

**ВВМУ „НИКОЛА ЙОНКОВ ВАПЦАРОВ”  
ФАКУЛТЕТ „ИНЖЕНЕРЕН”**

---

---

**Катедра „Електротехника”**

**инж. СТЕФАН АТАНАСОВ ФИЛЧЕВ**

**ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОБЛЕМИТЕ НА  
ПРИСЪЕДИНЯВАНИТЕ ВЕТРОПАРКОВЕ  
В ЕНЕРГИЙНАТА СИСТЕМА**

**АВТОРЕФЕРАТ  
на дисертационен труд  
за получаване на образователната и  
научна степен ДОКТОР**

**Професионално направление Транспорт,  
корабоплаване и авиация  
Научна специалност  
02.04.15 Електроснабдяване и електрообзавеждане (по отрасли)**

**Научен ръководител  
професор, доктор на техническите науки Н.Ф.Джагаров**

**Варна  
2014**

Дисертационният труд се състои от 178 страници.

Основен текст – 168 страници.

Брой на литературни източници – 169

Брой на фигурите – 122

Брой на таблиците – 4

Брой на публикациите по дисертацията – 8

Защитата на дисертационния труд ще се състои на .....  
от ..... часа в зала ..... на ВВМУ Н.Й.Вапцаров.

Рецензиите, становищата на членовете на научното жури и авторефератът са публикувани в сайта на училището  
[www.naval-acad.bg](http://www.naval-acad.bg)

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в катедра Електротехника.

Адрес: 8026 Варна, ул. Васил Друмев, 73

**ВВМУ „НИКОЛА ЙОНКОВ ВАПЦАРОВ”  
ФАКУЛТЕТ „ИНЖЕНЕРЕН”**

---

---

**Катедра „Електротехника”**

**инж.СТЕФАН АТАНАСОВ ФИЛЧЕВ**

**ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОБЛЕМИТЕ НА  
ПРИСЪЕДИНЯВАНИТЕ ВЕТРОПАРКОВЕ  
В ЕНЕРГИЙНАТА СИСТЕМА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**на дисертационен труд  
за получаване на образователната и  
научна степен ДОКТОР**

**Професионално направление Транспорт,  
корабоплаване и авиация  
Научна специалност**

**02.04.15 Електроснабдяване и електрообзавеждане (по отрасли)**

**Научен ръководител  
професор, доктор на техническите науки Н.Ф.Джагаров**

**Варна  
2014**

Дисертантът работи в Енергиен системен оператор ЕАД, клон Варна и е зачислен в свободна докторантура в катедра „Електротехника“ при факултет „Инженерен“ на ВВМУ Н.Й.Вапцаров.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Електротехника“ на ВВМУ Н.Й.Вапцаров, Енергиен системен оператор ЕАД, клон Варна.

Дисертационният труд е насочен за защита от съвета на Факултет „Инженерен“ при ВВМУ Н.Й.Вапцаров в съответствие с чл.5, ал.1 от ЗРАС.

Автор: Стефан Атанасов Филчев

Заглавие: Изследване проблемите на присъединяваните ветропаркове в енергийната система

Тираж: ..... броя

## ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА

Ветроенергията е атрактивна поради няколко причини. Тя е неизтощим източник на енергия, не води до замърсяване и до климатични аномалии, производството ѝ не е скъпо. Притежава качества, които нито един от традиционните енергийни източници за производство на електричество няма. Експлоатационните разходи, или по-точно липсата на такива за закупуване на горива при производството на енергия, правят вятъра особено привлекателен като енергиен източник.

В България също съществува потенциал за изграждане ветрови паркове в крайбрежната ни ивица и в места с надморска височина над 1000 м. Бъдещото развитие в подходящи планински зони и такива при по-ниски скорости на вятъра зависи от прилагането на нови технически решения.

Използването на ветроенергията, заедно с рационалното използване на енергията е важно за устойчивото развитие и същевременно осигурява постигането на целите за сигурност на енергийните доставки и намалява зависимостта от резки промени на цените на въглеводородите допринася за намаляване на търговския дисбаланс.

Масовото усвояване на ветровата енергия с много големи темпове започва през 90-те години на 20 век. Усъвършенстваха се технологиите на използваните ветрогенератори, нараснаха единичните им мощности и размерите им. Инсталираните ветропаркове съставят все по-голяма част от енергийната мощност на отделните държави, достигайки до 20% и повече процента от общата мощност.

Заедно с това възникнаха многобройни проблеми от икономическо, екологично, социално и техническо естество.

Изискванията за намаляване на изхвърлянето на въглероден диоксид предизвикаха въвеждането на икономически стимули за разработката и внедряването на ветрогенератори и ветропаркове. Това обаче създаде екологични проблеми, свързани главно с въздействието на ветропарковете върху популацията и миграцията на птиците. Икономическите стимули доведоха до повишаване на дела на по-скъпата ветроенергия, а оттам и до повишаване на крайната цена за потребителите, което създаде недоволство и съпротива срещу възобновяемите енергийни източници.

Обаче, основните проблеми са техническите. Основната трудност при това е генерация на качествена електроенергия при променлива скорост на въртене на ветротурбините. Случайният характер на генерация на ветропарковете изисква осигуряване на доста-

тъчно заместващи мощности или акумулиращи мощности, способни да осигурят компенсация на необходимата мощност за товарите. Разположението на ветропарковете е в места с максимална ветрови потенциал, които обикновено са далеч от центровете на максимална консумация. Изменят се потоците мощности в преносните и разпределителните мрежи. Това изисква въвеждането на допълнителни трансформаторни, преносни и разпределителни мощности, които имат висока цена. Възниква необходимост от разработката на нови схеми на оптимално управление на електроенергийната система. Ветропарковете изискват регулируеми компенсатори на реактивна мощност, за да се намалят загубите в мрежата. Възникват проблеми и с осигуряване на устойчивостта на работа на електроенергийната система. Необходима е разработка и внедряване на изисквания за включването и управлението на ветропарковете в електроенергийната система.

Мотивите за написването на дисертацията са свързани с моята над 20 годишна работа в Електроразпределително дружество, клон Варна, което след реорганизацията на българската енергетика носи името Енергиен системен оператор, клон Варна. През последните години, когато започна широкото навлизане на ветроенергетиката в България, аз отговарях за присъединяването на ветропарковете в Североизточна България към електрическата мрежа. Моята работа бе свързана с редица проблеми, възникващи при интеграцията на ветропарковете в енергийната система.

В дисертацията се разглежда и разработва част от изброените технически проблеми, резултат на моята работа в Енергийния системен оператор, Варна и на обучението ми в докторантура във Висшето военноморско училище Н.Й.Вапцаров, Варна.

Обекти на изследването са ветрогенераторите, ветропарковете, интегрирането им в електроенергийната система.

Предмети на изследването са: генерацията на ветрова енергия в Североизточна България и качеството на произвежданата електроенергия; техническите загуби при пренос и разпределение на ветровата електроенергия; изискванията към присъединяваните ветропаркове; математическото моделиране на процесите в електроенергийната система, съдържаща ветропаркове с различен тип ветрогенератори, в нормални и аварийни режими на работа; компенсирането на реактивната мощност на ветропарковете и управлението на различен тип компенсатори.

Цел на дисертационната работа е изследване и решаване на някои основни технически проблеми, свързани с присъединяването на ветропарковете в енергийната система.

За да се постигнат целите на изследванията се решават следните основни задачи:

- Оценка на ветровите ресурсите в Европа и България
- Класификация и обзор на ветровите генериращите агрегати и системи;
- Изследване на производството на ветроенергия в североизточна България;
- Изследване на загубите при пренос и разпределение на електроенергията;
- Изисквания към ветропарковете за работата им в електроенергийната система;
- Изследване на качеството на електроенергията, произвеждана от ветрогенераторите;
- Създаване на математически модели на ветропаркове, съдържащи различни типове ветрогенератори и интегрирани в електроенергийната система;
- Изследване на автономна работа и работа в енергийна система на ветрогенератори в статични и динамични режими на работа.
- Компенсация на реактивната мощност;
- Управление на системни средства, компенсирани реактивната мощност и подобряващи качеството на генерираната електроенергия.

Дисертационната работа има системен характер и затова няма единна хипотеза.

При изпълнение на формулираните задачи се използват различни методи за изследване и решение на проблеми. Информация за произвежданата ветроенергия е получавана от ветропарковете и от Енергийния системен оператор. Качеството на произвежданата електроенергия е оценено с помощта на измервателна апаратура на ветропарковете, Енергийния системен оператор и собствени средства за измерване, съхранение и обработка. Изискванията към присъединяваните ветропаркове са формулирани на базата на събраната информация за тези изисквания (grid code) в страните с най-голям дял на ветроенергетиката. Техническите загуби са оценени с помощта на измервателни прибори с висока точност и методи на изчисление, приети в повечето приложни програмни системи, а разпределението на тези загуби между участниците в енергийния пазар – чрез обобщение на световния опит. Изследването на процесите в електроенергийни системи, съдържащи ветропаркове, е извършено с помощта на математическо моделиране на базата на уравненията на Парк-Горев на електрическите машини с използване на методите, предложени от Н.Джагаров. Компенсацията на реактивната мощност се извършва с

помощта на паралелни системни средства - статичен напречен компенсатор и статичен синхронен компенсатор. При управлението на компенсаторите се използват идентификационни методи с помощта на наблюдатели, оценяващи параметрите и променливите на идентификационните модели.

Използваните методи и средства за решаване на поставените задачи са широко известни и признати от научната общност, те са използвани квалифицирано и коректно, поради което получените в дисертацията научни резултати са достоверни.

Научната новост на дисертацията се състои в доказване с нови средства на нови страни на вече съществуващи научни области и проблеми, както и създаване на нови схеми и средства.

Дисертационният труд бе разработван в течение на 7 години, като информацията и данните за производството и състоянието на ветропарковете е събирано в този период.

Резултатите на дисертационния труд са публикувани в България (3 публикации) и в чужбина (5 публикации). Публикациите бяха докладвани на „Енергиен Форум”, Варна, 2011 и 2012, 10<sup>th</sup> WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '10), Iwate Prefectural University, Japan, 2010; 6<sup>th</sup> International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering “Elektroenergetika 2011”, Kosice, Slovak Republic; 6<sup>th</sup> International Workshop on Deregulated Electricity Market Issues in South-Eastern Europe, 2011, Bled, Slovenia; III международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи», Екатеринбург 2012; 12<sup>th</sup> Electric Power Engineering EPE 2013, Ostrava, Czech Republic.

Една от статиите е реферирана в световните бази научни данни Scopus, British Libray и Compendex, а друга – в базата данни Web of Knowledge.



## **Първа глава: ОБЗОР НА ВЕТРОЕНЕРГЕТИКАТА**

Направен е обзор на развитието и оценка ветровите ресурси в света и в България. Посочени са предимствата и недостатъците на вятърната енергия, а също така и изискванията към ветроцентралите. Разгледани са основните фактори, допринасящи за развитието на ветроенергетиката.

Едновременно с това нараснаха и проблемите, свързани с това бурно навлизане на ветрогенераторите, предизвикано от случайния характер на генерираната от тях мощност. Те са свързани не само с осигуряване на резервираща мощност, а и с управлението на електроенергината система (ЕЕС), с осигуряване на устойчивостта на работа, с осигуряване на достатъчна пропускателна възможност на преносната мрежа, с ефективността на работа и снижение на загубите и т.н.

През 2012 г. в България електроенергията от възобновяеми източници е достигнала 11% от общото производство на електроенергия. Показани са основните характеристики на ветровата енергия в България, разделена на 8 района в зависимост от интензитета ѝ. Разгледана е икономическата целесъобразност за използването на ветровата енергия и са посочени 10 най-големи ветропаркове.

Посочени са петте направления на основните приоритети в Енергийната стратегия на България: гарантиране сигурността на доставките на енергия; достигане на целите за възобновяема енергия; повишаване на енергийната ефективност; развитие на конкурентен енергиен пазар и политика, насочена към осигуряване на енергийните нужди, и защита на интересите на потребителите.

Анализирано е развитието на преносната електрическа мрежа при присъединяването на възобновяеми енергийни източници (ВЕИ). Приведени са данни за прогнозните баланси на ВЕИ, а така също и сценария за новите мощности в ЕЕС на България.

Направена е класификация на ветровите турбини и диапазона на тяхното използване в зависимост от скоростта на вятъра. Приведена е зависимостта на изходната мощност на турбината в зависимост от нейния диаметър. Посочени са и двата начина за ограничаване на мощността на турбините: активни и пасивни ограничители.

Направена е класификация и на използваните типове генератори, като са посочени основните им характеристики, методи за управление, предимства и недостатъци. Посочено и разделението на ветрогенераторите на 4 групи в зависимост от скоростта им на въртене (постоянна, променлива) и използваните типове генератори.

Разгледани са проблемите на разпределената генерация. при-  
съединяване към енергийната мрежа; включване на енергията на вятъра в енергийната система (осигуряване стабилност на електрическо напрежение и на честотата на тока; компенсация при колебания в стойностите на мощността)

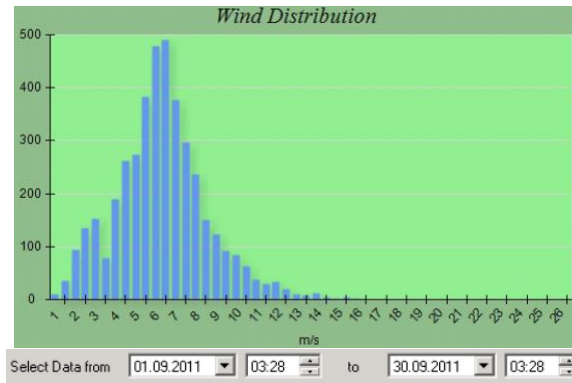
## **Втора глава. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЕТРОЕНЕРГЕТИКАТА В СЕВЕРОИЗТОЧНА БЪЛГАРИЯ**

Построяването на много ветропаркове и закриването на основните промишлени консуматори в Североизточна България преобръща посоката на енергийните потоци. Североизточна България се превърна от консуматор в експортър на електрическа енергия. Това предизвиква необходимост от реконструкция и оптимизация на електроенергийната инфраструктура, а също така предизвиква усложняване на управлението на електроенергийната система и увеличаване на загубите в мрежата.

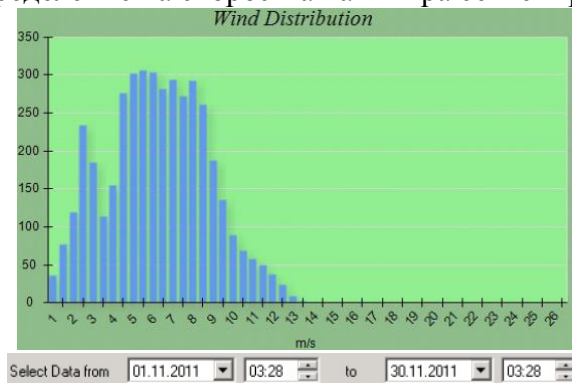
С построяването на парковете могат, и се събират данни за разпределението на ветровете в районите на разположение на ветропарковете. Тези данни служат при планирането и производството на електроенергия от ветропарковете, отношенията с Енергийния системен оператор и неговите регулиращи функции, и с развитието на електроенергийната инфраструктура.

Събраните данни за часовото, дневното, седмичното, месечното годишното разпределение на ветровете на различна височина, позволяват да се оптимизира изборът на инсталирана мощност, разположението на ветропарковете, планирането и строителството на преносна и разпределителна инфраструктура и регулирането на производството от Централния диспечерски център. Освен това тези данни служат за проверка и уточняване на картата на ветровете.

Разпределението на скоростта на вятъра показва зависимостта на времето/процента на вятър с определена скорост m/s. За да се получат тези зависимости е необходима информация за скоростта на вятъра през целия период на изследване. На следващите фигури е показана част от събраните данни за разпределение на скоростта на вятъра.



Фиг.2.1. Разпределение на скоростта на вятъра септември 2011 г. 80 м.



Фиг.2.3. Разпределение на скоростта на вятъра ноември 2011 г. 80 м.



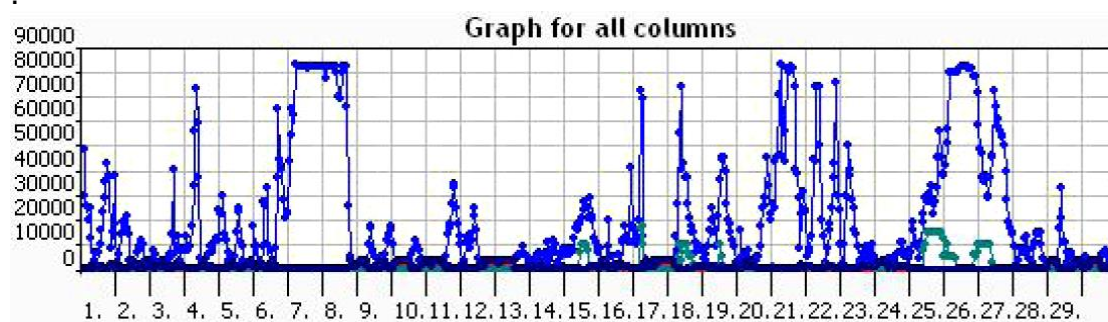
Фиг.2.9. Дневно разпределение на скоростта на вятъра и генерирана мощност 11:20 10.08. ÷ 11:20 11.08. 2011 г. 65 м.



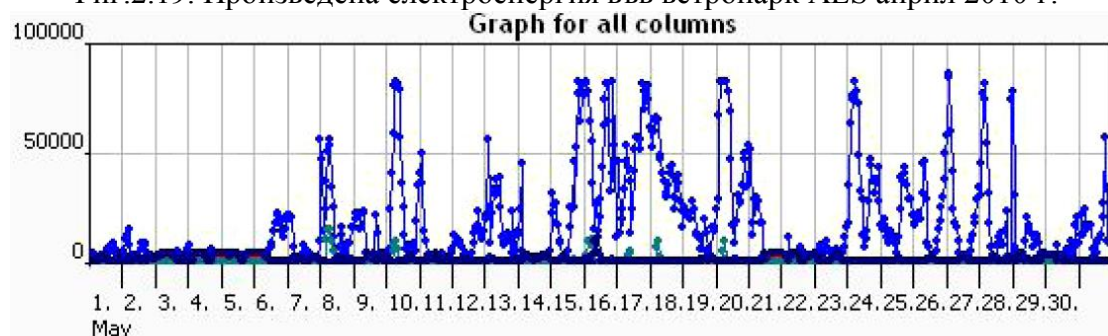
Фиг.2.12. Дневно разпределение на скоростта на вятъра

и генерирана мощност 11:20 26.08. ÷ 11:20 27.08. 2011 г. 65 м.

Бяха събрани данни за производството на ветрова електроенергия от вятърен парк "Свети Никола".



Фиг.2.19. Произведена електроенергия във ветропарк AES април 2010 г.



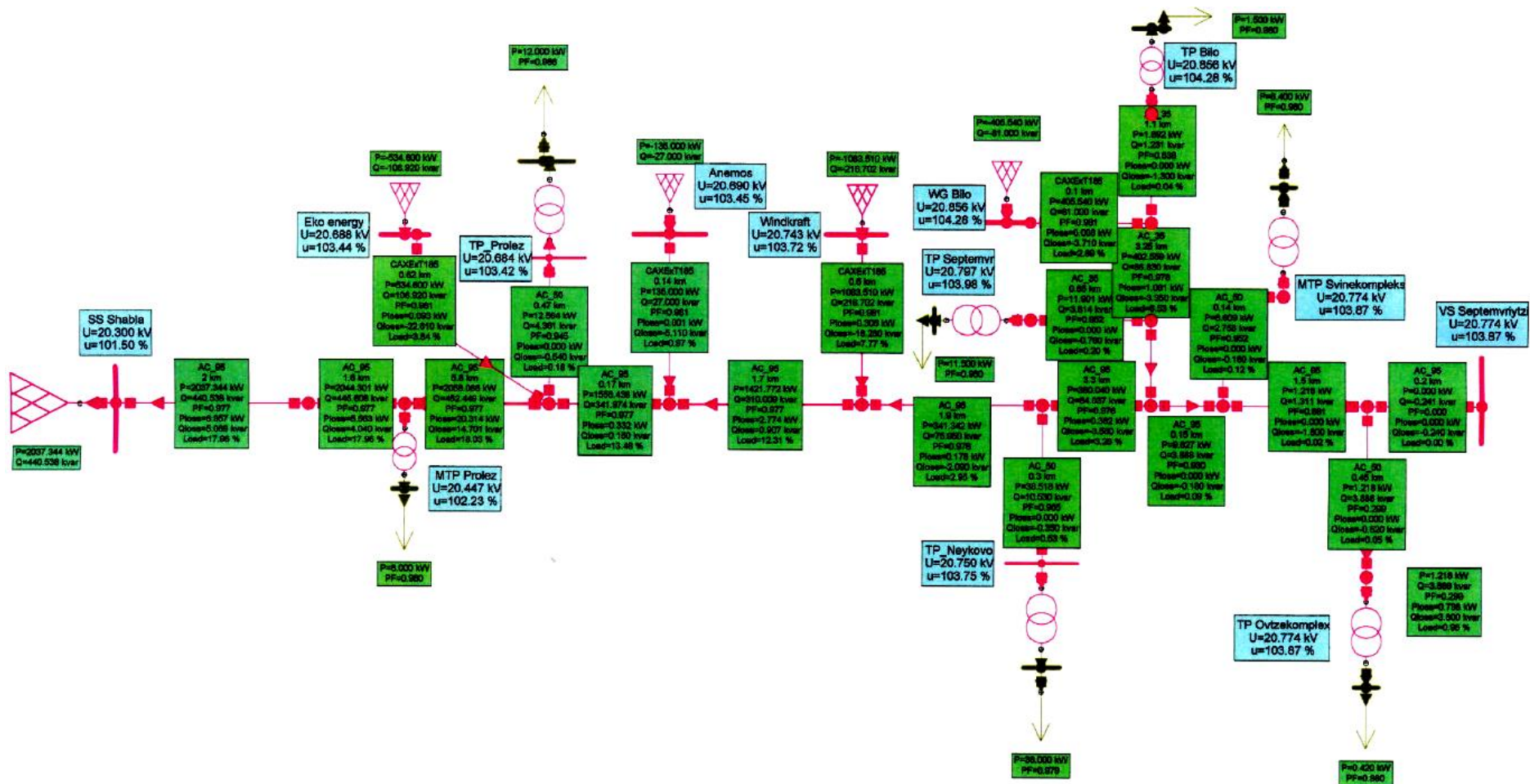
Фиг.2.20. Произведена електроенергия във ветропарк AES май 2010 г.

Изследвано е производството на ветрова електрическа енергия във ветропаркове в Североизточна България. Събрани са данни за изменението по часове на денонощието, по дни на седмицата, месечно и годишно производство. Направена е корелация между производството на електроенергия и изменението на скоростта на вятъра.

Констатирани са и са обобщени основните статистически показатели, които могат да се използват при краткосрочно и дългосрочно прогнозиране на изменението на ветровете и производството на ветрова енергия. Тези данни се използват също така и при планиране и управление на заявките и генерацията от Енергийния системен оператор.

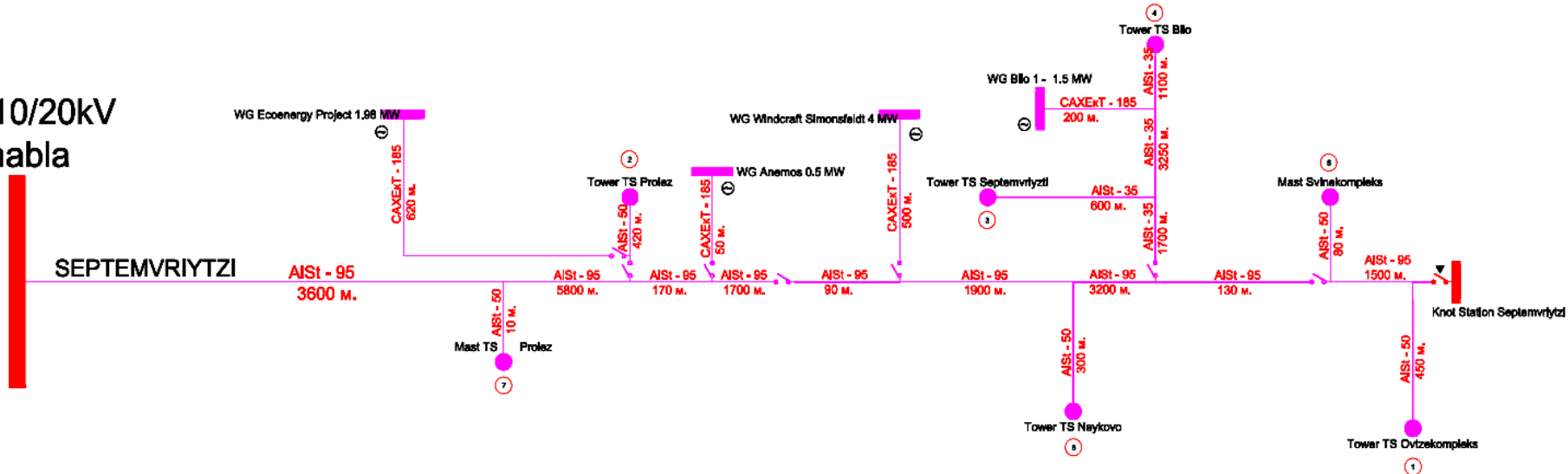
Техническите загуби при пренос и разпределение на ветровата енергия представляват важен фактор за ефективността на използване на ветровата енергия. Разпределението на загубите между производителите, националната електрическа компания и доставчиците може да повиши или да понижи доверието между различните оператори, собственици на мрежи, енергийни доставчици, които са отговорни за енергийния баланс, консуматорите и независимият енергиен системен оператор.

Направена е класификация на техническите загуби. Приведени са основните методи за изчисляването им. Приведени са и основните



Фиг.2.26. Пример за изчисление на загубите в статичен режим за участък Септемврийци - Шабла

SS 110/20kV  
Shabla



From	P Loss MW	Q Loss MVar	P Imp MW	Q Imp MVar	P Gen MW
Network	0,041	-0,025	-2,037	-0,441	2,159
Area 1	0,041	-0,025	0	0	2,159
Un	P Loss Line	Q Loss Line	P Loss Transformer	Q Loss Transformer	
kV	MW	MVar	MW	MVar	
20	0,038	-0,041	0,003	0,016	

Фиг.2.27. Пример за изчисление на загубите в статичен режим за участък Септемврийци - Шабла

методи за разпределение на загубите между участниците в енергийния пазар. Разгледани са основните оперативни, технически и организационни методи за намаляване на техническите загуби.

На фиг.2.26-фиг.2.27 е показан пример за изчисление на загубите в статичен режим за участък Септемврийци – Шабла.

Направен е обзор на изискванията към ветрогенераторите в различните страни. Подреждането на техническите изисквания в нормативния документ (grid code) и съпътстващите документи се систематизират по следния начин:

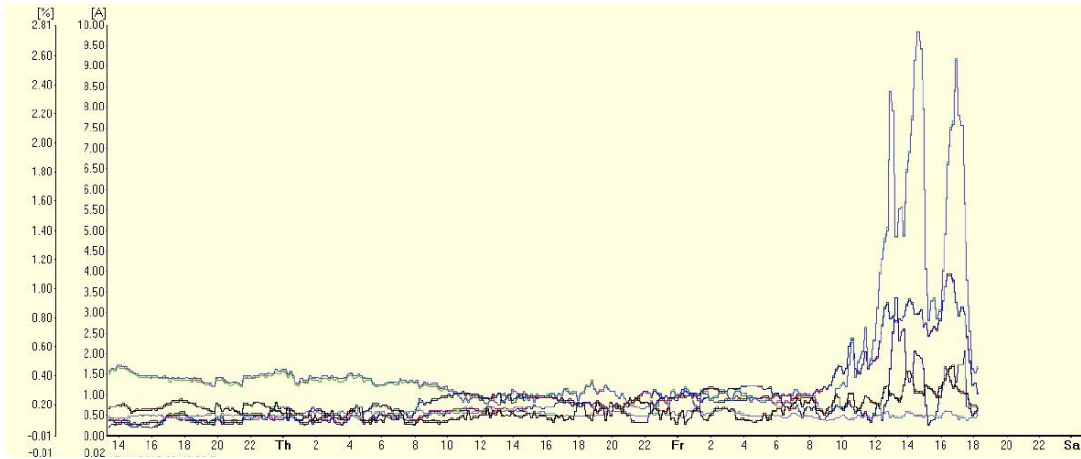
- Толеранс – диапазон от режими на електрическата система, при който ветропарковете трябва да продължат да работят;
- Управление на реактивната мощност – често това включва и управление на напрежението в мрежата;
- Управление на активната мощност;
- Защитни устройства;
- Качество на електроенергията.

Важно е да се отбележи, че често тези изисквания се отнасят за точката на присъединяване между ветропарка и мрежата. В този случай изискванията се отнасят за нивото на ветропарка и ветротурбините могат да се адаптират, да ги поддържат. Често производителите на ветрогенератори определят характеристиките на генераторите по-скоро от това на ветропарка. Възможно е също така някои изисквания да бъдат удовлетворени чрез допълнително обзавеждане, различно от ветрогенератора. На основата на обзора са направени предложения за българските изисквания.

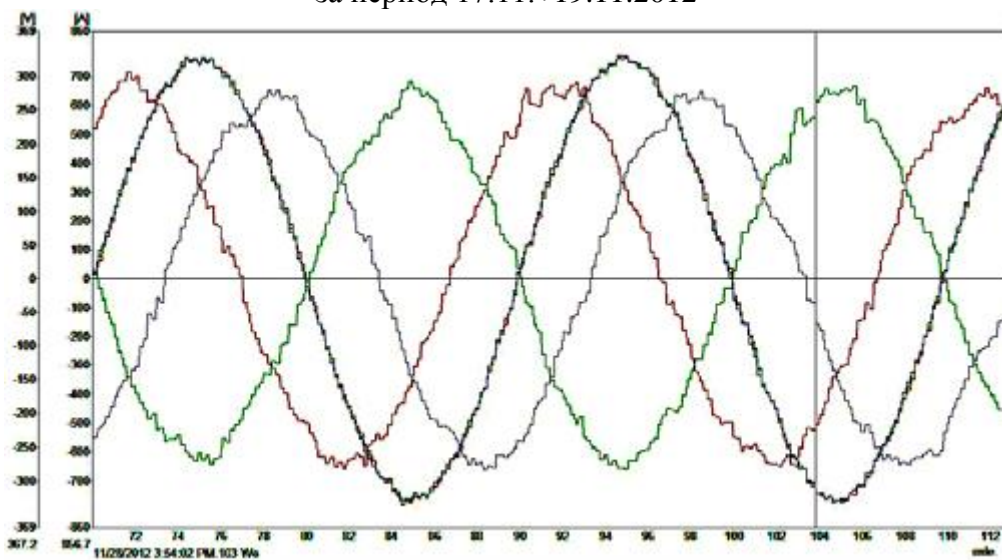
Описани са качественият показатели на електрическата енергия и отрицателното влияние на отклоненията им върху работата на основните елементи на електроенергийни системи.

Разгледани са изискванията към качеството на електроенергията (различните параметри, определящи това качество). Описани са различните методи, технически и математически средства за измерване, съхранение и обработка на данните за качеството на електроенергията.

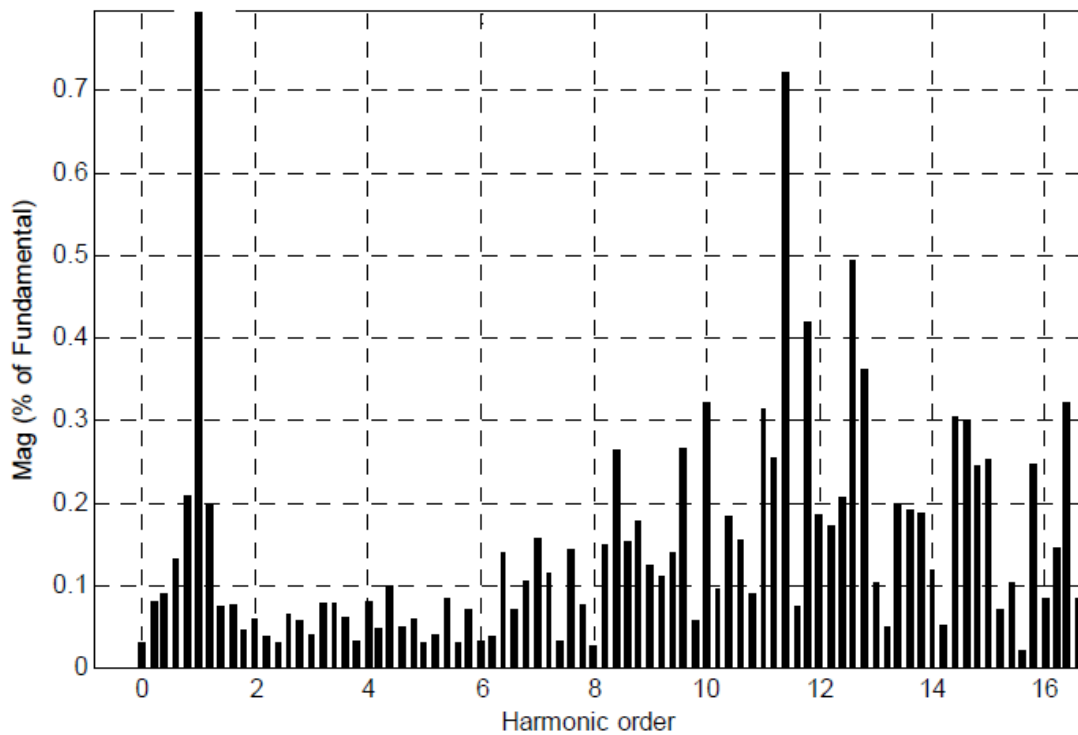
Бяха изследвани качественият показатели на генерираната електрическа енергия на синхронен ветрогенератор с постоянни магнити във ветропарк Leitwind. На следващите фигури е показана част от получените резултати.



Фиг.2.31. Изменение на хармоничния състав на генерирания ток за период 17.11.÷19.11.2012



Fundamental (60Hz) = 1.005 , THD= 1.38%





## Трета глава. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ НА ВЕТРОГЕНЕРАТОРИТЕ

Математическите модели се използват за изследване на процесите във ветрогенераторите и ветропарковете. Получените в резултат на моделирането резултати се използват при проектирането на ветрогенераторите, тяхното управление, при проектиране на ветропарковете и тяхното интегриране в електроенергийните системи. Тези обстоятелства определят високите изисквания към точността на математическите модели и достоверността на получаваните резултати.

От друга, страна ветрогенераторите представляват сложни нелинейни електромеханични системи интегрирани със съвременни статични електронни преобразователи. Ветрогенераторите са съединени с различен тип ветротурбини, преобразуващи ветровата енергия в механична. Тази аеродинамична система също се описва с нелинейни модели. Това усложнява неимоверно задачата за създаване на модели на ветрогенератори и ветропаркове. Трудността се увеличава още повече при необходимост от изследване на процесите в сложни многомашинни електроенергийни системи с развита топология на мрежата на електроенергийната система.

Математическите модели се изследват с помощта на компютри, имащи във всички случаи ограничени ресурси – памет и бързодействие. Затова е от особена важност изборът на метод за съставяне на математическите модели и изборът на числените методи за тяхното изследване.

В дисертационния труд се използват безитеративните методи за съставяне на математическите модели, предложени от Н.Джагаров. Основната идея на тези методи е съставянето на моделите на отделните елементи на ЕЕС във формата на Коши по отношение на токовете им и изключването на производните на тези токове в моделите на мрежата чрез десните части на диференциалните уравнение на токовете на елементите.

Уравненията на електрическите машини се преобразуват от фазна координатна система  $a, b, c$  във въртяща се декартова система  $d, q, 0$ . След това потокосцепленията на машините се заместват чрез токовете, след което се преобразуват във формата на Коши.

Обединението на моделите на елементите на системата (ветрогенератори, синхронни генератори, асинхронни двигатели, статични активно-индуктивни товари) в модел на изследваната електроенергийна система се извършва чрез безитеративни методи.

## Математически модел на асинхронен ветрогенератор

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ b_{31} & 0 \\ 0 & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ss} & A_{sr} \\ A_{rs} & A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_s \\ B_r \end{bmatrix} \cdot U =$$

$$= \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} I = A \cdot I + B \cdot U = H + B \cdot U;$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{\tau_m} (M_{em} - M_T) = \frac{1}{\tau_m} (\psi_{rd} \cdot i_q - \psi_{rq} \cdot i_d - M_T) = \frac{1}{\tau_m} [x_{ad} (i_{rd} \cdot i_q - i_{rq} \cdot i_d) - M_T];$$

където:  $a_{ij}$  - елементите на матрицата  $A$  са функция на активните и реактивни съпротивления на асинхронния генератор, а част от тях - и на ъгловите скорости на координатните оси  $\omega_k$  и на ротора на АГ -  $\omega_r$ ;  $b_{ij} = const$  - елементите на матрицата  $B$  са функция на активните и реактивни съпротивления на АГ; индексът  $s$  се отнася за статорните подматрици и вектори,  $r$  - за роторните подматрици и вектори; векторите на статорните и роторните токове -  $I_s = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$ ;  $I_r = \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$ ;

$A \cdot I = H$ ;  $M_{em}$  - електромагнитен момент на асинхронната машина;  $M_T$  - механичен момент на турбината;  $\tau_m$  - механична времеконстанта на машината, турбината и механичната предавка.

## Математически модел на асинхронен ветрогенератор с двойно захранване

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ b_{31} & 0 \\ 0 & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ss} & A_{sr} \\ A_{rs} & A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{ss} & B_{sr} \\ B_{rs} & B_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} I = A \cdot I + B \cdot U = H + B \cdot U;$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{\tau_m} (M_{EM} - M_T) = \frac{1}{\tau_m} (\psi_{rd} \cdot i_q - \psi_{rq} \cdot i_d - M_T) = \frac{1}{\tau_m} [x_{ad} (i_{rd} \cdot i_q - i_{rq} \cdot i_d) - M_T];$$

където:  $a_{ij}$  - елементите на матрицата  $A$  са функция на активните и реактивни съпротивления на асинхронния генератор с двойно захранване, а част от тях - и на ъгловите скорости на координатните оси  $\omega_k$  и на ротора на АГДЗ -  $\omega_r$ ;  $b_{ij} = const$  - елементите на матрицата  $B$  са функция на активните и реактивни съпротивления на АГДЗ; индекс-

сът  $s$  се отнася за статорните подматрици и вектори,  $r$  - за роторните подматрици и вектори; векторите на статорните и роторните токове -  $\mathbf{I}_s = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{U}_s = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{U}_r = \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{I}_r = \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{H}$ ;  $M_{EM}$  - електромагнитен момент на АГДЗ;  $M_T$  - механичен момент на турбината;  $\tau_m$  - механична времеконстанта на машината, турбината и механичната предавка.

### Математически модел на синхронен ветрогенератор с постоянни магнити

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_{23} \end{bmatrix} \cdot \psi_{PM} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \\ &= \frac{d}{dt} \mathbf{I}_s = \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{I}_s + \mathbf{A}_2 \cdot \psi_{PM} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}_s \\ \frac{d}{dt} \omega &= \frac{1}{\tau_m} (M_T + M_e); \end{aligned}$$

където:  $a_{11} = -r_s / L_d$ ;  $a_{12} = (L_q / L_d) \omega$ ;  $a_{21} = (L_d / L_q) \omega$ ;  $a_{22} = -r_s / L_q$ ;  $a_{23} = \omega / L_q$ ;  $b_{11} = 1 / L_d$ ;  $b_{22} = 1 / L_q$ ;  $\psi_{PM}$  - потокосцепление, създадено от постоянните магнити;  $M_e = (L_d - L_q) i_{sd} \cdot i_{sq} + i_{sq} \cdot \psi_{PM}$  - електромагнитен момент на генератора;  $M_T$  - момент на ветротурбината;  $\tau_m$  - механична времеконстанта на ветротурбината, механичната предавка и генератора.

### Математически модел на статичен товар

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \mathbf{I} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{H} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}$$

където:  $a_{11} = a_{22} = -r_T / l_T$ ;  $a_{12} = -a_{21} = \omega_k$ ;  $b_{11} = b_{22} = 1 / l_T$ ;  $r_T$  и  $l_T$  - съответно активното и индуктивно съпротивление на товара;  $\omega_k$  - ъгловата скорост на въртене на осите  $d, q, 0$ .

### Математически модел на активно-индуктивна линия

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d,ij} \\ i_{q,ij} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{d,ij} \\ i_{q,ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{di} - u_{dj} \\ u_{qi} - u_{qj} \end{bmatrix} = \\ &= \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{ij} = \mathbf{A}_{ij} \cdot \mathbf{I}_{ij} + \mathbf{B}_{ij} \cdot \mathbf{U}_{ij} = \mathbf{H}_{ij} + \mathbf{B}_{ij} \cdot \mathbf{U}_{ij} \end{aligned}$$

където:  $a_{11} = a_{22} = -r_{l,ij} / l_{l,ij}$ ;  $a_{12} = a_{21} = \omega_k$ ;  $b_{11} = b_{22} = 1 / l_{l,ij}$   
 $b_{11} = b_{22} = 1 / l_T$ ;  $r_{l,ij}, l_{l,ij}$  - съответно активното и индуктивно съпротивление на линия  $i, j$ ;  $\omega_k$  - ъгловата скорост на въртене на осите  $d, q, \theta$ .

### Математически модел на ветротурбина

$$P_{\text{мех}} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot u^3 \cdot C_p(\theta, \lambda);$$

където:  $\sigma$  - плътност на въздуха;  $R$  - радиус на турбината;  $u$  - скорост на вятъра;  $C_p(\theta, \lambda)$  - коефициент на мощност, който за турбини с управление на ъгъла на лопатките им записи от ъгъла на атака на лопатката  $\theta$  и от коефициента на скорост на края на лопатката  $\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{u}$ ;  $\omega_r$  - ъглова скорост на въртене на ротора на турбината.

### Математически модел на механична предавка

Използван е двумасов модел на предавката:

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r;$$

$$\frac{d}{dt} \theta_k = \omega_r - \frac{\omega_g}{n_p};$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{M_r - M_g}{J_r};$$

където:  $\theta_k = \theta_r - \frac{\theta_g}{n_p}$  - ъглова разлика между двата края на гъвкавия

вал; механичните моменти на вала на ниска скорост и механичната мощност на генератора са:

$$M_g = c \cdot \left( \omega_r - \frac{\omega_g}{n_p} \right) + k \cdot \theta_k; \quad P_t = \omega_g \cdot \frac{M_g}{n_p}.$$

Изведени са математическите модели на ветрогенераторите и елементите на електроенергийните системи във формата на Коши във въртяща се координатна система  $d, q, \theta$ . Като променливи на състоянието са избрани токовете на електрическите машини и елементите на ЕЕС. Тези преобразования са необходими, за да се използват безитеративни методи за изчисление на преходните електромеханични процеси в изследваните ЕЕС, съдържащи ветрогенератори и ветропаркове.

Особено внимание е обърнато на модела на синхронния ветрогенератор с постоянни магнити, който намира все по-голямо прило-

жение във ветроенергетиката. Приведени са моделите на синхронния генератор с постоянни магнити с и без демпферни намотки.

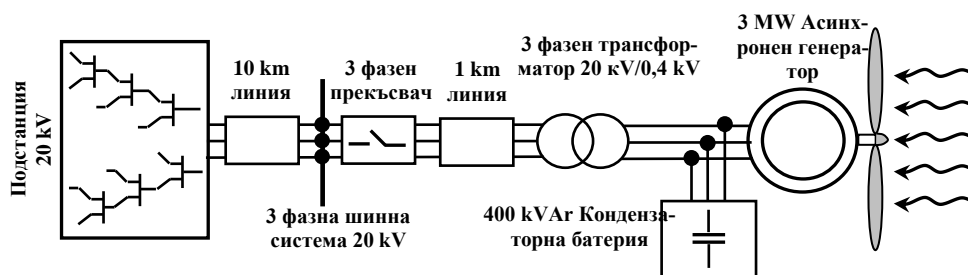
Изведени са моделите на статичен активно-индуктивен товар и на линия на мрежата на ЕЕС.

Изведен е моделът и на механичната предавка между ветротурбината и ветрогенератора, представен като двумасов модел.

Всички тези модели са по пълните уравнения на елементите (максимално точни) и представляват нелинейни диференциални уравнения.

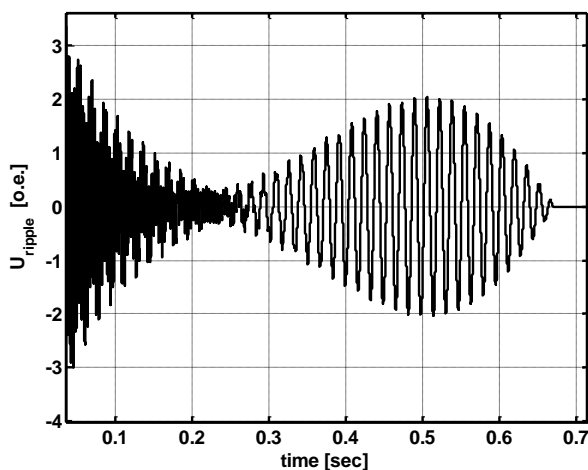
## Четвърта глава. ИЗСЛЕДВАНЕ РЕЖИМИТЕ НА РАБОТА НА ВЕТРОПАРКОВЕТЕ

### Включване на асинхронен ветрогенератор към мрежа

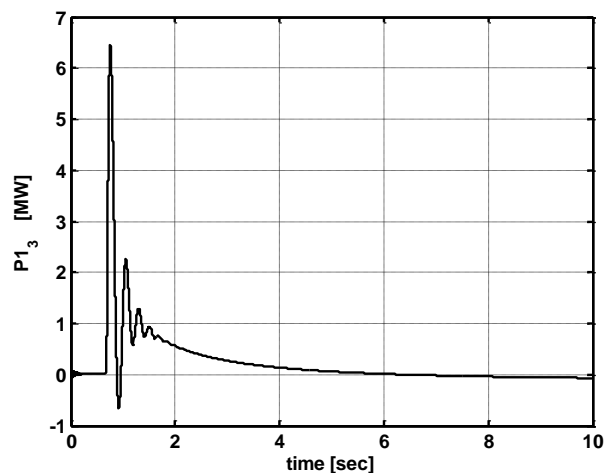


Фиг.4.1. Изследвана електроенергийна система с ветрогенератор

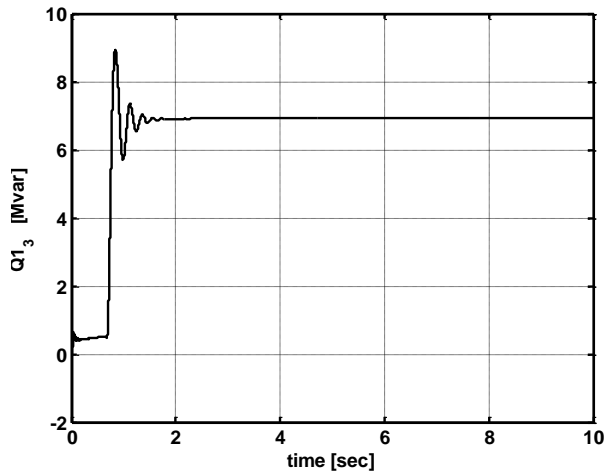
Асинхронният ветрогенератор се пуска без товар, задвижван от вятъра, докато скоростта му достигне подходяща за включване към мрежата. Целта на синхронизацията е да минимизира разликата между амплитудите, честотите и фазата между съответните фазни напрежения на двата източника – на мрежата и генератора преди присъединяването.



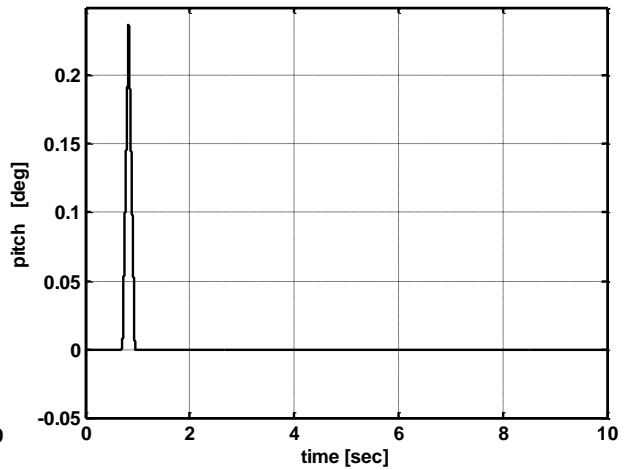
Фиг.4.4. Разлика на фазните напрежения  $u_{a.AG} - u_{a.grid}$  - напрежение на биене



Фиг.4.11. Активна мощност на генератора



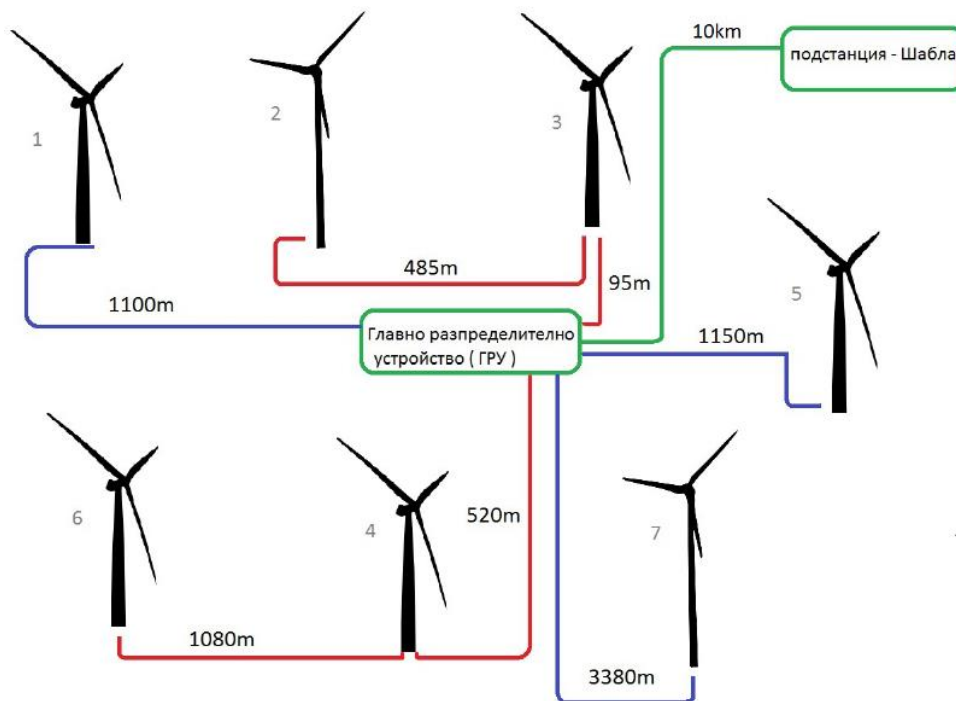
Фиг.4.12. Реактивна мощност на генератора



Фиг.4.14. Ъгъл на атаката на перото на ветротурбината

На горните фигури е показана част от получените резултати в резултата на симулацията на процеса на синхронизации.

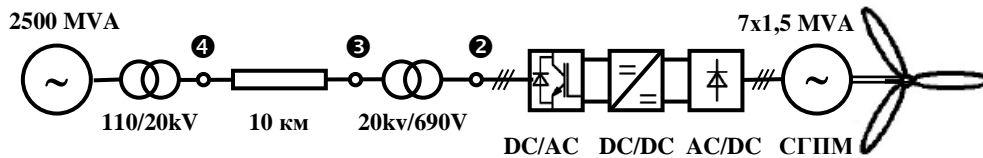
### Изследване режимите на работа на ветропарк със синхронни генератори с постоянни магнити



Фиг.4.15. Схема на ветропарк LEITWIND

На фиг.4.15 и фиг.4.16 са показани схемата на изследвания ветропарк и еквивалентната му схема.

Напреженията във възлите **2**, **3** и **4** се изчисляват с помощта на следните системи уравнения. Уравненията на линията, съединяваща възли  $i$  и  $j$ , ще бъдат разликата между напреженията на съединяваните възли:

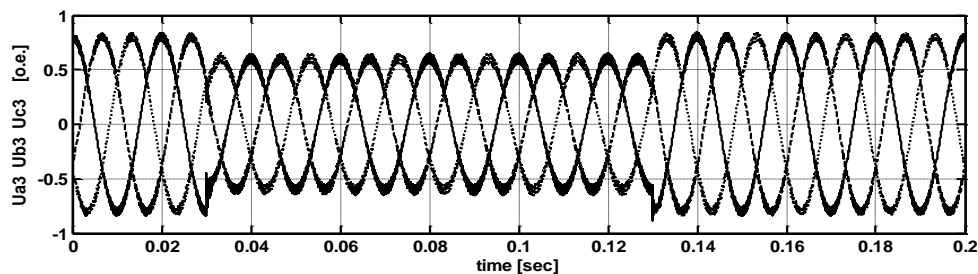


Фиг.4.16. Еквивалентна схема на изследвания ветропарк

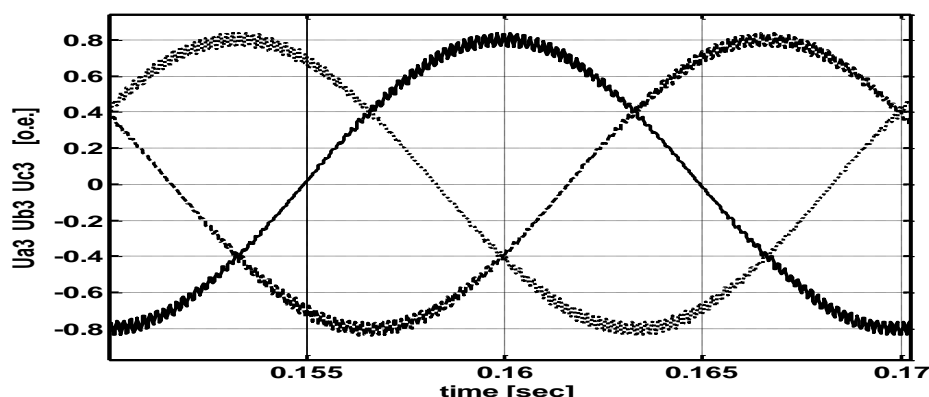
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{di} \\ u_{qi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{dj} \\ u_{qj} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_l & 0 \\ 0 & r_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -l_l \\ l_l & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} r_l & -l_l \\ l_l & r_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{I}_l + \mathbf{L}_l \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{I}_l = U_i - U_j = U_l; \end{aligned}$$

където: с индекс  $l$  са означени параметрите и променливите на съответната линия; токът на линията е токът на ветропарка.

На следващите времедиаграми е показана част от получените в резултат на симулациите експериментални данни.



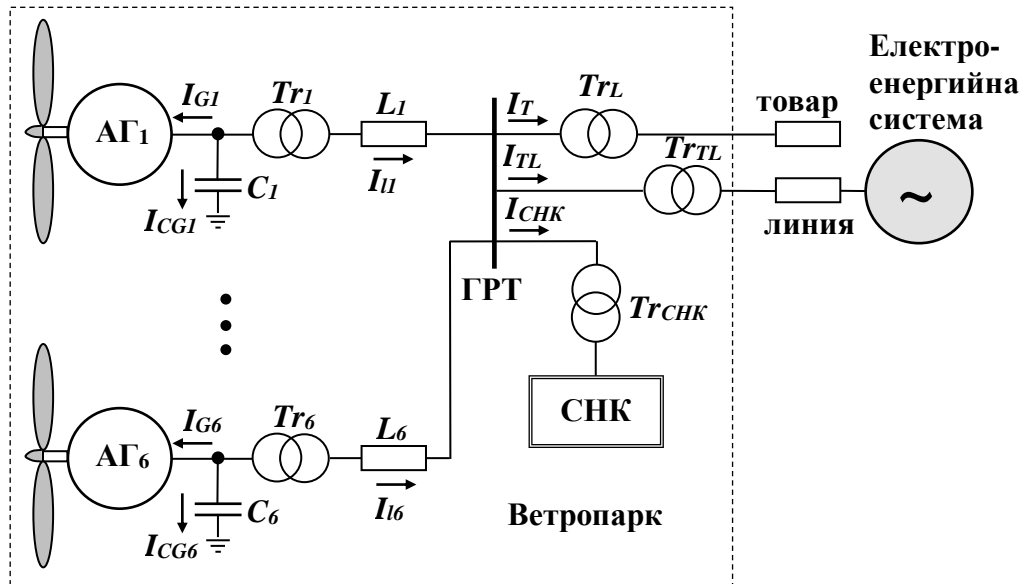
Фиг.4.20. Изменение на фазните напрежения във възел 3 при изменение на напрежението на шини 110kV



Фиг.4.23. Форми на фазните напрежения във възел 3, показващи изкривявания, предизвикани от преобразователя на честота

### Изследване компенсацията на реактивната мощност във ветропарк с помощта на статичен напречен компенсатор

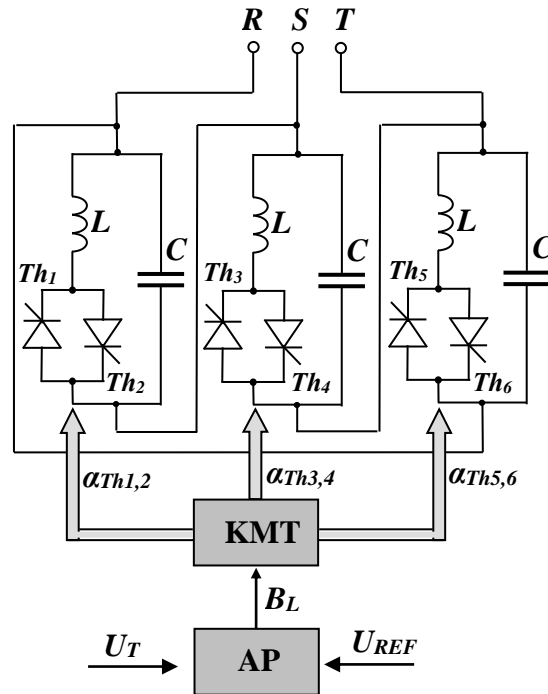
Паралелната компенсация е способна да променя енергийния поток в системата, чрез изменение на стойностите на присъединения паралелен компенсатор по време на преходните процеси, то границата на преходната устойчивост се увеличава и се доказва ефективното демпфиране на различните смущения.



Фиг.4.27. Схема на изследваната енергийна система

На фиг.4.27 е показана схемата на изследваната електроенергийна система. Към ГРТ е съединен статичен напречен компенсатор (СНК) - фиг.4.28 със съединение в триъгълник. Този компенсатор е представен чрез паралелно съединен към мрежата кондензатор  $C$  и паралелно с него тиристорно управляем реактор  $L$ . Управлението на тиристорите се осъществява чрез адаптивен регулатор (АР), изработващ управляващ сигнал, който пропорционално управлява проводимостта на тиристорно регулирания дросел  $V_L$ . След това този сигнал се преобразува от контролния модул на тиристорите (КМТ) в управляващи сигнали на тиристорите  $\alpha_{Th}$ . Тиристорно управляваният реактор непрекъснато регулира реактивната енергия, управлявайки амплитудата на тока на реактора. Това регулиране се извършва чрез управление на ъгъла на управление на тиристорите и е резултат на управлението на индуктивността на реактора. Всяка трифазна батерия кондензатори и тиристорно управляеми реактори е съединена в триъгълник така, че по време на нормална балансирана работа нулевата последователност тройните хармоници (3<sup>rd</sup>, 9<sup>th</sup>...) остават затворени в триъгълника, намалявайки генерацията на хармоници в мрежата.





Фиг.4.28. Схема на статичен управляем напречен компенсатор със съединение в триъгълник и със система за управление

Използват се моделите на елементите на изследваната ЕЕС, показани във втора глава. Моделът на възбудителния кондензатор

$$\frac{d}{dt} U_{CGj} = H_{CGj} + B_{CGj} \cdot I_{CGj};$$

където:  $H_{CGj} = A_{CGj} \cdot U_{CGj}$ ;  $I_{CGj} = -I_{Gj} - I_{lj}$ , елементите на матриците  $A_{CGj}$  и  $B_{CGj}$  са функции на параметрите на капацитета на кондензатора.

Моделът на реактора на СНК

$$\frac{d}{dt} I_{LCHK} = H_{LCHK} + B_{LCHK} \cdot U_{CHK};$$

където:  $H_{LCHK} = A_{LCHK} \cdot I_{LCHK}$ ; елементите на матриците  $A_{LCHK}$  и  $B_{LCHK}$  са функции на параметрите на реактора на СНК.

Моделът на кондензатора на СНК

$$\frac{d}{dt} U_{CHK} = H_{CCHK} + B_{CCHK} \cdot I_{CCHK};$$

където:  $H_{CCHK} = A_{CCHK} \cdot U_{CHK}$ ;  $I_{l\Sigma} = \sum_1^6 I_{lj}$   $I_{CHK} = I_{LCHK} + I_{CCHK}$ ;

$$I_{CGj} = I_{l\Sigma} - I_{LCHK} - I_L - I_{TL};$$

Преносна линия  $L_{1:6}$  и трансформатор  $Tr_{TL}$

$$\frac{d}{dt} I_{lj} = H_{lj} + B_{lj} \cdot (U_i - U_j);$$

където:  $H_{lj} = A_{lj} \cdot I_{lj}$ ; елементите на матриците  $A_{lj}$  и  $B_{lj}$  са функции на параметрите на преносната линия;  $U_i$  и  $U_j$  - вектора на напрежение във възела на присъединяване за съответната линия.

### Алгоритъм на адаптивното управление на СНК

Основната функция на адаптивното управление е, да идентифицира непрекъснато управлявания обект в реално време чрез линеен модел от нисък ред и да изработва управляващ сигнал. В изследваната система се използва скаларен модален адаптивен регулатор. Негова основна задача е да поддържа амплитудата на напрежение  $U_T$  близо до зададената точка  $U_{REF}$ , която е зададена от оператора. На входовете на адаптивния регулатор се подават дискретни извадки от вектора на напрежение от точката на измерване и от заданието за напрежение от оператора. Скаларният адаптивен моделен регулатор идентифицира в реално време обекта на базата на оценените параметри и променливи на модела и създава управляващ сигнал. Полученият след адаптивния регулатор управляващ сигнал  $B_L$  се подава на входа на модула за управление на тиристорите. КМТ изчислява ъглите на управление на тиристорите  $\alpha_{Th1-6}$  (фиг.4.28).

Наблюдаваната система може да се представи чрез следния вид линеен модел в областта на променливите на състоянието във вида на следните уравнения:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{b} \cdot v(k)$$

$$y(k) = \mathbf{c}^t \cdot \mathbf{x}(k) \quad v(k) = \mathbf{u}(k) + z(k)$$

където:  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ ,  $k=0,1,2,\dots$ ;  $\mathbf{x}(k)$ ,  $\mathbf{x}(k+1)$  – неизвестния текущ вектор на състоянието в две последователни извадки;  $\mathbf{x}(0)$  – неизвестен начален вектор на състоянието;  $\mathbf{u}(k)$  is an input signal;  $z(k)$  is a limited input sequence using for identification.

$\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{c}$  са неизвестните матрици и вектори от следния тип:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b}^t = [0, 0, 1]; \quad \mathbf{c}^t = [1, 0, 0].$$

Входно/изходните данни се формират във вид на следните матрици и вектори:

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ y(2) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} y(3) \\ y(4) \\ y(5) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} v(0) \\ v(1) \\ v(2) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Y}_{12} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & y(2) \\ y(1) & y(2) & y(3) \\ y(2) & y(3) & y(4) \end{bmatrix}$$

Оценката на вектор  $\hat{\mathbf{a}}$  се изчислява чрез следния израз:

$$\mathbf{Y}_{12} \cdot \hat{\mathbf{a}} = \mathbf{Y}_2 - \mathbf{V}_1$$

Оценката на началния вектор на състоянието  $\hat{x}(0)$  се изчислява чрез оптимален оценител от следния вид:

$$\hat{x}(0) = Y_1$$

Текущият вектор на състояние се оценява чрез пълния оптимален сингуларен адаптивен (ОСА) наблюдател:

$$\hat{x}(k+1) = \hat{F} \cdot \hat{x}(k) + b \cdot v(k) + g \cdot y(k);$$

$$\hat{x}(0) = \hat{x}_0; k=0, 1, 2, \dots,$$

$$\text{където: } \hat{F} = \hat{A} - g \cdot c^T; \quad g^T = [g_1, g_2, \dots, g_n]$$

Детерминантата на формулирания проблем с помощта на предложения алгоритъм съществува само ако матрицата  $Y_{12}$  не е особена:

$$\det Y_{12} \neq 0$$

Стабилизиращият сигнал  $B_L$  се изчислява с помощта на астатичен скаларен модален стабилизатор с теглови коефициент  $k_0$  със следния вид:

$$k(k) = [k_1(k), k_2(k), \dots, k_n(k)]$$

$$\hat{A}_z = \hat{A} - \hat{b}(k-1) \cdot k(k)$$

$$k_0(k) = \left[ c^T (I_n - \hat{A}_z)^{-1} \cdot \hat{b}(k-1) \right]^{-1}$$

$$B_L(k) = k_0(k) \cdot y_{ref} + k(k) \cdot \hat{x}(k-1)$$

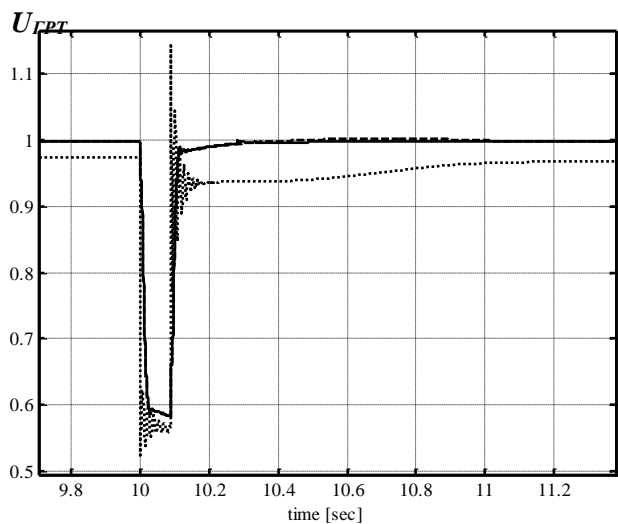
където:  $y_{ref}$  е сигнал на задание, задаван от оператора.

След определяне на управляващия сигнал за реактора на СНК  $B_L$  следва преобразуването на специфичната стойност на  $B_L$  в стойности на ъглите на управление  $\alpha_{Th}$  за тиристорите в градуси. Това преобразуване се извършва с помощта на следния израз:

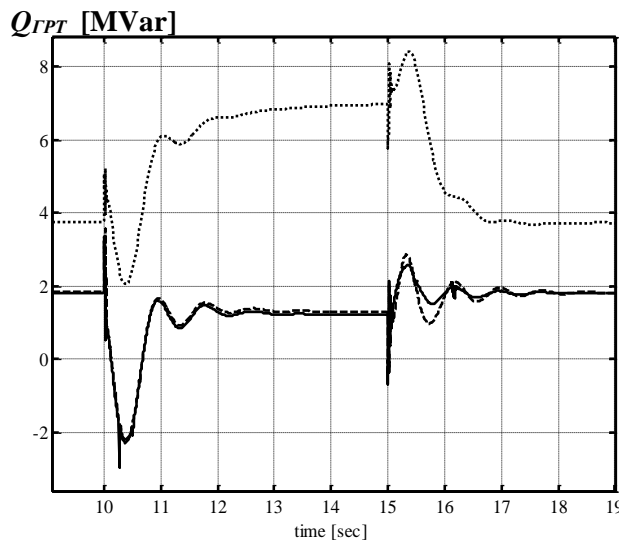
$$B_L = (2 - 2\alpha/\pi + \sin(2\alpha)/\pi) \cdot B_{Lnom}$$

където  $B_{Lpu}$  – стойности на  $B_L$  преобразувани в реалната система в относителни единици (о.е.);  $B_{Lnom}$  – номинална стойност на  $B_L$ .

За проверка на коректността и ефективността на предложеното адаптивно управление на изследваната електроенергийна система бе създаден модел в среда Matlab. Бяха симулиране преходни процеси, предизвикани от различни смущения. Част от получените резултати са показани по-долу. Показани са следните режим: на късо съединение на страна на ниско и средно напрежение и техните изключвания от прекъсвачите; включване/изключване на мощен статичен активно-индуктивен товар; малки отклонения на напрежението на страна високо напрежение; изменение на скоростта на вятъра и т.н. На графиките са показани някои параметри на режима и те са сравнени при конвенционално управление на СНК и при предложеното адаптивно управление на СНК и без СНК.



Фиг.4.29. Напрежение на шините на ГРТ при к.с.

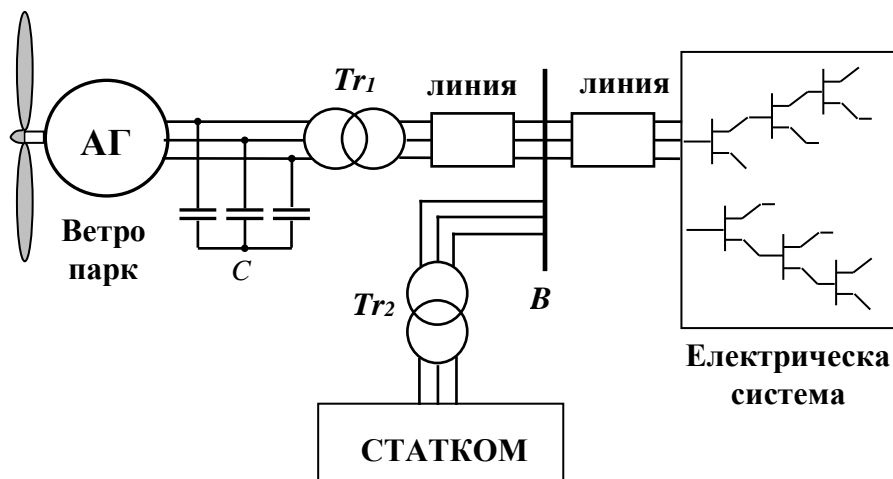


Фиг.4.31. Реактивна мощност

На фиг.4.29 и фиг.4.31 е показана част от получените експериментални резултати.

### Изследване на компенсацията на реактивната мощност във ветропарк с помощта на статичен синхронен компенсатор

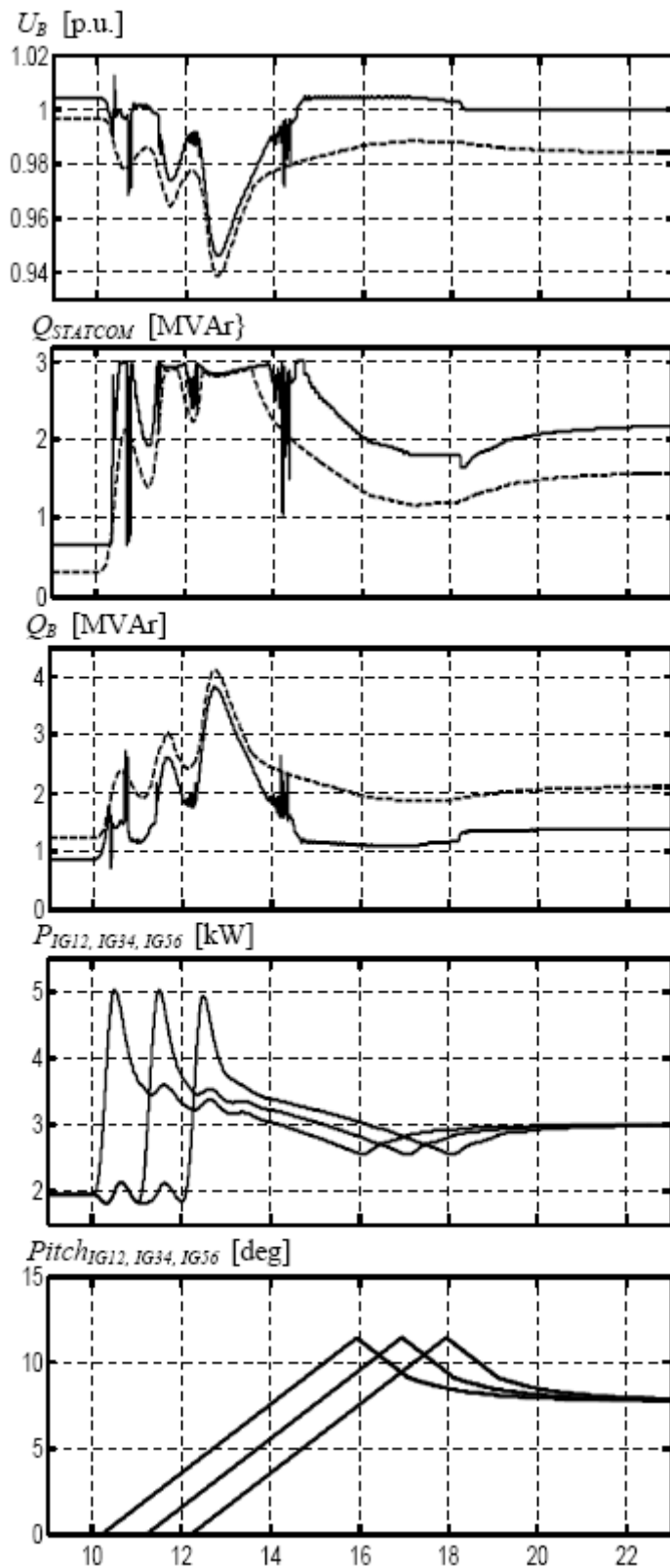
На фиг.4.35 е показана изследваната електроенергийна система, която включва ветропарк, съединен към мрежата чрез преносна линия и статичен синхронен компенсатор СТАТКОМ. Ветропаркът се състои от шест ветрогенератора с мощност 1,5 MW, които са съединени чрез линия с дължина 25-km на разпределителната система с напрежение 25kV към мрежа с напрежение 120kV.



Фиг.4.35. Еквивалентна схема на ветропарк със СТАТКОМ

Симулационните изследвания са извършени за изследване на ефекта от адаптивното управление на СТАТКОМ в електроенергийна система, включваща

ветропарк. Изследваната система се разглежда при различни преходни смущения и реакцията на системата, при подобряване с помощта на СТАТКОМ, и резултатите са сравнени с тези, получени от първоначалната система (без компенсатор).



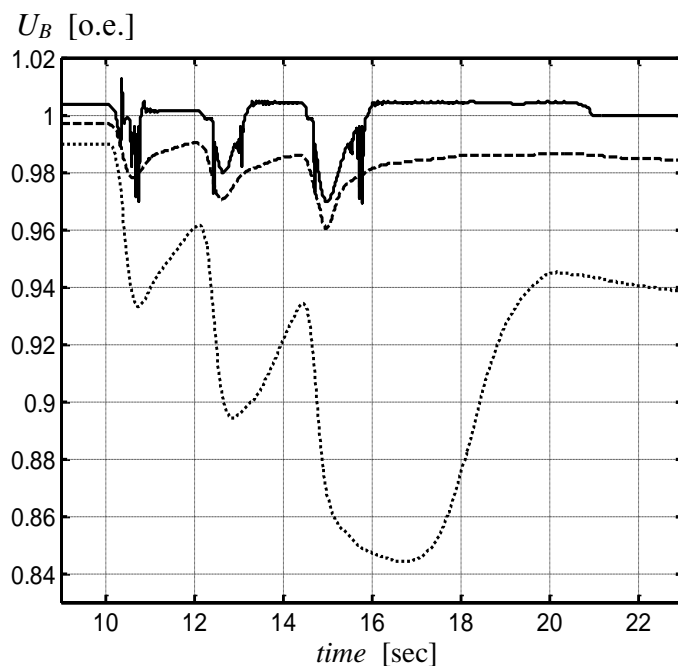
Фиг. 4.36. Осцилограми на изменението на параметрите на режима при изменение на скоростта на вятъра

и реакцията на системата, при подобряване с помощта на СТАТКОМ, и резултатите са сравнени с тези, получени от първоначалната система (без компенсатор). Изследвано е и адаптивното управление на СТАТКОМ и сравнено с конвенционално ПИ-управление. Извършени са редица изследвания, потвърждаващи правилността на работа на адаптивното управление. Представените резултати показват преходните процеси при промяна на скоростта на вятъра и при провал на напрежението от страна на мрежата.

Скоростта на вятъра се повишава от 8 m/s до 11m/s при време 10sec за първата двойка АГ, 11sec – за втората двойка, и 12sec – третата двойка. На първата от трите осцилограми е показано и сравнено адаптивно управление (с плътна линия) и конвенционален ПИ контролер (точкова линия) на следните параметри:  $U_B$  – напрежение на шини В,  $Q_{СТАТКОМ}$  – генерирана реактивна енергия от СТАТКОМ;  $Q_B$  – реактивна мощност на шини В. На следващите две осцилограми са показани активната мощност на АГ и ъгъла на управление на лопатките на турбината.

На фиг.4.37 е показано напрежението на шините при работа на СТАТКОМ с адаптивно управление

(плътна линия) и ПИ-управление и без СТАТКОМ (особена точкова линия). От фигурите може да се види подобрието на работните характеристики в цялата система при различни смущения, използвайки СТАТКОМ.



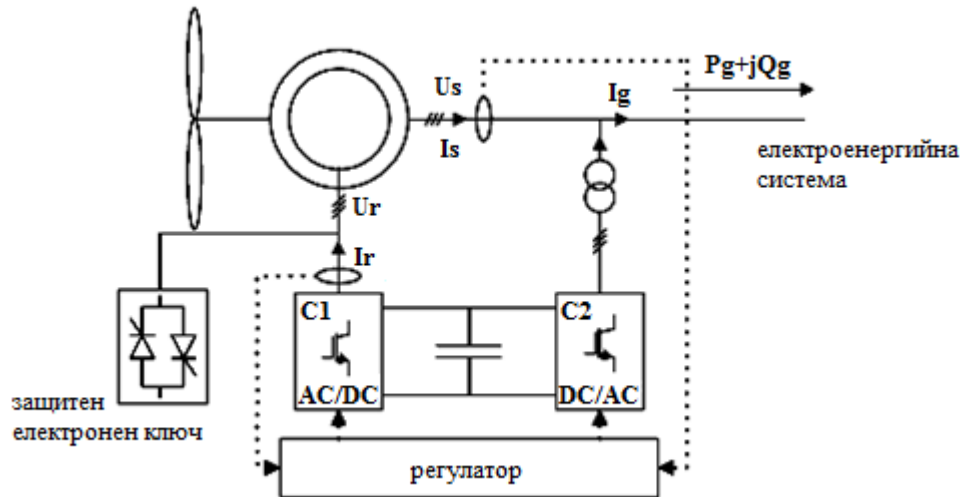
Фиг.4.37. Напрежение на шините при изменение скоростта на вятъра

### Изследване на работата на офшорен ветропарк

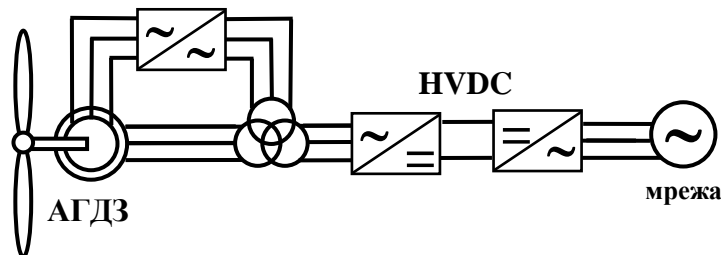
Изследва се офшорен ветропарк, състоящ се от ветрогенератори с двойно захранване. Паркът е свързан с мрежата чрез вставка на постоянен ток (HVDC – High voltage direct current). Вставката за постоянен ток се използва, за да се осигури устойчива работа на ветропарка с мрежата.

Асинхронният генератор с двойно захранване представлява - асинхронен генератор с фазен ротор с контактни пръстени за абсорбиране/генериране на мощност от/към роторната намотка и режим при променлива скорост, което се постига чрез подаване на управляемо напрежение с честота на хлъзгане. Роторната намотка се захранва от преобразовател на честота, който служи за осигуряване на достатъчно енергия за възбуждането и поддържането на устойчивия режим на работа на генератора. Преобразувателят се състои от два трифазни преобразователя на напрежение, всеки от които включва по шест транзистора. На входа на преобразователя се подава трифазно напрежение  $U_1$  с честота  $f_1$ , а на изхода се получава трифазно напрежение  $U_2$  амплитуда и честота  $f_2$ , на което могат да се регулират в широки граници. Предимството при използване на IGBT пре-

образуватели е, че токът през тях протича в двете посоки: от ротора към мрежата и от мрежата към ротора, посредством процеси на изправяне и инвертиране. Преобразователят на честота разделя честотата на мрежата от механичната честота на ротора, позволявайки на ветротурбината, да работи при променлива скорост. Генераторът и преобразователят са защитени чрез ограничаване на напрежението и обратните диоди.



Фиг.4.38. Ветротурбина с асинхронен генератор с двойно захранване



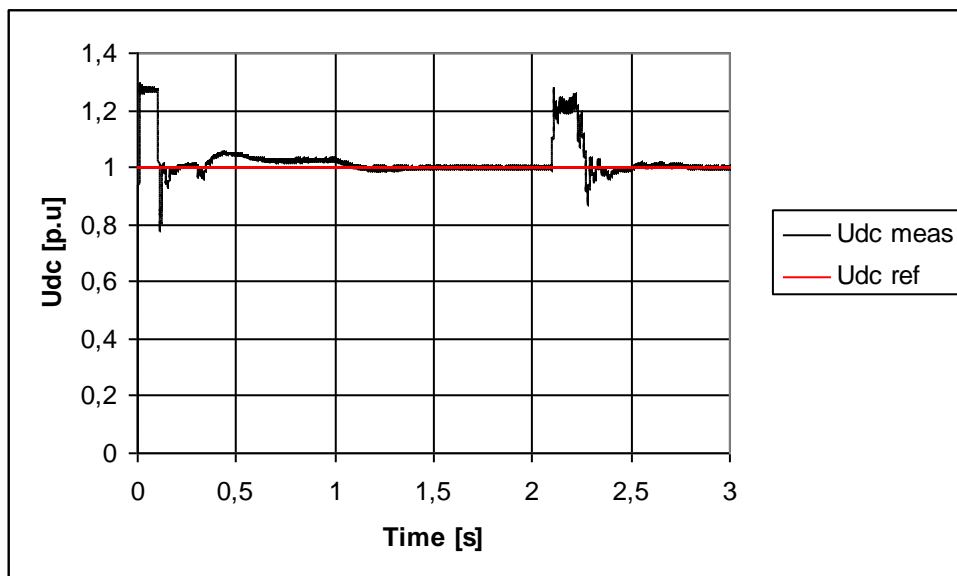
Фиг.4.51. Еквивалентна схема на ветропарк с вставка на постоянен ток

На фиг.4.51 е показана изследваната електроенергийна система, включваща ветропарк, състоящ се от шест асинхронни ветрогенератора с двойно захранване, вставка на постоянен ток и линия, свързваща ветропарка с мрежата.

Изправителят и инверторът на HVDC използват IGBT транзистори с паралелни обратни диоди и имат схеми с три нива на неутралата. Широчинно-импулсната модулация за управление използва еднофазна триъгълна носеща честота 27 пъти по-голяма от основната честота (1350 Hz). Намотките на повишаващия трансформатор са свързани Y/Δ и имат отношение на напреженията 525V-100kV. Вставката на постоянен ток има високочестотен променливотоков филтър, настроен на 27-ия и 54-ия хармоник и реактор на променли-

вотоковата страна, а на постояннотоковата – кондензатори и филтри, настроени на 3-ия хармоник. Кондензаторите на постояннотоковата страна влияят на динамиката на системата и изглаждат постояннотоковото напрежение.

Създаденият математически модел на изследваната електрое-



Фиг. 4.51. Постояннотоковото напрежение:  
задание – Udc.ref; измерено – Udc.meas

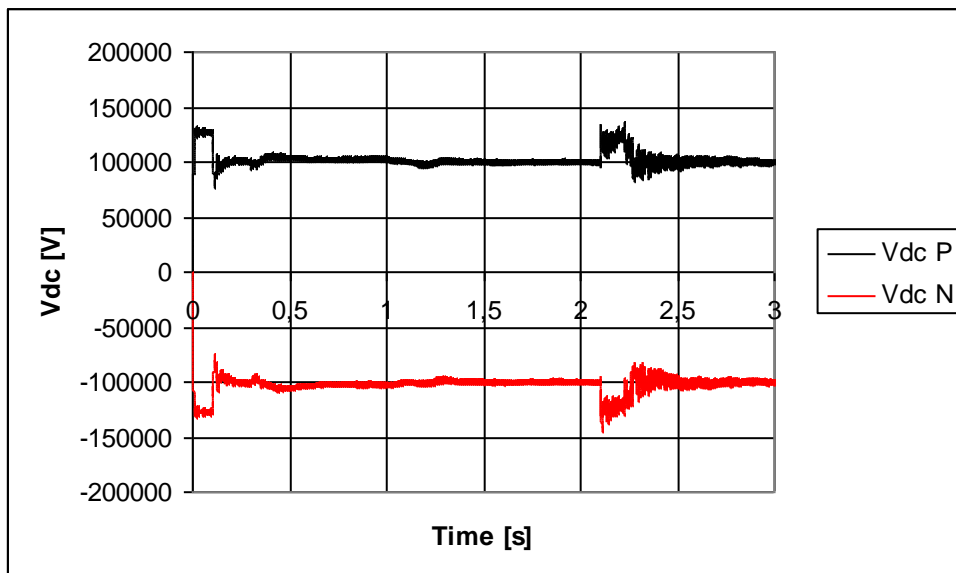
нергийна система, включваща ветропарк с асинхронни ветрогенератор с двойно захранване и вставка на постоянен ток, позволява да се симулират и изследват всички нормални и аварийни режими на работа, предизвикани от управляващи или смущаващи въздействия във ветропарка, в неговите преобразователи, управление или изменение на скоростта на вятъра, във вставката на постоянен ток и в мрежата на присъединяване.

По-долу са приведени част от експерименталните резултати, получени при симулиране на късо съединение на изхода на високоволтовата вставка на постоянен ток при  $t = 2,1s$  и изключването му при  $t = 2,2s$ .

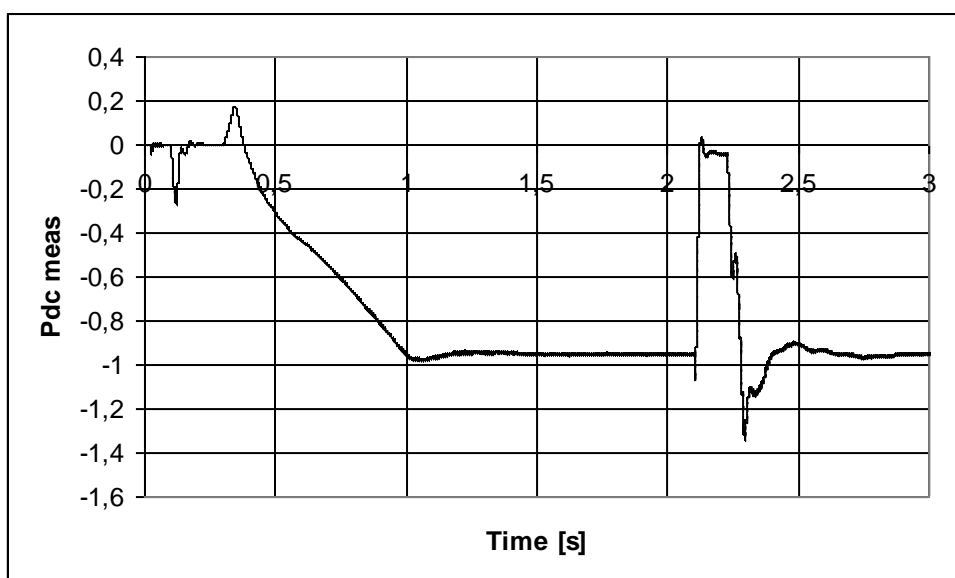
Приведени са осцилограмите на преходния режим, показващи изменението на постояннотоковото напрежение в относителни единици (фиг.4.51), изменението на потенциалите на положителния и отрицателния полюс на постояннотоковата страна (фиг.4.52), и изменението на мощността на постояннотоковата страна (фиг.4.53),

Създадени са математически модели на ветропаркове, съдържащи различен тип ветрогенератори – асинхронни, асинхронни с двойно захранване, синхронни с постоянни магнити. При съставянето на математическите модели са използвани безитеративни методи, което ускорява изследването на процесите в тях.





Фиг. 4.52. Изменение на постояннотоковото напрежение



Фиг. 4.53. Мощност на постояннотоковата страна

Разгледани са въпросите, свързани с необходимостта от компенсация на реактивната мощност, и методите за тази компенсация.

Предложени са нови методи за управление на ветрогенераторите с помощта на идентификационни методи на базата на оптимални сингуларни адаптивни наблюдатели. Благодарение на бързодействието на тези методи времето за идентификация и за изчисляване на управляващото въздействие е пренебрежимо малко в сравнение с темпа на протичане на процесите във ветрогенератора, поради което качеството на управление е много високо.

Изследваните са преходните процеси в електроенергийни системи, съдържащи ветропаркове в нормални и аварийни режими: синхронизация на ветропарка с мрежата; включване и изключване на съизмерим статичен и динамичен товар; късо съединение и изключването му от защитата.

Изследвани са режимите на компенсация на реактивната мощност на ветропаркове с помощта на статичен напречен компенсатор и с помощта на статичен синхронен компенсатор СТАТКОМ. Получени са основните характеристики на ветропарковете и компенсацията.

Разгледани са режимите на работа на офшорни ветропаркове, свързани с бреговата мрежа чрез високоволтови вставки на постоянен ток. За целта са разгледани различните типове ставки и тяхното управление.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В последните години ветровата енергетика се разви с много бързи темпове както в света, така и в България. Особено силно развитие тя получи в Североизточна България, където са съсредоточени основните мощни ветропаркове. В същото време там бяха закрити основните промишлени консуматори, което преобърна посоката на енергийните потоци. Североизточна България се превърна от консуматор в експортър на електрическа енергия. Това предизвика необходимост от реконструкция и оптимизация на електроенергийната инфраструктура, а също така предизвика усложняване на управлението на електроенергийната система и увеличаване на загубите в мрежата.

В дисертационната работа са изследвани и решени някои основни технически проблеми, свързани с проблемите на присъединяваните ветропаркове в енергийната система.

В дисертационния труд е направен обзор на развитието на световната ветроенергетика, като са приведени данни за растежа на инсталираните мощности и добиваната електроенергия и планираното ѝ развитие. Посочено е влиянието на ветроенергията върху енергийната система. Класифицирани са методите за оценка на ветровия ресурс. Направен е обзор на ветровия ресурс, развитието на ветроенергетиката в България и планираното ѝ развитие съгласно стратегията за развитие на електроенергетиката. Анализирани са развитието на преносната електрическа мрежа при присъединяването на ВЕИ, а също така и мощностите с приоритено производство.

Направена е класификация на ветровите турбини и използваните електрически генератори, като са посочени техните предимства

и недостатъци. Направена е класификация и от гледна точка на поддържаната скорост на въртене на генераторите.

Разгледани са проблемите, свързани с присъединяването на ветрогенераторите към електроенергийната система - тяхното включване, осигуряване на устойчива работа и компенсация на колебанията на мощността.

Изследвано е производството на ветрова електрическа енергия във ветропаркове в Североизточна България. Събрани са данни за изменението по часове на денонощието, по дни на седмицата, месечно и годишно производство. Направена е корелация между производството на електроенергия и изменението на скоростта на вятъра. Обобщени са основните статистически показатели, които могат да се използват при краткосрочно и дългосрочно прогнозиране на изменението на ветровете и производството на ветрова енергия. Тези данни се използват също така и при планиране и управление на заявките и генерацията от Енергийния системен оператор.

Направена е класификация на техническите загуби. Приведени са основните методи за изчисляването им. Приведени са и основните методи за разпределение на загубите между участниците в енергийния пазар. Разгледани са основните оперативни, технически и организационни методи за намаляване на техническите загуби.

Направен е обзор на изискванията към ветрогенераторите в различните страни. На основата на обзора са направени предложения за българските изисквания, включващи: толеранс на изменение на напрежението в мрежата; работа на ветропарковете при къси съединения в мрежата и провали на напрежението; управление на активната и реактивна мощности; защитните устройства; качеството на произвежданата електроенергия; бъдещи нови изисквания; необходимост от хармонизация на българските с бъдещите общо европейски изисквания.

Описани са качествените показатели на електрическата енергия и отрицателното влияние на отклоненията им върху работата на основните елементи на електроенергийни системи. Разгледани са изискванията към качеството на електроенергията (различните параметри, определящи това качество). Описани са различните методи, технически и математически средства за измерване, съхранение и обработка на данните за качеството на електроенергията.

Изследвано е качеството на произвежданата електроенергия във ветропарк, използващ синхронни ветрогенератори с постоянни магнити. Приведена е част от получените експериментални резултати. Описани са основните методи и средства, повишаващи качеството на произвежданата електроенергия.

Изведени са математическите модели на използваните типове електрически генератори (асинхронни, асинхронни с двойно захранване, синхронни, синхронни с постоянни магнити). Приведени са и използваните модели на механичната предавка и ветровата турбина.

Разгледани са въпросите, свързани с необходимостта от компенсация на реактивната мощност, и методите за тази компенсация.

Предложени са нови методи за управление на ветрогенераторите с помощта на идентификационни методи на базата на оптимални сингуларни адаптивни наблюдатели. Благодарение на бързодействието на тези методи времето за идентификация и за изчисляване на управляващото въздействие е пренебрежимо малко в сравнение с темпа на протичане на процесите във ветрогенератора, поради което качеството на управление е много високо.

Изследваните са преходните процеси в електроенергийни системи, съдържащи ветропаркове в нормални и аварийни режими: синхронизация на ветропарка с мрежата; включване и изключване на съизмерим статичен и динамичен товар; късо съединение и изключването му от защитата.

Изследвани са режимите на компенсация на реактивната мощност на ветропаркове с помощта на статичен напречен компенсатор и с помощта на статичен синхронен компенсатор СТАТКОМ. Получени са основните характеристики на ветропарковете и компенсацията.

Разгледани са режимите на работа на офшорни ветропаркове, свързани с бреговата мрежа чрез високоволтови вставки на постоянен ток. За целта са разгледани различните типове ставки и тяхното управление.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. N.Djagarov, Zh.Grozdev, M.Bonev, **S.Filchev**, Application of Novel Adaptive Control of STATCOM in Wind Power Generation, 10th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '10), Iwate Prefectural University, Japan, October 4-6, 2010, pp.200-204, ISSN 1792-5088; ISBN 978-960-474-233-2.
2. Н.Джагаров, **С.Филчев**, Ж.Гроздев, М.Бонев, Изисквания към ветропарковете за работата им мрежата, „Енергиен форум 2011”, с.41-59.
3. **С.Филчев**, Н.Джагаров, Ж.Гроздев, М.Бонев, Изследване включването на асинхронен ветрогенератор към мрежата, „Енергиен форум 2011”, с.173-181.

4. N.Djagarov, M.Bonev, Zh.Grozdev, **S.Filchev**, Electrical losses in networks with dispersed wind generation, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering “ELECTROENERGETIKA 2011”, Sep.21-23, Stará Lesná, Slovak Republic, pp.104-113, ISBN 978-80-553-0724-4.
5. N.Djagarov, Zh.Grozdev, M.Bonev and **S.Filchev**, Application of SVC to Increase Power System Damping in Wind Parks, 6th International Workshop on Deregulated Electricity Market Issues in South-Eastern Europe, 20-21 September, 2011, Bled, Slovenia - El. knjiga. – Ljubljana: Založba FE in FRI, 2011, ISBN 978-961-243-183-9
6. Н.Джагаров, **С.Филчев**, Д.Христов, Математически модел на ветропарк със синхронни генератори с постоянни магнити. „Енергиен форум 2012”, с.452-461.
7. Н.Джагаров, М.Панайотов, **С.Филчев**, Ю.Джагарова, М.Бонев, Ж.Гроздев, Д.Христов, Д.Цветанов, Математические модели синхронных ветрогенераторов с постоянными магнитами, «Электроэнергетика глазами молодёжи»: научные труды III международной научно-технической конференции: Сборник статей. В 2 томах, Екатеринбург: УрФУ, 2012. с.51-62. УДК 621.311 (082).
8. Djagarov N., **Filchev S.**, Djagarova J., Grozdev Zh., Bonev M., Pospíchal L., Toman P., Drápela I., Investigation of the power quality of wind permanent magnet synchronous generator, Electric Power Engineering EPE 2013, 28-30.5.2013, Kouty nad Desnou, Czech Republic,

**Статия №1 е реферирана в световните бази научни данни Scopus, British Libray и Compendex, а статия №4 – в базата данни Web of Knowledge.**

## **ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА**

### **Теоретични изследвания**

Създаден е математически модел на ветропарк, съдържащи асинхронни генератори и статичен напречен компенсатор. Проведени са експерименти с така създадения модел, с помощта на който са получени основните характеристики на работа на ветропарк със статичен напречен компенсатор в различни работни и аварийни режими.

Създаден математически модел на ветропарк, съдържащ асинхронни генератори и статичен синхронен компенсатор СТАТКОМ с адаптивно управление, който е присъединен към разпределителна

мрежа. Проведени са експерименти с така създадения модел, с помощта на който са получени основните характеристики на работа на ветропарк със СТАТКОМ в различни работни и аварийни режими.

Създаден е математически модел на ветропарк, съдържащ синхронни генератори с постоянни магнити, който е присъединен към разпределителна мрежа. Проведени са експерименти с така създадения модел, с помощта на който са получени основните характеристики на работа на ветропарк със синхронни генератори с постоянни магнити в различни работни и аварийни режими.

Създаден е математически модел на офшорен ветропарк, съдържащ асинхронни ветрогенератори с двойно захранване, свързан с бреговата електрическа мрежа чрез вставка за постоянен ток. Чрез симулации са изследвани режимите на работа на ветропарка при различни смущения.

Предложени са адаптивни контролери, управляващи системните компенсирани устройства във ветропарковете, които повишават устойчивостта на работа на ветропарковете и подобряват качеството на преходните режими.

### **Експериментални изследвания**

Събрани са данни за производството на електроенергия от различни ветропаркове, присъединени към разпределителни мрежи средно и високо напрежение. Данните са обработени статистически, като са направени изводи за тяхното използване при прогнозирането и управлението на ветровата генерация.

Събрани са данни за качеството на произвежданата електроенергия в различни точки на разпределителната мрежа. Направени са изводи за съответствието му с изискванията.

### **Научни резултати**

Създадени са математически модели на изследваните енергосистеми, съдържащи ветропаркове с различен тип генератори и статични компенсатори.

Предложени са нови адаптивни управления на базата на идентификационни методи на статичните компенсатори, което подобрява качеството на електрическата енергия в мястото на присъединяване на ветропарка към мрежата.

Изследвани са качествените показатели на генерираната електроенергия в статични и динамични режими на ветропаркове, използващи различен тип генератори.

### **Резултати с приложна насоченост**

Направен е обзор на изискванията за присъединяване на ветропарковете към мрежата в различни страни и е предложен Grid code на Енергийния системен оператор.

Направен е обзор на методите за оценка на техническите загуби в разпределителната и преносната мрежи, съдържащи ветропаркове. Предложен е метод за разпределение на цената на загубите между участниците на енергийния пазар. Анализирани са възможните методи и технически средства за намаляване на техническите загуби.

Получени са данни за качеството на електроенергията, генерирана от ветропарковете, което позволява да се предприемат мерки за нейното подобряване.

Използването на статични компенсатори с адаптивно управление позволява по оптимален начин да се намалят загубите в разпределителната мрежа.