Т Е Х Н И Ч Е С К И У Н И В Е Р С И Т Е Т – В А Р Н А

инж. Пламен Валентинов Янков

Заглавие:

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОДОБРЕНИ СХЕМИ НА СИЛОВИ ЕЛЕКТРОННИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ ЗА ВЕТРОГЕНЕРАТОРИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и научна степен "Доктор"

Научен ръководител: **Доц. д-р инж. Венцислав Цеков Вълчев**

Рецензенти:

1. .....

2. .....

Варна, 2013 г.

Дисертационният труд е обсъден на 08.10.2013 г. в катедра "Електронна техника и микроелектроника" и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра "Електронна техника и микроелектроника".

Автор: инж. Пламен Валентинов Янков

Заглавие: Изследване на подобрени схеми на силови електронни преобразуватели за ветрогенератори

Т Е Х Н И Ч Е С К И У Н И В Е Р С И Т Е Т – В А Р Н А

инж. Пламен Валентинов Янков

Заглавие:

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОДОБРЕНИ СХЕМИ НА СИЛОВИ ЕЛЕКТРОННИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ ЗА ВЕТРОГЕНЕРАТОРИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за получаване на образователна и научна степен “ДОКТОР”

Варна, 2013 г.

Дисертационният труд съдържа 129 страници, включително 81 фигури, 6 таблици, и 2 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 136 заглавия, от които 16 на кирилица и 120 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ……..... г. от ……..... ч.

в ..... на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора № ...../..... г.

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

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Възобновяемите енергийни източници пораждат все по-голям интерес, подпомогнати от общата Енергийна стратегия на всяка от страните членки на ЕС до 2020 г. Налагането на нови екологични норми и квоти за вредни емисии обуславя сериозни инвестиции в построените топлоелектрически централи или намаляване на техния дял в общото електропроизводство. Очевидно е, че бъдещето изисква изграждането на съоръжения, използващи екологично чисти и възобновяеми енергийни източници.

Преобразуването на енергията от вятъра в електрическа чрез ветрогенератори е един от най-бързо развиващите се сектори в областта на ВЕИ. Повишаването на ефективността и устойчивостта на силовите електронни системи оказва все по-голямо значение при наличието на все по-голям брой инсталирани мощности. Важни характеристики са: работа при променлива скорост на вятъра и следване на кривата с максимална стойност на преобразуваната енергия. Поддръжката и работоспособността им в дългосрочен план е определящ фактор и икономически критерий за оценка на даден проект. Предимството на наложените на пазара преобразуватели с напълно управляеми силови електронни ключове е в прецизността на контрола на количеството извлечена енергия от вятъра. Същевременно чувствителността към пренапрежения на управляващата им част е техен съществен недостатък. В патент PCT/EP2010/055637 са предложени подобрени схемни решения на неуправляеми трифазни токоизправители за ветрогенератори. Изследването на работата и ефективността им ще даде възможност за създаване на методика за проектирането им и алгоритми за оценка на преобразуваната енергия.

ПРОБЛЕМ

Текущите решения в областта на ветровата енергетика обуславят разглеждането на енергийно ефективни, а също и устойчиви на влиянието на околната среда системи, които включват силови електронни преобразуватели за извличане на кинетичната енергия от вятъра.

Съвременните силови електронни преобразуватели с напълно управляеми електронни ключове отговарят на изискванията за ефективност, но контролната им част ги прави уязвими при наличие на пренапрежения, както и увеличава възможността за дефект в самото устройство. Предложени са схемни решения на трифазни неуправляеми токоизправители за ветрогенератори в патент PCT/EP2010/055637. Нужно е изследване и анализ на тяхната работа и оценка на ефективността на извличане на кинетичната енергия на вятъра чрез построяване на сравнителни честотно/мощностни характеристики.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Повишаване на количество преобразувана енергия от ветрогенератори чрез анализиране, изследване, моделиране и проектиране на подобрени схеми на силови електронни преобразуватели.

ОСНОВНИ ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Анализиране на работата на използваните структури на силови електронни преобразуватели и изясняване на свойствата и характеристиките им. Оценка на необходимостта от разработване на подобрени схеми на силови електронни преобразуватели за ветрогенератори.
2. Предлагане на структурна схема на системата за преобразуване на енергия от вятъра чрез ветрогенератори и при използване на трифазни усъвършенствани топологии за токоизправители при следните изисквания:
   - Работа на генератора с променлива скорост на вятъра;
   - Максимално съвпадение на моделираната честотно/мощностна крива с позната кубична крива на мощността на ветрогенератора.
3. Анализиране и изследване на подобрени схеми на токоизправители за ветрогенератори. Разработване и верифициране на инженерна методика за проектиране на изследваните силови електронни преобразуватели чрез моделиране на честотно/мощностните им характеристики.
4. Разработване, анализ и изследване на електрически спирачки за ветрогенератори към изследваните токоизправители.
5. Експериментално изследване, верификация и обобщаване на особеностите на разработените електронни блокове и получените резултати.

ОБЕКТ И ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обектът на изследването са ветрогенераторите с хоризонтална ос на въртене и лопатки, ориентирани по посока на вятъра (downwind).

Предмет на научното изследване е изясняване принципа на работа на подобрените схеми на трифазни токоизправители за ветрогенератори чрез моделиране на честотно/мощностните им характеристики. В допълнение към изследваните подобрени схеми е разработването на аварийни електрически спирачки за ветрогенератори.

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Използван е софтуер за компютърно моделиране и симулиране; математически софтуер и оптимизационен метод на сканирането с променлива възвратна стъпка.

МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследванията са извършени в:

- Технически Университет – Варна – лаборатория по „Силова електроника” към катедра „Електронна техника и микроелектроника”
- Университет Гент, Белгия – лаборатория по „Електрическа енергия” – EELAB – в рамките на студентска мобилност по програма „ЕРАЗЪМ”.

НАУЧНА НОВОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Изследването, направено в дисертацията, изяснява принципа на работа, характеристиките и предимствата на подобрените схеми на неуправляеми токоизправители за ветрогенератори.

Разработена е методика за моделиране на честотно/мощностните характеристики чрез промяна на стойностите на реактивните компоненти, включени в подобрените схеми на неуправляем токоизправител. Създаден е компютъризиран алгоритъм за реализирането на методиката на честотно/мощностните характеристики.

Разработени са електрически спирачки за ветрогенератори към подобрените схеми на неуправляем токоизправител. Първата е капацитивна (статична), а втората натоварва електрически статорната намотка на електрическия генератор (динамична).

ПРАКТИЧЕСКА ЦЕННОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Реализираното изследване и разработената методика за проектиране позволяват правилно оразмеряване на добавените реактивни компоненти към подобрените схеми на неуправляеми токоизправители. Резултатите от компютърните симулации служат за изходни данни за проектанта на синхронния генератор с постоянни магнити, използван за ветрогенератора.

АПРОБАЦИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Основните теоретични и приложни резултати от дисертационния труд са представени в общо 14 публикации, от които:

1 публикация в списание „Електроника и Електротехника Е+Е”;

1 доклад, изнесена на конференция „European power electronics – Power electronics and motion control - EPE-PEMC 2010”, Ohrid, Macedonia;

1 доклад, изнесена на конференция „EPE'11 ECCE“, Birmingham, UK;

1 доклад, изнесена на конференция „EPE'12 PEMC”, Novi Sad, Serbia.

Конференциите са индексирани в електронната база SCOPUS и IEEE Explore.

ГЛАВА 1. ВЪЗОБНОВЯЕМИ ЕНЕРГИЙНИ ИЗТОЧНИЦИ – ЕНЕРГИЯ НА ВЯТЪРА. СЪСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМИ

В Глава 1 на дисертацията се разглеждат тенденциите в развитието на възобновяемите енергийни източници (ВЕИ), като е обоснована нуждата от тяхното използване. Конкретно е разгледана енергията, получавана от устройствата за преобразуване на енергията на вятъра - ветрогенераторите.

Описани са основните конструктивни елементи, на всеки ветрогенератор. Принципът на преобразуването на кинетичната енергия във вятъра в механична и след това в електрическа е изяснен.

Разгледани са видовете ветрогенератори, както и топологиите на присъединяване на различните видове електрически машини към електропреносната мрежа. Обобщени са предимствата и недостатъците на всяка от разгледаните топологии.

Описани са основните характеристики и формули за оценка разпределението на мощността и скоростта на върха на лопатките спрямо скоростта на вятъра, както и графика за определяне на коефициента на мощността.

Таблична са сравнени предимствата и недостатъците при работа на ветрогенераторите с фиксирана и променлива скорост на вятъра.

Извършено е и таблично сравнение на себестойността на произвежданата електрическа енергия от ветрогенераторите през годините.

Подробно са анализирани съществуващите топологии на силови електронни преобразуватели с приложение при ветрогенераторите. Представени са техните предимства и недостатъци заедно с примерен модел на честотно/мощностната им характеристика.

Разгледани са основните видове спирачни устройства и механизми за ветрогенератори – електрически, аеродинамични и механични. Направена е класификация на подвидовете, като във всяка подточка са представени данни за начина на задействането им. Посочени са предимствата на електрическите спирачки за ветрогенератори спрямо останалите два вида.

Направен е обзор на синхронните двигател/генератори. Представени са техни характерни особености и най-разпространените видове в практиката. Обосновано е използването им в настоящия труд.

Обобщения и изводи

От направения литературен обзор, сравнителни анализи и констатирани нерешени проблеми се формират следните изводи:

1. Анализът на тенденциите в развитието на ветровата енергетика доказва наличието на сериозен бъдещ интерес към изграждането на нови мощности. Научното развитие в тази област е в посока на

повишаване на ефективността и надеждността на цялостната система за преобразуване на енергията на вятъра. Измежду използваните електрически машини синхронните генератори с постоянни магнити са най-съвременното решение, осигуряващо по-дълги периоди между регулярната техническа поддръжка. Това обуславя нови изисквания и подобряване на схемите на силовите електронни преобразуватели за управление на този вид електрически машини [Д. 6], [Д. 13].

2. Съществуващите силови електронни токоизправителни схеми, подходящи за управление на електрически генератори, задвижвани от ветрогенератори са: неуправляеми схеми с ниска ефективност и цена (т. нар. схема Ларионов) или управляеми мостови схеми с висока ефективност и цена. В този смисъл е обоснована необходимостта от анализа и изследването на конкурентна подобрена схема на неуправляем силов електронен преобразувател за ветрогенератори със следните повишени изисквания: ниски нива на електромагнитно излъчване, висока надеждност и конкурентна ефективност при работа с променлива скорост на вятъра, които са наложени от нарастващите мощности на инсталираните електрически генератори и поставянето им в неблагоприятна околна среда (морета и океани, пустини, урагани и др.) [Д. 14].

3. Зададените в т. 2 повишени изисквания пораждат нужда от разработка на съпътстващи електрически решения за аварийно спиране, подходящи за разработваната топология. Известните методики за спиране на ветрогенераторите имат различни съществени недостатъци - скъпа и честа поддръжка, сложни управляващи системи, излъчване на електромагнитни смущения и др. Анализът на съществуващите решения показва липса на електрическа спирачка, съобразена с нарасналите изисквания.

ОГРАНИЧЕНИЯ

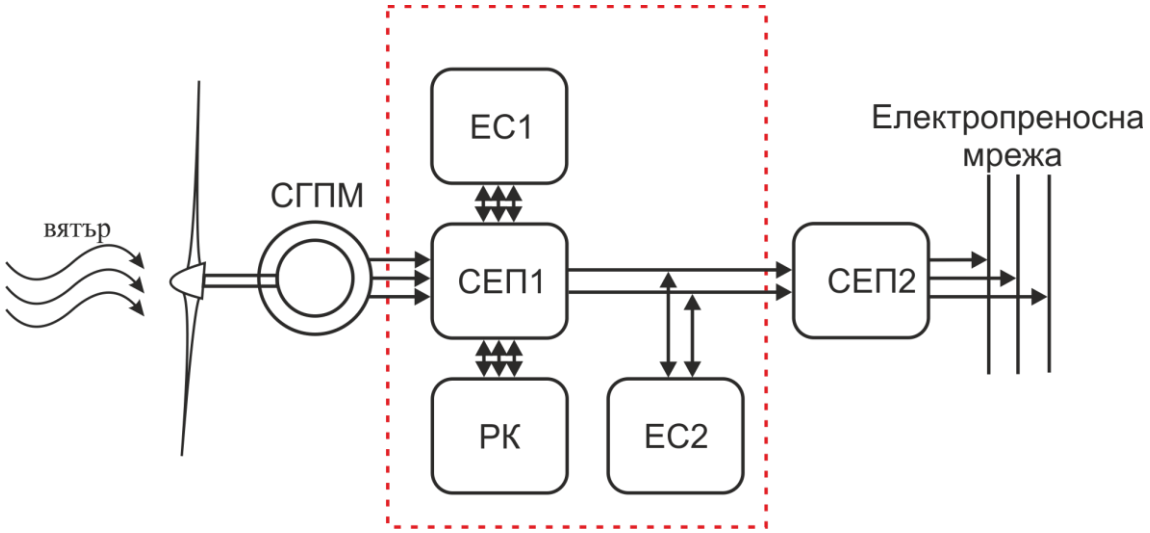
1. Изследването е насочено към ветрогенератори с хоризонтална ос на въртене със синхронен генератор с постоянни магнити.
2. Моделът на електрическите блокове за ветрогенератор е с ограничена мощност.
3. Поради невъзможност за получаване на аналитичен модел се преминава към моделиране.
4. Поставените задачи се решават в установен режим на работа. Протичането на преходните процеси не се разглежда.

ГЛАВА 2. ИЗСЛЕДВАНЕ, АНАЛИЗ И МОДЕЛИРАНЕ НА ПОДОБРЕНИ СХЕМИ НА НЕУПРАВЛЯЕМИ ТОКОИЗПРАВИТЕЛИ ЗА ВЕТРОГЕНЕРАТОРИ

Главата съдържа изследване, анализиране и създаване на методика за моделиране на честотно/мощностна крива на неуправляем трифазен токоизправител с подобрени характеристики за ветрогенератори. Целта е да се постигне крива, която следва добре познатата кубична зависимост (P_{wtmax}~ω_T^3) на преобразуваната енергия. Научното изследване е основата за получаване на предикативни данни за годишния добив на електроенергия от системата. Това определя конкурентоспособността на преобразувателя, сравнен със съществуващите и прилагани до настоящия момент решения в промишлеността.

2.1. Структура на системата за преобразуване на енергия от вятъра чрез ветрогенератори

Предлагам структура на система за преобразуване на енергията на вятъра чрез ветрогенератор на Фиг. 2.1 с електрическа мощност на генератора P_{nom}=100 kW, номинална честота на работа fnom=40 Hz и коефициент на ЕДН Кедн=40 V/Hz.



Фиг. 2.1 Структура на системата за преобразуване на енергия от вятъра чрез ветрогенератори

Разглежданата структура включва следните блокове:

Абревиатурата СГПМ е синхронен генератор с постоянни магнити.

Първият силов електронен преобразувател СЕП1 е подобрената схема на неуправляем токоизправител, представен във втора глава на дисертацията.

Блокът РК представлява реактивните компоненти (реактори или кондензатори), с които взаимодейства СЕП1.

Електрическа спирачка от първи вид – ЕС1.

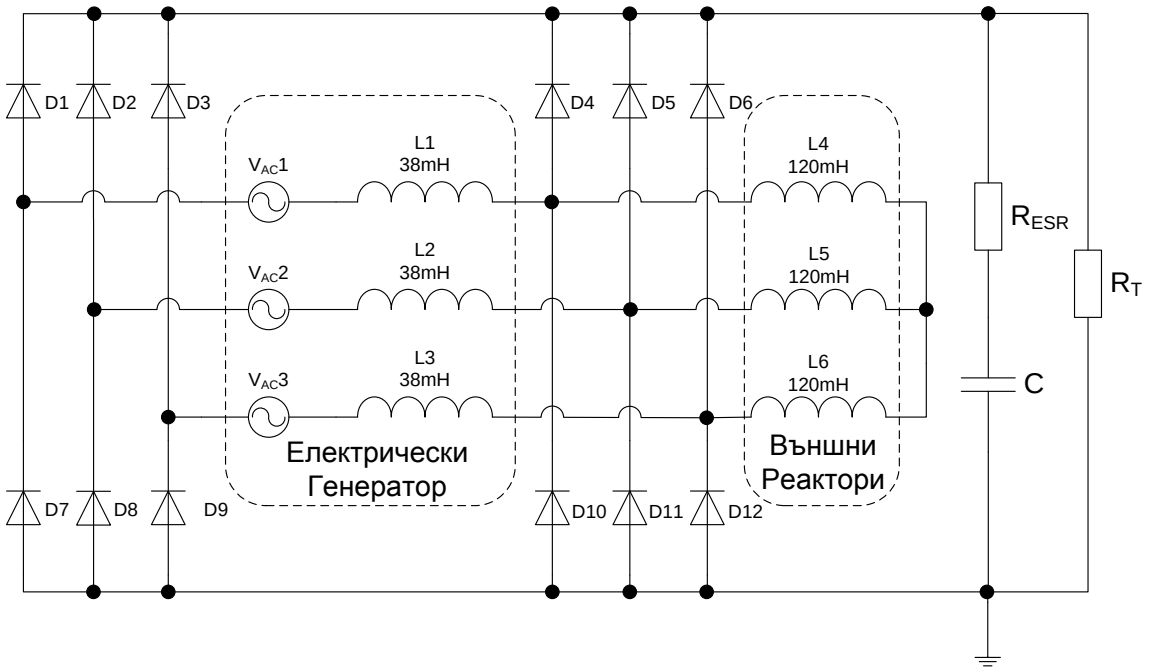
Електрическа спирачка от втори вид – ЕС2.

Вторият силов електронен преобразувател СЕП2 представлява инвертор, служещ за инжектиране на произведената електрическа енергия в електропреносната мрежа.

Блоковете, които се анализират, изследват и верифицират в дисертацията, са очертани с пунктирана линия.

2.2. Принципна схема и принцип на работа на базова подобрена схема на неуправляем трифазен токоизправител

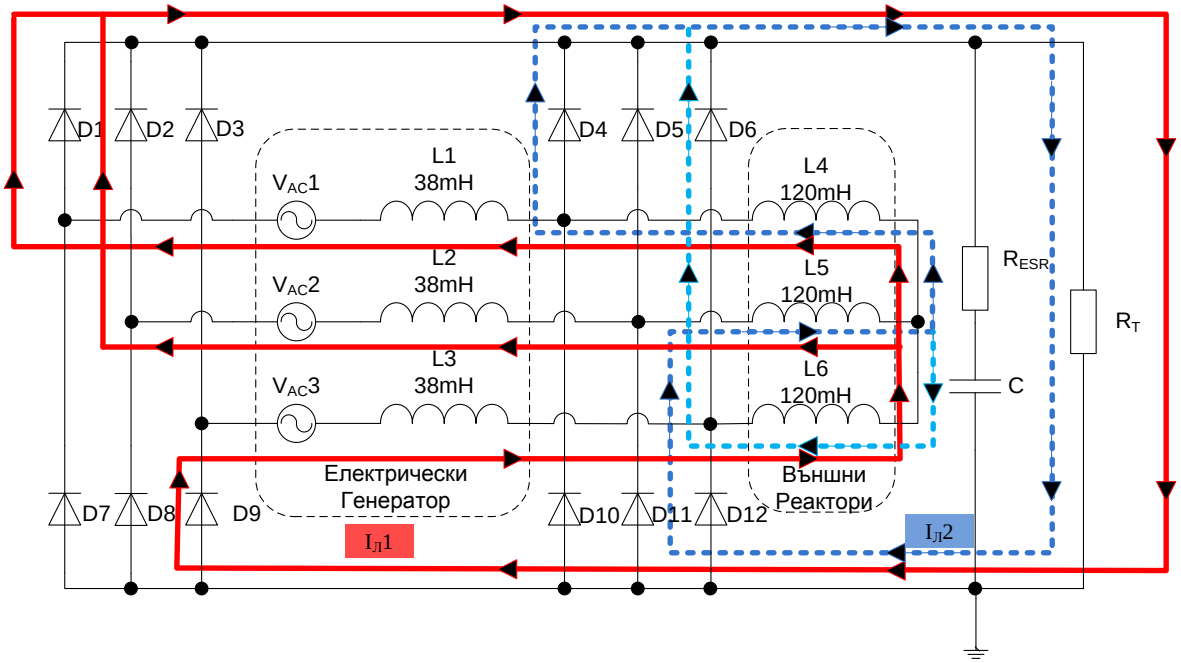
Изследваната трифазна схема е показана на Фиг. 2.2. Това е базово схемно решение, чрез което се постига подобрение на количество преобразувана енергия от вятъра спрямо конвенционалния трифазен двуполупериоден изправител (схема „Ларионов”).



Фиг. 2.2 Трифазна схема за симулация на неуправляемия токоизправител с подобрени характеристики за ветрогенератор

В аналоговата схема електрическата машина е формирана от източници на напрежение AC1 ÷ AC3 и бобини L1 ÷ L3 за всяка една от фазите. Активното съпротивление на намотките е включено в модела на бобините. Шестте извода от намотките на генератора са включени към два трифазни двуполупериодни неуправляеми токоизправителя, реализирани чрез диоди D1÷D12. Допълнителните външни реактори L4 ÷ L6 са свързани към всяка една от фазите като вторите им изводи формират външна обща точка за електрическия генератор.

Основно предимство на токоизправителя е възможността за работа на ветрогенератора с променлива скорост на вятъра, което осигурява повишаване на количеството на преобразуваната енергия. Извършва се нелинейно електрическо натоварване на генератора, чрез което се контролира преобразуваното количество енергия за всяка скорост на въртене на ротора.



Фиг. 2.3 Основни контури на линеен ток през „левия“ и „десния“ токоизправител за номинална честота на електрическия генератор

На Фиг. 2.3 са показани двата основни контура на линейния ток. Контур на тока $i_Л1$ протича през: R_T, D9, AC3, L3, L6, L4/L5, L1/L2, AC1/AC2, D1/D2, като диодите D1 и D2 работят заедно, т.е. наличен е режим на взаимна комутация. Вторият контур на тока $i_Л2$ протича през: R_T, D11, L5, L4/ L6, D4/D6, като диодите D4 и D6 работят заедно, т.е. отново е наличен режим на взаимна комутация.

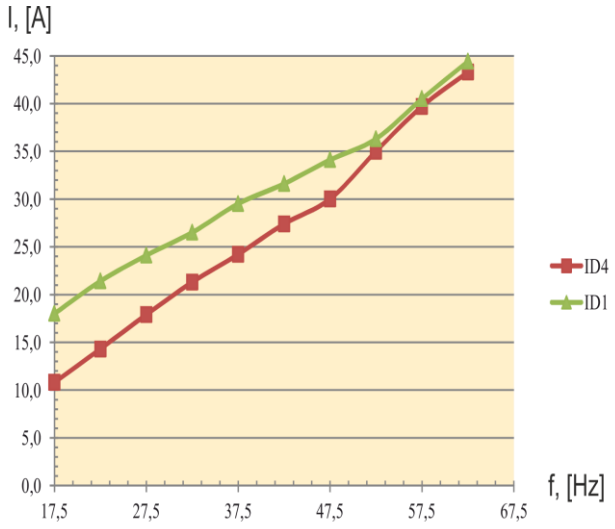
За да бъде анализирана работата на схемата по-подробно, е нужно да се зададат базови изходни стойности на електрическия генератор:

1. P_{nom} – номинална изходна мощност на ветрогенератора – 110 kW, (включени са 10 % запас поради механични загуби);
2. f_{nom} – номинална честота (обороти на въртене) – 40 Hz (75обр./мин.);
3. K_{emf} – коефициент на ЕДН – 40 V/Hz.

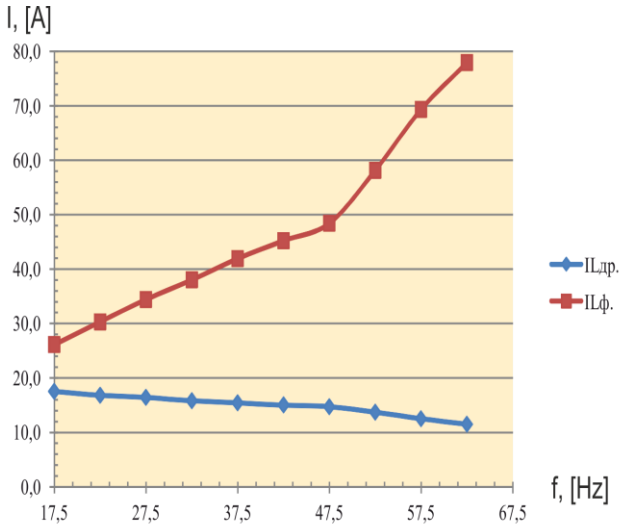
Константата K_{emf} определя отношението между амплитудната стойност на напрежението от генератора и оборотите на въртене на електрическия генератор. Линейната зависимост е нужна за създаването на опростения модел на генератора в Capture CIS. Нейната стойност се определя от желаната стойност на напрежението в постояннотоковата част на схемата.

На Фиг. 2.4. са представени графични резултати от сравнението на ефективните стойности на тока през диоди D1 и D4 в зависимост от оборотите на въртене.

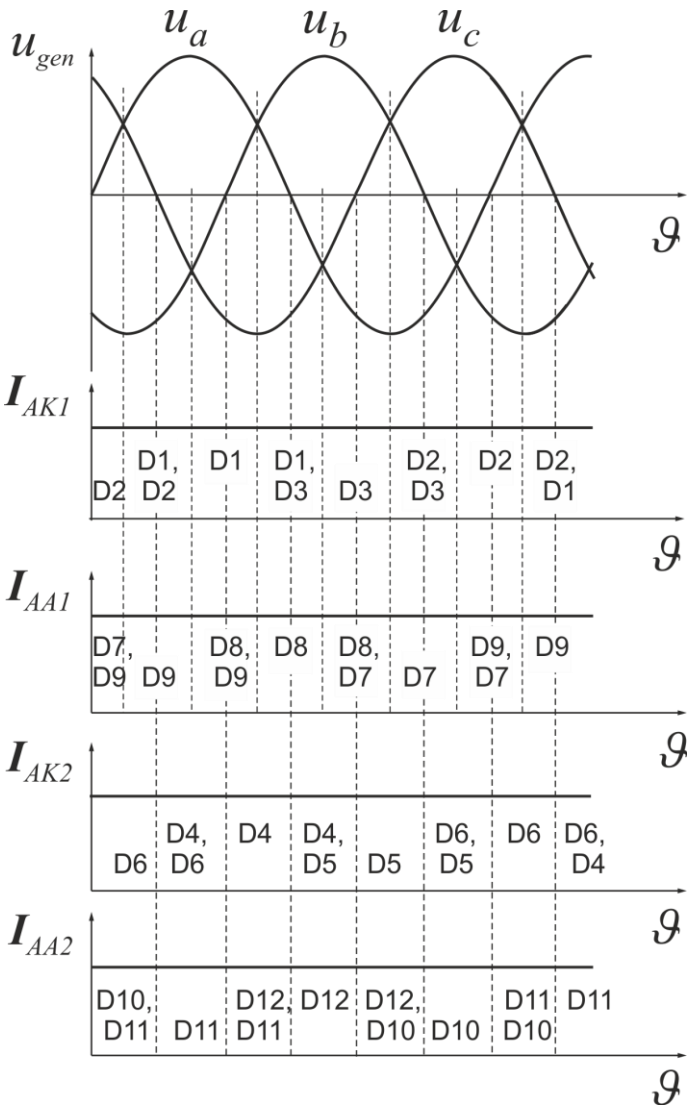
На следващата Фиг. 2.5. са представени графични резултати от сравнението на ефективните стойности на тока през реактора и през намотка на генератора в зависимост от оборотите на въртене.



Фиг. 2.4 Ефективна стойност на тока през диоди D1 и D4 в зависимост от оборотите на въртене



Фиг. 2.5 Ефективна стойност на тока през реактора и през намотка на генератора в зависимост от оборотите на въртене



Фиг. 2.6 Времедиаграми

На Фиг. 2.6 са представени времедиаграми, описващи работата на катодните и анодните групи от двата токоизправителя спрямо трифазното напрежение от електрическия генератор. При взаимна комутация преходният процес се характеризира с преминаване на тока от единия вентил към другия. При пренебрегване на активните загуби във веригата и токът през товара е константна величина, прехвърлянето става за интервал от време, който е еднакъв за намаляващия ток през единия вентил и за увеличаващия се ток през другия вентил:

$$\frac{di_{VAC1}}{dt} = -\frac{di_{VAC2}}{dt}, \tag{2.1}$$

тъй като

$$\mathrm{i}_{Л}1 = i_{VAC1} + i_{VAC2}, \text{ [A]}. \tag{2.2}$$

В интервала на взаимна комутация стойността на изходното напрежение се получава от двете фази с отпушени вентили и е равна на:

$$\mathrm{u}_{\mathrm{RT}} = u_{VAC1} - L1\frac{di_{VAC1}}{dt}, \text{ [V]} \tag{2.3}$$

$$\mathrm{u}_{RT} = u_{VAC2} - L2\frac{di_{VAC2}}{dt}, \text{ [V]} \tag{2.4}$$

$$u_{VAC1} - L1\frac{di_{VAC2}}{dt} = u_{VAC2} - L2\frac{di_{VAC2}}{dt}, \text{ [V]} \tag{2.5}$$

Напрежението върху L1 се получава чрез заместване в предните две уравнения:

$$L1\frac{di_{VAC1}}{dt} = \frac{u_{VAC1} - u_{VAC2}}{2}, \tag{2.6}$$

където

$$u_{VAC1} = U_{VAC1m}.\cos(\theta - \frac{\pi}{3}), \text{ [V]} \tag{2.7}$$

$$u_{VAC2} = U_{VAC2m}.\cos(\theta + \frac{\pi}{3}), \text{ [V]} \tag{2.8}$$

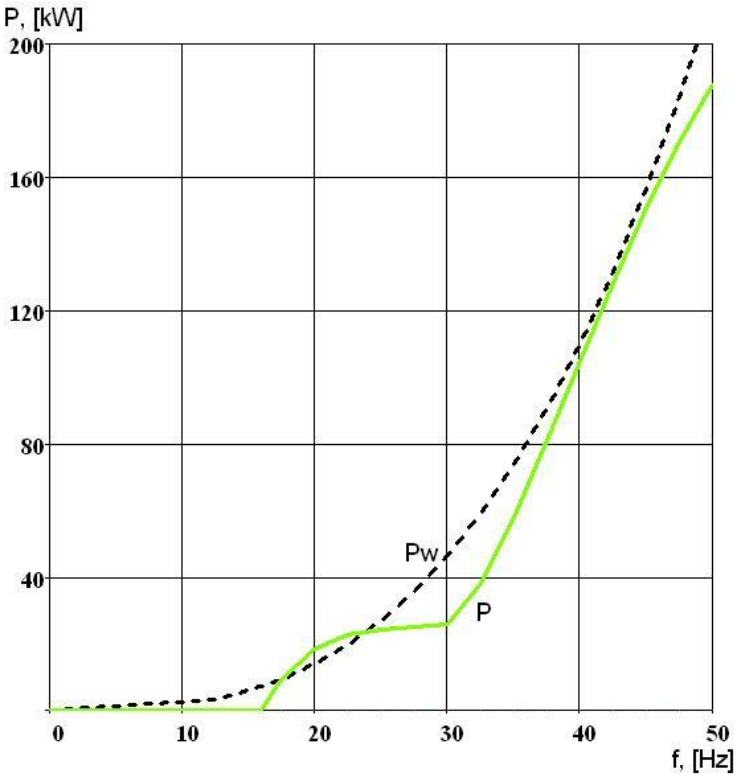
За напрежението върху товара в интервала на комутация се получава:

$$u_{RT} = u_{VAC1} - L1\frac{di_{VAC1}}{dt} = \frac{u_{VAC1} - u_{VAC2}}{2}, \text{ [V]} \tag{2.9}$$

Напрежението е полусумата от фазните напрежения на едновременно отпушените вентили.

Резултат от работата на подобрената схема на неуправляем токоизправител е представената изходна мощност на ветрогенератора като функция на честотата на електрическия генератор на Фиг. 2.7.

Характерната за схемата промяна в топологията на генератора за различни обороти на въртене обособява две плавно преливащи области на честотно/мощностната крива. Първата е при ниски обороти на въртене (под номиналните за даден ветрогенератор), където стойността на реактивното съпротивление на реакторите е ниско, тъй като $\omega = 2.\pi.f$ е с по-ниска стойност поради честотата. В този случай намотките на генератора са свързани в конфигурация, сходна на звезда, през реакторите поради ниското им съпротивление. Предимството при стартиране на ветрогенератора за свързване тип „звезда” е, че напрежението е √3 пъти по-високо (при синусоида) пред топология тип „триъгълник”.



Фиг. 2.7
Честотно/мощностна крива на трифазната схема

Легенда към Фиг. 2.7:

P – крива на мощността от симулациите в kW,

P_w – теоретична кубична крива на вятъра в kW.

2.3. Анализ на влиянието на стойностите на добавените реактивни компоненти. Създаване на методика за настройка на схемите за пасивно преобразуване с подобрени характеристики

В подраздела е представена методика за определяне на стойностите на компонентите от схемата.

Стъпка 1. Определяне на максималната мощност на ветрогенератора при зададени начални параметри

Изчислява се аналитично от зададените входни данни чрез следното уравнение:

$$P_{wt\max} = 3 \times U_{dc} \times \frac{U_{ac}}{2 \times \pi \times f \times L_{gen}} \times \frac{2}{\pi} \qquad (2.10)$$

С L_{gen} бележим стойността на индуктивността на разсейване на фаза на генератора; U_{dc} – постоянното изходно напрежение; U_{ac} – напрежение от източника за определена честота; f – честотата на въртене, която е избрана.

Условия за изчисление на максималната мощност са:

- задаване на висока честота f с цел достигане на областта на наситен електрически генератор;
- изчисляване на U_{ac} чрез честота f и константата K_{emf}.

Стъпка 2. Определяне на минималната стойност на оборотите на въртене (честота), при която започва преобразуване на енергия

Точката на начало на извличане на енергия от вятъра зависи от коефициента K_{emf}. За да работят трифазните двуполупериодни токоизправители от Фиг. 2.1, е нужно стойността на генерираното напрежение от източниците AC1 ÷ AC3 да е по-голяма от стойността на напрежението в постояннотоковата част.

Стъпка 3. Определяне на стойностите на реактивните компоненти

Стойностите на двата компонента се определят чрез метод на сканирането с променлива възвратна стъпка.

Таблица 2.4 Параметри, участващи в определянето на стойностите на реактивните компоненти по метода на сканирането с променлива възвратна стъпка

№	Параметър	Мерна Единица	Начална Стойност	Стъпка Грубо	Стъпка Финно	Крайна Стойност
1	L_{gen}	mH	0	10	1	38
2	L_{ext}	mH	0	20	10	120

Теоретичната максимална стойност на мощността за дадена честота се определя чрез следващото уравнение:

$$P_w = P_{nom} \times \left[\frac{f_a}{f_{nom}} \right]^3, \text{[W]}, \qquad (2.11)$$

където P_{nom} е стойността на преобразуваната мощност при номинална честота (обороти на въртене); f_{nom} е номиналната честота; f_a – текуща честота.

2.4. Разработка на компютъризиран алгоритъм на предложената методика в МАТЛАБ

Необходимостта от извършване на множество итерации до достигане на оптимална стойност на преобразуваната енергия, прави изследването на всяко схемно решение продължително във времето. Създаване на автоматизиран вариант на методиката при изчисление на стойностите на компонентите и достигане до оптимизираната финална крива съществено ще съкрати времето за проектиране за дадена мощност на ветрогенератора.

2.4.1 Необходими входни данни за работа на алгоритъма

Входните данни са P_{nom}, f_{nom} и K_{emf}.

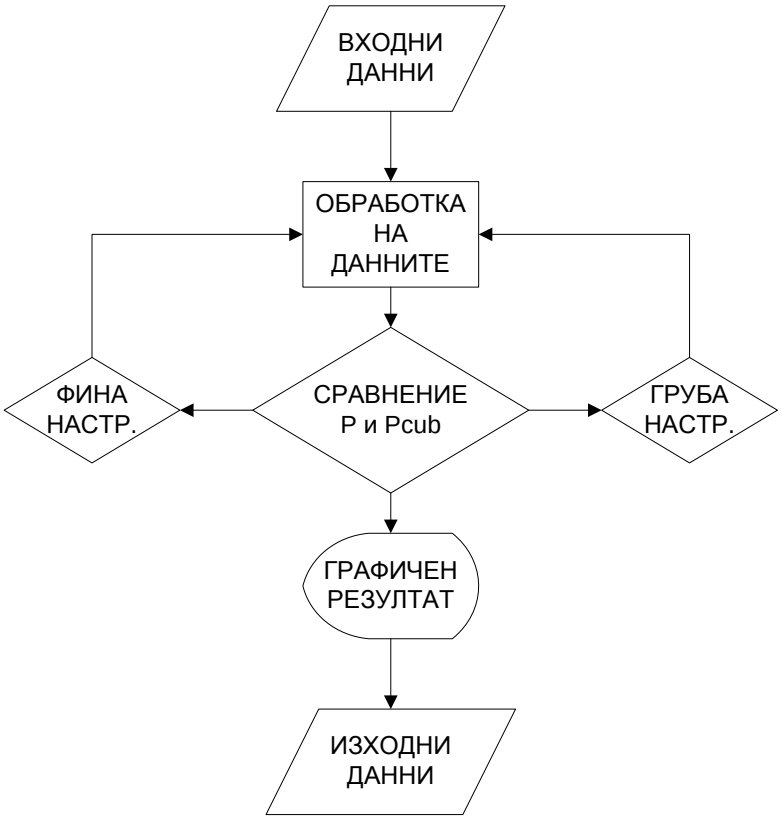
Резултатите от изследването се запазват в изходен файл (в таблица), като също така се извършва графично изобразяване.

Изходни данни:

a) L_{gen} – изходна стойност на индуктивността на фаза на генератора
b) L_{ext} – изходна стойност на индуктивността на външно добавения дросел

2.4.2 Блокова схема на компютъризираният алгоритъм на предложената методика

Алгоритъмът се основава на оптимизация чрез метод на сканирането с променлива възвратна стъпка. Осъществяват се последователни итерации и сравнение на известната кубична крива на мощността с модел на честотно/мощностната характеристика на подобрения токоизправител за изследваната мощност на генератора. Итерациите с промяна на стойностите на L_{gen} и L_{ext} се повтарят до постигане на максимално близка мощност за всяка честота. Стъпките са съответно 10 mH, 0,5 mH и 0,1 mH.



Фиг. 2.8 Алгоритъм за осъществяване на компютризирания модел за прилагане на преложената методика за проектиране на подобрен неуправляем токоизправител за ветрогенератори в Matlab

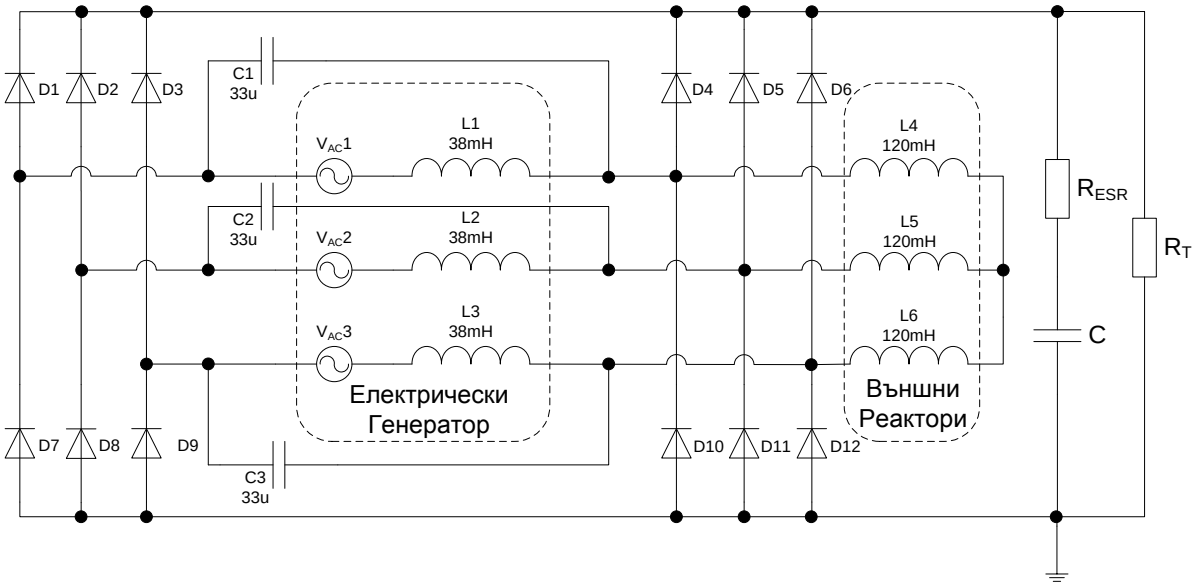
Обобщения и изводи

1. Предложена е структура на системата за преобразуване на енергия от вятъра при използване на подобрена схема на трифазен мостов неуправляем токоизправител.
2. Изследвана е базова подобрена трифазна схема на токоизправителя за преобразуване на енергията на вятъра за ветрогенератор. Анализиран е принципът на работата, както и новостите в решението [Д. 5].
3. Доказани са множеството предимства на изследваното схемно решение: липса на управляваща част, конкурентна ефективност спрямо преобразувателите с управляеми електронни компоненти, липсата на излъчване на електромагнитни смущения, които го правят подходящ за приложение във ветрогенератори със средна и висока мощност [Д. 12].
4. Разработена е методика за моделиране на честотно/мощностната крива на подобрения неуправляем токоизправител на база на промяна в стойностите на реактивните компоненти. Дефинирани са областите на действие на реактивните компоненти. Изяснен е приложеният метод за оптимизация на стойностите на точките от честотно/мощностната крива [Д. 9], [Д. 10], [Д. 11].
5. Реализираната методика чрез компютъризиран алгоритъм съществено съкращава времето за моделиране на честотно/мощностната крива за дадена схема на подобрен неуправляем токоизправител [Д. 1], [Д. 7].
6. Извършеното изследване е приложимо за всички схемни решения на подобрен неуправляем токоизправител, описани в патент PCT/EP2010/055637.

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СПИРАЧКИ ЗА ВЕТРОГЕНЕРАТОР

В тази част от дисертационния труд са проектирани, изследвани и анализирани електрически спирачки за ветрогенератор. В първата част е разгледано действието на капацитивна електрическа спирачка. Във втората половина от главата е изследвана спирачка, основаваща своето действие на електродинамичното спиране. Двете предложени решения са изследвани заедно с подобрената схема на неуправляем токоизправител. Направена е икономическа обосновка на капацитивната електрическа спирачка, както и таблично сравнение на стойностите на капацитета и цената на подходящи високоволтови кондензатори. Направен е анализ на работата на едно и многозвенна динамична спирачка.

3.1. Позициониране на капацитивна електрическа спирачка за ветрогенератор – блок схема



Фиг. 3.1 Принципна схема на капацитивна електрическа спирачка, комбинирана с подобрена схема на неуправляем токоизправител

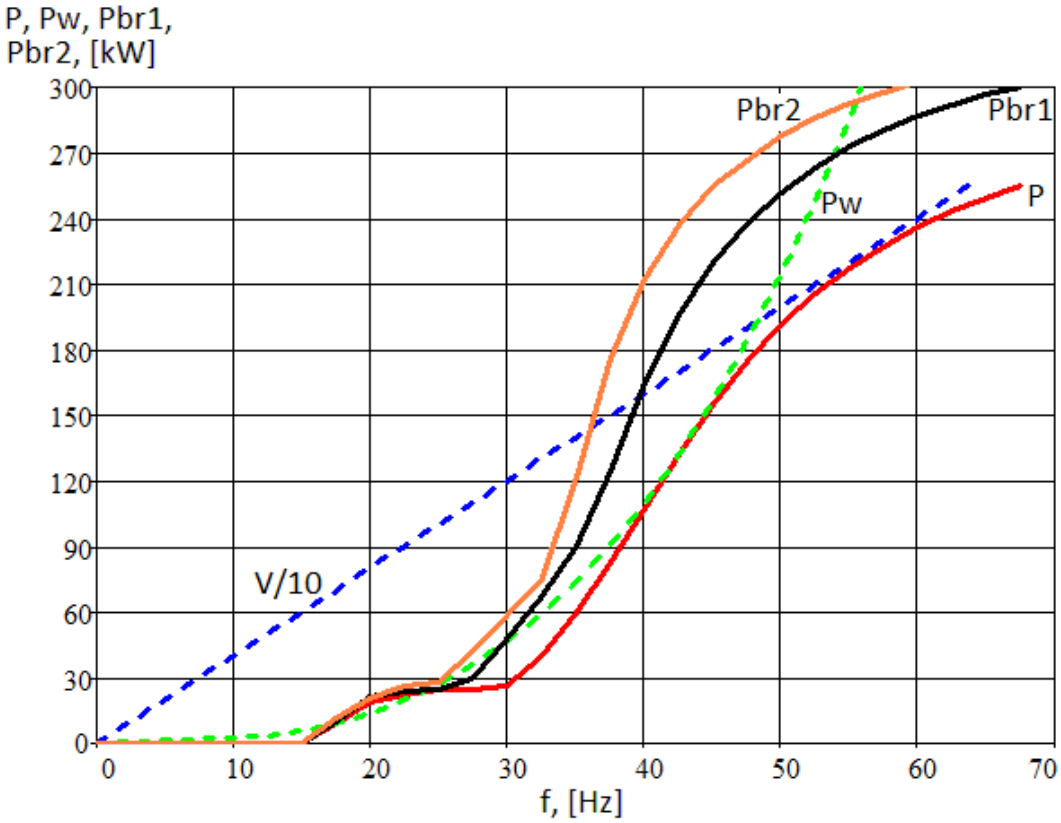
На Фиг 3.1 е предложено включване на капацитивна електрическа спирачка за ветрогенератори. За осъществяване на спиране се комутират кондензатори C1, C2 и C3, паралелно на всяка от намотките на ветрогенератора. Стойностите на капацитета им е еднаква и определя силата на приложения спирачен въртящ момент. Времезависимите ключове, използвани в симулацията U1÷U6, определят комутационна верига (контактор, тиристор), която ги присъединява към схемата в определен момент.

След прилагане на методиката за получаване на честотно/мощностните криви, както и кривите на електрическия товар при спиране, е предложен

графичен резултат на Фиг. 3.2 от изследване на подобрена схема на неуправляем токоизправител за 100kW ветрогенератор.

Стойностите на индуктивността на трите фази е еднаква по 38 mH, а външната индуктивност, добавена на всяка от фазите е 120 mH.

Честотно/мощностната крива на преобразуваната енергия (крива P) в номинален работен режим винаги остава под или в някои случаи частично над познатата кубична крива P_W ($P_W=\omega^3$). Причината е, че ветрогенераторът се нуждае от кинетичната енергия, запасена във вятъра, за да се върти и да преобразува. Ако стойностите на точките от кривата на мощността надвишат теоретично максималните стойности, то генераторът намалява своята скорост, т.е. енергията във вятъра е недостатъчна за поддържане на оборотите на въртене на генератора.



Фиг. 3.2 Честотно/ мощностни криви на ветрогенератор 100kW

Легенда към Фиг. 3.2, представените криви са както следва:

- Pw – теоретична кубична крива на мощността във вятъра,
- P – синтезирана честотно/мощностна крива за ветрогенератор 100kW електрическа мощност,
- Pbr1 – спирачна крива с включен кондензатор със стойност 15 μF,
- Pbr2 – спирачна крива с включен кондензатор със стойност 18,3 μF,
- V/10 – напрежение на генератора (ориентира проектанта на генератора).

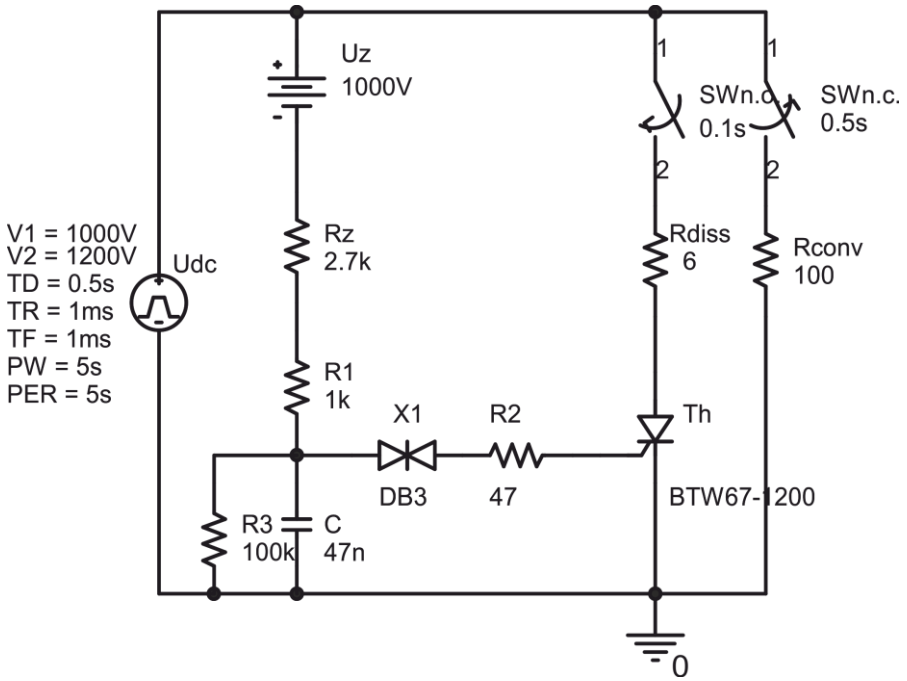
3.2. Анализ и изследване на динамична електрическа спирачна система за ветрогенератор

3.2.1. Схемно решение и позиция на симулираната електрическа спирачка за ветрогенератор

Предложената електрическа спирачна система е приложима при поява на пренапрежения във електрическата веригата на ветрогенератора при развързване от мрежата. Предложените схемни решения се базират на използването на тиристори за висока мощност, отговарящи напълно на генерираните мощности от съвременните ветрогенератори.

Разположението на проектираното решение е на постояннотоковата част от системата.

На Фиг. 3.3 е представена предложената схема. Главният електронен компонент в нея е силовият ключ, в случая тиристор. В пълния текст на дисертацията е описан принципът на работа на схемата.

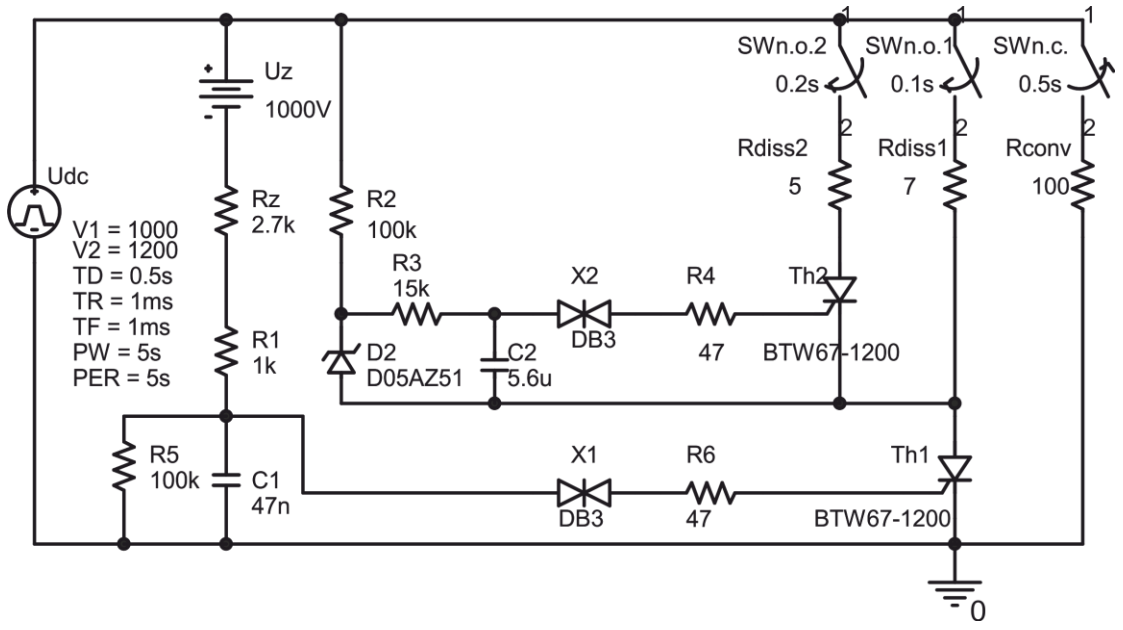


Фиг. 3.3 Принципна схема на еднозвенна динамична спирачка

3.2.1. Схемно решение и свързване на многозвенна електрическа спирачка за ветрогенератор

На Фиг. 3.4 е изобразена многозвенна електрическа спирачна система за ветрогенератори с тиристори. Входните данни и параметри са същите, като на точка 3.2.1.

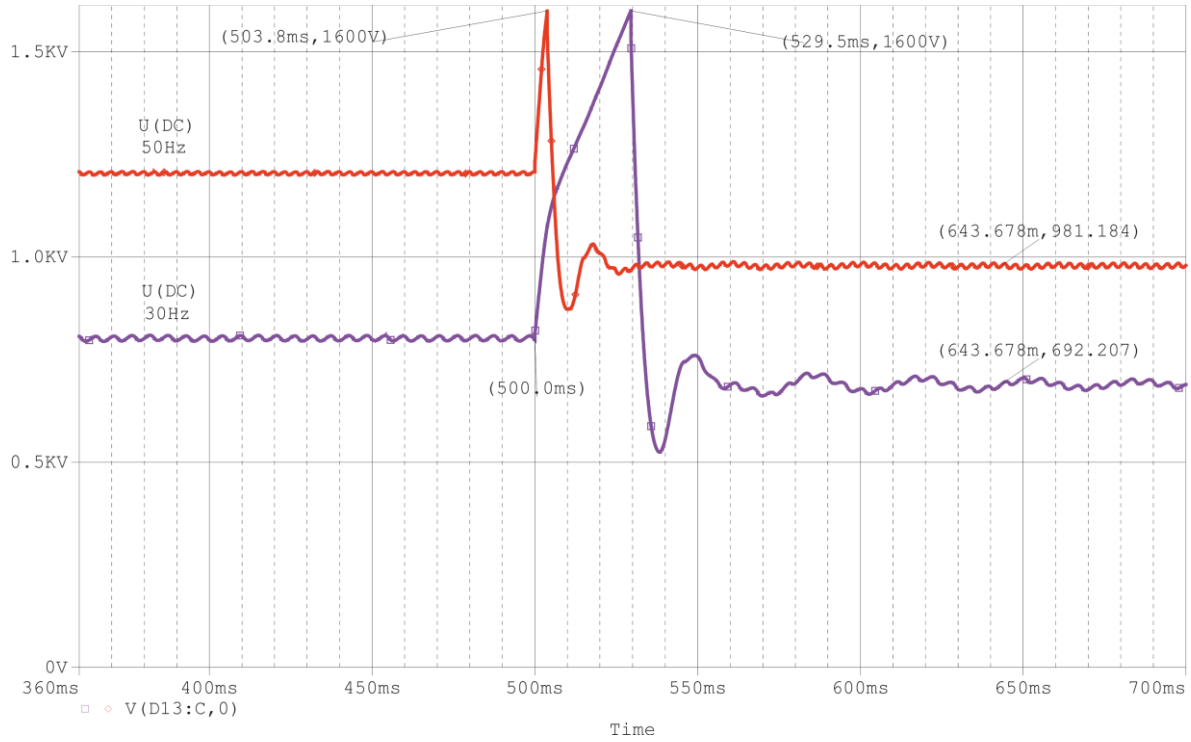
Задействането на първото звено е аналогично с това на еднозвенната схема. В пълния текст на дисертацията е направено подробно описание на принципът на работа на схемата.



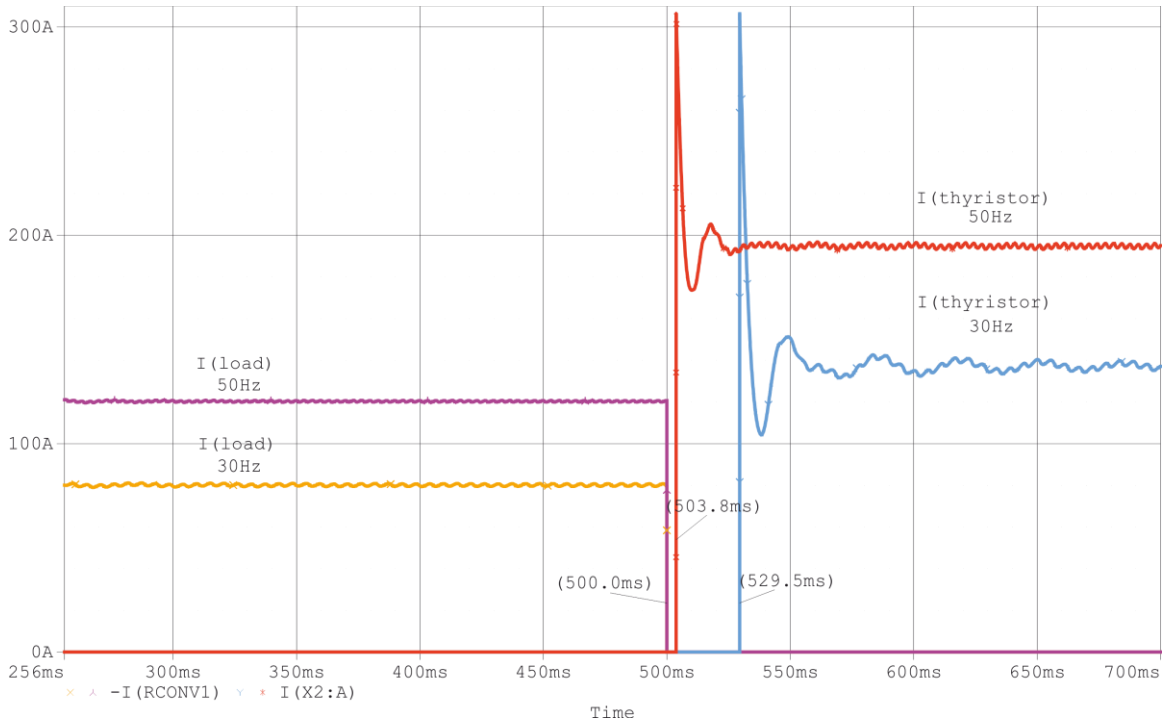
Фиг. 3.4 Многозвенна електрическа спирачна система
за ветрогенератори с тиристори

3.3. Изследване времето за задействане на динамична спирачка за ветрогенератор

На Фиг. 3.5 е показано времето за достигане на прага на задействане на електрическата спирачка при отпадане на натоварване от електропреносната мрежа при 30 Hz и 50 Hz.



Фиг. 3.5 Време за достигане на прага на задействане на електрическата спирачка при отпадане на натоварването от мрежата при 30 Hz и 50 Hz



Фиг. 3.6 Време за сработване на електрическата спирачка при 30 и 50 Hz

На Фиг. 3.6 са показани тока през товарния резистор и тока през тиристора при 30 Hz и 50 Hz. Чрез графиката се вижда преминаването от номинален към авариен режим на работа на схемата, както и времето за сработване на електрическата спирачка.

Обобщения и изводи

1. Проектирана е капацитивна електрическа спирачка за подобрени схеми на неуправляем токоизправител. Анализирана е работата ѝ, представени са характеристиките и резултатите от изследването. Предложени са стойности на компонентите, съставящи електрическата спирачка. Представени са симулирани спирачни честотно/мощностни криви, сравнени с работната такава [Д. 4].
2. Направена е икономическа оценка на компонентите, необходими за изработването на първия вид електрическа спирачка.
3. Доказани са множество предимства на капацитивната електрическа спирачка, част от които са: възможност за многократно сработване без необходимост от поддръжка; работа при променлива скорост на вятъра.
4. Синтезирана, изследвана и анализирана е динамична спирачка със следните преимущества спрямо конвенционалната електрическа спирачка с транзистор, а също така и спрямо механичните: липса на високочестотно излъчване (електромагнитни смущения) в сравнение с т.нар. “chopper brake”, използваща транзистори; понижаване на теглото на „гондолата”; опростено и надеждно схемно решение [Д. 8].
5. Изследвано времето за задействане на динамичната електрическа спирачка. Сравнени са времената за задействане при различни обороти (честота) на въртене [Д. 2].

ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТ И СИМУЛАЦИИ ЗА ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПОДОБРЕНИ СХЕМИ НА СИЛОВИ ЕЛЕКТРОННИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ

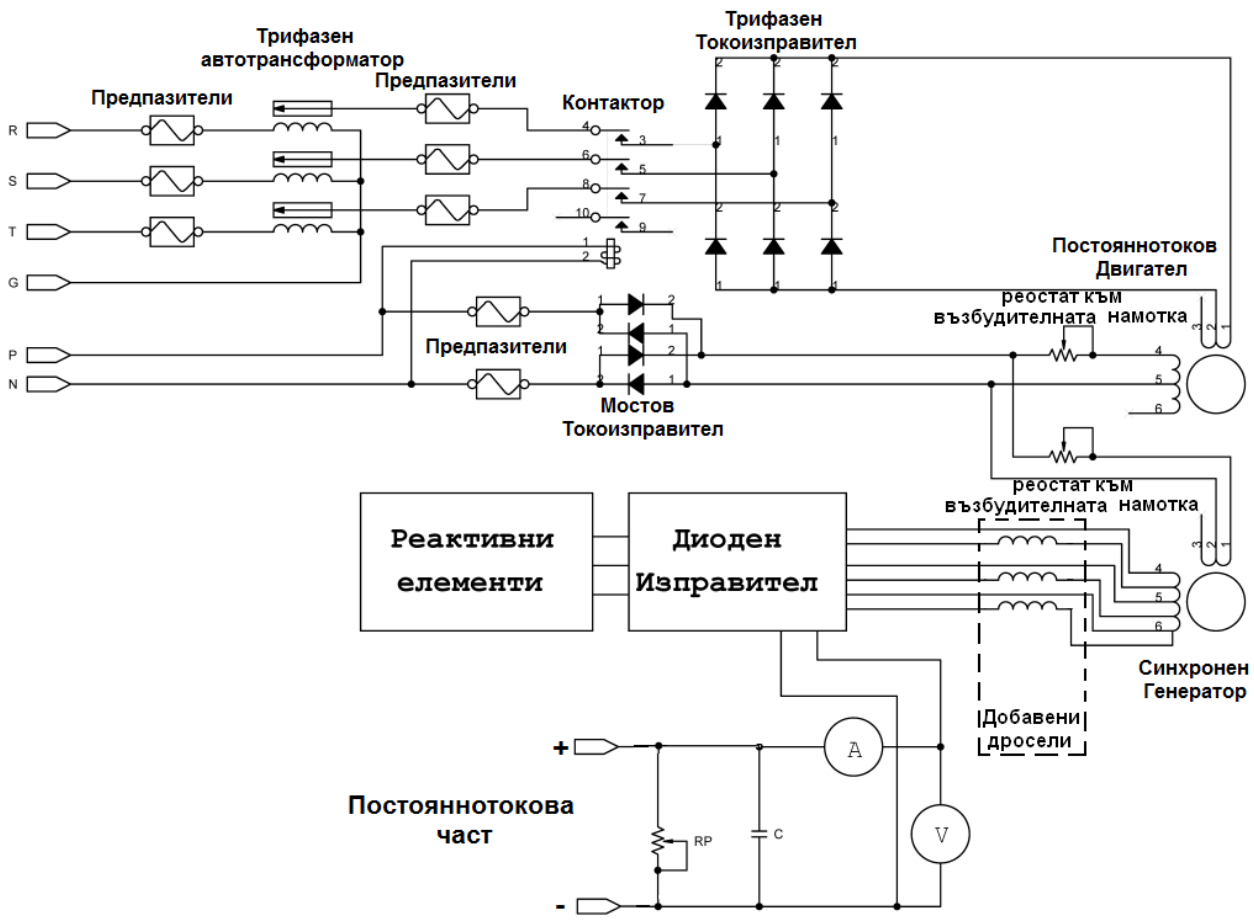
В тази глава от дисертационния труд се верифицират чрез експеримент получените резултати от компютърните симулации, разгледани във втора глава. Предложена е структурна схема на експеримент. Направен е сравнителен анализ на изходните данни от експеримента и симулациите.

Извършена е симулация на схемата на подобрен неуправляем токоизправител в комбинация с инвертор за отдаване на електрическа енергия в електропреносната мрежа. Приложено е проектиране на външните реактори чрез методиката „Fast Design Approach” на Вълчев-Босхе. Чрез компютърни симулации са изследвани основните параметри и характеристиките на динамичната спирачка. Също така е изследвано времето за задействане на динамичната електрическа спирачка при различни обороти на въртене.

4.1. Експериментална реализация на изследваната схема на неуправляем токоизправител за ветрогенератори и графични и таблични резултати.

За провеждане на експерименталната част от изследването е подходящо използването на куплирана двигател-генераторна група. Специфично изискване към генератора е да има възможност за промяна на топологията на намотките извън корпуса. Това прави възможно включването на намотките на машината в тип звезда или триъгълник чрез външно свързани проводници. На тези условия отговаря двигател-генераторна група на фирма „AEG”, която включва синхронен генератор с възбудителна намотка, куплиран с постояннотоков двигател със серийно възбуждане. Въпреки, че генератора не е с възбуждане от постоянни магнити и ефективността на тази електрическа машина е по-ниска, резултатите от експеримента ще предоставят достоверни резултати за работата на подобрения неуправляем токоизправител.

Симулацията на промяната на скоростта на вятъра се реализира посредством регулиране на постояннотоков двигател чрез трифазен автотрансформатор и трифазен мостов изправител. Възбудителните намотки и на двете електрически машини са захранени чрез еднофазен мостов токоизправител, като токът се ограничава с реостати. Количеството преобразувана енергия се оценява чрез уреди за измерване на ток и напрежение в постояннотоковата част.



Фиг. 4.1. Структурна схема на експерименталната реализация

За експеримента, на постояннотоковата част е свързан реостат, за да може да се регулира максималното напрежение U_{dcmax}. Тази стойност за изследвания ветрогенератор с мощност 100 kW е U_{dcmax}=1000 V, а за експерименталната установка ще бъде преизчислена в съответния мащаб. Това е начин да се симулира работата на следващия блок – инвертора, инжектиращ в мрежата (този блок не се разглежда в дисертацията). В практиката обратна връзка, контролираща работата на инвертора, следи за повишаване на входното напрежение на инвертора. Ако е налично повишение на U_{dcmax}, то той започва да консумира повече ток и съответно напрежението на постояннотоковата част намалява.

4.1.1. Проектиране на реактор по методиката Вълчев-Босхе

За да се изчислят основните параметри на външно добавените реактори използвам методиката за проектиране на магнитни компоненти (дросели и трансформатори) “Fast design approach” на Вълчев-Босхе. Изхождайки от предложените методики в книгата, за нискочестотни приложения най-подходящ е вторият подход, при който съществуват две ограничения: индукцията на насищане B_{sat} и максималната работна температура на магнитния материал (Saturated Thermally Limited Design).

Проектирането на реакторите за експеримента се базира на следните входни данни:

- Ефективна стойност на напрежението върху реактора – $U_{L4,rms}$=80 V;
- Ефективна стойност на тока през реактора – $I_{L4,rms}$=1,8 A;
- Максимална честота – f_{max}=60 Hz;
- Индукция на насищане – B_{sat}=1,3 T;
- Индуктивност на реактора – L4=295 mH.

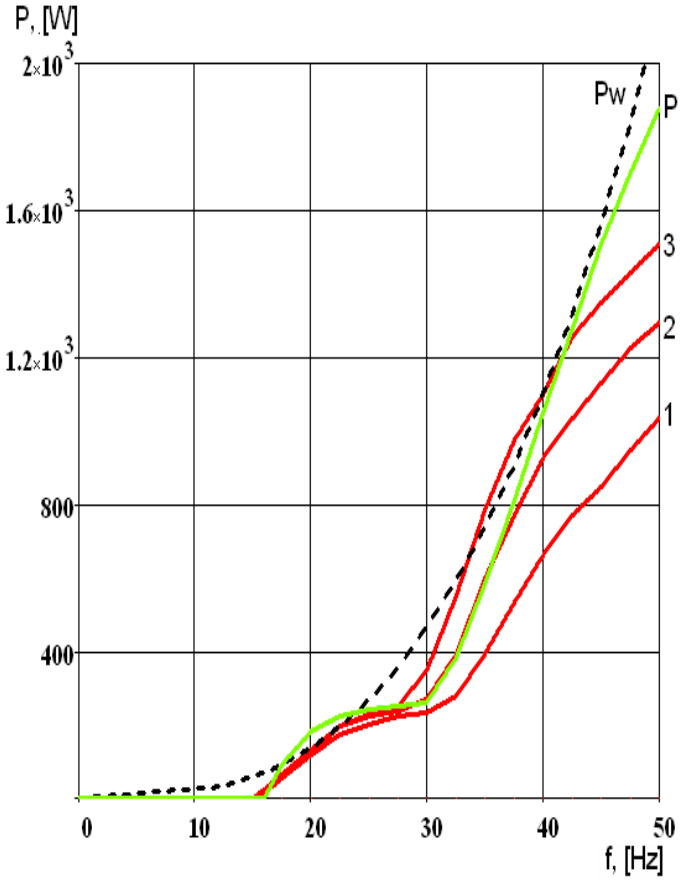
Уравненията от методиката са въведени в MathCad. Необходими са няколко итерации през всички стъпки от представения алгоритъм за достигане на подходящите параметри на реактора.

За да се извърши коректно сравнение са реализирани симулации с изчисленията в мащаб в среда Capture CIS.

Стойностите на компонентите, с които е реализирана кривата, са следните:

1) Индуктивност на генератора – L1, L2, L3, равни по 93.4 mH;
2) Външен реактор – L4, L5, L6, равни по 295 mH;
3) Коефициент на ЕДН – K_{emf} =6.28 V/Hz;
4) Постоянно напрежение – $V_{dc,pr}$ =157 V.

Моделът работи според очакванията и на Фиг. 4.2 е извършено графично сравнение между експеримента и компютърните симулации.



Фиг. 4.2 Сравнение между експеримент и компютърната симулация

Легенда на Фиг. 4.2:

Pw – идеална крива на мощността на вятъра

P – честотно/мощностна крива, постигната чрез компютърна симулация

1 – крива на мощността, постигната при 64,8 mH добавена индуктивност последователно на намотките на генератора

2 – крива на мощността, постигната при 28 mH добавена индуктивност последователно на намотките на генератора

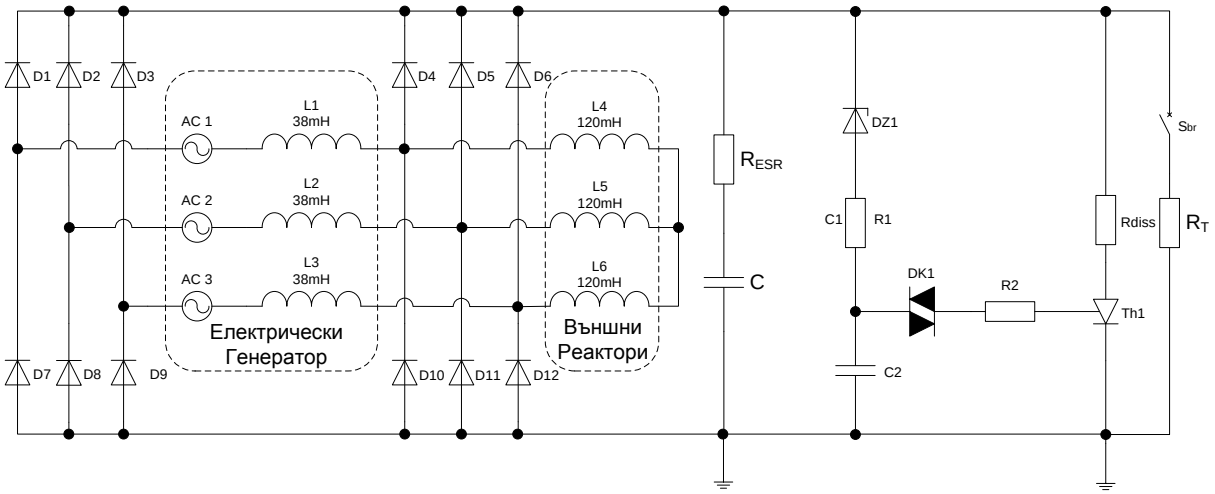
3 – крива на мощността, постигната при 12 mH добавена индуктивност последователно на намотките на генератора

4.2. Верификация на работата на подобрената схема на неуправляем токоизправител с инвертор за инжектиране в мрежата.

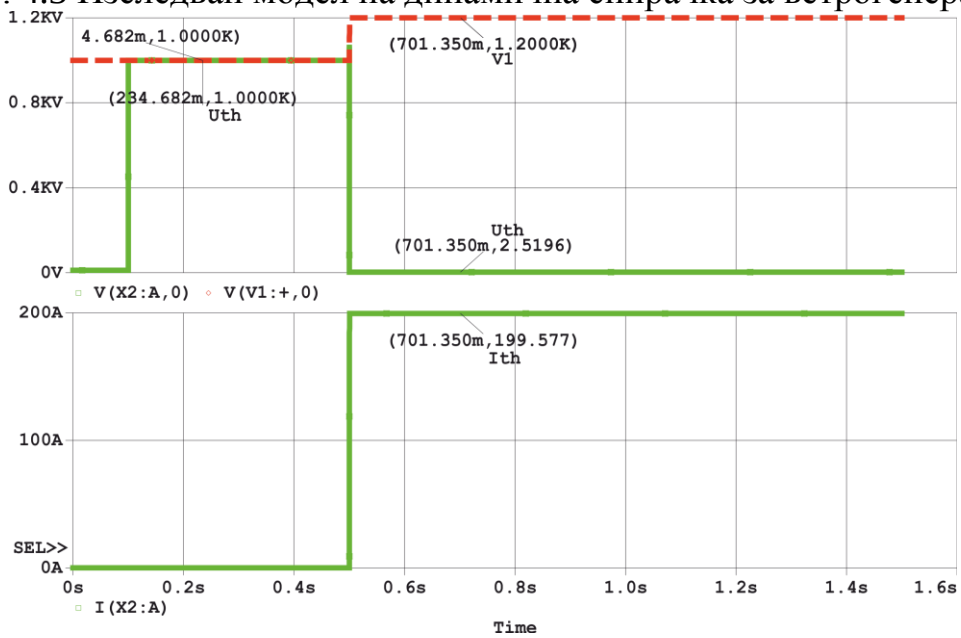
В процеса на верификация е създадена възможност за изследване на схемата на неуправляемия токоизправител в комбинация с инвертор за инжектиране в мрежата. Инверторът, част от друг дисертабилен проблем, е представен от две части: блокова схема на управляващата част и опростен модел на силовата част.

В пълният текст на дисертацията са представени резултатите от изследването блок схеми на работата на инверторът, както графики на основните параметри на комбинираната система от преобразуватели.

4.3. Верификация на съвместната работа на подобрената схема на неуправляем токоизправител и динамична спирачка за ветрогенератор.



Фиг. 4.3 Изследван модел на динамична спирачка за ветрогенератор



Фиг. 4.4 Ток и напрежение през тиристора на динамичната спирачка

Обобщения и изводи

1. Направеният експеримент верифицира получените резултати от изследванията и анализа на подобрената схема на токоизправител за ветрогенератори. Доказана е работоспособността на методиката за моделиране на честотно/мощностна крива чрез сравнителен анализ на получените резултати от експеримента и компютърна симулация.
2. Извършена е симулация на схемата на подобрен неуправляем токоизправител в комбинация с инвертор за отдаване на електрическа енергия в електропреносната мрежа. Приложени са графики при два режима на работа на ветрогенератора – ниски и високи обороти на въртене [Д. 3].
3. Приложено е проектиране на външните реактори чрез методиката „Fast Design Approach" на Вълчев-Босхе. Показан е алгоритъмът на методиката и реализираните стъпки за проектиране на реактор.
4. Симулирана е работата на еднозвенна и двузвенна динамична електрическа спирачка за ветрогенератор. Представени са графични резултати, визуализиращи задействането на всяко звено от схемата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представената дисертация са проучени, систематизирани и анализирани съвременните проблеми и тенденции на развитието на системите за преобразуване на енергия, използвани при ветрогенераторите. Основно внимание е отделено на подобрените схеми на неуправляеми токоизправители за ветрогенератори. Предложена е структурна схема на електрическата част на изследваните преобразуватели.

В съответствие с поставените в дисертацията задачи е разработена специализирана методика за определяне на стойностите на реактивните компоненти от изследваните схеми. В процеса на работа е осъществен и компютъризиран алгоритъм за прилагане на методиката в МАТЛАБ.

В дисертационния труд са анализирани и изследвани два вида електрически спирачки за ветрогенератор.

Експериментално са потвърдени получените резултати от симулациите на подобрените схеми на неуправляеми токоизправители от патент PCT/EP2010/055637.

Основната насока за бъдещата работа е свързана с реализирането на компютърна програма за оценка на годишното количество преобразувана енергия при използване на данните, получени от изследването на подобрените схеми на неуправляеми токоизправители. Това ще позволи прилагането на системата в програмни продукти за цялостен анализ на ветропаркове, например WindPro.

ПРИНОСИ

1. Проучени са състоянието и тенденциите за развитие на системите за генериране на електрическа енергия от вятъра. Разгледани и анализирани са силовите електронни преобразуватели, влияещи върху електрическото

натоварване на ветрогенераторите и са дефинирани основните изисквания към тях.

2. Предложена е структура на система за преобразуване на енергия от вятъра чрез ветрогенератори, включваща подобрена схема на неуправляем силов електронен преобразувател, защита от пренапрежение, включена към постояннотоковата част, и кондензаторна електрическа спирачка.

3. Получени са резултати от проведените изследвания, позволяващи определянето на моментната генерирана електрическа мощност на преобразувателя и влиянието на всеки от добавените реактивни компоненти върху моделираната честотно/мощностна крива. Представени са графични резултати за верификация на принципа на работа на изследваната подобрена схема на неуправляем токоизправител.

4. Разработена е методика за моделиране на честотно/мощностни характеристики при използване на подобрена схема на неуправляем токоизправител за ветрогенератор. Реализиран е оптимизационен процес чрез прилагане на метода на сканирането с променлива възвратна стъпка за определяне на оптималните стойности на реактивните компоненти.

5. Разработен е алгоритъм и компютърен скрипт за прилагане на методиката за получаване на стойностите на реактивните компоненти на изследваните схеми на неуправляем токоизправител за ветрогенератор със зададена мощност. Реализацията е в МАТЛАБ и предлага резултати на модел на честотно/мощностната крива с предварително зададена точност.

6. Разработени, анализирани и изследвани са динамична електрическа спирачка и капацитивна електрическа спирачка за ветрогенератори. Доказани са функционалните предимства на предложената електрическа спирачка чрез изследване на времето за задействане на динамичната спирачка.

7. Изследваните схемни решения са верифицирани чрез реализация, реални експерименти и сравнителен анализ. Доказвана е функционалността на изследваните схеми чрез доброто съвпадение на резултатите от компютърните симулации и тези от извършения експеримент. Работата на изследвания неуправляем токоизправител е верифицирана заедно с модел на инвертор в МАТЛАБ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

[Д. 1] Van den Bossche A., **P. Yankov**, A. Marinov, ‘Automated methodology for adjustment of component values in passive converter circuit for wind turbine generators’, EPE-PEMC, 4-6 September, 2012, Novi Sad, Serbia, ISBN: 978-1-4673-1971-3, DS2d.4-1÷DS2d.4-4.

[Д. 2] **Yankov P.**, A. Marinov, V. Valchev, ‘Investigation of electric brake actuation time for wind turbine’, Third International Scientific Congress 2012, 4-6 Октомври, 2012, Варна, България, ISBN 978-954-20-0552-0 Vol. 3, стр. 249-252.

[Д. 3] Маринов А., **П. Янков**, Д. Бозалъков, Virtual analysis of a power electronic converter with passive control for grid interface of a wind turbine, Siela, 28-30 Май, Бургас, България, 2012, ISSN 1314-6297, pp. 218-226.

[Д. 4] Вълчев В., **П. Янков**, Изследване на статична електрическа спирачка за ветрогенератор, Енергиен Форум 2013, 12÷15 Юни, Варна, 2013, стр 249-255.

[Д. 5] Van den Bossche A., **P. Yankov**, V. Valchev, 'Design of Passive Converter for Wind Driven Generators', "EPE-PEMC'11", Birmingham, UK, 30 August - 1 September, 2011, ISBN/ISSN: 978-1-61284-167-0, pp. 1-10.

[Д. 6] **Yankov P.**, E. Bekov, 'Medium and high power generators for wind turbines', 'Управление, автоматика и оклона среда', Севастопол, Украйна, 25-28 април, 2011, UDC 551.46. 08, pp. 272-276.

[Д. 7] **Янков П.**, А. Маринов, Е. Беков, А. Йорданов, Автоматизирана методика за получаване на стойностите на компонентите за пасивен преобразувател с подобрени характеристики за ветрогенератори", „ЕЛМА", 21-23 Октомври, Варна, България, 2011, ISSN 1313-4965, стр. 122-125

[Д. 8] **Yankov P.**, A. Van den Bossche, V. Valchev, Successive resistive braking circuit for permanent magnet wind turbine generators. "EPE-PEMC'2010", 6-8 September, Ohrid, Macedonia, 2010, ISBN 978-1-4244-7854-5, pp. T11-27 ÷ T11-31

[Д. 9] **Yankov P.**, Synthesis of Power/Frequency Curves for Wind Turbine – Single Phase. "Young in Science", Varna, Bulgaria, 2010, ISBN 978-954-20-0492-9, pp. 42-46

[Д. 10] **Yankov P.**, V. Valchev, "Power/Frequency Characteristics of Passive Controlled Wind Turbines with Additional Reactive Components in the Circuitry", "Electronics 2010 Conference", Sozopol, Bulgaria, 22-24 September, 2010, ISSN 1313-1842, pp. 176-179

[Д. 11] Valchev V., **P. Yankov**, Improvement on Passive Controlled Wind Turbines Schematics and Obtaining Power/Frequency Curves, "Electronics 2010 Conference", Sozopol, Bulgaria, 22-24 September, 2010, ISSN 1313-1842, pp. 180 – 183

[Д. 12] **Янков П.**, Трифазна схема с подобрени параметри за управление на преобразуваната енергия от вятърна турбина. „E+E", София, България, 2010, ISSN 0861-4717, стр. 38-45.

[Д. 13] Valchev V., **P. Yankov**, A. Marinov, "PMSM/BLDC as generators in renewable energy conversion systems' – Annual Journal of Electronics 2009, Sozopol, Bulgaria, 2009, ISSN 1313-1842, pp. 139-140.

[Д. 14] Вълчев В., **П. Янков**, А. Маринов, „Сравнение на системи за управление вятърна турбина с активен или пасивен изправител", Годишник на ТУ – Варна 2009, Том I, Варна, България, 2009, ISSN 1311-896X, стр. 108-112.

ABSTRACT

PhD Thesis Title: Investigation of power electronic converters for wind turbines

Of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy

By: Plamen Valentinov Yankov

The dissertation examines and analyzes improved circuits of power electronic converters for wind turbines. The analysis in Chapter 1 shows the trends in the development of wind energy, namely, increased efficiency and longer periods between regular maintenance. This determines the study of improved schemes of power electronic converters used in conjunction with the most modern electrical machines - synchronous generators with permanent magnets. In the next Chapter 2 a basic scheme of an improved three-phase uncontrolled rectifier for wind turbine is examined. The principle of operation is analyzed, as well as novel approach in this type of circuitry. Another development is a methodology for modeling the frequency / power curve based on the change in values of the reactive components. A computerized approach of the methodology is suggested. This type of implementation significantly reduces the modeling time. Study performed in Chapter 2 is applicable to all circuit solutions of improved uncontrollable rectifier described in patent PCT/EP2010/055637. In Chapter 3 are designed, tested and analyzed electric brakes for the improved schemes of uncontrolled rectifier. The chapter presents two schemes: capacitive (static) electric brake and the dynamic brake. The actuation time of the dynamic brake is also examined. The final Chapter 4 confirms the research results. Verification of the results is carried out in two ways as an experimental set up and through joint simulation of improved schemes with uncontrollable rectifier along with an inverter circuit injecting into the grid.

РЕЗЮМЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Для присуждения образовательной и научной степени „доктор“

Тема: ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ СХЕМЫ СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ВЕТРОВЫХ ТУРБИН

Аспирант: инж. Пламен Валентинов Янков

В диссертации рассмотрены и проанализированы улучшенные схемы силовых электронных преобразователей для ветровых турбин. Анализ, проведенный в главе 1 показаны тенденции в развитии ветроэнергетики, а именно, повышение эффективности и более длительные периоды между регулярного технического обслуживания. Это исследование определяет улучшенные схемы силовых электронных преобразователей, используемых в сочетании с самыми современными электрическими машинами – синхронных генераторов с постоянными магнитами. В главе 2 был проанализированы принцип работы основные схемы улучшения выпрямитель для ветровых турбин. Создан метод моделирования кривой частоты / мощности на основе изменения стоимости реактивных компонентов. Реализован компьютерный подход к реализации, что значительно сокращает время моделирования. Исследование, проведенное в главе 2 применимы ко всем схемотехнических решений улучшили неконтролируемой выпрямителя описано в патенте PCT/EP2010/055637. В главе 3 разработаны, протестированы и проанализированы электрические тормоза для улучшения схемам неконтролируемого выпрямителя. Подарки двум схемам: емкостный электрический тормоз и динамический тормоз. Исследование самое время активировать динамическое торможение. В заключительной главе 4 будет сделано подтверждение результатов исследований. Проверка результатов проводится через эксперимента и посредством совместного моделирования на улучшенные схемы на неконтролируемым выпрямитель с инвертор для инжекций в сетку.