни режими породени от еднократни и сложни видове повреди, в ЕЕС включваща и централи използващи ВЕИ.

8. Направено е систематизирано изследване на влиянието на ВяЕЦ и ФВЕЦ върху нивата на късите и земни съединения в електрическите мрежи. Анализирани са проблемите с приложението на цифровите токови защиты в този вид централи.
9. Разработените математични модели и алгоритми са приложени при обобщено представяне на ФВЕЦ „Казанлък – Ясеново, Голямо Дряново“, като еквивалентен генератор за целите на настройка на релейните защиты по изискванията на Електроенергийния Системен Оператор (ЕСО ЕАД).
10. Установена е възможността за подобряване на демпфирането на критичните моди, чрез регулиране на реактивната мощност на централите използващи ВЕИ, без да се налага намеса в пазара на активна енергия. По този начин може да се повиши запаса на устойчивост на установените режими при малки смущения.
11. Разработени са структурни модели за изследване на влиянието на централите използващи ВЕИ върху регулирането на честотата на ЕЕС и алгоритъм за оптимизация на параметрите на техните регулатори на мощността, в зависимост от честотата. Чрез тези алгоритми е установено:
 - Възможност за подобряване на регулирането на честотата на ЕЕС с използване на функциите на ВяЕЦ и ФВЕЦ, дори при дял на ВЕИ в електропроизводството около 20 %.
 - С оптималните настройки се постигна значително подобрене при регулирането на честотата, изразяващо се в намаляване на амплитудата на нейното отклонение и времетраенето на преходния процес.

Приноси на дисертационния труд

Научни приноси

- Създаване на нови структури на математични модели на ЕЕС, във фазни координати, приложими за анализи на установени и преходни режими, при сложни видове повреди и наличие на генератори използващи ВЕИ;

Научно-приложни приноси

- Създаване на математични модели за изследване на установени режими, електромеханични и електромагнитни преходни процеси в ЕЕС с участие на генератори използващи ВЕИ;
- Създаване на алгоритъм за вероятностно потокоразпределение с отчитане на неопределености;
- Създаване на алгоритъм за оценка на влиянието на генерацията от ВЕИ върху устойчивостта на ЕЕС при малки смущения;
- Създаване на математични модели на ЕЕС за изследване на регулирането на честотата и алгоритъм за изчисляване на целесъобразни настройки на регулаторите на генераторите използващи ВЕИ;

Приложни приноси

- Създаване на компютърни програми за решаване на актуални проблеми за отрасъл Електроенергетика, свързани с увеличаващия се дял на генераторите използващи ВЕИ;
- Систематизирано изследване на влиянието на ВяЕЦ и ФВЕЦ върху режимите на ЕЕС, при смущения с глобално и локално проявление.

Публикации по дисертационния труд

1. Николаев, Н., Кр. Герасимов, Ю. Рангелов. Изчисляване на токовете на къси съединения от ветрогенератори за нуждите на релейната защита. Годишник на ТУ-Варна, 2011, ISSN: 1311-896X, Варна, България, с. 36-41, vol. 1
2. Герасимов, Кр., К. Герасимов, Н. Николаев. Методика и компютърна програма за изчисляване във фазни координати на несиметричните установени режими в електроразпределителните мрежи. Годишник на ТУ-Варна. 2011, ISSN: 1311-896X, Варна, България, с. 45-50. , vol. 1

3. Николаев, Н. Компютърна реализация на математичен модел на двустранно-захранен ветрогенератор. Трети международен научен конгрес, 50 години ТУ-Варна, 04-06 окт 2012, Варна, България, ISBN 978-954-20-0552-0 Vol. 3, с. 93-98
4. Николаев, Н., Кр. Герасимов. Компютърна програма Power System Research за изследване на симетрични и несиметрични установени и преходни режими във фазни координати. Трети международен научен конгрес, 50 години ТУ-Варна, 04-06 окт 2012, Варна, България, ISBN 978-954-20-0552-0 Vol. 3, с. 87-92
5. Nikolaev, N., K. Gerasimov, Y. Rangelov, Kr. Gerasimov. An Algorithm for Assessment of the Impact of Renewable Energy Sources on the Power flow of the Electric Power System (Алгоритъм за оценка на влиянието на ВЕИ върху установените режими на ЕЕС). Conference Proceeding of the 12th International conference on Environment and Electrical Engineering, Wroclaw, Poland, 5-8 May 2013, ISBN 978-1-4673-3058-9, pp 203-208, DOI 10.1109/EEEIC.2013.6549611. **(реферирана в SCOPUS)**
6. Nikolaev, N., Y. Rangelov, K. Gerasimov, Kr. Gerasimov. Influence of Wind Turbine Generators on the Frequency of the Electric Power System During Large Disturbances (Влияние на ВЯЕЦ върху регулирането на честотата при смущения). Conference Proceeding of the 12th International conference on Environment and Electrical Engineering, Wroclaw, Poland, 5-8 May 2013, ISBN 978-1-4673-3058-9, pp 209-213, DOI 10.1109/EEEIC.2013.6549612. **(реферирана в SCOPUS)**
7. Николаев, Н., Кр. Герасимов, Ю. Рангелов, К. Герасимов. Модели на двустранно-захранени ветрогенератори и тяхното приложение. Списание Енергетика, НЕК ЕАД, 2013, брой 4, ISSN 0324-1521, сс 15-23
8. Nikolaev, N. Probabilistic assessment of the impact of renewable energy sources on the power flows of medium voltage grids (Вероятностна оценка на влиянието на ВЕИ върху установените режими на мрежи средно напрежение). International Conference ICEST 2013, Ochrid, Macedonia, 26-29 June 2013, ISBN 978-9989-786-90-7, pp 325-328
9. Николаев, Н., Кр. Герасимов. Програма за изчисляване на електромагнитни преходни процеси при къси и земни съединения в разпределителните мрежи, чрез използване на моментните стойности на режимните параметри. Сборник научни доклади „Принос за развитие на технологичен предприемачески дух и насоченост на инженерните изследвания към развитие на икономика, базирана на знание и иновации“, ТУ-Варна, 2014, ISBN 978-954-760-316-6, сс 92-100

Abstract (Резюме на английски език)

The PhD thesis consists of four chapters. The first chapter starts with a short literature overview of the modern electric power systems (EPS). Different modelling approaches are discussed and the necessity for use of three-phase grid representation is justified. An overview of the existing algorithms for analysis of the power system operation is also conducted. The advantages and drawbacks of the available software tools for computations in EPS are commented. Conclusions are made based on the literature overview and the main objectives of the thesis are specified.

Chapter 2 formulates the mathematical models of the grid, the conventional synchronous generators and the modern generators, based on renewable energy sources (RES) with various degree of details. The last section of the chapter presents a structural approach for defining a common set of equations of the conventional part of the EPS and the generators based on renewables.

The main objective of chapter 3 is the development of computer programs based on models for analysis of steady-state and transient processes of the EPS. A three-phase power flow algorithm is developed using the iterative Newton method. To ensure the convergence of the solution, an algorithm for computation of good initial guess is proposed. An algorithm for three-phase time-domain simulations of electromechanical transients of the EPS including generators based on renewables is also created. An algorithm is developed for computation of electromagnetic transients with the instantaneous voltages and currents, during faults in the grids of RES power plants. All algorithms are implemented in a computer software named Power System Research. The last section of chapter 3 aims to develop simplified models of the EPS suitable for analysis of the impact of wind turbines and photovoltaic plants on the regulation of the frequency during disturbances.

Chapter 4 presents a research on the RES impact on the operation of the EPS. Two probabilistic power flow algorithms are developed to analyze the impact on the lines and transformers loading, the voltage levels and

therefore to determine the acceptable operation modes of the RES power plants. The first algorithm is based in the fuzzy logic theory, while the second one on the Monte Carlo method. The algorithms are tested and compared on real transmission and distribution grids. The chapter also presents a comprehensive study on the short-circuit and earth-fault currents of the most generator types based on RES. Issues with the application of conventional relay protection are also discussed. An algorithm for assessing the impact of RES on the small-signal stability of the EPS is developed using an eigenvalue sensitivity approach. Possible measures for improving the stability are commented. A study on RES's impact on the frequency regulation of the EPS is conducted and a procedure for optimal tuning of their regulators is proposed.

The main conclusions and the author's original contributions in the PhD thesis are summarized at the end.

Резюме на русском язык (Резюме на руски език)

Диссертация состоит из четырех глав. Глава первая представляет собой краткий обзор особенностей структуры современных электроэнергетических систем (ЭЭС). Выполнен обзор различных подходов к созданию математических описаний составных компонентов ЭЭС, обоснована необходимость исследования проводить в трехфазных координатах. Представлены алгоритмы анализа режимов в ЭЭС, известных из литературы. Выполнен анализ преимуществ и недостатков имеющегося программного обеспечения по исследованию ЭЭС. На основании обзора литературы представлены выводы, из которых определены цель и задачи диссертации.

В главе второй формируются математические описания элементов электроэнергетических сетей и синхронных агрегатов в обычных электростанциях. Там же представлены и математические описания генераторов на электростанциях, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ), с разной степенью детализации. Последний раздел этой главы призван дать структурный подход для составления общего математического описания элементов ЭЭС, в том числе и генераторов на ВИЭ.

Основной целью третьей главы является разработка моделей для исследования установившихся и переходных процессов в электроэнергетических системах. Разработана модель для расчета установившихся режимов методом Ньютона в трехфазных координатах. Предложен метод поиска подходящих начальных условий, с которыми достигается сходимость решения. Разработана и модель для расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме, содержащей электрогенераторы, использующие возобновляемые источники энергии, тоже в трехфазных координатах. Разработана математическая модель для расчета электромагнитных переходных процессов, с мгновенными значениями режимных параметров, при замыканиях на землю в распределительных сетях, питающихся от электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии. Разработано компьютерная программа *Power System Research*, параметры которой описаны в этой главе. Последний раздел третьей главы направлен на построение упрощенной модели ЭЭС, пригодной для исследования процессов управления частотой с участием генераторов, использующих возобновляемые источники энергии, а также для расчета оптимальных настроек их регуляторов.

Глава 4 направлена на изучение влияния генераторов, использующих ВИЭ, на режимы работы ЭЭС. Разработано два алгоритма для вероятностного расчета потокораспределения, чтобы с ними учесть их влияние на нагрузку элементов сети, на уровень напряжений, а также и способы регулирования генераторов, использующих ВИЭ. Первый алгоритм основан на теории нечетких множеств, а второй – на методе Монте-Карло. Алгоритмы применялись к реальной сети высокого напряжения и к распределительной сети среднего напряжения. В этой главе сделан и полный анализ режимов короткого замыкания и замыкания на землю для всех, наиболее распространенных, и рассмотренных во второй главе, типов генераторов, использующих ВИЭ. Здесь исследованы и проблемы, которые наблюдаются специально в цифровых релейных защитах. На основе алгоритма нахождения чувствительности собственных значений выполнена оценка влияния ВИЭ на устойчивость ЭЭС при малых возмущениях, а также и возможностей для ее улучшения. Исследовано регулирование частотой энергосистемы. Разработана методика оптимизации настроек регуляторов генераторов, использующих возобновляемые источники энергии, имеющие отношение к регулированию частоты.

В заключении представлены обобщенные выводы по диссертации.

Благодарности

Авторът желае да изкаже своите благодарности на:

- Научния си ръководител проф. д-р инж. мат. Крум Костов Герасимов за неговата посветеност и всеотдайност;
- Доц. д-р инж. Ангел Маринов Врангов, доц. д-р инж. Йончо Любенов Каменов, д-р инж. Юлиан Емилов Рангелов и д-р инж. Константин Крумов Герасимов за непрекъснатата им, всеотдайна подкрепа при разработването на дисертационния труд;
- Доц. д-р инж. Кольо Василев Тасев за превода на резюмето към автореферата на руски език;
- Целия състав на катедра „Електроенергетика“ за съдействието и осигуряването на отлични условия, като предпоставка за успешното разработване на дисертацията.

Настоящия документ е изготвен с финансовата помощ на Европейския социален фонд, чрез подкрепа по ОП „Развитие на човешките ресурси“ BG05PO001-3.3.06-0005: „Развитие потенциала на докторанти, постдокторанти, млади учени и специализанти от инженерните науки в ТУ-Варна и техния принос за развитие на икономика, базирана на знанието“. Авторът носи цялата отговорност за съдържанието на настоящия документ и при никакви обстоятелства не може да се приеме като официална позиция на Европейския Съюз или на ТУ-Варна.

Съдържание

| | |
|--|----|
| Характеристика на дисертационния труд | 1 |
| Актуалност на проблема..... | 1 |
| Проблем | 1 |
| Цел и задачи на изследването | 1 |
| Обект и предмет на изследването..... | 1 |
| Методи, използвани при изследването | 2 |
| Място на изследване | 2 |
| Научна новост на изследването | 2 |
| Практическа ценност на изследването | 2 |
| Апробация на изследването | 2 |
| Публикации по дисертационния труд | 3 |
| Съдържание на дисертационния труд | 3 |
| ГЛАВА 1. Режими на работа на съвременните електроенергийни системи. Проблеми при изследването им | 3 |
| 1.1. Литературен обзор | 3 |
| 1.2. Изводи | 3 |
| 1.3. Цел и задачи на дисертацията | 3 |
| ГЛАВА 2. Формиране на математично описание на ЕЕС съдържаща и генератори използващи ВЕИ..... | 3 |
| 2.1. Математично описание на елементите на електрическата мрежа..... | 3 |
| 2.2. Математично описание на синхронните агрегати в конвенционални електрически централи | 4 |
| 2.3. Математично описание на генератори в централи използващи ВЕИ | 4 |
| 2.4. Обединяване на описанието на елементите на ЕЕС в общо описание..... | 9 |
| 2.5. Изводи | 9 |
| ГЛАВА 3. Разработване на компютърни модели за изследване на установени и преходни режими на ЕЕС | 10 |
| 3.1. Модел за изчисляване на установени режими на ЕЕС с включени генератори използващи ВЕИ | 10 |
| 3.2. Модел за изследване на електромеханични преходни процеси в ЕЕС включващи генератори използващи ВЕИ | 11 |
| 3.3. Модел за изчисляване на електромагнитни преходни процеси, чрез използване на моментните стойности на режимните параметри, при къси и земни съединения в мрежи с генератори използващи ВЕИ | 12 |
| 3.4. Възможности на разработената програма Power System Research | 14 |
| 3.5. Валидиране на разработения програмен комплекс | 14 |
| 3.6. Модели за изследване на влиянието на генератори използващи ВЕИ върху регулирането на честотата в ЕЕС | 15 |
| 3.7. Изводи | 16 |
| ГЛАВА 4. Изследване на влиянието на генератори използващи ВЕИ върху режимите на ЕЕС | 16 |
| 4.1. Влияние върху установените режими на ЕЕС..... | 16 |
| 4.2. Влияние върху преходните режими на ЕЕС | 21 |
| 4.3. Изводи | 27 |
| Основни изводи и приложения за практиката..... | 27 |
| Приноси на дисертационния труд | 29 |
| Abstract (Резюме на английски език)..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Резюме на русском язык (Резюме на руски език) | 31 |
| Благодарности | 32 |
| Съдържание | 33 |